

**DAMPAK LAJU PENDINGINAN PADA KURVA CCT PROSES  
*QUENCHING-TEMPERING* TERHADAP KEKERASAN DAN  
PEMBENTUKAN FASA BAJA AISI 4140**

**SKRIPSI**

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat

Memperoleh gelar Sarjana Teknik

Program Studi Teknik Mesin



Disusun oleh:

Stefanus Felix Prasetyo

NIM: 215214032

**FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI**

**UNIVERSITAS SANATA DHARMA**

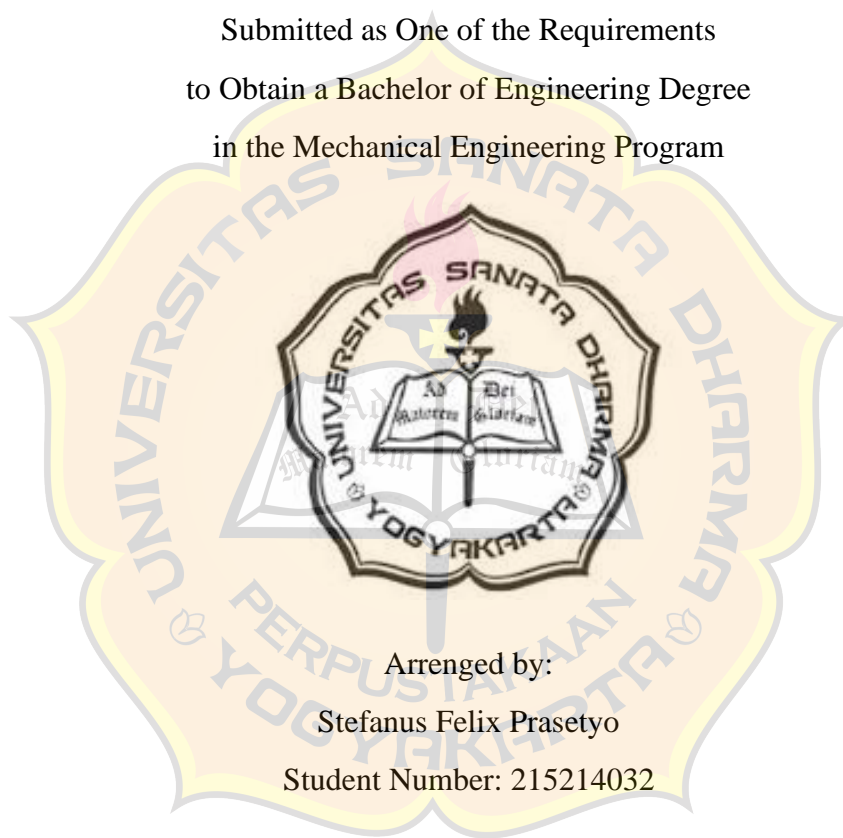
**YOGYAKARTA**

**2025**

**THE EFFECT OF COOLING RATE PROCESS ON CCT  
CURVE IN THE QUENCHING-TEMPERING, HARDNESS,  
AND PHASE FORMATION AISI 4140 STEEL**

**THESIS**

Submitted as One of the Requirements  
to Obtain a Bachelor of Engineering Degree  
in the Mechanical Engineering Program



Arrenged by:

Stefanus Felix Prasetyo

Student Number: 215214032

**FACULTY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

**SANATA DHARMA UNIVERSITY**

**YOGYAKARTA**

**2025**

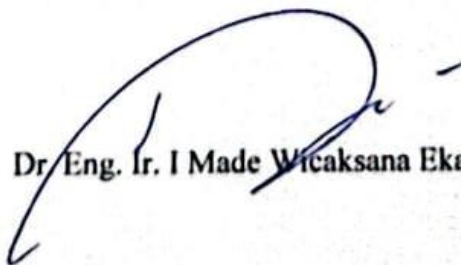
SKRIPSI

**DAMPAK LAJU PENDINGINAN PADA KURVA CCT PROSES  
QUENCHING - TEMPERING TERHADAP KEKERASAN DAN  
PEMBENTUKAN FASA BAJA AISI 4140**



Disusun oleh :  
Stefanus Felix Prasetyo  
NIM: 215214032

Dosen Pembimbing,



Dr. Eng. Ir. I Made Wicaksana Ekaputra

21 Januari 2025

SKRIPSI

DAMPAK LAJU PENDINGINAN PADA KURVA CCT PROSES  
QUENCHING - TEMPERING TERHADAP KEKERASAN DAN  
PEMBENTUKAN FASA BAJA AISI 4140

Dipersiapkan dan ditulis oleh:

Stefanus Felix Prasetyo

NIM: 215214032

SUSUNAN DEWAN PENGUJI

JABATAN	NAMA LENGKAP	TANDA TANGAN
Ketua	: A. Prasetyadi M.Si., Ph.D.	
Sekretaris	: Heryoga Winarbawa M.Eng.	
Anggota	: Dr. Eng. Ir. I Made Wicaksana Ekaputra	

Yogyakarta, 21 Januari 2025

Fakultas Sains dan Teknologi  
Universitas Sanata Dharma

  
Dekan,

Ir. Drs. Haris Sriwindono, M.Kom., Ph.D.

## PERNYATAAN KEASLIAN KARYA

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi yang saya tulis ini tidak memuat karya atau bagian karya orang lain, kecuali yang telah disebutkan dalam kutipan dan daftar pustaka dengan mengikuti ketentuan sebagaimana layaknya karya ilmiah.

Apabila di kemudian hari ditemukan indikasi plagiarisme dalam naskah ini, saya bersedia menanggung segala sanksi sesuai peraturan perundang-undangan yang berlaku.

Yogyakarta, 5 Desember 2024

Penulis,



Stefanus Felix Prasetyo



**LEMBAR PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI  
KARYA ILMIAH UNTUK KEPERLUAN AKADEMIS**

Yang bertanda tangan di bawah ini, saya mahasiswa Universitas Sanata Dharma:

Nama : Stefanus Felix Prasetyo

NIM : 215214032

Demi perkembangan ilmu pengetahuan, saya memberikan kepada Perpustakaan Universitas Sanata Dharma karya ilmiah saya yang berjudul:

**DAMPAK LAJU PENDINGINAN PADA KURVA CCT PROSES  
QUENCHING-TEMPERING TERHADAP KEKERASAN DAN  
PEMBENTUKAN FASA BAJA AISI 4140**

Dengan demikian saya memberikan hak kepada Perpustakaan Universitas Sanata Dharma baik untuk menyimpan, mengalihkan dalam bentuk media lain, mengolah dalam bentuk pangkalan data, mendistribusikan secara terbatas, dan mempublikasikannya di internet atau media lain untuk kepentingan akademis tanpa perlu meminta izin dari saya atau memberikan royalti kepada saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di Yogyakarta

Pada tanggal 5 Desember 2024

Yang menyatakan,



Stefanus Felix Prasetyo

## KATA PENGANTAR

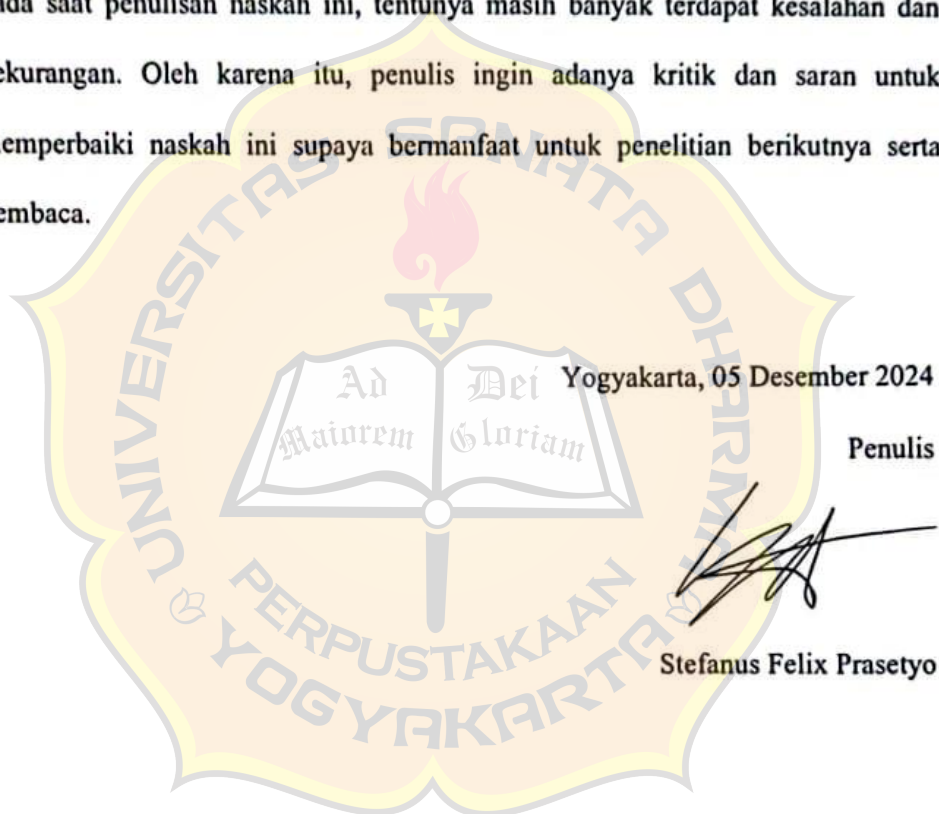
Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa,, sehingga saya sebagai penulis dapat melaksanakan dan menyelesaikan penelitian dan penulisan naskah skripsi yang berjudul “Dampak Laju Pendinginan pada Kurva CCT Proses *Quenching-Tempering* terhadap Kekerasan dan Pembentukan Fasa Baja AISI 4140”.

Penyusunan skripsi ini dilakukan guna memenuhi salah satu syarat bagi mahasiswa/I untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik pada Program Strata 1, Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Sanata Dharma Yogyakarta. Selesaiannya tugas akhir ini tidak lepas dari bantuan banyak pihak, oleh karena itu penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Ir. Drs. Haris Sriwindono, M.Kom., Ph.D. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Sanata Dharma.
2. Bapak Ir. Budi Setyahandana, M. T., selaku Ketua Program Studi Teknik Mesin Universitas Sanata Dharma.
3. Bapak Wibowo Kusbandono S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Akademik.
4. Bapak Dr. Eng. Ir.I Made Wicaksana Ekaputra selaku Dosen Pembimbing tugas akhir yang telah banyak meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan hingga penulis menyelesaikan naskah ini.

5. Bapak, Ibu dan kedua saudara penulis yang selalu memberikan dukungan secara langsung maupun tak langsung.
6. Segenap sahabat penulis yang sudah membantu sampai pada titik ini, rasanya seperti keluarga kedua yang menyaksikan perjalanan lika-liku penulis selama perkuliahan ini.

Pada saat penulisan naskah ini, tentunya masih banyak terdapat kesalahan dan kekurangan. Oleh karena itu, penulis ingin adanya kritik dan saran untuk memperbaiki naskah ini supaya bermanfaat untuk penelitian berikutnya serta pembaca.



Yogyakarta, 05 Desember 2024

Penulis

  
Stefanus Felix Prasetyo



## INTISARI

Baja AISI 4140 merupakan material yang banyak digunakan pada komponen otomotif dan industri karena sifat mekanisnya yang unggul. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi media pendingin berupa air dan oli dalam proses *quenching* pada suhu 870°C selama 45 menit, diikuti dengan proses *tempering* pada suhu 400°C selama 45 menit terhadap kekerasan dan struktur mikro baja AISI 4140. Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan metode Vickers, sementara analisis struktur mikro dilakukan melalui pengamatan *metallography*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa media pendingin air menghasilkan laju pendinginan lebih cepat, yang memicu transformasi langsung *austenite* menjadi *martensite*, sehingga terbentuk struktur *tempered martensite* dengan nilai kekerasan tertinggi mencapai rata-rata 393,4 HV. Sebaliknya, media pendingin oli dengan laju pendinginan lebih lambat menghasilkan struktur mikro berupa *ferrite* dan *pearlite* halus, dengan nilai kekerasan lebih rendah, rata-rata 313,96 HV. Keseluruhan hasil menunjukkan bahwa laju pendinginan berpengaruh signifikan terhadap peningkatan kekerasan dan pembentukan fasa baja AISI 4140.

Kata kunci: Baja AISI 4140, *quenching*, *tempering*, Vickers, *metallography*

## ABSTRACT

AISI 4140 steel is a widely used material in automotive and industrial components due to its excellent mechanical properties. This study aims to analyze the effect of different cooling media, namely water and oil, in the quenching process at a temperature of 870°C for 45 minutes, followed by tempering at 400°C for 45 minutes, on the hardness and microstructure of AISI 4140 steel. Hardness testing was conducted using the Vickers method, while microstructural analysis was performed through metallographic observation. The results indicate that water as a cooling medium provides a faster cooling rate, triggering a direct transformation of austenite into martensite, resulting in a microstructure dominated by tempered martensite with the highest hardness value averaging 393.4 HV. On the other hand, oil as a cooling medium, with a slower cooling rate, produces a microstructure consisting of fine ferrite and pearlite, resulting in a lower average hardness value of 313.96 HV. Overall, the results demonstrate that the cooling rate significantly influences the hardness and phase formation of AISI 4140 steel.

**Keywords:** AISI 4140 steel, quenching, tempering, Vickers, metallography

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL DALAM BAHASA INGGRIS .....	ii
HALAMAN PERSETUJUAN PEMBIMBING .....	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN KARYA .....	v
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	vi
HALAMAN KATA PENGANTAR.....	vii
ABSTRAK .....	ix
ABSTRACT.....	x
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiv
DAFTAR GAMBAR .....	xv
BAB I.....	1
PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Batasan Masalah.....	4
1.4 Tujuan Penelitian .....	4
1.5 Manfaat Penelitian .....	5
BAB II.....	6
LANDASAN TEORI.....	6
2.1 Baja .....	6
2.1.1 Baja Karbon Rendah ( <i>Low Carbon Steel</i> ).....	6
2.1.2 Baja Karbon Sedang ( <i>Medium Carbon Steel</i> ).....	7
2.1.3 Baja Karbon Tinggi ( <i>High Carbon Steel</i> ) .....	7

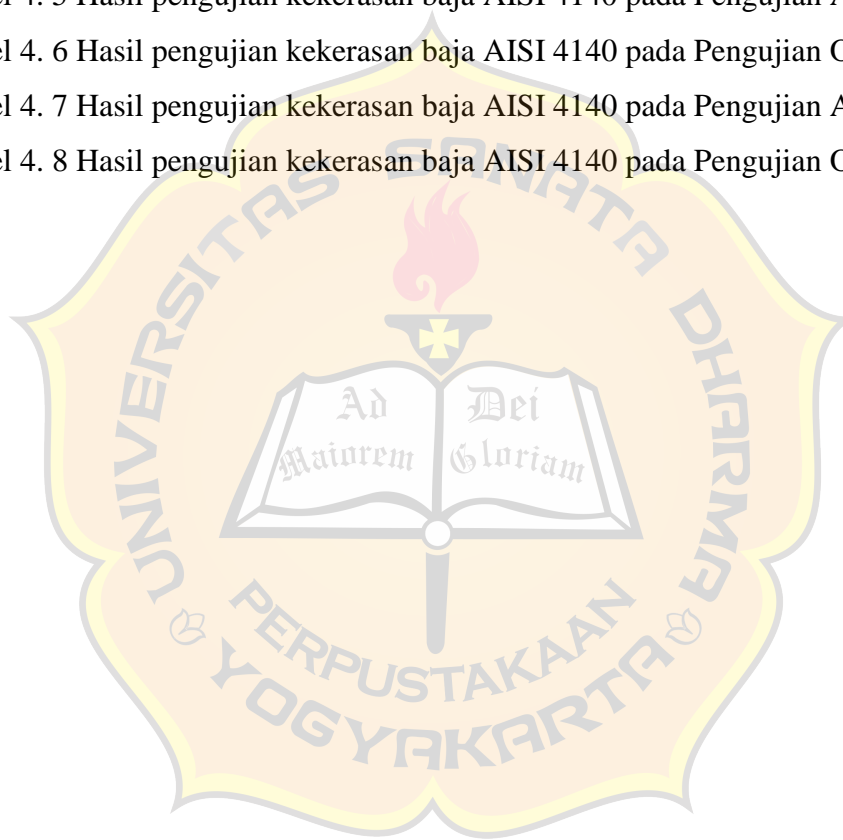
2.2	Baja AISI 4140.....	8
2.3	<i>Continuous Cooling Transformation</i> .....	9
2.4	Diagram Fase-Fe <sub>3</sub> C .....	14
2.4.1	<i>Ferrite</i> atau Besi- $\alpha$ .....	16
2.4.2	<i>Pearlite</i> .....	17
2.4.3	<i>Cementite</i> .....	18
2.4.4	<i>Bainite</i> .....	19
2.4.5	<i>Martensite</i> .....	20
2.4.6	$\gamma$ - <i>Austenite</i> .....	21
2.5	Perlakuan Panas ( <i>Heat Treatment</i> ) .....	22
2.5.1	<i>Normalizing</i> .....	23
2.5.2	<i>Quenching</i> .....	23
2.5.3	<i>Tempering</i> .....	24
2.6	Pengujian Kekerasan Vickers .....	25
2.6.1	Ketebalan Spesimen .....	26
2.6.2	<i>Finishing</i> Spesimen.....	27
2.6.3	Kesejajaran Spesimen .....	27
2.6.4	Waktu Indentasi .....	27
2.6.5	Jarak Indentasi.....	28
2.7	Pengujian <i>Metallography</i> .....	28
2.8	Tinjauan Pustaka .....	32
BAB III .....		34
METODE PENELITIAN.....		34
3.1	Diagram Alir Penelitian .....	34
3.2	Baja AISI 4140.....	36
3.3	Media <i>Quenching</i> .....	36

3.4	Larutan Etsa .....	37
3.5	Mesin Uji Kekerasan Vickers .....	37
3.6	<i>Furnace</i> / Tungku.....	38
3.7	Termometer .....	39
3.8	Mesin <i>Polishing</i> .....	40
3.9	Mikroskop Optik .....	41
3.10	Pembuatan Spesimen / Benda Uji .....	42
3.11	Perlakuan Panas <i>Normalizing</i> .....	42
3.12	Proses <i>Quenching</i> .....	43
3.13	Pengujian <i>Metallography</i> .....	43
3.14	Pengujian Kekerasan Vickers .....	44
BAB IV	.....	46
PEMBAHASAN	.....	46
4.1	Diagram Continuous Cooling Transformation (CCT) setelah Proses <i>Quenching</i> – <i>Tempering</i> .....	47
4.2	Laju Pendinginan setelah Proses <i>Quenching</i> – <i>Tempering</i> .....	55
4.3	Hasil Uji Kekerasan Vickers.....	57
4.4	Perbandingan Grafik Uji Kekerasan pada Pengujian 1, 2, dan 3 .....	63
4.5	Hasil Pengujian <i>Metallography</i> .....	65
BAB V	.....	73
KESIMPULAN	.....	73
5.1	Kesimpulan .....	73
5.2	Saran.....	74
DAFTAR PUSTAKA	.....	75



## DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Komposisi Baja AISI 4140 (Badaruddin et al., 2019) .....	8
Tabel 4. 1 Penamaan pada spesimen.....	58
Tabel 4. 2 Hasil pengujian kekerasan baja AISI 4140 pada Spesimen 1 .....	58
Tabel 4. 3 Hasil pengujian kekerasan baja AISI 4140 pada Pengujian A1.....	59
Tabel 4. 4 Hasil pengujian kekerasan baja AISI 4140 pada Pengujian O1.....	59
Tabel 4. 5 Hasil pengujian kekerasan baja AISI 4140 pada Pengujian A2.....	59
Tabel 4. 6 Hasil pengujian kekerasan baja AISI 4140 pada Pengujian O2.....	60
Tabel 4. 7 Hasil pengujian kekerasan baja AISI 4140 pada Pengujian A3.....	60
Tabel 4. 8 Hasil pengujian kekerasan baja AISI 4140 pada Pengujian O3.....	60



