



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PENGARUH PROSES PERLAKUAN PANAS  
TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO  
RODA KERETA API BUATAN LOKAL**

**TESIS**

**MUHAMMAD KOZIN  
1006733253**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
PROGRAM STUDI ILMU MATERIAL  
SALEMBA  
JULI 2012**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PENGARUH PROSES PERLAKUAN PANAS  
TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO  
RODA KERETA API BUATAN LOKAL**

**TESIS**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Sains**

**MUHAMMAD KOZIN  
1006733253**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
PROGRAM STUDI ILMU MATERIAL  
SALEMBA  
JULI 2012**

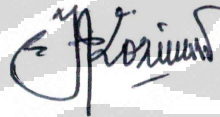
## LEMBAR PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Muhammad Kozin

NPM : 1006733253

Tanda Tangan :



Tanggal : 7 Juli 2012

## LEMBAR PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh

Nama : Muhammad Kozin  
NPM : 1006733253  
Program Studi : Ilmu Material  
Judul Tesis : Pengaruh Proses Perlakuan Panas Terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Roda Kereta Api Buatan Lokal

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Sains pada Program Studi Ilmu Material, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia.

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof.Dr.Ir D.N. Adnyana, APU (.....)  
Penguji : Dr. Azwar Manaf, M.Met (.....)  
Penguji : Dr. Budhy Kurniawan, M.Si (.....)  
Penguji : Dr.Ir. M. Yudi Masduky S.,M.Sc (.....)

Ditetapkan di : Jakarta

Tanggal : 7 Juli 2012

## KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH

Alhamdulillah, segala puji bagi Allah SWT, karena hanya dengan rahmat-Nya saya dapat menyelesaikan tesis ini. Penulisan tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Sains pada Program Studi Ilmu Material Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Indonesia.

Saya juga sangat berterima kasih kepada berbagai pihak atas bantuan dan dukungannya sehingga saya dapat menyelesaikan studi pascasarjana ini. Secara khusus, saya ingin berterima kasih kepada:

1. Dr. Bambang Soegijono, M.Si selaku Ketua Program Studi Ilmu Material dan juga pembimbing akademik
2. Prof.Dr.Ir. D.N. Adnyana, APU atas bimbingannya selama proses penelitian.
3. Dr. Azwar Manaf, M.Met, Dr. Budhy Kurniawan, M.Si dan Dr.Ir. M. Yudi Masduky S., M.Sc atas segala masukannya yang sangat bermanfaat.
4. Bapak/Ibu dosen dan staf sekretariat Program Studi Ilmu Material UI atas bantuannya selama proses perkuliahan dan penelitian.
5. Menteri Negara Riset dan Teknologi dan Kepala BPPT atas pemberian ijin tugas belajar melalui Program Beasiswa Kemenristek..
6. Dr. Barman Tambunan, selaku Direktur Pusat Teknologi Material BPPT, atas bantuan moril dan materil dalam pelaksanaan penelitian ini.
7. Dr. Benny atas segala bantuan selama penelitian di Polman - Bandung
8. Orang tua dan istri tercinta atas dukungan yang tak pernah berhenti.
9. Muhammad Fahrurridho dan Zaika Khoirunnisa, buah hati sumber semangat dan inspirasi.

Semoga Alloh SWT membalas kebaikan semua pihak di atas dengan balasan yang berlipat. Saya juga berharap hasil penelitian ini dapat berguna bagi pihak-pihak yang membutuhkan, khususnya bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Penulis

2012

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

---

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

Nama : Muhammad Kozin  
NPM : 1006733253  
Program Studi : Ilmu Material  
Departemen : Fisika  
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Jenis karya : Tesis

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 :

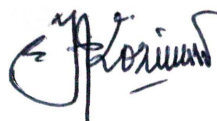
**Pengaruh Proses Perlakuan Panas Terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Roda Kereta Api Buatan Lokal**

beserta 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 : Jakarta  
Pada tanggal : 7 Juli 2011

Yang menyatakan



(Muhammad Kozin)

## ABSTRAK

Nama : Muhammad Kozin  
Program Studi : Ilmu Material  
Judul : Pengaruh Proses Perlakuan Panas Terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Roda Kereta Api Buatan Lokal

Dalam rangka untuk mengurangi ketergantungan terhadap produk impor roda kereta api, maka telah dilakukan usaha untuk membuatnya di dalam negeri. Usaha pembuatan roda kereta api dilakukan melalui proses pengecoran dengan bahan baku dari roda kereta api bekas. Hasil dari proses pengecoran tersebut memerlukan proses perlakuan panas untuk mendapatkan sifat mekanik yang sesuai dengan standar. Penelitian ini diawali dengan pembuatan spesimen untuk pengujian komposisi kimia, kekuatan tarik, kekerasan dan struktur mikro. Selanjutnya dilakukan proses perlakuan panas berupa *normalizing*, *flame hardening* dan *tempering*. Proses *normalizing* dilakukan pada temperatur 850 °C, waktu penahanan selama 2 (dua) jam dan didinginkan di udara menghasilkan kekuatan tarik sebesar 906.1 MPa dan kekerasan 24 HRC. Proses *flame hardening* pada temperatur 800 °C, waktu penahanan 60 detik dengan media pendingin air menghasilkan kekerasan permukaan sebesar 58.35 HRC. Proses *tempering* pada temperatur 500 °C, waktu penahanan selama 1 (satu) jam menghasilkan kekerasan antara 34-37 HRC dengan kedalaman pengerasan efektif sebesar 10 mm.

Kata kunci: perlakuan panas, sifat mekanik, struktur mikro, roda kereta api, kedalaman pengerasan  
xii+69 halaman ; 43 Gambar; 13 Tabel  
Daftar Pustaka : 24 (1988-2011)

## ABSTRACT

Name : Muhammad Kozin  
Program of Study : Materials Science  
Title : Effect of Heat Treatment Process on the Mechanical Properties and Microstructure of Locally-Made Railway Wheels

In order to reduce the dependency on imported products of railway wheels, efforts have been made to produce it in the country. The manufacture of railway wheels is done through a casting process of raw materials originated from used railway wheels. The results of the casting process requires heat treatment processes to improve the mechanical properties in accordance with the standards. This study has begun with the manufacture of test specimens for chemical composition, tensile strength, hardness and microstructure. It is followed by heat treatment processes namely normalizing, flame hardening and tempering. The normalizing process, at a temperature of 850 °C with a holding time of 2 hours followed by cooling in the air, has resulted in tensile strength of 906.1 MPa and hardness of 24 HRC. The flame hardening process at a temperature of 800 °C with a holding time of 60 seconds followed by water quenching has resulted in hardness of 57.33 HRC. The tempering process at a temperature of 500 °C with a holding time of one hour followed by cooling in the air, has resulted in a final surface hardness of 34 to 37 HRC that complies with the railway standard with effective depth of hardening of 10 mm.

Keywords: heat treatment, mechanical properties, microstructure, railway wheels, depth of hardening

xii+69 pages ; 43 pictures; 13 tables

Bibliography : 24 (1988-2011)



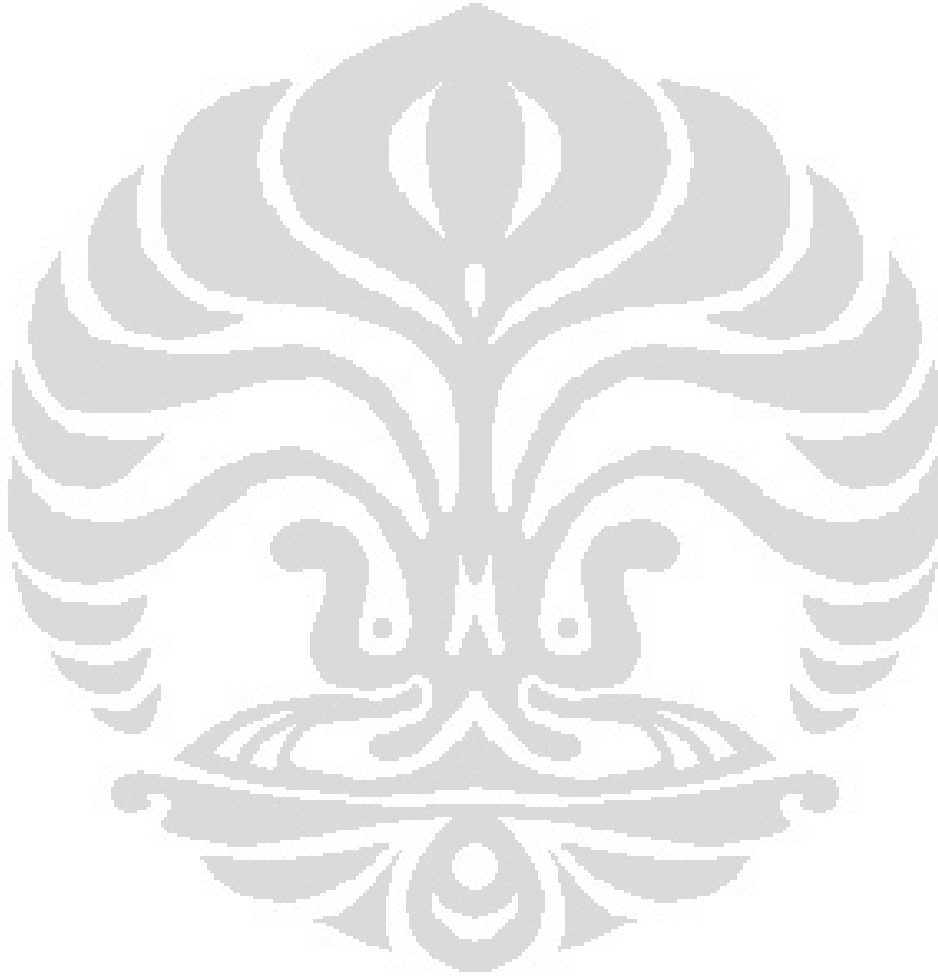
## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
LEMBAR ORISINALITAS .....	ii
LEMBAR PENGESAHAN .....	iii
KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH .....	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH .....	v
ABSTRAK .....	vi
DAFTAR ISI .....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	ix
DAFTAR TABEL .....	xi
DAFTAR LAMPIRAN .....	xii
SINGKATAN DAN ISTILAH.....	xiii
<b>1. PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian .....	3
1.4 Hipotesa Penelitian .....	3
1.5 Manfaat Penelitian .....	3
1.6 Batasan Masalah .....	4
1.7 Sistematika Penulisan .....	4
<b>2. TINJAUAN LITERATUR .....</b>	<b>5</b>
2.1 Kereta Api .....	5
2.2 Roda Kereta Api .....	6
2.3 Perlakuan Panas.....	10
2.4 Perlakuan Panas Permukaan .....	15
<b>3. METODE PENELITIAN .....</b>	<b>25</b>
3.1 Alur Penelitian .....	25
3.2 Prosedur Penelitian .....	25
3.3 Alat dan Bahan yang Digunakan.....	33
3.4 Pengujian-Pengujian .....	35
3.5 Tempat Penelitian .....	35
<b>4. HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>36</b>
4.1 Spesimen Hasil Pengecoran.....	36
4.2 Pengujian <i>Ultrasonic</i> Spesimen Hasil Pengecoran.....	37
4.3 Kekuatan Tarik dan Kekerasan Spesimen Hasil Pengecoran....	37
4.4 Kekuatan Tarik dan Kekerasan Spesimen Hasil <i>Normalizing</i> .....	38
4.5 Kekerasan Hasil Proses <i>Flame Hardening</i> .....	39
4.6 Kekerasan Hasil Proses <i>Tempering</i> .....	42
4.7 Foto Struktur Mikro .....	45
<b>5. KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>56</b>
5.1 Kesimpulan .....	56
5.2 Saran .....	57
DAFTAR REFERENSI .....	58
LAMPIRAN .....	60

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Proses pengecoran roda kereta api.....	2
Gambar 2.1	Bogie kereta api .....	6
Gambar 2.2	Perangkat roda kereta api.....	6
Gambar 2.3	Roda kasut .....	7
Gambar 2.4	Roda monoblok .....	8
Gambar 2.5	Diagram tegangan – regangan roda hasil penempaan dan pengecoran .....	10
Gambar 2.6	Gradien temperatur pendinginan cepat ( <i>quench</i> ) .....	12
Gambar 2.7	Kurva pendinginan pada permukaan dan pusat.....	13
Gambar 2.8	Metode titik/setempat ( <i>spot method or stationary method</i> ).....	21
Gambar 2.9	Metode progresif ( <i>progresive method</i> ).....	22
Gambar 2.10	Metode putar ( <i>spinning method</i> ).....	23
Gambar 2.11	Kombinasi metode putar-progresif .....	24
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian .....	25
Gambar 3.2	Desain proses perlakuan panas .....	26
Gambar 3.3	Diagram Fe-Fe <sub>3</sub> C .....	27
Gambar 3.4	Pengaruh unsur paduan terhadap pergeseran titik eutektoid.....	27
Gambar 3.5	Posisi titik eutektoid setelah mengalami pergeseran .....	28
Gambar 3.6	Diagram temperatur <i>tempering</i> baja eutektoid .....	30
Gambar 3.7	Proses pengecoran spesimen proses <i>flame hardening</i> .....	32
Gambar 3.8	Proses <i>flame hardening</i> .....	31
Gambar 3.9	Metode pengukuran kedalaman pengerasan .....	32
Gambar 3.10	Contoh pengukuran kedalaman pengerasan.....	32
Gambar 3.11	Alat <i>rotary flame hardening</i> .....	34
Gambar 4.1	Pola dan spesimen <i>flame hardening</i> hasil pengecoran .....	36
Gambar 4.2	Proses dan hasil pengujian ultrasonik.....	37
Gambar 4.3	Pengaruh <i>interlamellar spacing</i> terhadap kekerasan dan kekuatan .....	39
Gambar 4.4	Diagram CCT baja eutektoid .....	40
Gambar 4.5	Struktur <i>body centered tetragonal (BCT)</i> .....	41
Gambar 4.6	Pemilihan temperatur <i>tempering</i> .....	42
Gambar 4.7	Perubahan fasa yang terjadi pada proses <i>tempering</i> baja eutektoid .....	43
Gambar 4.8	Struktur mikro hasil proses pengecoran.....	45
Gambar 4.9	Struktur mikro hasil proses <i>normalizing</i> .....	46
Gambar 4.10	Gambar skematik dari struktur perlit .....	47
Gambar 4.11	Gambar skematik dari perlit hasil <i>annealing</i> dan <i>normalizing</i> .....	47
Gambar 4.12	Struktur mikro hasil proses <i>flame hardening</i> .....	48
Gambar 4.13	Pengaruh kadar karbon terhadap pembentukan martensit..	49
Gambar 4.14	Pengaruh kadar karbon terhadap prosentasi austenit sisa...	49
Gambar 4.15	Struktur mikro hasil proses <i>tempering</i> dengan temperatur <i>tempering</i> 450 °C .....	50

Gambar 4.16	Struktur mikro hasil proses <i>tempering</i> dengan temperatur tempering 500 °C .....	50
Gambar 4.17	Struktur mikro hasil proses <i>tempering</i> dengan temperatur tempering 550 °C .....	50
Gambar 4.18	Variasi impak dari tiga macam struktur yang ditemper ....	51
Gambar 4.19	Grafik distribusi kekerasan rata-rata hasil proses <i>flame hardening</i> dengan variasi <i>holding time</i> 30, 45 dan 60 detik .....	53
Gambar 4.20	Grafik distribusi kekerasan rata-rata hasil proses <i>tempering</i> dari spesimen <i>flame hardening</i> dengan variasi <i>holding time</i> 30, 45 dan 60 detik .....	55



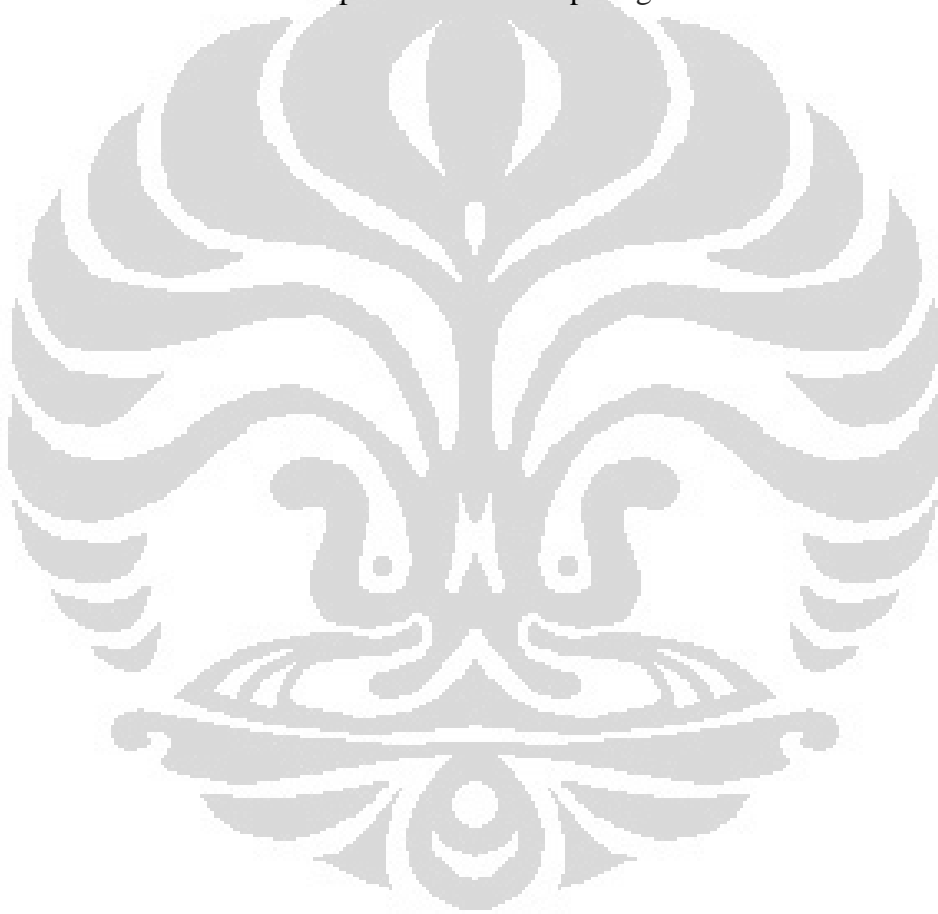
## DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	Kebutuhan roda kereta api per tahun.....	1
Tabel 2.1	Penggolongan roda kereta api.....	8
Tabel 2.2	Komposisi kimia roda kereta api.....	9
Tabel 2.3	Pengaruh frekuensi terhadap kedalaman pengerasan.....	20
Tabel 2.4	Perbandingan <i>induction</i> dan <i>flame hardening</i> .....	24
Tabel 3.1	Komposisi roda kimia bekas .....	34
Tabel 4.1	Komposisi kimia hasil pengecoran .....	36
Tabel 4.2	Kekuatan tarik dan kekerasan hasil pengecoran .....	37
Tabel 4.3	Kekuatan tarik dan kekerasan hasil pengecoran dan <i>normalizing</i> .....	38
Tabel 4.4	Kekerasan hasil proses <i>flame hardening</i> .....	39
Tabel 4.5	Kekerasan dengan variasi temperatur <i>tempering</i> .....	42
Tabel 4.6	Distribusi kekerasan rata-rata hasil proses <i>flame hardening</i> dengan variasi waktu penahanan.....	52
Tabel 4.7	Distribusi kekerasan rata-rata hasil proses <i>tempering</i> .....	54



