

SKRIPSI

**ANALISIS MAMPU KERAS DAN STRUKTUR MIKRO MATERIAL REL
KERETA API TIPE R350HT**

Disusun dan diajukan oleh:

NADYA INDRIANI SAZQIA

D021181328



PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2023

SKRIPSI

**ANALISIS MAMPU KERAS DAN STRUKTUR MIKRO MATERIAL REL
KERETA API TIPE R350HT**

Disusun dan diajukan oleh:

NADYA INDRIANI SAZQIA

D021181328

PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2023

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI**ANALISIS MAMPU KERAS DAN STRUKTUR MIKRO MATERIAL REL
KERETA API TIPE R350HT**

Disusun dan diajukan oleh

Nadya Indriani Sazqia
D021 18 1328

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing utama,



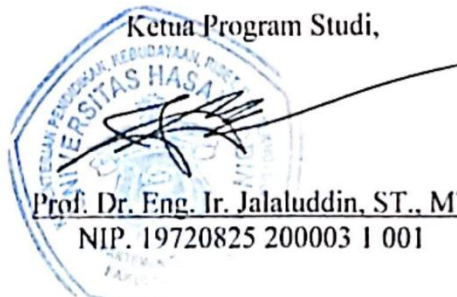
Dr. Eng. Lukmanul Hakim Arma ST., MT
NIP. 19740415 199903 1 001

Pembimbing pendamping,



Dr. Hairul Arsyad ST., MT
NIP. 19750322 200212 1 001

Ketua Program Studi,



Prof. Dr. Eng. Ir. Jalaluddin, ST., MT
NIP. 19720825 200003 1 001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : Nadya Indriani Sazqia

NIM : D021 18 1328

Program Studi : Teknik Mesin

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

ANALISIS MAMPU KERAS DAN STRUKTUR MIKRO MATERIAL REL KERETA API TIPE R350HT

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 1 November 2023

Yang Menyatakan



Nadya Indriani Sazqia

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan yang Maha Pengasih atas segala limpahan rahmat serta hidayah-Nya sehingga penulis dapat melaksanakan dan menyelesaikan Skripsi ini dengan baik. Shalawat serta salam tidak lupa kami haturkan kepada baginda Nabi Muhammad Sallallahu Alaihi Wasallam. Nabi sang Revolusioner islam pembawa panji-panji kebenaran, pembawa cahaya ilmu pengetahuan yang terus berkembang hingga kita merasakan nikmatnya hidup zaman ini.

Penulisan skripsi ini, penulis tentu tak lepas dari pengarahan dan bimbingan dari berbagai pihak dan tidak lepas dari hambatan. Namun, semua itu merupakan proses yang harus dilalui, menjadikan penulis sebagai bentuk pelajaran dan pengalaman selama melaksanakan penelitian ini. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua tercinta Ayah H. Abu Djaropi dan ibu tercinta Wahyu Indriawati dan juga kepada saudara saya yang baik telah membantu, memberi nasehat, motivasi dan semangat untuk penulis dalam menyelesaikan skripsi ini
2. Bapak Dr. Eng. Lukmanul Hakim Arma, ST., MT selaku dosen pembimbing utama yang telah memberikan arahan, bimbingan kepada penulis sehingga penyusunan skripsi ini dapat diselesaikan.
3. Bapak Dr. Hairul Arsyad, ST., MT selaku dosen pembimbing kedua saya yang telah membantu dan memberikan arahan kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
4. Bapak Prof. Dr. Eng. Jalaluddin ST., MT, Selaku Ketua Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
5. Bapak dan Ibu dosen serta Staf Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
6. Sahabat terkasih Ihwal Ramadhan, Erina Dwi Ramadhani, Nurkhafidzah, Sitti Lainun, Novita Anggraeni dan Dea Asrini Mas'ud
7. Sahabat tersayang Zahwa, Manika, Rahma, Iffat, Novita, Indri, Masitha,

Olif, Puthe dan Amirah

8. Seluruh teman-teman asisten Lab Metalurgi Fisik Gabriel Yuranta, Muh. Irvin Alif, Afifi Agung, Fatawy, Samhi, Rifki Adira, Fahrul, Brilliant, Rijal, Arif, Ai dan Ramadhan yang setia membantu dalam proses pengambilan data.
9. Seluruh penghuni Lab Metalurgi Fisik S2 dan Angkatan 19 yang selalu mendukung dan menghibur.
10. Sahabat REACTOR18, sebagai teman seperjuangan mulai dari mahasiswa baru sampai sekarang.

Demikian, penulis ucapkan terima kasih dan semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat kepada pembaca maupun bagi penulis

Gowa, 2023

Penulis

ABSTRAK

NADYA INDRIANI SAZQIA. *Analisis Mampu Keras dan Struktur Mikro Material Rel Kereta Api Tipe R350HT* (dibimbing oleh Dr. Eng. Lukmanul Hakim Arma, ST., MT., dan Dr. Hairul Arsyad, ST., MT)

Pengujian mampu keras merupakan metode pengujian yang bertujuan untuk mengetahui kemampuan suatu material untuk mengeras sampai kedalaman tertentu dengan cara perlakuan panas hingga terbentuk struktur martensit. Terdapat dua metode pengujian mampu keras yaitu Jominy end quench dan metode Grossmanm. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui nilai mampu keras material Rel Kereta R350HT dan AISI 1020 sebagai pembandingnya. Pengujian ini meliputi perlakuan panas, pengujian Jominy, pengujian kekerasan dan pengamatan struktur mikro. Pengujian menggunakan spesimen berbentuk batang silinder dengan ukuran diameter 25mm dan panjang 100mm yang dipanaskan hingga suhu austenisasi. Spesimen kemudian didinginkan secara cepat dengan cara disemprotkan air pada salah satu ujung spesimen agar terbentuk struktur martensit. Dari penelitian yang telah dilakukan kekerasan paling tinggi ada pada bagian ujung material yang terkena air pada saat pengujian Jominy, lalu mengalami penurunan kekerasan ke bagian yang tidak terkena air. Dapat dilihat pada pengujian struktur mikro material rel kereta api R350HT terbentuk struktur martensit, dan pada material AISI 1020 terbentuk pearlite dan ferrite.

Kata Kunci: Pengujian mampu keras, perlakuan panas, pengujian kekerasan, pengujian struktur mikro, R350HT

ABSTRACT

NADYA INDRIANI SAZQIA. *Analisis Mampu Keras dan Struktur Mikro Material Rel Kereta Api Tipe R350HT* (supervised by Dr. Eng. Lukmanul Hakim Arma, ST., MT., dan Dr. Hairul Arsyad, ST., MT)

Hardenability Test is a method aimed to determining the ability of a material to harden to a certain depth through heat treatment, resulting in the formation of a martensitic structure. There are two hardenability test methods: Jominy end quench and Grossman method. This research aims to determine the hardness values of the R350HT Railway Material and AISI 1020 as a comparison. The testing includes heat treatment, Jominy testing, hardness test, and micro structure examination. Testing was conducted on cylindrical specimens with a diameter of 25mm and a length of 100mm, which were heated to austenitizing temperature. The specimens were then rapidly cooled by spraying water on one end to form a martensitic structure. The research results show that the highest hardness is found at the end of the material that was in contact with water during the Jominy testing, followed by a decrease in hardness towards the portion that was not in contact with water. Microstructure testing reveals that the railway material R350HT has a martensitic structure, while AISI 1020 exhibits pearlite and ferrite structures

Key words: Hardenability test, heat treatment, hardness test, microstructure examination, R350HT.

