



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISIS KEKERASAN, STRUKTUR MIKRO, DAN
KETAHANAN *HYDROGEN EMBRITTLEMENT* PADA BAJA
SAE 1050 HASIL *QUENCH TEMPER* DAN *MARTEMPER***

SKRIPSI

FANDY IRWANTO

0606074823

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI METALURGI DAN MATERIAL

DEPOK

JUNI 2010



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISIS KEKERASAN, STRUKTUR MIKRO, DAN
KETAHANAN *HYDROGEN EMBRITTLEMENT* PADA BAJA
SAE 1050 HASIL *QUENCH TEMPER* DAN *MARTEMPER***

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana teknik

**FANDY IRWANTO
0606074823**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
JUNI 2010**

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Fandy Irwanto
NPM : 0606074823
Program Studi : Metalurgi dan Material
Judul Skripsi : **ANALISIS KEKERASAN, STRUKTUR MIKRO,
DAN KETAHANAN *HYDROGEN*
EMBRITTEMENT PADA BAJA SAE 1050
HASIL *QUENCH TEMPER* DAN *MARTEMPER***

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Metalurgi dan Material Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Myrna Ariati, MS. (.....)

Penguji : Prof. Dr. Ir. Anne Zulfia, M.Sc. (.....)

Penguji : Dr. Ir. Dedi Priadi, D.E.A. (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 6 Juli 2010

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

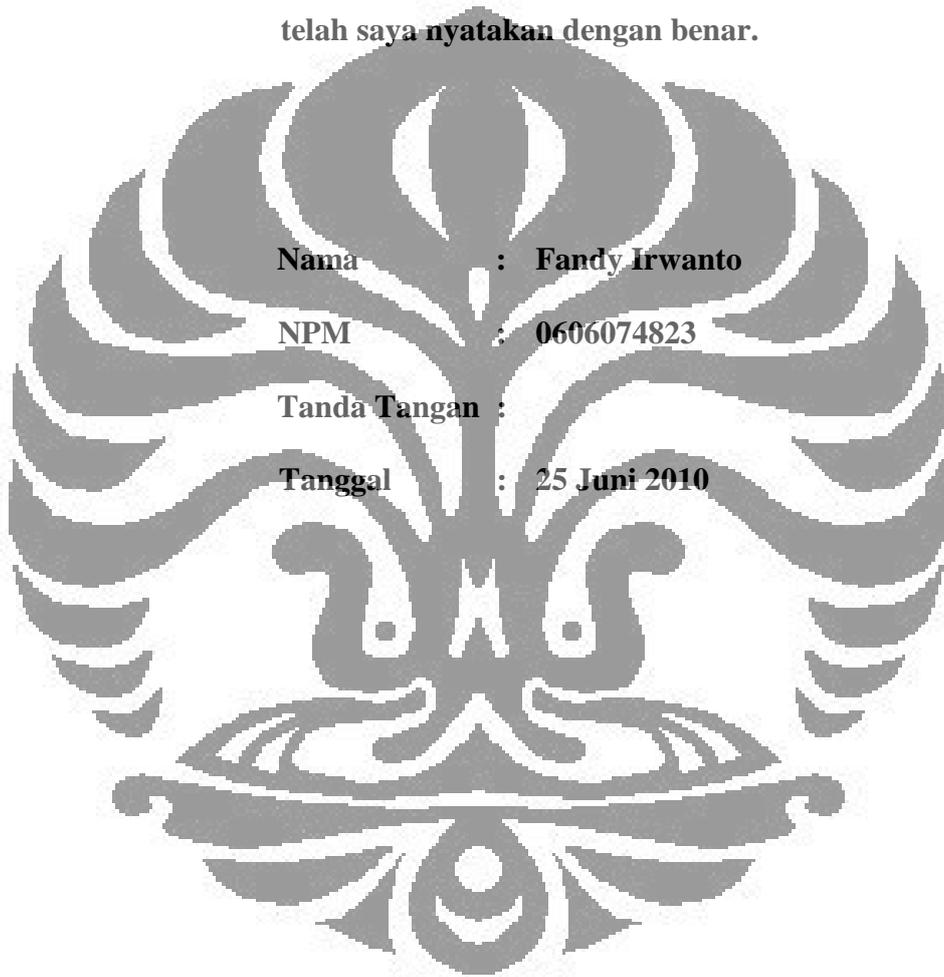
**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : Fandy Irwanto

NPM : 0606074823

Tanda Tangan :

Tanggal : 25 Juni 2010



KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Metalurgi dan Material pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada berbagai pihak, antara lain:

1. Ibu Dr. Ir. Myrna Aryati, M.S. selaku pembimbing skripsi I yang telah banyak membimbing dan membantu kelancaran proses penyusunan skripsi ini
2. Bapak Alfian Hamdan selaku Kepala Pabrik yang telah memberikan kesempatan untuk dapat melakukan tugas akhir di PT FSCM Manufacturing
3. Bapak Abdullah Hinduan, S.T. dan Bapak Heri Kristiyono, S.T. selaku pembimbing skripsi II yang selalu menyediakan waktu bagi penulis untuk berkonsultasi dalam pemecahan masalah dan penyusunan skripsi ini. Semoga berguna untuk studi dan pengembangan produk
4. Bapak Almakhsus, Bapak Widagdo beserta seluruh staf dan karyawan PT. FSCM Manufacturing Indonesia atas segala bantuan dan dukungan selama melakukan pengujian
5. Bapak Prof. Dr. Ir. Johnny Wahyuadi, DEA. sebagai pembimbing akademis yang selalu memberikan perhatian dan dukungan penuh terhadap perkembangan akademis penulis
6. Bapak Prof. Dr-Ing. Bambang Suharno sebagai Kepala Departemen
7. Bapak Dr. Ir. Winarto, M.Sc. sebagai Sekretaris Departemen
8. Bapak Prof. Dr. Ir. Bambang Soegiarto, M.Eng., Bapak Dr. Ir. Dedi Priadi, DEA., Ibu Prof. Dr. Ir. Bondan Tiara Sofyan, M.Sc., Bapak Prof. Dr-Ing. Nandy Setiadi, Bapak Prof. Dr. Ir. Anondho Widjanarko, M.Sc. serta Bapak

Prof. Dr. Ir. Yuri Maemunyah, M.Eng.Sc. atas keteladanan serta kepemimpinannya di Fakultas Teknik ini

9. Felicia Inez Sabella, S.E. yang setia mendampingi penulis selama 5 tahun terakhir, setia memberikan dukungan secara total dari awal mengerjakan tugas akhir sampai kepada saat-saat mendebarkan penulisan, penyusunan dan penyelesaian skripsi ini. Terimakasih.
10. Orang tua tercinta dan keluarga yang selalu mendoakan penulis
11. Seluruh dosen dan staf akademik Departemen Metalurgi dan Material, khususnya Bapak Nofrijon, Ph.D, Bapak Ir. Andi Rustandi, MT, dan Bapak Dr. Ir Akhmad Herman Yuwono, M.Sc. atas bimbingan koordinasi tugas akhir dan teladan selama saya mengenyam pendidikan di bangku kuliah strata satu
12. Fiki Arif Pramudya selaku rekan kerja yang berkerja sama dengan baik dalam menjalani 5 bulan masa tugas akhir ini. Akhirnya kita sarjana, Fik
13. Teman-teman satu hobi fotografi : Richard, Paul, Binsur, Fahmi. Sukses selalu
14. Rekan-rekan metalurgi angkatan 2006 tanpa terkecuali
15. Rekan-rekan metalurgi 2007 sampai 2009, khususnya para Asisten Laboratorium Kimia
16. Rekan-rekan metalurgi 2003 (Panitia M'nM's Week 2006), 2004 dan 2005
17. Bapak Zaenal, Bapak Suyoto, Bang Ahmad dan Bapak Edi atas segala kerjasana yang sangat baik selama masa perkuliahan, praktikum dan dalam melakukan tugas akhir
18. Mbak Nur, Mbak Dewi dan Mbak Sukma atas pertolongannya terhadap administrasi kemahasiswaan dan data-data buku dari perpustakaan Departemen Metalurgi dan Material
19. Bapak Ari Agustar, S.T. dan Bapak Akhmayanda, S.T. yang telah bersedia bertukar pikiran serta memberi nasihat-nasihat dalam menghadapi dunia kerja
20. Andre Sutomo dan seluruh rekan-rekan Elektro UI 2006 atas informasi dalam dunia *cyber* maupun dalam penulisan skripsi ini. Sampai bertemu kembali
21. Andi Nata, Andry Sulaiman, Rikko Defriadi, Bayu dan rekan-rekan dari Koperasi Mahasiswa FTUI, terimakasih kawan atas koordinasi yang indah selama tahun 2009. Sukses selalu!

22. Teman-teman Keluarga Umat Katolik Teknik UI, Persekutuan Oikumene UI, Forum Ukhuwah dan Studi Islam FTUI dan Keluarga Mahasiswa Budha UI
23. Rekan-rekan pembuat skripsi : Tim TMCP, Tim Leaching, Tim Las, Tim Aluminum, Tim Etsa, Tim Korosi, Tim pengecoran, Tim Komposit, dsb
24. Seluruh pihak yang telah membantu (sampai skripsi ini selesai dijilid) yang tidak dapat ditulis satu per satu. Kalian sungguh berarti Pak, Mas, Bu, Mbak, Kak, Om, Tante, dsb, dst

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 25 Juni 2010

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Fandy Irwanto
NPM : 0606074823
Program Studi : Metalurgi dan Material
Departemen : Teknik Metalurgi dan Material
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

Analisis Kekerasan, Struktur Mikro, dan Ketahanan *Hydrogen Embrittlement* Pada Baja SAE 1050 Hasil *Quench Temper* dan *Martemper*

berserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 25 Juni 2010
Yang menyatakan

(Fandy Irwanto)

ABSTRAK

Nama : Fandy Irwanto
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul : Analisis Kekerasan, Struktur Mikro, dan Ketahanan
Hydrogen Embrittlement pada Baja SAE 1050 Hasil *Quench
Temper* dan *Martemper*

Inovasi perlakuan panas yang dilakukan dari metode *quench temper* konvensional menjadi metode *martemper* bertujuan untuk meningkatkan ketahanan komponen *outer link plate* (OLP) spesifikasi 420 AD (SAE 1050; 1,2 mm) terhadap *hydrogen embrittlement* dengan tetap mempertahankan nilai kekerasan dan ketangguhan. *Quench temper* dilakukan dengan pemanasan hingga temperatur 855 °C dan ditahan selama 40 menit, kemudian di-*quench* ke dalam media oli (40 s.d. 70 °C), lalu di-*temper* (350 °C) selama 60 menit. *Martemper* dilakukan dengan pemanasan hingga temperatur 855 °C dan ditahan selama 40 menit, kemudian di-*quench* ke dalam media oli (155 °C) dengan variabel waktu 5, 10, dan 15 menit untuk menyeragamkan temperatur permukaan dan inti. Kemudian dicelup dalam air untuk menyelesaikan pembentukan martensit, dan di-*temper* (260 °C) selama 60 menit. Hasil pengujian *delayed fracture* menunjukkan sampel *quench temper* mengalami kenaikan kekerasan permukaan sebesar 4,25%, sedangkan pada *martemper* sebesar 3,63%, 3,63%, dan 4,21%. Nilai ketahanan *hydrogen embrittlement* yang optimal dicapai pada proses *martemper* selama 5 dan 10 menit. Penelitian ini juga membahas mengenai perbandingan bentuk perpatahan makro pada kedua proses.

Kata kunci: *Quench Temper*, *Martemper*, *Hydrogen Embrittlement*,
Martensit Temper, Baja SAE 1050, *Delayed Fracture*

ABSTRACT

Name : Fandy Irwanto
Study Program : Metallurgy and Materials Engineering
Title : Analysis of Hardness, Microstructure, and The Resistance of Hydrogen Embrittlement in Quench Temper and Martemper of SAE 1050 Steel

Innovation of heat treatment method which done from conventional quench temper into martemper was purposed to increase the resistance of Outer Link Plate (OLP) component 420 AD (SAE 1050; 1.2 mm) to hydrogen embrittlement by maintain values of hardness and toughness. Quench temper was did by heating up to 855 °C for 40 minutes, oil quenched at 40- 70 °C, and then tempered at 350 °C for 60 minutes. Otherwise, Martemper was did by heating up to 855 °C for 40 minutes, oil quenched at 155 °C with holding time variable in 5, 10, and 15 minutes to uniform the temperature of core and surface, then water quenched for finishing martensite transformation, and then tempered at 260 °C for 60 minutes. The result of delayed fracture test shows that sample of quench temper has increasing in surface hardness value by 4.25%, meanwhile the increase values for martemper product are 3.63%, 3.63%, and 4.21%. Optimum value of hydrogen embrittlement resistance was attained on 5 and 10 minutes of martemper process. This research also discussing about comparison of macro fracture mode for both processes

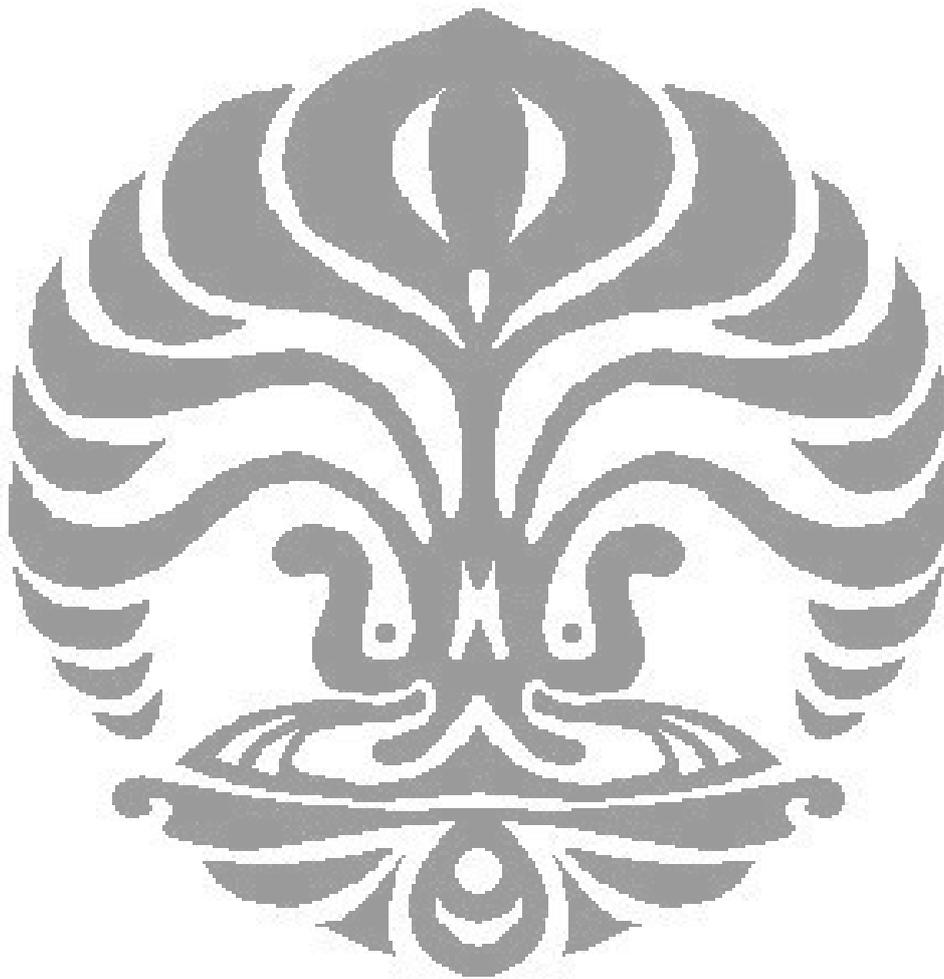
Keywords : Quench Temper, Martemper, Hydrogen Embrittlement, Tempered Martensite, SAE Steel 1050, Delayed Fracture

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	vii
ABSTRAK	viii
ABSTRACT	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR RUMUS	xvii
DAFTAR LAMPIRAN	xviii
1.PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Manfaat Penelitian	5
1.5 Batasan Penelitian.....	6
1.6 Sistematika Penulisan	6
2.TINJAUAN PUSTAKA.....	8
2.1 Baja Karbon Medium SAE 1050	8
2.2 Perlakuan Panas pada Baja SAE 1050.....	8
2.3 Proses <i>Martemper</i>	9
2.3.1 Media Celup untuk Metode <i>Martemper</i>	14
2.4 Mekanisme Pelepasan Panas Selama <i>Quench</i>	15
2.5 Transformasi Struktur Mikro Selama Pendinginan	17
2.6 Diagram Isothermal Transformation.....	20
2.7 Struktur Mikro Baja 1050	21
2.7.1 Martensit	22
2.7.2 Martensit Temper.....	23

2.8 Tegangan Sisa Pada Baja	24
2.9 <i>Delayed Fracture</i> pada Baja	25
2.10 Perpatahan Makro	28
3.METODE PENELITIAN	29
3.1 Diagram Alir Penelitian	29
3.2 Bahan dan Peralatan.....	30
3.2.1 Peralatan.....	30
3.2.2 Bahan	31
3.3 Prosedur Penelitian	31
3.3.1 Komposisi Material.....	31
3.3.2 Pembuatan Sampel Pelat Rantai	33
3.3.3 Austenisasi	33
3.3.4 <i>Martemper</i> dan <i>Temper</i>	34
3.3.5 Pengujian Kekerasan.....	35
3.3.6 Pengamatan Struktur Mikro	36
3.3.7 Pengujian <i>Delayed Fracture</i>	37
3.3.8 Pengamatan Makro Permukaan Patahan.....	38
4.HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	39
4.1 Pengujian Kekerasan Makro	39
4.1.1 Kekerasan Sebelum Temper	39
4.1.2 Kekerasan Setelah Temper	41
4.1.3 Kekerasan Setelah Pengujian <i>Delayed Fracture</i>	44
4.2 Pengujian Kekerasan Mikro	47
4.3 Analisis Struktur Mikro	50
4.4 Hasil Pengujian <i>Delayed Fracture</i>	58

5.KESIMPULAN	64
5.1 Kesimpulan	64
 DAFTAR REFERENSI	 65



DAFTAR TABEL

Tabel 1.1. Perbandingan Sifat Mekanis Antara Produk <i>Quench Temper</i> , <i>Martemper</i> , dan <i>Austemper</i> pada baja 1095	3
Tabel 1.2. Parameter Proses <i>Quench Temper</i> Pada Pelat Rantai	4
Tabel 2.1. Komposisi Baja SAE 1050	8
Tabel 2.2. Karakteristik Penggunaan Temperatur untuk <i>Martempering Oil</i>	15
Tabel 3.1. Karakteristik <i>Hot Quench Oil No.809XV</i>	31
Tabel 3.2. Komposisi Kimia Material	32
Tabel 4.1. Kekerasan Sampel OLP Hasil Perlakuan Panas (Sebelum Temper)	42
Tabel 4.2. Kekerasan Sampel OLP Hasil Perlakuan Panas (Setelah Temper)	44
Tabel 4.3. Kekerasan Sampel OLP Hasil Pengujian <i>Delayed Fracture</i>	47
Tabel 4.4. Perbandingan Kekerasan Mikro Sampel OLP Hasil <i>Martemper</i> Sebelum Temper	50

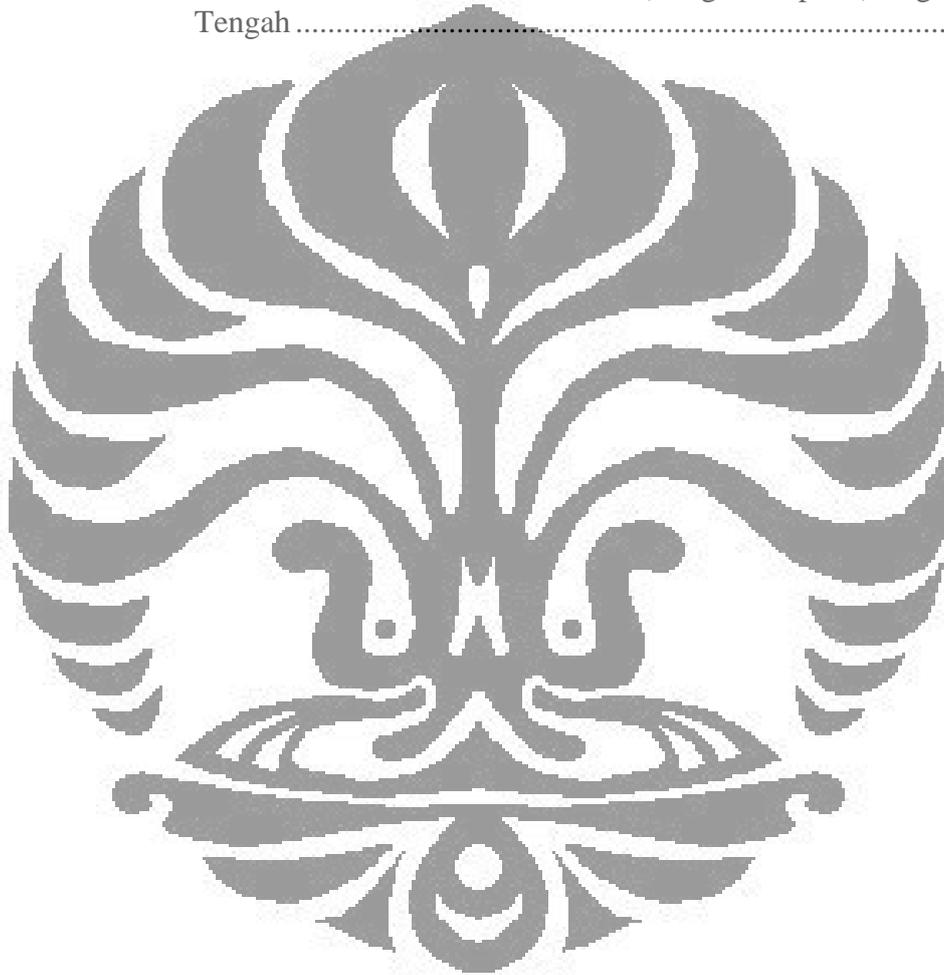


DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Diagram Fasa Fe-Fe ₃ C	9
Gambar 2.2.	Diagram <i>Time Temperature Transformation</i> dengan Perbandingan Kurva Pendinginan Hasil <i>Quenching</i> dan <i>Tempering</i> dengan (a) Proses Konvensional (b) <i>Martempering</i> (c) Modifikasi <i>Martempering</i>	10
Gambar 2.3.	Diagram TTT Proses <i>Martemper</i>	11
Gambar 2.4.	Diagram TTT Proses <i>Hot Oil Quenching</i>	12
Gambar 2.5.	Diagram TTT Antara Baja 1034 (<i>Hypoeutectoid</i>) dan Baja 1090 (<i>Hypereutectoid</i>)	13
Gambar 2.6.	Mekanisme Pendinginan Cepat pada Baja Hasil Austenisasi dalam Media Celup Cair	16
Gambar 2.7.	Efek Agitasi Pada Kurva Pendinginan	17
Gambar 2.8.	Transformasi Melalui Dekomposisi <i>Austenite</i>	18
Gambar 2.9.	Struktur Kristal Martensit- <i>Body Centered Tetragonal</i> (BCT)	19
Gambar 2.10.	Jarum <i>Martensite</i> dalam Matriks yang Mengandung <i>Austenite</i>	19
Gambar 2.11.	Diagram <i>Time Temperatur Transformation</i> (TTT) pada Baja SAE 1050	20
Gambar 2.12.	Struktur Mikro Martensit <i>Temper</i> Baja 1050 Hasil <i>Quench</i> air dengan Temperatur <i>Temper</i> 260o C Perbesaran 500x	21
Gambar 2.13.	Struktur Mikro Martensit <i>Temper</i> Baja 1050 Hasil <i>Quench</i> Air dengan Temperatur <i>Temper</i> 480o C Perbesaran 825x	22
Gambar 2.14.	Struktur Mikro Martensit <i>Temper</i> Baja 1050 Hasil <i>Quench</i> Air dengan Temperatur <i>Temper</i> 595o C Perbesaran 825x	22
Gambar 2.15.	<i>Lath</i> Martensit hasil <i>quench</i>	23
Gambar 2.16.	Transformasi Struktur Mikro Martensit Menjadi Martensit <i>Temper</i>	24
Gambar 2.17.	Mekanisme Pertumbuhan Retak Pada <i>Delayed Fracture</i> Maraging Steel. (a) Sebelum <i>Crack Initiation</i> (b) Babak Pertumbuhan Retak ..	26
Gambar 2.18.	Kurva Kekuatan Jangka Panjang Pada Baja yang Dihidrogenisasi ..	28