## DAFTAR LAMPIRAN

Hasil pengujian komposisi kimia roda kereta api bekas.....	60
Hasil pengujian komposisi kimia hasil proses pengecoran.....	61
Hasil pengujian kekuatan tarik spesimen hasil proses pengecoran.....	62
Hasil pengujian kekuatan tarik spesimen hasil proses normalizing.....	63
Hasil pengujian kekerasan spesimen hasil hasil proses pengecoran .....	64
Hasil pengujian kekerasan spesimen hasil proses normalizing .....	65
Hasil pengujian kekerasan spesimen hasil flame hardening.....	66
Hasil pengujian kekerasan spesimen hasil tempering.....	67
Hasil distribusi kekerasan spesimen hasil flame hardening.....	68
Hasil distribusi kekerasan spesimen hasil tempering.....	69



## SINGKATAN DAN ISTILAH

BCC	<i>Body Centered Cubic</i>
BCT	<i>Body Centered Tetragonal</i>
CCR	<i>Critical Cooling Rate</i>
CCT	<i>Continuous Cooling Transformation</i>
FCC	<i>Face Centered Cubic</i>
HRC	<i>Hardness Rockwell Cone</i>
Ms	<i>Martensite Start</i>
Mf	<i>Martensite Finish</i>
<i>Bogie</i>	Bagian dari kereta api yang berfungsi sebagai dudukan lokomotif, kereta dan gerbong yang ditopang oleh roda kereta
<i>Hardening</i>	Proses perlakuan panas yang dilakukan dengan memanaskan material sampai temperatur austenisasi, ditahan pada temperatur tersebut selama beberapa saat dan dilanjutkan dengan pendinginan cepat ( <i>quenching</i> )
<i>Normalizing</i>	Proses perlakuan panas yang dilakukan dengan memanaskan material sampai temperatur austenisasi, ditahan pada temperatur tersebut selama beberapa saat dan dilanjutkan dengan pendinginan udara
<i>Tempering</i>	Proses perlakuan panas yang dilakukan dengan memanaskan material di bawah temperatur austenisasi, ditahan pada temperatur tersebut selama beberapa saat dan dilanjutkan dengan pendinginan udara
<i>Temp. austenisasi</i>	Temperatur dimana terjadi transformasi dari fasa sebelumnya ke fasa martensit.

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Kereta api merupakan sebagai salah satu moda transportasi yang memiliki karakteristik dan keunggulan khusus, terutama dalam kemampuannya untuk mengangkut, baik orang maupun barang secara massal, menghemat energi, menghemat penggunaan ruang, mempunyai faktor keamanan yang tinggi, memiliki tingkat pencemaran yang rendah, serta lebih efisien dibandingkan dengan moda transportasi jalan untuk angkutan jarak jauh dan untuk daerah yang padat lalu lintasnya seperti angkutan perkotaan (UU RI No. 23, 2007).

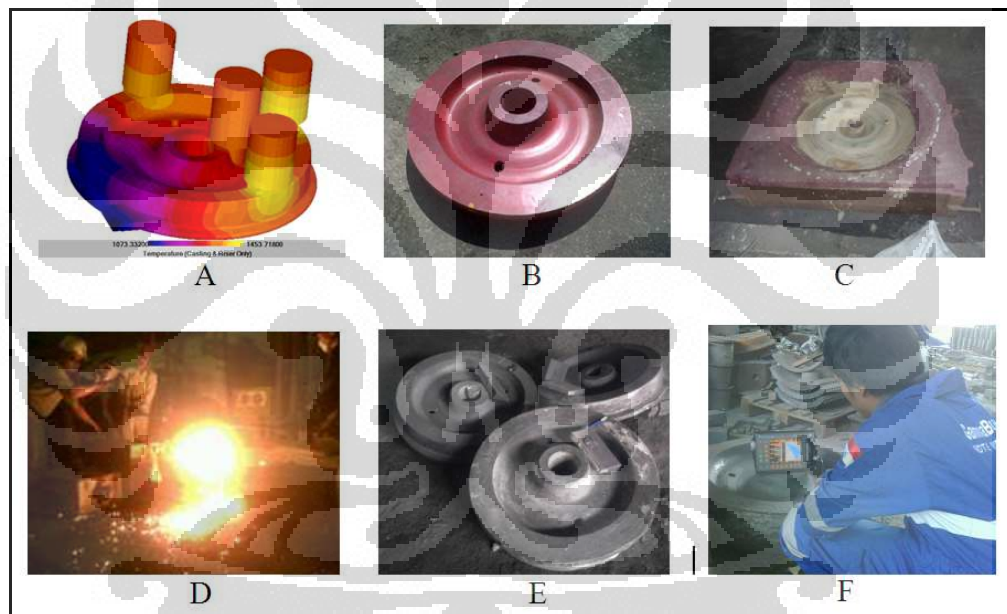
Untuk mendukung operasional kereta api tersebut diperlukan dukungan penyediaan komponen yang berkesinambungan. Komponen tersebut sebagian sudah bisa dipenuhi secara lokal dan sebagian lagi masih harus impor. Salah satu komponen yang sampai saat ini sepenuhnya masih impor adalah roda kereta api yang diimpor dari Rumania, Chekoslovakia dan China. Kebutuhan roda kereta api per tahunnya sekitar 5910 keping untuk penggantian roda yang sifatnya periodik seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.1 (Hartono, 2011).

Tabel 1.1. Kebutuhan roda kereta api per tahun

No.	Jenis Roda	Penggunaan	Kebutuhan per Tahun
1.	Golongan O	Lokomotif DE/GM	200 keping
2.	Golongan L	Lokomotif DE/GE	750 keping
3.	Golongan L	Lokomotif DH	80 keping
4.	Golongan DD	Gerbong KKBW 50 Ton	2000 keping
5.	Golongan HH	KRL	500 keping
6.	Golongan HH	KRD	80 keping
7.	Golongan CC	Kereta & gerbong	2200 keping
8.	Golongan P	Kereta bogie K9	100 keping
<b>Jumlah</b>			<b>5910 keping</b>

[Sumber: Hartono, 2011]

Dalam rangka untuk mengurangi ketergantungan impor, telah dilakukan usaha pembuatan roda kereta api di dalam negeri melalui proses pengecoran dengan menggunakan bahan baku dari roda kereta api bekas. Roda kereta api bekas berasal dari roda kereta yang sudah tidak bisa digunakan lagi. Jenis roda kereta yang diteliti adalah roda kereta yang paling banyak kebutuhannya di Indonesia yaitu roda golongan CC. Pembuatan roda dilakukan dengan teknik pengecoran gravitasi (*gravity casting*) dengan menggunakan cetakan pasir (*sand casting*). Proses tersebut dimulai dengan pembuatan desain roda, simulasi proses pengecoran, pembuatan pola, pembuatan cetakan pasir, proses pengecoran, evaluasi hasil pengecoran dan proses perlakuan panas *normalizing* seperti ditunjukkan pada Gambar 1.1.



Keterangan: A = Simulasi pengecoran logam  
 B = Pola cetakan  
 C = Cetakan pasir  
 D = Proses pengecoran  
 E = Roda hasil pengecoran  
 F = Evaluasi kualitas hasil pengecoran dengan UT

Gambar 1.1. Proses pengecoran roda kereta api

Kekuatan tarik dan kekerasan bagian dalam dari roda kereta api yang dihasilkan sudah memenuhi standar. Akan tetapi kekerasan bagian permukaan roda yang berkisar antara 14-25 HRC masih di bawah standar yaitu 34-37 HRC, sehingga perlu dilakukan proses pengerasan permukaan (Budiyanto, 2011).



## 1.2. Perumusan Masalah

Perumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh proses perlakuan panas terhadap sifat mekanik dan struktur mikro roda kereta api buatan lokal?
2. Bagaimana pengaruh waktu penahanan (*holding time*) terhadap kedalaman pengerasan (*depth of hardening*) pada proses *flame hardening*?

## 1.3. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Mengetahui pengaruh proses perlakuan panas terhadap sifat mekanik dan struktur mikro roda kereta api buatan lokal.
2. Mengetahui pengaruh waktu penahanan terhadap kedalaman pengerasan pada proses *flame hardening*.
3. Mendapatkan parameter proses perlakuan panas yang tepat agar dihasilkan sifat mekanik roda kereta api yang sesuai dengan standar.

## 1.4. Hipotesa Penelitian

Hipotesa penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Proses perlakuan panas akan menyebabkan terjadinya perubahan fasa sehingga akan mempengaruhi sifat mekanik dan struktur mikro roda kereta api buatan lokal.
2. Waktu penahanan akan mempengaruhi distribusi temperatur austenisasi pada material sehingga akan menghasilkan kedalaman pengerasan yang berbeda setelah proses *flame hardening*.

## 1.5. Manfaat Penelitian

1. Keberhasilan pembuatan roda kereta api di dalam negeri yang sesuai dengan standar akan mengurangi ketergantungan terhadap impor roda kereta api sehingga akan menghemat devisa, meningkatkan kemandirian dan daya saing bangsa.
2. Keberhasilan kegiatan ini juga ikut menjadi bagian dari salah satu solusi pemecahan masalah transportasi yang ada di Indonesia.

### 1.6. Batasan Penelitian

1. Pada penelitian ini jenis roda kereta api yang diteliti adalah roda kereta api golongan CC.
2. Proses pengecoran dilakukan dengan teknik pengecoran gravitasi (*gravity casting*) dengan menggunakan cetakan pasir (*sand casting*).
3. Pengerasan permukaan dilakukan dengan menggunakan *flame hardening* dengan media *quenching* air.
4. Sifat mekanik yang diteliti adalah sifat mekanik yang dipersyaratkan oleh PT. Kereta Api Indonesian yaitu kekerasan dan kekuatan tarik. Namun demikian untuk memperdalam analisis akan dilakukan juga analisis struktur mikro.

### 1.7. Sistematika Penelitian

Sistematika dalam penulisan tesis ini adalah sebagai berikut

#### Bab 1 Pendahuluan

Pada bab ini disampaikan latar belakang penelitian, perumusan masalah, tujuan penelitian, hipotesa penelitian, manfaat penelitian, batasan penelitian dan sistematika penulisan.

#### Bab 2 Tinjauan Literatur

Pada bab ini disampaikan kajian pustaka mengenai kereta api, roda kereta api, perlakuan panas dan perlakuan panas permukaan

#### Bab 3 Metode Penelitian

Pada bab ini dijelaskan alur penelitian, proses pembuatan dan pengujian spesimen

#### Bab 4 Hasil dan Pembahasan

Pada bab ini disampaikan hasil-hasil pengujian, analisa serta pembahasannya.

#### Bab 5 Kesimpulan dan Saran

Pada bab ini disampaikan ringkasan hasil penelitian yang dikaitkan dengan tujuan penelitian yang ingin dicapai.

## **BAB 2**

### **TINJAUAN LITERATUR**

#### **2.1. Kereta Api**

##### **2.1.1. Pengertian Kereta Api**

Kereta api adalah sarana perkeretaapian dengan tenaga gerak, baik berjalan sendiri maupun dirangkaikan dengan sarana perkeretaapian lainnya, yang akan ataupun sedang bergerak di jalan rel yang terkait dengan perjalanan kereta api. Sarana perkeretaapian menurut jenisnya terdiri dari lokomotif, kereta, gerbong dan peralatan khusus. Yang dimaksud dengan lokomotif adalah sarana perkeretaapian yang memiliki penggerak sendiri yang bergerak dan digunakan untuk menarik dan/atau mendorong kereta, gerbong, dan/atau peralatan khusus. Kereta adalah sarana perkeretaapian yang ditarik lokomotif atau mempunyai penggerak sendiri yang digunakan untuk mengangkut orang. Gerbong adalah sarana perkeretaapian yang ditarik lokomotif digunakan untuk mengangkut barang, antara lain gerbong datar, gerbong tertutup, gerbong terbuka, dan gerbong tangki. Peralatan khusus adalah sarana perkeretaapian yang tidak digunakan untuk angkutan penumpang atau barang, tetapi untuk keperluan khusus, antara lain kereta inspeksi (lori), gerbong penolong, derek (crane), kereta ukur dan kereta pemeliharaan jalan rel (UU. No. 23, 2007).

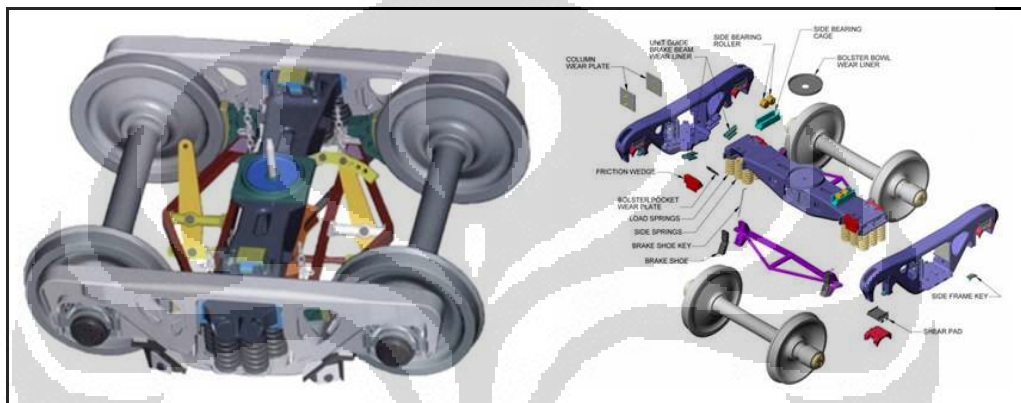
##### **2.1.2. Jenis Kereta Api**

Kereta api dibedakan atas dasar kecepatan, tenaga penggerak, jenis rel dan posisinya terhadap tanah. Berdasarkan kecepatannya kereta api dibedakan menjadi kereta api kecepatan normal (kurang dari 200 km/jam) dan kereta api kecepatan tinggi (lebih dari 200 km/jam). Berdasarkan tenaga penggeraknya kereta api dibedakan menjadi kereta api uap, diesel dan listrik. Berdasarkan jenis relnya kereta api dibedakan menjadi kereta api rel konvensional dan kereta api monorel. Berdasarkan posisinya terhadap tanah kereta api dibedakan menjadi kereta api permukaan dan kereta api bawah tanah (Esveld, 2001).

## 2.2. Roda Kereta Api

### 2.2.1. Perangkat Roda Kereta Api (*Wheel Set*)

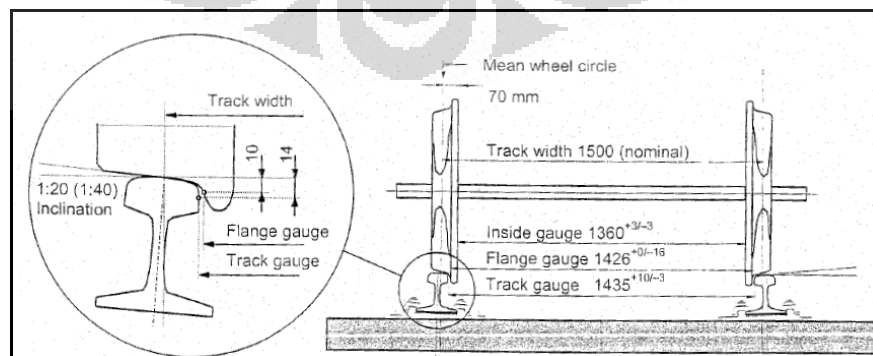
Perangkat roda kereta api terpasang pada bogie dimana biasanya pada satu bogie memiliki dua pasang roda (dua gandar) sehingga pada masing-masing bogie terdiri dari empat buah roda. Sementara itu sebuah gerbong biasanya terdiri dari dua buah bogie sehingga jumlah total roda pada sebuah gerbong adalah delapan keping (Subyanto, 1977).



[Sumber: Esveld, 2001]

Gambar 2.1. Bogie dan roda kereta api

Rel dan roda merupakan pasangan yang sangat menentukan dan menjadi ciri khas keunggulan dari kendaraan jalan rel. Sebuah kendaraan jalan rel pada dasarnya terdiri atas sebuah badan (*body*) yang ditopang oleh bogie dengan seperangkat roda seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2. (Esveld, 2001)

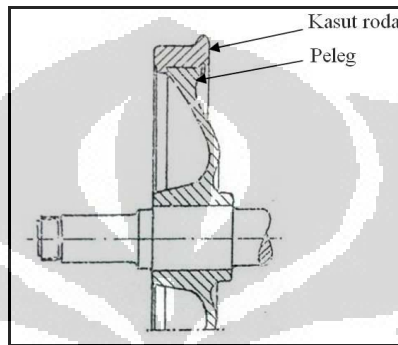


[Sumber: Esveld, 2001]

Gambar 2.2. Perangkat roda kereta api

### 2.2.2. Jenis Roda Kereta Api

Roda kereta api ada dua macam yaitu roda kereta kasut (bandasi/bandase) dan roda kereta monoblok (solid). Roda kasut seperti tampak pada Gambar 2.3 terdiri dari dua bagian yaitu peleg dan ban baja yang dinamakan kasut roda. Pemasangan kasut roda dengan peleg dilakukan dengan proses penekanan pada temperatur tertentu. Jika terjadi keausan pada roda jenis ini, maka yang diganti cukup kasut rodanya saja (Darmawan, 2001).