DAFTAR ISI

SAMPUL	i
LEMBAR PENGESAHAN SKRIPS	iii
PERNYATAAN KEASLIAN.....	iv
KATA PENGANTAR.....	v
ABSTRAK.....	vii
DAFTARI ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Baja.....	5
2.2 Sifat Logam	6
2.3 Baja R350HT.....	8
2.4 Baja AISI 1020	9
2.5 Heat Treatment	10
2.6 Diagram Fasa Fe-Fe ₃ C	13
2.7 Diagram TTT	16
2.8 Hardenability	17
2.9 Uji Kekerasan	20

2.10 Uji Struktur Mikro	22
2.11 Uji SEM	23
BAB III METODE PENELITIAN	24
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	24
3.2 Alat dan Bahan	24
3.2.1 Alat Yang Digunakan	24
3.3 Metode Pengambilan Data	29
3.4 Prosedur Pelaksanaan Penelitian	29
3.4.1 Tahapan Penelitian	29
3.5 Pelaksanaan Pengujian	30
3.5.1 <i>Heat Treatment</i>	30
3.5.2. Pengujian Jominy Test	31
3.5.3. Pengukuran Temperatur Menggunakan Laser Infrared Thermometer	31
3.5.4. Pengujian Kekerasan	32
3.5.5. Pengujian Struktur Mikro	32
3.6 Diagram Alir Penelitian	34
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	35
4.1 Karakterisasi Material AISI 1020 dan R350HT	36
4.1.1 Spesifikasi Material	36
4.1.2 Nilai Kekerasan Awal & Struktur Mikro Sebelum Perlakuan	36
4.2 Data Hasil Pengujian Jominy	39
4.3 Pengujian Hardenability	45
4.4 Diagram Fasa dan Diagram TTT	53
4.5 Pengujian Struktur Mikro AISI 1020 dan R350 HT	55
BAB V PENUTUP	61
5.1 Kesimpulan	61
5.2 Saran	61

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Baja R350HT.....	8
Gambar 2 Penamaan Baja R350HT	9
Gambar 3 Baja AISI 1020	10
Gambar 4 Diagram Fasa Fe ₃ C	14
Gambar 5 Diagram TTT Hypoeutectoid	16
Gambar 6 Diagram TTT Eutectoid	17
Gambar 7 Ilustrasi Pengujian Jominy Test.....	18
Gambar 8 Standar Pengujian Jominy Test ASTM A225.....	19
Gambar 9 Grafik distribusi kekerasan hasil Jominy Test.....	19
Gambar 10 kurva Hardenability untuk beberapa baja.....	20
Gambar 11 Alat Uji Kekerasan	22
Gambar 12 Mikroskop Optik Logam (Lab. Metalurgi Fisik UNHAS)	22
Gambar 13 Alat Uji SEM.....	23
Gambar 14 Furnace	24
Gambar 15 Sarung Tangan.....	24
Gambar 16 Alat Uji Jominy	25
Gambar 17 Alat Uji Kekerasan	25
Gambar 18 Microscope optik untuk logam (Lab. Metalurgi Fisik UNHAS)	26
Gambar 19 Alat Scanning Electron Microscope (Fakultas Teknik Sipil UMI)	26
Gambar 20 Laser Infrared Thermometer	27
Gambar 21 Stopwatch	27
Gambar 22 Baja R350HT.....	27
Gambar 23 Baja AISI 1020	28
Gambar 24 Kertas Amplas	28
Gambar 25 Air.....	28
Gambar 26 Larutan Etsa	29
Gambar 27 Gambar Spesimen Uji	30
Gambar 28 Gambar ASTM	30
Gambar 29 Pendinginan dengan Metode Jominy End Quench	35
Gambar 30 Nilai Kekerasan R350HT	37

Gambar 31 Nilai Kekerasan RS R350HT	37
Gambar 32 Gambar Titik Kekerasan R350HT	37
Gambar 33 Foto Mikro AISI 1020	38
Gambar 34 Foto Mikro R350HT	38
Gambar 35 Gambar titik pengambilan temperatur.....	39
Gambar 36 Grafik Laju Pendinginan AISI 1020 750°C bagian ujung	41
Gambar 37 Grafik Laju Pendinginan AISI 1020 750°C bagian tengah	42
Gambar 38 Grafik Laju Pendinginan AISI 1020 900°C bagian ujung	42
Gambar 39 Grafik Laju Pendinginan AISI 1020 900°C bagian tengah	43
Gambar 40 Grafik Laju Pendinginan R350HT 750°C bagian ujung	44
Gambar 41 Grafik Laju Pendinginan R350HT 750°C bagian tengah.....	45
Gambar 42 Gambar Titik Pengambilan Kekerasan.....	45
Gambar 43 Grafik Kekerasan AISI 1020 Temperatur 750°C dan 900°C	50
Gambar 44 Grafik Kekerasan R350HT Temperatur 750°C	51
Gambar 45 Diagram Perbandingan Kekerasan	52
Gambar 46 Diagram Fasa Pengujian.....	53
Gambar 47 Diagram TTT Hypoeutectoid	53
Gambar 48 Diagram TTT Eutectoid	54
Gambar 49 Struktur Mikro AISI 1020 750°C	55
Gambar 50 Struktur Mikro AISI 1020 900°C	56
Gambar 51 Struktur Mikro R350HT 750°C.....	57
Gambar 52 Pengujian SEM Material R350HT perbesaran x1000	58
Gambar 53 Pengujian SEM Material R350HT perbesaran 3000	59
Gambar 54 Pengujian SEM Material R350HT perbesaran 5000	60

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Komposisi Baja R350HT	8
Tabel 2 Komposisi Baja AISI 1020	9
Tabel 3 Komposisi AISI 1020	36
Tabel 4 Komposisi Baja R350HT	36
Tabel 5 Nilai Kekerasan AISI 1020	38
Tabel 6 Temperatur Pendinginan AISI 1020 750°C	39
Tabel 7 Temperatur Pendinginan AISI 1020 900°C	40
Tabel 8 Temperatur Pendinginan R350HT 750°C	40
Tabel 9 Kekerasan pada baja AISI 1020 dengan variasi temperature 750°C	46
Tabel 10 Kekerasan pada baja AISI 1020 dengan variasi temperature 900°C	47
Tabel 11 Kekerasan pada baja R350HT dengan temperature 750°C	48

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Peningkatan jumlah penduduk yang sangat pesat menyebabkan berbagai kebutuhan ikut meningkat, termasuk kebutuhan akan transportasi. Dari banyaknya jenis transportasi, kereta api merupakan transportasi yang paling diminati oleh masyarakat dikarenakan kapasitas untuk menampung penumpang dan barang yang besar, ekonomis, dan relatif aman (Zulkabir, 2018). Di Indonesia, kereta api pertama kali didirikan pada masa kolonial Belanda dengan tujuan awal untuk memangkas biaya transportasi pengangkutan hasil bumi. Namun seiring dengan perkembangannya kereta api tidak hanya berfungsi sebagai moda angkutan hasil bumi, akan tetapi juga sebagai moda transportasi masyarakat (Ravico dkk, 2021).

Rel merupakan ciri khas bagi transportasi kereta api, karena kereta api hanya dapat berjalan di atas rel. Rel inilah yang menjadi tumpuan bagi pergerakan roda kereta api dan memandu kereta api bergerak dari satu tempat ke tempat yang lain. Rel berfungsi untuk menerima beban dari roda dan mendistribusikan beban ke bantalan, mendistribusikan gaya percepatan dan pengereman, penghantar arus listrik untuk lintas kereta listrik dan untuk persinyalan (Hafizal, 2021). Adanya tuntutan akan peningkatan ukuran dan kecepatan kereta untuk kebutuhan massal ini mengakibatkan dibutuhkannya pendekatan pada bidang manufaktur dan metalurgi logam dengan tujuan untuk mengimbangi keausan dan jenis kegagalan lainnya yang memperpendek umur rel (Karol Dopierala, 2017).