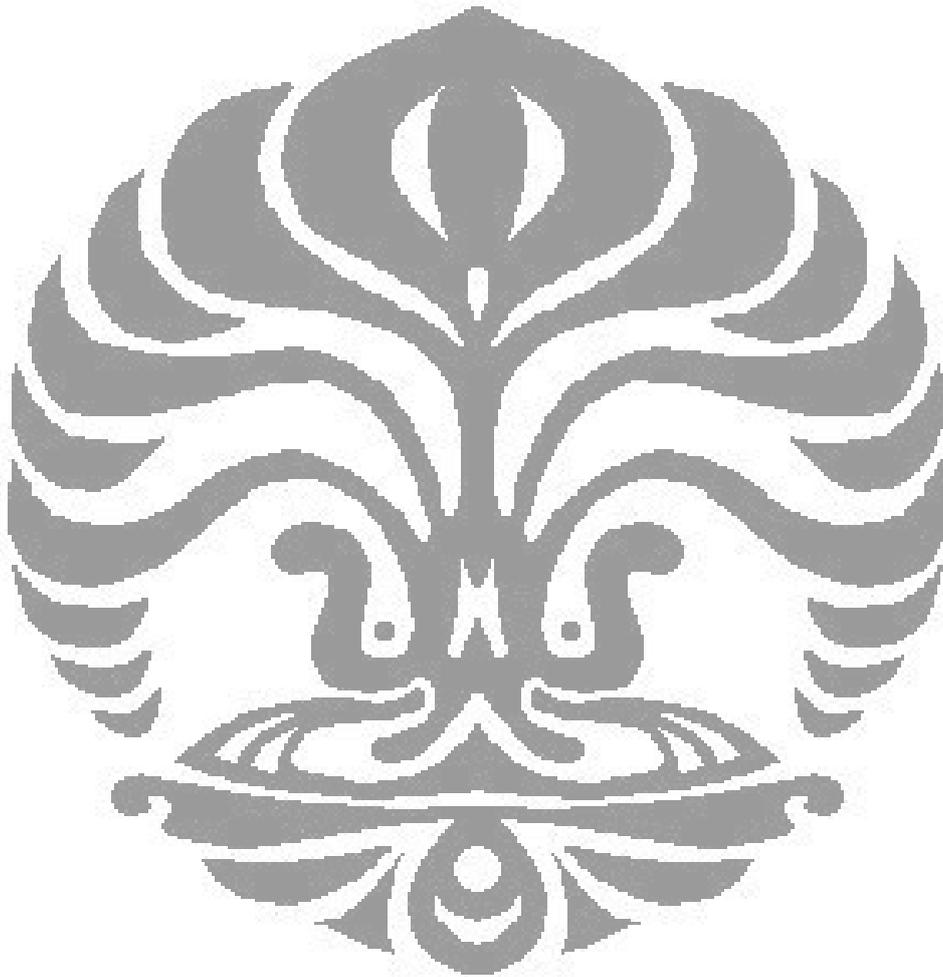
Gambar 3.1.	Diagram Alir Penelitian	29
Gambar 3.2.	Sampel Pelat <i>Outer Link Plate 420 AD</i>	33
Gambar 3.3.	<i>Wilmonn Batch Furnace</i>	34
Gambar 3.4.	Penjejakan Model <i>Vickers</i>	36
Gambar 3.5.	Skema Mikroskop Optik	37
Gambar 3.6.	Rangkaian Rantai Uji <i>Delayed Fracture</i> Sebelum Dichelup.....	38
Gambar 4.1.	Grafik Perbandingan Kekerasan Sampel Sebelum dan setelah <i>Temper</i>	44
Gambar 4.2.	Grafik Perbandingan Kekerasan Sampel Sebelum dan Setelah Uji <i>Delayed Fracture</i>	47
Gambar 4.3.	Grafik Perbandingan kekerasan Mikro Sampel <i>Martemper</i> Sebelum <i>Temper</i>	49
Gambar 4.4.	Foto Mikro Daerah Pinggir Sampel <i>Martemper</i> 5 Menit, (B) 10 menit, dan (C) 15 menit. Etsa Nital 2% s.d. 3%.....	50
Gambar 4.5.	Foto Mikro hasil Q&T Sebelum <i>Temper</i> . Etsa Nital 2% - 3%. 1000x	51
Gambar 4.6.	Foto Mikro hasil Q&T Setelah <i>Temper</i> . Etsa Nital 2% - 3%. 1000x.....	52
Gambar 4.7.	Foto Mikro hasil <i>Martemper</i> 5 Menit. Sebelum <i>Temper</i> . Etsa Nital 2% - 3%. 1000x.....	53
Gambar 4.8.	Foto Mikro hasil <i>Martemper</i> 5 Menit. Setelah <i>Temper</i> . Etsa Nital 2% - 3%. 1000x.....	54
Gambar 4.9.	Foto Mikro hasil <i>Martemper</i> 10 Menit. Sebelum <i>Temper</i> . Etsa Nital 2% - 3%. 1000x.....	55
Gambar 4.10.	Foto Mikro hasil <i>Martemper</i> 10 Menit. Setelah <i>Temper</i> . Etsa Nital 2% - 3%. 1000x.....	55
Gambar 4.11.	Foto Mikro hasil <i>Martemper</i> 15 Menit. Sebelum <i>Temper</i> . Etsa Nital 2% - 3%. 1000x.....	56
Gambar 4.12.	Foto Mikro hasil <i>Martemper</i> 15 Menit. Setelah <i>Temper</i> . Etsa Nital 2% - 3%. 1000x.....	57
Gambar 4.13.	Rangkaian Pelat Setelah Pengujian <i>Delayed Fracture</i> Selama 50 Jam	58
Gambar 4.14.	Rangkaian Pelat Setelah Pengujian <i>Delayed Fracture</i> Selama 100 Jam.....	59

Gambar 4.15.	Daerah Perpatahan Pada Sampel Hasil Q&T Setelah Uji <i>Delayed Fracture</i> Selama 100 Jam.....	60
Gambar 4.16.	Daerah Perpatahan Pada Sampel Hasil <i>Martemper</i> Setelah Uji <i>Delayed Fracture</i> Selama 100 Jam	60
Gambar 4.17.	Permukaan Patahan Sampel <i>Quench Temper</i> Hasil Uji <i>Delayed Fracture</i> Selama 100 Jam. 100x. A) Bagian Tepi, B) Bagian Tengah.....	61
Gambar 4.18.	Permukaan Patahan Sampel <i>Martemper</i> Hasil Uji <i>Delayed Fracture</i> Selama 100 Jam. 100x. A) Bagian Tepi, B) Bagian Tengah	62



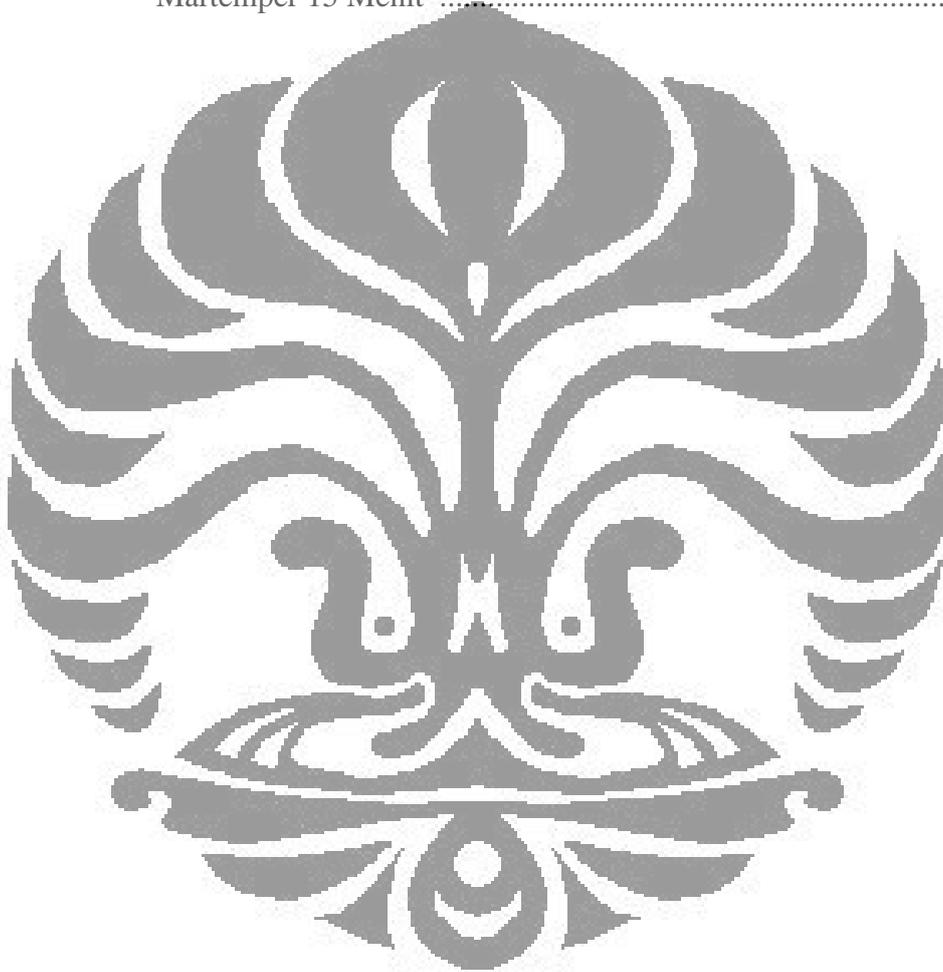
DAFTAR RUMUS

Rumus 2.1. Rumus Perhitungan Ms	22
Rumus 3.1. Metode Vickers.....	35
Rumus 4.1. Persamaan Reaksi Fe	58



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Data Pengujian Kekerasan Secara Mikro untuk Baja 1050 Hasil Martemper 5 dan 10 Menit.....	67
Lampiran 2 Data Pengujian Kekerasan Secara Mikro untuk Baja 1050 Hasil Martemper 15 Menit	68



BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebijakan liberalisasi perdagangan telah dilakukan pemerintah Indonesia sejak awal tahun 1980. Secara bertahap pemerintah membuka perekonomian dengan mengeluarkan serangkaian kebijakan penurunan tarif dan menghilangkan kebijakan non-tarif yang menghambat masuknya barang impor. Di samping itu, pemerintah juga melakukan kerjasama perdagangan regional melalui *ASEAN Free Trade Agreement* (AFTA). Selanjutnya kebijakan liberalisasi perdagangan semakin meningkat sejalan dengan derasnya arus globalisasi dan masuknya Indonesia dalam kerjasama internasional melalui *World Trade Organization* (WTO) ^[1].

Indonesia merupakan pasar motor terbesar di Asia, namun Indonesia belum mampu melakukan produksi motor dengan *brand* sendiri, sehingga banyak produsen motor dari negara lainnya seperti China, Jepang, dan Italia melemparkan produksinya ke Indonesia. Pasar sepeda motor di Indonesia pada tahun 2010 diperkirakan akan terus tumbuh seiring bertambahnya jumlah penduduk serta meningkatnya kesejahteraan masyarakat. Produksi sepeda motor nasional pada tahun ini diprediksi akan mencapai 10 juta unit atau mengalami kenaikan dari tahun lalu yang hanya 6 juta unit ^[2].

Sebagai pasar motor terbesar di Asia, meningkatnya konsumsi sepeda motor tentunya akan berdampak pada meningkatnya permintaan komponen sepeda motor. Salah satu komponen sepeda motor tersebut adalah rantai. Indonesia memiliki sebuah perusahaan rantai berskala nasional bernama PT X Manufacturing Indonesia yang bertindak sebagai produsen dan pemasok tunggal rantai sepeda motor di Indonesia. PT X Manufacturing Indonesia merupakan produsen resmi rantai sepeda motor untuk *Original Equipment Manufacture* (OEM) dan *genuine part* produsen motor di Indonesia sejak tahun 1984. Namun seiring masuknya rantai – rantai motor dari luar negeri dengan kualitas yang sama

dan harga yang lebih murah, maka tidak sedikit konsumen dari PT X Manufacturing Indonesia beralih menggunakan rantai buatan pemasok luar negeri. Kondisi ini memaksa PT X Manufacturing Indonesia untuk melakukan *Cost Reduction Program* sejak tahun 2005. Maka sejak saat itu PT X Manufacturing Indonesia terus berupaya melakukan efisiensi biaya dalam proses produksi dengan tujuan dapat menghasilkan rantai berkualitas tinggi dengan biaya relatif rendah agar mampu bersaing dengan produk impor.

Salah satu konsumen utama PT X Manufacturing Indonesia tersebut membuat standard kualifikasi baru untuk spesifikasi rantai yang mereka butuhkan, yaitu ketahanan terhadap *hydrogen embrittlement* (HE). Ternyata komponen rantai yang selama ini diproduksi oleh PT X Manufacturing Indonesia masih memiliki kelemahan terhadap *hydrogen embrittlement*

Untuk memenuhi permintaan konsumen utama dan meningkatkan daya saing penjualan, maka PT X Manufacturing Indonesia melakukan upaya berbasis efisiensi terhadap proses produksi yang digunakan. Salah satu upaya tersebut adalah dengan melakukan inovasi dalam metode *hardening* yang dilakukan melalui peralihan metode perlakuan panas konvensional berupa *quench temper* yang selama ini dilakukan, menuju kepada metode *martemper*. Alasan peralihan proses dikarenakan produk hasil *martemper* memiliki beberapa kelebihan dalam sifat mekanis dibandingkan dengan produk hasil *quench temper* (Q&T) seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.1 berikut.

Tabel 1.1. Perbandingan Sifat Mekanis Antara Produk *Quench Temper*, *Martemper*, dan *Austemper* pada baja 1095^[3]

Perlakuan Panas	Kekerasan (HRC)	Kekuatan Impak		Elongasi dalam 25 mm atau 1 inchi (dalam %)
		Joule	ft.lbf	
<i>Quench dan temper</i>	52,5	19	14	...
<i>Martemper dan temper</i>	53	38	28	...
<i>Martemper dan temper</i>	52,8	33	24	...
<i>Austemper</i>	52	61	45	11

Metode *martemper* dipilih karena memiliki nilai ekonomis yang sangat baik, terutama dalam biaya instalasi peralatan yang diperlukan, hanya membutuhkan media oli panas untuk melakukan *quenching*. Setelah melakukan pendalaman konseptual terhadap ketahanan *hydrogen embrittlement*, maka didapat hipotesis bahwa sifat kekerasan, mikrostruktur dan tegangan sisa merupakan tiga hal yang mempengaruhi ketahanan terhadap *hydrogen embrittlement*^[4]. Pada metode Q&T akan menghasilkan produk yang memiliki struktur mikro berupa martensit temper dan pada metode *martemper* juga akan dihasilkan martensit temper, namun dengan tegangan sisa yang lebih rendah dibandingkan dengan hasil Q&T. Selain itu, produk hasil *martemper* juga memiliki kestabilan dimensi serta ketahanan distorsi yang baik^[3].

Berdasarkan pemahaman di atas, maka akan dibuktikan apakah metode *martemper* dapat diterima sebagai metode yang efisien dan ekonomis, sebagai solusi atas produk hasil Q&T yang tidak tahan terhadap *hydrogen embrittlement*.

1.2 Perumusan Masalah

Material SAE 1050 selama ini digunakan dalam proses produksi *inner* dan *outer link plate* dengan berbagai parameter proses yang telah ditetapkan pada Tabel 1.2. berikut

Tabel 1.2. Parameter Proses *Quench Temper* Pada Pelat Rantai ^[5]

Component	Material Specification	Hardness After Heat Treatment	Normal Hardening			
			Temp	Time	Quenching Temp	Quenching Media
Outer Link Plate	SAE 1050 / S 50 C	56 s.d. 62 HRC	850 ± 5 °C	40 Menit	40 s.d. 70 °C	Oil Quenching
Inner Link Plate						

Dengan parameter proses yang selama ini dilakukan, produk yang dihasilkan memiliki sifat mekanis yang baik namun ketahanan terhadap *hydrogen embrittlement* yang buruk. Hal ini diperburuk dengan hadirnya tegangan sisa akibat proses perlakuan panas selama proses produksi. Kestabilan fasa, struktur mikro, dan komposisi kimia material juga dapat mempengaruhi ketahanan pelat rantai terhadap *hydrogen embrittlement*.

Diyakini bahwa penyebab rendahnya ketahanan terhadap *hydrogen embrittlement* terletak pada metode perlakuan panas *quench temper* yang menghasilkan struktur martensit dengan tegangan sisa hasil pengerjaan yang besar. Oleh karena itu harus dilakukan peralihan metode perlakuan panas untuk mendapatkan ketahanan *hydrogen embrittlement* yang baik tetapi tidak mengurangi sifat mekanis seperti kekuatan luluh, kekerasan, dan ketahanan fatik.

Salah satu upaya tersebut adalah penelitian menggunakan metode *martemper* yang akan dilakukan dengan membandingkan produk hasil metode baru ini dengan produk hasil metode konvensional. Pada penelitian ini akan dibahas mengenai pengaruh metode *martemper* terhadap ketahanan *hydrogen embrittlement* dengan

variabel waktu tahan di dalam media oli panas dengan tidak mengabaikan nilai kekerasan sesuai standard yang berlaku. Diharapkan dengan metode *martemper* ini akan menghasilkan tegangan sisa yang lebih kecil, struktur mikro martensit yang seragam, kekerasan yang baik, dan ketahanan *hydrogen embrittlement* yang meningkat.

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan perumusan masalah yang telah disebutkan, tujuan dilaksanakan penelitian ini, yaitu:

1. Mengetahui pengaruh waktu tahan pencelupan oli panas terhadap kekerasan, struktur mikro, dan ketahanan *hydrogen embrittlement* pada baja SAE 1050.
2. Mengetahui pengaruh media celup oli panas (metode *martemper*) terhadap kekerasan, struktur mikro, dan ketahanan *hydrogen embrittlement* pada baja SAE 1050 bila dibandingkan dengan media celup oli temperatur 40^o s.d. 70^o C (metode *quench temper*).
3. Mengetahui bentuk permukaan dan jenis patahan pelat rantai hasil pengujian *delayed fracture* yang diamati secara makro antara baja SAE 1050 hasil *martemper* dan *quench temper* setelah pengujian *delayed fracture* selama 100 jam.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dilakukannya penelitian ini adalah :

1. Bagi industri rantai sepeda motor
Menciptakan pelat rantai yang tahan terhadap *hydrogen embrittlement*, mempunyai kekuatan tinggi, dan mempunyai sifat mekanis yang lebih baik dibanding pelat rantai dengan metode konvensional *quench temper* yang dipakai sebelumnya untuk memenuhi permintaan produksi dari konsumen di PT X Manufacturing Indonesia.

Universitas Indonesia

2. Bagi peneliti di bidang Metalurgi dan Material

Penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar atau acuan untuk penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan topik yang serupa maupun topik yang akan dikembangkan lebih lanjut.

1.5 Batasan Penelitian

Dalam menganalisa masalah pada penelitian ini, peneliti membatasi pada hal-hal sebagai berikut :

1. Material yang digunakan adalah baja karbon medium SAE 1050.
2. Penelitian dilakukan dengan menggunakan metode *martemper* atau *marquenching*.
3. Media pendinginan yang digunakan adalah *Hot Oil Quenching No.809XV* dengan volume 3 liter
4. Temperatur media *quenching* yang digunakan adalah 155 °C dengan toleransi plus minus 5 °C.
5. Penelitian menggunakan variabel waktu tahan pencelupan selama 5 menit, 10 menit, dan 15 menit
6. Austenisasi dilakukan di dalam *batch furnace* dalam atmosfer yang tidak vakum
7. Karakterisasi yang dilakukan meliputi pengujian kekerasan, pengamatan struktur mikro, dan analisis komposisi kimia. Sedangkan ketahanan HE akan diketahui dengan pengujian *delayed fracture*, yaitu pencelupan sampel ke dalam 4 liter HCl 0,1 N selama 100 jam dengan setiap 25 jam dilakukan penggantian larutan

1.6. Sistematika Penulisan

Dalam sistematika penulisan ini, peneliti hendak memberikan gambaran umum mengenai apa yang diuraikan dalam masing-masing bab, sehingga isi dari Tugas Akhir ini dapat terlihat dengan jelas tanpa melupakan hubungan antara bab yang satu dengan bab yang lainnya.