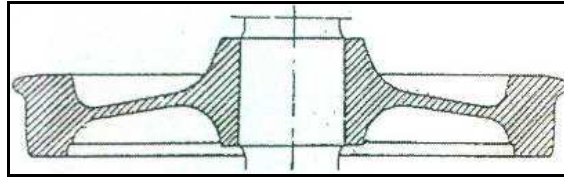


[Sumber: Darmawan, 2001]

Gambar 2.3. Roda kasut (Darmawan, 2001)

Pada perkembangannya penggunaan roda kasut diketahui mengandung resiko yang cukup tinggi karena bisa terjadi hubungan yang longgar antara kasut roda dan peleg yang bisa menyebabkan terlepasnya kasut roda dari peleg. Kelonggaran ini bisa terjadi karena adanya pemuaian kasut roda sebagai akibat dari adanya panas yang terjadi ketika ada gesekan antara roda dengan rel dan juga antara roda dengan rem blok pada saat proses pengereman. Ketika roda kereta api jenis ini dipakai, roda tersebut harus sesering mungkin diperiksa untuk memastikan ada atau tidak ada kelonggaran tersebut. Roda jenis ini banyak dipakai ketika kecepatan kereta api masih di bawah 50 km/jam.

Seiring perkembangan teknologi kereta api, kecepatan kereta api semakin tinggi lebih dari 50 km/jam. Kecepatan kereta api yang semakin tinggi tersebut mengakibatkan resiko terlepasnya kasut roda dari peleg juga semakin tinggi. Oleh karena itu pada saat ini roda kereta api yang banyak digunakan adalah roda kereta jenis monoblok. Roda kereta jenis ini tidak mempunyai bagian-bagian yang terpisah seperti pada jenis roda kasut, tetapi merupakan produk *solid* seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4.



[Sumber: Darmawan, 2001]

Gambar 2.4. Roda monoblok

Berdasarkan diameter dan penggunaannya roda kereta api dikelompokkan menjadi beberapa golongan seperti pada Tabel 2.1.

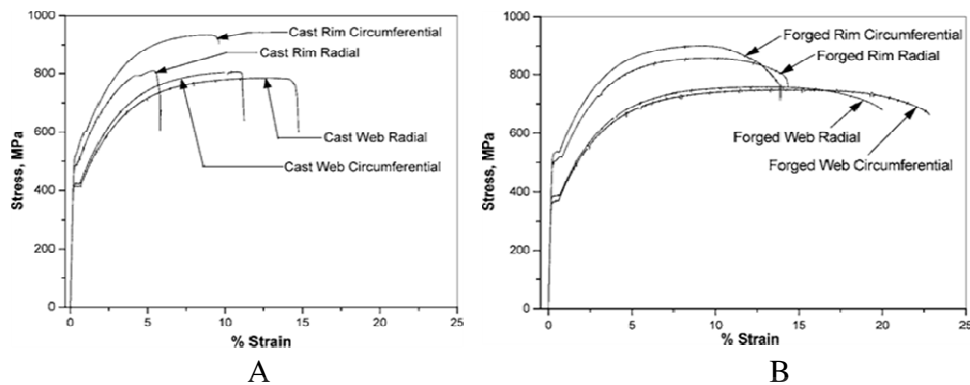
Tabel 2.1. Penggolongan roda kereta api

No.	Jenis Roda	Diameter (mm)	Penggunaan
1.	Golongan O	1.016	Lokomotif DE/GM
2.	Golongan L	914	Lokomotif DE/GE, DH
3.	Golongan DD	850	Gerbong KKBW 50 ton
4.	Golongan HH	860	KRL/KRD
5.	Golongan CC	774	Kereta & gerbong
6.	Golongan P	860	Kereta bogie K9

[Sumber: Hartono, 2011]

### 2.2.3. Teknik Pembuatan Roda Kereta Api

Roda kereta api dapat diproduksi dengan teknik pengecoran maupun dengan teknik penempaan ( JIS E 5402:1998, ASTM A 583:1999). Kedua teknik pembuatan roda kereta api ini sudah banyak diterapkan di industri roda kereta api di seluruh dunia. Berbagai macam penelitian juga sudah dilakukan untuk mengetahui karakteristik dari roda kereta api yang dibuat melalui proses pengecoran dan penempaan tersebut. Salah satu sifat mekanik yang dibandingkan adalah kekuatan tarik roda hasil proses pengecoran dan penempaan seperti terlihat pada Gambar 2.5.



Keterangan: A = Diagram tegangan – regangan roda kereta hasil proses pengecoran  
B = Diagram tegangan – regangan roda kereta hasil proses penempaan

[Sumber: Tarafder, Sivaprasad & Ranganath, 2007]

Gambar 2.5. Diagram tegangan – regangan roda hasil penempaan dan pengecoran

#### 2.2.4. Keausan roda kereta api

Keausan roda kereta api terjadi karena adanya kontak antara roda dengan rel kereta api. Keausan pada telapak roda kereta api yang diijinkan maksimal 8 mm dan setelah mencapai batas keausan tersebut maka roda kereta api tersebut harus ditambal dan dibubut ulang (*reprofilering*) sesuai profil roda kereta api baru atau diganti dengan roda yang baru (Darmawan, 2011). Proses penambalan roda kereta yang aus dianggap tidak ekonomis dan pada beberapa kasus terjadi kualitas penambalan roda tidak bagus dimana ada bagian tambalan roda yang lepas. Lepasnya tambalan roda ini dapat memicu terjadinya kecelakaan. Oleh karena itu untuk alasan keamanan, penggantian roda kereta yang aus dengan dengan roda yang baru lebih direkomendasikan (KNKT, 2007).

#### 2.2.5. Material Roda Kereta Api

Roda kereta api golongan CC dibuat dari baja karbon dengan komposisi kimia seperti tercantum pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Komposisi kimia roda kereta api golongan CC.

	Komposisi Kimia				
	C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	S (%)
<b>Standar</b>	0.55-0.65	0.50-0.90	0.15-0.35	maks 0.05	maks 0.05

[Sumber: JIS E 5402-1, 1998]

Dari Tabel 2.2. tersebut diketahui bahwa roda kereta api golongan CC terbuat dari baja karbon menengah sampai karbon tinggi. Masing-masing golongan/jenis roda kereta api mempunyai komposisi yang berbeda-beda, tergantung aplikasi dari tipe roda tersebut. Pada umumnya roda kereta api terbuat dari baja karbon menengah dan karbon tinggi dengan struktur mikro ferit-perlit (Zang, 2008). Disamping itu juga dikembangkan jenis material yang lain yaitu *low carbon bainitic-martensitic* (Constable, 2006). Perkembangan selanjutnya dalam rangka meningkatkan ketahanan aus roda kereta api banyak digunakan jenis baja martensitik. Baja martensitik terbukti secara signifikan mampu memperbaiki ketahanan aus dari roda kereta api (Lingamanik, 2011).

### 2.3. **Perlakuan Panas (*Heat Treatment*)**

Sifat mekanik tidak hanya tergantung pada komposisi kimia suatu paduan, tetapi juga tergantung pada struktur mikronya. Suatu paduan dengan komposisi kimia yang sama dapat memiliki struktur mikro yang berbeda sehingga sifat mekaniknya juga akan berbeda. Struktur mikro tergantung pada proses pengerjaan yang dialami, terutama proses perlakuan panas yang diterima selama proses pengerjaan. Proses perlakuan panas adalah kombinasi dari operasi pemanasan dan pendinginan dengan kecepatan tertentu yang dilakukan terhadap logam atau paduan dalam keadaan padat, untuk memperoleh sifat-sifat tertentu (ASM Metals Handbook, 1991).

Roda kereta api yang dihasilkan melalui proses pengecoran memerlukan proses perlakuan panas agar diperoleh sifat mekanik yang sesuai dengan yang dipersyaratkan. Perlakuan panas pada roda kereta api yang dihasilkan dengan proses pengecoran tersebut biasanya terdiri dari *normalizing*, *surface hardening* dan *tempering* (Poschmann, 2009). Parameter proses dari masing-masing tahap perlakuan panas yang optimal untuk masing-masing jenis roda kereta berbeda-beda tergantung pada komposisi kimia dan sifat mekanis yang diinginkan. Oleh karena itu setiap jenis roda kereta mempunyai standar parameter proses perlakuan panas masing-masing (Wang, 2009).



Secara umum proses perlakuan panas diklasifikasikan menjadi dua jenis yaitu perlakuan panas yang mendekati kesetimbangan (*near equilibrium*) dan perlakuan panas yang tidak setimbang (*non equilibrium*). Perlakuan panas jenis *near equilibrium* secara umum bertujuan untuk untuk melunakkan struktur kristal, menghaluskan butir, menghilangkan tegangan dalam dan memperbaiki *machineability*. Jenis dari perlakuan ini misalnya *full annealing*, *stress relief annealing*, *spheroidizing annealing* dan *normalizing*. Perlakuan panas jenis *non equilibrium* secara umum bertujuan untuk mendapatkan kekerasan dan kekuatan yang lebih tinggi. Jenis perlakuan ini misalnya *hardening*, *martempering*, *austempering* dan *surface hardening* (Krauss, 1990)

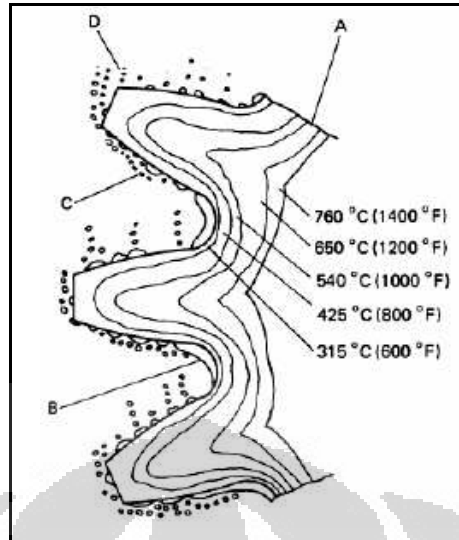
### 2.3.1. Mekanisme Pendinginan Cepat (*Quenching*)

Dalam proses pendinginan cepat, baja mengalami pendinginan cepat dari temperatur tinggi yang umumnya dilakukan dengan mencelupkan kedalam air atau minyak. Sebagai hasilnya diperoleh produk yang memiliki mikrostruktur yang dikeraskan (*as-quenched*) pada daerah kritis dan sifat mekanis yang memenuhi spesifikasi setelah proses *temper*. Keefektifan *quenching* tergantung pada sifat pendinginan dari media *quench* dan juga kemampukerasan dari baja.

Beberapa faktor yang terlibat dalam mekanisme pendinginan cepat, yaitu (Smith, J.L., Russel, G.M., & Bhatia, S.C, 2009):

- a). Kondisi internal bahan yang mempengaruhi proses perpindahan panas
- b). Kondisi permukaan yang mempengaruhi pelepasan panas
- c). Kemampuan penyerapan panas dari media *quench* dalam kondisi fluida tak mengalir pada temperatur dan tekanan fluida normal (kondisi standar)
- d). Perubahan kemampuan penyerapan panas dari fluida yang disebabkan oleh kondisi non-standar dari agitasi, temperatur, dan tekanan.

Faktor-faktor ini diilustrasikan pada Gambar 2.6 untuk kasus pendinginan cepat pada roda gigi dalam cairan tak mengalir (tanpa agitasi) yang mudah menguap (*volatile*).



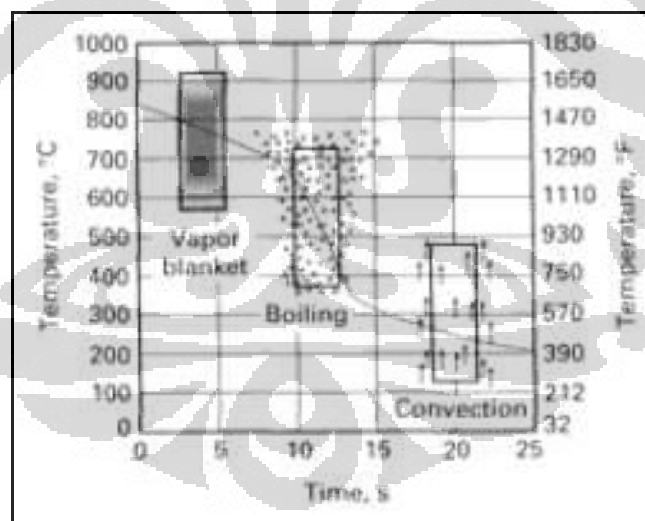
[Sumber: ASM Metals Handbook, 1991]

Gambar 2.6. Gradien temperatur dan faktor utama lain yang mempengaruhi pendinginan cepat (*quench*) dari sebuah roda gigi

Poin A pada Gambar 2.6 memperlihatkan bagaimana konfigurasi roda gigi yang tidak beraturan mempengaruhi aliran panas dari bagian dalam roda gigi ke daerah yang mengalami pendinginan cepat. Perlu diperhatikan bahwa temperatur tinggi tetap tertahan dekat permukaan di dasar gigi dimana terdapat sebagian besar gelembung uap yang terperangkap. Jika roda gigi ini dipanaskan secara induksi atau menggunakan *flame* (sehingga terbentuk lapisan-lapisan panas yang seragam dan tipis mengikuti kontur roda gigi yang tak beraturan), suplai panas ke daerah *quench* akan lebih konsisten, dan *quench* akan berlangsung lebih cepat karena panas juga akan mengalir secara simultan ke logam yang mendingin yang melapisi bagian luar. Media *quench* yang tidak mengalir mengalami pergerakan-pergerakan yang tak dapat dihindari sebagai akibat dari pencelupan, turbulensi dari pendidihan, dan arus-arus konveksi. Agitasi minimum ini secara bertahap akan mendisipasi panas yang terakumulasi ke seluruh bagian cairan, tetapi sebagian volume cairan yang berada dekat dengan sumber panas akan mengalami peningkatan panas, atau bahkan akan menguap, dan ini akan mempengaruhi proses pendinginan cepat. Media *quench* yang *volatile* menghasilkan uap pada hampir setiap temperatur operasi.

Di atas titik didih, suplai uap meningkat banyak sehingga terbentuk selimut uap (*vapor blanket*) di sekitar permukaan benda kerja. Lapisan gas ini dipertahankan oleh panas yang diradiasikan selama sumber panas itu tersedia (poin B). Pada temperatur lebih rendah, uap menjadi gelembung-gelembung, yang berukuran bervariasi tergantung pada hubungan tegangan permukaan antara cairan, gas, dan padatan. Gelembung yang terbentuk bisa berukuran kecil, berjumlah banyak, dan mudah lepas (poin D), ataupun berukuran besar, mudah melekat, dan dalam jumlah sedikit (poin C). Untuk jenis cairan yang *volatile*, mekanika terperangkapnya gelembung uap (poin C) akan sangat memperlambat transfer panas pada lokasi terjadinya gelembung uap tersebut.

Untuk menggambarkan mekanisme pendinginan cepat digunakan suatu kurva pendinginan yang dibuat berdasarkan pengujian pada kondisi aktual. Perubahan temperatur diukur dengan menggunakan satu atau lebih *thermocouple* yang dipasangkan pada benda kerja. Hasil kurva waktu terhadap temperatur dapat mengindikasikan karakteristik transfer panas dari media *quench*.



[Sumber: ASM Metals Handbook, 1991]

Gambar 2.7. Kurva pendinginan pada permukaan dan pusat

Pada proses pendinginan cepat terjadi beberapa tahapan seperti pada Gambar 2.7 sebagai berikut:

1). Tahap A: Pembentukan selimut uap (*vapor blanket cooling stage*)

Pada tahap ini terjadi pembentukan selimut uap disekeliling benda kerja. Ini terjadi ketika suplai panas dari permukaan benda kerja mencapai energi yang dibutuhkan untuk pembentukan jumlah uap per unit area maksimum. Pendinginan pada tahap ini berlangsung sangat lambat, karena selimut uap bertindak sebagai isolator dan pendinginan terjadi dengan radiasi melalui lapisan uap tipis (*vapor film*). Tahap ini tidak terjadi pada larutan yang *non-volatile* seperti potasium klorida, lithium klorida, sodium hidroksida atau asam sulfat. Kurva pendinginan untuk larutan ini memulai langsung dengan tahap B.

2). Tahap B: Perpindahan panas (*Boiling cooling stage*)

Dimana terjadi laju transfer panas paling tinggi, berawal ketika temperature di permukaan logam berkurang sebagian dan lapisan uap tipis pecah. Kemudian penidihan cairan *quenching* dan panas terlepas dari logam dengan sangat cepat, sebagian besar sebagai panas penguapan. Titik didih dari media *quench* menentukan akhir dari tahap ini. Ukuran dan bentuk gelembung uap juga sangat penting dalam mengatur durasi dari tahap B, sebagaimana kecepatan pendinginan ditentukan pada tahap ini.

3). Tahap C: Pendinginan lambat (*convection cooling stage*)

Laju pendinginan pada tahap ini berlangsung lebih lambat dibandingkan pada tahap B. Tahap C berawal ketika temperatur di permukaan logam berkurang hingga titik didih dari cairan *quenching*. Di bawah temperatur tersebut, terjadi pendinginan lambat dengan konduksi dan konveksi. Perbedaan temperatur antara titik didih cairan dan temperatur larutan merupakan faktor utama yang mempengaruhi laju transfer panas. Viskositas juga mempengaruhi kecepatan pendinginan pada tahap C.

Kecepatan pendinginan aktual dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain:

1). Agitasi

Agitasi secara eksternal menghasilkan pergerakan media *quench*. Hal ini memiliki pengaruh yang sangat besar pada karakteristik transfer panas dari media *quench*. Proses ini meliputi perusakan awal secara mekanis terhadap selimut uap yang terbentuk pada tahap A dan menghasilkan gelembung uap yang lebih kecil, dan lebih mudah lepas selama berlangsungnya tahap B, sehingga menghasilkan transfer panas yang lebih cepat pada tahap C. Sebagai tambahan, agitasi juga menggantikan cairan yang panas dengan cairan yang dingin.