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Diagram Continuous Cooling Transformation (CCT) .....	10
Gambar 2. 2 Diagram Time Temperature Time (TTT) pada pembentukan fasa pearlite.....	11
Gambar 2. 3 Diagram Time Temperature Time (TTT) pada batas martensite dan pearlite.....	12
Gambar 2. 4 Pembentukan fasa berdasarkan laju pendinginan pada diagram fasa untuk jenis baja AISI 4140 (Callister, 1991) .....	13
Gambar 2. 5 Diagram fase besi karbida (Fe – Fe <sub>3</sub> C).....	15
Gambar 2. 6 Struktur mikro Ferrite atau Besi- $\alpha$ .....	16
Gambar 2. 7 Struktur BCC (Body Centered Cubic) .....	17
Gambar 2. 8 Struktur mikro Pearlite .....	18
Gambar 2. 9 Struktur mikro Cementite pada baja karbon 1,4 wt% C .....	19
Gambar 2. 10 Struktur mikro Bainite.....	20
Gambar 2. 11 Struktur mikro Martensite.....	21
Gambar 2. 12 Struktur mikro $\gamma$ -Austenite.....	22
Gambar 2. 13 Indentor Piramida.....	25
Gambar 2. 14 Jarak minimum indentasi untuk Vickers dan Knoop .....	28
Gambar 3. 1 Skema diagram alir penelitian.....	35
Gambar 3. 2 Baja silindris pejal AISI 4140 .....	36
Gambar 3. 3 Oli SAE 20W – 50 .....	36
Gambar 3. 4 Larutan HNO <sub>3</sub> 100% dan alkohol 96% .....	37
Gambar 3. 5 Mesin uji kekerasan Vickers DHV – 50D.....	38
Gambar 3. 6 Furnace / Tungku tipe Ney M525 seri II.....	39
Gambar 3. 7 Termometer .....	40
Gambar 3. 8 Mesin Polishing TNP – 2020 FRX .....	41
Gambar 3. 9 Mikroskop Optik Union Tokyo 2900.....	41
Gambar 3. 10 Spesimen Uji Baja AISI 4140 .....	42
Gambar 4. 1 Diagram CCT Pengujian A1 .....	47
Gambar 4. 2 Diagram CCT Pengujian A2 .....	49

Gambar 4. 3 Diagram CCT Pengujian A3 .....	50
Gambar 4. 4 Diagram CCT Pengujian O1 .....	51
Gambar 4. 5 Diagram CCT Pengujian O2 .....	52
Gambar 4. 6 Diagram CCT Pengujian O3 .....	53
Gambar 4. 7 Grafik Laju Pendinginan Media Air dan Oli.....	55
Gambar 4. 8 Grafik Perbandingan Uji Kekerasan Baja AISI 4140 .....	63
Gambar 4. 9 Struktur mikro pada Spesimen 1 dengan perlakuan normalizing 900°C .....	66
Gambar 4. 10 Struktur mikro pada Pengujian A1 dengan perlakuan quenching air 870°C dan tempering 400°C .....	66
Gambar 4. 11 Struktur mikro pada Pengujian O1 dengan perlakuan quenching oli 870°C dan tempering 400°C .....	67
Gambar 4. 12 Struktur mikro pada Pengujian A2 dengan perlakuan quenching air 870°C dan tempering 400°C .....	67
Gambar 4. 13 Struktur mikro pada Pengujian O2 dengan perlakuan quenching oli 870°C dan tempering 400°C .....	68
Gambar 4. 14 Struktur mikro pada Pengujian A3 dengan perlakuan quenching air 870°C dan tempering 400°C .....	68
Gambar 4. 15 Struktur mikro pada Pengujian O3 dengan perlakuan quenching oli 870°C dan tempering 400°C .....	69

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Baja adalah salah satu material logam yang paling sering digunakan dalam berbagai rekayasa teknik, terutama dalam sektor otomotif hingga industri. Baja digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti komponen-komponen otomotif, dalam dunia industri hingga pada sebuah peralatan perkakas. Baja memiliki banyak keunggulan mekanik dibandingkan dengan material yang lain, seperti kekerasan (*hardness*), ketangguhan (*toughness*) dan keuletan (*ductility*). Kandungan yang terdapat pada baja terdiri dari besi (Fe) dan karbon (C). Besi merupakan komposisi utama pada kandungan baja dengan konsentrasi lebih dari 90%. Berdasarkan kandungan karbon tersebut, baja dikelompokkan menjadi tiga kategori, baja karbon rendah (*low carbon steel*), baja karbon sedang (*medium carbon steel*) dan baja karbon tinggi (*high carbon steel*) (Callister, 2018). Sedangkan dalam paduan baja terbagi dalam dua golongan, baja paduan rendah dan baja paduan tinggi. Salah satu tipe baja paduan sedang yaitu baja karbon seri AISI 4140. Di dunia industri, baja seri ini biasanya digunakan pada poros dan komponen mesin yang membutuhkan karakteristik kekerasan dan ketangguhan yang tinggi.

Baja AISI 4140 merupakan salah jenis baja paduan sedang atau menengah dikarenakan memiliki kandungan karbon yaitu sekitar 0,45% - 0,50%. Baja AISI 4140 pada umumnya dapat menahan korosi karena baja

tersebut memiliki tambahan komponen yang terdiri dari kromium (Cr) dan molybdenum (Mo). Menurut AISI (*American Iron and Steel Institute*) komposisi kandungan yang terdapat pada baja AISI 4140 terdiri dari karbon (C) sekitar 0,38% - 0,43%, Silikon (Si) sekitar 0,15% - 0,30%, Mangan (Mn) sekitar 0,75% - 1,00%, Sulfur (S)  $\leq 0.04\%$ , Kromium (Cr) sekitar 0.8% - 1.10%, Molybdenum sekitar 0.15% - 0.25% dan Nikel 0,30%. Beberapa penggunaan baja AISI 4140 pada bidang otomotif hingga industri digunakan sebagai *gear*, *bolt*, *coupling*, *shaft*, *piston pin* dan *spindles*. Berbagai upaya telah banyak dilakukan dalam proses rekayasa baja AISI 4140. Upaya-upaya tersebut dilakukan dalam rangka untuk memperoleh sifat paduan baja yang spesifik sesuai dengan kebutuhan lingkungan kerja. Baja AISI 4140 merupakan jenis baja yang dapat direkayasa melalui proses perlakuan panas (*heat treatment*). Beberapa penelitian telah banyak dilakukan terkait rekayasa melalui proses perlakuan panas (Shultoni Mahardika, 2020).

Proses perlakuan panas pada baja merupakan proses pemanasan dan pendinginan dengan tujuan mengubah sifat mekanisnya sesuai kebutuhan. Pada prosesnya baja akan mengalami proses perubahan sifat mekaniknya seperti dari segi kekerasan, keuletan serta ketangguhan tergantung metode yang akan digunakan. *Quenching* dan *tempering* merupakan salah satu metode perlakuan panas. *Quenching* merupakan proses pendinginan yang cepat pada sebuah media pendingin setelah perlakuan panas, prosesnya menghasilkan struktur mikro *martensite*. Tujuan *quenching* yaitu mencegah transformasi *austenite* menjadi struktur lain yang lebih lunak, seperti *ferrite* dan *pearlite*. Sedangkan *tempering* merupakan proses perlakuan panas setelah logam sudah dikeraskan



melalui proses pengerasan *quenching* dengan waktu yang telah ditentukan, lalu melalui proses pendinginan untuk mengembalikan ketangguhan dan tegangan sisa. Proses *quenching* umumnya dilanjutkan dengan proses *tempering* agar mendapatkan sifat mekanis dari baja yang optimal.

Pada penelitian ini, baja AISI 4140 akan dilakukan proses metode *quenching* dengan temperatur pemanasan  $870^{\circ}\text{C}$  dengan *holding time* selama 45 menit. Setelah waktu *holding*, baja kemudian didinginkan secara cepat melalui proses *quenching* dengan beberapa media pendingin. Proses pendinginan akan menggunakan media berupa air dan oli. Proses *tempering* dilakukan dengan temperatur pemanasan  $400^{\circ}\text{C}$  dengan *holding time* selama 45 menit. Untuk mengetahui pengaruh proses *quenching-tempering* yang dilakukan, pengujian kekerasan menggunakan metode Vickers dilakukan. Sebagai tambahan, untuk memverifikasi hasil kekerasan, fasa pada baja diidentifikasi melalui pengamatan struktur mikro.

## 1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang, dapat dirumuskan beberapa rumusan masalah yaitu:

1. Bagaimana pengaruh variasi laju pendinginan pada perlakuan panas *quenching-tempering* pada suhu  $870^{\circ}\text{C}$  selama 45 menit terhadap kekerasan baja AISI 4140?
2. Bagaimana pengaruh variasi laju pendinginan pada perlakuan panas *quenching-tempering* pada suhu  $870^{\circ}\text{C}$  selama 45 menit terhadap pembentukan fasa baja AISI 4140?

### 1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan-batasan masalah dari topik tugas akhir ini, antara lain yaitu:

1. Kondisi permukaan spesimen atau bahan uji pada saat perlakuan panas normalizing dianggap sama.
2. Ukuran spesimen atau bahan uji yang digunakan dalam penelitian ini seragam serta sesuai dengan standar pengujian.
3. Komposisi oli sebagai media pendingin dianggap tidak mengalami perubahan akibat proses pencelupan.
4. Suhu kondisi lingkungan disekitar pengujian tidak mempengaruhi proses heat treatment.

### 1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini, antara lain yaitu:

1. Mengidentifikasi pengaruh variasi laju pendinginan pada perlakuan panas *quenching-tempering* pada suhu 870°C selama 45 menit terhadap kekerasan baja AISI 4140?
2. Mengidentifikasi pengaruh variasi laju pendinginan pada perlakuan panas *quenching-tempering* pada suhu 870°C selama 45 menit terhadap pembentukan fasa baja AISI 4140?

### 1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian tugas akhir ini, antara lain yaitu:

1. Memahami bagaimana proses peningkatan kekuatan dan keuletan baja AISI 4140.
2. Menambah wawasan tentang perlakuan panas (*heat treatment*) pada baja AISI 4140.
3. Sebagai salah satu syarat lulus strata-1 Program Studi Teknik Mesin Universitas Sanata Dharma.



## BAB II

### LANDASAN TEORI

#### 2.1 Baja

Baja merupakan salah satu material teknik dari logam, baja merupakan sebuah paduan gabungan antara besi (Fe) dengan karbon (C). Baja juga mengandung beberapa unsur campuran lainnya seperti sulfur (S), fosfor (P), silikon (Si) dan mangan (Mn) yang jumlahnya dibatasi. Baja karbon adalah baja yang mengandung karbon antara 0,1 – 1,7% (Sucahyo, 1999:55). Berdasarkan dari jumlah kandungan karbonnya, baja dapat digolongkan menjadi tiga jenis, yaitu:

##### 2.1.1 Baja Karbon Rendah (*Low Carbon Steel*)

Baja karbon rendah yang banyak diproduksi pada umumnya hanya mengandung kurang dari 0,25% wt C. Struktur mikro baja karbon rendah menurut (Callister, 1991) didominasi ferit dan perlit sehingga menyebabkan baja memiliki kekerasan serta keuletan yang tinggi tetapi masih memiliki sifat ketahanan terhadap aus dan kekerasan yang rendah dibandingkan baja karbon sedang. Baja karbon rendah ini sering digunakan dalam pembuatan produk yang membutuhkan keuletan tinggi, seperti lembaran logam, kawat, kawat pengikat dan komponen struktural yang tidak membutuhkan kekerasan yang tinggi.

### 2.1.2 Baja Karbon Sedang (*Medium Carbon Steel*)

Baja karbon sedang atau menengah merupakan baja yang mengandung karbon sekitar 0,25 wt% dan 0,60 wt%. Baja karbon sedang ini memungkinkan baja untuk dikeraskan sebagian dengan diberikan perlakuan panas (*heat treatment*) yang sesuai. Proses pengerjaan panas menaikkan kekuatan baja dengan cara digiling. Baja karbon sedang digunakan dalam beberapa peralatan mesin seperti roda gigi otomotif, poros hubungan, poros engkol, sekrup sungkup dan alat angkat presisi serta beberapa komponen struktural berkekuatan tinggi yang membutuhkan kombinasi kekuatan tinggi, ketahanan aus dan ketangguhan.

### 2.1.3 Baja Karbon Tinggi (*High Carbon Steel*)

Baja karbon tinggi merupakan baja yang mengandung karbon antara 0,6 wt% dan 1,4 wt% sehingga memiliki tahanan panas dan kekerasan yang tinggi tetapi mempunyai keuletan yang rendah dibanding baja jenis karbon yang lainnya. Pembentukan baja ini dilakukan dengan cara menggerinda permukaannya, misalnya pada material berbentuk batang silindris (batang bor) atau batang pipih (batang datar). Apabila baja ini digunakan untuk bahan produksi maka harus dikerjakan dalam keadaan panas dan digunakan untuk peralatan mesin-mesin berat, batang-batang pengontrol, alat-alat tangan seperti palu, obeng, tang, kunci mur, baja pelat gas kumparan dan sejumlah peralatan pertanian (Amanto, dan Daryatno, 1999:33).



Pada penelitian ini, penulis menggunakan baja karbon sedang yaitu Baja AISI 4140 sebagai bahan penelitian. Dengan alasan pemilihan baja karbon sedang tersebut karena sesuai dengan kajian teoritis yang menunjukkan bahwa kandungan karbon dari baja sedang dapat dikeraskan melalui perlakuan panas (*heat treatment*). Perlakuan panas yang akan digunakan oleh penulis merupakan metode *quenching* dan *tempering*.

## 2.2 Baja AISI 4140

Baja AISI 4140 merupakan salah satu jenis baja yang termasuk baja karbon sedang. AISI (*American Iron and Steel Institute*) merupakan sistem kode standar dari *Society of Automotive Engineers* (SAE) sehingga jenis 4140 termasuk dalam baja paduan dengan yang didesain menggunakan *four digit number* yang artinya ada perbedaan kandungan dalam baja tersebut. Angka 4 dalam AISI 4140 menunjukkan kandungan unsur paduan *chromium* dan *molybdenum*, sedangkan angka 1 menunjukkan presentasi paduan  $\pm 1\%$  dan angka 40 menunjukkan kandungan karbon sebesar  $\pm 0,4\%$ . (Fendri, 2018)

Tabel 2. 1 Komposisi Baja AISI 4140 (Badaruddin et al., 2019)

<i>Element</i>	<i>Composition (wt%)</i>
Karbon (C)	0,38% - 0,43%
Kromium (Cr)	0,8% - 1,10%
Molibdenum (Mo)	0,15% - 0,25%
Mangan (Mn)	0,75% - 1,00%

Silikon (Si)	0,15% - 0,30%
Sulfur (S)	$\leq 0,04\%$
Nikel (Ni)	0,30%

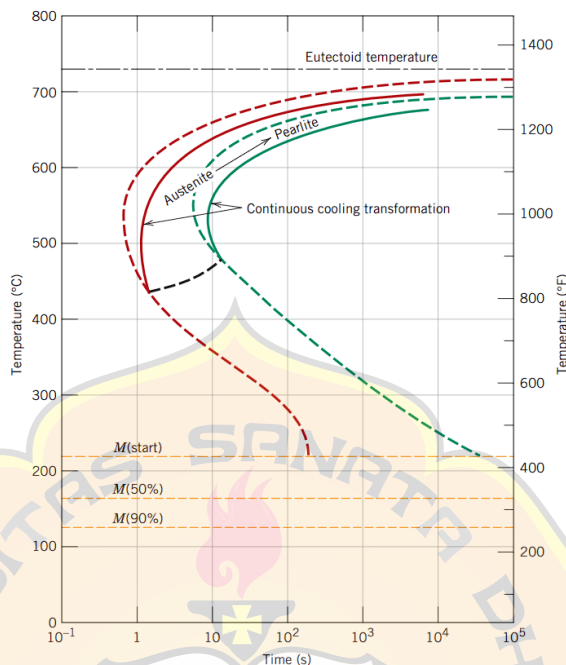
---

Dari Table 2.1 dapat diketahui bahwa baja AISI 4140 merupakan baja paduan dengan komposisi kandungan seimbang sehingga menghasilkan sifat mekanis yang baik. Kandungan karbon (C) berkisar antara 0,38% - 0,43%, memiliki dampak pada kekuatan dan kekerasan baja. Kromium (Cr) yang terkandung berada pada rentang 0,8% - 1,1% yang berfungsi dalam meningkatkan ketahanan korosi dan kekerasan. Molibdenum (Mo) dengan kadar 0,15% - 0,25% berperan meningkatkan kekuatan dan ketangguhan. Mangan (Mn) dengan kadar 0,75% - 1,00% untuk memperbaiki sifat mampu las dan meningkatkan kekerasan. Silikon (Si) dengan kadar 0,15% - 0,30%. Nikel (Ni) dengan kadar 0,30% memiliki peran dalam meningkatkan keuletan dan ketangguhan baja. Sulfur (S) hanya terkandung dalam jumlah kecil yaitu kurang dari 0,04%.

### 2.3 *Continuous Cooling Transformation*

*Continuous Cooling Transformation* (CTT) atau diagram transformasi pendinginan kontinu digunakan untuk memprediksi struktur mikro yang terbentuk selama proses pendinginan kontinu dari suatu logam atau paduan. Sebagian besar perlakuan panas untuk baja melibatkan pendinginan terus-menerus spesimen hingga suhu ruang. Diagram transformasi isothermal hanya berlaku pada kondisi suhu konstan, sehingga dalam diagram tersebut harus dimodifikasi untuk transformasi yang terjadi

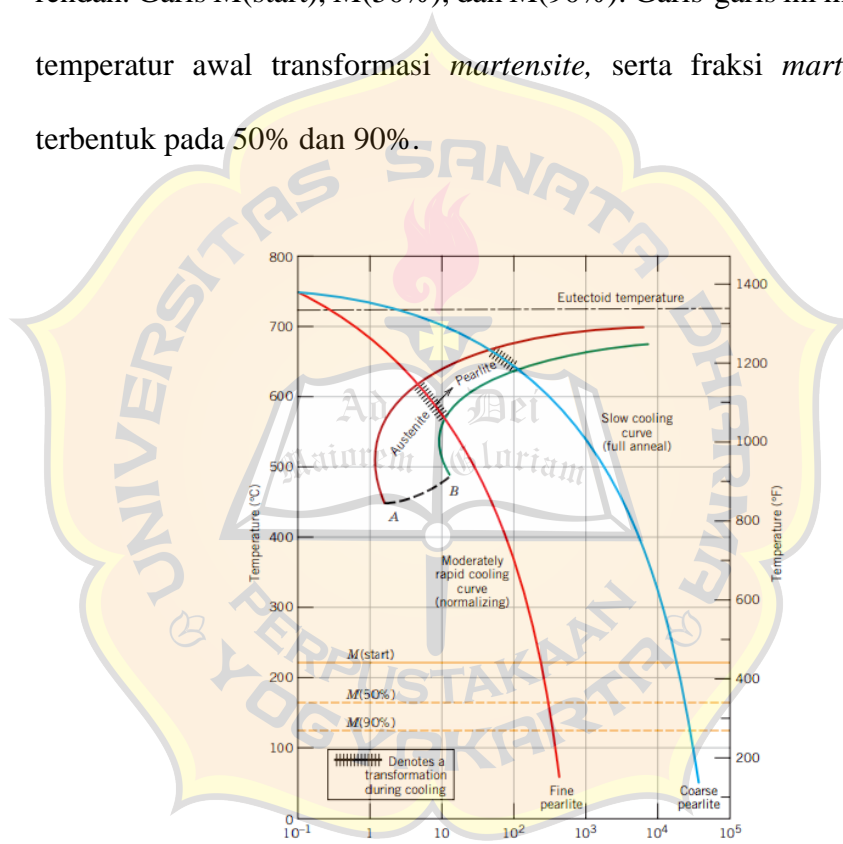
saat suhu terus berubah. Untuk pendinginan terus-menerus, waktu yang diperlukan untuk reaksi mulai dan berakhir tertunda.



Gambar 2. 1 Diagram *Continuous Cooling Transformation* (CCT)  
(Callister, 1991)

Dari Gambar 2.1 diagram tersebut, berisi beberapa informasi penting mengenai diagram CTT. Hal yang pertama yaitu kurva temperatur eutektoid, kurva horizontal pada bagian atas diagram menunjukkan temperature eutektoid yang merupakan temperature dimana transformasi austenite menjadi perlit terjadi. Terdapat transformasi fase yaitu menggambarkan transformasi fase yang terjadi selama proses pendinginan, terdapat tiga fase utama yang akan terbentuk yaitu; *austenite*, *perlite*, dan *martensit*. Dalam diagram tersebut akan diketahui laju pendinginan, terdapat dua kurva pendinginan yaitu pendinginan cepat (*continuous cooling transformation*) dan pendinginan lambat (*slow cooling*). Dari laju

pendinginan ini akan mempengaruhi mikrostruktur akhir yang terbentuk. Terdapat waktu transformasi untuk menunjukkan waktu dimana transformasi fase terjadi. Semakin lambat laju pendinginan, waktu transformasi juga semakin lama. Temperatur transformasi pada diagram tersebut untuk menunjukkan temperatur dimana transformasi fase terjadi. Semakin lambat laju pendinginan, temperatur transformasi cenderung lebih rendah. Garis M(start), M(50%), dan M(90%): Garis-garis ini menunjukkan temperatur awal transformasi *martensite*, serta fraksi *martensite* yang terbentuk pada 50% dan 90%.