Pembahasan dalam lima bab secara ringkas dapat diuraikan sebagai berikut :

BAB 1 PENDAHULUAN

Bab ini merupakan pendahuluan yang menjelaskan mengenai latar belakang dibuatnya penelitian, perumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan penelitian serta sistematika dari penulisan Tugas Akhir ini.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi tentang teori-teori umum yang relevan dengan penelitian sehingga dapat diperoleh pengertian dan pengetahuan yang menunjang analisis permasalahan dalam penelitian ini.

BAB 3 METODE PENELITIAN

Dalam bab ini dijelaskan mengenai rancangan penelitian, prosedur pelaksanaan, spesifikasi peralatan, dan spesifikasi material uji.

BAB 4 PEMBAHASAN

Merupakan inti dari penelitian yang berisi data-data yang diperoleh selama penelitian dan pembahasan tentang data yang ada sesuai dengan permasalahan yang ditetapkan pada penelitian.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

Dalam bab terakhir ini diuraikan mengenai simpulan dari hasil penelitian yang dilakukan dan pemberian saran-saran yang diharapkan akan berguna bagi semua pihak yang memiliki kepentingan serupa terhadap topik penelitian ini.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Baja Karbon Medium SAE 1050

Sampel yang digunakan pada penelitian ini merupakan jenis baja karbon medium, dengan kandungan karbon mencapai 0,50 %, dan memiliki kemampukerasan yang cukup baik dikarenakan kandungan karbon yang tidak terlalu rendah. Berikut ini adalah kandungan unsur yang terdapat dalam baja karbon medium:

Tabel 2.1. Komposisi Baja SAE 1050 ^[6]

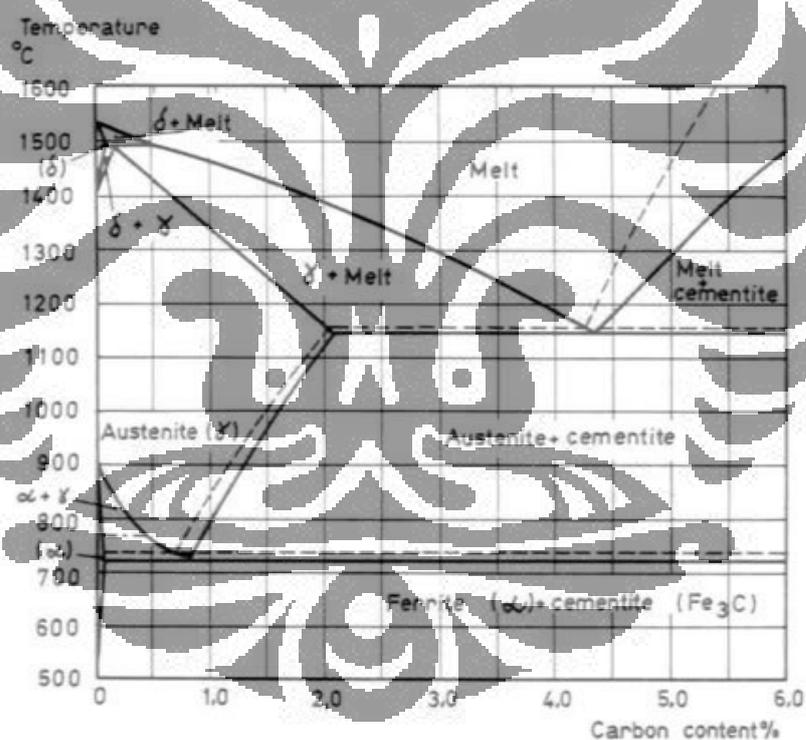
Spesifikasi	Komposisi Kimia								
	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cu (%)	Ni (%)	Cr (%)	Mo (%)
Carbon Steel									
SAE 1050 / JIS S50C	0,47 s.d. 0,55	0,15 s.d. 0,35	0,60 s.d. 0,90	Max 0,03 0	Max 0,03 5	Max 0,30	Max 0,20	Max 0,20	-

Baja karbon SAE 1050 merupakan salah satu jenis baja karbon medium yang memiliki rentang kadar karbon antara 0,45 s.d. 0,55 % C dan banyak digunakan di pasaran karena memiliki beberapa keunggulan antara lain sifat mampu mesin dan ketahanan aus yang baik, serta sifat mekaniknya menengah. Baja karbon medium banyak digunakan sebagai *gear*, *crankshaft*, *chain link*, dan komponen lainnya yang membutuhkan kekuatan tinggi serta ketahanan aus yang baik dalam aplikasinya.

2.2 Perlakuan Panas Pada Baja SAE 1050

Memahami diagram fasa menjadi sebuah tuntutan karena terdapatnya hubungan antara struktur mikro dengan sifat-sifat mekanis suatu material, yang semuanya berhubungan dengan karakteristik diagram fasanya. Diagram fasa juga memberikan informasi penting tentang titik leleh, titik kristalisasi, dan fenomena lainnya.

Perlakuan panas diberikan pada baja untuk menghasilkan sifat-sifat yang diinginkan dalam penggunaannya. Perlakuan panas diawali dengan proses austenisasi atau pemanasan hingga temperatur austenit di atas temperatur kritis (A_1). Kemudian logam mengalami penahanan temperatur selama waktu tertentu lalu disusul dengan pendinginan dengan beragam kecepatan pendinginan, yang akan menghasilkan fasa akhir yang berbeda-beda. Dengan pendinginan yang lambat, akan terbentuk struktur mikro perlit kasar dan lapisan tipis ferit sementit. Dengan ditingkatkannya laju pendinginan, maka akan mengurangi ketebalan lamela. Jika ditingkatkan lagi akan membentuk struktur mikro bainit. Laju pendinginan yang sangat cepat akan menghasilkan struktur mikro martensit. Diagram transformasi pada baja yang mungkin terjadi melalui dekomposisi austenit ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Diagram Fasa Fe-Fe₃C^[6].

2.3 Proses Martemper

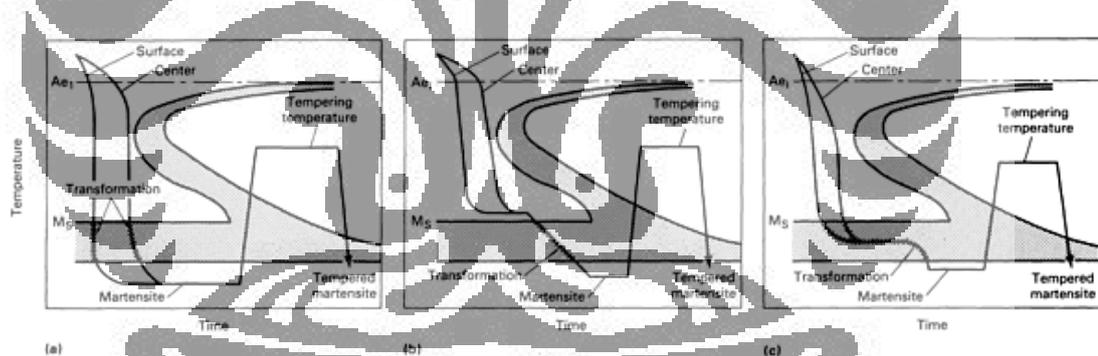
Martemper merupakan salah satu bagian dari proses *interrupted quench* yang mengalami penahanan di atas temperatur pembentukan martensit dari

Universitas Indonesia

temperatur austenisasi, dalam jangka waktu yang cukup untuk menunda pendinginan cepat dan menyeragamkan temperatur antara permukaan dan inti baja. Hal tersebut akan mengurangi distorsi, perpatahan, dan tegangan sisa. Terkadang *martempering* disebut juga dengan *marquenching*. Struktur mikro yang terbentuk hasil *martemper* sebagian besar berupa martensit yang belum mengalami *temper* dan bersifat *brittle* [3].

Gambar 2.2. menunjukkan perbedaan di antara konvensional *quenching* dan *martempering*. Proses yang dilakukan saat *martempering* antara lain:

- *Quenching* dari temperatur austenisasi ke media cair yang panas seperti oli panas, lelehan garam atau *fluidized particle bed* di atas temperatur pembentukan martensit (M_s)
- *Holding* pada media celup sampai temperatur pada baja menjadi seragam (sangat tergantung pada ketebalan baja)
- Pendinginan (umumnya di udara) dengan kecepatan moderat untuk mencegah perbedaan temperatur yang besar antara permukaan dan inti



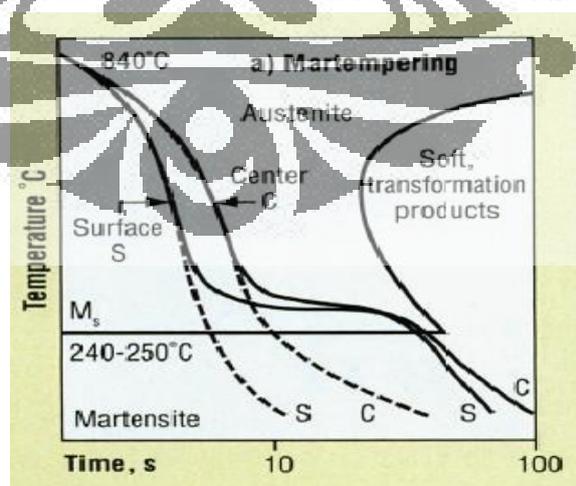
Gambar 2.2. Diagram *Time Temperature Transformation* (TTT) dengan Perbandingan Kurva Pendinginan Hasil *Quenching* dan *Tempering* dengan (a) Proses Konvensional- (b) *Martempering*. (c) Modifikasi *Martempering* [3].

Pembentukan martensit terjadi secara seragam pada benda uji selama pendinginan pada temperatur ruang, dengan tujuan untuk menghindari tegangan sisa yang berlebihan. Produk hasil *martemper* harus kembali dilakukan proses temper seperti produk hasil konvensional *quenching* dengan tujuan untuk memperbaiki ketangguhan

Keuntungan metode *martempering* terletak pada proses reduksi gradien panas antara permukaan dan inti dari material. Tegangan sisa yang dihasilkan dari produk *martemper* lebih rendah daripada tegangan sisa hasil konvensional *quenching* karena variasi panas terbesar terjadi selama baja berada pada kondisi austenitik plastis dan karena transformasi akhir serta perubahan panas terjadi pada sampel uji dalam waktu yang bersamaan. *Martemper* juga dapat mengurangi resiko terjadinya perpatahan.

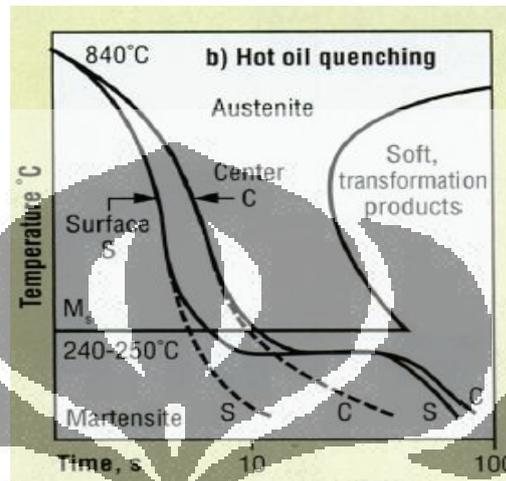
Kekerasan produk sangat berkaitan dengan struktur mikro, begitu juga halnya dengan ketangguhan dan ketahanan fatik. Struktur mikro hasil *martemper* adalah martensit dan kemungkinan terbentuk bainit sangat kecil^[3]. Kemungkinan lainnya adalah terbentuk ferit, sementit karbida dan *austenite* sisa jika pendinginan dilakukan dengan lambat.

Proses *martemper (full martemper)* secara konseptual merupakan sebuah metode yang diaplikasikan pada sebuah benda uji yang terlebih dahulu diaustenisasi, yang kemudian di-*quench* melalui sebuah media di mana temperatur harus dijaga di atas temperatur *Martensit Start* (M_s) dalam hal ini SAE 1050 memiliki temperatur M_s sekitar 316°C , dan ditahan di dalam media yang dapat berupa lelehan garam dan oli panas sampai temperatur antara permukaan dan inti menjadi seragam (tetapi tidak terlalu lama agar tidak terbentuk bainit atau perlit) kemudian didinginkan di udara^[7].



Gambar 2.3. Diagram TTT Proses *Martemper*^[7]

Perbedaannya dengan proses *marquenching* adalah merupakan hasil modifikasi proses *martemper* yang pada prinsipnya sama, namun temperatur dijaga di bawah temperatur *Martensit Start* (M_s) antara M_s dan *Martensit Finish* (M_f). Proses ini dikenal lebih spesifik dengan nama *hot oil quench*.



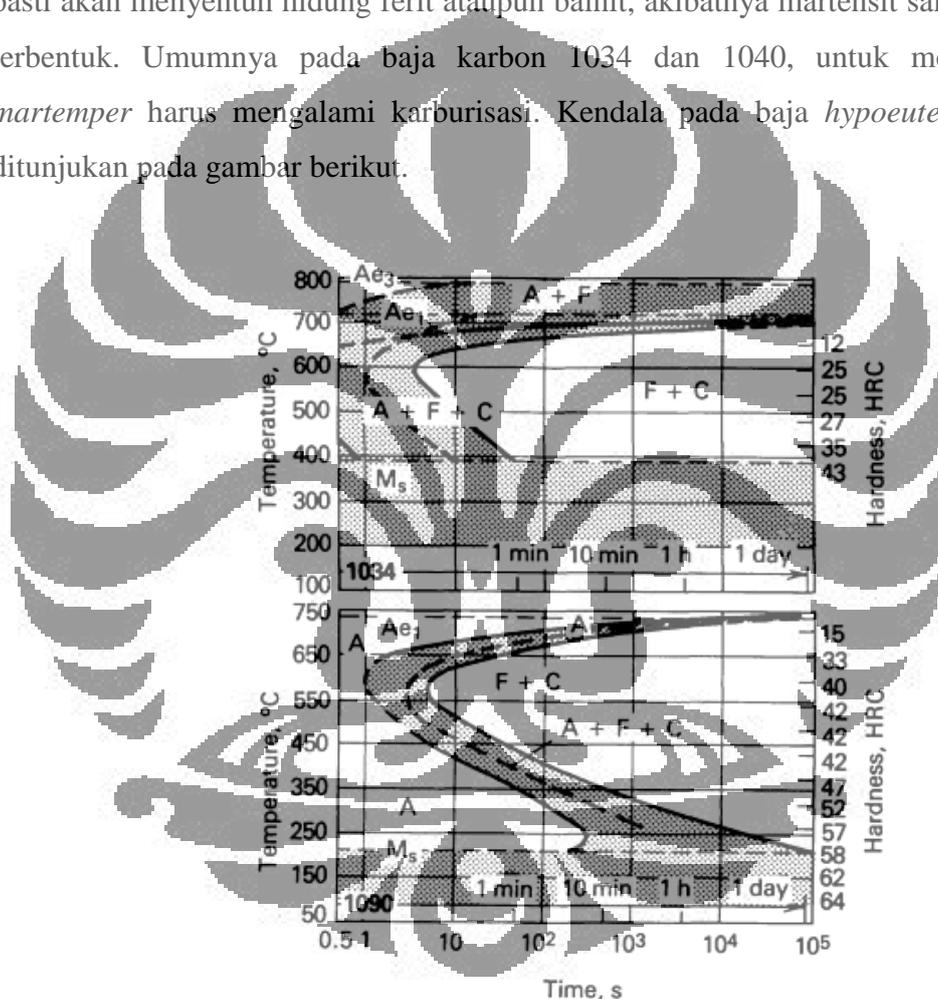
Gambar 2.4. Diagram TTT Proses *Hot Oil Quench* ^[7]

Dalam berbagai jenis baja dibutuhkan laju pendinginan yang kritis seperti *quenching* yang lebih cepat, yang dapat dilakukan dengan *marquenching* atau *martempering*. Hal tersebut sangat dibutuhkan untuk mendapatkan kekerasan penuh. Juga dapat secara efektif mereduksi tegangan sisa hasil *quench* dan memperbaiki kestabilan dimensi *part*.

Dengan struktur martensit yang semakin halus, diharapkan nilai ketangguhan dan ketahanan fatik material hasil *martemper* dapat meningkat dibandingkan dengan hasil *quench temper* serta mendapatkan nilai kekerasan yang sesuai standard konsumen yaitu 42 sampai dengan 49 HRC.

Material yang umum digunakan pada proses *martemper* antara lain berupa baja paduan dan baja karbon, namun baja paduan lebih umum digunakan karena pengaruh unsur paduan yang menggeser hidung kurva *Time Temperature Transformation* (TTT) ke arah kanan sehingga mempermudah terjadinya pembentukan martensit untuk waktu yang cukup. Pada dasarnya seluruh material

yang media celupnya menggunakan oli, pasti dapat mengalami *hardening* dengan metode *martemper*. Baja karbon biasa (*plain carbon steel*) harus memiliki kandungan karbon yang cukup untuk menggeser hidung kurva TTT ke arah kanan. Pada umumnya baja karbon medium dengan kandungan karbon di atas 0,4 % dapat dikeraskan dengan metode *martemper*. Untuk kasus baja karbon *hypoeutectoid*, harus diperhatikan kadar karbon dengan kurva TTT yang dimilikinya dikarenakan untuk pendinginan secepat apapun, kurva pendinginan pasti akan menyentuh hidung ferit ataupun bainit, akibatnya martensit sangat sulit terbentuk. Umumnya pada baja karbon 1034 dan 1040, untuk mengalami *martemper* harus mengalami karburisasi. Kendala pada baja *hypoeutectoid* ini ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 2.5. Diagram TTT Antara Baja 1034 (*Hypoeutectoid*) dan Baja 1090 (*Hypereutectoid*)^[3]

Kontrol proses *martemper* sangat penting diperhatikan mengingat temperatur dan waktu berperan sensitif pada kasus ini. Temperatur austenisasi harus diperhatikan karena berhubungan dengan besar butir austenit yang

Universitas Indonesia

dihasilkan, derajat homogenisasi, dan kelarutan karbida. Semakin tinggi temperatur maka ukuran butir austenit semakin besar dan temperatur pembentukan martensit (*Martensit Start*, M_s) semakin rendah. Pada baja 1050, temperatur austenisasi yang sesuai adalah 800 – 845 °C [3].

Temperatur pada media celup juga sangat diperhatikan dan sangat bergantung pada komposisi kimia benda uji, temperatur austenisasi, dan hasil yang diinginkan. Sebagai contoh, untuk metode konvensional *quenching* digunakan temperatur oli antara 40 s.d. 70 °C sedangkan untuk metode *martemper* umumnya digunakan oli di atas temperatur 95 °C. Untuk baja SAE 1050, temperatur media celup berkisar antara 150 s.d. 160 °C [3].

Waktu tahan dalam media celup sangat bergantung pada ketebalan sampel dan kecepatan pengadukan media celup. Semakin tipis sampel, maka waktu tahan semakin cepat. Untuk baja 1050, waktu tahan yang dibutuhkan minimal 5 menit.

Pada Baja 1050 untuk aplikasi *chain link*, *martemper* lebih efektif dilakukan dalam media lelehan garam (*salt bath*) pada temperatur 205° C dibandingkan dengan menggunakan oli panas pada temperatur 135 s.d. 175 °C [3].

2.3.1 Media Celup untuk Metode *Martemper*

Martempering Oil atau *Hot Quenching Oil* digunakan pada temperatur pencelupan antara 95 °C sampai 230 °C. Terdiri dari oli mineral hasil *solvent refine* dengan fraksi parafin yang sangat tinggi untuk mengoptimalkan stabilitas termal dan oksidatif. Stabilitas juga ditingkatkan oleh penambahan antioksidan. Perlambatan dan percepatan proses *Martempering Oil* juga dapat terjadi [8].

Martempering Oil diformulasikan untuk digunakan pada suhu yang tinggi dibandingkan *Conventional Oil*, karena memungkinkan untuk modifikasi atau aktualisasi *martempering* dari baja. Karakteristik dari interval temperatur untuk *Martempering Oil* disajikan pada Tabel 2.2. Karakteristik tersebut sesuai dengan jenis *Hot Oil Quenching* yang digunakan pada penelitian ini.

Tabel 2.2. Karakteristik Penggunaan Temperatur untuk *Martempering Oil* ^[8]

Viscosity at 40 °C (100 °F) SUS	Minimum flash point		Used temperature			
			Open air		Protective atmosphere	
	°C	°F	°C	°F	°C	°F
250 - 550	220	430	95-150	200-300	95-175	200-350
700 -1500	250	480	120-175	250-350	120- 205	250-400
2000 - 2800	290	550	150-205	300-400	150- 230	300-450

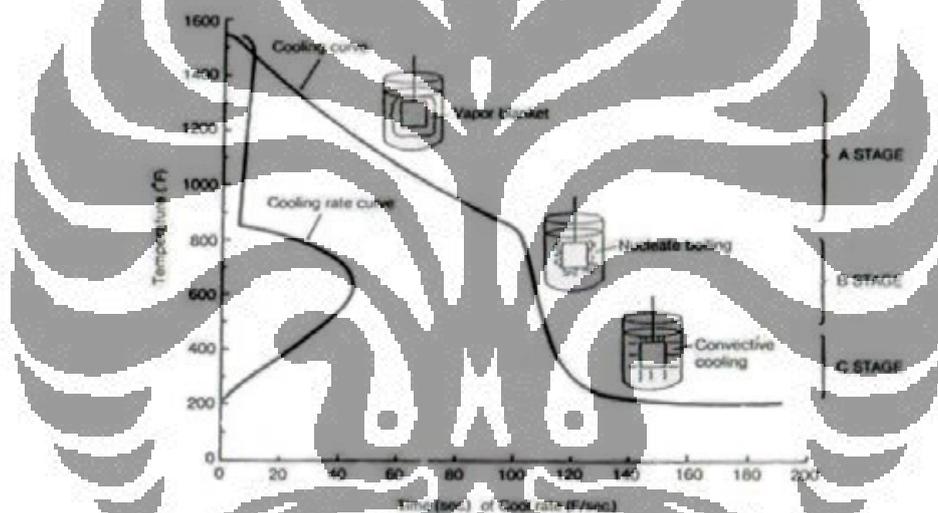
2.4 Mekanisme Pelepasan Panas Selama *Quench*

Struktur, kekerasan, dan kekuatan yang dihasilkan oleh perlakuan panas ditentukan oleh laju pendinginan aktual yang dicapai dalam proses *quench*. Jika laju pendinginan aktual melampaui laju pendinginan kritis, hanya martensit yang akan dihasilkan. Jika laju pendinginan aktual lebih kecil daripada laju pendinginan kritis, komponen baja tidak sepenuhnya mengalami pengerasan. Semakin besar perbedaan di antara kedua laju pendinginan tersebut, produk hasil transformasi akan semakin lunak ^[9].