Material yang umum digunakan dalam pembuatan rel kereta api penyeberangan adalah baja, dengan karbon sebagai unsur utama yang dominan termasuk baja austenitik (baja mangan yang dikeraskan secara eksplosif Mn13), baja bainitik (B360) dan baja rel perlit (R350HT). Masing-masing bahan memiliki keunggulan yang berbeda dalam hal ketahanan terhadap berbagai jenis kerusakan yang dapat terjadi (Skrypnyk, Rostyslav, dkk, 2019).

Tiap logam memiliki sifat mekanis, sifat fisis dan struktur yang berbeda-beda. Untuk mendapatkan sifat mekanis dan struktur mikro yang diinginkan pada logam, dapat diberikan perlakuan panas. *Heat Treatment* atau perlakuan panas merupakan proses memanaskan logam pada suhu tertentu dan didinginkan menggunakan media pendingin dengan tujuan untuk merubah sifat mekanis maupun struktur dari logam tersebut. Dalam proses heat treatment terdapat berbagai macam metode yaitu *quenching*, *normalizing*, *annealing*, *tempering* dan *hardening*. Media pendingin yang banyak digunakan pada proses heat treatment adalah air, air garam, oli, solar, udara dan masih banyak lagi (Ahmad Roshid, 2020).

Untuk memperoleh kekerasan yang maksimal maka logam yang diberikan perlakuan panas harus diberikan pendinginan secara cepat, *quenching* (Danel Saputro, dkk, 2019). Kekerasan yang dapat dicapai tergantung pada kadar karbon dalam baja dan kekerasan yang terjadi akan tergantung pada temperatur pemanasan (temperatur autenitis), *holding time* dan laju pendinginan yang dilakukan serta seberapa tebal bagian penampang yang menjadi keras tergantung pada *hardenability*. *Hardenability* adalah kemampuan suatu material untuk mengeras hingga kedalaman tertentu.

Ada dua metode yang dapat dilakukan untuk menentukan tingkat *hardenability* baja, yaitu dengan metode Grossman dan metode Jominy *end quench*. *Hardenability* atau mampu keras merujuk kepada sifat baja yang menentukan dalamnya pengerasan sebagai akibat proses quench dari temperatur austemisasinya. Dua variabel penting yang sangat mempengaruhi tingkat *hardenability* adalah ukuran butir (*grain size*) dan komposisinya (kadar karbon dan unsur paduan). Meningkatnya ukuran butir austenit akan mengakibatkan *hardenability* ikut meningkat, hal ini dikarenakan luas batas butir menurun. Ini berarti wadah pembentukan ferit dan perlit berkurang jumlahnya, dengan hasil bahwa transformasi ini diperlambat, dan oleh karena itu *hardenability* meningkat. Pengujian Mikro bertujuan untuk memperoleh gambar yang menunjukkan struktur mikro sebuah material. Pengujian mikro dimaksudkan untuk melihat perubahan struktur pada material.

Dari uraian di atas penulis sangat tertarik untuk meneliti dengan judul:
**“ANALISIS MAMPU KERAS DAN STRUKTUR MIKRO MATERIAL
 REL KERETA API TIPE R350HT”**

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian dari latar belakang di atas, maka dapat dirumuskan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh temperatur 750°C dan 900°C terhadap kekerasan baja AISI 1020 dan R350HT dengan pengujian Jominy Test.
2. Bagaimana perbedaan tingkat *hardenability* spesimen Baja AISI 1020 dan Baja R350HT yang diberikan perlakuan.
3. Bagaimana perbandingan struktur mikro Baja AISI 1020 dan R350HT

1.3 Tujuan

Adapun tujuan penelitian ini adalah:

1. Menganalisis pengaruh temperatur 750°C dan 900°C terhadap kekerasan baja AISI 1020 dan R350HT dengan pengujian Jominy Test.
2. Menganalisis *hardenability* baja R350HT dan membandingkan dengan baja AISI 1020 dari hasil Jominy test.
3. Menganalisis struktur mikro baja R350HT dan baja AISI 1020.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Material yang digunakan adalah baja R350HT dan Baja AISI 1020.
2. Proses *Heat Treatment* dengan suhu heating 750°C dan 900°C, *holding time* 60 menit.
3. Karakterisasi sifat mekanik meliputi uji kekerasan dan struktur mikro.
4. Pengujian kemampukerasan dengan metode *Jominy Test*.
5. Karakterisasi metalografi dengan Mikroskop optik LEXT OLYMPUS-OLS4100

1.5 Manfaat

1. Menambah wawasan dan pengetahuan bagi pembaca tentang pengaruh proses *Heat Treatment* terhadap sifat mekanis dan Struktur Mikro pada baja R350HT.
2. Menjadi sumber referensi mengenai baja R350HT untuk penelitian lebih lanjut.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Baja

Baja adalah logam yang dipadukan dengan besi sebagai unsur dasarnya dan memiliki karbon sebagai unsur paduan utamanya. Kandungan karbon yang terkandung dalam baja berkisar antara 0,2% hingga 2,1% sesuai dengan tingkatannya. Fungsi dari karbon dalam baja adalah sebagai unsur penguat. Ada beberapa unsur paduan lain yang biasa ditambahkan pada baja selain karbon, contohnya adalah mangan (manganese), krom (chromium), vanadium, dan tungsten (Tarkono dkk., 2012). Baja secara umum dapat dikelompokkan atas 2 jenis, yaitu Baja karbon dan Baja paduan.

1. Baja karbon terdiri dari baja karbon rendah, baja karbon sedang dan baja karbon tinggi (Ilham Ansharil, 2017). Baja karbon terdiri atas :

- a. Baja karbon rendah (*low carbon steel*)

Baja karbon rendah adalah salah satu jenis baja karbon, di mana presentase unsur karbonnya di bawah 0,25%. Penggunaan baja karbon rendah sangat luas meskipun terbatas pada konstruksi yang tidak membutuhkan tegangan tarik dan kekerasan relatif tinggi. Untuk memperluas penggunaan baja karbon rendah, diperlukan peningkatan sifat mekaniknya terutama dari segi kekuatan.

- b. Baja karbon sedang (*medium carbon steel*)

Baja karbon sedang memiliki kandungan karbon 0,4%-0,6%. Baja karbon sedang digunakan untuk membuat benda kerja tempa berat, poros, dan rel baja.

- c. Baja karbon tinggi (*high carbon steel*)

Baja karbon tinggi merupakan komposisi campuran besi dan karbon, dengan kadar karbon 0,7%-1,5 %. Baja karbon tinggi digunakan dalam pembuatan kikir, pahat, gergaji, dan alat mesin bubut. (Suwardi dan Daryanto, 2018).

2. Baja Paduan (*Alloy steel*)

Baja paduan adalah baja yang diberikan penambahan unsur dengan tujuan untuk menaikkan sifat mekanik baja (kekerasan, kekuatan tarik dan sebagainya) (Ilham Ansharil, 2017).