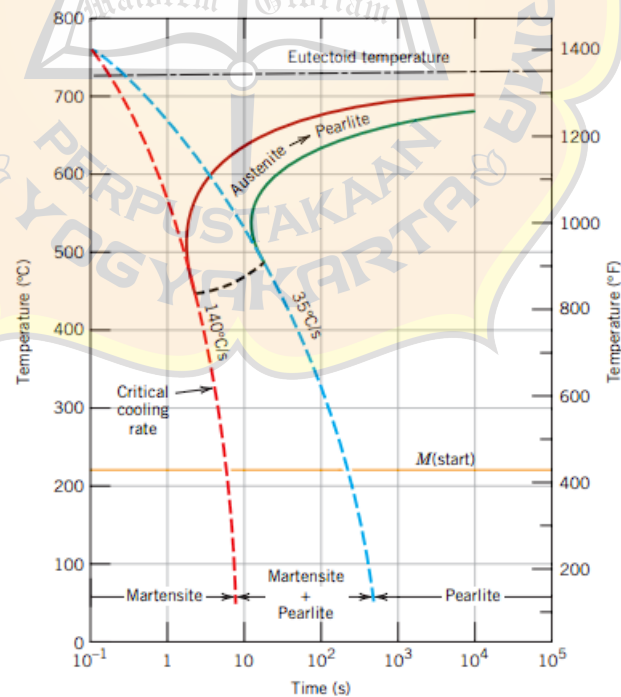


Gambar 2. 2 Diagram *Time Temperature Time* (TTT) pada pembentukan fasa *pearlite*

(Callister, 1991)

Diagram transformasi waktu suhu (TTT) untuk baja eutektoid menggambarkan perubahan struktur mikro dari fase *austenite* pada suhu tinggi menjadi struktur lain saat didinginkan ke suhu yang lebih rendah.

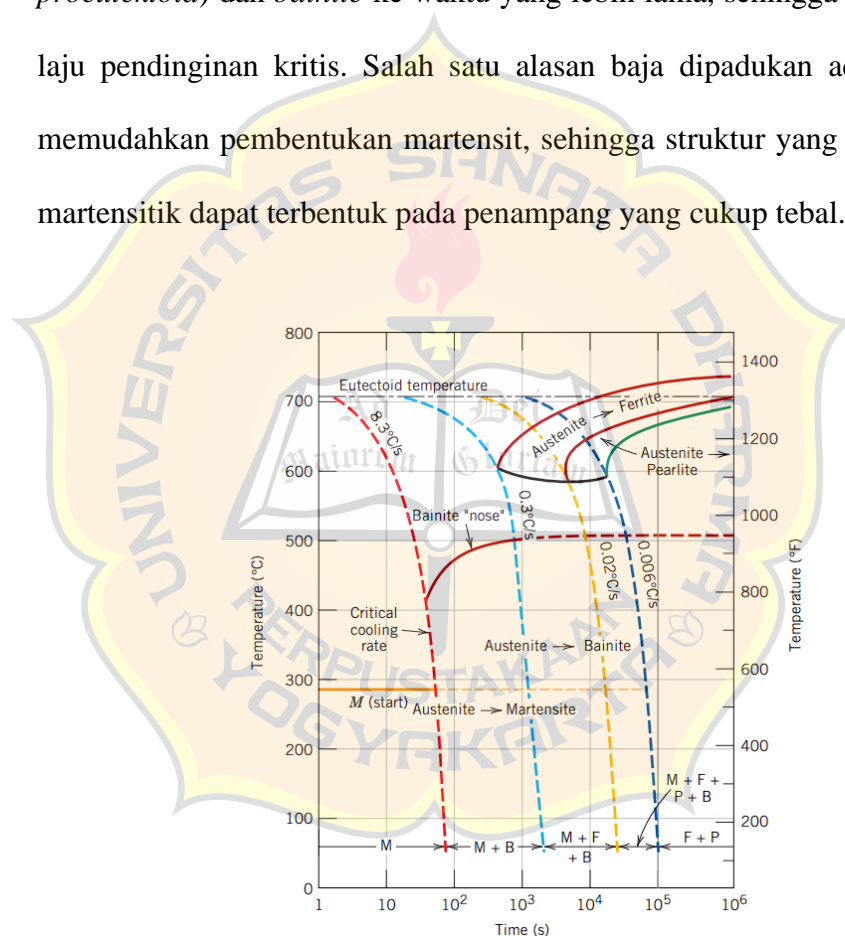
Sumbu horizontal (X) menunjukkan waktu pendinginan, sementara sumbu vertikal (Y) menunjukkan suhu. Garis merah dan hijau menunjukkan batas di mana *austenite* mulai berubah menjadi *pearlite*. Dengan pendinginan lambat, *pearlite* kasar terbentuk, sementara pendinginan lebih cepat menghasilkan pearlit halus. Pembentukan bainit tidak terjadi dalam pendinginan terus-menerus karena *austenit* sudah berubah menjadi *pearlite* sebelum suhu pembentukan *bainite* tercapai. Di bawah titik “nose,” kurva AB menunjukkan batas transformasi *austenite* – *pearlite*. Jika kurva pendinginan melewati AB, sisa *austenite* berubah menjadi *martensite* saat mencapai garis M(start). Diagram TTT ini membantu menentukan kondisi pendinginan untuk mendapatkan sifat mekanis baja yang diinginkan, seperti kekerasan pada *martensite* atau kelunakan pada *pearlite*.



Gambar 2. 3 Diagram *Time Temperature Time* (TTT) pada batas *martensite* dan *pearlite*

(Callister, 1991)

Seperti terlihat pada gambar 2.3, hanya *martensite* yang terbentuk jika laju pendinginan melebihi laju kritis. Terdapat rentang laju di mana baik pearlit maupun martensit dapat terbentuk. Pada laju pendinginan rendah, struktur yang sepenuhnya *pearlitic* akan terbentuk. Kehadiran karbon dan elemen paduan lainnya juga menggeser titik "nose" *pearlite* (termasuk fase *proeutektoid*) dan *bainite* ke waktu yang lebih lama, sehingga mengurangi laju pendinginan kritis. Salah satu alasan baja dipadukan adalah untuk memudahkan pembentukan martensit, sehingga struktur yang sepenuhnya martensitik dapat terbentuk pada penampang yang cukup tebal.



Gambar 2. 4 Pembentukan fasa berdasarkan laju pendinginan pada diagram fasa untuk jenis baja AISI 4140 (Callister, 1991)

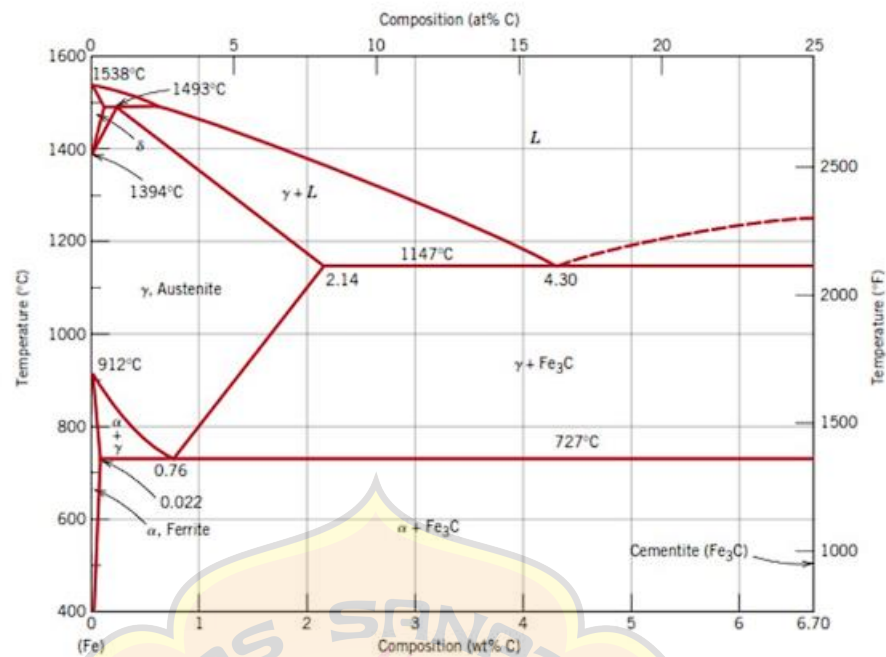
Pada gambar diagram 2.4, *Continuous-Cooling Transformation* (CCT) pada baja paduan menggambarkan pembentukan struktur mikro baja saat didinginkan dengan berbagai laju pendinginan. Diagram ini

memperlihatkan titik "*nose*" *bainite*, yang menunjukkan laju pendinginan di mana *bainite* dapat terbentuk selama proses perlakuan panas dengan pendinginan kontinu. Kurva yang ada dalam diagram ini menunjukkan laju pendinginan kritis yang diperlukan untuk mencegah terjadinya transformasi menjadi *perlite* atau *bainite*, serta memungkinkan pembentukan martensit secara langsung. Kehadiran elemen paduan seperti karbon, kromium, nikel, dan molibdenum dapat menurunkan laju pendinginan kritis, mempermudah pembentukan *martensite*, bahkan pada baja dengan penampang yang lebih tebal. Diagram CCT ini, serupa dengan diagram transformasi isothermal, berguna untuk memprediksi struktur mikro yang terbentuk setelah proses pendinginan dengan kecepatan tertentu, berdasarkan suhu dan waktu pendinginan yang diterapkan.

#### 2.4 Diagram Fase-Fe<sub>3</sub>C

Dalam diagram fase Fe-Fe<sub>3</sub>C terdapat dua jenis paduan karbon yaitu baja karbon dan besi cor. Baja karbon yang memiliki kandungan karbon dengan kisaran 0-1,4 wt%, sedangkan besi cor memiliki kandungan karbon berkisar pada 1,5 - 6,7 wt%. Tabel dibawah merupakan diagram fase Fe-Fe<sub>3</sub>C yang dijadikan dasar pengambilan keputusan variable suhu pada penelitian.





Gambar 2. 5 Diagram fase besi karbida (Fe – Fe<sub>3</sub>C)

(Callister, 1991)

Pada temperatur ruangan, besi murni dengan bentuk *alpha ferrite* memiliki struktur kristal BCC (*Body Centered Cubic*). Besi murni akan mengalami fase *austenite* dengan bentuk kristal FCC (*Face Centered Cubic*) pada saat besi murni dipanaskan sehingga temperatur 912°C. Fase *austenite* besi murni memiliki temperatur maksimal pada 1394°C dan memiliki titik leleh atau berubah wujud menjadi liquid pada temperatur 1535°C.

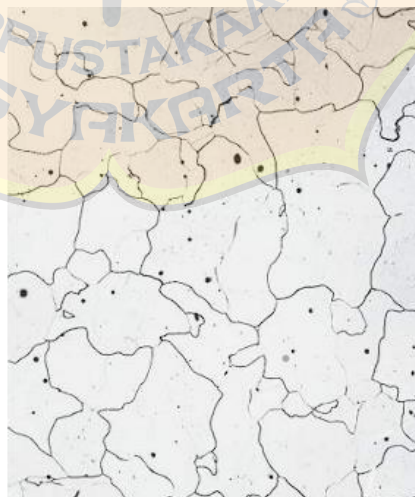
Pada diagram fase Fe-Fe<sub>3</sub>C terdapat titik yang menunjukkan tranformasi fase, yaitu pada titik *eutectoid* dan *eutectic*. Titik *eutectoid* berada pada temperatur ± 727°C dengan presentasi karbon ± 0,76 wt%, sedangkan titik *eutectic* terdapat pada temperatur ± 1147°C dengan presentasi karbon ± 4,3 wt%. Fase *alpha ferrite* terjadi Ketika baja dengan kelarutan karbon 0,22 wt% berada pada temperatur 727°C. Lalu pada

temperatur yang sama tetapi pada kelarutan yang sama tetapi pada kelarutan karbon 0,76 wt% terdapat fase *gamma austenite* dan pada temperatur 1147°C terjadi peningkatan karbon menjadi 2,14 wt% (Callister, 1991)

Berikut merupakan fase-fase yang dimiliki oleh paduan baja karbon:

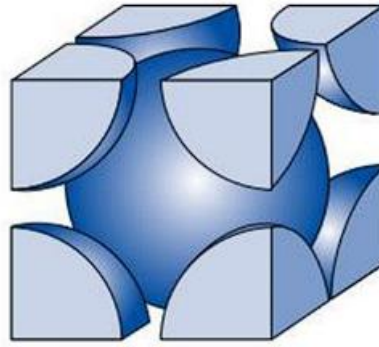
#### 2.4.1 *Ferrite* atau Besi- $\alpha$

*Ferrite* atau Besi- $\alpha$  merupakan salah satu fase pada baja karbon yang memiliki struktur kristal BBC (*Body Centered Cubic*) (Luis & Moncayo, 2008:844), maka ruang antara atom-atomnya adalah kecil dan padat sehingga atom karbon yang bisa tertampung hanya sedikit sekali. *Ferrite* memiliki nilai kelarutan karbon 0,022 wt% dan terjadi pada temperatur 727 °C. Sifat mekanik *ferrite* cenderung lunak dan ulet dikarenakan sedikitnya jumlah karbon yang terkandung (Callister,1991).



Gambar 2. 6 Struktur mikro *Ferrite* atau Besi- $\alpha$

(Callister, 1991)

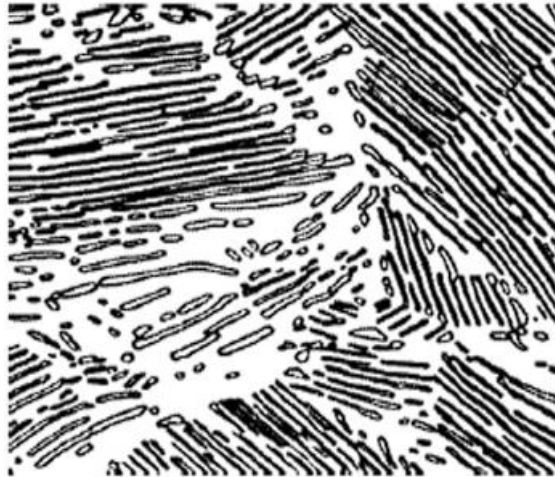


Gambar 2. 7 Struktur BCC (*Body Centered Cubic*)

(Callister, 1991)

#### 2.4.2 *Pearlite*

*Pearlite* merupakan fase gabungan dari fase *alpha-ferrite* dan *cementite* yang menjadi lapisan secara bergantian (atau *lamellae*) (Luis & Moncayo, 2008). Baja pada fase *pearlite* akan menjadi 100% ketika larutan karbon pada angka 0,76 wt%. Sifat mekanik *pearlite* ada diantara *ferrite* yang lunak dan ulet dan *cementite* yang keras dan getas (Callister, 1991). Dapat dilihat pada gambar dibawah yang merupakan contoh struktur mikro *pearlite*.



Gambar 2. 8 Struktur mikro *Pearlite*

(Callister, 1991)

#### 2.4.3 *Cementite*

*Cementite* atau yang biasa disebut dengan  $Fe_3C$  (Besi Karbida) terbentuk karena terjadinya difusi karbon dari batas butir *austenite* menuju ke bagian tengah butir dan berikatan dengan *Fe*. *Cementite* merupakan senyawa intermetalik yang sangat keras akan tetapi rapuh dan memiliki pengaruh yang signifikan Terhadap sifat-sifat baja (Kalpakjian, 2019). Gambar dibawah menunjukkan contoh struktur mikro *cementite* pada baj karbon 1,4 wt% C.

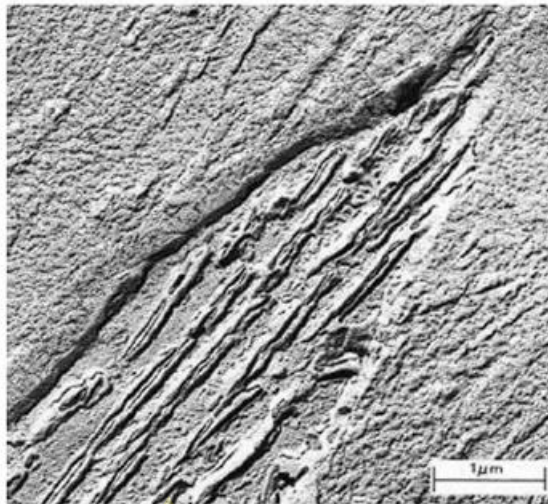


Gambar 2. 9 Struktur mikro *Cementite* pada baja karbon 1,4 wt% C

(Callister, 1991)

#### 2.4.4 *Bainite*

Struktur mikro *bainite* terbentuk melalui proses difusi yang melibatkan fase *ferrite* dan *cementite*. Detail struktur mikro *bainite* sangat halus sehingga hanya dengan mikroskop electron dapat melihat stukturanya. Tergantung pada temperatur transformasi, *bainite* dapat berbentuk jarum atau pelat (Callister, 1991). Gambar dibawah menunjukkan contoh gambar struktur mikro *bainite*.



Gambar 2. 10 Struktur mikro *Bainite*

(Callister, 1991)

#### 2.4.5 *Martensite*

*Martensite* merupakan transformasi dari *austenite* menjadi fase tunggal yang tidak seimbang tanpa adanya difusi. Transformasi *martensite* terjadi ketika laju pendinginan cukup cepat sehingga dapat mencegah terjadinya difusi karbon (Callister, 1991). *Austenite* yang laju pendinginannya tinggi, dapat merubah struktur atom nya dari FCC (*Face Centered Cubic*) menjadi BCT (*Body Centered Tetragonal*) yang menjadikan *martensite* memiliki sifat keras dan getas (Kalpakjian, 2009; Callister, 1991). Gambar dibawah menunjukkan contoh struktur mikro *mastensite*.





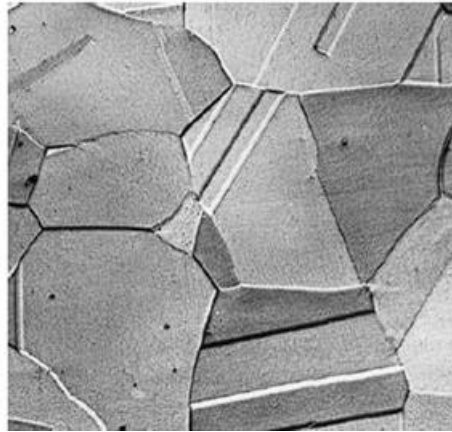
Gambar 2. 11 Struktur mikro *Martensite*

(Callister, 1991)

#### 2.4.6 $\gamma$ -Austenite

$\gamma$ (Gamma)-austenite merupakan fase *austenite* yang memiliki nilai kelarutan karbon yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan  $\alpha$ -ferrite, dan juga  $\gamma$ -austenite memiliki bentuk kristal FCC (*Face Centered Cubic*). Hasil tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi nilai kelarutan yang terkandung semakin tinggi temperatur yang dibutuhkan untuk memasuki fase *austenite*. Ketika baja karbon memiliki kelarutan karbon sebesar 0,76 wt% mencapai temperatur 1147 °C terjadi peningkatan karbon sebesar 2,14 wt% (Callister, 1991). Gambar dibawah merupakan contoh struktur mikro  $\gamma$ -austenite.





Gambar 2. 12 Struktur mikro  $\gamma$ -Austenite

(Callister, 1991)

## 2.5 Perlakuan Panas (*Heat Treatment*)

Perlakuan panas atau *heat treatment* merupakan kombinasi sebuah proses pemanasan atau pendinginan dari suatu logam atau paduannya dalam keadaan padat untuk mendapatkan sifat-sifat tertentu (Handoyo, Y., 2015). Perlakuan panas ini mempunyai beberapa tujuan seperti meningkatkan keuletan, menghilangkan *internal stress*, penyempurnaan ukuran butir, dan meningkatkan kekerasan atau kekuatan Tarik dan mencapai sebuah perubahan komposisi kimia dari permukaan logam seperti kasus-kasus pengerasan.