2). Temperatur Media *Quench*

Temperatur larutan dari media *quench* sangat mempengaruhi kemampuannya untuk menyerap panas. Semakin tinggi temperatur larutan maka semakin rendah temperatur karakteristik (temperatur dimana terbentuk selimut uap total) dan sehingga memperpanjang waktu pada tahap A. Bagaimanapun, titik didih tidak mengalami perubahan. Temperatur larutan yang lebih tinggi dapat menurunkan viskositas dan mempengaruhi ukuran gelembung uap. Jika factor lainnya seimbang, temperatur yang lebih tinggi dapat menurunkan laju transfer panas pada tahap C.

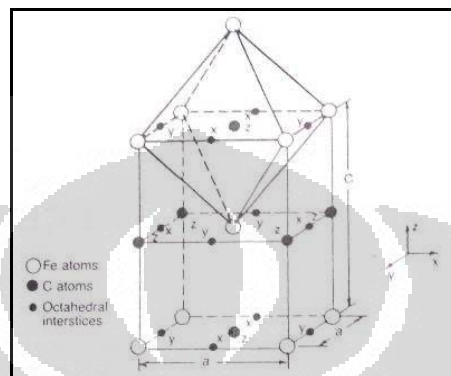
3). Temperatur benda kerja

Peningkatan temperatur benda kerja memiliki pengaruh yang relatif kecil pada kemampuan media *quench* untuk menyerap panas. Laju transfer panas dapat ditingkatkan dengan mudah disebabkan oleh adanya perbedaan temperatur yang sangat tinggi.

### 2.3.2. Pembentukan Martensit

Austenit yang didinginkan dengan cepat misalnya dengan *water quench* tersebut dapat mencapai *Ms* sebelum menjadi struktur yang lain sehingga pada saat itu mulai terbentuk martensit. Pada temperatur yang rendah ini austenit mengalami *driving force* yang sangat besar untuk berubah dari FCC menjadi BCC. Hal ini akan menimbulkan *shear force* terhadap atom-atomnya sehingga menyebabkan atom-atom tersebut sedikit tergeser untuk menuju bentuk BCC. Akan tetapi karena dalam austenit cukup banyak karbon yang terlarut dan belum

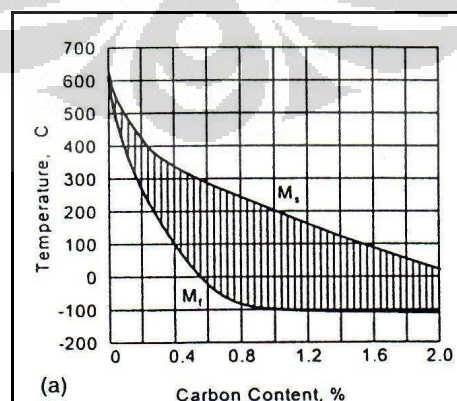
sempat keluar, sedangkan ferit hanya mampu melarutkan karbon dalam jumlah yang sangat kecil, maka karbon yang seharusnya keluar akan terperangkap karena temperatur sudah terlalu rendah sehingga tidak cukup energi untuk berdifusi keluar. Hal ini menyebabkan tidak terjadi BCC tetapi menjadi BCT yaitu martensit seperti ditunjukkan pada Gambar 2.8.



[Sumber: Krauss, 1990]

Gambar 2.8. Struktur BCT

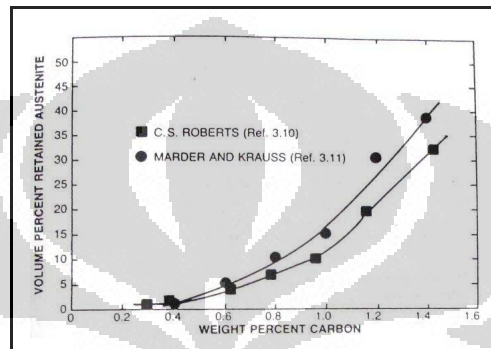
Kekerasan martensit tergantung dari kadar karbon. Semakin tinggi kadar karbon maka kekerasan martensit akan semakin tinggi. Namun demikian, semakin tinggi kadar karbon menyebabkan  $M_s$  dan  $M_f$  semakin turun seperti terlihat pada Gambar 2.9 sehingga pada temperatur kamar akan menghasilkan austenit sisa (*retained austenite*) yang akan mengurangi kekerasan martensit. Austenit sisa disebabkan karena pada saat pendinginan selesai pada temperatur kamar, ada austenit yang belum selesai bertransformasi menjadi martensit.



[Sumber: Panagiotidis, 2007]

Gambar 2.9. Pengaruh kadar karbon terhadap temperatur pembentukan martensit

Prosentase austenit sisa yang terbentuk juga dipengaruhi oleh kadar karbon karena semakin tinggi kadar karbon, maka semakin rendah temperatur  $M_s$  dan  $M_f$  sehingga ketika proses pendinginan berhenti pada temperatur kamar akan semakin banyak terbentuk austenit sisa seperti ditunjukkan pada Gambar 2.10. Untuk mengurangi austenit sisa ini, biasanya dilakukan perlakuan panas di bawah nol (*subzero treatment*) untuk memberikan waktu bagi austenit bertransformasi menjadi martensit.



[Sumber: Panagiotidis, 2007]

Gambar 2.10. Pengaruh kadar karbon terhadap prosentasi austenit sisa

## 2.4. Perlakuan Panas Permukaan (*Surface Hardening*)

Perlakuan panas permukaan (*surface hardening*) adalah suatu proses perlakuan panas untuk mendapatkan kekerasan hanya pada permukaan saja (ASM Metals Handbook, 1991). Beberapa jenis pengerasan permukaan antara lain *carburizing*, *nitriding*, *induction hardening* dan *flame hardening*.

### 2.4.1. Proses *Carburizing*

*Carburizing* adalah proses menambahkan karbon ke permukaan benda, dilakukan dengan memanaskan benda kerja dalam lingkungan yang banyak mengandung karbon aktif, sehingga karbon berdifusi masuk ke permukaan baja (Wahid Suherman, 1998). Pada temperatur *carburizing*, media karbon terurai menjadi CO yang selanjutnya terurai menjadi karbon aktif yang dapat berdifusi masuk ke dalam baja dan menaikkan kadar karbon pada permukaan baja. Berdasarkan bentuk fisik media karburisasi dikenal dengan tiga cara karburisasi yaitu *carburizing* padat (*pack carburizing*), *carburizing* cair (*liquid carburizing*), *carburizing* dengan media gas (*gas carburizing*).

*Carburizing* padat adalah proses karburisasi pada permukaan benda kerja dengan menggunakan karbon yang didapat dari bubuk arang. Bahan karburisasi ini biasanya adalah arang tempurung kelapa, arang kokas, arang kayu, arang kulit atau arang tulang. Benda kerja yang akan diberi perlakuan *carburizing* dimasukkan ke dalam kotak karburisasi yang sebelumnya sudah diisi media karburisasi. Selanjutnya benda kerja ditimbuni dengan bahan karburisasi dan benda kerja lain diletakkan di atasnya demikian. Kandungan karbon dari setiap jenis arang adalah berbeda-beda. Semakin tinggi kandungan karbon dalam arang, maka penetrasi karbon ke permukaan baja akan semakin baik pula. Besarnya kadar karbon yang terlarut dalam baja pada saat baja dalam larutan pada gamma fase austenit selama karburisasi adalah maksimal 2 %. Kotak karburisasi yang dipanaskan harus dalam keadaan tertutup rapat, hal ini bertujuan untuk mencegah terjadinya reaksi antara media karburisasi dengan udara luar. Cara yang biasanya ditempuh untuk menghindari hal tadi adalah dengan memberikan lapisan tanah liat (*clay*) antara tutup dengan kotak karburisasi. Media karburisasi yang digunakan pada proses *carburizing* padat adalah arang tempurung kelapa, arang kayu, arang kokas, arang kulit atau arang tulang. Beberapa jenis dari media karburisasi tadi yang sering digunakan adalah arang kayu jati dan arang tempurung kelapa. Kadar karbon yang terdapat pada media karburisasi sangat mempengaruhi hasil dari proses *carburizing*, karena karbon yang dipanaskan dalam kotak karburisasi akan terurai menjadi CO yang selanjutnya terurai menjadi karbon aktif yang dapat berdifusi masuk ke dalam baja, dan akhirnya akan menaikkan konsentrasi karbon pada permukaan baja. Seperti yang kita ketahui bahwa semakin besar konsentrasi karbon pada permukaan baja maka kekerasannya akan meningkat pula.

*Carburizing* cair adalah proses pengerasan baja dengan cara mencelupkan baja yang telah ditempatkan pada keranjang kawat ke dalam campuran garam cianida, kalsium cianida (KCN), atau natrium cianida (NaCN). Pada proses karburisasi ini selain terserapnya karbon, nitrogen juga ikut terserap. Bahwa karburisasi cair hampir sama dengan *cyaniding*, yang menyerap nitrogen dan karbon. Bedanya terletak pada tingkat perbandingan banyaknya karbon dan nitrogen yang terserap. Pada karburisasi cair penyerapan karbon lebih dominan.



Banyaknya karbon dan nitrogen yang terserap ini tergantung pada kadar cianida dalam *salt bath* dan temperatur kerjanya. *Salt bath* untuk karburisasi cair biasanya mengandung 40 – 50 % garam cianida. Temperatur yang digunakan adalah 900 ° C selama 5 menit, kedalaman penetrasi karbon yang dicapai antara 0,1 – 0,25 mm dari permukaan baja. Kadar karbon yang dikarburisasi akan naik dengan semakin tingginya temperatur dan makin lamanya waktu karburisasi. Bila kadar karbon dipermukaan terlalu tinggi maka kekerasan tidak begitu tinggi, karena itu baja yang akan di quenching langsung setelah pemanasan untuk karburisasi hendaknya dipakai temperatur yang tidak begitu tinggi. Selama pemakaian konsentrasi cianida dalam salt bath dapat berubah sehingga tentu saja sifat salt bath dapat berubah, karena itu kondisi salt bath harus secara rutin diperiksa. Apabila terdapat perubahan yang berarti, harus dilakukan penambahan garam baru untuk menjaga konsentrasi tetap sebagaimana semula. Semua cianida adalah senyawa yang sangat beracun, karena itu pemakaiannya harus sangat hati-hati. Demikian pula pada saat membuang sisa-sisa cairan yang akan terkena garam cianida tersebut harus benar-benar mengikuti petunjuk dari pihak berwenang.

Proses *carburizing* gas dilakukan dengan cara memanaskan baja dalam dapur dengan atmosfer yang banyak mengandung gas CO dan gas hidro karbon yang mudah berdifusi pada temperatur karburisasi 900 ° – 950 ° C selama 3 jam. Gas-gas pada temperatur karburisasi itu akan bereaksi menghasilkan karbon aktif yang nantinya berdifusi ke dalam permukaan baja. Pada proses ini lapisan hypereutectoid yang menghalangi pemasukan karbon dapat dihilangkan dengan memberikan *diffusion period*, yaitu dengan menghentikan pengaliran gas tetapi tetap mempertahankan temperatur pemanasan. Dengan demikian karbon akan berdifusi lebih ke dalam dan kadar karbon pada permukaan akan semakin naik. Carburizing dalam media gas lebih menguntungkan dibanding dengan Carburizing jenis lain karena permukaan benda kerja tetap bersih, hasil lebih banyak dan kandungan karbon pada lapisan permukaan dalam dikontrol lebih teliti. Proses karburisasi dengan media gas biasanya digunakan untuk memperoleh lapisan tipis antara 0,1 – 0,75 mm.

### 2.4.2. Nitriding

*Nitriding* adalah proses pengerasan permukaan, dimana baja dipanaskan sampai sekitar 500 °C– 600 °C di lingkungan gas ammonia selama beberapa waktu. Nitrogen yang diserap baja akan membentuk nitrida yang keras dan tersebar merata pada permukaan baja. Proses nitriding ini hampir sama dengan proses karburisasi. Perbedaannya terdapat pada unsur yang didifusikan pada proses ini adalah nitrida. Nitridanya didapat dari gas NH<sub>3</sub>. Kekerasannya mencapai 800 – 1050 HV (paling tinggi diantara proses lainnya). Pada dasarnya semua baja dapat dinitriding, tetapi hasil yang baik akan diperoleh bila baja mengandung unsure paduan yang membentuk nitride (*nitride forming element*) seperti aluminium, chrom atau molybden.

Benda kerja yang akan dinitriding dimasukkan ke dalam dapur yang kedap udara dan gas ammonia dialirkan secara kontinyu selama pemanasan pada temperature 500 °C– 600 °C. Proses ini berlangsung lama , dapat sampai beberapa hari. Kekerasan yang sangat tinggi ( sampai 70 HRC) langsung terjadi setelah terjadinya nitride, tanpa perlu melakukan quenching. Dengan demikian benda kerja terhindar dari kemungkinan distorsi/retak dan tegangan sisa. Nitrida yang terbentuk sangat stabil , kekerasannya hampir tidak berubah dengan pemanasan, walaupun sampai lebih dari 600 °C (bandingkan dengan martensit yang mulai menjadi lunak pada temperature yang jauh lebih rendah , 200 °C).

Walaupun proses nitriding ini berlangsung lama sekali tetapi tebal kulit yang terjadi tipis sekali. Baja untuk dinitriding biasanya tidak boleh terlalu lunak, 0.3 – 0.4 % C , agar mampu mendukung kulit yang terlalu tipis tadi. Biasanya benda kerja harus sudah selesai dilakukan pemesinan dan ukuran sudah sangat mendekati ukuran akhir, sehingga sesudah dinitriding tidak ada lagi proses machining selain polishing/lapping. Baja yang dinitriding mempunyai sifat tahan aus yang sangat baik, juga sifat terhadap kelelahan menjadi lebih baik, demikian juga sifat tahan korosinya.

### 2.4.3. Induction hardening

Pada *induction hardening* pemanasan ditimbulkan oleh arus induksi yang terjadi karena adanya medan magnit yang berubah-ubah dengan sangat cepat. Dari

teori kelistrikan diketahui bahwa disekitar konduktor yang dialiri arus listrik akan timbul medan magnet yang besar dan arahnya tergantung pada besar dan arah arus yang mengalir. Bila yang mengalir itu arus bolak balik maka tentunya besar dan arah medan magnet yang timbul juga akan selalu berubah, dan medan magnet yang besarnya berubah ini dapat menimbulkan arus listrik, arus induksi yang disebut *eddy current*, pada konduktor yang ferromagnetik. Arus induksi ini akan menimbulkan panas, dan karena arus induksi ini terjadi di permukaan maka panas akan terjadi di permukaan. Panas yang timbul ini akan sangat intens bila arus bolak balik yang menimbulkan induksi ini adalah arus bolak balik dengan frekuensi tinggi.

Untuk menimbulkan pemanasan pada permukaan suatu benda kerja maka benda kerja diletakkan di dekat koil yang dialiri arus bolak balik frekuensi tinggi. Tebal kulit tergantung pada tebalnya permukaan yang mengalami pemanasan sampai ke temperatur austenit sebelum dilakukan proses *quenching*. Hal ini terutama tergantung pada intensitas pemanasan oleh arus induksi yaitu tergantung pada frekuensi arus bolak baliknya dan lamanya pemanasan (karena panas yang timbul di permukaan juga akan merambat ke dalam). Frekuensi yang digunakan pada umumnya tidak melebihi 500.000 Hz. Untuk benda yang tipis digunakan frekuensi yang tinggi, sedangkan untuk benda yang tebal digunakan frekuensi yang rendah seperti terlihat pada Tabel 2.5.

Tabel 2.3. Pengaruh frekuensi terhadap depth of case hardness

FREQUENCY, HZ	THEORETICAL DEPTH OF PENETRATION OF ELECTRICAL ENERGY, IN.	PRACTICAL DEPTH OF CASE HARDNESS, IN.
1,000	0.059	0.180 to 0.350
3,000	0.035	0.150 to 0.200
10,000	0.020	0.100 to 0.150
120,000	0.006	0.060 to 0.100
500,000	0.003	0.040 to 0.080
1,000,000	0.002	~0.010 to 0.030

[Sumber: ASM Metals Handbook, 1991]

#### 2.4.4. *Flame hardening*

*Flame hardening* adalah proses perlakuan panas dimana permukaan baja yang akan dikeraskan dipanaskan dengan nyala api hingga mencapai temperatur austenit dan didinginkan dengan cepat sehingga pada permukaan terbentuk martensit sedangkan pada bagian intinya tetap seperti kondisi semula (ASM Metals Handbook, 1991). Nyala api dengan temperatur tinggi diperoleh dari hasil pembakaran bahan bakar dengan oksigen. Kedalaman kekerasan yang dapat diperoleh dari proses ini berkisar antara 1/32 – 1/4 inci atau dapat lebih tergantung pada jenis bahan bakar yang digunakan, temperatur nyala api maksimum yang dihasilkan bahan bakar, disain pemanas (*flame head*), waktu pemanasan, kemampukerasan material dan metode serta media pendingin (*quenchant*) yang digunakan. Sebagai contoh baja karbon dengan kadar karbon di atas 0.37% dapat dikeraskan sampai ½ inchi (13 mm) (ASM Metals Handbook, 1991).

Beberapa metode pengerasan permukaan dengan flame hardening yang umum digunakan yaitu (ASM Metals Handbook, 1991) :

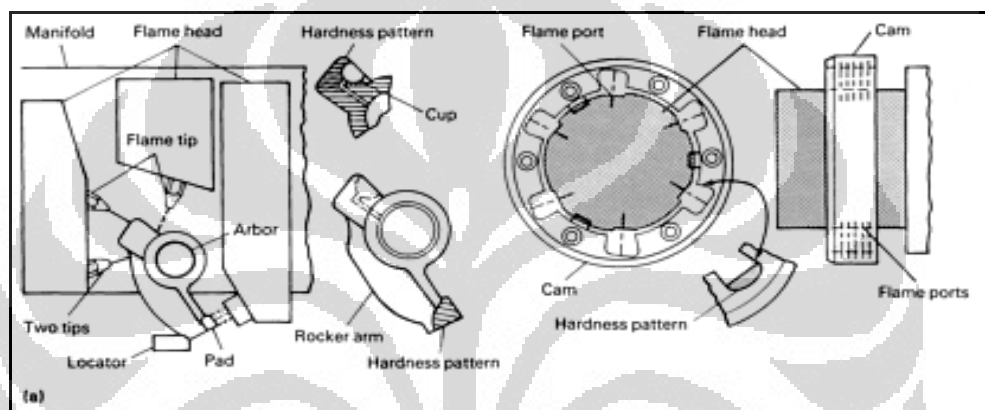
- Metode titik/setempat (*spot method or stationary method*),
- Metode progresif (*progresive method*),
- Metode putar (*spinning method*), dan
- Kombinasi antara metode progresif dan putar.