Bentuk kurva pendinginan merupakan indikasi dari berbagai mekanisme pendinginan yang terjadi selama proses *quench*. Sebagai contoh, saat baja hasil austenisasi mengalami pendinginan cepat dalam suatu media cair yang mudah menguap, seperti air, oli, atau larutan polimer, setidaknya terjadi tiga tahap perpindahan panas. Ketiga tahap ini mewakili ketiga jenis mekanisme pendinginan yang terjadi saat pendinginan cepat logam panas. Ketiganya dikenal sebagai tahap A, B, dan C yang dapat dijelaskan sebagai berikut :

- Tahap A, atau tahap selubung uap (*vapor blanket stage*), terjadi melalui pembentukan selubung uap di sekitar logam panas. Temperatur logam sangat tinggi sehingga media pendingin membentuk uap di sekitar permukaan logam dan suatu lapisan film tipis dari uap menyelubungi logam panas

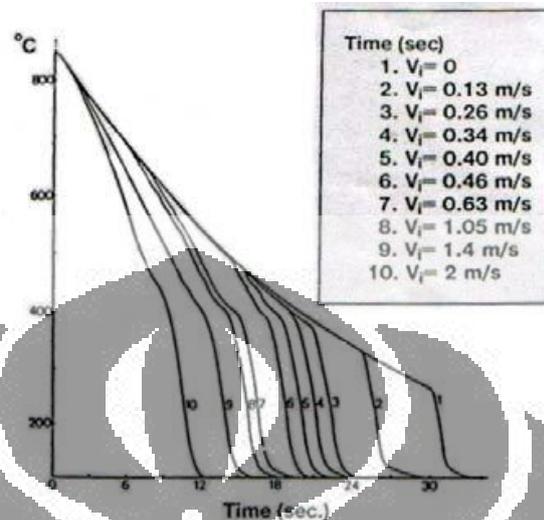
- Tahap B, atau tahap perpindahan uap (*vapor transport stage*), merupakan tahap dimulainya nukleasi pendidihan. Pendinginan lanjut dari tahap A menyebabkan logam mencapai temperatur di mana uap menjadi tidak stabil. Terjadi proses *wetting* dan *violent boiling* pada permukaan logam oleh media *quench*. Panas dengan sangat cepat terlepas sebagai energi laten penguapan. Tahap ini merupakan tahap tercepat dari pendinginan. Temperatur transisi antara tahap A dengan B dikenal sebagai '*leidenfrost temperature*' dan tidak tergantung pada temperatur awal logam yang dicelup.
- Tahap C merupakan tahap pendinginan konveksi dan konduksi, dimana permukaan logam telah memiliki temperatur dibawah titik didih air. Tahap ini hanya mengalami perpindahan panas melalui konveksi dan konduksi.



Gambar 2.6. Mekanisme Pendinginan Cepat Pada Baja Hasil Austenisasi Dalam Media Celup Cair^[3]

Laju pelepasan panas dari logam yang di-*quench* dapat ditingkatkan menggunakan agitasi, yang akan mengurangi stabilitas dari selubung uap yang menyelubungi permukaan logam selama tahap awal dari *quench*. Efek dari agitasi pada mekanisme pendinginan dari sebuah perak yang di-*quench* dengan medium pendingin air bertemperatur 60 °C ditunjukkan pada Gambar 2.5. Aliran air dengan kecepatan V_i diinjeksikan dari bagian bawah bak media pendingin dan diarahkan ke logam. Semakin besar laju aliran (agitasi), semakin besar temperatur

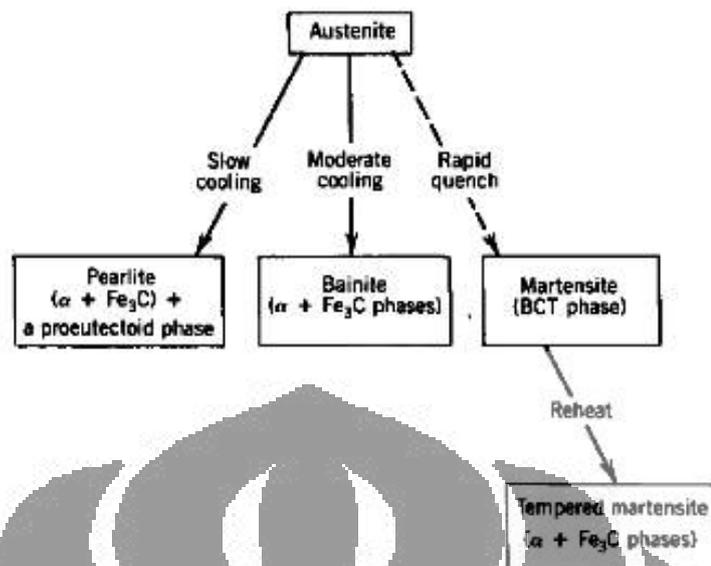
yang dapat dilepas dengan mengurangi kemungkinan terjadinya pembentukan selubung uap. Agitasi yang besar juga akan mempercepat pendinginan pada tahap pendinginan konveksi dan konduksi.



Gambar 2.7. Efek Agitasi Pada Kurva Pendinginan [8]

2.5 Transformasi Struktur Mikro Selama Pendinginan

Jika suatu baja dengan kadar karbon kurang dari 0,8 % mengalami austenisasi kemudian dilakukan pendinginan lambat, fasa pertama yang terbentuk dari austenit adalah ferit. Transformasi ini menghasilkan perubahan susunan atom dari *Face Centered Cubic* (FCC) menjadi *Body Centered Cubic* (BCC). Dikarenakan ferit hanya mampu melarutkan karbon dalam jumlah kecil, konsentrasi karbon dalam austenit meningkat selama pendinginan, hingga mencapai temperatur *eutectoid* 720°C , austenit yang tersisa akan bertransformasi menjadi perlit. Seperti yang ditunjukkan pada gambar di bawah ini

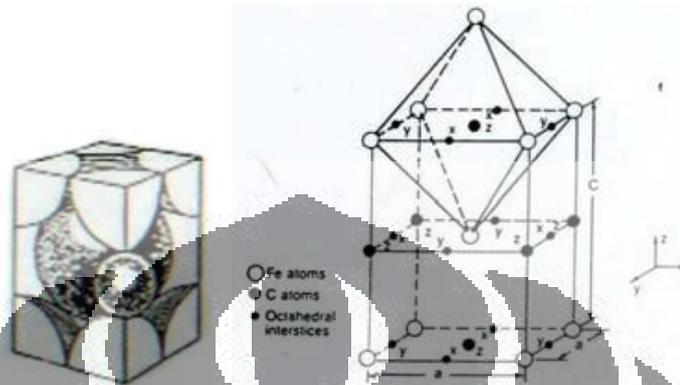


Gambar 2.8. Transformasi Melalui Dekomposisi Austenit ^[10]

Pada laju pendinginan yang lebih tinggi, transformasi pembentukan ferit dan perlit dapat dihindarkan pada banyak jenis baja karbon dan baja paduan rendah. Transformasi dari austenit terjadi antara temperatur 200 °C sampai 540 °C, menghasilkan struktur yang terdiri dari ferit dan sementit, tetapi fasa tersebut tidak tersusun dalam bentuk lamellar. Sebaliknya, ferit dan sementit tampak berbentuk *feathery* atau *acicular*, sehingga struktur ini dikenal sebagai bainit. Saat transformasi berlangsung pada temperatur 370 °C sampai 540 °C, bainit tampak seperti *feather* yang disebut bainit atas. Saat transformasi berlangsung pada daerah 200 °C sampai 370 °C, bainit tampak lebih *acicular* sehingga dinamakan bainit bawah. Kekerasan bainit tergantung pada struktur yang dicapai, tetapi umumnya berkisar antara 45 sampai 60 HRC ^[11].

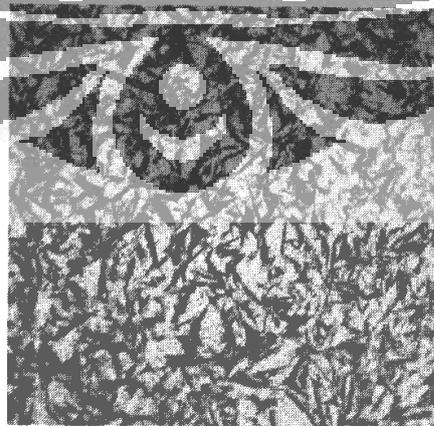
Transformasi austenit sampai temperatur yang lebih rendah, di bawah 200 °C, akan menghasilkan struktur *Body Centered Tetragonal* (BCT) yaitu martensit. Struktur mikro martensit memiliki penampakan seperti jarum. Beberapa jenis pendinginan dengan media air akan menekan pembentukan ferit, perlit, dan bainit yang akhirnya menghasilkan struktur martensit penuh. Baja akan tereksansi saat martensit terbentuk dan menghasilkan perubahan dimensi yang akan

menyebabkan distorsi. Hal tersebut disebabkan karena martensit memiliki volume jenis yang lebih besar dibandingkan austenit. Pada beberapa kondisi tertentu, distorsi dapat menyebabkan komponen retak selama *quench*.



Gambar 2.9. Struktur Kristal Martensit *Body Centered Tetragonal* (BCT) ^[9]

Pada beberapa kasus, austenit tidak seluruhnya berubah menjadi martensit. Jika hal ini terjadi, jarum-jarum martensit tampak dalam matriks yang mengandung austenit, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.10. Struktur terdiri dari martensit temper dengan sejumlah kecil austenit sisa. Austenit sisa bersifat lunak dan menurunkan kekerasan baja. Umumnya austenit sisa tidak diharapkan keberadaannya di dalam baja perkakas, sebab saat mengalami permesinan, austenit sisa tersebut akan bertransformasi menjadi martensit non-temper yang getas dan dapat menimbulkan retak saat aplikasi



Gambar 2.10. Jarum *Martensit* Dalam Matriks yang Mengandung Austenit (Warna Putih) ^[12]

2.6 Diagram *Isothermal Transformation*

Setiap pendinginan yang dilakukan harus memperhatikan kesempatan untuk pembentukan martensit. Pada baja 1050, akan mengalami perlakuan panas *hypoeutectoid* yaitu perlakuan panas yang terjadi sebelum titik eutektoid yang disebabkan oleh kandungan karbon pada baja yang lebih rendah dari 0,8 %^[9]. Kadar karbon sekitar 0,50 sudah cukup untuk mengalami pembentukan martensit seperti dapat terlihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11. Diagram *Time Temperatur Transformation* (TTT) pada Baja SAE 1050^[13]

Dari diagram pendinginan diatas dapat dilihat bahwa dengan pendinginan cepat akan menghasilkan struktur martensit dibandingkan dengan pendinginan lambat yang merupakan laju pendinginan kritis (*critical cooling rate*) yang nantinya akan tetap terbentuk fase austenit (tidak stabil). Pendinginan dalam proses *martemper* dilakukan sampai temperatur melewati temperatur transformasi martensit atau M_s sekitar 316 °C. Terbentuk struktur martensit yang kekerasannya berkisar antara 600 BHN -750 BHN, tetapi bersifat rapuh karena tegangan dalam yang besar^[9].

Jadi dapat disimpulkan bahwa dengan proses hardening pada baja karbon medium akan meningkatkan kekerasannya. Dengan meningkatnya kekerasan, maka efeknya terhadap kekuatan adalah sebagai berikut ^[9]:

- Kekuatan impact (*impact strength*) akan turun karena dengan meningkatnya kekerasan, maka tegangan dalamnya akan meningkat. Karena pada pengujian impak, beban yang bekerja adalah beban geser dalam satu arah, maka tegangan dalam akan mengurangi kekuatan impak.
- Kekuatan tarik (*tensile strength*) akan meningkat. Hal ini disebabkan karena pada pengujian tarik beban yang bekerja adalah secara aksial yang berlawanan dengan arah dari tegangan dalam, sehingga dengan naiknya kekerasan akan meningkatkan kekuatan tarik dari suatu material.

2.7 Struktur Mikro Baja 1050

Struktur mikro yang diharapkan terbentuk pada proses *martemper* adalah martensit temper dengan tegangan sisa yang lebih rendah karena terlebih dahulu terjadi penyeragaman temperatur antara permukaan dengan inti kedalaman. Namun tidak jarang akan terbentuk struktur lain seperti austenit sisa, ferit dan karbida sementit yang disebabkan oleh kecepatan pendinginan yang lambat. Berikut akan ditunjukkan pada Gambar 2.10. struktur mikro martensit *temper* dan diperjelas pada Gambar 2.11. dan Gambar 2.12. mengenai fasa ferit dan sementit karbida yang terbentuk. Warna putih bening pada foto menunjukkan fasa sementit. Sedangkan untuk warna hitam merupakan struktur ferit sebagai matrik.

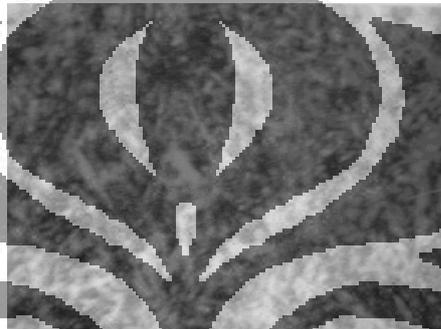


Gambar 2.12. Struktur Mikro Martensit *Temper* Baja 1050 Hasil *Quench* air dengan Temperatur *Temper* 260° C. Perbesaran 500x ^[14]

Universitas Indonesia



Gambar 2.13. Struktur Mikro Martensit *Temper* Baja 1050 Hasil *Quench* Air dengan Temperatur *Temper* 480° C. Perbesaran 825x ^[14]



Gambar 2.14. Struktur Mikro Martensit *Temper* Baja 1050 Hasil *Quench* Air dengan Temperatur *Temper* 595° C. Perbesaran 825x ^[14]

2.7.1 Martensit

Martensit merupakan fasa dengan tingkat kekerasan tertinggi di dalam baja. Mekanisme pembentukan martensit telah dijelaskan dalam sub bab 2.5. Martensit mulai terbentuk pada temperature *martensite start* (M_s) yang merupakan fungsi terhadap kandungan karbon dan unsur paduan yang terdapat di dalam baja dan dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$M_s (^{\circ}C) = 512 - 453C - 16,9Ni + 15Cr - 9,5Mo + 217(C)^2 - 71,5(C)(Mn) - 67,6(C)(Cr) \quad (2.1)$$

Bila baja mengandung persen karbon kurang dari 0,6 maka martensit yang terbentuk akan terdiri dari domain *lath* dengan orientasi yang berbeda tapi terbatas dari seluruh domain. *Lath* martensit berbentuk menyerupai bilah halus yang diantaranya terdapat sedikit austenit sisa. Struktur *lath* martensit memiliki bentuk yang sangat halus sehingga sulit untuk diamati di bawah

mikroskop optik ^[16] seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.15.



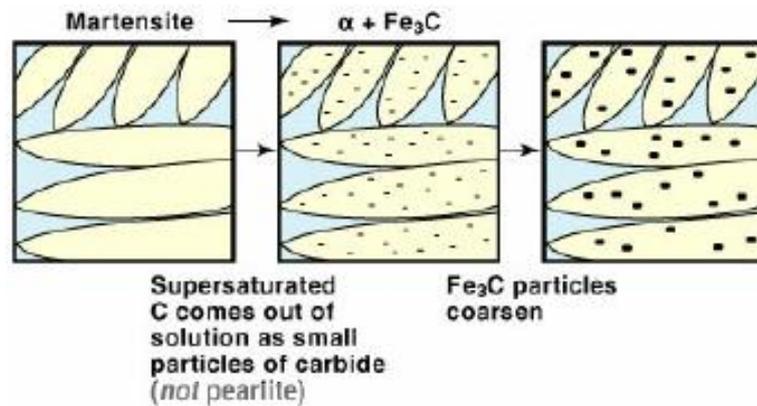
Gambar 2.15. *Lath* Martensit hasil *quench* ^[11]

Jika baja mengandung karbon di atas 0,6% maka martensit yang terbentuk akan berbentuk *plate* dengan struktur seperti jarum kembar paralel dan tersusun secara acak. *Plate* tersebut terkadang dikelilingi oleh sejumlah besar austenit sisa dikarenakan semakin tinggi kandungan karbon maka temperatur M_s akan semakin rendah sehingga transformasi dari austenit menjadi martensit semakin sulit ^[16].

2.7.2 Martensit Temper

Merupakan hasil temper dari struktur martensit yang awalnya sangat keras dan getas menjadi lebih tangguh dan ulet. Tingginya kadar karbon jenuh dalam martensit menjadikan martensit fasa yang metastabil. Tegangan sisa yang tinggi, kerapatan dislokasi, rasio *lath* atau *plate* per satuan volume yang tinggi, dan banyaknya austenit sisa inilah yang menyebabkan martensit menjadi fasa yang tidak stabil.

Setelah proses temper, martensit dengan struktur kristal BCT akan berubah menjadi ferit dengan struktur kristal BCC dan endapan karbida atau sementit Fe_3C . Struktur ini lebih dikenal dengan sebutan martensit temper. Semakin lama waktu temper dan semakin tinggi temperatur temper maka struktur ferit dan sementit yang terbentuk akan menjadi makin besar. Perubahan mikrostruktur selama temper ditunjukkan pada Gambar 2.16. berikut



Gambar 2.16. Transformasi Struktur Mikro Martensit Menjadi Martensit Temper^[15].

2.8 Tegangan Sisa Pada Baja

Tegangan sisa merupakan tegangan yang berada di dalam atau terkunci dalam komponen meskipun sudah terbebas dari gaya luar atau pengaruh adanya perbedaan panas^[17]. Tegangan sisa merupakan sistem yang setimbang. Jika satu bagian dari sistem dihilangkan, maka sisa dari sistem akan mempertahankan kesetimbangannya. Perubahan ini terjadi dalam bentuk distorsi atau perubahan dimensi dari *part*.

Tegangan sisa tidak seluruhnya bersifat merugikan. Pada beberapa proses manufaktur, tegangan sisa diperlukan untuk mendapatkan sifat tertentu dari komponen. Proses tersebut antara lain meliputi *case hardening*, *shot peening*, dan *surface rolling*. Sementara pada proses manufaktur lainnya seperti *grinding*, *welding*, dan beberapa proses permesinan, tegangan sisa harus dicegah^[21].

Tegangan sisa dapat digambarkan dalam bentuk gaya tarik dan tekan. Tegangan sisa tekan atau *compressive* merupakan tegangan yang arahnya menekan material dari luar dan bernilai negatif. Sedangkan tegangan sisa tarik atau *tensile* merupakan tegangan sisa yang arahnya menarik material ke arah luar dan bernilai positif^[16].

Pembentukan tegangan sisa dapat terjadi secara thermal, mekanis, metalurgi, dan kimiawi. Tegangan sisa thermal disebabkan karena perbedaan ekspansi dan kontraksi ketika logam didinginkan. Tegangan sisa metalurgi disebabkan karena

ekspansi volume martensit sebanyak 3 s.d. 4% yang terjadi secara tidak seragam. dan menyebabkan tegangan sisa tekan. Tegangan sisa mekanis hampir sama dengan sisa metalurgi dengan menghasilkan tegangan sisa tekan. Sedangkan tegangan sisa kimia disebabkan oleh proses korosi, etsa, dan permesinan secara kimiawi dan meninggalkan tegangan sisa tarik ^[16].

2.9 Delayed Fracture pada Baja

Delayed Fracture atau ketahanan *hydrogen embrittlement* (HE) merupakan proses perpatahan yang dipengaruhi oleh lamanya waktu suatu material diekspos pada lingkungan hidrogen dengan tegangan statis yang berasal dari tegangan sisa atau tegangan yang diaplikasikan. Hal ini merupakan masalah besar bagi baja berkekuatan tinggi atau yang telah mengalami pengerjaan dingin. Inisiasi dan pertumbuhan perpatahan yang dipicu oleh kandungan hidrogen terjadi pada tegangan di bawah *yield strength* baja ^[4].