Adapula faktor-faktor atau variabel yang mempengaruhi proses perlakuan panas, seperti temperature pemanasan, *holding time*, laju pemanasan dan pendinginan, serta proses pendinginan (*quenching*) (Handoyo, Y., dikutip dari Rajan, 1994).

Berikut beberapa jenis perlakuan panas atau *heat treatment* yang dapat diberikan pada baja AISI 4140:

### 2.5.1 *Normalizing*

*Normalizing* merupakan perlakuan panas yang bertujuan untuk menghilangkan tegangan sisa akibat deformasi plastis dengan mendistribusikan ukuran butir agar lebih seragam. *Normalizing* dilakukan dengan pemanasan pada temperatur setidaknya 55°C (100F) diatas temperatur kritis atau garis A3, kemudian didinginkan di udara. Proses tersebut menghasilkan struktur mikro yang lebih halus dan seragam, yang meningkatkan sifat mekanis baja seperti kekuatan dan keuletan (Callister, 1991).

### 2.5.2 *Quenching*

*Quenching* salah satu proses perlakuan panas dimana suatu bahan, biasanya berupa material logam yang didinginkan dengan cepat dari suhu tinggi untuk mendapatkan sifat material tertentu. Tujuan dari quenching ini, baja akan mendapatkan fase *martensite* dari proses pendinginan baja yang sudah memasuki fase *austenite* dengan laju pendinginan cepat. Laju pendinginan cepat bertujuan supaya karbon tidak memiliki waktu untuk proses difusi dan karbon cenderung terperangkap pada area tertentu. Sedangkan ketika laju pendinginan lambat, proses *quenching* akan menghasilkan fase *pearlite* dan *bainite* dikarenakan terjadinya proses difusi.

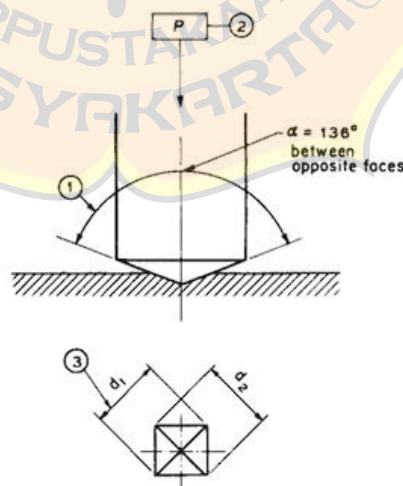
Dalam proses quenching, media pendingin yang umum digunakan yaitu air dan oli. Air sering digunakan karena mampu memberikan laju pendinginan yang cepat, yang diperlukan untuk menghasilkan struktur *martensite* yang keras. Namun, oli juga merupakan pendinginan yang sering digunakan secara umum khususnya dalam perlakuan panas baja paduan (Callister, 1991). Oli digunakan dalam perlakuan panas berbagai jenis baja paduan karena memberikan laju pendinginan yang lebih lambat dan terkontrol dibandingkan air, yang mengurangi risiko retak dan deformasi pada logam. Selain media pendingin, bentuk dan ukuran sebuah material juga memiliki pengaruh yang signifikan Terhadap terbentuknya fase *martensite*. Semakin besar luas permukaan dan volume material maka akan mempercepat laju pendinginannya, yang pada gilirannya meningkatkan efek pengerasan yang dihasilkan.

### 2.5.3 *Tempering*

*Tempering* yaitu suatu proses pemanasan kembali baja hingga mencapai temperatur dibawah temperatur kritis dan menahan temperatur tersebut sampai jangka waktu tertentu. Kemudian baja tersebut didinginkan menggunakan media udara. Proses *tempering* bertujuan dalam memperoleh keuletan dan ketangguhan pada sifat baja dan diterapkan pada baja yang telah mengalami proses *quenching* atau celup cepat (Thelning,1984).

## 2.6 Pengujian Kekerasan Vickers

Proses pengujian Vickers ini dilakukan dengan cara menekan benda uji atau spesimen dengan spesimen indenter yang berbentuk piramida dengan alas berbentuk segi empat dan besar sudut dari permukaannya berhadapan  $136^\circ$ . Sebelum dikembangkan pada tahun 1922, uji kekerasan Vickers ini dikenal sebagai uji kekerasan *pyramid diamond*. Nilai kekerasan Vickers ditunjukkan dengan huruf HV atau VHN (*Vickers Hardness Number*) (Kalpakjian, 2009). Nilai HV merupakan koefisien dari gaya uji dibandingkan dengan luas permukaan bekas tekan yang dihitung menggunakan sudut tertentu dari indenter. Proses pengujian Vickers ini dibagi menjadi dua tipe pengujian, yaitu; pengujian makro dan pengujian mikro. Pada pengujian makro menggunakan gaya penekanan dari 1 kgf sampai 120 kgf. Sedangkan pengujian mikro menggunakan gaya penekanan dari 15 g sampai 1000 g. (ASTM E92-16, 1997).



Gambar 2. 13 Indentor Piramida

(ASTM E92 – 82, 1997)

Proses awal pengujian makro kekerasan Vickers yaitu dengan permukaan dari sebuah spesimen ditekan dengan indenter yang berbentuk segi empat tersebut. Setelah ditekan dengan indenter tersebut, menghasilkan bekas yang akan diukur menggunakan lensa optik untuk mencari ukuran panjang dari setiap diagonalnya. Hasil nilai dari diagonal tersebut digunakan untuk menghitung nilai kekerasan dengan menggunakan persamaan berikut.

$$HV = \frac{2P \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{d^2} \quad (2.1)$$

$$HV = \frac{1,8544 \times P}{d^2} \quad (2.2)$$

Keterangan:

$\alpha$  = sudut dari indenter ( $136^\circ$ )

$P$  = beban yang diberikan (kg)

$d$  = diagonal rata-rata hasil indenter (mm)

Terdapat beberapa persyaratan untuk material atau spesimen yang akan diuji dalam melakukan pengujian kekerasan Vickers (ASTM E92 – 82, 1997), diantaranya berikut:

### 2.6.1 Ketebalan Spesimen

Ketebalan spesimen atau material harus sedemikian rupa tanpa adanya tonjolan atau tanda yang menunjukkan pengaruh beban muncul

pada sisi sampel yang berlawanan dengan lekukan. Ketebalan material harus setidaknya satu setengah kali panjang diagonal. (ASTM E92-82, 1997).

### 2.6.2 *Finishing* Spesimen

Permukaan spesimen atau material harus disiapkan sedemikian rupa sehingga setiap ujung diagonal hasil indentasi terlihat jelas dan dapat dibaca dengan presisi  $\pm 0,0005$  mm atau  $\pm 0,5\%$  dari panjang diagonal, mana yang lebih besar. Maka dari itu, proses *polishing* dan *grinding* sangat penting dalam mencegah perubahan mikrostruktur material akibat perlakuan mekanik (ASTM E92 – 82, 1997).

### 2.6.3 Kesejajaran Spesimen

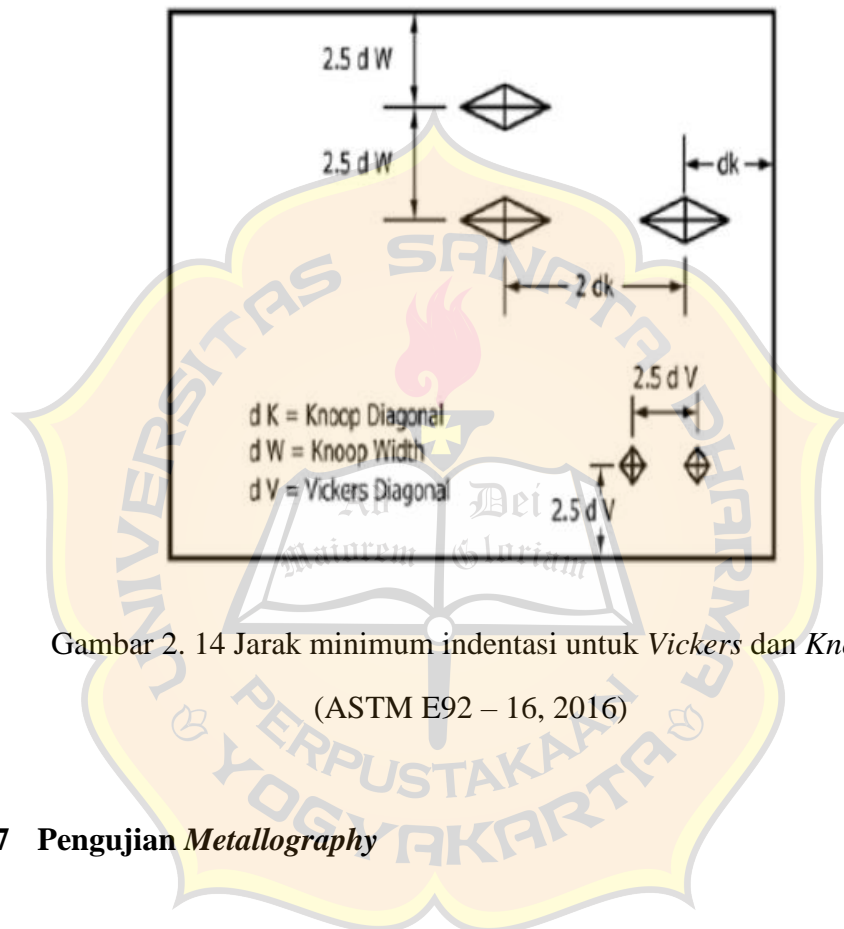
Spesimen atau material dipasang sedemikian rupa sehingga permukaannya tegak lurus terhadap sumbu indenter dalam  $1^\circ$  sudut. Sehingga, proses penggerindaan pada sisi berlawanan dari sisi pengujian diperlukan (ASTM E92 – 82, 1997).

### 2.6.4 Waktu Indentasi

Waktu dalam indentasi pengujian kekerasan makro selama 10 detik sampai 15 detik (ASTM E92 – 82, 2004).

### 2.6.5 Jarak Indentasi

Jarak indentasi meliputi jarak antar indentasi dan jarak antar indentasi dengan tepi bahan uji. Berikut contoh implementasi jarak indentasi (ASTM E92 – 82, 2004).



Gambar 2. 14 Jarak minimum indentasi untuk *Vickers* dan *Knoop*

(ASTM E92 – 16, 2016)

### 2.7 Pengujian *Metallography*

*Metallography* atau mikroskopi merupakan studi mikroskopik untuk mengetahui tentang karakteristik struktur logam atau paduan. Mikroskop menjadi salah satu alat yang penting dalam bidang metalurgi, baik dari sudut pandang ilmiah maupun teknis. Mikrostruktur akan mengungkapkan perlakuan mekanis dan termal yang diterima oleh logam tersebut, dan dapat memprediksi perilakunya di bawah kondisi tertentu. Tujuan utama



melakukan pengujian *metallography* ini untuk menghasilkan permukaan yang datar, bebas goresan dan seperti cermin (Sidney, 1974).

Secara umum mikroskop yang digunakan pada pengamatan struktur mikro metalurgi sama seperti mikroskop dalam pengamatan biologi. Namun terdapat suatu perbedaan yang sangat berbeda pada teknik pencahayaannya. Logam yang tidak tembus cahaya mengharuskan mikroskop metalurgi menggunakan sumber cahaya dari atas, sedangkan penggunaan mikroskop biologi umumnya menggunakan cahaya dari atas (Wibisono, 2021). Sebelum melakukan Pengamatan struktur mikro, spesimen atau material diberi beberapa perlakuan supaya ketika saat melakukan pengujian *metallography* dapat terlihat dalam mikroskop. Beberapa hal yang perlu diperhatikan sebelum melakukan pengamatan struktur mikro:

### 2.7.1 *Sampling*

*Sampling* merupakan proses pemilihan sampel uji logam. Dalam prosesnya, sampel harus diambil sedekat mungkin dengan area kegagalan dan dibandingkan dengan sampel dari bagian normal material untuk mendapatkan hasil yang akurat. Untuk material yang lunak, seperti logam *non-ferrous*, paduan, atau baja yang tidak dipanaskan, pemotongan dapat dilakukan dengan gergaji tangan manual. Namun, untuk material yang lebih keras, digunakan roda potong abrasif - cakram tipis dari bahan abrasif yang berputar dengan kecepatan tinggi. Selama pemotongan, sangat penting untuk menjaga spesimen tetap dingin agar tidak terjadi perubahan mikrostruktur yang dapat mempengaruhi hasil

analisis. Dari proses ini, dapat dipastikan bahwa sampel yang dipilih merepresentasikan kondisi sebenarnya dari material yang sedang diperiksa (Sidney, 1974).

### **2.7.2 *Rough Grinding***

*Rough Grinding* bertujuan untuk menciptakan permukaan sampel yang rata dan bebas dari cacat sebelum memasuki tahap pemolesan. Dengan menghilangkan goresan dalam dan ketidakrataan lainnya, kita membuka jalan untuk pengamatan mikrostruktur yang lebih jelas dan akurat (Sidney, 1974).

### **2.7.3 *Mounting***

*Mounting* bertujuan dalam menciptakan kondisi yang ideal bagi sampel sebelum dilakukan pengamatan mikroskopis. Hal tersebut dilakukan dengan menyatukan sampel dalam sebuah blok, sehingga dapat memastikan bahwa seluruh permukaan sampel terpapar secara merata selama proses pemolesan, dan menghasilkan pengamatan yang lebih akurat (Sidney, 1974).

### **2.7.4 *Intermediate Polishing***

Tahap *intermediate polishing* merupakan langkah awal dalam menentukan kualitas spesimen dalam persiapan sampel metalografi. Proses ini melibatkan penggosokan sampel secara bertahap menggunakan kertas amplas dengan tingkat kekasaran yang semakin

halus. Tujuan utama *intermediate polishing* untuk meratakan permukaan sampel dan menghilangkan goresan-goresan dalam yang terbentuk pada tahap sebelumnya. Penggunaan abrasif silikon karbida dengan pelumas, terutama untuk bahan yang lunak, dapat meningkatkan efisiensi proses dan mencegah kerusakan pada sampel (Sidney, 1974).

### 2.7.5 *Fine Polishing*

*Fine Polishing* merupakan tahap akhir dalam persiapan sampel metalografi yang bertujuan untuk menghasilkan permukaan yang sangat halus dan mengkilap. Proses ini melibatkan penggunaan roda berputar basah yang dilapisi kain khusus dan partikel abrasif berukuran sangat halus. Pemilihan jenis abrasif dan kain pemoles akan disesuaikan dengan jenis material sampel. Hasil akhir yang diharapkan adalah permukaan sampel yang bebas dari goresan dan siap untuk pengamatan mikroskopis (Sidney, 1974).

### 2.7.6 *Etching*

*Etching* memiliki peranan penting dalam mengungkap berbagai karakteristik struktural dari sebuah logam atau paduan. Tujuan dari *etching* yaitu membuat mikrostruktur logam terlihat dengan jelas dan permukaan yang rata, sehingga berbagai bagian dari mikrostruktur dapat dibedakan secara tepat (Sidney, 1974). Jika fase lebih dari satu atau logam paduan akan menghasilkan permukaan yang tidak rata,

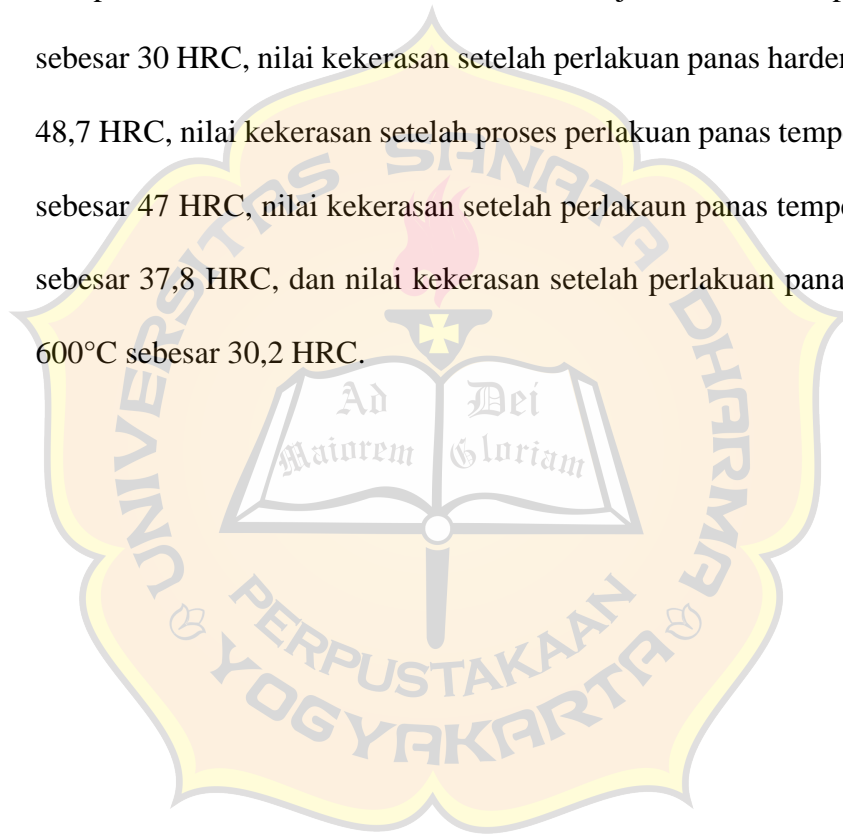
dikarenakan laju korosi yang dimiliki setiap fase berbeda-beda pada setiap area permukaan (Alkarim, 2019).

## 2.8 Tinjauan Pustaka

Penelitian yang dilakukan oleh Aria Narendra Adhi (2020) yang berjudul “Optimasi Parameter Perlakuan Panas Terhadap Kekerasan Baja AISI 4140 Dengan Metode Taguchi Untuk Aplikasi Poros Pompa Sentrifugal Multistage” bertujuan untuk menganalisis kombinasi parameter yang dapat menghasilkan kekerasan optimum serta persentase kontribusi setiap parameter terhadap hasil akhir. Proses perlakuan panas yang dilakukan pada penelitian ini adalah *Austenisasi*, *Quenching*, dan *Tempering*. Pada proses *austenisasi* pemanasan terhadap spesimen dilakukan pada suhu 877°C dan proses *tempering* pada suhu 545°C kemudian didinginkan menggunakan brine (larutan garam). Pada spesimen-spesimen yang telah mengalami proses perlakuan panas tersebut dilakukan pengujian *vickers* untuk mengukur dan mengevaluasi kekerasan material AISI 4140. Hasil dari penelitian ini perlakuan panas yang menggunakan parameter optimum menghasilkan kekerasan baja sebesar 276,75 HV. (Sidney, 1974) (Sidney, 1974)

Penelitian yang dilakukan oleh Risno Fendi, dkk (2018) yang berjudul “Analisis Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Baja AISI 4140 Akibat Perbedaan Temperatur pada Perlakuan Panas Tempering” bertujuan untuk mengetahui perlakuan panas *tempering* Terhadap sifat mekanik material, termasuk kekerasan, kekuatan tarik dan ketangguhan, serta

mengamati perubahan struktur mikro baja setelah perlakuan panas. Proses perlakuan panas yang dilakukan pada penelitian ini adalah *tempering* dan *hardening*. Pada proses *tempering* pemanasan terhadap spesimen dilakukan pada suhu 200°C, 400°C, dan 600°C. Pada spesimen-spesimen yang telah mengalami proses perlakuan panas tersebut dilakukan pengujian *rockwell* untuk mengetahui ketangguhan dan kekerasan pada baja AISI 4140. Hasil dari penelitian ini nilai rata-rata kekerasan baja AISI 4140 tanpa perlakuan sebesar 30 HRC, nilai kekerasan setelah perlakuan panas *hardening* sebesar 48,7 HRC, nilai kekerasan setelah proses perlakuan panas *tempering* 200°C sebesar 47 HRC, nilai kekerasan setelah perlakuan panas *tempering* 400°C sebesar 37,8 HRC, dan nilai kekerasan setelah perlakuan panas *tempering* 600°C sebesar 30,2 HRC.