2.2 Sifat Logam

Setiap logam memiliki sifat mekanis, sifat fisis dan struktur yang berbeda-beda (Danel Saputro, dkk, 2019). Berikut adalah penjelasan sifat mekanis dan sifat fisis yang terdapat pada logam:

1. Sifat Mekanis

Sifat mekanis adalah kemampuan bahan untuk menerima pembebanan atau untuk menahan beban yang diterimanya baik beban statis maupun beban dinamis (Surdia T., 2000). Sifat mekanis terdiri dari aspek-aspek berikut:

a. Kekerasan (*Hardness*)

Kekerasan dapat didefinisikan sebagai kemampuan bahan untuk bertahan terhadap goresan, pengikisan, dan penetrasi. Sifat ini berkaitan erat dengan sifat keausan (*wear resistance*). Dimana kekerasan ini juga mempunyai hubungan dengan kekuatan. (Vicky Bhaskara, 2018). Pada *heat treatment*, kecepatan laju pendinginan sangat mempengaruhi kekerasan. Semakin cepat laju pendinginan maka tingkat kekerasan akan semakin tinggi. (Djapri, 1986)

b. Kekuatan (*Strength*)

Kekuatan dapat didefinisikan sebagai kemampuan suatu bahan untuk menerima tegangan tanpa menyebabkan bahan tersebut patah. Kekuatan ini ada beberapa macam, dan tergantung pada beban yang bekerja seperti kekuatan tarik, kekuatan tekan, kekuatan puntir, dan kekuatan bengkok (Vicky Bhaskara, 2018).

c. Kelelahan (*fatigue*)

Kelelahan adalah kecenderungan dari logam untuk patah apabila menerima tegangan yang berulang-ulang (*cyclic stress*) yang besarnya masih jauh dibawah batas kekuatan

elastisitasnya. Sebagian besar dari kerusakan yang terjadi pada komponen mesin disebabkan oleh kelelahan.

d. Ketangguhan (*toughness*)

Ketangguhan adalah kemampuan suatu bahan untuk menyerap sejumlah energi tanpa terjadinya kerusakan. Ketangguhan dapat dikatakan sebagai ukuran banyaknya energi yang diperlukan untuk membuat benda kerja patah pada suatu kondisi tertentu.

e. Kekakuan (*stiffness*)

Kekakuan menyatakan kemampuan bahan untuk menerima tegangan atau beban tanpa mengakibatkan terjadinya deformasi atau defleksi.

f. Keausan

Keausan adalah friksi atau gesekan yang diakibatkan pergerakan relatif dengan tekanan pada bidang kontak. Setelah terjadi gesekan berlanjut menjadi abrasi yang akan merusak ketelitian komponen dan berkembang menjadi lebih parah sampai komponen mesin kehilangan fungsinya (Surdia T., 2000).

g. Mulur

Mulur terjadi apabila diberikan suatu tegangan melampaui batas elastis, maka perpanjangan permanen terjadi pada batang uji tersebut. Perpanjangan tersebut dinamakan deformasi plastis dan tegangan terendah dimana deformasi plastis terjadi disebut mulur (Surdia T., 2000)

2. Sifat Fisis

Sifat fisis adalah sifat yang terjadi karena mengalami peristiwa fisika, seperti adanya pengaruh panas dan listrik. Sifat karena pengaruh panas antara lain mencair, perubahan ukuran dan struktur mikro karena proses pemanasan, untuk melihat perubahan struktur mikro melalui proses uji struktur mikro dengan alat foto mikroskop. (Djapri, 1986).

2.3 Baja R350HT

Tabel 1 Komposisi Baja R350HT

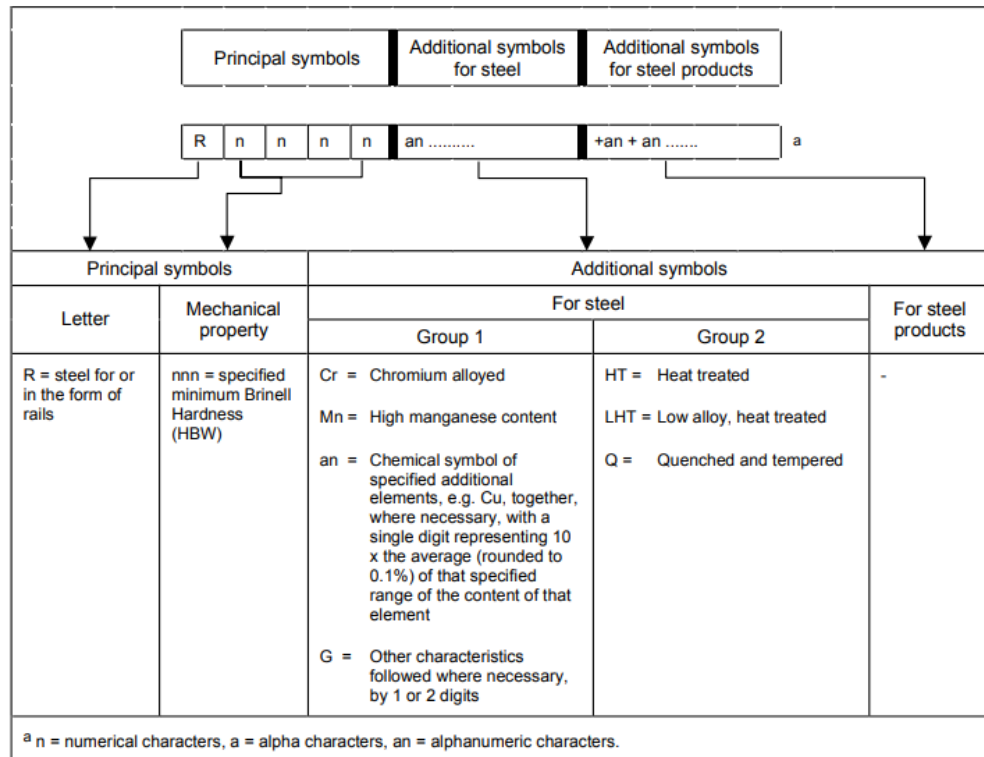
	C%	Mn%	P%	S%	Si%	Ni%	Cr%	Al%	V%
R350HT	0,70-0,82	0,65-1,25	0,025	0,030	0,13-0,60	0,10	0,15	0,004	0,030



Gambar 1 Baja R350HT

Baja R350HT merupakan baja perlit yang digunakan sebagai bahan dasar rel kereta api. Baja R350HT memiliki kadar kandungan karbon sebesar 0.70-0.82%. Kandungan lain yang terdapat pada baja R350HT dapat dilihat pada tabel berikut:

Pada sistem penamaan Baja R350HT, R menunjukkan bahwa baja tersebut dalam bentuk rel, angka 350 menunjukkan *specified* minimum kekerasan Brinell, sedangkan HT menunjukkan bahwa baja tersebut diberikan perlakuan panas.



Gambar 2 Penamaan Baja R350HT

2.4 Baja AISI 1020

Baja AISI 1020 merupakan baja karbon rendah dengan unsur karbon (1,40-1,70)% Ni, (0,90- 1,40)% Cr, dan (0,20-0,30)% Mo. Baja AISI 1020 yang secara luas mudah tersedia sebagai gear, billet bar, batang forging, lembaran, tabung, dan kawat las.

Tabel 2 Komposisi Baja AISI 1020

	Fe%	C%	Si%	Mn%	Mo%	P%	Cr%
AISI 1020	98,1	0,119	0,265	0,657	0,0096	0,0243	0,153



Gambar 3 Baja AISI 1020

Pengaplikasian yang umum dari baja AISI 1020 adalah baut, skrup, roda gigi, batang piston untuk mesin, roda pendaratan, dan komponen landing gear pesawat terbang. Baja AISI 1020 dengan kadar bajanya paduannya memungkinkan baja ini untuk dikeraskan dengan perlakuan panas. Salah satu perlakuan panas yang bisa digunakan pada baja ini yaitu proses hardening, dengan proses hardening baja AISI 1020 dapat mengalami perubahan sifat mekanik dengan variasi suhu austenisasi pada baja AISI 1020 yang di quenching dengan oli (Nasution & Nasution, 2020).