Kerusakan yang ditimbulkan hidrogen memiliki ciri berupa pengurangan area reduksi perpatahan getas dan menghasilkan daerah retak rambut atau *fissure*. Bahkan ketika kadar hidrogen dalam lingkungan sangat sedikit sekali, kegagalan masih dapat terjadi melalui mekanisme *hydrogen-induced delayed fracture*. *Hydrogen embrittlement* terbagi atas tiga jenis yaitu ^[17]:

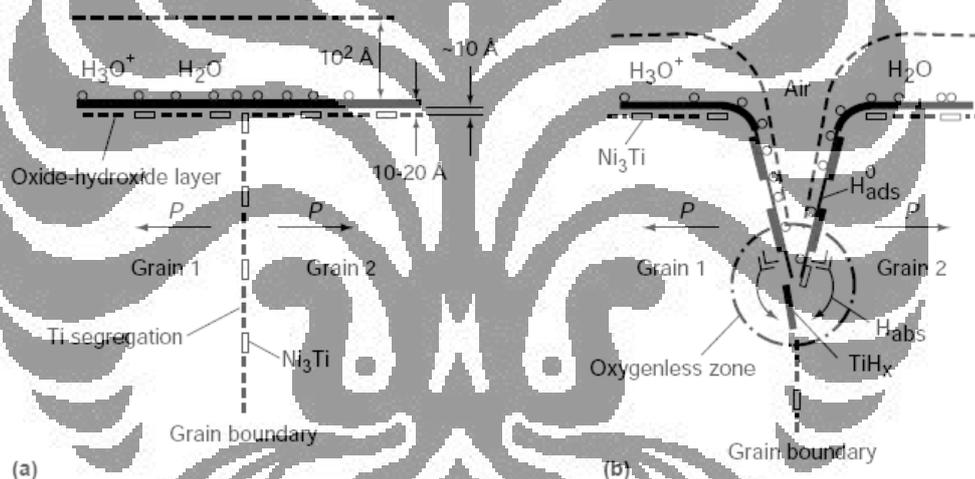
- *Internal Reversible Hydrogen Embrittlement*
- *Hydrogen Environment Cracking*
- *Hydrogen Reaction Cracking*

Dalam kasus *delayed fracture*, kegetasan ditimbulkan melalui jenis *Internal Reversible Hydrogen Embrittlement* (IR-HE) yaitu konsentrasi lokal hidrogen yang terdapat dalam material akan lebih tinggi dari lingkungan. Hal ini disebabkan oleh hidrogen yang masuk ke dalam material secara difusi pada batas butir melalui material inklusi maupun masuk pada daerah dislokasi dari kisi kristal ^[6]. Mekanisme *embrittlement* tersebut akan terjadi pada waktu inkubasi yang lama melalui regangan yang lambat atau dikenal dengan istilah *slow strain rate*. Retak yang terjadi tentunya akan berada pada suatu jalur intergranular. Faktor-faktor yang berperan dalam IR-HE antara lain ^[17]:

Universitas Indonesia

- Kekerasan material yang tinggi
- Struktur Mikro
- Tegangan sisa tarik yang tinggi
- Inklusi fosfor, mangan, dan sulfur pada batas butir

Proses terjadinya *delayed fracture* dimulai dengan terbentuknya inisiasi retak, polarisasi katoda dan pertumbuhan retak. Pada inisiasi retak, pertumbuhan terus terjadi sampai kepada nilai kritis. Hal tersebut berkaitan erat dengan komposisi kimia material beserta strukturnya pada sifat dasar material serta pada saat proses pengerjaannya berpengaruh kepada permukaan sampel dan konsentrasi tegangan yang tersisa di dalam material tersebut. Proses inisiasi sampai kepada pertumbuhan retak disajikan pada Gambar 2.17



Gambar 2.17. Mekanisme Pertumbuhan Retak Pada *Delayed Fracture* Maraging Steel. (a) Sebelum *Crack Initiation*. (b) Babak Pertumbuhan Retak^[4]

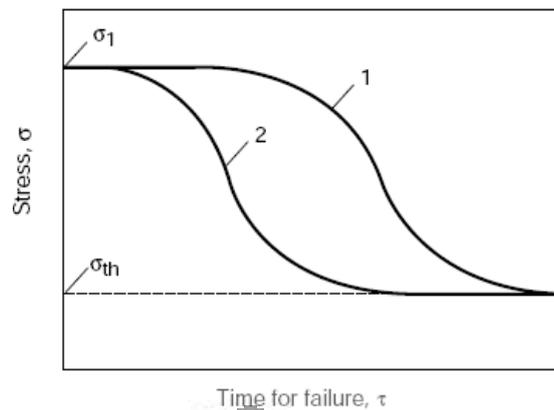
Ketahanan baja terhadap *hydrogen embrittlement* dipengaruhi oleh komposisi kimia dan dtruktur material seperti yang telah peneliti sajikan pada halaman sebelumnya. Semakin tinggi kandungan karbon pada material maka akan mengurangi ketahanan terhadap *hydrogen embrittlement*. Hubungannya adalah dengan meningkatnya karbon, kekuatan baja bertambah, residual internal tegangan mikro meningkat disertai dengan peningkatan volume fasa karbida serta area permukaan antar fasa^[4]. Efek penambahan elemen paduan Al, Co, Si, dan

Mn akan mengurangi kekuatan jangka panjang material yang mengalami proses *quench temper* dan efek paduan Mo, Nb, dan V akan memperpanjang waktu terjadinya perpatahan.

Sebagai elemen pengotor, Fosfor dan Sulfur (P dan S) memberikan dampak buruk. Sulfur akan berikatan dengan Mn membentuk MnS yang akan memberikan ruang agar atom hidrogen terperangkap dengan mudah sehingga perpatahan lebih mudah terjadi pada konsentrasi hidrogen yang rendah^[4]. Sementara P bersama Sb dan Sn akan membentuk segregasi pad batas butir yang dipercepat dalam proses perlakuan panas. Perpatahan umumnya terjadi secara transgranular. Selama segregasi terbentuk, mekanisme lain terjadi yaitu perpatahan getas sepanjang batas butir sebagai efek dari pengurangan koefisien intensitas tegangan (K_{Ith}).

Struktur baja juga memainkan pengaruh yang sangat penting terhadap ketahanan *hydrogen embrittlement*. Ketahanan terendah dimiliki oleh struktur martensit dengan temperatur temper yang rendah. Pengurangan fraksi volume dari martensit sebanyak 20 – 30% akan membuat *hydrogen embrittlement* tidak terjadi. Kegagalan pada martensit terjadi sepanjang butir dari pembentukan butir austenit.

Dalam analisis ketergantungan waktu perpatahan (S) dengan tegangan yang terjadi (r) akan menghasilkan beberapa parameter seperti terlihat pada Gambar 2.18. Tegangan kritis yang lebih tinggi akan berhubungan dengan nilai kekuatan tarik dari sampel. Tegangan kritis yang lebih rendah akan menyebabkan proses *hydrogen embrittlement* tidak terjadi. Waktu sebelum dan selama terjadinya inisiasi perpatahan merupakan hal paling berbahaya. Yang ditunjukkan pada area kurva diantara tegangan kritis yang lebih tinggi dan lebih rendah^[4].



Gambar 2.18. Kurva Kekuatan Jangka Panjang Pada Baja Yang Dihidrogenisasi. 1 adalah Waktu Sebelum Kegagalan, τ . 2 Adalah Periode Inkubasi. σ_1 Adalah Tegangan Kritis Yang Lebih Tinggi. Sedangkan σ_{th} Adalah Tegangan Kritis Yang Lebih Rendah ^[4]

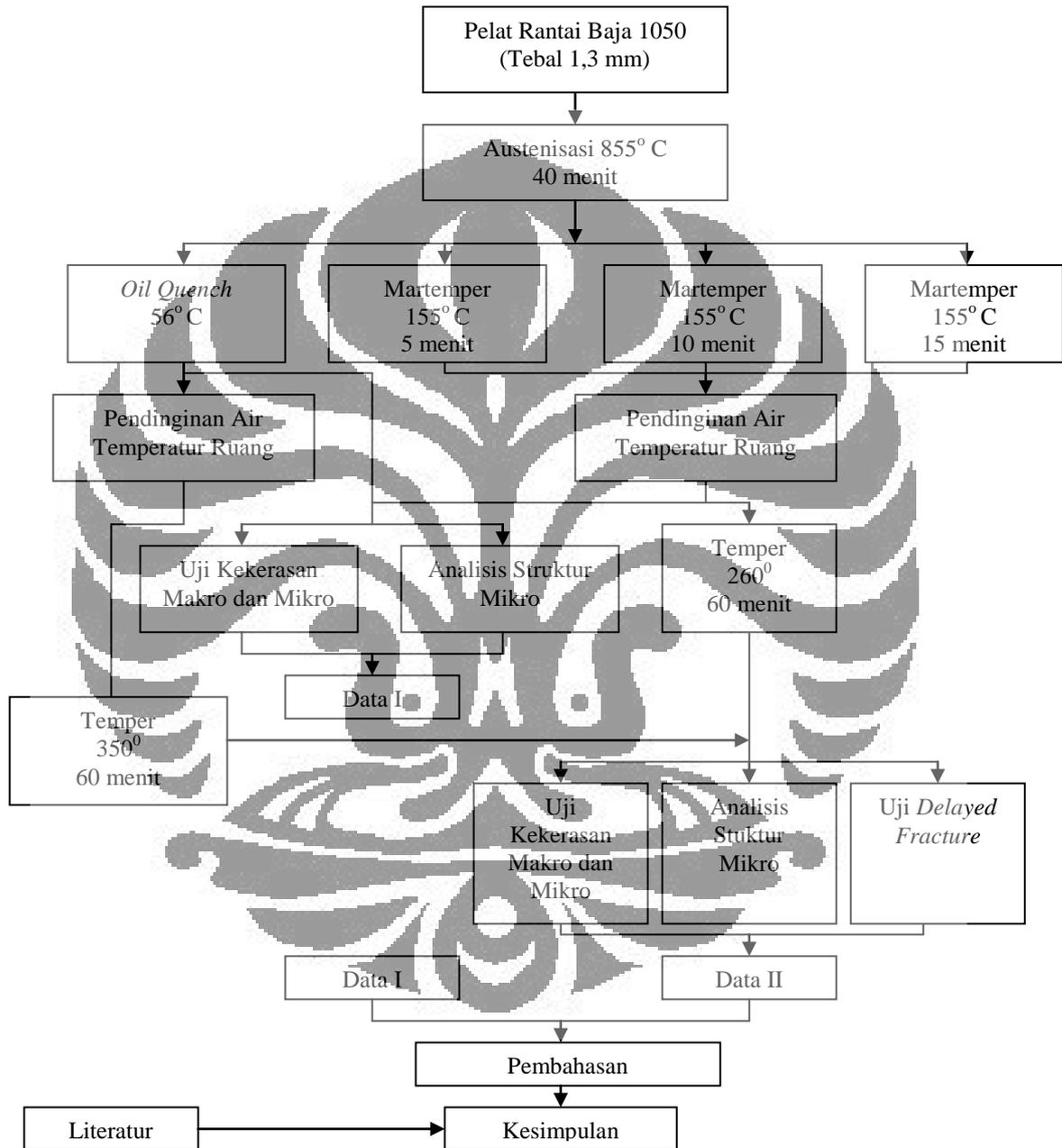
2.10 Perpatahan Makro

Pengamatan perpatahan secara makro dapat dibagi menjadi tiga jenis perpatahan yaitu perpatahan getas atau *brittle*, ulet atau *ductile*, dan campuran. Perpatahan ulet terjadi pada logam dengan ketangguhan yang baik seperti baja karbon dan aluminium dengan ciri khas perpatahan transgranular, permukaan yang bercabang-cabang, *necking*, dan tidak memantulkan cahaya. Sedangkan perpatahan getas terjadi pada logam dengan kekerasan yang tinggi seperti besi tuang dan baja perkakas. Ciri khas perpatannya memiliki arah rambat tegak lurus dengan arah tegangan, permukaan patahan rata, pemantulan cahaya sempurna, dan menunjukkan perpatahan intergranular ^[17].

Perpatahan makro dapat diamati di bawah mikroskop optik dengan tujuan untuk mengetahui letak inisiasi perpatahan atau *crack initiation* serta arah penjalaran retak atau *crack propagation* ^[17].

BAB 3 METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian

3.2 Bahan dan Peralatan

3.2.1 Peralatan

Peralatan yang digunakan pada saat proses penelitian ini meliputi :

a. Alat pembuatan sampel

Alat yang digunakan pada saat pembuatan sampel :

- *Progressive press machine*
- *Barreling finishing machine*

b. Alat perlakuan panas

Alat yang digunakan pada saat perlakuan panas antara lain :

- *Mesh Belt Continuous Hardening and Tempering Furnace No. ERW-30142-AS/36132-E8W*
- *Heating Batch furnace Wilmonn*
- *Kompor Induksi Hassen 220 V-50 Hz dengan daya 120 – 1900 W*
- *Wadah stainless steel dengan volume 3 liter*
- *Alat Pengaman Diri berupa masker, sarung tangan dan celemek*
- *Holder untuk mengambil sampel*
- *Thermocouple Infrared*

c. Alat uji *delayed fracture*

Adapun alat yang digunakan untuk pengujian *delay fracture* adalah sebagai berikut :

- *Beaker glass 4000 ml*
- *Volumetric flask 1000 ml*
- *Volumetric Pipet 10 ml*

d. Alat pengujian

Alat yang digunakan untuk melakukan pengujian adalah :

- *Mikroskop optik digital*
- *Mesin amplas dan poles*
- *Vickers micro-hardness Tester*
- *Rockwell Hardness Terter*

3.2.2 Bahan

Klasifikasi bahan dapat dibedakan untuk tiap-tiap tahapan pengujian

a. Bahan proses perlakuan panas

Terdiri dari media celup berupa *Hot Quench Oil No. 809XV* dengan karakteristik sebagai berikut:

Tabel 3.1. Karakteristik *Hot Quench Oil No. 809XV* ^[22]

Jenis Karakteristik	Data
Viskositas (100°C) (mm^2/s)	7,9
Flash Point ($^{\circ}\text{C}$)	254
Kandungan Air (% Volume)	0,0
Cooling Performance (detik)	4,7
Temperatur Karakteristik ($^{\circ}\text{C}$)	620
H Value (1/cm)	0,102

b. Bahan uji *delayed fracture*

Terdiri dari larutan asam klorida 0,1 N dan aquades.

c. Bahan uji metalografi

Terdiri dari kertas amplas 500#, 800#, 1000#, 1200#, 1500#, 2400#, kain beludru, air, resin, hardener, cairan poles, nital 2% - 3%, dan roll film.

3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Komposisi Material

Menurut data yang dimiliki oleh PT X Manufacturing, material dasar pelat adalah baja karbon medium SAE 1050 atau JIS S 50 C. Untuk mengetahui apakah sesuai dengan standard, pengujian komposisi kimia material dasar pelat telah dilakukan oleh pihak perusahaan dengan menggunakan *Optical Emission Spectrometer* (OES) yang hasilnya dibandingkan dengan komposisi kimia standard dari material SAE 1050 atau JIS S 50 C.

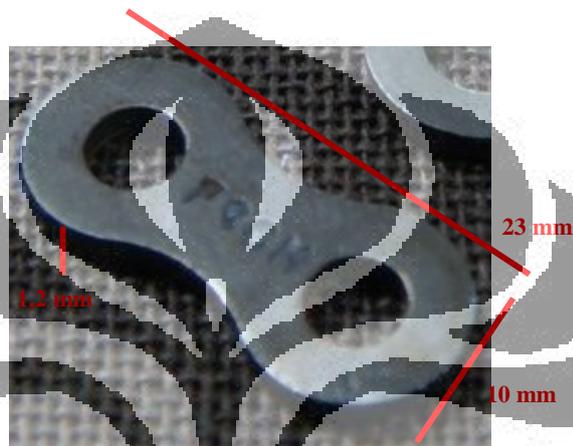
Tabel 3.2. Komposisi Kimia Material

Unsur	Kandungan Material Dasar Pelat (%)	Kandungan JIS S 50 C (%)
Fe	98,384	96 s.d. 99
C	0,497	0,47 s.d. 0,55
Si	0,267	0,15 s.d. 0,35
Mn	0,727	0,60 s.d. 0,90
P	0,0179	Max 0,030
S	0,0047	Max 0,035
Cu	Kurang dari 0,002	Max 0,30
Ni	Kurang dari 0,005	Max 0,20
Cr	0,0149	Max 0,20
Mo	Kurang dari 0,005	Tidak Diperbolehkan

Setelah dibandingkan dengan komposisi kimia baja S 50 C, maka didapatkan bahwa komposisi kimia material dasar pelat mengalami sedikit ketidaksesuaian kandungan unsur molibdenum dengan kriteria standar untuk material JIS S 50 C. Terdapat kandungan Molibdenum sejumlah kurang dari 0,005% yang seharusnya tidak boleh terdapat dalam baja tersebut. Jumlah tersebut merupakan jumlah yang sangat kecil yang tidak akan membawa dampak besar dalam proses *hardening*. Namun kehadirannya dapat mempengaruhi pergeseran hidung kurva *Isothermal Transformation* (IT) ke arah kiri dan menurunkan temperatur pembentukan martensit (Ms) sehingga martensit akan sulit terbentuk. Namun kandungan dengan kadar yang sangat kecil ($< 0,005$) pengaruhnya dapat diabaikan.

3.3.2 Pembuatan Sampel Pelat Rantai

Sampel yang akan digunakan dalam penelitian ini merupakan pelat rantai terluar atau *Outer Link Plate* (OLP) yang dibentuk melalui proses *cold forming* dari lembaran berdimensi 1,2 mm x 79 mm x 1300 mm menjadi pelat dengan ketebalan 1,2 mm, panjang 23 mm, dan lebar 10 mm seperti yang terlihat pada Gambar 3.2. dengan menggunakan alat *progressive press machine* dan *dies*.



Gambar 3.2. Sampel Pelat *Outer Link Plate 420 AD*

Setelah keluar dari *progressive press machine*, sampel yang telah berbentuk pelat akan dimasukkan ke dalam *barreling finishing machine*. Di dalam mesin ini sampel akan dibersihkan dengan menggunakan *ridolite* (sejenis deterjen), pasir silika, dan air hangat di dalam suatu silinder berputar (seperti konsep mesin cuci). Tujuan proses *barrel* ini untuk membersihkan rantai hasil *forging* dari *grease*, geram, dan pengotor lainnya sebelum masuk ke dalam proses austenisasi.

3.3.3 Austenisasi

Dalam proses austenisasi, sampel dengan jumlah sekitar 60 buah diletakkan di dalam suatu wadah besi yang dipenuhi dengan potongan arang bakau. Penambahan arang bakau ini ditujukan untuk mengantisipasi masalah dekarburisasi. Dekarburisasi merupakan peristiwa penurunan kekerasan pada permukaan yang terjadi akibat kehilangan atom karbon dikarenakan atmosfer

yang banyak mengandung O_2 , sehingga atom karbon bereaksi dengan lingkungan pada temperatur austenisasi, membentuk CO_2 yang menyebabkan banyak atom C meninggalkan permukaan sampel [3].

Material kemudian mengalami perlakuan austenisasi pada temperatur 855^0 C selama 40 menit di dalam *batch furnace* yang ditunjukkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3. Wilmonn *Batch Furnace*

3.3.4 *Martemper* dan *Temper*

Pada tahap berikutnya, peneliti melakukan pendinginan cepat dengan pencelupan ke dalam oli panas dengan temperatur 155^0 C [3] yang ditampung dalam wadah *stainless steel* dengan volume 3 liter, yang dijaga stabil temperaturnya dengan menggunakan *Thermocouple Infrared*. Di dalam oli panas ini, sampel dicelup dengan variabel waktu 5 menit, 10 menit dan 15 menit untuk mengetahui pengaruh lama waktu tahan celup terhadap kekerasan, struktur mikro dan tegangan sisa.

Setelah dicelup dalam oli untuk waktu yang telah ditentukan, sampel dicelup ke dalam ember yang berisi air ledeng untuk menyelesaikan pembentukan martensit menuju garis M_f . Kemudian dilakukan uji kekerasan untuk memastikan apakah sudah dicapai kekerasan martensit yang diharapkan yaitu 45 – 63 HRC. Selanjutnya, sampel mengalami temper di dalam *continuous furnace* pada temperatur 260^0 C [3] selama 60 menit.

Universitas Indonesia

3.3.5 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan pada sampel pelat rantai dibagi menjadi 2, yaitu pengujian secara mikro dan makro. Tujuan dilakukan pengujian secara mikro adalah untuk melihat secara lebih spesifik kekerasan pada beberapa titik dengan jarak setiap 0,1 mm dari permukaan sampai ke inti. Sedangkan pengujian secara makro bertujuan untuk mengetahui kekerasan permukaan material sesaat sesudah *quench* atau *temper*, apakah sudah memenuhi rentang kekerasan permukaan untuk struktur martensit yang didapatkan.

a. Pengujian Kekerasan Mikro

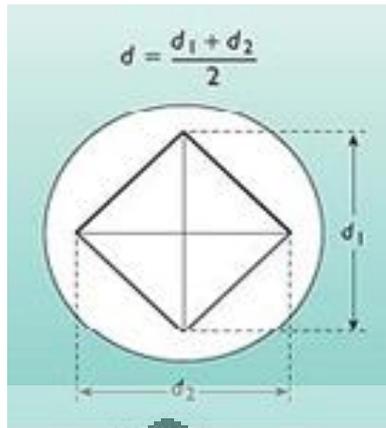
Untuk pengujian mikro akan dihitung dengan menggunakan metode *Vickers* sesuai dengan standar ASTM E 92 "*Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials*". Metode ini menggunakan beban 100 gr dalam waktu 10 detik. Indentor yang digunakan adalah intan berbentuk piramida dengan sudut 136°. Prinsip pengujiannya sama dengan metode kekerasan *Brinell*, namun jejak yang dihasilkan berbentuk bujur sangkar berdiagonal [19]. Panjang diagonal diukur dengan skala pada mikroskop pengukur jejak. Perhitungan nilai kekerasan ini sesuai dengan rumus:

$$VHN = \frac{1,854 P}{d^2} \quad (3.1)$$

dimana:

P = beban yang diberikan (dalam kg)

d = diameter jejak rata-rata (dalam mm)



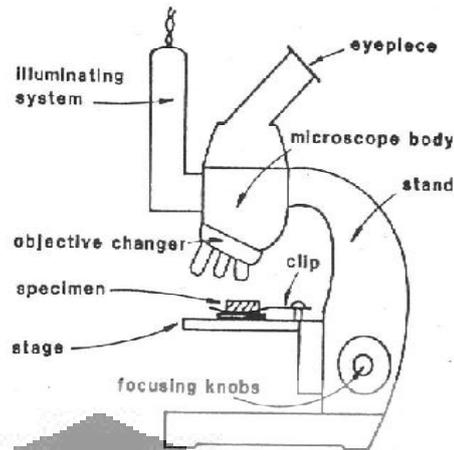
Gambar 3.4. Penjejukan Metode *Vickers* ^[18]

b. Pengujian Kekerasan Makro

Pengujian makro dilakukan dengan metode Rockwell C sesuai dengan standar ASTM E-18 "*Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic material*". Metode ini menggunakan beban 150 gr dengan indenter intan berbentuk kerucut dengan sudut 120°. Metode Rockwell C sesuai bila digunakan untuk baja karbon rendah, medium ataupun tinggi ^[20].

3.3.6 Pengamatan Struktur Mikro

Sampel yang telah di-*mounting* kemudian diampas di atas mesin ampas dengan menggunakan kertas ampas ber-*grid* 500#, 800#, 1000#, 1200#, 1500#, dan 2400#. Kemudian sampel dipoles di atas mesin poles dengan menggunakan kain beludru dan cairan poles. Setelah permukaan sampel tidak terdapat bidang dan bersih dari pengotor, sampel di etsa dengan menggunakan nital 2% - 3% selama 7 detik ^[11]. Penggunaan etsa nital 2% - 3% untuk melihat secara jelas struktur martensit. Pengamatan permukaan sampel hasil etsa dilakukan menggunakan mikroskop optik digital untuk melihat fasa yang terbentuk dari proses perlakuan panas terhadap sampel.