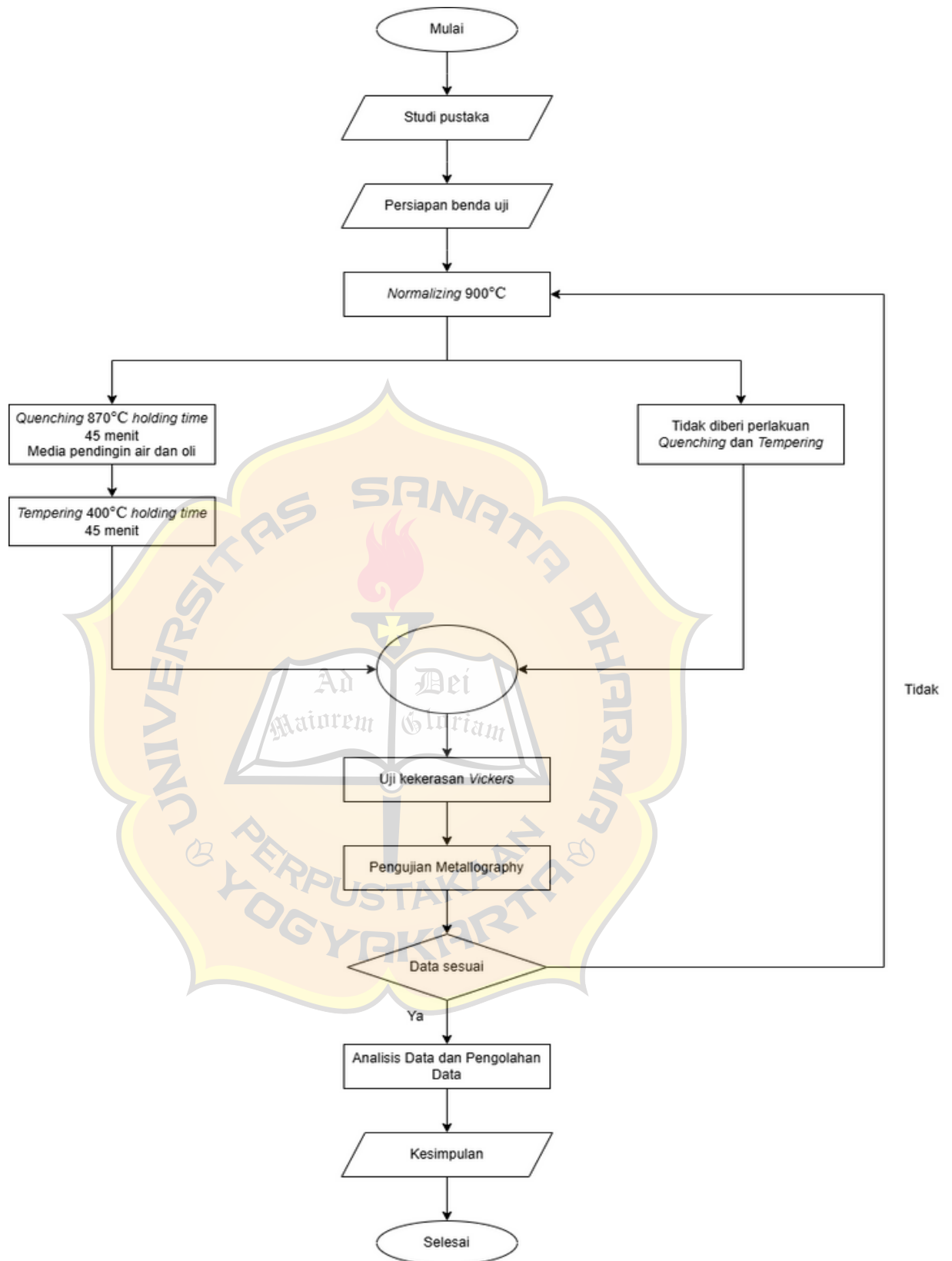


## BAB III

### METODE PENELITIAN

#### 3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode pengujian eksperimental seperti pengamatan struktur mikro dan pengujian kekerasan. Gambar 3.1 menunjukkan skema diagram alir pengujian. Penelitian dimulai dengan mencari referensi studi pustaka, persiapan benda uji, normalizing, quenching dan tempering, pengujian kekerasan Vickers, serta pengujian metallography. Terdapat tujuh sampel uji dalam penelitian ini, enam di antaranya diberi perlakuan panas quenching dan tempering pada temperatur 870°C untuk quenching dan 400°C untuk tempering. Keenam sampel tersebut dibagi menjadi tiga kali percobaan, sehingga satu percobaan menghasilkan dua sampel untuk perbandingan laju pendinginan dari media pendingin. Setelah proses quenching dilakukan holding time 45 menit, spesimen didinginkan dengan media oli dan air, lalu kembali dipanaskan (tempering) dengan holding time 45 menit dan didinginkan kembali dengan udara. Proses dilanjutkan dengan pengujian metallography untuk mengetahui struktur mikro permukaan spesimen dan mencari nilai kekerasan menggunakan mesin uji kekerasan Vickers. Setelah pengujian metallography dan nilai kekerasan diketahui, tahapan selanjutnya adalah analisis data. Penelitian ini sepenuhnya dilakukan di Laboratorium Ilmu Logam Universitas Sanata Dharma Yogyakarta.

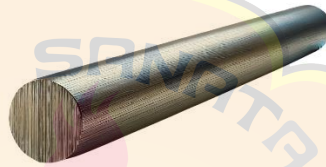


Gambar 3. 1 Skema diagram alir penelitian



### 3.2 Baja AISI 4140

Dalam penelitian ini menggunakan material uji baja karbon sedang AISI 4140 dengan kadar karbon sebesar 0,43wt% pada awalnya dalam bentuk silindris pejal dengan diameter 3,2 cm dan panjang 25 cm seperti pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Baja silindris pejal AISI 4140

### 3.3 Media *Quenching*

Dalam penelitian ini menggunakan media pendingin berupa oli dan air. Oli yang digunakan yaitu SAE 20W – 50 seperti pada Gambar 3.3.



Gambar 3. 3 Oli SAE 20W – 50

### 3.4 Larutan Etsa

Dalam penelitian ini menggunakan larutan etsa yang berbahan dasar asam nitrat ( $\text{HNO}_3$ ) dengan konsentrasi larutan 100% dan alkohol dengan konsentrasi larutan 96%. Pemilihan larutan etsa ini berdasarkan material bahan uji yaitu baja. Gambar 3.4 merupakan larutan yang digunakan etsa dalam penelitian penulis.

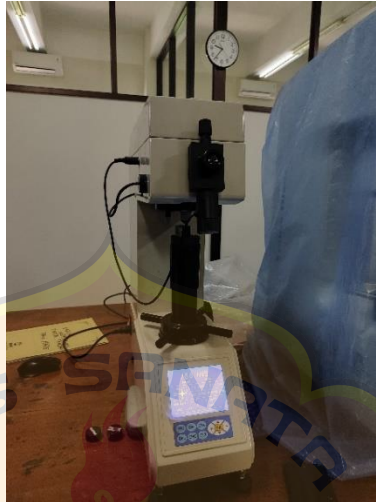


Gambar 3. 4 Larutan  $\text{HNO}_3$  100% dan alkohol 96%

### 3.5 Mesin Uji Kekerasan Vickers

Dalam penelitian ini menggunakan mesin uji kekerasan Vickers dengan mode DHV – 50D untuk mengetahui nilai kekerasan pada setiap sampel uji baja AISI 4140. Model DHV – 50D memiliki beberapa fitur seperti pemrograman, mikroskop, *metallography* dan sistem digital sehingga memudahkan pada saat proses pengujian berlangsung. Nilai kekerasan akan muncul secara otomatis atau dapat diartikan secara otomatis

menghitung nilai kekerasan Vickers pada layar monitor. Gambar 3.5 menunjukkan alat uji kekerasan Vickers yang akan digunakan dalam penelitian.



Gambar 3. 5 Mesin uji kekerasan Vickers DHV – 50D

### 3.6 *Furnace / Tungku*

*Furnace* atau tungku merupakan alat untuk memanaskan sampel uji. *Furnace* dengan tipe Ney m255 seri II dengan sumber daya listrik bertegangan 120 V memiliki kemampuan mengeluarkan panas bertemperatur  $\pm 1200^{\circ}\text{C}$ . *Furnace* ini dilengkapi dengan fitur tombol putaran temperatur (tombol *power*) yang berfungsi mengatur kecepatan proses pemanasan dan juga ada lampu indicator yang berfungsi sebagai penanda bahwa proses pemanasan sedang berlangsung. Gambar 3.6 menunjukkan tungku tipe Ney m255 seri II yang akan digunakan dalam penelitian.



Gambar 3. 6 Furnace / Tungku tipe Ney M525 seri II

### 3.7 Termometer

Termometer berfungsi sebagai alat untuk mendeteksi atau membaca suhu selama berlangsungnya proses *normalizing*, *quenching*, dan *tempering*. Alat ini dilengkapi dengan sistem sensor digital yang berfungsi sebagai pengukur suhu, yang dikenal dengan istilah termokopel. Termokopel ditempatkan di bagian tengah tungku dan berperan sebagai penerima panas, dengan kabel yang mengalir melalui bagian atas tungku. Dalam penelitian ini, digunakan termometer digital SANFIX GM1312, yang memiliki opsi pengukuran dalam satuan *Celsius* dan *Fahrenheit*, dengan batas maksimal pengukuran hingga 1372°C dan tingkat akurasi sebesar  $\pm 0,1\% + 0,6^\circ\text{C}$ . Gambar 3.4 dan Gambar 3.5 memperlihatkan detail termokopel yang akan digunakan dalam penelitian.



Gambar 3. 7 Termometer

### 3.8 Mesin *Polishing*

Mesin *polishing* merupakan alat yang digunakan untuk mengamplas, meratakan, dan menghaluskan permukaan sampel uji sebelum memasuki tahap pengujian *metallography*. Dalam penelitian ini, mesin *polishing* yang digunakan adalah model TNP-2020FRX, yang memiliki spesifikasi kecepatan putaran 50-800 rpm serta beberapa pilihan tingkat kekasaran, yaitu 800, 1500, dan 2000. Amplas berbentuk persegi dari pabrik dipotong menjadi bentuk lingkaran agar sesuai dengan ukuran roda *polishing* pada mesin. Selama proses *polishing*, sampel uji perlu dialiri air untuk mengurangi efek panas dan mencegah terjadinya goresan yang tidak diinginkan pada sampel. Gambar 3.6 memperlihatkan foto mesin *polishing* model TNP - 2020FRX yang akan digunakan dalam penelitian.



Gambar 3. 8 Mesin Polishing TNP – 2020 FRX

### 3.9 Mikroskop Optik

Mikroskop optik merupakan alat yang digunakan untuk mengamati struktur mikro pada sampel uji. Pada penelitian ini menggunakan mikroskop optik seri Union Tokyo 2900 dengan fitur perbesaran M 10/0,25; M 200/0,40; M40/0,65; dan M100/0.9 dan fitur intensitas cahaya dengan memutar tombol intensitas cahaya. Gambar 3.7 merupakan foto mikroskop yang akan digunakan dalam penelitian.



Gambar 3. 9 Mikroskop Optik Union Tokyo 2900

### 3.10 Pembuatan Spesimen / Benda Uji

Baja karbon sedang AISI 4140 yang digunakan sebagai material spesimen benda uji awalnya berbentuk besi pejal dengan diameter 3,2 cm dan panjang 25 cm. Proses pembuatan spesimen diawali dengan pemotongan besi pejal menjadi tujuh spesimen dengan panjang masing masing 2,5 cm menggunakan gergaji mesin otomatis. Setelah pemotongan benda uji, dilakukan proses *facing* untuk mendapatkan spesimen yang rata, tidak cembung atau pun cekung dan tidak miring. Proses *facing* dilakukan menggunakan mesin bubut konvensional. Akibat proses *facing*, panjang spesimen dari 2,5 cm menjadi 2,2 cm. Gambar 3.11 merupakan bentuk akhir spesimen yang akan digunakan dalam pengujian.



Gambar 3. 10 Spesimen Uji Baja AISI 4140

### 3.11 Perlakuan Panas *Normalizing*

Menurut ASM Handbook vol. 4, 2017, temperatur pemanasan *normalizing* untuk AISI 4140 pada 900°C dengan *holding time* 45 menit. Ketujuh spesimen uji diberi perlakuan *normalizing* untuk menghilangkan tegangan sisa dari proses sebelumnya atau bahkan saat proses *machining*



nya. Setelah dipanaskan dalam tungku atau *furnace*, spesimen didinginkan dengan udara terbuka tanpa adanya aliran kalor paksa.

### 3.12 Proses Quenching

Proses perlakuan panas *quenching* merupakan proses memanaskan spesimen uji di atas temperatur kritis. Temperatur *quenching* yang digunakan dalam penelitian ini yaitu 870°C dengan *holding time* 45 menit. *Holding time* 45 menit dapat diartikan dengan menahan temperatur ketika mencapai 870°C selama 45 menit. Tujuan dari *holding time* untuk memberi waktu pada spesimen dalam pembentukan struktur *austenite* secara merata dan setelah itu didinginkan dengan cepat untuk mengubah struktur *austenite* menjadi *martensite*. *Holding time* 45 menit tersebut diperlukan karena kadar karbon yang sedang memerlukan waktu lebih untuk membentuk struktur *austenite* secara merata. Terbentuknya *martensite* merupakan tujuan dari proses *quenching* ini, yaitu menambah sifat keras dan getas pada spesimen uji.

### 3.13 Pengujian Metallography

Pengujian *metallography* bertujuan untuk mengamati fenomena struktur mikro pada spesimen uji. Tahapan pengujian ini dimulai dengan persiapan permukaan spesimen uji yang harus rata dan tidak boleh cembung, cekung, atau miring. Untuk mendapatkan permukaan yang rata, spesimen melewati proses *polishing*. Kemudian, dilakukan proses *polishing* ulang menggunakan pasta korosif untuk menghilangkan bekas goresan dari

proses *polishing* sebelumnya, sehingga permukaan menjadi halus dan mengkilap seperti cermin. Tahap selanjutnya adalah pengetsaan, yang dilakukan dengan mencelupkan spesimen ke dalam larutan campuran HNO<sub>3</sub> 100% dan alkohol 95% sampai permukaan spesimen tampak buram, tidak mengkilap, atau berwarna abu-abu. Proses pengetsaan ini bertujuan untuk mengkorosi permukaan spesimen agar struktur mikro yang terbentuk dapat diamati di bawah mikroskop. Setelah proses pengetsaan, spesimen dibilas dengan air untuk menghentikan korosi. Tahap akhir adalah pengamatan struktur mikro menggunakan mikroskop dengan perbesaran lensa M 5/0,10 (50x); M 10/0,25 (100x); M 20/0,40 (200x); dan M 40/0,65 (400x).

### 3.14 Pengujian Kekerasan Vickers

Pada penelitian ini, digunakan pengujian kekerasan metode Vickers untuk mencari nilai kekerasan melalui proses indentasi indenter pada suatu titik permukaan spesimen uji. Mesin uji kekerasan Vickers memiliki program rumus yang secara otomatis menghitung nilai kekerasan menjadi angka. Pengujian kekerasan Vickers menggunakan indenter jenis intan dengan ukuran diagonal  $\pm 3$  mm dan sudut kemiringan 136°. Interval waktu penekanan selama 10 detik dengan beban penekanan 10 kg. Pemilihan waktu dan beban penekanan disesuaikan dengan jenis dan komposisi material spesimen uji. Sebelum proses pengujian kekerasan dilakukan, permukaan spesimen uji dipoles kembali menggunakan autosol dengan tujuan permukaan spesimen uji kembali mengkilap. Permukaan yang

mengkilap menunjukkan bahwa permukaan itu rata sehingga diagonal 1 dan diagonal 2 dari bekas bola indentasi dapat terlihat serta dapat diukur.

Proses uji kekerasan Vickers dimulai dengan meletakkan spesimen uji pada meja kerja mesin uji. Langkah berikutnya adalah menentukan bagian permukaan yang akan dikenakan proses indentasi. Ketika bagian permukaan sudah ditentukan, menekan tombol *start* untuk memulai proses indentasi pada permukaan. Selama proses indentasi berjalan, layar akan menunjukkan tombol peringatan atau tanda seru hingga proses indentasi selesai. Setelah proses indentasi selesai, langkah berikutnya adalah mengukur panjang diagonal 1 dan diagonal 2. Perhitungan panjang diagonal indentasi secara otomatis akan diolah oleh mesin hingga menjadi nilai kekerasan Vickers. Proses indentasi dilakukan dari bagian kiri permukaan spesimen hingga bagian kanan permukaan spesimen dengan lima titik indentasi, tujuannya menghitung persebaran tingkat kekerasan pada permukaan spesimen.

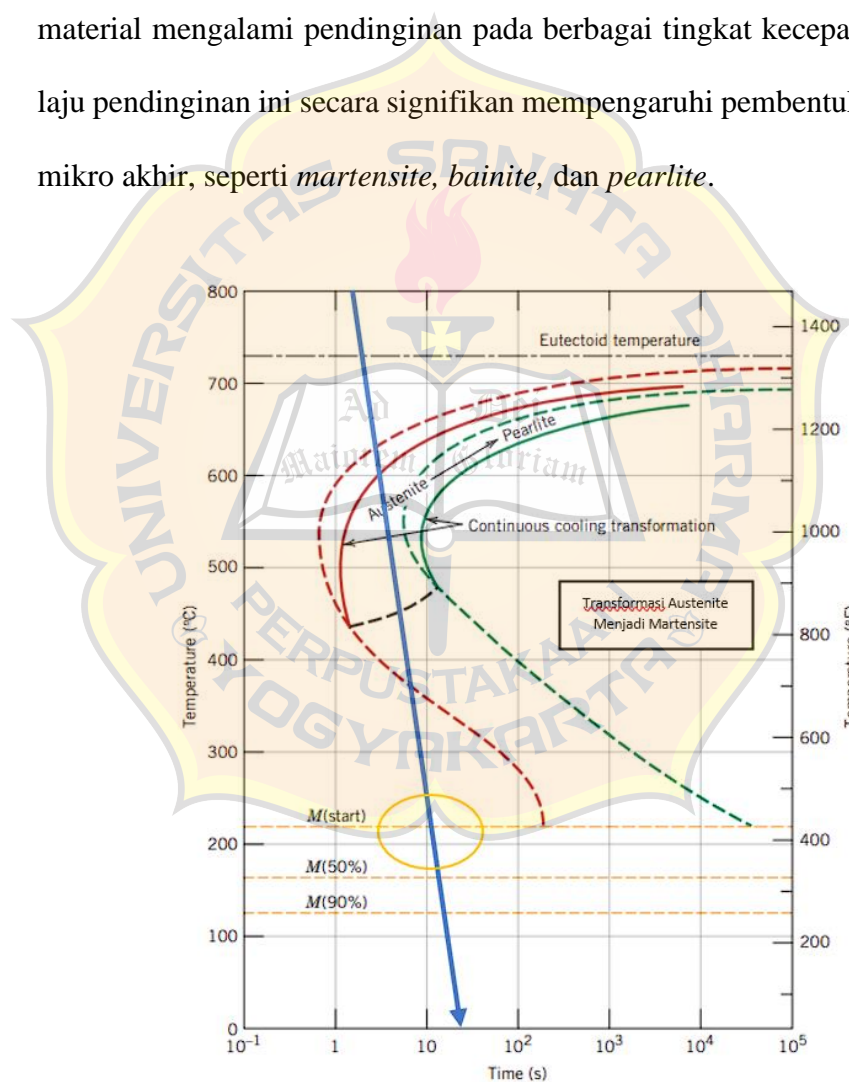
## BAB IV

### PEMBAHASAN

Pada bab ini mengeksplorasi hasil berupa pengaruh kecepatan pendinginan terhadap karakteristik kekerasan dan struktur mikro baja AISI 4140. Baja karbon tersebut sebelumnya diberikan perlakuan panas (*heat treatment*) untuk diubah strukturnya, lalu didinginkan dengan berbagai laju pendinginan. Proses pendinginan tersebut, nantinya diamati menggunakan diagram *continuous cooling transformation* (CCT) untuk memahami transformasi perubahan fasa yang terjadi. Kecepatan proses pendinginan tersebut akan membuktikan faktor krusial dalam menentukan karakteristik akhir dari sebuah material. Variasai dalam laju pendinginan menghasilkan beragam struktur mikro, seperti *martensite*, *bainite* atau *pearlite*, setiap struktur mikro tersebut memberikan kontribusi berbeda terhadap sifat mekanis baja. Karakterisasi mikrostruktur dilakukan menggunakan mikroskop optik yang terintegrasi dengan sistem pencitraan, sehingga menghasilkan dokumentasi dalam format gambar dua dimensi. Tahap terakhir yaitu berfokus pada evaluasi kekerasan material dengan menggunakan metode kekerasan Vickers. Pengambilan data kekerasan dilakukan pada lima titik berbeda di permukaan baja AISI 4140 untuk mendapatkan gambaran menyeluruh tentang sebaran nilai kekerasan material. Semua hasil pengukuran kekerasan dicatat dan disusun dalam bentuk tabel yang menunjukkan nilai kekerasan di setiap titik pengujian. Dari data tersebut kemudian dihitung nilai kekerasan rata-rata dan dibandingkan hasilnya berdasarkan jenis pengujian yang telah dilakukan.