Pemilihan metode yang digunakan tergantung pada bentuk dan ukuran benda kerja, komposisi material, luas daerah yang akan dikeraskan, kedalaman pengerasan yang diinginkan dan jumlah benda kerja.

#### **Metode Titik (*Stationary/Spot Method*)**

Metode titik terdiri atas pemanasan lokal pada daerah yang telah ditentukan dengan pemanas (*flame head*) yang sesuai dan dilanjutkan dengan pendinginan cepat (*quenching*). Kepala pemanas (*heating head*) dapat digunakan dalam bentuk disain lubang tunggal (*single orifice*) ataupun lubang majemuk (*multiple orifice*), tergantung pada luas daerah yang akan dikeraskan. Masukan

panas yang diterima harus seimbang untuk memperoleh keseragaman temperatur pada keseluruhan daerah tersebut. Setelah proses pemanasan, benda kerja biasanya didinginkan dengan metode *immersion quenching*, ataupun *spray quenching*. Pada dasarnya, metode titik tidak membutuhkan peralatan yang sangat kompleks (kecuali penahan benda kerja dan pencatat waktu yang digunakan untuk menyamakan lamanya proses dari masing-masing benda kerja). Walaupun demikian, pengoperasian dapat dilakukan dengan otomasi antara lain dengan menerapkan *spray quenching* atau *spray bath* yang sesuai.



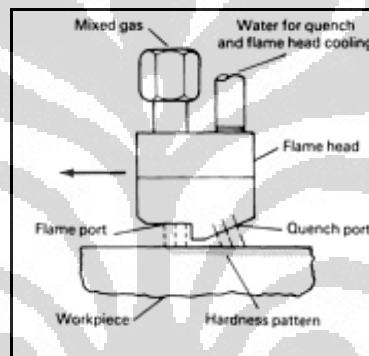
[Sumber: ASM Metals Handbook, 1991]

Gambar 2.11. Metode titik/setempat (*spot method or stationary method*),

### Metode Progresif (*Progressive Method*)

Metode progresif digunakan untuk mengeraskan benda kerja yang memiliki luas daerah pengerasan yang besar, yang diluar kemampuan metode titik. Ukuran dan bentuk benda kerja, sama halnya dengan kebutuhan jumlah oksigen dan bahan bakar gas untuk memanaskan suatu daerah, merupakan factor yang menentukan penggunaan metode ini. Pada metode ini biasanya digunakan jenis *flame head* berlubang majemuk (*multiple-orifice*) dan sistem *quenching* yang terintegrasi ataupun terpisah. Perlengkapan yang dibutuhkan untuk proses *flame hardening* dengan metode progresif terdiri atas satu atau beberapa pemanas (*flame head*) dan sebuah media pendingin (*quench*) yang ditempatkan pada pemegang yang dapat bergerak pada satu jalur dengan kecepatan yang teratur. Benda kerja ditempatkan secara statis sehingga dapat langsung diproses. Secara praktis cara

yang digunakan dapat menentukan bagian mana yang dapat bergerak, baik pemanas ataupun benda kerja. Dengan cara ini tidak ada batas ukuran panjang benda kerja, karena jalur dapat dengan mudah diperpanjang. Laju gerak translasi dari *flame head* pada proses pengerasan progresif akan sangat ditentukan oleh kapasitas panas yang mampu dihasilkan, kedalaman pengerasan yang diinginkan, komposisi dan bentuk benda kerja, dan jenis media pendinginan yang digunakan. Kelajuan traslasi dalam batas 2 - 12 inchi/menit (0.85 - 5.08 mm/detik) umum digunakan untuk pemanas berbahan bakar oksasi-asetilen. Umumnya, air pada temperatur ambien sebagai media pendingin. Dalam keadaan tertentu, air hangat atau air panas, atau larutan air dan minyak (*soluble oil*), juga dapat digunakan.



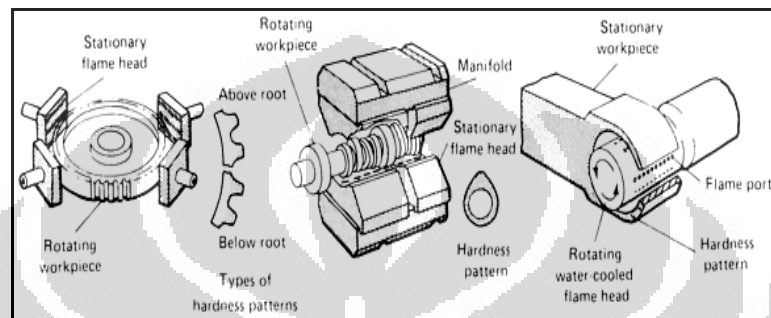
[Sumber: ASM Metals Handbook, 1991]

Gambar 2.12. Metode progresif (*progressive method*),

### Metode Putar (*Spinning Method*)

Metode putar diterapkan untuk benda-benda bundar atau semi bundar seperti roda gigi. Secara sederhana, metode ini menggunakan mekanisme rotasi atau memutar benda kerja, baik secara horizontal ataupun vertikal, selama pemanasan permukaan benda kerja. Laju rotasi relatif tidak penting, sementara itu keseragaman pemanasan dapat dicapai. Setelah permukaan benda kerja dipanaskan hingga temperatur yang diinginkan, benda kerja didinginkan secara *immersion* atau *spray*, atau kombinasi antara keduanya. Berbeda dengan metode progresif, dimana asetilena selalu digunakan (karena nyala api dan laju pemanasan yang tinggi), hasil yang memuaskan dapat dicapai dalam spin

hardening dengan gas alam maupun propana. Pemilihan gas tergantung pada bentuk, ukuran dan komposisi benda kerja, dan pada kedalaman pengerasan yang dibutuhkan, sama halnya dengan harga relatif dan ketersediaan masing-masing gas. Media *quench* yang digunakan bisa sangat beragam. Dalam *spray quenching*, biasanya digunakan air, atau larutan minyak berbasis air (*soluble oil*).

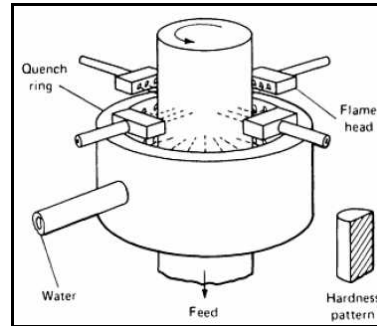


[Sumber: ASM Metals Handbook, 1991]

Gambar 2.13. Metode putar (*spinning method*),

### **Kombinasi Metode Putar-Progresif**

Sesuai dengan namanya maka metode ini merupakan kombinasi antara *progressive* dan *spinning*, digunakan untuk benda kerja yang panjang seperti shaft dan roll. Benda kerja diputar seperti pada metode putar, namun juga kepala pemanas (*heating head*) menyusuri shaft atau roll dari ujung yang satu ke ujung yang lainnya. Hanya sebatas bagian tertentu yang dipanaskan secara progresif, sehingga harus segera diikuti dengan quenching yang berada setelah pemanas (terintegrasi atau terpisah). Metode ini mampu menghasilkan pengerasan untuk permukaan yang sangat luas, menjadi sangat berarti bila dibandingkan dengan aliran gas yang relatif rendah.



[Sumber: ASM Metals Handbook, 1991]

Gambar 2.14. Kombinasi metode putar-progresif

Proses *flame hardening* hampir sama dengan *induction hardening*. Perbedaannya terletak pada sumber panas yang digunakan. Namun demikian hasil kedua proses tersebut menunjukkan karakteristik yang berbeda (J.R. Davis, 2002). Proses *flame hardening* relatif mampu memberikan kedalaman pengerasan yang lebih tinggi dan bisa digunakan untuk benda dalam ukuran yang besar.

Tabel 2.4. Perbandingan *flame hardening* dengan *induction hardening*

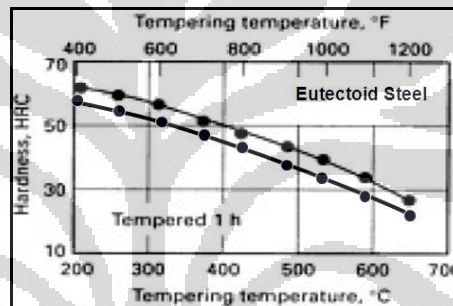
Characteristics	Flame	Induction
Equipment	Oxyfuel torch, special head quench system	Power supply, inductor, quench system
Applicable material	Ferrous alloys, carbon steels, alloy steels, cast irons	Same
Speed of heating	Few seconds to few minutes	1–10 s
Depth of hardening	1.2–6.2 mm (0.050–0.250 in.)	0.4–1.5 mm (0.015–0.060 in.); 0.1 mm (0.004 in.) for impulse
Processing	One part at a time	Same
Part size	No limit	Must fit in coil
Tempering	Required	Same
Can be automated	Yes	Yes
Operator skills	Significant skill required	Little skill required
Control of process	Attention required	Very precise after setup
Operator comfort	Hot, eye protection required	Can be done in suit
Cost		
Equipment	Low	High
Per piece	Best for large work	Best for small work

[Sumber: Smith, J.L., Russel, G.M., & Bhatia, S.C., 2009]



## 2.5. Tempering

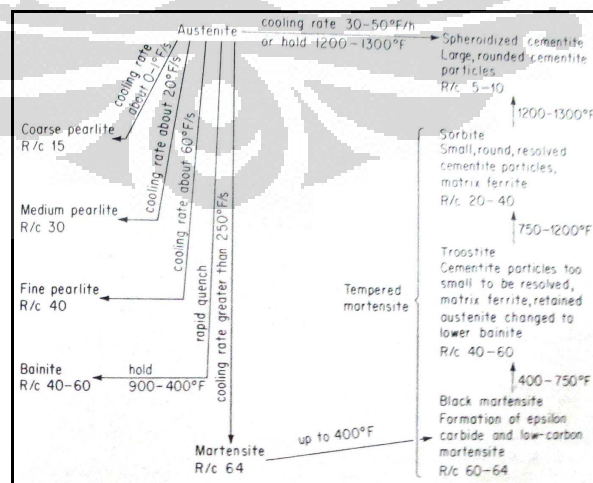
Proses *tempering* dilakukan dengan memanaskan kembali baja yang sudah dikeraskan dengan tujuan untuk memperoleh kombinasi antara kekuatan, keuletan dan ketangguhan yang tinggi. Proses *tempering* ini terdiri dari pemanasan baja sampai di bawah temperatur  $A_1$  dan menahannya pada temperatur tersebut untuk jangka waktu tertentu dan kemudian didinginkan di udara. Proses pemanasan kembali struktur martensit yang merupakan produk dari proses *hardening* akan menghasilkan martensit temper (*tempered martensite*). Pemilihan temperatur tempering didasarkan pada data kekerasan awal hasil dari proses *hardening* dan kekerasan akhir yang diinginkan dengan menggunakan bantuan diagram tempering yang sesuai.



[Sumber: ASM metals handbook, 1991]

Gambar 2.15. Diagram temperatur *tempering* baja dengan komposisi eutektoid

Transformasi yang terjadi selama proses tempering ditunjukkan pada Gambar 4.7 berikut:



[Sumber: Krauss, 1990]

Gambar 2.16. Perubahan fasa yang terjadi pada proses *tempering* baja eutektoid

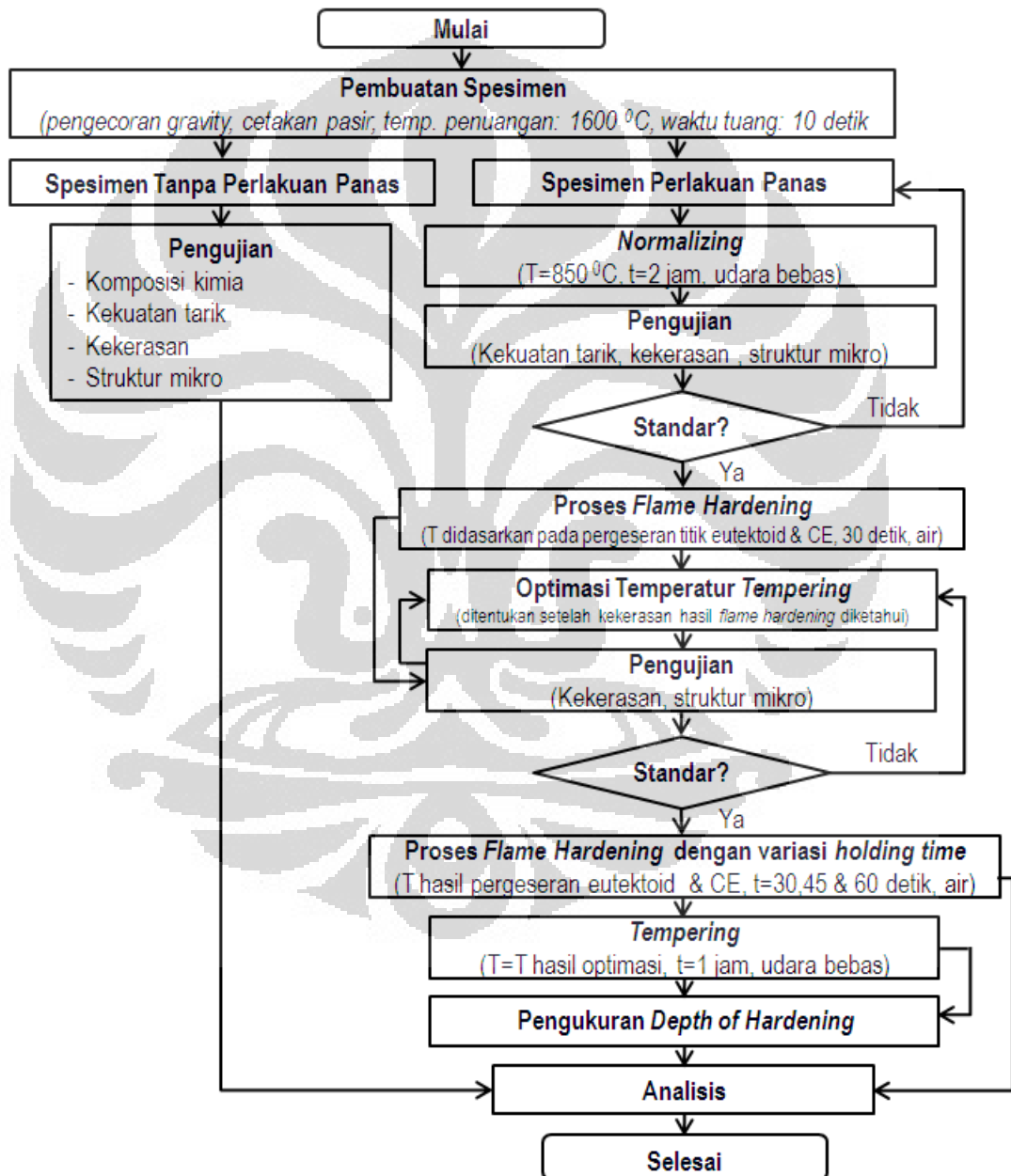
Perubahan fasa yang terjadi selama pemanasan kembali pada fasa martensit tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Pada temperatur antara 80 dan 200 °C, suatu produk transisi yang kaya karbon yang dikenal sebagai karbida, berpresipitasi dari martensit tetragonal sehingga menurunkan tetragonalitas martensit atau bahkan mengubah martensit tetragonal menjadi ferit kubik. Periode ini disebut sebagai proses temper tahap pertama. Karbida yang terbentuk pada periode ini disebut karbida epsilon.
2. Pada temperatur antara 200 dan 300 °C, austenit sisa mengurai menjadi suatu produk seperti bainit. Penampilannya mirip martensit temper. Periode ini disebut sebagai proses temper tahap kedua.
3. Pada temperatur antara 300 dan 400 °C, terjadi pembentukan dan pertumbuhan sementit dari karbida yang berpresipitasi pada tahap pertama dan kedua. Periode ini disebut sebagai proses temper tahap ketiga.
4. Pada temperatur 400 dan 700 °C pertumbuhan terus berlangsung dan disertai dengan proses sperodisasi dari sementit. Pada temperatur yang lebih tinggi lagi, terjadi pembentukan karbida kompleks, pada baja-baja yang mengandung unsur-unsur pembentuk karbida yang kuat. Periode ini disebut sebagai proses temper tahap keempat.

## BAB 3 METODE PENELITIAN

### 3.1. Alur Penelitian

Alur penelitian yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:



Gambar 3.1 Alur penelitian pengaruh proses perlakuan panas terhadap sifat mekanik dan struktur mikro roda kereta api buatan lokal

### 3.2. Prosedur Penelitian

Dari Gambar 3.1 tentang metodologi penelitian dapat dijelaskan lebih detail dalam prosedur penelitian sebagai berikut:

#### 3.2.1. Pembuatan Spesimen

Proses pembuatan spesimen untuk proses *flame hardening* seperti tampak pada Gambar 3.2 dilakukan dengan cara pengecoran gravity (*gravity casting*) dengan menggunakan cetakan pasir (*sand mold*) *pouring temperature* 1600 °C dan *pouring time* 10 detik. Kualitas hasil pengecoran diuji dengan *ultrasonic testing* (UT) untuk memastikan tidak adanya cacat pengecoran.