2.5 Heat Treatment

Heat Treatment atau perlakuan panas merupakan proses memanaskan spesimen di dalam tungku pada temperatur yang telah ditentukan selama periode waktu tertentu. Spesimen yang telah dipanaskan tersebut kemudian didinginkan menggunakan media pendingin seperti udara, air, oli dan solar. Masing-masing media pendingin mempunyai kerapatan pendinginan yang berbeda-beda (Suwardi dan Daryanto, 2018).

Perlakuan panas adalah proses kombinasi antara proses pemanasan atau proses pendinginan dari suatu logam atau paduannya dalam keadaan padat yang bertujuan untuk mendapatkan sifat-sifat tertentu. Untuk mendapatkan sifat-sifat tersebut maka kecepatan pendinginan dan batas temperatur sangat menentukan (T. Jukdin Saktisahdan, 2019). Sifat bahan yang dimaksud adalah sifat fisis dan sifat mekanis. Sifat fisis mencakup kondisi fisik, komposisi, dan struktur mikro. Sedangkan sifat mekanis mencakup kekuatan tarik, kekerasan, keuletan, kemampuan muai, kekuatan tekan, kegetasan dan lain-lain.

Adanya perbaikan struktur mikro dan peningkatan sifat mekanis merupakan solusi tepat guna menghasilkan produk baja karbon yang mampu mencegah terjadinya kerusakan-kerusakan dari komponen mesin atau peralatan akibat perlakuan berat. Sedangkan terbentuknya struktur mikro ini selain dipengaruhi oleh komposisi kimia dari material juga dipengaruhi oleh proses *heat treatment* yang diterima dan kondisi awal material tersebut (T. Jukdin Saktisahdan, 2019).

Temperatur dalam proses perlakuan panas akan menentukan terhadap tingkat ketahanan dan kekuatan bahan. Apabila dengan pemanasan sampai suhu di daerah atau di atas daerah kritis akan terbentuk austenit. Struktur austenit ini akan berubah menjadi martensit saat benda didinginkan dengan cepat.

Kecepatan laju pendinginan tergantung pada jenis media pendingin yang digunakan, masing-masing media pendingin memiliki karakteristik pendinginan yang berbeda. Pendinginan dengan menggunakan air akan memberikan daya pendinginan yang cepat, apabila dilarutkan dengan garam maka akan mempercepat turunnya temperatur material dan semakin cepat dingin maka material semakin keras. Sedangkan pendinginan dengan menggunakan minyak pelumas dan udara akan memberikan pendinginan yang lebih lambat dibandingkan pendinginan menggunakan air dan air garam (Bangsawan, 2012). Penggunaan pelumas sebagai media pendingin akan menyebabkan timbulnya selaput karbon pada spesimen. Banyaknya selaput karbon tergantung dari besarnya viskositas pelumas. (Bahtiar, 2014).

Proses *Heat Treatment*:

2.4.1. *Annealing*

Proses *annealing* adalah kebalikan dari proses *hardening*. Logam diberikan perlakuan *annealing* dengan tujuan untuk melepaskan tekanan internal, melunakkan, membuatnya lebih mudah dibentuk, dan memperbaiki strukturnya. *Annealing* terdiri dari memanaskan logam hingga di atas temperatur kritis (723°C), *holding* atau menahan panas pada jangka waktu yang telah ditentukan, dan pendinginan mencapai suhu ruangan.

Metode pendinginan tergantung pada logam dan sifat yang diinginkan.

2.4.2. *Hardening*

Perlakuan *hardening* untuk sebagian besar baja terdiri dari memanaskan baja dengan suhu di daerah atau di atas daerah kritis (723°C) dan kemudian mendinginkannya secara cepat dengan mencelupkannya ke dalam minyak, air, atau air garam. Baja membutuhkan pendinginan cepat untuk pengerasan tetapi beberapa dapat didinginkan dengan udara dengan hasil yang sama. Proses *hardening* meningkatkan kekerasan dan kekuatan dari baja, tetapi membuatnya kurang ulet. Umumnya, semakin kurang ulet baja, semakin rapuh. (Steelwork vol1, 2001).

2.4.3. *Tempering*

Setelah perlakuan pengerasan diterapkan, baja seringkali lebih keras dari yang dibutuhkan dan baja menjadi rapuh. Juga, tekanan internal yang dihasilkan selama pendinginan cepat dari suhu pengerasan. Untuk menghilangkan tegangan internal dan mengurangi kerapuhan, baja harus dilunakkan dengan tempering, yaitu memanaskan baja sampai temperatur sedikit di bawah temperatur kritis (723°C), menahannya pada suhu tersebut untuk jangka waktu yang diperlukan, dan kemudian mendinginkannya. Kekuatan yang dihasilkan, kekerasan, dan keuletan tergantung pada suhu untuk dimana baja dipanaskan selama proses tempering. Tujuan tempering adalah untuk mengurangi kerapuhan diberikan dengan pengerasan dan untuk menghasilkan fisik yang pasti properti di dalam baja (Steelwork vol1, 2001).

2.4.4. *Normalizing*

Normalizing adalah jenis perlakuan panas yang berlaku untuk logam *ferrous*. Berbeda dengan annealing, pada normalizing logam akan dipanaskan dengan suhu yang tinggi kemudian dikeluarkan dari tungku untuk didinginkan dengan

udara. Tujuan dari normalizing adalah untuk menghilangkan tekanan internal yang dipicu oleh perlakuan panas, *welding*, *casting*, *forming* atau *machining*. Apabila tekanan tidak dikendalikan dengan baik, akan mengakibatkan kegagalan logam.

2.4.5. *Quenching*

Quenching menghasilkan tekanan internal yang sangat tinggi dalam baja, dan untuk meredakannya, kita dapat melunakan baja tersebut sebelum dingin.

2.4.6. *Holding Time*

Holding time atau waktu penahanan dilakukan untuk mendapatkan kekerasan maksimum dari suatu bahan pada proses perlakuan panas dengan menahan pada temperatur pengerasan untuk memperoleh pemanasan yang homogen sehingga struktur austenitnya homogen atau terjadi kelarutan karbida ke dalam austenit dan terjadi difusi karbon dengan unsur paduan (Bangsawan, 2012).

2.4.7. *Cooling*

Kecepatan laju pendinginan suatu benda tergantung pada banyak hal seperti ukuran, komposisi, dan suhu awal dan sifat akhir adalah faktor penentu dalam memilih media pendinginan. Sebuah media pendinginan harus mendinginkan logam dengan kecepatan yang cukup cepat untuk mendapatkan hasil yang diinginkan (Steelwork vol1, 2001).