#### 4.1 Diagram Continuous Cooling Transformation (CCT) setelah Proses Quenching – Tempering

Pada bagian awal ini yaitu mengamati transformasi fasa yang terjadi pada baja karbon AISI 4140 selama proses *quenching-tempering* melalui diagram *Continuous Cooling Transformation* (CCT). Diagram ini berperan dalam menggambarkan perubahan mikrostruktur yang berlangsung ketika material mengalami pendinginan pada berbagai tingkat kecepatan. Variasi laju pendinginan ini secara signifikan mempengaruhi pembentukan struktur mikro akhir, seperti *martensite*, *bainite*, dan *pearlite*.

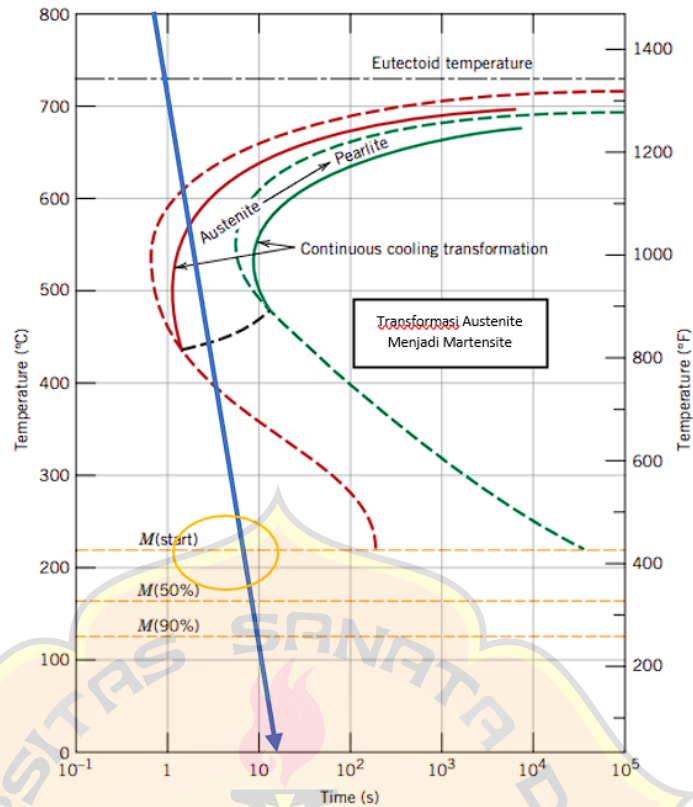


Gambar 4. 1 Diagram CCT Pengujian A1

Berdasarkan hasil penelitian yang terdapat pada Gambar 4.1, transformasi fasa baja AISI 4140 selama proses pendinginan

dipengaruhi oleh laju pendinginan yang diterapkan. Garis panah biru menunjukkan laju pendinginan yang terjadi pada baja selama *quenching*. Struktur awal AISI 4140 berada pada *austenite*, dari struktur tersebut *austenite* secara langsung bertransformasi menjadi *martensite* tanpa sebelumnya menjadi *pearlite* atau *bainite*. Proses perubahan struktur tersebut terlihat jelas karena garis laju pendinginan tidak melewati wilayah *pearlite* (garis hijau) ataupun *bainite* (diantara garis merah dan hijau) melainkan secara langsung masuk ke wilayah transformasi *martensite*.

Pada diagram, suhu ini berada sekitar 200 °C untuk baja AISI 4140. Saat suhu terus menurun, jumlah martensit yang terbentuk bertambah, mencapai 50% pada garis M(50%) dan sekitar 90% pada garis M(90%). Pembentukan *martensite* biasanya selesai di bawah suhu M(90%), dan struktur *martensite* yang dominan akan terbentuk di dalam baja setelah pendinginan selesai. Proses *quenching-tempering* ini menghasilkan *martensite* sebagai fasa dominan pada baja AISI 4140, yang sangat berguna untuk aplikasi yang memerlukan kekerasan tinggi meskipun sifatnya cenderung lebih getas dibandingkan dengan *pearlite* atau *bainite*.

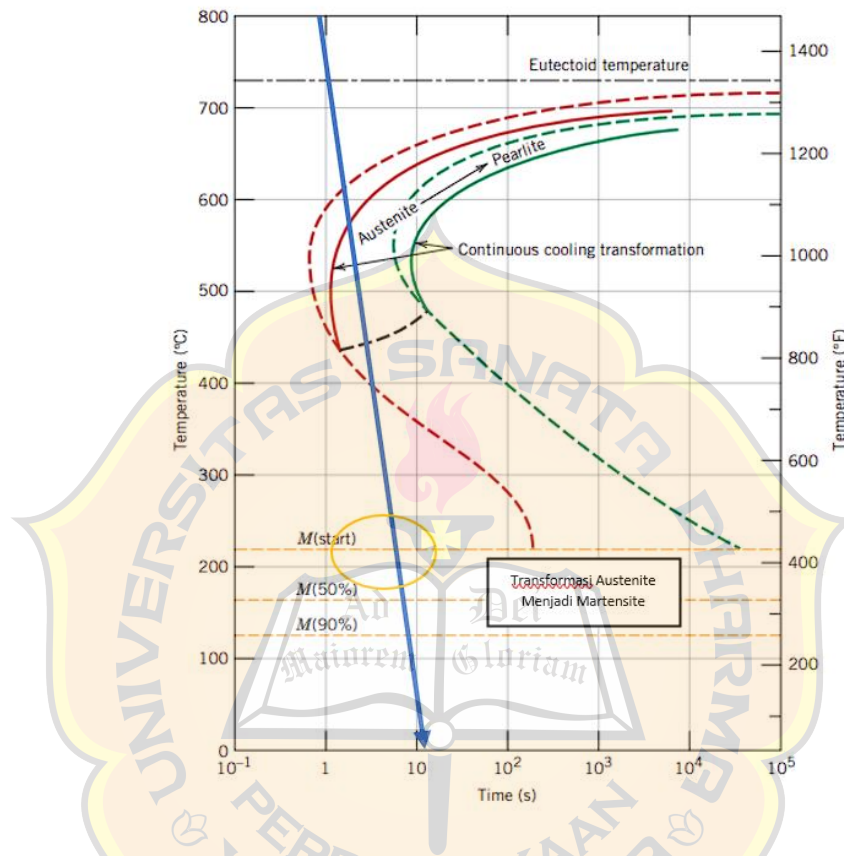


Gambar 4. 2 Diagram CCT Pengujian A2

Berdasarkan hasil penelitian yang terdapat pada Gambar 4.2, kurva pendinginan yang ditunjukkan oleh garis biru dalam diagram CCT tersebut memperlihatkan bahwa laju pendinginan terjadi sangat cepat. Proses tersebut terlihat dimana garis memotong zona transformasi *martensite* tanpa melewati daerah pembentukan *pearlite* atau *bainite*. Transformasi *martensite* dimulai pada saat temperature sekitar 250°C (M-start), yang tercatat pada detik ke-6 dengan temperatur 251,6°C. Proses transformasi terus berlanjut melewati M(50%) hingga M(90%) yang ditandai dengan penurunan temperatur dari 190,8°C pada detik ke-7 hingga mencapai 108°C pada detik ke-10. Karakteristik pendinginan yang sangat cepat ini menghasilkan struktur mikro yang didominasi oleh fasa *martensite*, yang terbentuk akibat tidak adanya waktu yang cukup bagi karbon untuk



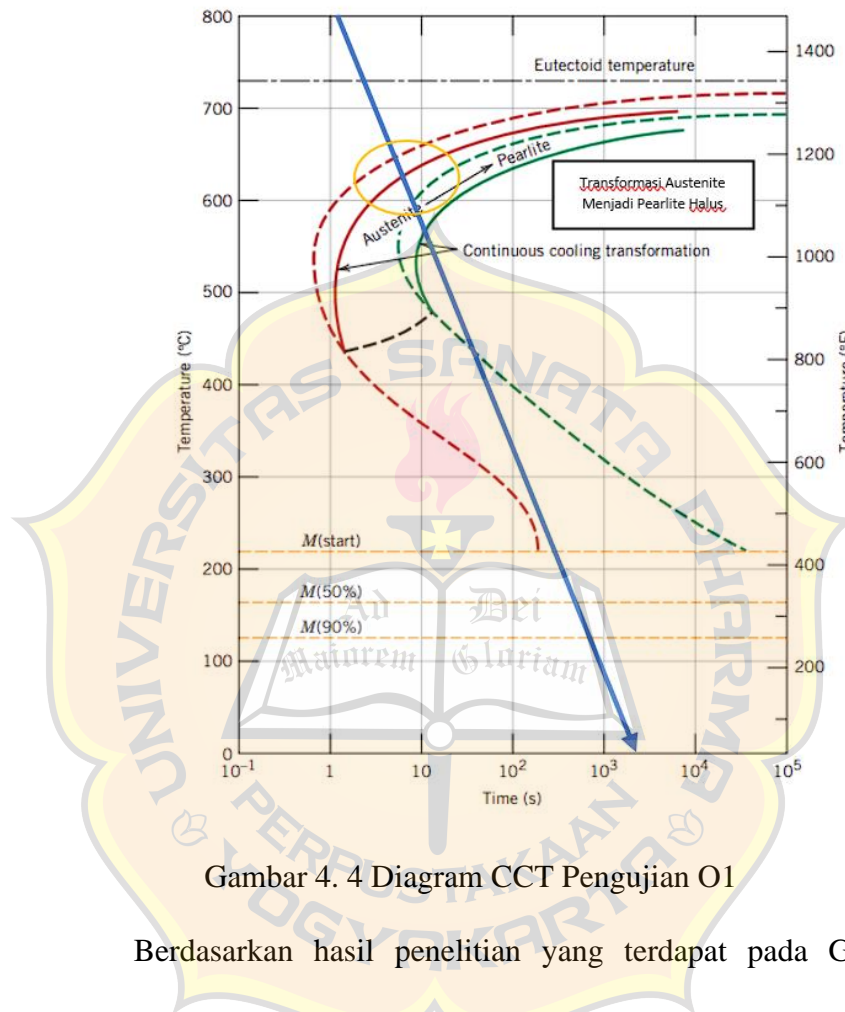
berdifusi membentuk struktur *pearlite* atau *bainite*. Hal ini sesuai dengan tujuan proses *quenching-tempering* untuk mendapatkan struktur *martensite* yang keras dan kuat pada baja AISI 4140.



Gambar 4. 3 Diagram CCT Pengujian A3

Berdasarkan hasil penelitian yang terdapat pada Gambar 4.3, dapat diamati bahwa transformasi fasa berlangsung dengan karakteristik pendinginan yang sangat cepat. Garis biru yang menurun tajam menunjukkan jalur pendinginan spesifik yang diterapkan pada baja selama proses *quenching-tempering* menggunakan media pendingin air. Laju pendinginan yang sangat cepat ini menyebabkan baja melewati area transformasi *pearlite* dan *bainite* di diagram CCT, dan memasuki zona martensit (M(start), M(50%), M(90%)), yang berada di bawah suhu sekitar

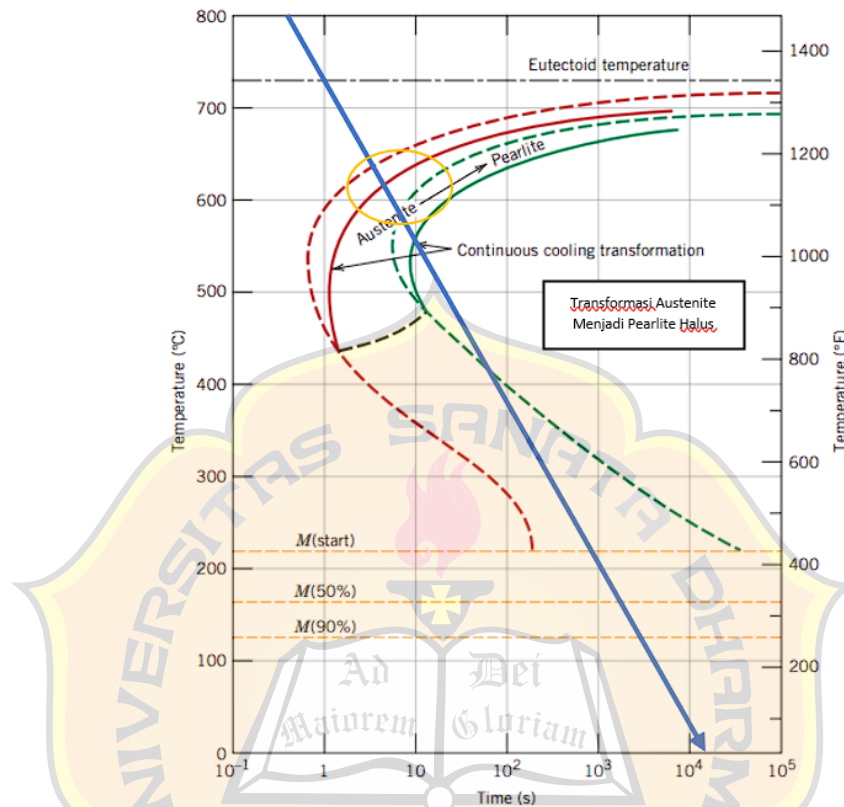
200 °C. Hal ini menghasilkan terbentuknya struktur *martensite* yang keras dan getas dalam baja, yang diinginkan untuk meningkatkan kekuatan dan kekerasan material.



Gambar 4. 4 Diagram CCT Pengujian O1

Berdasarkan hasil penelitian yang terdapat pada Gambar 4.4, menunjukkan perubahan fase dari transformasi *austenite* menjadi *pearlite* halus dengan menggunakan media pendingin berupa oli. Berdasarkan Gambar 4.4, struktur *pearlite* halus ini terbentuk karena pendinginan yang berlangsung berjalan cukup lambat sehingga memberikan waktu yang cukup untuk *austenite* bertransformasi secara difusi. Seiring dengan berjalannya waktu, laju pendinginan ini tetap berada di dalam batas-batas area transformasi, sehingga *austenite* mengalami pembentukan struktur

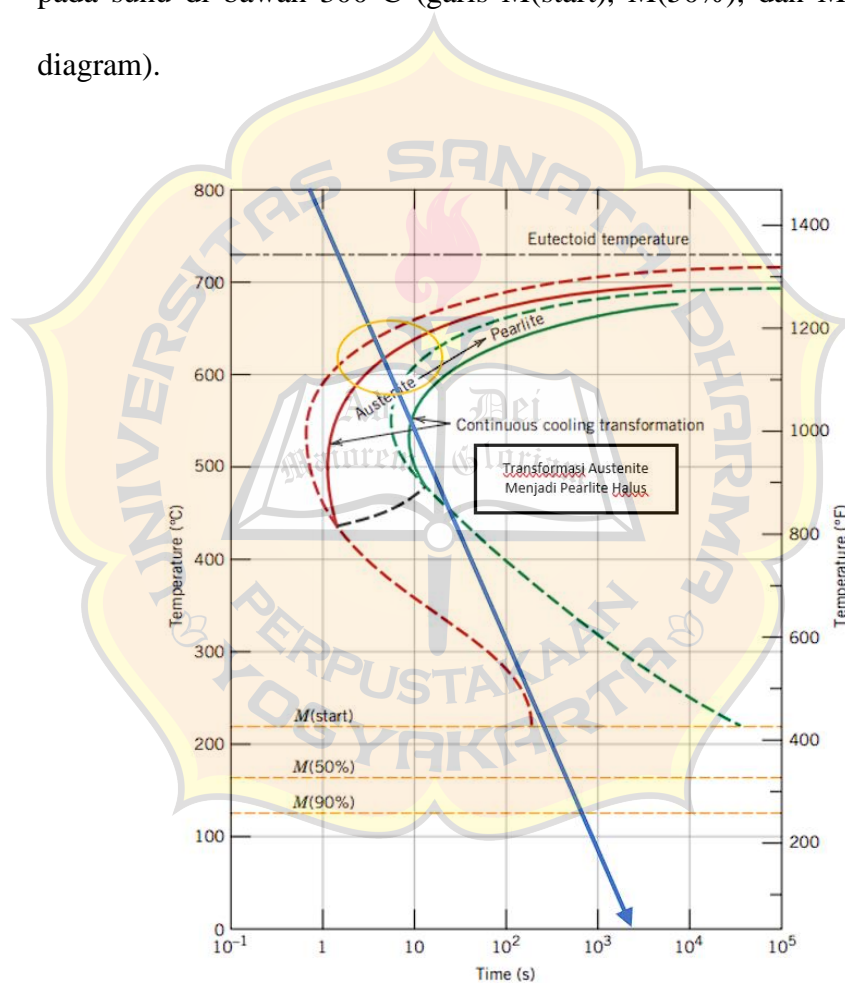
*pearlite* yang lebih teratur atau halus akibat laju pendinginan yang relatif sedang.



Gambar 4. 5 Diagram CCT Pengujian O2

Berdasarkan hasil penelitian yang terdapat pada Gambar 4.5, garis biru yang miring ke bawah menunjukkan kurva pendinginan untuk proses *quenching-tempering* dengan oli. Pada tahap awal pendinginan, suhu dengan cepat turun hingga memasuki rentang transformasi *austenite* menjadi *pearlite* pada sekitar 600-700°C. Seiring dengan penurunan suhu, terjadi transformasi mikrostruktur dari *austenite* menjadi *pearlite* halus melalui proses pendinginan kontinu. Hal tersebut terjadi karena adanya proses eutectoid yang dipicu oleh laju pendinginan cepat menggunakan media oli, sehingga memungkinkan perubahan struktur kristal dari *austenite*

menjadi struktur yang lebih stabil pada suhu rendah yaitu *pearlite* halus. Dikarenakan laju pendinginan oli yang cukup cepat, kurva pendinginan ini cenderung melewati rentang waktu yang lebih cepat sebelum transformasi menjadi *pearlite* dapat sepenuhnya berlangsung. Akibatnya, baja cenderung melewati daerah transformasi *pearlite* dan masuk ke dalam rentang suhu yang lebih rendah, yang kemudian menyebabkan terbentuknya *martensite* pada suhu di bawah 300°C (garis M(start), M(50%), dan M(90%) pada diagram).



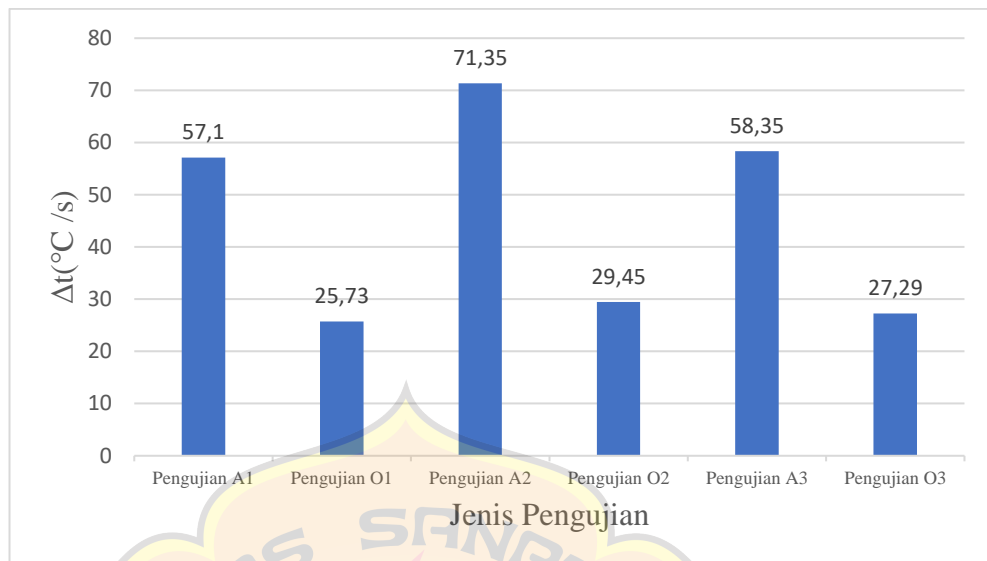
Gambar 4. 6 Diagram CCT Pengujian O3

Berdasarkan hasil penelitian yang terdapat pada Gambar 4.6, kurva pendinginan yang ditunjukkan oleh garis biru. Seiring waktu dan penurunan suhu, struktur kristal *austenite* mengalami transformasi menjadi struktur

yang lebih stabil pada suhu yang lebih rendah yaitu *pearlite* halus. Transformasi ini terjadi melalui proses *eutectoid*, dimana *austenite* terdekomposisi menjadi dua fase yang lebih stabil yaitu *ferrite* dan *cementite*. Laju pendinginan yang cepat akibat penggunaan oli sebagai media pendingin memungkinkan transformasinya berlangsung secara kontinu selama proses pendinginan.