Gambar 3.2. Proses pengecoran spesimen proses *flame hardening*

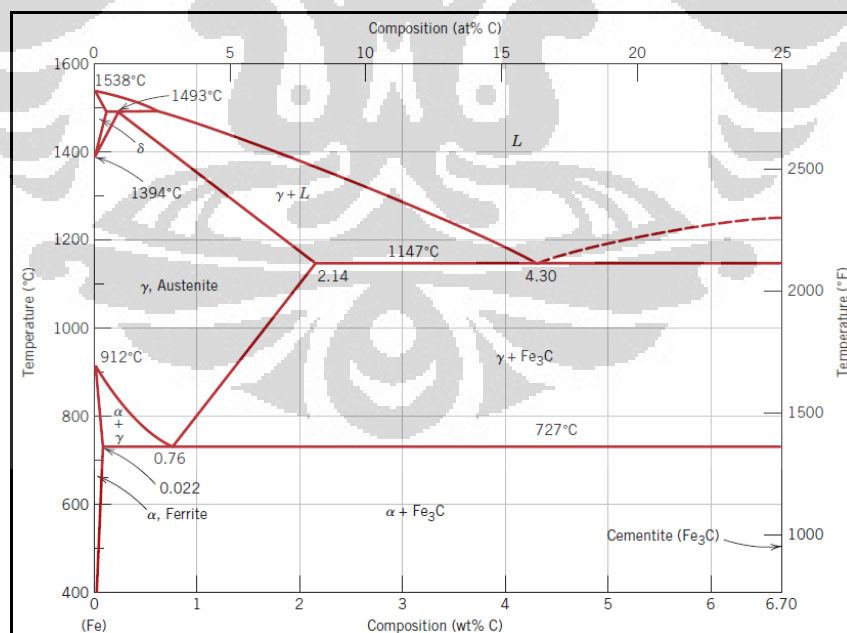
Spesimen yang dibuat ini dikelompokkan menjadi 2 kelompok yaitu untuk perlakuan panas dan tanpa perlakuan panas. Untuk spesimen tanpa perlakuan panas diuji komposisi kimia, kekuatan tarik, kekerasan dan struktur mikronya sebagai bahan pembanding dengan spesimen dengan perlakuan panas. Spesimen untuk uji komposisi kimia, kekuatan tarik, kekerasan dan struktur mikronya dibuat dari potongan sistem saluran (*gating system*) dari spesimen untuk *flame hardening*.

### 3.2.2. Proses Normalizing

Pemilihan parameter proses *normalizing* (temperatur dan waktu penahanan) ditentukan berdasarkan rekomendasi dari hasil optimasi proses *normalizing* terhadap roda kereta api buatan lokal yang sudah dilakukan sebelumnya. Proses *normalizing* yang direkomendasikan dilakukan dengan temperatur austenisasi 850 °C , waktu penahanan (*holding time*) 2 jam dan pendinginan menggunakan udara bebas (Budiyanto, 2011). Hasil dari proses *normalizing* ini selanjutnya diuji kekuatan tarik, kekerasan dan struktur mikronya. Apabila sudah sesuai dengan standar dilanjutkan dengan proses *flame hardening*.

### 3.2.3. Proses Flame Hardening

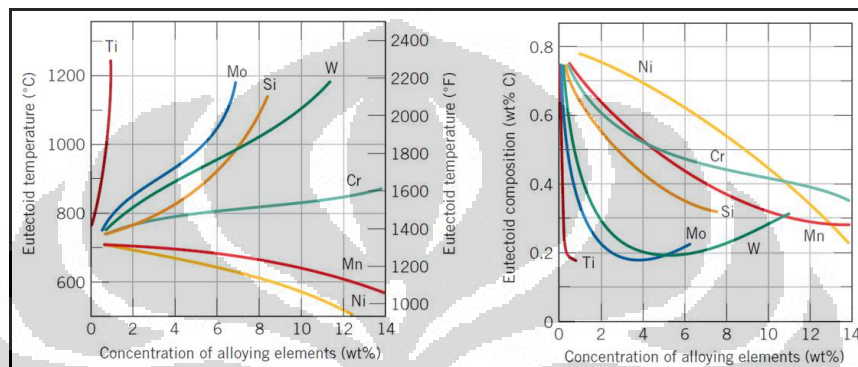
Sebelum dilakukan proses *flame hardening*, terlebih dahulu harus ditentukan temperatur austenisasi yang digunakan. Pemilihan temperatur austenisasi dilakukan dengan menggunakan diagram Fe-Fe<sub>3</sub>C dengan terlebih dahulu melakukan perhitungan pergeseran titik eutektoid akibat pengaruh adanya unsur paduan. Disamping itu juga mempertimbangkan *Carbon Equivalent (CE)* dari material yang digunakan.



[Sumber: Callister, 2007]

Gambar 3.3. Diagram Fe-Fe<sub>3</sub>C (Callister, 2007)

Pada Gambar 3.3 diketahui bahwa titik eutektoid terletak pada titik titik dimana kadar karbonnya 0.76% dan temperatur 727 °C. Titik eutektoid yang demikian hanya berlaku untuk baja dengan komposisi Fe dan C tanpa adanya unsur paduan. Apabila ada unsur paduan dalam baja tersebut, maka titik eutektoid ini akan bergeser yang dikenal dengan istilah pergeseran titik eutektoid. Pergeseran titik eutektoid dapat ditentukan dengan menggunakan bantuan Gambar 3.4 berikut:



Keterangan: A = Pengaruh unsur paduan terhadap temperatur eutektoid  
B = Pengaruh unsur paduan terhadap komposisi eutektoid

[Sumber: Callister, 2007]

Gambar 3.4. Pengaruh unsur paduan terhadap pergeseran titik eutektoid

Perhitungan pergeseran titik eutektoid dapat dihitung dengan menggunakan rumus 3.1 dan 3.2 berikut

$$T_e = \frac{\sum (T_x \times \%C_x)}{\sum \%C_x} \quad (3.1)$$

$$C_e = \frac{\sum (T_x \times \%C_x)}{\sum T_x} \quad (3.2)$$

Dimana:

$T_e$  : Temperatur eutektoid

$C_e$  : Karbon eutektoid

$T_x$  : Temperatur eutektoid karena pengaruh unsur x (°C)

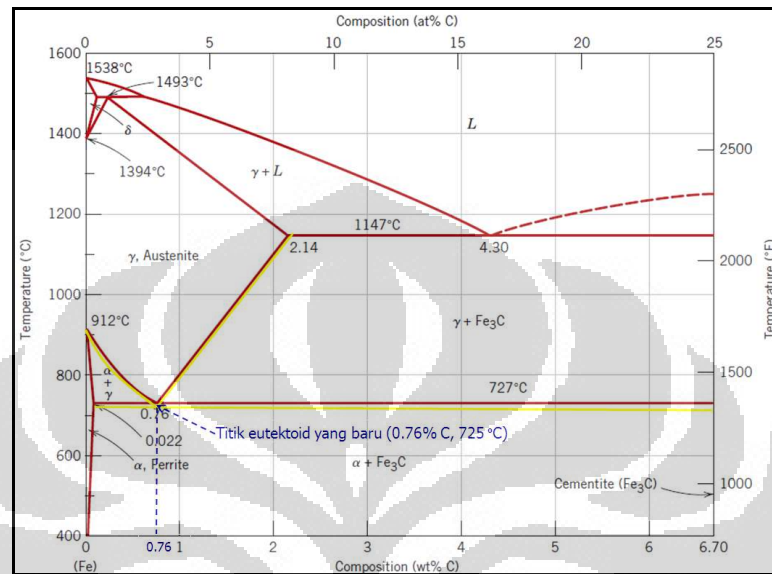
$\%C_x$  : Karbon eutektoid karena pengaruh unsur x (persen berat)

Sehingga didapatkan:

$$T_e = 724.80 \approx 725 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$C_e = 0.76$$

Dari perhitungan tersebut didapatkan titik eutektoid yang baru berada pada temperatur 725 °C dan kadar karbon 0.76. Jadi temperatur eutektoid turun dari 727 °C menjadi 725 °C dan kadar karbon eutektoid tetap pada komposisi 0.76% C. Pergeseran titik eutektoid dapat dilihat pada Gambar 3.5 berikut:



Gambar 3.5. Posisi titik eutektoid setelah mengalami pergeseran

Setelah ditentukan pergeseran titik eutektoidnya, dilakukan perhitungan *Carbon Equivalent* dari bahan yang digunakan dan diplot ke dalam diagram Fe-Fe<sub>3</sub>C yang sudah mengalami pergeseran titik eutektoid tersebut. *Carbon Equivalent* dihitung dengan menggunakan persamaan 3.1 berikut (ASM Handbook, 1991):

$$CE = C + \frac{Mn}{5} + \frac{Mo}{5} + \frac{Cr}{10} + \frac{Ni}{50} \quad (3.1)$$

Dimana:

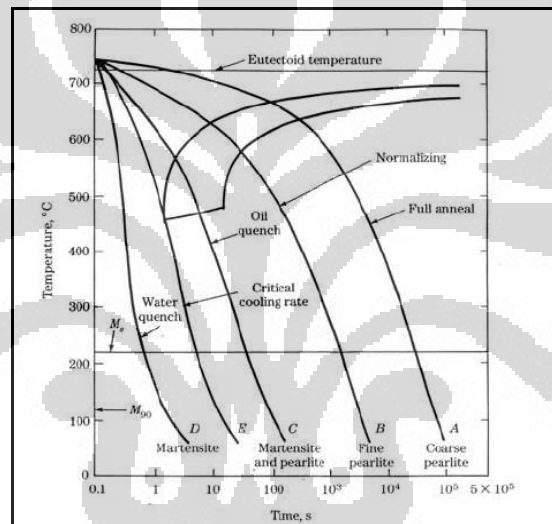
- C : Prosentase unsur C (% berat)
- Mn : Prosentase unsur Mn (% berat)
- Mo : Prosentase unsur Mo (% berat)
- Cr : Prosentase unsur Cr (% berat)
- Ni : Prosentase unsur Ni (% berat)

Sehingga didapatkan:

$$CE = 0,60 + (0,80/5)$$

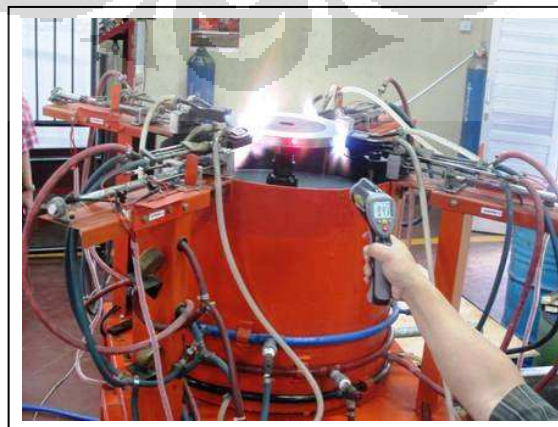
$$CE = 0,76$$

Berdasarkan perhitungan CE tersebut diketahui bahwa spesimen berada pada komposisi eutektoid (0,76%C). Dengan demikian pada temperatur di atas 725 °C sudah masuk temperatur austenisasi. Temperatur austenisasi untuk proses *hardening* biasanya antara 50<sup>0</sup>C-100<sup>0</sup>C di atas temperatur austenisasi (Smith, 2009). Oleh karena itu pada penelitian ini akan dipilih temperatur austenisasi pada 800 °C. Berdasarkan diagram CCT untuk komposisi eutektoid seperti tampak pada Gambar 3.6 diketahui bahwa untuk mendapatkan struktur martensit melalui proses *hardening*, bisa menggunakan media *quenching* air atau oli. Untuk mendapatkan pengerasan kedalaman (*depth of hardening*) yang tinggi pada proses *flame hardening*, maka dalam penelitian ini dipilih menggunakan media *quenching* air.



[Sumber: ASM Metals Handbook, 1991]

Gambar 3.6. Diagram CCT baja eutektoid

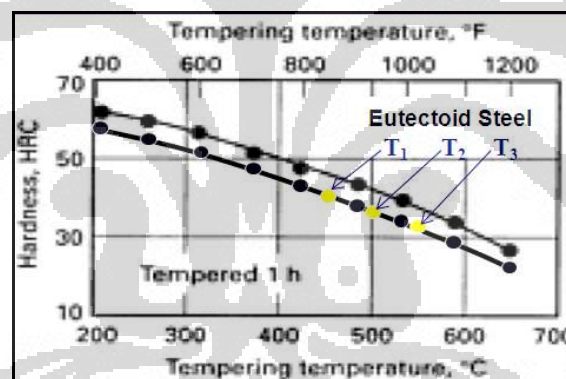


Gambar 3.7. Proses *flame hardening*



### 3.2.4. Proses Tempering

Temperatur tempering ditentukan berdasarkan data kekerasan awal hasil dari proses *hardening* dan kekerasan akhir yang diinginkan. Dari data hasil pengujian kekerasan diketahui bahwa kekerasan material setelah proses *flame hardening* adalah 57.33 HRC dan kekerasan akhir yang diinginkan adalah antara 34-37 HRC. Mengingat komposisi material yang digunakan dalam penelitian ini merupakan komposisi eutektoid, maka pemilihan temperatur tempering dilakukan dengan bantuan grafik temperatur tempering baja *eutectoid* misalnya (ASM Metal Handbook, 1991). Berdasarkan data kekerasan hasil proses *flame hardening* dan kekerasan akhir yang diinginkan, maka dengan bantuan grafik temperatur tempering baja eutektoid dapat ditentukan bahwa temperatur tempering berkisar antara  $450^{\circ}\text{C}$  -  $550^{\circ}\text{C}$  sehingga temperatur tempering yang kita pilih dalam penelitian ini adalah  $T_1=450^{\circ}\text{C}$ ,  $T_2=500^{\circ}\text{C}$  dan  $T_3=550^{\circ}\text{C}$  seperti tampak pada Gambar 3.8.



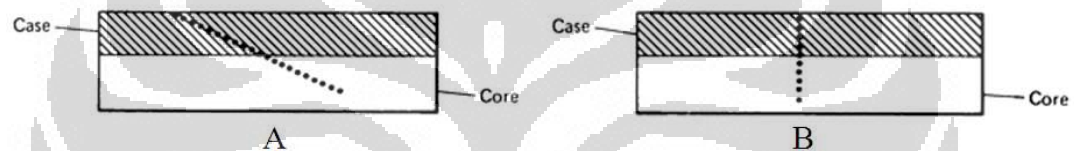
[Sumber: ASM Metals Handbook, 1991]

Gambar 3.8. Pemilihan temperatur tempering

### 3.2.5. Pengukuran kedalaman pengerasan (*depth of hardening*)

Pengukuran kedalaman pengerasan dilakukan dengan mengukur kekerasan spesimen dari permukaan ke arah bagian dalam dari spesimen. Pengukuran kedalaman pengerasan dilakukan terhadap spesimen hasil proses *flame hardening* maupun hasil proses *tempering*. Dari pengukuran ini akan diketahui seberapa dalam bagian yang mampu dikeraskan. Dalam pengukuran kedalaman pengerasan ini ada beberapa istilah yang biasa dipakai yaitu kedalaman pengerasan yang

efektif (*effective case depth*) dan kedalaman pengerasan total (*total case depth*). Kedalaman pengerasan yang efektif adalah jarak terjauh dari permukaan yang mampu dikeraskan sehingga menghasilkan kekerasan sesuai dengan yang diinginkan. Sedangkan kedalaman pengerasan total adalah jarak terjauh dari permukaan dimana terjadi peningkatan kekerasan jika dibandingkan dengan kekerasan awal. Untuk kedalaman pengerasan yang kurang dari 0.38 mm, pengukuran kedalaman pengerasan dari permukaan ke arah dalam dilakukan membentuk sudut sekitar  $45^{\circ}$  C. Sedangkan untuk kedalaman pengerasan yang lebih dari 0.38 mm, pengukuran kedalaman pengerasan dilakukan lurus dari permukaan ke arah dalam (ASM Metals Handbook, 1991) seperti pada Gambar 3.9.