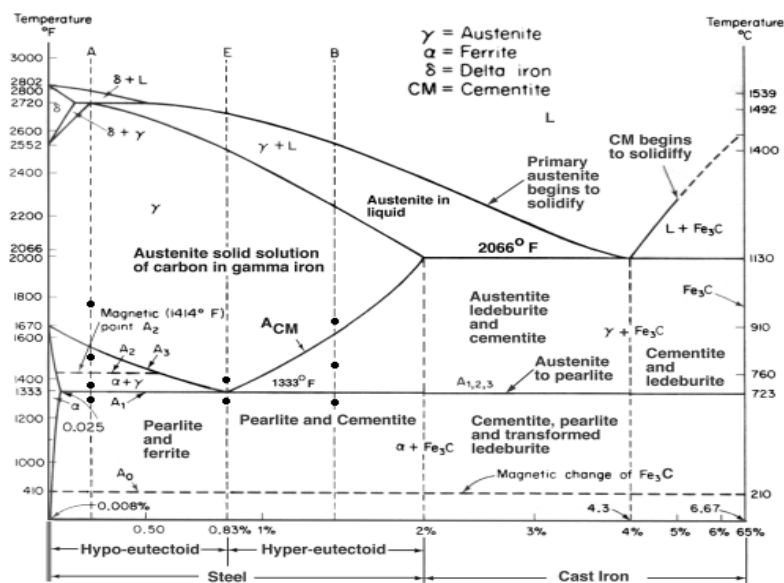
2.6 Diagram Fasa Fe-Fe₃C

Fasa didefinisikan sebagai bagian dari bahan yang memiliki struktur atau komposisi tersendiri. Diagram fasa Fe- Fe₃C atau biasa disebut diagram kesetimbangan besi karbon merupakan diagram yang menjadi parameter untuk mengetahui segala jenis fasa yang terjadi di dalam baja dengan segala perlakuannya. Konsep dasar dari diagram fasa adalah mempelajari bagaimana hubungan antara besi dan paduannya dalam keadaan setimbang. Hubungan

ini dinyatakan dalam suhu dan komposisi, setiap perubahan komposisi dan perubahan suhu akan mempengaruhi struktur mikro.

Diagram kesetimbangan Fe- Fe₃C adalah diagram yang menjelaskan hubungan antara temperatur dimana terjadi perubahan fase selama proses pendinginan atau pemanasan yang lambat dengan kadar karbon. Diagram ini juga merupakan dasar pemahaman untuk semua proses perlakuan panas. Dimana fungsi diagram fasa ialah untuk memudahkan pengguna untuk memilih temperatur pemanasan yang sesuai dengan setiap proses perlakuan panas baik proses *annealing*, *normalizing* maupun proses pengerasan. (Vicky Bhaskara dkk, 2018).

Diagram fasa menunjukkan hubungan antara struktur mikro dengan sifat-sifat mekanis suatu material, dimana semua berhubungan dengan karakteristik diagram fasanya.



Gambar 4 Diagram Fasa Fe₃C

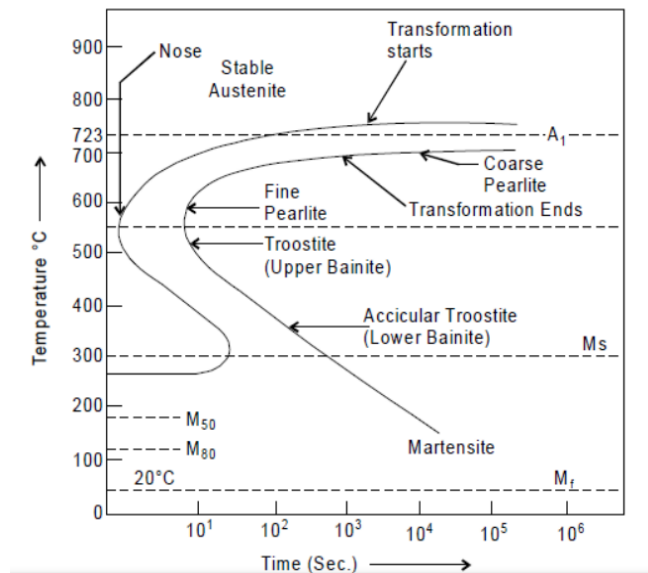
1. *Ferrite* atau besi alpha (α) merupakan modifikasi struktur besi murni pada suhu ruang, dimana ferit menjadi lunak dan ulet , maka ruang antara atom-atomnya adalah kecil dan padat sehingga atom karbon yang dapat tertampung hanya sedikit sekali (Saputra dan Tyastomo, 2016).
2. *Austenite* atau besi gamma (γ) merupakan modifikasi dari besi murni dengan struktur FCC yang memiliki jarak atom lebih besar

dibandingkan dengan ferit. Meski demikian rongga-rongga pada struktur FCC hampir tidak dapat menampung atom karbon dan penyisipan atom karbon akan mengakibatkan tegangan dalam struktur sehingga tidak semua rongga dapat terisi, dengan kata lain daya larutnya jadi terbatas. Umumnya fasa austenit bersifat stabil, ulet, mudah dibentuk, tidak bersifat feromagnetis (Saputra dan Tyastomo, 2016).

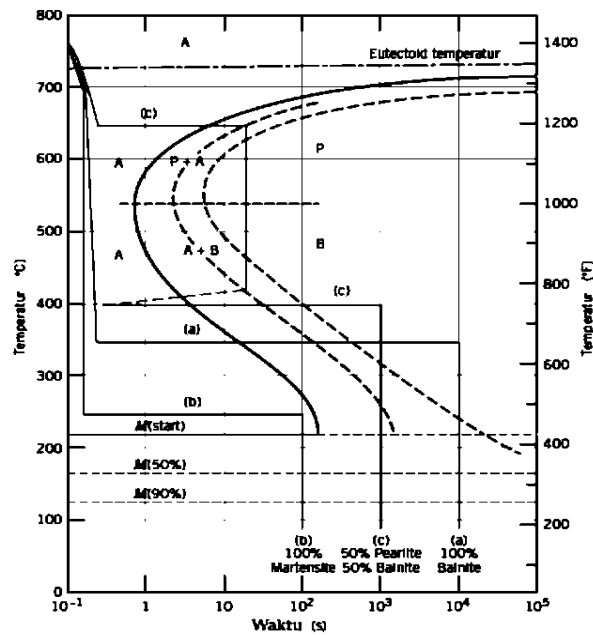
3. Karbida Besi atau Sementit adalah paduan besi karbon, dimana pada kondisi ini karbon melebihi batas larutan sehingga membentuk fasa kedua atau karbida besi yang memiliki komposisi Fe_3C . Hal ini tidak berarti bila karbida besi membentuk molekul Fe_3C , akan tetapi kisi kristal yang membentuk atom besi dan karbon mempunyai perbandingan 3:1. Karbida pada ferit akan meningkatkan kekerasan pada baja sifat dasar sementit adalah sangat keras (Saputra dan Tyastomo, 2016).
4. *Pearlite* merupakan campuran khusus yang terjadi atas dua fasa yang terbentuk austenisasi, dengan komposisi eutektoid bertransformasi menjadi ferit dan karbida. Ini dikarenakan ferit dan karbida terbentuk secara bersamaan dan keduanya saling bercampur. Apabila laju pendinginan dilakukan secara perlahan-lahan maka atom karbon dapat berdifusi lebih lama dan dapat menempuh jarak lebih jauh, sehingga diperoleh bentuk perlit besar. Dan apabila laju pendinginan lebih dipercepat lagi maka difusi akan terbatas pada jarak yang dekat sehingga menghasilkan lapisan tipis lebih banyak (Saputra dan Tyastomo, 2016).
5. *Martensite* terbentuk karena transformasi tanpa difusi sehingga atom-atom karbon seluruhnya terperangkap dalam larutan super jenuh. Keadaan ini yang menimbulkan distorsi pada struktur kristal martensit dan membentuk BCT. Tingkat distorsi yang terjadi sangat tergantung pada kadar karbon. Karena itu martensit merupakan fasa yang sangat keras namun getas (Saputra dan Tyastomo, 2016).