Dari penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa penggunaan media dari air dan oli menghasilkan laju pendinginan yang berbeda. Media air menghasilkan laju pendinginan yang lebih tinggi dibandingkan dengan oli. Proses *quenching-tempering* dengan media air menghasilkan struktur mikro yang didominasi oleh *martensite*, yang terbentuk karena akibat laju pendinginan yang sangat cepat sehingga *austenite* langsung bertransformasi menjadi *martensite* tanpa melewati fase *pearlite* atau *bainite*. Sebaliknya, meskipun oli juga dapat menghasilkan *martensite* pada suhu rendah, Namun laju pendinginan yang lebih lambat cenderung menghasilkan struktur *pearlite* yang lebih teratur. Dari proses ini maka dapat diketahui bahwa penggunaan media air lebih cocok dalam aplikasi yang memerlukan kekerasan tinggi, sementara oli memberikan keseimbangan antara kekerasan dan ketangguhan.

#### 4.2 Laju Pendinginan setelah Proses *Quenching* – *Tempering*



Gambar 4. 7 Grafik Laju Pendinginan Media Air dan Oli

Berdasarkan grafik laju pendinginan yang terdapat pada gambar 4.7, dapat dilihat bahwa terdapat perbedaan suhu dalam laju pendinginan di antara jenis pengujian yang dilakukan dengan media air dan oli setelah proses *quenching-tempering*. Dalam Pengujian A1 yang menggunakan media pendingin air menghasilkan laju pendinginan sebesar  $57,1^{\circ}\text{C}/\text{s}$ . Laju pendinginan yang cepat dapat mendorong terjadinya transformasi fasa yang cepat dan pembentukan struktur mikro yang lebih keras seperti *martensite*. Berikutnya pada Pengujian A2 laju pendinginan memperoleh yang tertinggi dari ketiga pengujian menggunakan media air yaitu  $71,35^{\circ}\text{C}/\text{s}$ . Nilai tersebut menandakan bahwa air mampu menyerap panas dengan cepat dan efektif, sehingga menghasilkan laju pendinginan yang tinggi. Pada Pengujian A3 laju pendinginan memperoleh nilai lebih rendah dibandingkan A2, namun masih memperoleh nilai lebih tinggi dibandingkan Pengujian A1 yaitu  $58,35^{\circ}\text{C}/\text{s}$ . Dari ketiga pengujian tersebut

laju pendinginan dengan media air menunjukkan bahwa air dapat memberikan efek pendinginan yang sangat efektif secara konsisten.

Pada Pengujian O1 yang menggunakan oli sebagai media pendingin, memperoleh laju pendinginan yang jauh lebih rendah yaitu hanya 25,73 °C/s. Rendahnya laju pendinginan menggunakan oli menunjukkan bahwa media tersebut tidak mampu dalam menyerap dan menyalurkan panas secara cepat seperti air. Saat Pengujian O2 memperoleh laju pendinginan memperoleh 29,45 °C/s, sedikit lebih tinggi dibandingkan O1 namun masih jauh dibawah pengujian dengan air. Sementara pada Pengujian O3, memperoleh nilai laju pendinginan yaitu 27,29 °C/s. Hal tersebut menunjukkan bahwa struktur mikro yang terbentuk akibat laju pendinginan oli yang lebih lambat cenderung lebih lunak, seperti *bainite* atau *pearlite*.

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa media pendingin air menghasilkan laju pendinginan yang lebih cepat dibandingkan oli. Laju pendinginan yang lebih cepat menunjukkan bahwa air dapat menyerap panas dengan efektif, sehingga memungkinkan terjadinya transformasi fasa yang cepat dan terbentuknya struktur mikro yang lebih keras seperti *martensite*. Sedangkan rendahnya laju pendinginan pada media pendingin oli menunjukkan bahwa media tersebut tidak mampu menyerap dan menyalurkan panas dengan cepat sehingga menghasilkan struktur mikro yang cenderung lebih halus dan ulet seperti *bainite* atau *pearlite*.



### 4.3 Hasil Uji Kekerasan Vickers

Dalam pengujian kekerasan Vickers ini dilakukan untuk mengetahui serta memperoleh nilai kekerasan pada spesimen baja AISI 4140 dari sebelum dan sesudah diberikan perlakuan panas *quenching* dan *tempering*. Proses ini dilakukan dengan permukaan spesimen ditekan dengan indentor yang berbentuk segi empat. Pada proses indentansi tersebut, permukaan dari spesimen diberi sebuah beban indentansi 10 kg dengan waktu indentansi 10 detik. Pengambilan data nilai kekerasan Vickers ini dilakukan dengan proses indentansi pada permukaan spesimen yang berjumlah lima titik, mulai dari bagian permukaan kiri spesimen hingga bagian permukaan kanan spesimen. Tujuan dari pemilihan lima titik indentansi untuk mengetahui persebaran kekerasan sebelum dan sesudah diberikan perlakuan panas (*heat treatment*). Dalam penelitian ini, spesimen diberi kode angka untuk mempermudah penyebutan seperti yang terdapat pada Table 4. Hasil uji kekerasan Vickers akan ditampilkan pada Table 4.1 – 4.8.

Tabel 4. 1 Penamaan pada spesimen

No	Perlakuan pada specimen	Kode
1	<i>Normalizing</i> 900°C	Spesimen 1
2	Pengujian 1 <i>Quenching</i> Air 870°C dan <i>Tempering</i> 400°C	Pengujian A1
3	Pengujian 1 <i>Quenching</i> Oli 870°C dan <i>Tempering</i> 400°C	Pengujian O1
4	Pengujian 2 <i>Quenching</i> Air 870°C dan <i>Tempering</i> 400°C	Pengujian A2
5	Pengujian 2 <i>Quenching</i> Oli 870°C dan <i>Tempering</i> 400°C	Pengujian O2
6	Pengujian 3 <i>Quenching</i> Air 870°C dan <i>Tempering</i> 400°C	Pengujian A3
7	Pengujian 3 <i>Quenching</i> Oli 870°C dan <i>Tempering</i> 400°C	Pengujian O3

Tabel 4. 2 Hasil pengujian kekerasan baja AISI 4140 pada Spesimen 1

Spesimen 1					
Perlakuan Panas	Titik Uji	Waktu (s)	Diagonal		Hasil (HV10)
			D1	D2	
<i>Normalizing</i>	1	10	298,32	283,8	218,8
	2		301,8	300,12	204,6
	3		300,12	291,24	212
	4		302,16	290,16	211,3
	5		279,72	282,48	234,5
Rata-rata Nilai Kekerasan					216,24
Standar Devitas					10,17695436

Tabel 4. 3 Hasil pengujian kekerasan baja AISI 4140 pada Pengujian A1

Spesimen 2					
Perlakuan Panas	Titik Uji	Waktu (s)	Diagonal		Hasil (HV10)
			D1	D2	
<i>Quenching Tempering Air 1</i>	1	10	213,36	207,36	419
	2		216,12	212,04	404,6
	3		213,24	221,16	392,8
	4		234,6	230,88	342,2
	5		210,96	215,04	408,4
Rata-rata Nilai Kekerasan					393,4
Standar Devitas					26,93547846

Tabel 4. 4 Hasil pengujian kekerasan baja AISI 4140 pada Pengujian O1

Spesimen 3					
Perlakuan Panas	Titik Uji	Waktu (s)	Diagonal		Hasil (HV10)
			D1	D2	
<i>Quenching Tempering Oli 1</i>	1	10	225,96	211,92	386,7
	2		220,32	224,88	374
	3		219,36	216,72	389,9
	4		237,36	223,2	349,7
	5		218,52	217,68	389,5
Rata-rata Nilai Kekerasan					377,96
Standar Devitas					15,27371599

Tabel 4. 5 Hasil pengujian kekerasan baja AISI 4140 pada Pengujian A2

Spesimen 4					
Perlakuan Panas	Titik Uji	Waktu (s)	Diagonal		Hasil (HV10)
			D1	D2	
<i>Quenching Tempering Air 2</i>	1	10	225,36	215,64	381,1
	2		226,68	226,56	360,9
	3		210,96	215,28	408
	4		229,56	220,68	365,7
	5		241,2	229,68	334,4
Rata-rata Nilai Kekerasan					370,02
Standar Devitas					24,23166523

Tabel 4. 6 Hasil pengujian kekerasan baja AISI 4140 pada Pengujian O2

Spesimen 5					
Perlakuan Panas	Titik Uji	Waktu (s)	Diagonal		Hasil (HV10)
			D1	D2	
<i>Quenching Tempering Oli 2</i>	1	10	257,28	257,28	280,1
	2		252	248,88	295,5
	3		247,92	250,56	298,4
	4		248,4	238,92	312,3
	5		225,36	214,32	383,5
Rata-rata Nilai Kekerasan					313,96
Standar Devitas					36,24348769

Tabel 4. 7 Hasil pengujian kekerasan baja AISI 4140 pada Pengujian A3

Spesimen 6					
Perlakuan Panas	Titik Uji	Waktu (s)	Diagonal		Hasil (HV10)
			D1	D2	
<i>Quenching Tempering Air 3</i>	1	10	207,36	225,84	395
	2		222,24	219	380,8
	3		232,92	227,64	349,7
	4		238,44	217,56	356,4
	5		219	236,16	358
Rata-rata Nilai Kekerasan					367,98
Standar Devitas					17,10139176

Tabel 4. 8 Hasil pengujian kekerasan baja AISI 4140 pada Pengujian O3

Spesimen 7					
Perlakuan Panas	Titik Uji	Waktu (s)	Diagonal		Hasil (HV10)
			D1	D2	
<i>Quenching Tempering Oli 3</i>	1	10	240,36	233,04	330,7
	2		247,8	246,24	303,7
	3		256,2	256,8	281,6
	4		257,04	261	276,2
	5		247,92	249,36	299,8
Rata-rata Nilai Kekerasan					298,4
Standar Devitas					19,22716828

Berdasarkan hasil pengujian kekerasan Vickers pada baja AISI 4140 seperti yang terdapat pada Table 4.2 – 4.8, yang dilakukan dengan pengujian

sebanyak tiga kali dengan menggunakan media pendingin air dan oli dengan suhu *quenching* sebesar  $870^{\circ}\text{C}$  dengan waktu *holding time* selama 45 menit dilanjutkan dengan proses *tempering* pada suhu  $400^{\circ}\text{C}$  dengan waktu *holding time* 45 menit. Dari penelitian tersebut memperoleh hasil perubahan yang signifikan pada baja AISI 4140 dalam nilai kekerasan setelah diberikan perlakuan panas dan melalui pendinginan cepat.

Pada Spesimen 1 baja AISI 4140 yang telah diberikan perlakuan panas berupa *normalizing* memiliki rata-rata nilai kekerasan 216,44 HV dengan standar deviasi 10,17. Pada proses pengujian pertama yaitu A1 yang diberikan perlakuan panas berupa *quenching-tempering* air memiliki nilai kekerasan yang cukup tinggi dengan rata-rata nilai kekerasan 393,4 HV dengan standar deviasi 26,93. Rata-rata tersebut menunjukkan adanya peningkatan kekerasan akibat proses pendinginan cepat dan dengan standar deviasi yang besar memungkinkan adanya variasi kekerasan antar titik uji pada spesimen. Pengujian O1 yang diberikan perlakuan panas berupa *quenching-tempering* oli memiliki rata-rata nilai kekerasan 377,96 HV dengan standar deviasi yang lebih kecil yaitu 15,27. Hal tersebut menunjukkan bahwa kekerasan Spesimen O1 lebih seragam dibandingkan Spesimen A1.

Pada pengujian kedua, pengujian A2 yang diberikan perlakuan panas berupa *quenching-tempering* air memiliki rata-rata nilai kekerasan 370,02 HV dan standar deviasi 24,23. Pengujian A2 ini memiliki rata-rata nilai kekerasan yang cukup tinggi namun dengan variasi kekerasan antar

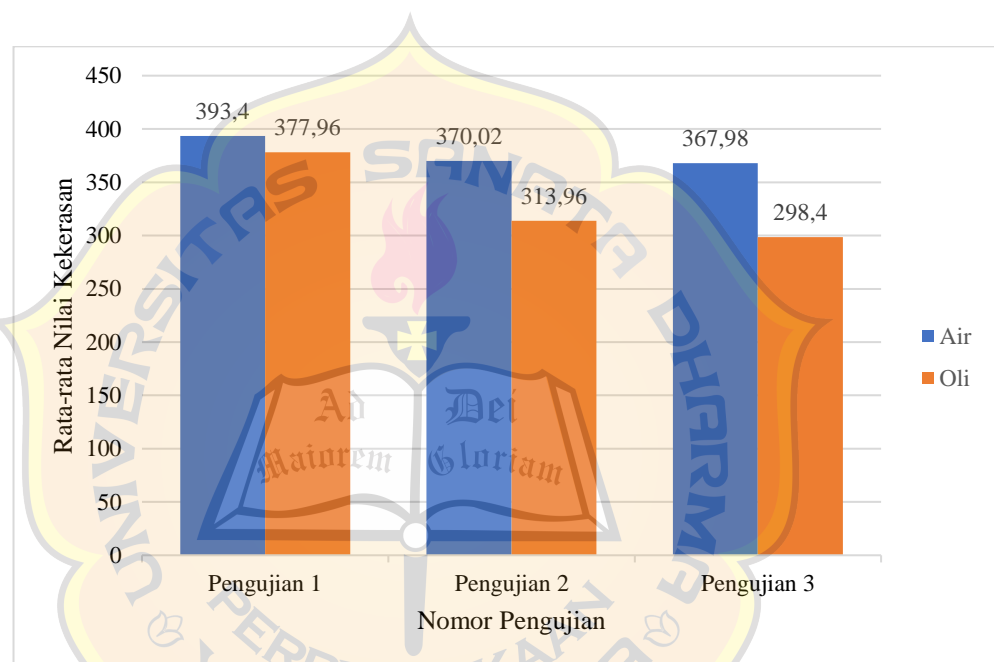
titik uji yang cukup besar. Sementara pada Pengujian O2 yang melalui proses perlakuan panas *quenching-tempering* oli memiliki rata-rata nilai kekerasan yang lebih rendah yaitu 313,96 HV dengan standar deviasi 36,24. Standar deviasi yang cukup besar pada Pengujian O2 ini mengidentifikasi variasi kekerasan yang cukup signifikan antar titik uji.

Pada pengujian ketiga, yaitu Pengujian A3 memiliki rata-rata nilai kekerasan yaitu 367,98 HV dengan standar deviasi 17,10. Hal tersebut menunjukkan bahwa *quenching-tempering* dengan menggunakan media pendingin air menghasilkan kekerasan yang tinggi dengan tingkat keseragaman yang cukup baik dibandingkan dengan spesimen *quenching-tempering* oli. Sementara Pengujian O3 memiliki rata-rata nilai kekerasan yaitu 298,4 HV dengan standar deviasi 19,23. Dapat diketahui bahwa *quenching-tempering* oli cenderung menghasilkan kekerasan yang lebih rendah namun lebih seragam dibandingkan *quenching-tempering* air.

Secara keseluruhan dari hasil pengujian pertama hingga ketiga, menunjukkan bahwa proses *quenching-tempering* dengan media air cenderung menghasilkan rata-rata nilai kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan dengan *quenching-tempering* media oli. Hal tersebut dikarenakan air memiliki laju pendinginan yang lebih cepat dalam pembentukan *martensite*, sedangkan oli dengan laju pendinginan yang lebih lambat akan menghasilkan pembentuk struktur mikro yang lebih lunak seperti *bainite* atau *pearlite*. Kekerasan yang diciptakan dengan *quenching-tempering* air menghasilkan nilai yang tinggi tetapi terdapat variasi yang

cukup besar antar titik uji seperti pada standar deviasi sehingga kekerasannya tidak selalu seragam di seluruh spesimen. Sementara pada *quenching-tempering* oli, menghasilkan kekerasan yang lebih rendah tetapi kekerasan antar titik uji lebih konsisten sehingga menunjukkan hasil yang lebih seragam di seluruh spesimen.

#### 4.4 Perbandingan Grafik Uji Kekerasan pada Pengujian 1, 2, dan 3



Gambar 4. 8 Grafik Perbandingan Uji Kekerasan Baja AISI 4140

Pada Gambar 4.8 menunjukkan perbandingan rata-rata nilai kekerasan dari semua spesimen yang telah diberikan perlakuan panas berupa *quenching* dan *tempering* dengan media pendingin yang berbeda yaitu air dan oli. Dapat dilihat dari pengujian pertama, nilai kekerasan dihasilkan dari media air (bar biru) yaitu 393,4 HV sedangkan pada spesimen yang menggunakan media oli (bar oranye) memiliki nilai dibawahnya yaitu 377,96 HV. Hal tersebut menunjukkan bahwa



penggunaan media air memberikan kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan dengan oli.

Pada pengujian kedua, nilai kekerasan kedua media mengalami penurunan dibandingkan pengujian sebelumnya. *Quenching-tempering* yang menggunakan media air (bar biru) menghasilkan nilai kekerasan yaitu 370,02 HV, sedangkan *quenching-tempering* oli memiliki nilai kekerasan yang lebih rendah yaitu 313,96 HV. Penurunan tersebut sangat terlihat khususnya pada *quenching-tempering* oli, sehingga memungkinkan menghasilkan struktur yang lebih lunak dibandingkan dengan *quenching-tempering* air.

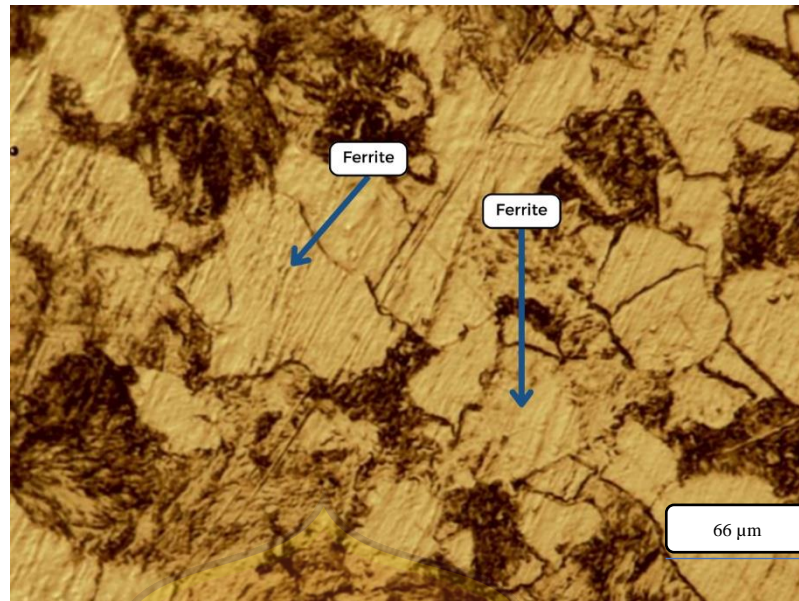
Pada pengujian ketiga, nilai kekerasan masih mengalami sebuah penurunan. *Quenching-tempering* dengan media air (bar biru) hanya menghasilkan nilai kekerasan 367,98 HV dan *quenching-tempering* dengan oli (bar oranye) hanya memiliki nilai 298,4 HV. Penurunan pada *quenching-tempering* oli (bar oranye) dapat disebabkan karena perubahan dalam kondisi pemanasan atau pendinginan yang diterapkan.