Keterangan: A = Pengukuran kekerasan untuk kedalaman pengerasan  $< 0.38$  mm  
B = Pengukuran kekerasan untuk kedalaman pengerasan  $> 0.38$  mm

[Sumber: ASM metals handbook, 1991]

Gambar 3.9. Metode pengukuran kedalaman pengerasan



[Sumber: Panagiotidis, 2007]

Gambar 3.10. Contoh pengukuran kedalaman pengerasan

### 3.3. Alat dan Bahan yang Digunakan

#### 3.2.1. Alat yang Digunakan

Alat utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Tanur induksi

- Merk : Inductotherm
- Kapasitas : 250 Kg

2. Spektrometer

- Merk : ARL – Swiss
- Model : ARL-3460 (Channel : Ferro base, Al Base, Cu Base)

3. Ultrasonic Tester

- Merk : Karl Duetsch
- Tipe : Echograph

4. Tungku untuk proses *normalizing* dan *tempering*

- Merk : Vestar-Furnace
- Temperatur max: 1400 °C

5. Mesin Uji Tarik

- Merk : Hung Ta – Taiwan
- Model : HT-8346
- Kapasitas : 20 Ton

6. Mesin uji kekerasan Rockwell

- Merk : Future Tech – Japan
- Model : FR-1e

7. Mikroskop

- Merk : Olympus
- Model : GX 71 (Perbesaran : 50,100,200,500,1000 x)

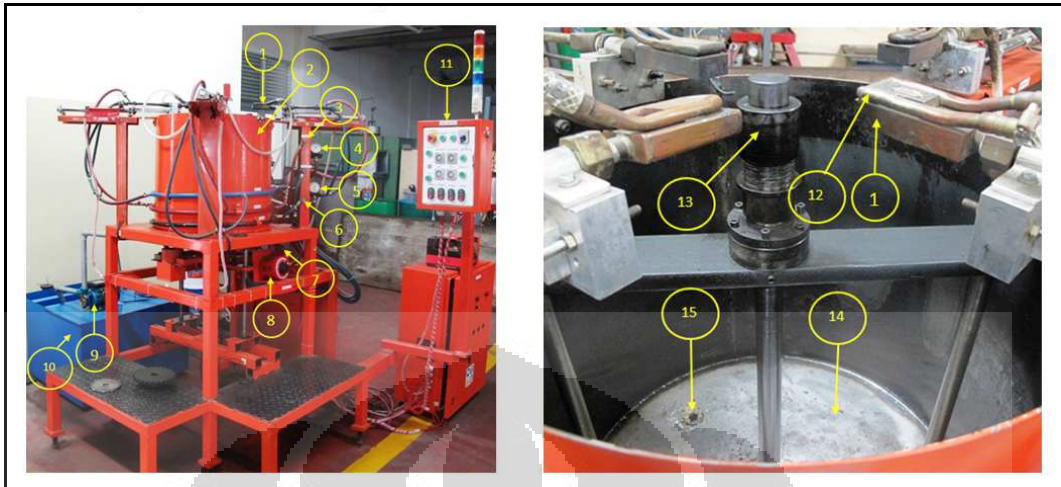
8. X-Ray Diffractometer (XRD)

- Merk : Shimadzu
- Model : XRD-7000

9. Termometer Infrared

- Merk : Krisbow
- Model : KW06-304 dan KW06-409

### 10. Rotary Flame Hardening



Gambar 3.11. Alat *Rotary Flame Hardening*

Keterangan:

- |                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| 1. <i>Flame head</i>                | 9. Pompa                                     |
| 2. <i>Drum quenching</i>            | 10. Bak Penampungan media <i>quenching</i>   |
| 3. <i>Regulator (Acetylene/LPG)</i> | 11. <i>Control panel</i>                     |
| 4. <i>Display (Acetylene/LPG)</i>   | 12. Pendingin <i>flame head</i>              |
| 5. <i>Display (O<sub>2</sub>)</i>   | 13. Dudukan spesimen                         |
| 6. <i>Regulator (O<sub>2</sub>)</i> | 14. Tempat media <i>quenching</i>            |
| 7. Sistem hidrolik                  | 15. Lubang pembuangan media <i>quenching</i> |
| 8. Motor                            |  |

Alat *flame hardening* yang digunakan dalam penelitian ini adalah tipe *rotary*, oleh karena itu benda kerjanya berputar dengan putaran antara 200-300 rpm. Benda kerja dipasang pada poros dudukan spesimen dan diklem agar tidak terlepas pada waktu benda kerja tersebut diputar. Panas yang digunakan berasal dari campuran antara oksigen dan *acetylene* yang disemburkan melalui *flame head*. Pada penelitian ini perbandingan campuran antara oksigen dan *acetylene* adalah 1:1 dan jarak *flame head* dengan benda kerja adalah 2 cm. Kedua hal tersebut dalam penelitian ini dibuat sebagai variabel tetap. Media pendingin yang digunakan disirkulasikan dengan menggunakan pompa agar proses pendinginannya lebih efektif. Panas yang diterima benda kerja diukur dengan termometer *infrared*, sedangkan parameter proses *flame hardening* yang lain misalnya lamanya *pre heating* dan *holding time* dikendalikan oleh sistem *Programming Linear Controlling (PLC)* yang bisa diatur melalui panel kontrol.

### 3.2.2. Bahan yang Digunakan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah roda kereta api bekas yang sudah tidak bisa digunakan lagi. Adapun komposisi kimia roda kereta api bekas tersebut ditampilkan dalam Tabel 3.1.

Tabel 3.1. Komposisi roda kimia bekas

Komposisi Kimia Roda Kereta Api Bekas				
C (%)	S (%)	Mn (%)	P (%)	Si (%)
0.60618	0.00812	0.71074	0.01138	0.21522

### 3.4. Pengujian - Pengujian

#### 3.3.1. Pengujian Kekuatan Tarik

Pengujian kekuatan tarik dilakukan dengan menggunakan standar ASTM E8-04 (*Standard Test Methods for Tensile Testing of Metallic Materials*).

#### 3.3.2. Pengujian Kekerasan

Pengujian kekuatan tarik dilakukan dengan menggunakan standar ASTM E18-03 (*Standard Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials*)

#### 3.3.3. Pengujian Struktur Mikro

Pengujian kekuatan tarik dilakukan dengan menggunakan standar ASTM E3-01 (*Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*).

### 3.5. Tempat Penelitian

Tempat Penelitian dilakukan di Laboratorium Pengecoran Logam dan Perlakuan Panas - Polman Bandung.

## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1. Spesimen Hasil Pengecoran

Proses pembuatan spesimen *flame hardening* dilakukan dengan cara pengecoran gravity (*gravity casting*) dengan menggunakan cetakan pasir (*sand mold*). Pola cetakan dan spesimen hasil pengecoran ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Keterangan: A = Pola cetakan spesimen *flame hardening*  
B = spesimen *flame hardening* hasil proses pengecoran

Gambar 4.1. Pola dan spesimen *flame hardening* hasil pengecoran

Hasil uji komposisi kimia spesimen *flame hardening* hasil pengecoran dibandingkan dengan spesifikasi roda kereta api golongan CC yang dikeluarkan oleh PT. Kereta Api Indonesia dengan mengacu kepada *Japanese Industrial Standard (JIS) E 5402:1998* ditampilkan pada Tabel 4.1.

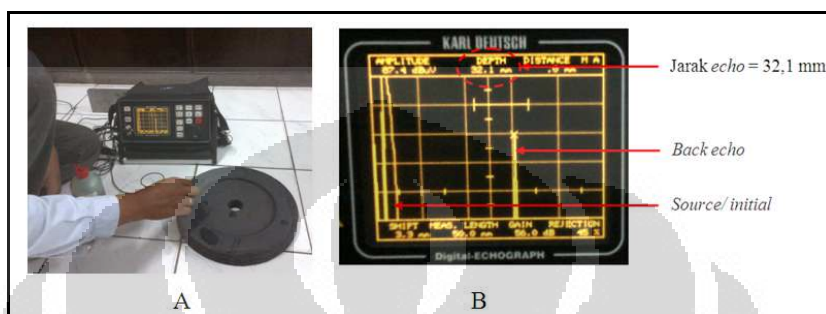
Tabel 4.1. Komposisi kimia hasil pengecoran

	<b>Komposisi Kimia</b>				
	C (%)	S (%)	Mn (%)	P (%)	Si (%)
<b>Standar</b>	0.55-0.65	maks 0.05	0.50-0.90	maks 0.05	0.15-0.35
<b>Percobaan</b>	0.60371	0.00406	0.80323	0.01723	0.22713

Dari Tabel 4.1. terlihat bahwa komposisi kimia spesimen *flame hardening* hasil proses pengecoran sudah sesuai dengan standar yang ada. Semua unsur paduan yang ada persentasenya masuk dalam *range* standar yang dipersyaratkan.

#### 4.2. Pengujian Kualitas Spesimen Hasil Hasil Pengecoran

Sebelum dilakukan proses perlakuan panas, dilakukan proses pengujian *dye penetrat* dan ultrasonik (UT) untuk memastikan bahwa spesimen hasil proses pengecoran tersebut bebas dari cacat pengecoran (*shrinkage, porosity*) seperti ditampilkan pada Gambar 4.2.



Keterangan: A = Pengujian hasil pengecoran dengan ultrasonik  
B = Hasil pengujian

Gambar 4.2. Proses dan hasil pengujian ultrasonik

Dari hasil uji tersebut terlihat bahwa jarak *initial pulse* ke pulse berikutnya (*back echo*) menunjukkan nilai 32,1 mm dan ini sesuai dengan tebal benda kerja. Tidak adanya *back echo* yang berjarak kurang dari tebal benda kerja menunjukkan tidak ditemukan adanya cacat pada bagian tengah benda kerja tersebut.

#### 4.3. Kekuatan Tarik dan Kekerasan Spesimen Hasil Pengecoran

Hasil pengujian tarik dan kekerasan spesimen hasil proses pengecoran dibandingkan dengan standar ditampilkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2. Kekuatan tarik dan kekerasan hasil pengecoran

	Kekuatan Tarik (MPa)	Kekerasan (HRC)
<b>Standar</b>	800-940 (elongasi min 5 %)	Hub : 31 maks Telapak : 34 - 37
<b>Hasil proses pengecoran</b>	881,3 (elongasi 3.3 %)	Hub : 22 Telapak : 22

Dari Tabel 4.2. tersebut terlihat bahwa kekuatan tarik dan kekerasan bagian hub sudah sesuai dengan standar. Sedangkan elongasi dan kekerasan bagian permukaan belum sesuai dengan standar.

#### 4.4. Kekuatan Tarik dan Kekerasan Spesimen Hasil *Normalizing*

Proses *normalizing* dilakukan dengan parameter proses *normalizing* sesuai rekomendasi hasil penelitian pembuatan roda kereta api yang sudah dilakukan sebelumnya. Berdasarkan hasil penelitian tersebut, temperatur *normalizing* yang direkomendasikan adalah 850 °C dengan *holding time* 2 jam dengan pendinginan udara bebas (Budiyanto, 2011). Hasil dari proses *normalizing* tersebut ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3. Kekuatan tarik dan kekerasan hasil pengecoran dan *normalizing*

	Kekuatan Tarik (MPa)	Kekerasan (HRC)
<b>Standar</b>	800-940 (elongasi min 5 %)	Hub : 31 maks Telapak : 34 - 37
<b>Hasil proses pengecoran</b>	881,3 (elongasi 3.3 %)	Hub : 22 Telapak : 22
<b>Hasil proses <i>normalizing</i></b>	906.1 (elongasi 9.5 %)	Hub : 24 Telapak : 24

Dari Tabel 4.3. tersebut terlihat bahwa setelah dilakukan proses *normalizing*, kekuatan tarik meningkat dari 881.3 menjadi 906.1 MPa. Demikian juga dengan kekerasan sedikit meningkat dari 22 HRC menjadi 24 HRC. Sedangkan elongasi meningkat dengan cukup tinggi yaitu dari 3.3 % menjadi 9.5 %. Produk yang dihasilkan dari proses pengecoran selalu menyisakan adanya tegangan dalam (*internal stress*). Tegangan dalam tersebut diakibatkan adanya pendinginan yang tidak merata antara bagian permukaan yang bersentuhan dengan cetakan dengan bagian yang ada di dalam dan jauh dari cetakan. Disamping itu tegangan dalam juga diakibatkan karena laju pendinginan yang berbeda pada berbagai bagian dari produk cor. Adanya tegangan dalam ini menyebabkan hasil produk dari proses pengecoran cenderung mempunyai elongasi yang rendah. Disamping itu, produk cor biasanya menghasilkan ukuran butiran yang kasar dan dendritik. Untuk menghilangkan tegangan dalam/tegangan sisa dan untuk menghaluskan struktur cor yang dendritik tersebut dilakukan proses *normalizing*. Proses *normalizing* yang dilakukan menyebabkan berkurang/hilangnya tegangan sisa dan dan juga membuat struktur menjadi lebih



homogen sehingga elongasi bahan menjadi meningkat seperti seperti ditunjukkan pada Tabel 4.3. Disamping itu proses *normalizing* juga menghasilkan *lamellar spacing* dan ukuran butiran yang lebih halus sehingga kekerasan dan kekuatan material juga semakin meningkat. Dengan demikian setelah proses *normalizing* tersebut kekuatan tarik, elongasi dan kekerasan bagian hub sudah sesuai dengan standar. Sedangkan kekerasan bagian permukaan spesimen masih di bawah standar, oleh karena itu perlu dilakukan perlakuan panas permukaan (*surface hardening*).

#### 4.5. Kekerasan Hasil Proses *Flame Hardening*

Data kekerasan hasil proses *surface hardening* dengan temperatur austenisasi 800 °C, waktu penahanan 30 detik dan media *quenching* air ditampilkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4. Kekerasan hasil proses *flame hardening*

Kekerasan (HRC)			
I	II	II	Rata-Rata
57.30	57.10	57.60	<b>57.33</b>

Dari Tabel 4.4 di atas diketahui bahwa kekerasan rata-rata yang dihasilkan dari proses *flame hardening* adalah 57.33 HRC. Proses *flame hardening* yang dilakukan telah meningkatkan kekerasan material dari 24 HRC menjadi 57.33 HRC. Peningkatan kekerasan yang tinggi ini disebabkan karena terbentuknya martensit setelah proses *flame hardening*. Terbentuknya martensit ini ditandai dengan tingginya kekerasan yang dihasilkan, dimana kekerasan tersebut masuk dalam *range* kekerasan martensit. Martensit tersebut terbentuk karena pemanasan yang diberikan pada proses *flame hardening* ini sudah berada di atas temperatur transformasi  $A_1$  sehingga terjadi transformasi dari struktur awal material yaitu perlit menjadi austenit dan pendinginan yang dilakukan dengan menggunakan air (*water quenching*) mempunyai laju pendinginan yang lebih cepat dari laju pendinginan kritis (*critical cooling rate, CCR*) sehingga terbentuk martensit.

Proses transformasi dari austenit menjadi martensit diklasifikasikan sebagai proses transformasi tanpa difusi yang tidak tergantung waktu (*diffusionless time-independent transformation*). Transformasi martensit tersebut terjadi dengan mekanisme geser. Oleh karena tidak terjadi difusi, maka martensit mempunyai komposisi yang persis sama seperti fasa awalnya yaitu austenit. Karena pendinginan yang cepat, atom karbon terjebak dalam tempat oktahedral dari struktur *body center cubic* (BCC), hingga membentuk fasa baru yaitu martensit dengan struktur *body centered tetragonal* (BCT). Fasa martensit adalah fasa metastabil yang akan membentuk fase yang lebih stabil apabila diberikan perlakuan panas. Martensit yang keras dan getas ini disebabkan karena proses transformasi yang terjadi secara mekanik (geser) tersebut mengakibatkan adanya atom karbon yang terperangkap pada struktur kristal BCT pada saat terjadi transformasi dari FCC ke BCC. Kegetasan martensit dikarenakan oleh beberapa faktor antara lain terjadi karena distorsi kisi yang disebabkan oleh terperangkapnya atom karbon dalam kisi oktahedral dari martensit, segregasi dari unsur-unsur pengotor pada batas butir austenit, pembentukan karbida selama proses pencelupan dan tegangan sisa yang terjadi pada proses pencelupan.

Dalam perubahan transformasi martensit, ada beberapa karakteristik penting antara lain bahwa transformasi martensit terjadi tanpa proses difusi, hal ini terjadi karena transformasi dari austenit menjadi martensit berlangsung dengan kecepatan tinggi. Karena tanpa difusi, maka transformasi martensit terjadi tanpa adanya perubahan komposisi kimia dari fasa awal. Jenis martensit yang dihasilkan sangat tergantung pada jumlah kandungan karbon dalam baja. Bila kandungan karbon rendah maka yang terbentuk adalah *lath* martensit dan apabila kandungan karbon dalam baja tinggi akan terbentuk *plate* martensit. Sedangkan bila kandungan karbonnya sedang akan terbentuk campuran dari keduanya. Pada penelitian ini, kandungan karbon pada material yang digunakan adalah 0.60 % sehingga masuk pada baja karbon tinggi. Karena masuk pada baja karbon tinggi, maka martensit yang dihasilkan adalah terbentuk *plate* martensit.

#### 4.6. Kekerasan Hasil Proses *Tempering*

Data kekerasan hasil proses *tempering* dengan berbagai macam temperatur *tempering* terhadap material yang sebelumnya sudah diberi perlakuan panas flame hardening ditunjukkan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5. Kekerasan dengan variasi temperatur *tempering*

Parameter Proses <i>Tempering</i>			Kekerasan Rata-Rata (HRC)
Temperatur	<i> Holding Time </i>	Media Pendingin	
450 °C	1 jam	udara	41.60
500 °C			36.00
550 °C			31.30

Dari Tabel 4.5 terlihat bahwa pada temperatur *tempering* 450 °C, kekerasan akhir rata-rata yang dihasilkan adalah 41.60 HRC. Ketika temperatur *tempering* dinaikkan menjadi 500 °C kekerasan akhir yang dihasilkan adalah 36.00 HRC dan ketika temperatur *tempering* dinaikkan lagi menjadi 550 °C kekerasan akhir yang dihasilkan adalah 31.30 HRC. Dari data tersebut dapat disimpulkan bahwa dengan waktu *tempering* yang sama, perbedaan temperatur *tempering* akan menghasilkan tingkat kekerasan akhir yang berbeda. Semakin tinggi temperatur *tempering* maka kekerasan akhir yang didapat akan semakin rendah. Hal ini disebabkan karena semakin tinggi temperatur *tempering*, maka akan semakin banyak atom karbon yang keluar dari struktur martensit menjadi martensit temper sehingga kekerasan akan semakin turun.

Atom karbon yang keluar selama pemanasan pada proses *tempering* tersebut akan membentuk partikel sementit. Sementit dalam sistem paduan berbasis besi adalah *stoichiometric inter-metallic compound* Fe<sub>3</sub>C yang keras (*hard*) dan getas (*brittle*). Sementit sebenarnya dapat terurai menjadi bentuk yang lebih stabil yaitu Fe dan C sehingga sering disebut sebagai fase metastabil. Namun, untuk keperluan praktis, fasa ini dapat dianggap sebagai fase stabil. Sementit sangat penting perannya di dalam membentuk sifat-sifat mekanik akhir baja. Sementit dapat berada di dalam sistem besi baja dalam berbagai bentuk seperti bentuk bola (*sphere*), bentuk lembaran (berselang seling dengan alfa-ferit),

atau partikel-partikel karbida kecil. Bentuk, ukuran dan distribusi sementit ini dapat direkayasa melalui siklus pemanasan dan pendinginan. Jarak rata-rata antar sementit/karbida dikenal sebagai lintasan ferit rata-rata (*ferrite mean path*). Semakin tinggi temperatur tempering maka partikel sementit tersebut akan tumbuh menjadi lebih besar sehingga menyebabkan kekerasan dan kekuatan material semakin turun sedangkan keuletan dan ketangguhannya semakin meningkat. Pada penelitian ini temperatur *tempering* yang menghasilkan kekerasan akhir yang sesuai dengan standar (34-37 HRC) adalah 500 °C. Perubahan sifat mekanik (kekuatan tarik dan kekerasan) material mulai dari hasil pengecoran yang diikuti proses perlakuan panas dari *normalizing* sampai *tempering* dapat dilihat pada tabel 4.6 berikut.