Gambar 3.5. Skema Mikroskop Optik ^[18]

3.3.7. Pengujian *Delayed Fracture*

Pengujian ini dilakukan bertujuan untuk mengkondisikan atmosfer yang kaya akan atom hidrogen, sehingga konsentrasi atom H yang dominan akan ber-interstisi ke atom C sampel. Sampel akan direndam ke dalam larutan HCl 0,1 N selama 100 jam dengan setiap 25 jam larutan diganti dengan yang baru. Hal ini bertujuan agar konsentrasi hidrogen dalam larutan tetap cukup untuk dapat berpenetrasi ke dalam sampel. Pengujian ini mensimulasikan mekanisme kegagalan akibat lingkungan yang mengandung hidrogen dengan pembebanan statis (*applied* maupun *residual stress*). Namun dalam pengujian ini tidak diberikan pembebanan yang menghasilkan tegangan dari luar tetapi hanya terdapat tegangan sisa hasil *forging* dan perlakuan panas dari proses sebelumnya.

Rantai yang akan mengalami pengujian *delayed fracture* harus mengalami proses perakitan manual sehingga menjadi satu rangkaian seperti pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6. Rangkaian Rantai Untuk Pengujian *Delayed Fracture* Sebelum Dichelup

3.3.8 Pengamatan makro hasil permukaan patahan

Pengamatan menggunakan mikroskop optik bertujuan untuk melihat bentuk dan mekanisme perpatahan yang terjadi akibat hidrogen. Hal ini dapat menjadi perbandingan material mana yang mengalami perpatahan *ductile*. Pengamatan ini dilakukan ketika *delayed fracture* selesai dilakukan, kemudian pelat rantai yang mengalami perpatahan akan dipotong secara tegak lurus dan permukaan patahan diamati di bawah mikroskop optik.

Perpatahan akibat hidrogen umumnya menghasilkan perpatahan di batas butir atau intergranular yang disebabkan oleh peristiwa melemahnya batas butir karena beberapa hal antara lain^[17]:

- Terjadi pengendapan pada batas butir
- Segregasi pengotor ke batas butir akibat proses perlakuan panas
- Tegangan pada temperatur tinggi
- Faktor lingkungan yang masuk dalam batas butir seperti hidrogen

BAB 4 HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Penelitian yang dilakukan meliputi pengujian kekerasan secara makro sebelum dan sesudah temper, pengujian kekerasan setelah uji *delayed fracture*, pengujian kekerasan mikro, penyajian foto mikro, analisis struktur mikro serta pengamatan makro untuk melihat bentuk perpatahan pada permukaan pelat.

4.1 Pengujian Kekerasan Makro

Pengujian kekerasan makro dilakukan dengan metode Rockwell C dengan pembebanan sebesar 150 kgf dan waktu penjejakan selama 5 detik. Pengujian kekerasan dilakukan terhadap 15 sampel *Outer Link Plate* (OLP), setiap satu variabel prosesnya. Tujuan dilakukan pengujian kekerasan ini agar nilai kekerasan yang didapatkan dapat mewakili nilai kekerasan rata-rata suatu produk dalam satu variabel proses tertentu.

4.1.1 Kekerasan Sebelum Temper

Pada Tabel 4.1. disajikan data hasil pengujian kekerasan makro pada sampel hasil *Quench Temper* (Q&T) dan sampel hasil *martemper* dengan variabel waktu 5 menit, 10 menit, dan 15 menit sebelum dilakukan temper. Data rata-rata kekerasan hasil *quenching* sebelum temper adalah 58 HRC. Berdasarkan analisis terhadap diagram *Time Temperature Transformation* (TTT) baja 1050, kekerasan setelah proses *quench* akan mencapai rentang 56 s.d. 63 HRC^[13]. Nilai kekerasan yang didapatkan sesuai dengan literatur dan ini membuktikan bahwa proses perlakuan panas *quenching* konvensional yang selama ini dilakukan pada OLP telah benar dan efektif.

Sementara untuk data rata-rata kekerasan hasil *martemper* memiliki perbedaan nilai kekerasan pada setiap variabel waktu tahannya. *Martemper* dengan waktu tahan 15 menit memiliki nilai kekerasan yang paling tinggi dengan pola waktu tahan berbanding lurus terhadap peningkatan kekerasan. Berdasarkan analisis terhadap diagram TTT, kekerasan hasil *martemper* seharusnya sama dengan kekerasan yang dicapai dalam proses *quench*

konvensional karena kurva pendinginan pada akhirnya akan menyentuh garis martensit *finish* (M_f) dan rentang kekerasannya berada antara 56 s.d. 63 HRC.

Tabel 4.1. Kekerasan Sampel OLP Hasil Perlakuan Panas (Sebelum Temper)

Sampel	Kekerasan (HRC) Metode Perlakuan Panas			
	Q&T	Martemper 5 menit	Martemper 10 menit	Martemper 15 menit
1	57,50	50,00	51,00	50,50
2	59,00	50,50	50,00	55,00
3	58,00	52,00	50,00	52,50
4	58,00	50,00	54,00	52,00
5	57,50	49,50	53,00	52,50
6	58,00	49,50	51,00	53,00
7	58,00	48,50	55,00	54,00
8	59,00	50,50	54,00	54,00
9	58,00	49,00	53,50	52,00
10	58,00	49,00	50,50	55,00
11	57,00	51,00	49,00	54,50
12	57,50	52,00	53,00	53,50
13	58,00	49,00	54,00	55,00
14	58,50	50,00	51,00	52,50
15	58,00	54,00	52,00	54,00
Rata-Rata	58,00	50,30	52,06	53,33

Namun nilai kekerasan yang didapatkan lebih rendah dari nilai kekerasan literatur, di mana nilai tertinggi yang dicapai hanya sebesar 53,33 HRC. Hal ini disebabkan karena setelah waktu tahan pencelupan selesai, sampel tidak langsung mengalami pendinginan dengan air, tetapi diangkat terlebih dahulu

di udara untuk menghilangkan tetesan oli. Terjadi pendinginan lambat sehingga kurva pendinginan yang berada di antara temperatur M_s dan M_f tidak diteruskan sampai melewati temperatur M_f atau dengan kata lain martensit yang terbentuk tidak 100%. Dilihat dari nilai kekerasan sebesar 50 s.d. 53 HRC dapat disimpulkan bahwa martensit yang terbentuk masih berada pada wilayah antara temperatur M_s dan M_f sehingga transformasi austenit menjadi martensit belum selesai. Terjadi banyak austenit sisa yang menyebabkan kekerasan material berkurang dan menyebabkan ketidakstabilan pada saat material mengalami proses permesinan selanjutnya.

Penyebab yang kedua adalah terjadinya masalah dekarburisasi pada permukaan material. Dekarburisasi adalah penurunan kekerasan pada permukaan material yang disebabkan oleh berkurangnya atom karbon yang berikatan dengan oksigen membentuk gas CO_2 yang disebabkan oleh faktor lingkungan yang tidak vakum pada temperatur austenisasi $855\text{ }^\circ\text{C}$. Jadi sesungguhnya kekerasan martensit 100 % sudah tercapai pada inti, namun pada permukaan belum tercapai. Berdasarkan nilai kekerasan permukaan yang berada antara 50 s.d. 53 HRC dan tidak terlalu jauh dari kekerasan martensit pada literatur, dapat dibuat hipotesis bahwa kekerasan pada inti tidak akan mengalami peningkatan yang jauh berbeda dikarenakan sampel OLP ini sangat tipis (1,2 mm). Hipotesis ini akan dibuktikan dengan pengujian kekerasan mikro bahwa apakah sampel mengalami masalah dekarburisasi atau tidak.

Dapat disimpulkan bahwa sampel hasil *martemper* membentuk fasa akhir martensit, namun belum 100% dikarenakan pendinginan lambat pada udara setelah dicelup oli panas. Martensit 100% dapat dicapai melalui peningkatan kecepatan pendinginan dengan media air.

4.1.2 Kekerasan Setelah Temper

Pada Tabel 4.2. disajikan data hasil pengujian kekerasan makro pada sampel hasil *Quench Temper* (Q&T) dan sampel hasil *martemper* dengan variabel waktu 5 menit, 10 menit, dan 15 menit setelah dilakukan temper. Namun temperatur temper yang digunakan pada proses Q&T dan *martemper*

berbeda. Pada proses Q&T menggunakan temperatur temper 350 °C sesuai dengan parameter proses perusahaan sedangkan proses *martemper* menggunakan temperatur temper 260 °C sesuai dengan ASM Handbook Vol 4 tentang *Heat Treating*

Tabel 4.2. Kekerasan Sampel OLP Hasil Perlakuan Panas (Setelah Temper)

Sampel	Kekerasan (HRC) Metode Perlakuan Panas			
	Q&T (350 °C)	Martemper 5 menit (260 °C)	Martemper 10 menit (260 °C)	Martemper 15 menit (260 °C)
1	45,50	47,00	51,00	48,00
2	46,00	46,50	50,00	49,00
3	45,00	49,00	49,00	49,00
4	45,00	51,50	49,50	51,00
5	46,50	48,50	50,50	46,00
6	46,00	43,50	47,00	51,50
7	46,00	43,50	44,50	46,00
8	45,00	43,00	48,50	47,50
9	44,50	42,50	49,50	50,50
10	46,00	42,00	50,50	49,00
11	46,00	43,00	49,00	48,50
12	45,50	47,00	50,00	50,50
13	46,00	46,00	44,00	51,00
14	46,50	45,50	51,00	49,50
15	45,00	48,00	47,00	50,00
Rata-Rata	45,63	45,77	48,73	49,13

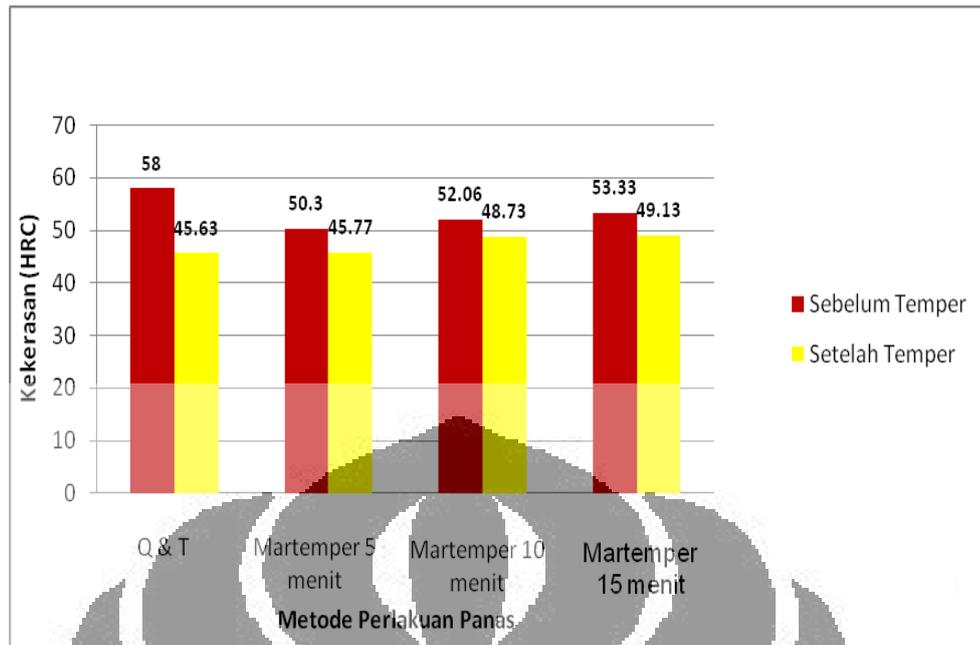
Proses *martemper* dengan temperatur temper 260 °C digunakan karena kekerasan awal sampel sebelum temper sudah lebih rendah dibandingkan kekerasan awal sampel hasil *quench* konvensional. Namun untuk mencapai kekerasan 50 HRC dapat digunakan temperatur temper sebesar 260 °C [3].

Data rata-rata kekerasan hasil Q&T adalah 45,63 HRC. Berdasarkan analisis terhadap diagram TTT baja 1050, kekerasan setelah proses Q&T pada temperatur temper 350 °C akan mencapai rentang 42 s.d. 49 HRC. Nilai kekerasan yang didapatkan sesuai dengan literatur dan ini membuktikan bahwa proses Q&T yang selama ini dilakukan telah benar dan efektif.

Sementara untuk nilai kekerasan hasil *martemper* pada temperatur 260 °C dengan waktu tahan 5, 10, dan 15 menit berturut-turut adalah 45,77; 48,73; dan 49,13 HRC. Berdasarkan analisis terhadap diagram TTT baja 1050, kekerasan setelah proses *martemper* pada temperatur temper 260 °C akan mencapai rentang 48 s.d. 53 HRC [3]. Nilai kekerasan yang didapatkan pada waktu tahan 10 dan 15 menit sesuai dengan literatur namun pada waktu tahan 5 menit nilai kekerasan lebih rendah daripada rentang kekerasan literatur. Hal ini disebabkan oleh dua hal. Pertama karena kekerasan sampel sebelum temper merupakan yang paling rendah bila dibandingkan dengan kekerasan sampel lainnya dikarenakan masalah belum terbentuknya 100% martensit dan yang kedua disebabkan oleh persentase reduksi kekerasan yang dialami sampel dengan waktu tahan 5 menit adalah yang paling besar. Persentase reduksi kekerasan sampel 5 menit mencapai 9,8% sedangkan persentase reduksi kekerasan sampel 10 dan 15 menit berturut-turut adalah 6,8% dan 8,5%

Dapat disimpulkan bahwa semakin lama waktu tahan *martemper* maka kekerasan akan semakin meningkat. Hal tersebut sesuai dengan literatur bahwa kekerasan optimal akan tercapai pada waktu penahanan di atas 5 menit [3]. Berdasarkan kekerasan setelah temper, material dengan waktu tahan 5 menit memiliki kekerasan yang paling rendah dibandingkan hasil *martemper* lainnya yang artinya memiliki ketangguhan yang lebih baik.

Berikut ini akan disajikan data mengenai perbandingan kekerasan sampel dengan metode Q&T dan *martemper* dengan perbandingan sebelum dan sesudah temper pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1. Grafik Perbandingan Kekerasan Sampel Sebelum dan Setelah Temper

Berdasarkan Gambar 4.1. dapat dilihat bahwa reduksi nilai kekerasan paling besar terjadi untuk sampel hasil Q&T dikarenakan temperatur temper yang digunakan lebih tinggi dibandingkan pada *martemper*. Perbedaan temperatur temper mencapai 90 °C

4.1.3 Kekerasan Setelah Pengujian *Delayed Fracture*

Pada Tabel 4.3. disajikan data hasil pengujian kekerasan makro pada sampel hasil *Quench Temper* (Q&T) dan sampel hasil *martemper* dengan variabel waktu 5 menit, 10 menit, dan 15 menit setelah dilakukan uji *delayed fracture*.. Data rata-rata kekerasan hasil Q&T setelah *delayed fracture* adalah 47,57 HRC. Sedangkan rata-rata kekerasan hasil *martemper* 5, 10, dan 15 menit setelah *delayed fracture* berturut-turut adalah 47,43, 50,50, dan 51,20 HRC. Terjadi kenaikan nilai kekerasan pada sampel sebelum (lihat Tabel 4.2.) dan setelah dilakukan *delayed fracture*. Kenaikan nilai kekerasan ini terjadi karena efek dari *hydrogen embrittlement* atau penggetasan material diakibatkan oleh difusi hidrogen (H_2 [g]) ke permukaan sampel yang ditandai dengan aroma hidrogen yang sangat kuat pada permukaan sampel saat penggantian larutan setiap 25 jam.

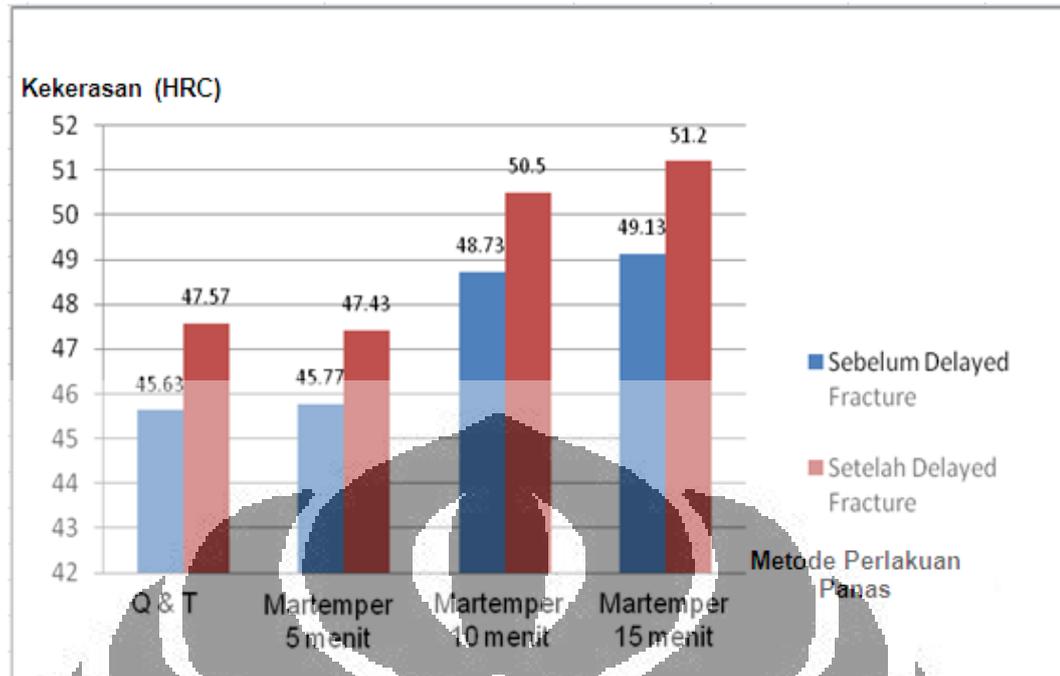
Tabel 4.3. Kekerasan Sampel OLP Hasil Pengujian *Delayed Fracture*

Sampel	Kekerasan (HRC) Metode Perlakuan Panas			
	Q&T (350 °C)	Martemper 5 menit (260 °C)	Martemper 10 menit (260 °C)	Martemper 15 menit (260 °C)
1	46,50	47,00	51,00	52,00
2	48,00	46,50	50,00	52,00
3	48,00	48,00	50,00	51,50
4	47,00	47,50	49,50	50,50
5	48,50	48,50	50,50	50,50
6	47,00	47,50	50,00	51,50
7	48,00	47,50	51,00	50,50
8	48,00	47,00	50,50	51,00
9	47,50	47,50	50,50	51,50
10	49,00	48,00	50,50	52,00
11	48,00	48,00	51,00	51,50
12	46,50	47,00	50,00	50,50
13	47,00	47,00	51,00	51,00
14	46,50	46,50	51,00	50,00
15	48,00	48,00	51,00	52,00
Rata-Rata	47,57	47,43	50,50	51,20

Sampel hasil Q&T mengalami kenaikan kekerasan yang paling tinggi dibandingkan dengan ketiga sampel hasil *martemper* lainnya. Persentase kenaikan kekerasan sampel Q&T mencapai 4,25% sedangkan pada sampel hasil *martemper* 5, 10, dan 15 menit persentase kenaikan kekerasan berturut-

turut adalah 3,63%; 3,63%; dan 4,21%. Nilai persentase kekerasan yang lebih tinggi ini membuktikan bahwa sampel hasil Q&T mengalami penggetasan lebih tinggi melalui difusi hidrogen yang lebih besar pada permukaan sampel. Dengan kata lain sampel hasil Q&T memiliki ketahanan *hydrogen embrittlement* yang lebih rendah dibandingkan dengan proses *martemper*.

Namun perbedaan kenaikan persentase nilai kekerasan tersebut tidak terlalu signifikan dan hanya berbeda sekitar 0,6%. Bahkan pada waktu tahan 15 menit, persentase kenaikan mencapai nilai yang hampir sama dengan hasil Q&T. Hal tersebut disebabkan keempat variabel proses perlakuan panas ini menghasilkan struktur mikro yang sama yaitu martensit temper. Martensit temper terdiri atas ferit dan endapan sementit. Sementit akan mengendap pada batas butir austenit dan menjadikan batas butir sebagai tempat yang lebih mudah bagi hidrogen untuk berdifusi. Kehadiran inklusi seperti sulfur dapat membahayakan karena dapat membentuk senyawa MnS pada batas butir yang akan menambah mudahnya hidrogen terperangkap. Dengan terjadinya pengendapan inklusi dan hidrogen pada batas butir maka dislokasi akan semakin sulit untuk digerakan. Hal tersebut menyebabkan kekerasan material bertambah. Berikut ini disajikan grafik perbandingan peningkatan nilai kekerasan pada sampel hasil Q&T dan *martemper* sebelum dan setelah dilakukan uji *delayed fracture*.



Gambar 4.2. Grafik Perbandingan Kekerasan Sampel Sebelum dan Setelah Uji *Delayed Fracture*

4.2 Pengujian Kekerasan Mikro

Pengujian kekerasan mikro dilakukan untuk membuktikan apakah sampel hasil *martemper* sebelum temper mengalami masalah dekarburisasi yang ditandai dengan penurunan kekerasan pada permukaan dibandingkan dengan inti. Pengujian dilakukan dengan metode Vickers melalui pembebanan 100 gr dalam waktu penjejakan 10 detik. Pengujian dilakukan secara representatif dengan satu sampel OLP yang dipilih secara acak untuk setiap variabel prosesnya dengan jarak penjejakan setiap 0,1 mm dimulai dari permukaan menuju ke inti dan kembali ke permukaan pada bagian yang berlawanan. Diharapkan dari metode ini dapat diketahui apakah penyebab nilai kekerasan hasil *martemper* pada Tabel 4.1. tidak sesuai dengan literatur berkaitan dengan masalah dekarburisasi.