Secara keseluruhan grafik, menandakan bahwa *quenching-tempering* dengan air (bar biru) secara konsisten menghasilkan nilai kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan *quenching-tempering* oli (bar oranye) di semua pengujian. Hal tersebut disebabkan karena laju pendinginan yang lebih cepat pada *quenching-tempering* media air, sehingga menghasilkan struktur mikro yang keras. Sebaliknya, *quenching-tempering* oli memiliki laju pendinginan yang lambat sehingga

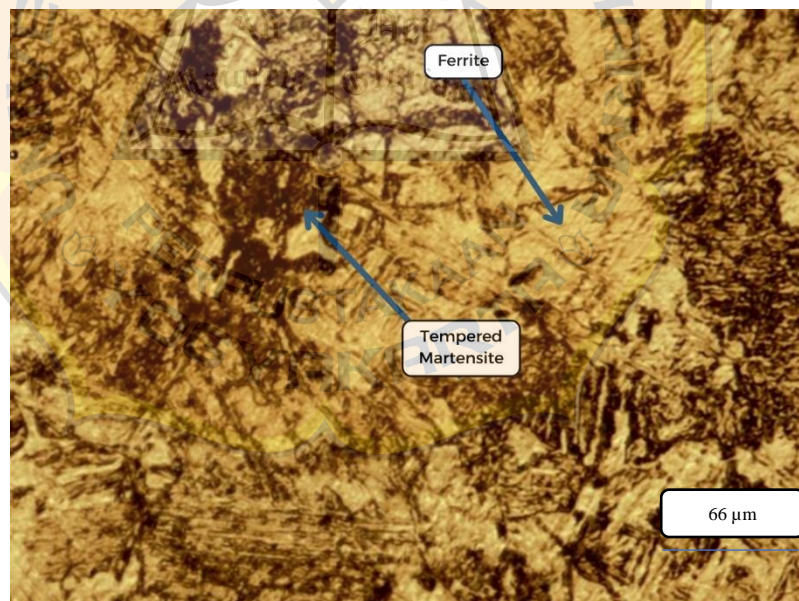
menghasilkan nilai kekerasan yang lebih rendah. Perbedaan nilai kekerasan dari ketiga pengujian menunjukkan bahwa variasi dalam kondisi *quenching-tempering* seperti laju pendinginan dan media pendingin yang digunakan akan mempengaruhi sifat akhir baja terutam dalam hal kekerasan.

#### 4.5 Hasil Pengujian *Metallography*

Dalam penelitian ini, sebelum melakukan pengamatan terhadap struktur mikro nantinya setiap spesimen diberikan perlakuan panas yaitu *quenching* dengan temperatur 870°C dan *tempering* pada suhu 400°C kemudian dilakukan pendinginan menggunakan dua media pendingin berupa air dan oli. Pengujian mettalography bertujuan untuk mengetahui fase yang terbentuk pada permukaan spesimen, sebelum dan sesudah diberikan perlakuan panas. Pengamatan struktur mikro akan menggunakan mikroskop optik dengan pembesaran 400 kali. Data pengujian mettalography dapat dilihat pada gambar 4.9 – 4.15.

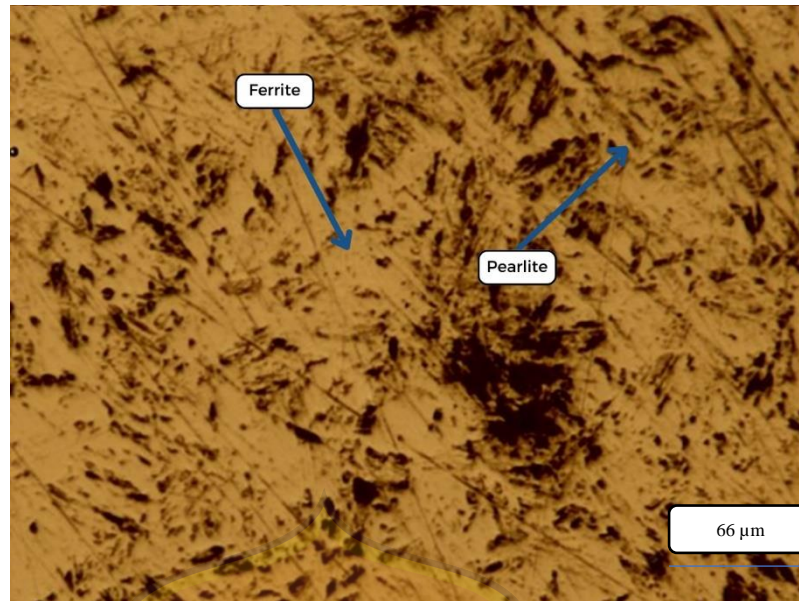


Gambar 4. 9 Struktur mikro pada Spesimen 1 dengan perlakuan *normalizing* 900°C

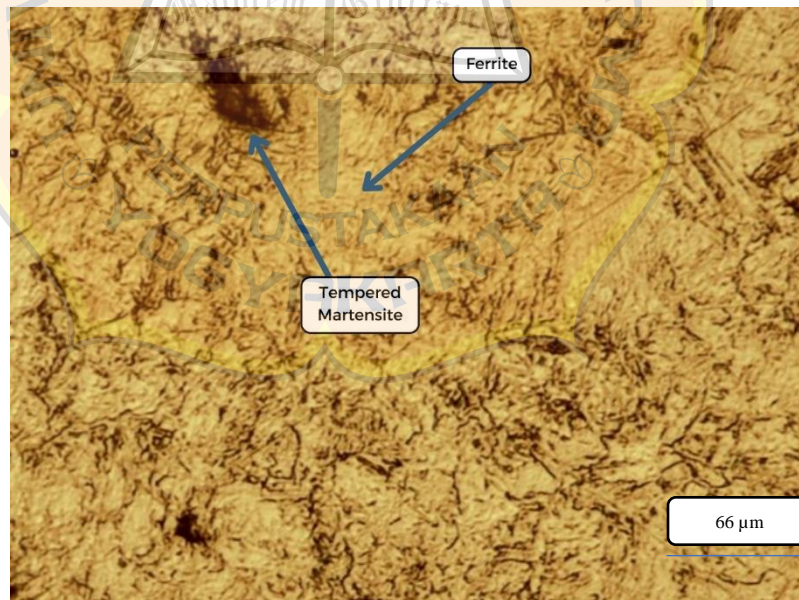


Gambar 4. 10 Struktur mikro pada Pengujian A1 dengan perlakuan *quenching* air 870°C dan *tempering* 400°C

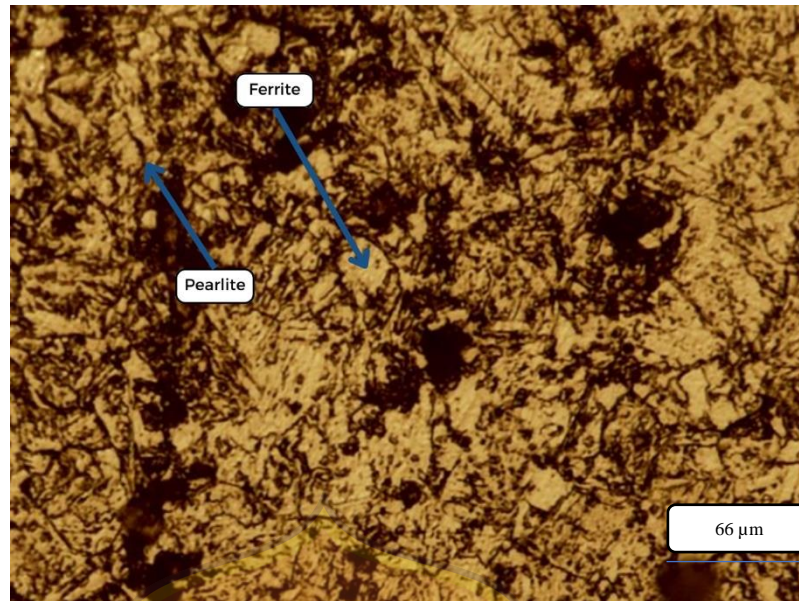




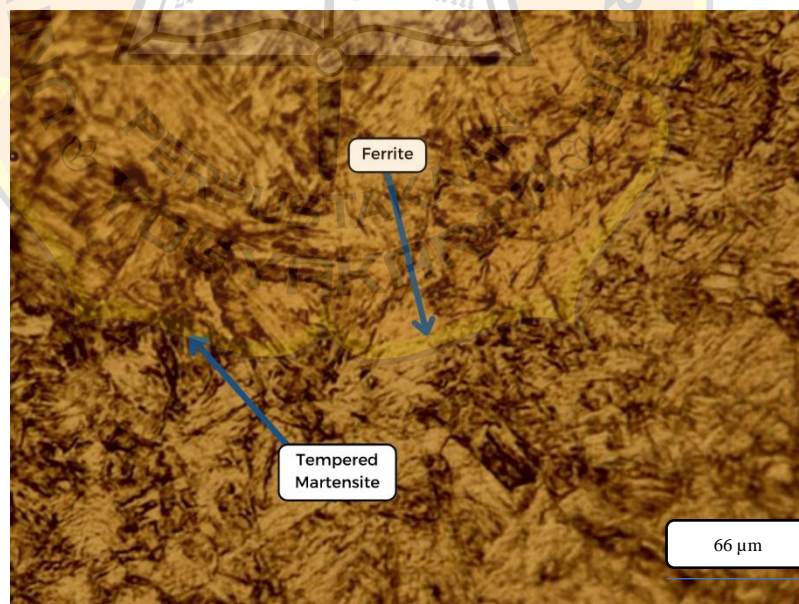
Gambar 4. 11 Struktur mikro pada Pengujian O1 dengan perlakuan *quenching* oli 870°C dan *tempering* 400°C



Gambar 4. 12 Struktur mikro pada Pengujian A2 dengan perlakuan *quenching* air 870°C dan *tempering* 400°C

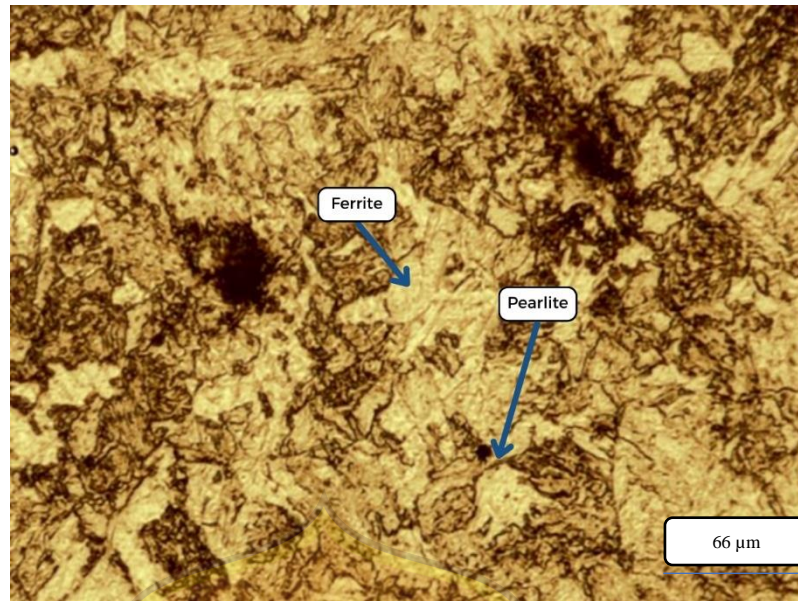


Gambar 4. 13 Struktur mikro pada Pengujian O2 dengan perlakuan *quenching* oli 870°C dan *tempering* 400°C



Gambar 4. 14 Struktur mikro pada Pengujian A3 dengan perlakuan *quenching* air 870°C dan *tempering* 400°C





Gambar 4. 15 Struktur mikro pada Pengujian O3 dengan perlakuan *quenching* oli 870°C dan *tempering* 400°C

Gambar 4.9 menunjukkan struktur mikro dari Spesimen 1 yang telah diberikan perlakuan panas berupa *normalizing* 900°C dengan *holding time* 45 menit. Dari hasil perlakuan panas tersebut menghasilkan struktur mikro yang didominasi oleh fase *ferrite* dan sedikit *pearlite*, hal itu dibuktikan dengan rata-rata nilai kekerasan yaitu 216,24 HV. Pembentukan struktur *ferrite* pada spesimen dihasilkan karena laju pendinginan yang lambat selama proses *normalizing*. Selama pendinginan dari suhu tinggi, sebagian *austenite* berada pada keadaan stabil bertransformasi menjadi *ferrite*, sehingga menghasilkan kekuatan dan keuletan pada material.

Gambar 4.10 menunjukkan struktur mikro pada Pengujian A1 dengan perlakuan *quenching* air 870°C dengan *tempering* 400°C dan *holding time* 45 menit. Dari gambar tersebut dapat terlihat bagaimana bentuk dari *tempered martensite* cukup merata pada setiap permukaan

spesimen, sehingga menunjukkan bahwa variasi dari perlakuan *quenching* dan *tempering* seimbang dengan adanya fase *ferrite* dan *tempered martensite*. Spesimen ini memperoleh rata-rata nilai kekerasan yang cukup tinggi yaitu 393,4 HV. Hal tersebut sesuai dengan diagram CCT yang terdapat pada Gambar 4.1 dimana struktur mikro bertransformasi dengan langsung dari *austenite* menjadi *tempered martensite*. Gambar 4.11 menunjukkan struktur mikro pada Pengujian O1 dengan perlakuan *quenching* oli 870°C dengan *tempering* 400°C dan *holding time* 45 menit. Hasil pengujian menunjukkan struktur mikro didominasi oleh fase *ferrite* dan sedikit *pearlite*. Struktur *pearlite* tampak sebagai daerah gelap, sedangkan *ferrite* muncul dengan area yang lebih terang dan bersifat lebih lunak. Pada Pengujian O1 ini memperoleh rata-rata nilai kekerasan cukup tinggi yaitu 377,96 HV. Sesuai dengan Gambar 4.4 yaitu diagram CCT menunjukkan bahwa struktur mikro langsung bertransformasi menjadi *pearlite*.

Gambar 4.12 menunjukkan struktur mikro pada Pengujian A2 dengan perlakuan *quenching* air 870°C dengan *tempering* 400°C dan *holding time* 45 menit. Struktur mikro yang terlihat jelas pada Pengujian A2 ini yaitu *tempered martensite* dan *ferrite*. Proses *quenching* air yang menghasilkan pembentukan *martensite* dikarenakan laju pendinginan yang cukup tinggi sehingga melewati pembentukan *pearlite* atau *bainite*. Rata-rata nilai kekerasannya mengalami penurunan dari Pengujian A1, namun masih cukup tinggi yaitu 370,02 HV. Selama proses *tempering*, *martensite* metastabil mengalami transformasi menjadi fase *tempered martensite* yang



lebih stabil. Gambar 4.13 menunjukkan struktur mikro pada Pengujian O2 dengan perlakuan *quenching* oli 870°C dengan *tempering* 400°C dan *holding time* 45 menit. Mikro struktur yang terdapat pada gambar masih didominasi oleh banyaknya *ferrite*. Berdasarkan diagram CCT nya yang terdapat pada gambar 4.5, dominasi *ferrite* ini menunjukkan bahwa laju pendinginan dari oli memberikan waktu yang cukup dalam difusi karbon sehingga mendukung pembentukan *pearlite* halus.

Gambar 4.14 menunjukkan struktur mikro pada Pengujian A3 dengan perlakuan *quenching* air 870°C dengan *tempering* 400°C dan *holding time* 45 menit. Dari gambar tersebut dapat diketahui terdapat dua fase yaitu *ferrite* dan *tempered martensite*. Adanya fase *tempered martensite* menunjukkan bahwa hasil *quenching* air menyebabkan fase *austenite* bertransformasi menjadi *tempered martensite* hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.3, sehingga menghasilkan rata-rata nilai kekerasan yang cukup tinggi yaitu 367,98 HV. Gambar 4.15 menunjukkan struktur mikro pada Pengujian O3 dengan perlakuan *quenching* oli 870°C dengan *tempering* 400°C dan *holding time* 45 menit. Terdapat dua fase dalam gambar tersebut yaitu *ferrite* dan *pearlite* yang menghasilkan Spesimen 7 ini memiliki sifat ulet. Hal tersebut ditandai dengan rata-rata nilai kekerasan 298,4 HV.

Berdasarkan hasil penelitian pada pengujian mettalogy ini, menunjukkan bahwa jenis perlakuan dan media pendinginan sangat mempengaruhi struktur mikro dan sifat mekanis dari sebuah material.

Semakin cepat laju pendinginan maka semakin besar transformasi *austenite* menjadi *martensite*, yang dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasan material. *Quenching* dengan media air menghasilkan struktur *tempered martensite* yang lebih merata sehingga memberikan kekerasan yang lebih tinggi. Sebaliknya, *quenching* menggunakan media oli lebih cenderung menghasilkan dominasi *ferrite* dan sedikit *pearlite* akibat laju pendinginan yang lambat.



## BAB V

### KESIMPULAN

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dari analisis data kekerasan dan struktur mikro pada baja AISI 4140 yang diberikan perlakuan panas berupa *quenching* dan *tempering*, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada pengujian Vickers, variasi laju pendinginan perlakuan panas *quenching* 870°C dan *tempering* pada suhu 400°C dengan *holding time* 45 menit memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kekerasan baja AISI 4140. Penggunaan dari media pendingin air menghasilkan laju pendinginan yang lebih cepat dibandingkan media pendingin oli. Laju pendinginan yang cepat menyebabkan transformasi dari *austenite* menjadi *martensite* secara langsung, sehingga menghasilkan struktur mikro yang didominasi oleh *tempered martensite*. Hasil dari pengujian memperoleh rata-rata nilai kekerasan mencapai 393,4 HV pada pengujian pertama, 370,02 HV pada pengujian kedua, dan 367,98 HV pada pengujian ketiga. Sebaliknya laju pendinginan yang lebih lambat dengan media pendingin oli menghasilkan struktur mikro yang didominasi oleh *ferrite* dan *pearlite* sehingga nilai kekerasannya lebih rendah dengan rata-rata nilai kekerasan mencapai 377,96 HV pada pengujian pertama, 313,96 HV pada pengujian kedua, dan 298,4 HV pada pengujian ketiga.

2. Pada struktur mikro yang terbentuk dari pengaruh *quenching* dan *tempering* dengan variasi media pendingin air dan oli. Penggunaan media pendingin air menyebabkan transformasi *austenite* menjadi *martensite* secara langsung, tanpa melewati pembentukan *pearlite* atau *bainite*. Struktur mikro yang terbentuk pada *quenching* dengan media air didominasi oleh *tempered martensite*. Sedangkan penggunaan media pendingin oli menghasilkan laju pendinginan yang lebih lambat, sehingga *austenite* memiliki cukup waktu dalam bertransformasi menjadi *ferrite* dan *pearlite* halus.

## 5.2 Saran

Dalam penelitian ini terdapat saran dari penulis dalam membantu penelitian selanjutnya supaya mendapatkan hasil yang lebih baik: Dalam proses perlakuan panas *tempering* variasi suhu yang diberikan diharapkan cukup tinggi atau lebih dari 400°C untuk menghasilkan presentase penurunan tingkat kekerasan tidak terlalu drastis.

## DAFTAR PUSTAKA

- Adhi, A. N. (2020). Optimasi Parameter Perlakuan Panas Terhadap Kekerasan Baja AISI 4140 Dengan Metode Taguchi Untuk Aplikasi Poros Pompa Sentrifugal Multistage. *Tugas Akhir-TL184834*.
- Amanto, & D. (1999). *Ilmu bahan teknik*. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama.
- Badaruddin, M. S. (2019). Komposisi baja AISI 4140. *Jurnal Teknik Material*, 11(2), 34-42.
- Callister, W. D. (1991). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (Second Edition ed., Vol. 12). Materials & Design.
- Daryatno, A. (1999). *Ilmu Bahan Teknik*. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama.
- Fendi, R. S. (2018). Analisis sifat mekanik dan struktur mikro baja AISI 4140 akibat perbedaan temperatur pada perlakuan panas tempering. *Jurnal Teknik Mesin*, 10(1), 12-18.
- Handoyo, Y. (2015). *Analisis struktur mikro dan kekerasan baja AISI 4140*. Bandung: ITB Press.
- International, A. (1997). *ASTM E92-16: Standard Test Method for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- International, A. (1997). *ASTM E92-82: Standard Test Method for Vickers Hardness Testing*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Kalpakjian, S. &. (2009). *Manufacturing Engineering*. Upper Saddle River, NJ: Illinois Institute of Technology.
- Sidney, H. (1974). *Introduction To Physical Metallography Second Edition*. New York: Wiley.
- Sucahyo, A. (1999). *Bahan teknik: Konsep dan aplikasi*. Surabaya: ITS Press.

Thehning, K.-E. (1984). *Steel and its heat treatment*. London: Butterworths.