2.7 Diagram TTT

Diagram TTT (*Time Transformation Temperature*) memperlihatkan permulaan dan akhir transformasi dengan waktu sebagai variabelnya. Diagram seperti ini merupakan hasil serangkaian percobaan dekomposisi isothermal, karena mengkaitkan produk transformasi dengan waktu dan temperatur tertentu disebut kurva TTT. Diagram TTT (*Time Temperature Transformation*) dilakukan dengan memanaskan baja karbon sehingga mencapai temperatur austenitisasi kemudian mendinginkan dengan laju pendinginan kontinu pada daerah fasa austenit kemudian menahannya untuk waktu tertentu dan mendinginkan lagi dengan laju pendinginan kontinu (Callister, 2009).



Gambar 5 Diagram TTT Hypoeutectoid



Gambar 6 Diagram TTT Eutectoid

2.8 Hardenability

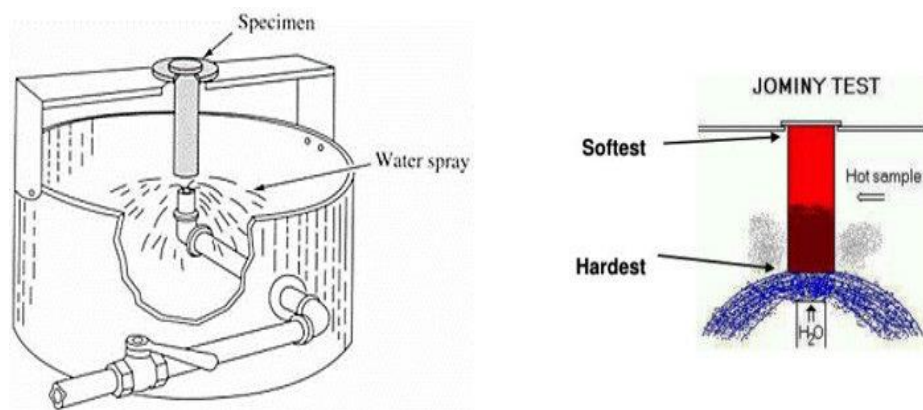
Hardenability atau kemampukerasan merupakan salah satu sifat terpenting dari baja. *Hardenability* menunjukkan kemampuan suatu material untuk mengeras sampai kedalaman tertentu dengan cara perlakuan panas hingga terbentuk martensit pada proses pendinginan untuk mencapai kekerasan tertentu. Mampu keras merujuk kepada sifat baja yang menentukan dalamnya pengerasan sebagai akibat proses quench dari temperatur austemisasinya. Mampu keras tergantung pada presentase unsur-unsur paduan, besar butir austenit, temperatur austenisasi, lama pemanasan dan struktur mikro baja tersebut sebelum dikeraskan (Susilo dkk, 2021). Untuk mendapatkan hasil maksimal, baja harus dikonversi menjadi martensit sepenuhnya. Untuk memperolehnya, baja harus diberikan pendinginan dengan kecepatan tinggi, menghindari dekomposisi austenite menjadi ferrite, pearlite dan bainit selama proses pendinginan. Kedalaman pengerasan pada baja karbon dapat mencapai 2-3 mm, pada baja paduan dapat mencapai 50 mm. Baja berdiameter besar akan lebih lama didinginkan dibandingkan baja berdiameter lebih kecil. Oleh karena itu, baja berdiameter kecil lebih cenderung menjadi martensit penuh.

Hardenability tidak sama dengan *hardness*, dimana *hardenability* mengacu pada kemampuan untuk mengeras hingga kedalaman tertentu, sedangkan kekerasan mengacu pada ketahanan sampel terhadap indentasi atau goresan pada permukaan (Khaira H.K, 2013).

Ada dua metode yang dapat dilakukan untuk menentukan tingkat *hardenability* baja, yaitu dengan metode *Grossman* dan metode *Jominy end quench*.

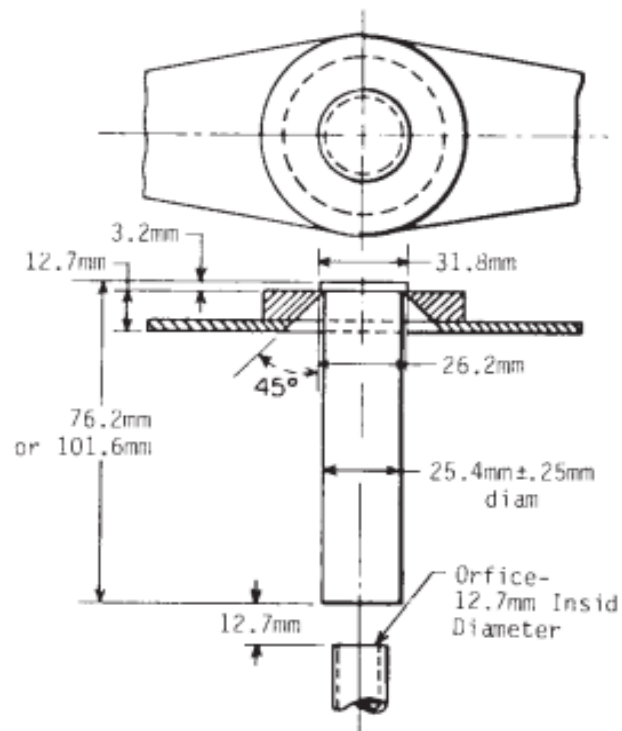
Pada pengujian *hardenability* dengan metode *Grossman*, benda uji dicelupkan pada media pendingin. Metode ini memerlukan beberapa perlakuan austenitisasi dan pendinginan pada satu spesimen dengan diameter berbeda untuk mengukur kemampukerasannya.

Metode *Jominy end quench* adalah alternatif yang lebih umum digunakan karena lebih praktis. Pengujian *hardenability* dengan menggunakan metode *Jominy Test*, benda uji dipanaskan pada suhu yang ditentukan, kemudian didinginkan dengan menyemprotkan air pada salah satu ujungnya. Setelah pengujian dengan alat uji Jominy, diukur kekerasannya dengan menggunakan alat uji kekerasan. (Susilo dkk, 2021).

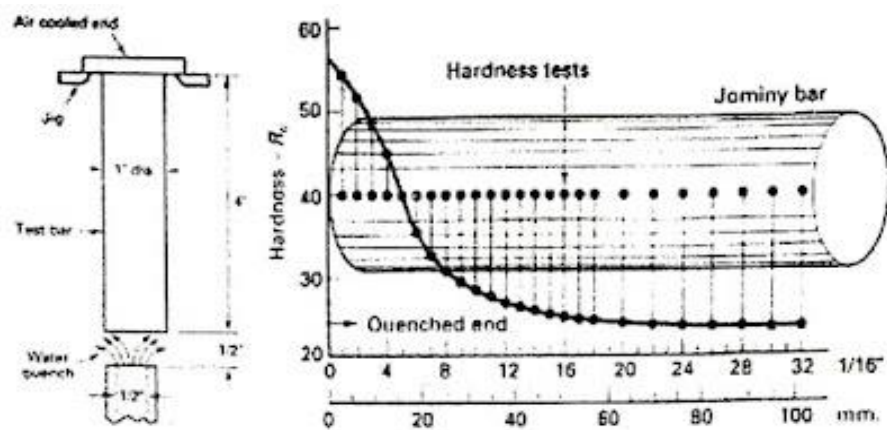


Gambar 7 Ilustrasi Pengujian Jominy Test

Metode yang dilakukan dalam penelitian ini mengacu kepada standar pengujian Jominy bar ASTM A255. (Standar khusus *jominy* yang telah diakui). Perancangan harus memenuhi standar agar hasil pengujian yang dilaksanakan diperoleh data sesuai yang diharapkan / akurat.