Pada Tabel 4.4. disajikan data hasil pengujian kekerasan mikro pada sampel hasil *martemper* dengan waktu tahan 5, 10, dan 15 menit. Nilai kekerasan pada jarak 0,1 mm dari permukaan lebih rendah daripada jarak 0,2 mm, begitu seterusnya dan mencapai kekerasan puncak pada jarak 0,3 sampai 0,7 mm dari permukaan. Pada sampel 5 menit *martemper*, kekerasan tertinggi pada jarak 0,3 mm. Sedangkan pada sampel 10 dan 15 menit *martemper* kekerasan tertinggi

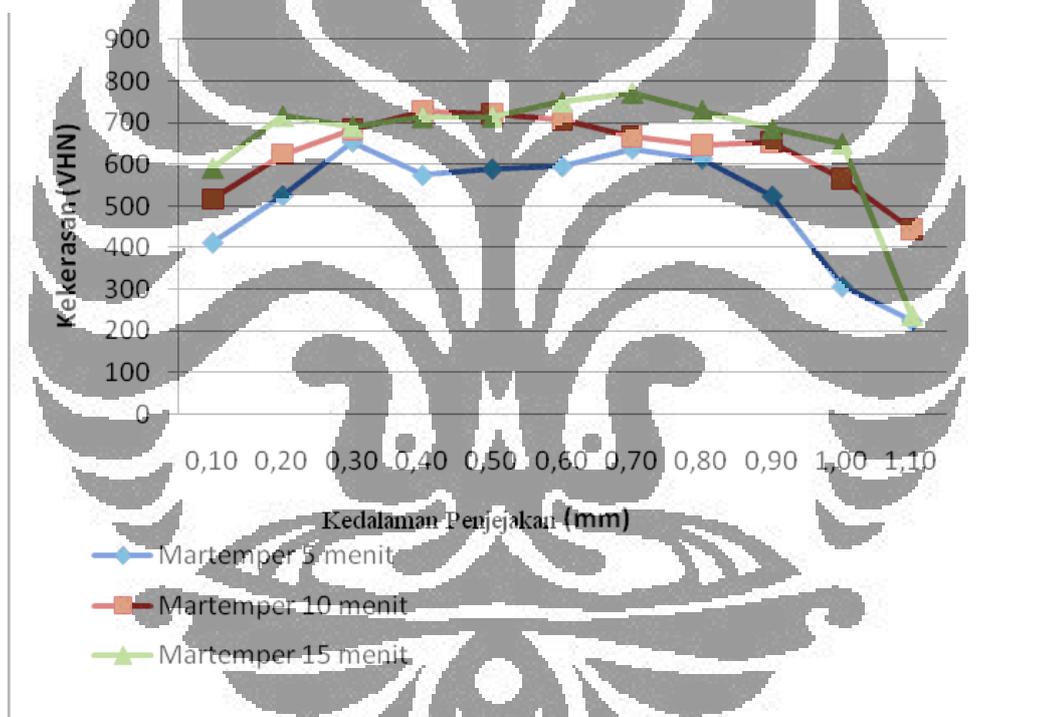
berturut-turut pada kedalaman 0,4 dan 0,7 mm. Kekerasan pada kedalaman 0,3 mm sampai 0,9 mm memiliki nilai kekerasan yang perbedaannya tidak terlalu signifikan. Sedangkan nilai kekerasan antara kedalaman 0,1 s.d. 0,2 mm dan 1 s.d. 1,1 mm mengalami penurunan yang cukup signifikan dibandingkan dengan kekerasan pada kedalaman 0,3 s.d. 0,9 mm.

Tabel 4.4. Perbandingan Kekerasan Mikro Sampel OLP
Hasil *Martemper* Sebelum *Temper*

Jarak (mm)	Kekerasan (VHN)		
	<i>Martemper</i> 5 menit	<i>Martemper</i> 10 menit	<i>Martemper</i> 15 menit
0,10	412	517	591
0,20	525	624	716
0,30	654	683	691
0,40	574	727	713
0,50	589	721	714
0,60	595	706	750
0,70	637	667	772
0,80	614	647	729
0,90	524	653	686
1,00	307	565	650
1,10	225	443	236
1,20			

Berdasarkan data tersebut dapat disimpulkan bahwa sampel hasil *martemper* secara keseluruhan mengalami penurunan kekerasan pada bagian yang mendekati permukaan. Hal ini disebabkan oleh peristiwa yang disebut dekarburisasi. Banyaknya atom karbon yang berikatan dengan oksigen pada saat austenisasi dalam dapur yang tidak vakum mengakibatkan daerah permukaan sampel kekurangan kandungan karbon. Sehingga kandungan 0,5% karbon yang seragam dari permukaan sampai inti, pada saat sebelum austenisasi, mengalami penurunan

dan menyebabkan pada daerah permukaan hanya terdapat 0,2 s.d. 0,3% karbon, sehingga kemampukerasan pada permukaan berkurang. Pada saat pendinginan cepat dilakukan, austenit pada permukaan yang kekurangan karbon tidak dapat bertransformasi menjadi martensit karena dipengaruhi oleh hidung kurva pendinginan yang bergeser ke kiri pada diagram TTT. Terbentuklah ferit dalam jumlah yang dominan disertai dengan sejumlah kecil sementit Fe_3C . Ferit ini akan menyebabkan kekerasan permukaan lebih lunak dibandingkan kekerasan inti. Namun karena ketebalan sampel sangat tipis (1,2 mm) maka struktur ferit ini harus dibuktikan keberadaannya dengan analisis struktur mikro. Perbedaan kekerasan dapat dilihat pada Gambar 4.3.

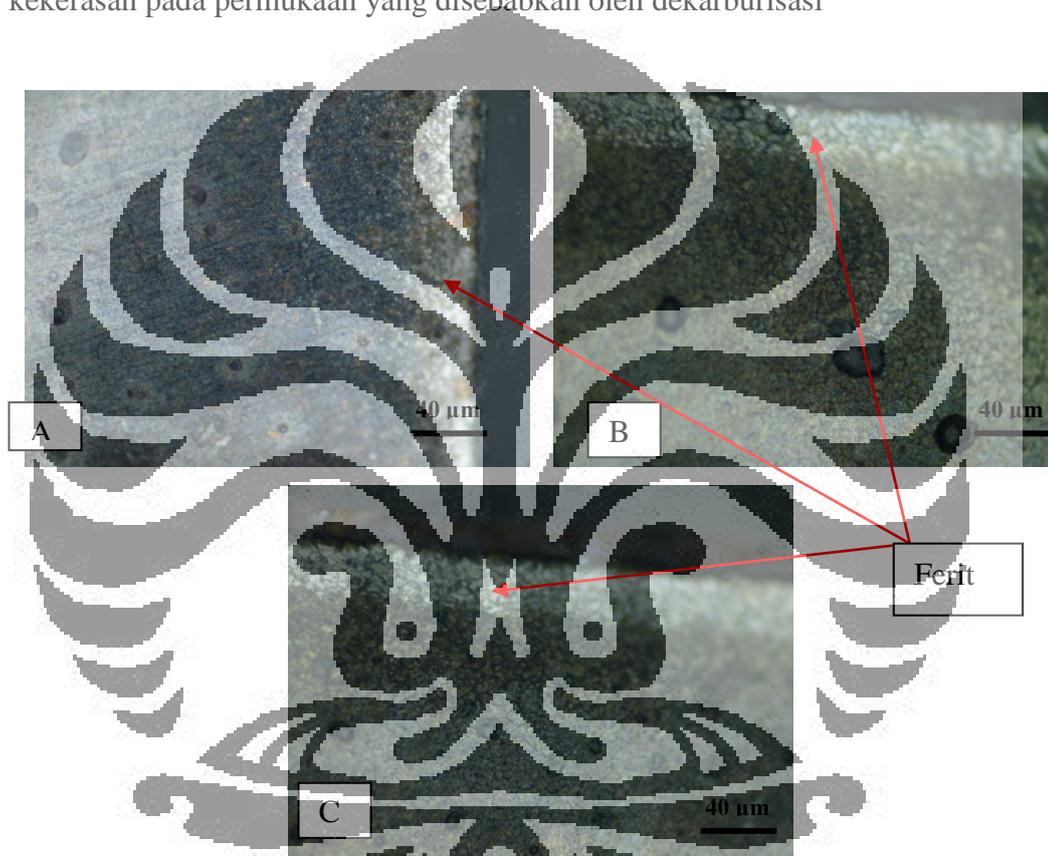


Gambar 4.3. Grafik Perbandingan Kekerasan Mikro Sampel Martemper Sebelum Temper

Hasil foto mikro dengan perbesaran 200x pada Gambar 4.4. menunjukkan fasa berwarna putih atau lebih terang pada permukaan dibandingkan dengan fasa pada bagian yang lebih dalam. Warna lebih terang menunjukkan kekerasan yang lebih rendah. Dapat disimpulkan bahwa fasa tersebut adalah ferit^[11] dengan membandingkannya pada sub-bab 2.7.

Kemungkinan lain fasa yang terbentuk adalah austenit sisa, namun austenit sisa terjadi karena austenit yang tidak bertransformasi menjadi martensit. Namun karena letaknya pada permukaan, hampir tidak memungkinkan terbentuk austenit sisa karena pendinginan justru dimulai dari permukaan sampel di mana austenit pada permukaan terlebih dulu bertransformasi daripada inti.

Dapat disimpulkan bahwa penurunan nilai kekerasan yang menyebabkan ketidaksesuaian dengan literatur salah satunya disebabkan karena penurunan kekerasan pada permukaan yang disebabkan oleh dekarburisasi



Gambar 4.4. (A) Foto Mikro Daerah Pinggir Sampel *Martemper* 5 Menit, (B) 10 menit, dan (C) 15 menit. Etsa Nital 2% s.d. 3%

4.3 Analisis Struktur Mikro

Pengamatan struktur mikro hasil perlakuan panas *Quench Temper* (Q&T) dan *martemper* dilakukan di bawah mikroskop optik digital pada perbesaran 1000x. Sebelumnya dilakukan preparasi pada sampel berupa pembuatan *mounting*, pengamplasan dan pemolesan. Setelah itu permukaan sampel dietsa dengan menggunakan nital 2 s.d. 3% untuk melihat butir ferit dan martensit dengan mekanisme korosi terkontrol pada butir ^[11]. Informasi yang didapat melalui

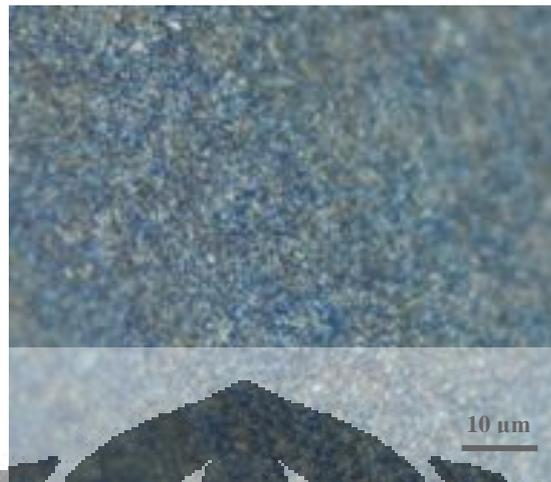
pengamatan struktur mikro antara lain berupa fasa yang terbentuk beserta morfologi strukturnya.

Pada Gambar 4.5. diperlihatkan struktur mikro pada sampel hasil *quench* konvensional dengan menggunakan etsa nital 2 s.d. 3%. Material telah mengalami proses perlakuan panas *quench* dari waktu austenisasi 40 menit dan temperatur austenisasi 855° C dengan media pendingin berupa oli pada temperatur 56° C dengan harapan struktur akhir yang dihasilkan adalah martensit. Terdapat fasa berbentuk *lath* martensit yang dominan dan berwarna coklat (gelap) dengan orientasi yang berbeda dan persebaran yang acak tetapi terbatas dari seluruh domain. Terdapat pula fasa berwarna putih kebiruan (terang) dan tersebar di antara struktur martensit. Fasa tersebut merupakan austenit sisa yang memberikan efek berupa pelunakan pada sampel. Selain itu terdapat endapan karbida berbentuk partikel kecil berwarna hitam yang berbentuk sementit maupun inklusi MnS. Struktur martensit sebelum temper ini terlihat sangat kasar dan tegas. Hal tersebut menandakan kekerasan yang sangat tinggi mencapai 58 HRC.



Gambar 4.5. Foto Mikro Hasil Q&T Sebelum Temper.
Etsa Nital 2% - 3%. 1000x

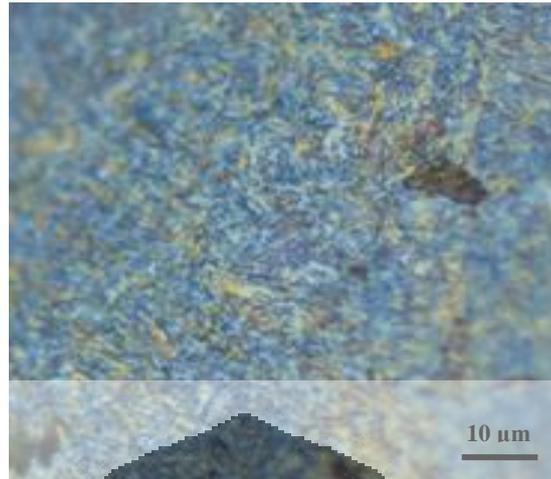
Kemudian pada Gambar 4.6. diperlihatkan struktur mikro hasil temper pada sampel hasil Q&T. Sampel yang kekerasannya 58 HRC tersebut mengalami temper pada temperatur 350° C dalam jangka waktu 60 menit. Dengan harapan struktur akhir yang terbentuk adalah martensit temper dengan tegangan sisa yang berkurang, ketahanan distorsi, dan ketangguhan yang meningkat.



Gambar 4.6. Foto Mikro Hasil Q&T Setelah Temper.
Etsa Nital 2% - 3%. 1000x

Tampak struktur berbentuk bulir yang sangat halus berwarna biru (terang) sebagai matrik dengan endapan berupa partikel hitam yang tersebar di antaranya. Saat martensit mengalami temper pada temperatur di atas 250°C , martensit akan menjadi tidak tampak dan akan digantikan dengan struktur yang terdiri atas ferit dan sementit tersebar yang sangat halus [1]. Struktur ini sama sekali tidak mengandung pearlit dan disebut martensit temper. Terdapat pula struktur seperti titik berwarna putih yang merupakan austenit sisa.

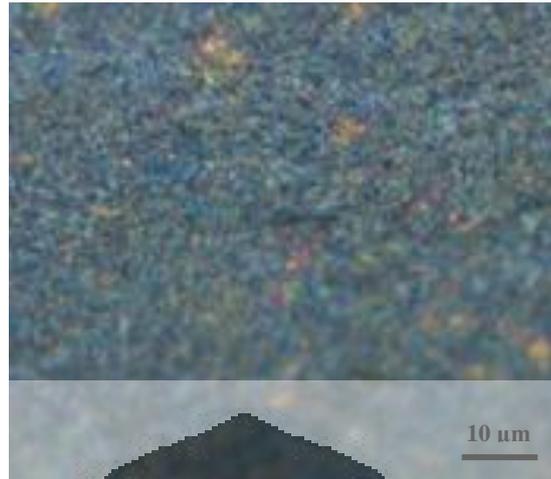
Pada Gambar 4.7. diperlihatkan struktur mikro pada sampel hasil *martemper* selama 5 menit tetapi belum dilakukan temper. Sampel mengalami perlakuan panas austenisasi pada temperatur 855°C selama 40 menit, kemudian di-*quench* dalam media celup oli pada temperatur 155°C selama 5 menit tanpa mengalami temper. Diharapkan struktur yang terbentuk adalah martensit.



Gambar 4.7. Foto Mikro Hasil *Martemper* 5 Menit. Sebelum Temper.
Etsa Nital 2% - 3%. 1000x

Struktur berbentuk jarum berwarna biru terlihat sangat jelas dan berwarna lebih terang dibandingkan struktur pada Gambar 4.5. Terdapat pula struktur berwarna coklat yang merupakan endapan karbida dan sedikit sekali struktur berwarna putih yang merupakan austenit sisa. Sementara bercak berwarna hitam yang terlihat merupakan *micropitting* yang disebabkan karena etsa yang terlalu lama. Pada prinsipnya semakin gelap warna dari struktur menunjukkan material memiliki kekerasan yang semakin tinggi, sedangkan semakin terang warna struktur menunjukkan kekerasan yang lebih rendah^[11].

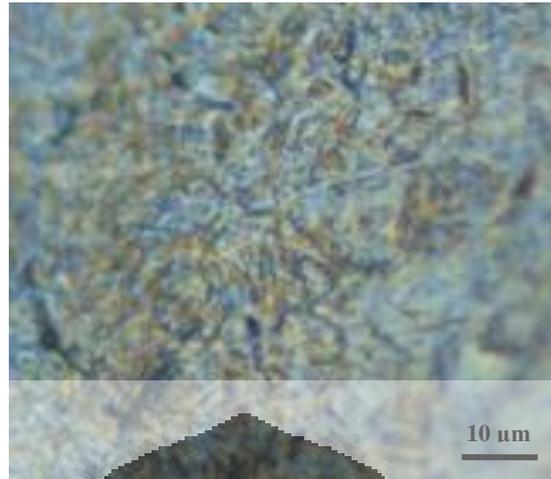
Kemudian sampel pada Gambar 4.7. mengalami proses temper pada temperatur 260 °C selama 60 menit. Struktur mikro yang dihasilkan diperlihatkan pada Gambar 4.8. di mana terdapat struktur dengan beraneka ragam warna. Struktur berwarna biru merupakan domain ferit pada martensit temper sedangkan struktur berwarna coklat merupakan endapan sementit Fe₃C. Masih terdapat sedikit titik berwarna putih yang merupakan austenit sisa. Keberadaan ferit yang cukup merata dan menyerupai Gambar 4.6. menyebabkan kekerasan sampel hasil *martemper* 5 menit lebih rendah daripada hasil *martemper* pada temperatur 10 dan 15 menit.



Gambar 4.8. Foto Mikro Hasil *Martemper* 5 Menit. Setelah Temper. Etsa Nital 2% - 3%. 1000x

Sementara itu beberapa endapan karbida pada martensit temper ini memiliki bentuk seperti bola kecil atau *spheroidal*. Bentuk ini akan memberi perangkap kepada hidrogen untuk masuk dalam batas butir sehingga mempermudah penggetasan akibat hidrogen. Bentuk *spheroidal* ini terjadi jika pemfilahan waktu dan temperatur temper yang kurang tepat^[11].

Pada Gambar 4.9. diperlihatkan struktur mikro pada sampel hasil *martemper* selama 10 menit tetapi belum dilakukan temper. Terlihat struktur mikro yang hampir sama seperti pada Gambar 4.7. namun jarum-jarum martensit terlihat lebih kasar dengan orientasi yang lebih acak. Hal tersebut menunjukkan kekerasan pada sampel *martemper* 10 menit lebih tinggi daripada 5 menit. Struktur berwarna coklat merupakan endapan karbida dan sedikit struktur berwarna putih berupa bintik di antara struktur martensit merupakan austenit sisa. Garis-garis menyerupai jarum martensit berwarna hitam merupakan sisa goresan atau bidang pada saat pemolesan sampel dan lubang berwarna hitam merupakan *micropitting* yang disebabkan karena etsa yang terlalu lama.



Gambar 4.9. Foto Mikro Hasil *Martemper* 10 Menit. Sebelum Temper.
Etsa Nital 2% - 3%. 1000x

Gambar 4.10. merupakan struktur mikro hasil temper dari Gambar 4.9. Terlihat Struktur berwarna coklat yang merupakan domain ferit pada martensit temper sedangkan struktur berwarna hitam merupakan endapan sementit Fe_3C . Struktur berwarna hijau tua merupakan ferit yang tidak terlalu jelas dalam Gambar 4.6. dan 4.8. Ferit merupakan hasil dari transformasi austenit sisa ketika mengalami temper. Sedangkan masih terdapat sedikit titik berwarna putih yang merupakan austenit sisa yang jumlahnya lebih sedikit dari Gambar 4.8.



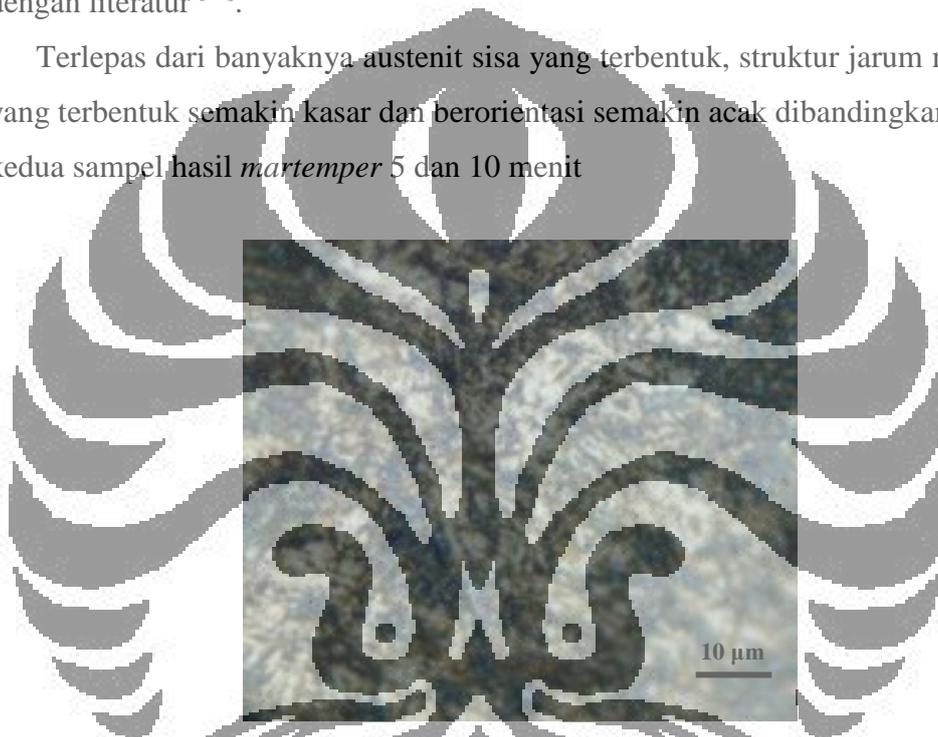
Gambar 4.10. Foto Mikro Hasil *Martemper* 10 Menit. Setelah Temper.
Etsa Nital 2% - 3%. 1000x

Pada Gambar 4.11. diperlihatkan struktur mikro pada sampel hasil *martemper* selama 15 menit tetapi belum dilakukan temper. Tampak struktur berwarna putih

yang terdapat di antara struktur berwarna biru. Struktur putih merupakan austenit sisa yang jumlahnya sangat dominan dibandingkan struktur martensit. Sedangkan sedikit titik hitam merupakan endapan karbida.

Terdapat banyaknya austenit sisa menunjukkan martensit belum sepenuhnya terbentuk 100% yang dikarenakan kurva pendinginan belum mencapai temperatur akhir pembentukan martensit atau martensit *finish* (M_f). Hal tersebut menyebabkan kekerasan yang tercapai dalam proses *martemper* tidak sesuai dengan literatur^[13].