Gambar 8 Standar Pengujian Jominy Test ASTM A225



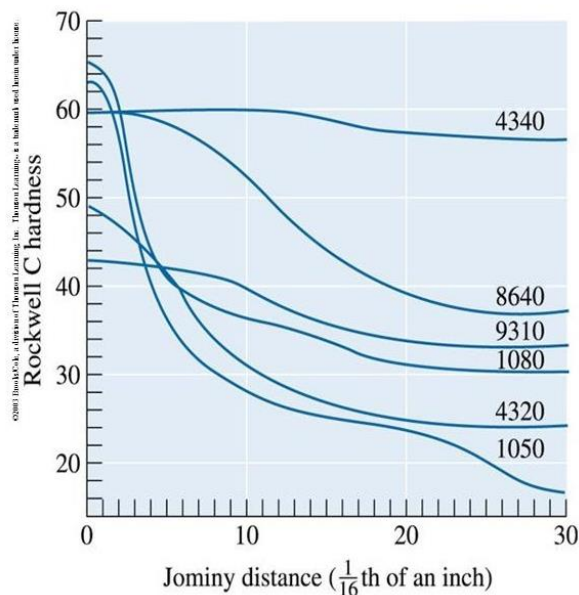
Gambar 9 Grafik distribusi kekerasan hasil Jominy Test

Baja dengan ukuran standar diubah menjadi austenit melalui perlakuan panas, kemudian didinginkan pada salah satu ujungnya menggunakan air dengan suhu ruangan. Laju pendinginan akan paling tinggi pada ujung baja yang bersentuhan dengan air secara langsung. Semakin jauh jarak dari ujung yang bersentuhan dengan air, maka laju pendinginan akan menurun.

Hardenability kemudian diperoleh dengan mengukur kekerasan di sepanjang baja, semakin jauh dari ujung yang bersentuhan dengan air maka semakin tinggi tingkat *hardenability* (Khaira H.K, 2013).

Faktor-faktor yang mempengaruhi *hardenability*:

1. Memperlambat transformasi fasa austenit menjadi ferit dan perlit akan meningkatkan *hardenability* baja.
2. Ukuran butir austenit
3. Kandungan karbon
4. Elemen paduan



Gambar 10 kurva *Hardenability* untuk beberapa baja

Dapat dilihat pada grafik di atas, terdapat kurva beberapa jenis baja yang berbeda. Dari grafik di atas, yang menunjukkan kemampuan penguatan yang baik adalah grafik 4340. Tapi, untuk kasus pengujian pada rel kereta yang sesuai adalah grafik 1080. Rel kereta api butuh sifat keras dan tahan aus pada bagian kepala, namun pada bagian bawahnya tidak berubah.

2.9 Uji Kekerasan

Kekerasan menyiratkan ketahanan akan deformasi, dan untuk logam/baja kekerasan merupakan ukuran resistensi terhadap perubahan deformasi plastis maupun permanen (Dieter, 1987). Deformasi adalah

perubahan bentuk suatu material. Deformasi plastis terjadi pada permukaan benda atau material yang lunak, sedangkan deformasi permanen terjadi pada permukaan benda atau material yang lebih keras (Maulana, 2018).

Untuk mengukur kekerasan suatu material terdapat tiga jenis umum, tergantung pada cara melakukan pengujian, yaitu: (1) Kekerasan goresan (*scratch hardness*); (2) Kekerasan lekukan (*indentation hardness*); (3) Kekerasan pantulan (*rebound*). Uji kekerasan goresan dilakukan dengan cara mengukur kemampuan suatu material dengan menggoreskan material uji kepada spesimen. Uji kekerasan lekukan dilakukan dengan cara mengukur ketahanan suatu material terhadap gaya tekanan yang diberikan oleh indentor dengan memperhatikan besar beban yang diberikan dan besar indentasi. Uji kekerasan pantulan dilakukan dengan cara menghitung energi *impact* yang dihasilkan oleh indentor yang dijatuhkan pada permukaan spesimen (Maulana, 2018).

Hardness test merupakan uji NDT (*Non Destructive test*) dimana pada pengujian ini dapat diketahui suatu nilai kekerasan pada sebuah material/spesimen uji. Cara pengujian *hardness* ini dilakukan dengan metode *hardness* vickers, rockwell dan brinell. Uji kekerasan ini berupa pembentukan lekukan pada permukaan logam memakai bola baja yang dikeraskan kemudian ditekan dengan beban tertentu. Beban diterapkan pada waktu tertentu, biasanya 30 detik, dan diameter lekukan diukur dengan mikroskop, setelah beban dihilangkan. Permukaan harus relatif halus, rata, bersih dari debu atau kerak.

Cara pengujian Brinell dilakukan dengan penekanan sebuah bola baja yang terbuat dari baja krom yang telah dikeraskan dengan diameter tertentu oleh suatu gaya tekan secara statis ke dalam permukaan logam yang diuji tanpa sentakan. Permukaan logam yang diuji harus rata dan bersih. Setelah gaya tekan diiadakan dan bola baja dikeluarkan dari bekas lekukan, maka diameter paling atas dari lekukan tersebut diukur secara teliti. Kekerasan ini disebut kekerasan Brinell, yang biasa disingkat dengan HB atau BHN (*Brinell Hardness Number*). Semakin keras logam yang diuji, maka semakin tinggi nilai HB.

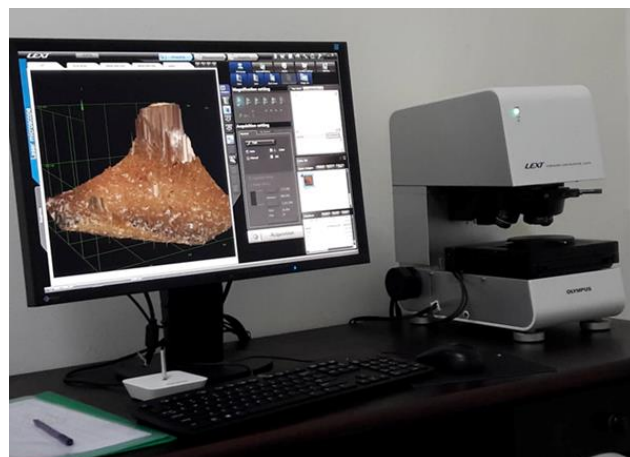


Gambar 11 Alat Uji Kekerasan

2.10 Uji Struktur Mikro

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui dan mempelajari bentuk struktur mikro dari logam, termasuk didalamnya besar butiran dan arah struktur. Struktur mikro sangat menentukan sifat mekanis logam yang diuji (Saputra dan Tyastomo, 2016).

Pengujian Mikro bertujuan untuk memperoleh gambar yang menunjukkan struktur mikro sebuah material. Melalui proses ini kita dapat mengetahui struktur dari suatu bahan dengan memperjelas batas-batas butir bahan sehingga dapat langsung dilihat dengan menggunakan mikroskop dan diambil gambarnya. Pengujian mikrografi dimaksudkan untuk melihat perubahan struktur pada bahan (Murtiono, 2012).



Gambar 12 Mikroskop Optik Logam (Lab. Metalurgi Fisik UNHAS)

2.11 Uji SEM



Gambar 13 Alat Uji SEM

Scanning Electron Microscope (SEM) adalah jenis mikroskop elektron yang menghasilkan gambar sampel dengan memindai permukaan dengan sinar elektron yang terfokus dengan perbesaran hingga skala tertentu.