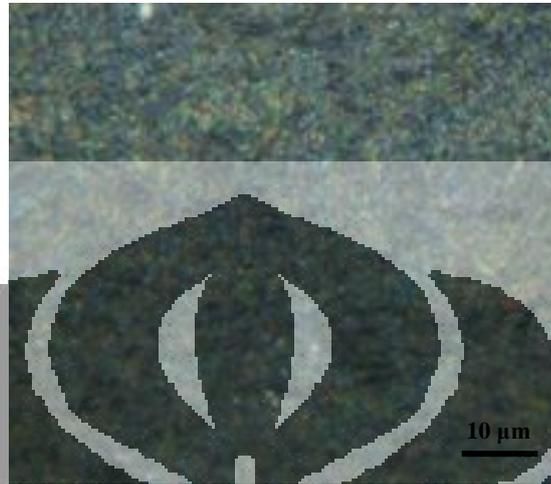
Terlepas dari banyaknya austenit sisa yang terbentuk, struktur jarum martensit yang terbentuk semakin kasar dan berorientasi semakin acak dibandingkan dengan kedua sampel hasil *martemper* 5 dan 10 menit



Gambar 4.11. Foto Mikro Hasil *Martemper* 15 Menit. Sebelum Temper. Etsa Nital 2% - 3%. 1000x

Sampel pada Gambar 4.11, kemudian mengalami perlakuan temper dan menghasilkan struktur mikro yang diperlihatkan dalam Gambar 4.12. Tampak dominan struktur berwarna hijau tua yang merupakan fasa ferit hasil transformasi dari austenit sisa. Dikarenakan austenit sisa yang banyak terbentuk, maka memberi implikasi pada banyaknya kandungan ferit yang terbentuk. Selain itu terdapat struktur berwarna coklat dan hitam yang merupakan struktur martensit temper bersama endapan sementit Fe_3C .

Kekerasan yang dihasilkan pada sampel *martemper* 15 menit ini seharusnya lebih lunak jika dikorelasikan dengan keberadaan ferit yang dominan. Namun struktur martensit temper yang terdiri atas ferit dan sementit juga terjadi pada sampel hasil perlakuan panas lainnya.



Gambar 4.12. Foto Mikro Hasil *Martemper* 15 Menit. Setelah Temper. Etsa Nital 2% - 3%, 1000x

Jika dibandingkan dengan struktur mikro hasil Q&T maka dapat terlihat perbedaan bentuk struktur martensit temper. Sampel hasil Q&T memiliki struktur ferit dan sementit Fe_3C yang lebih halus dibandingkan dengan sampel hasil *martemper* yang menyebabkan kekerasan sampel hasil *martemper* lebih tinggi. Namun terdapat sedikit kemiripan warna struktur yang kebiruan antara sampel hasil Q&T dan hasil 5 menit *martemper*. Hal ini berkaitan dengan nilai kekerasan sampel yang hampir serupa sebesar 45,63 dan 45,77.

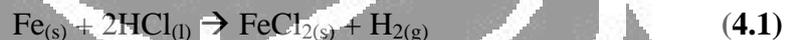
Pada Gambar 4.8.; 4.10.; dan 4.12. struktur mikro hasil *martemper* memperlihatkan kecenderungan semakin berwarna gelap dengan morfologi yang semakin kasar. Hal ini sesuai dengan nilai kekerasan yang semakin bertambah jika waktu tahan *martemper* ditingkatkan.

Pada Gambar 4.7.; 4.9.; dan 4.11. diperlihatkan struktur jarum martensit yang semakin kasar dan runcing dengan orientasi yang semakin acak. Hal tersebut sesuai dengan peningkatan kekerasan sampel dalam waktu tahan yang semakin meningkat. Namun kehadiran austenit sisa menunjukkan bahwa struktur martensit yang terbentuk belum 100%. Hal tersebut menyebabkan kekerasan yang

dihasilkan masih di bawah kekerasan minimum martensit yang seharusnya terbentuk jika dianalisis pada diagram TTT baja 1050 ^[13].

4.4 Hasil Pengujian *Delayed Fracture*

Rangkaian rantai dicelupkan ke dalam larutan HCl 0,1 N dengan volume sebesar 4 liter selama 100 jam dengan setiap 25 jam larutan diganti dengan larutan yang baru. Terlihat gelembung gas yang terbentuk di dalam larutan pada saat awal pencelupan dan serta merta akan memperkeruh larutan dengan kemunculan serbuk-serbuk berwarna coklat pada akhir jam ke 25. Rantai yang kemudian diangkat untuk penggantian larutan, menghasilkan bau yang sangat menyengat yang ditimbulkan oleh gas hidrogen yang dihasilkan melalui persamaan reaksi kimia berikut:



Gas hidrogen yang dihasilkan dengan mudah dapat dikenali melalui gelembung gas yang terbentuk pada awal pencelupan dan bau yang menyengat pada permukaan sampel saat penggantian larutan. Lapisan FeCl_2 sebagai produk korosi dapat diamati pada saat akhir 25 jam waktu pelarutan dan biasanya mengapung pada permukaan larutan atau menempel pada dinding *beaker glass*. Lapisan ini juga muncul pada permukaan sampel dan terlihat sangat jelas ketika sampel dikeringkan. Hasil permukaan rangkaian rantai sesudah dicelup dapat dilihat pada Gambar 4.13. dan 4.14. berikut:



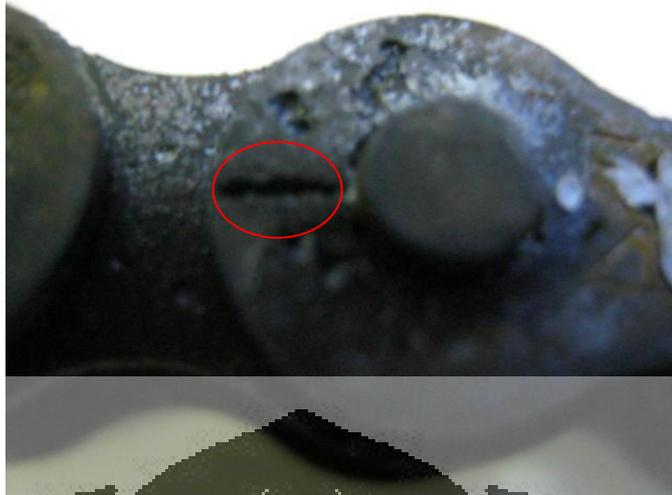
Gambar 4.13. Rangkaian Pelat Setelah Pengujian *Delayed Fracture* Selama 50 Jam



Gambar 4.14. Rangkaian Pelat Setelah Pengujian *Delayed Fracture* Selama 100 Jam

Saat dilakukan penggantian larutan setiap 25 jam, permukaan sampel diamati secara makro menggunakan indera penglihatan mata. Pada saat penggantian larutan setelah 75 jam pengujian, diamati terdapat permukaan yang mengalami perpatahan pada sebuah sampel OLP dengan variabel proses *quench* dan *temper*. Kemudian pengujian dilanjutkan sampai 100 jam. Setelah pengujian selama 100 jam, sampel kembali diamati. Ternyata terjadi pertambahan sampel yang mengalami retak yaitu sampel dengan variabel proses *martemper* selama 15 menit.

Perpatahan terjadi lebih dahulu pada sampel hasil Q&T dikarenakan ketahanan terhadap difusi hidrogen pada batas butir yang lebih rendah dibandingkan dengan hasil *martemper*. Permukaan daerah patahan diamati pada Gambar 4.15. dan 4.16. berikut



Gambar 4.15. Daerah Perpatahan Pada Sampel Hasil Q&T Setelah Uji *Delayed Fracture* Selama 100 Jam



Gambar 4.16. Daerah Perpatahan Pada Sampel Hasil *Martemper* Setelah Uji *Delayed Fracture* Selama 100 Jam

Pada Gambar 4.15. diperlihatkan permukaan hasil patahan sudah membentuk celah yang cukup lebar seperti yang ditunjukkan dalam lingkaran merah. Sementara pada Gambar 4.16. permukaan hanya membentuk retak atau inisiasi perpatahan seperti ditunjukkan dalam lingkaran biru, dan bukan merupakan perpatahan yang memiliki celah seperti Gambar 4.15. Inisiasi retak yang terdapat pada Gambar 4.16. menunjukkan ciri perpatahan getas dengan daerah retak rambut yang halus ^[17] sedangkan perpatahan celah pada Gambar 4.15. terjadi akibat waktu inkubasi yang lebih lama setelah terjadinya inisiasi retak pada saat 75 jam pengujian dilanjutkan dengan 25 jam pengujian terakhir. Selain itu sampel hasil

quench temper juga memiliki ketahanan yang lebih rendah terhadap *hydrogen embrittlement* yang dibuktikan dengan terjadinya kegagalan dalam waktu inkubasi yang lebih cepat (75 jam)

Kemudian daerah permukaan hasil patahan dipotong dan diamati di bawah mikroskop optik digital dengan perbesaran 100x. Pengujian dengan *scanning electron microscope* tidak dilakukan karena untuk mengamati bentuk permukaan patahan cukup diamati secara makro di bawah mikroskop seperti pada Gambar 4.17. dan 4.18. berikut:



Gambar 4.17. Permukaan Patahan Sampel *Quench Temper* Hasil Uji *Delayed Fracture* Selama 100 Jam. 100x. A) Bagian Tepi, B) Bagian Tengah

Pada Gambar 4.17. diperlihatkan permukaan patahan sampel hasil *quench temper* lebih terang karena memantulkan cahaya secara sempurna dengan permukaan yang lebih rata. Sebagian besar cahaya dipantulkan. Hal ini

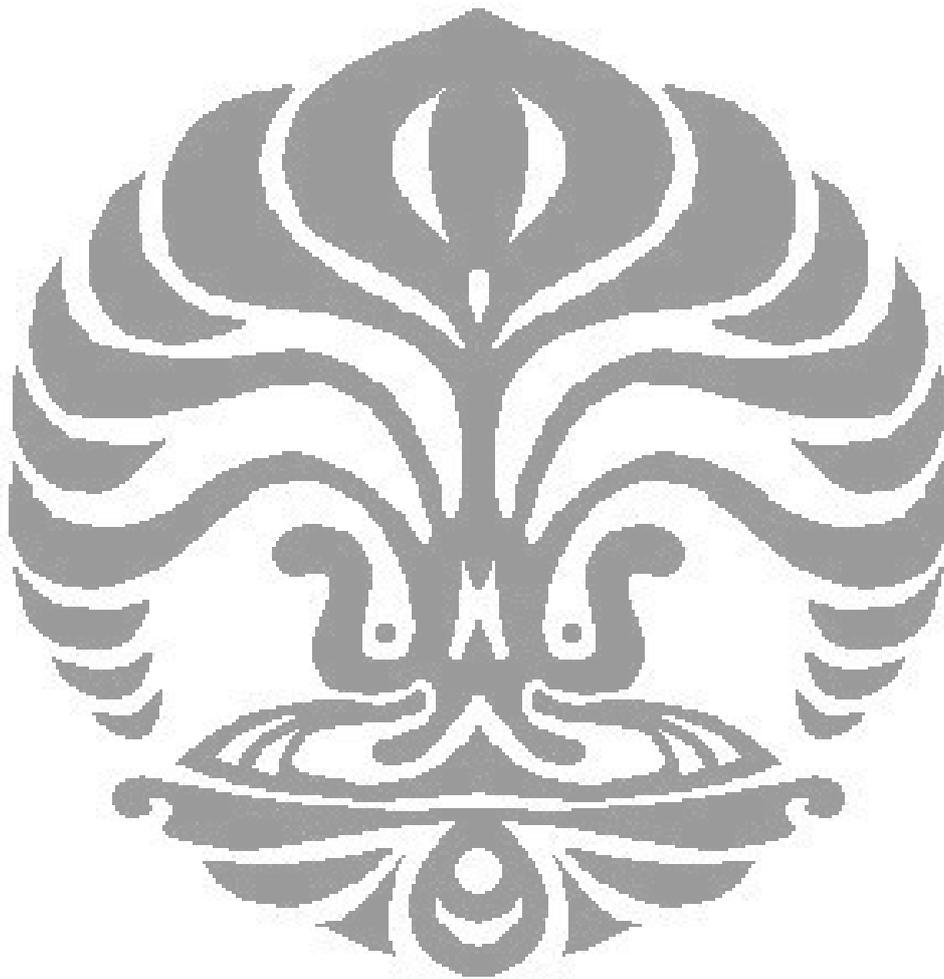
merupakan ciri patahan getas (*brittle*)^[17]. Tidak dapat dilihat secara jelas arah perambatan retak terhadap arah tegangan serta pola percabangan yang terbentuk

Pada Gambar 4.18. diperlihatkan permukaan patahan yang menyerupai permukaan pada gambar 4.17. Perbedaannya terletak pada komposisi permukaan yang dipenuhi dengan produk korosi endapan $\text{FeCl}_2(\text{s})$ berwarna coklat dan hanya terdapat sedikit bentuk permukaan patahan yang memantulkan cahaya. Permukaan patahan pada kedua sampel terlihat identik dan menunjukkan ciri perpatahan getas. Namun tingkat kegetasan material pada Gambar 4.17. yaitu hasil *quench temper* lebih tinggi dibandingkan hasil *martemper*.



Gambar 4.18. Permukaan Patahan Sampel *Martemper* Hasil Uji *Delayed Fracture* Selama 100 Jam. 100x. A) Bagian Tepi, B) Bagian Tengah

Permukaan patahan kedua sampel menunjukkan ciri perpatahan getas yang disebabkan oleh struktur mikro yang terbentuk pada kedua sampel adalah martensit temper. Martensit temper memiliki ketangguhan yang lebih baik dibandingkan dengan martensit biasa, namun tetap bersifat getas karena terdiri atas endapan sementit Fe_3C dan ferit. Ferit tersebut yang memberi perbaikan keuletan pada struktur martensit setelah temper.



BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

1. Dengan peningkatan waktu tahan *martemper* dari 5 menit, 10 menit, dan 15 menit maka nilai kekerasan semakin meningkat, struktur mikro martensit temper yang dihasilkan semakin kasar dan gelap, serta ketahanan terhadap *hydrogen embrittlement* semakin menurun.
2. Dengan temperatur temper yang lebih rendah, nilai kekerasan pada proses *martemper* lebih tinggi daripada nilai kekerasan hasil *quench temper*.
3. Proses *quench temper* menghasilkan struktur mikro martensit temper dan austenit sisa yang lebih halus bila dibandingkan dengan hasil *martemper*.
4. Sampel *quench temper* hasil uji *delayed fracture* mengalami kenaikan persentase kekerasan paling tinggi yaitu 4,25%. Sementara sampel *martemper* 5 menit, 10 menit, dan 15 menit mengalami kenaikan berturut-turut sebesar 3,63%; 3,63%; dan 4,21%. Dengan kata lain sampel hasil *quench temper* memiliki ketahanan *hydrogen embrittlement* yang paling rendah dan nilai optimal untuk kekerasan dan ketahanan *hydrogen embrittlement* dicapai pada sampel hasil *martemper* 5 dan 10 menit.
5. Perpatahan makro pada sampel hasil *quench temper* dan *martemper* sama-sama menunjukkan terjadinya perpatahan getas dikarenakan struktur mikro yang dihasilkan adalah martensit temper.
6. Austenisasi sangat sulit dilakukan pada *batch furnace* yang tidak vakum dan tanpa penambahan *carbon potential* karena akan menimbulkan masalah dekarburisasi.

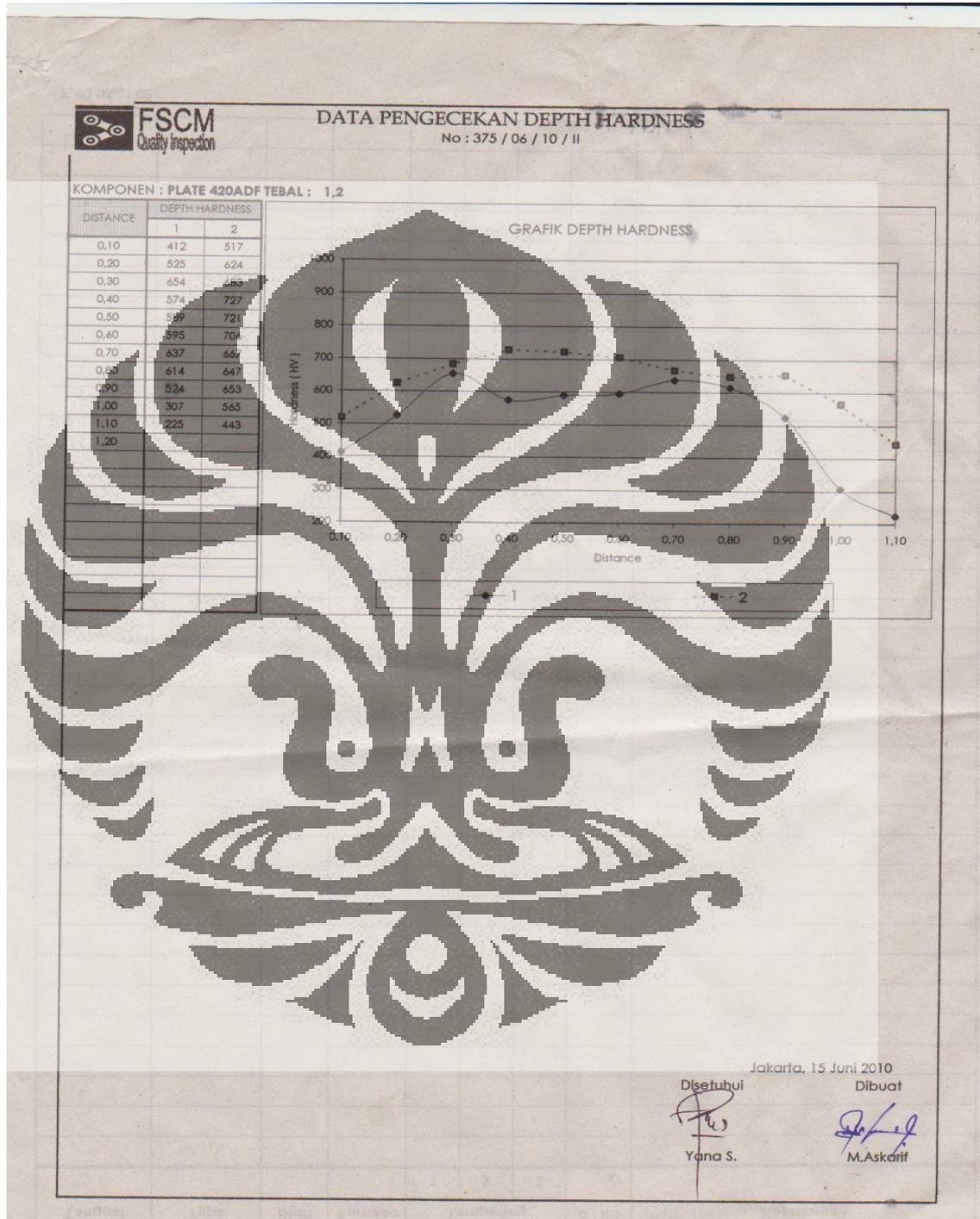
DAFTAR REFERENSI

- [1]. Koeswoyo, Moch (2003). *Industri Komponen Otomotif Harus Kembangkan Merek Sendiri*. Rabu, 17 September 2003. <http://www.tempointeraktif.com>
- [2]. Niko, Hendra (2009). *Produsen OEM dan Aftermarket; Standar Resmi Dijual Bebas*. 22 Mei 2009. <http://www.motorplus.com>
- [3] ASM handbook vol 4, *Heat Treating* . ASM International ; USA, 1991
- [4] ASM handbook, *Handbook Of Residual Stress and Steel Deformation*. ASM International; USA, 2002
- [5] *Journal Cold Rolled High Carbon Steel Sheet Martempering and Austempering*. DID Manufacturing, Japan, 2009
- [6] Thelning, Karl. *Steel and Its Heat Treatment*. Butterworths; 1984
- [7] Herring, Daniel H. *Secret of Effective Hot Oil Quenching*. *Journal on Industrial Heating*; April 2006, Ed.73 page 16
- [8] Totten, G.E., dkk. *Handbook of Quenchants and Quenching Technology*. ASM International; Ohio;1993
- [9] Krauss, George. *Steels: Heat Treatment and Processing Principles*. ASM International, Ohio;1990
- [10] Callister, William D. Jr. *An Introduction Materials Science and Engineering*. 5rd Edition. Mc-Graw Hill. 1995
- [11] ASM handbook vol 9, *Metallography and Microstructure*. ASM International;USA, 2004
- [12] American Society for Metals (ASM), *Metals Handbook Vol 7*. 8th Ed, Ohio; 1972
- [13] *Atlas of Isothermal Transformation Diagram*. ASM International, Ohio; 1993
- [14] American Society for Metals. *HEAT TREATER'S GUIDE: Standard Practices and Procedures for Steel*. Ohio; 1984
- [15] Raygan, S., Rassizadehghani, J., and M. Askari. *Comparison of Microstructure and Surface Properties of AISI 1045 Steel After Quenching in Hot Alkaline Salt Bath and Oil*. ASM International. 2009; 18: 168–173

- [16] Setiawan, Heri. *Pengaruh Metode Pendinginan Quench Temper Terhadap Sifat Mekanis Plain Carbon Steel AISI 1045*. Skripsi Departemen Metalurgi. Depok; 2001
- [17] ASM handbook vol 11, *Failure Analysis and Prevention*. ASM International; USA, 2002
- [18] Voort, George Vander. *METALLOGRAPHY: Principles and Practice*. McGraw-Hill. New York; 1984
- [19] ASTM E 92-00, *Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials*. ASTM International, USA. 2000
- [20] American Society for Testing Materials E 18-03, *Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic material*. ASTM International, USA. 2003
- [21] Krauss, George and Mario Saeglitz. *Deformation, Fracture, and Mechanical Properties of Low-Temperature-Tempered Martensite in SAE 43xx Steels*. Colorado School of Mines, Golden. Feb1997; 28A: 377
- [22] Dokumen Nippon Grease Co. Ltd. Toyosaki Building. Chayamachi Kita-ku. Osaka; 2010



Data Pengujian Kekerasan Secara Mikro untuk Baja 1050 Hasil Martemper 5 dan 10 Menit



Lampiran 2

Data Pengujian Kekerasan Secara Mikro untuk Baja 1050 Hasil Martemper 15 Menit