Tabel 4.6. Kekerasan dan kekuatan tarik hasil proses perlakuan panas

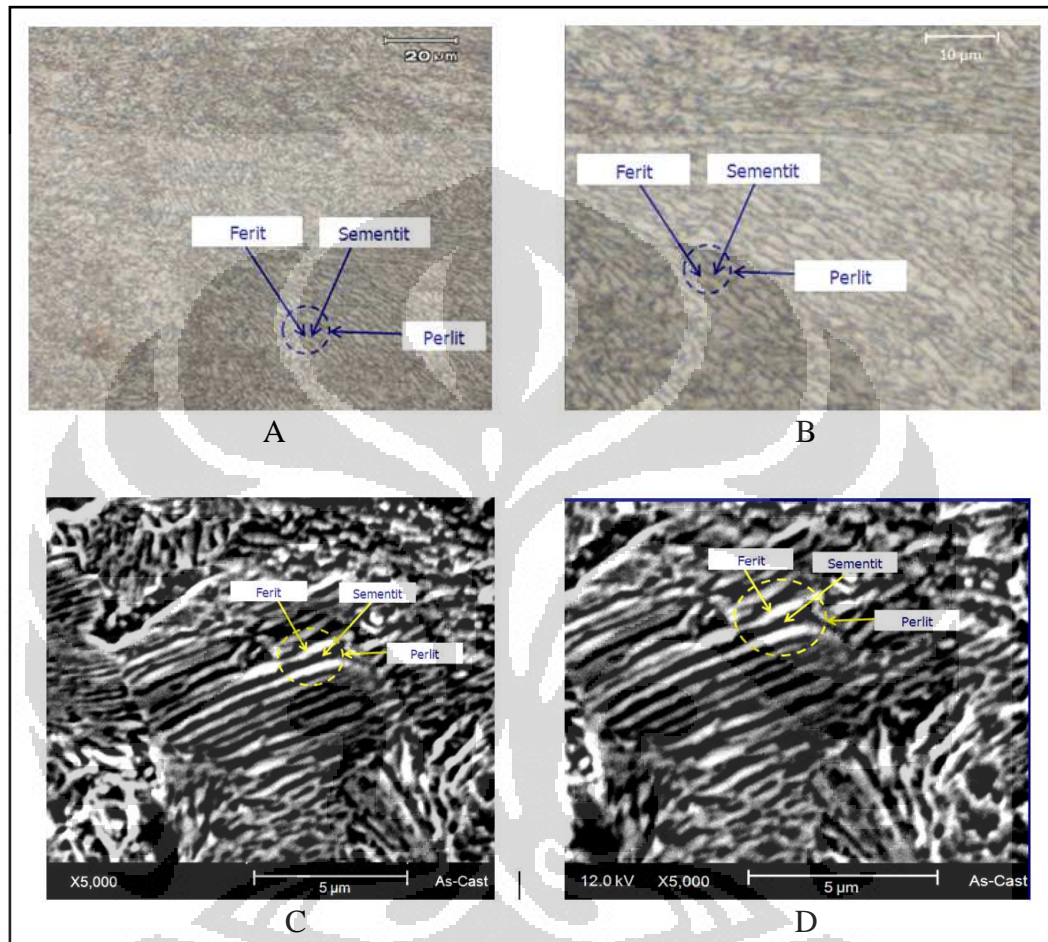
	Kekuatan Tarik (MPa)	Kekerasan (HRC)
<b>Standar</b>	800-940 (regangan min 5 %)	Hub : 31 maks Telapak : 34 - 37
<b>Hasil proses pengecoran</b>	881,3 (elongasi 3.3 %)	Hub : 22 Telapak : 22
<b>Hasil proses <i>normalizing</i></b>	906.1 (elongasi 9.5 %)	Hub : 24 Telapak : 24
<b>Hasil proses <i>Flame Hardening</i> dan <i>Tempering</i></b>	906.1 (elongasi 9.5 %)	Hub : 24 Telapak : 36

Dari tabel 4.6 tersebut terlihat bahwa setelah proses *flame hardening* dan *tempering* kekuatan tarik yang dihasilkan adalah 906.1 MPa dengan elongasi sebesar 9.5%. Dengan demikian kekuatan tarik dan elongasi yang dihasilkan sudah memenuhi standar yang ditetapkan yaitu kekuatan tarik antara 800-940 MPa dengan elongasi minimal 5%. Kekerasan yang dihasilkan setelah proses *flame hardening* dan *tempering* untuk hub adalah 24 HRC dan untuk telapak 36 HRC. Dengan demikian kekerasan yang dihasilkan baik untuk hub maupun telapak sudah memenuhi standar yang ditetapkan yaitu kekerasan hub maksimal 31 HRC dan kekerasan bagian permukaan antara 34-37 HRC.

## 4.7. Struktur Mikro

### 4.7.1. Struktur Mikro Hasil Proses Pengecoran

Struktur mikro spesimen hasil proses pengecoran diperlihatkan pada Gambar 4.3. berikut ini:



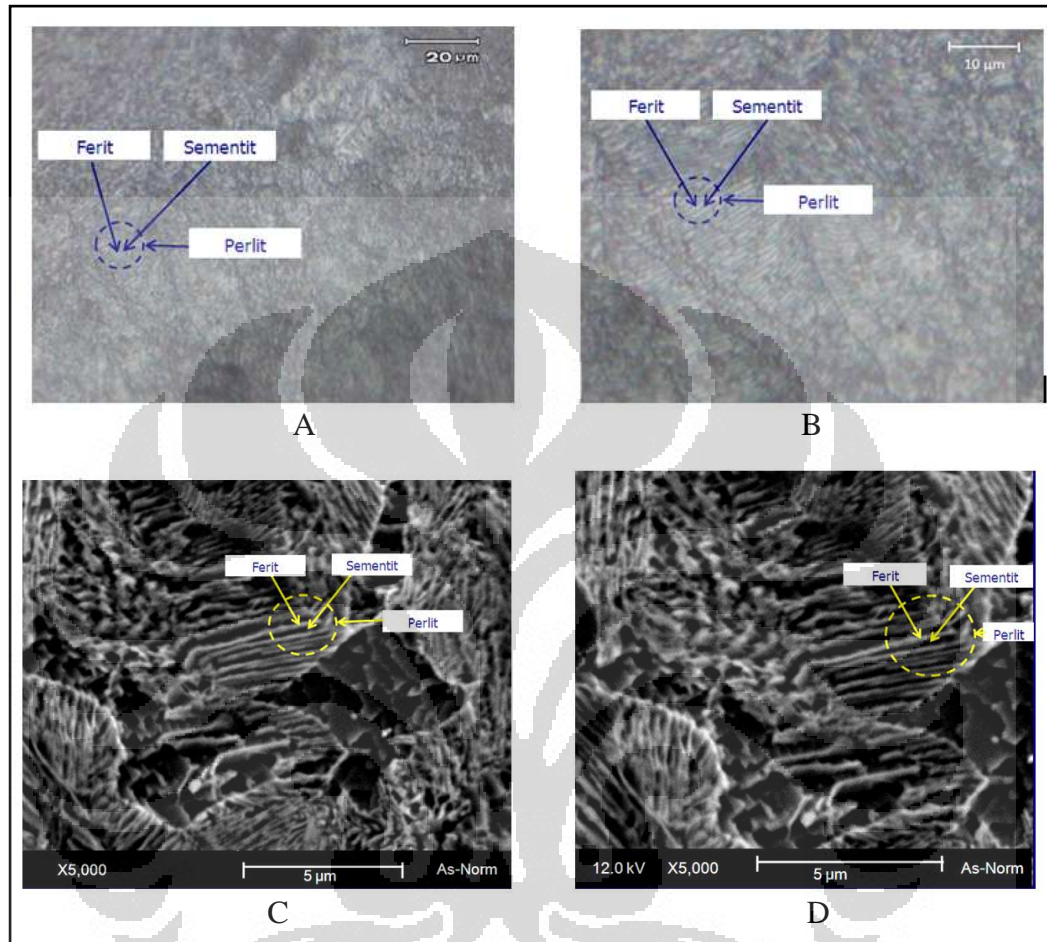
Keterangan: A – B = Struktur mikro hasil pengecoran dengan menggunakan mikroskop optik  
B – C = Struktur mikro hasil pengecoran dengan menggunakan SEM

Gambar 4.3. Struktur mikro spesimen hasil proses pengecoran

Dari Gambar 4.3 terlihat bahwa struktur mikro hasil pengecoran adalah perlit yaitu struktur yang berlapis-lapis (*lamellar*) yang terdiri dari ferit dan sementit. Struktur perlit ini diperoleh karena komposisi material yang digunakan pada penelitian ini mempunyai komposisi eutektoid. Karakteristik dari struktur mikro hasil pengecoran adalah bentuknya relatif kasar dan tidak seragam antara bagian luar yang dekat dengan cetakan dengan bagian dalam karena adanya perbedaan kecepatan pendinginan antara bagian luar dengan bagian dalam.

#### 4.7.2. Struktur Mikro Hasil Proses *Normalizing*

Struktur mikro spesimen hasil proses *normalizing* diperlihatkan pada Gambar 4.4. berikut ini:



Keterangan: A – B = Struktur mikro hasil *normalizing* dengan menggunakan mikroskop optik  
B – C = Struktur mikro hasil *normalizing* dengan menggunakan SEM

Gambar 4.4. Struktur mikro spesimen hasil proses *normalizing*

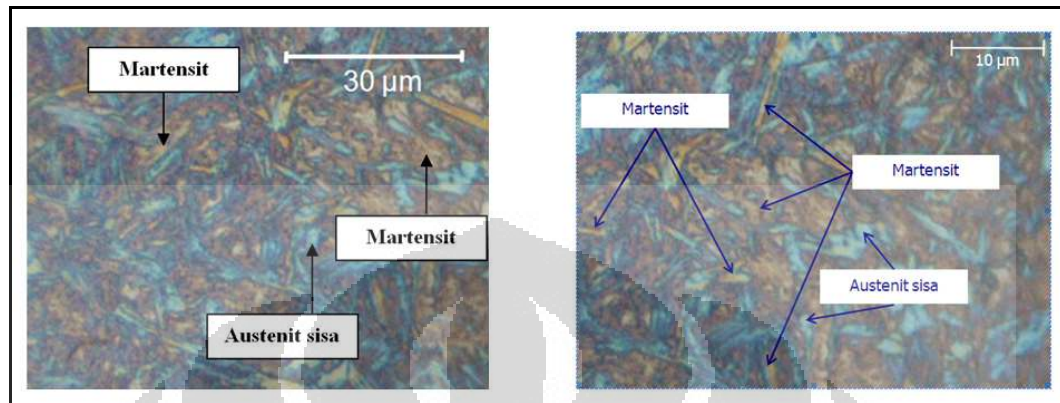
Dari Gambar 4.4 nampak bahwa struktur mikro setelah proses *normalizing* juga perlit. Perbedaan struktur mikro antara perlit hasil pengecoran dengan perlit setelah proses *normalizing* adalah pada kehalusan lamel-lamer perlitnya dimana perlit yang dihasilkan dari proses *normalizing* lebih halus dibandingkan perlit hasil pengecoran. Dalam struktur perlit, salah satu faktor yang banyak menentukan kekuatan dan kekerasan dari perlit adalah *lamellar spacing* yaitu jarak antara lamel ferit dengan perlit. Semakin kecil *lamellar spacing* maka semakin kuat dan keras struktur perlit tersebut.

Oleh karena itulah kekuatan dan kekerasan yang dihasilkan setelah proses *normalizing* lebih tinggi jika dibandingkan dengan hasil pengecoran. Proses *normalizing* yang dilakukan dengan memanaskan material sampai di atas temperatur kritis menyebabkan terjadinya perubahan dari perlit menjadi austenit dan setelah didinginkan di udara akan menghasilkan perlit dengan *lamellar spacing* yang lebih tipis jika dibandingkan dengan perlit yang dihasilkan dari proses pengecoran maupun annealing. Perlit dengan *lamellar spacing* yang lebih tipis dan ukuran butiran yang kecil ini akan menghasilkan kekuatan dan kekerasan yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan yang perlit dengan *lamellar spacing* yang lebih tebal. Material dengan ukuran butir yang kecil akan memiliki batas butir (*grain boundary*) yang lebih banyak. Batas butir merupakan penghambat gerakan dislokasi. Hal ini disebabkan karena dislokasi harus mengubah arah gerak karena orientasi yang berbeda butir, sehingga dislokasi menjadi sulit bergerak lagi. Dengan terhambatnya gerakan dislokasi tersebut menghasilkan kekuatan dan kekerasan yang lebih tinggi.

Kemampuan batas butir dalam menghalangi gerakan dislokasi ini akan bertambah dengan adanya peningkatan sudut mis-orientasi butir (*angle of misorientation*). Oleh karena itulah, material dengan ukuran butir yang halus akan mempunyai batas butir lebih banyak sehingga menghalangi dislokasi juga lebih banyak sehingga menyebabkan dislokasi menjadi lebih sulit untuk slip dan hasilnya material akan menjadi lebih kuat dan keras. Hal inilah yang menyebabkan kekerasan dan kekuatan tarik dari spesimen yang diberi perlakuan *normalizing* lebih tinggi jika dibandingkan dengan spesimen dari hasil proses pengecoran. Disamping menghaluskan ukuran butiran, proses *normalizing* juga membuat struktur mikro dari produk-produk hasil pengecoran menjadi lebih homogen. Oleh karena itu proses *normalizing* yang dilakukan terhadap produk-produk pengecoran tersebut akan memberikan respon yang lebih baik ketika dilakukan proses pengerasan (*hardening*). Oleh karena itu pada produk-produk hasil pengecoran biasanya dilakukan proses *normalizing* sebelum dilakukan proses pengerasan.

### 4.7.3. Struktur Mikro Hasil Proses *Flame Hardening*

Foto struktur mikro spesimen hasil proses *flame hardening* dengan temperatur austenisasi 800 °C ditunjukkan pada Gambar 4.5.



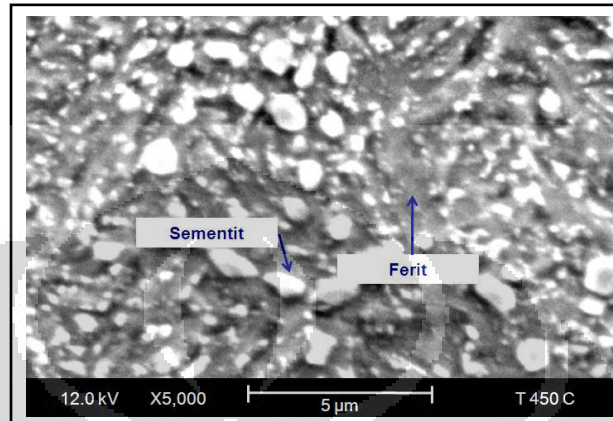
Gambar 4.5. Struktur mikro proses *hardening* dengan temperatur 800 °C

Dari Gambar 4.5 terlihat bahwa struktur mikro yang dihasilkan adalah martensit dan austenit sisa (*retained austenite*). Martensit terbentuk karena pemanasan pada proses *flame hardening* ini sudah berada di atas temperatur transformasi  $A_1$  sehingga terjadi transformasi dari perlit ke austenit dan pendinginan yang dilakukan dengan menggunakan air (*water quenching*) laju pendinginannya lebih cepat dari laju pendinginan kritis sehingga terbentuk martensit. Austenit sisa muncul karena ketika pendinginan berhenti pada temperatur kamar, masih ada austenit yang belum bertransformasi menjadi martensit. Hal ini disebabkan karena material yang mempunyai kadar karbon di atas 0.5% temperatur selesainya pembentukan martensit berada di bawah temperatur kamar. Pada penelitian ini, material yang digunakan mempunyai kadar karbon 0.60%, sehingga temperatur selesainya pembentukan martensit berada di bawah 0 °C. Oleh karena itu ketika pendinginan berhenti pada temperatur kamar terbentuk austenit sisa yang akan mengurangi kekerasan dan kekuatan dari material. Semakin tinggi kadar karbon, maka semakin rendah temperatur mulai dan selesainya proses pembentukan martensit sehingga akan menyebabkan semakin banyak terbentuk austenit sisa yang terbentuk. Apabila diinginkan kekerasan yang maksimal, maka austenit sisa ini harus diminimalkan yang bisa dilakukan dengan perlakuan di bawah nol (*subzero treatment*).

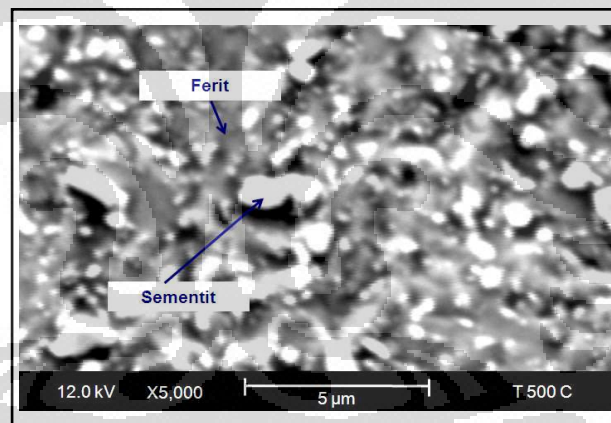


#### 4.7.4. Struktur Mikro Hasil Proses *Tempering*

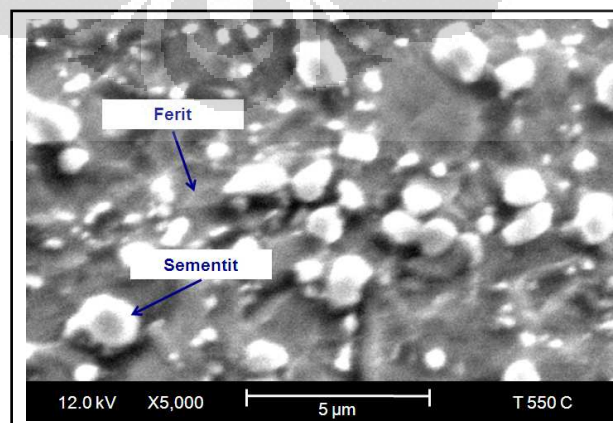
Foto struktur mikro spesimen hasil proses *tempering* dengan temperatur *tempering* 450 °C, 500 °C dan 550 °C dengan waktu penahanan selama 1 jam dan didinginkan di udara bebas ditunjukkan pada Gambar 4.6, 4.7 dan 4.8 berikut :



Gambar 4.6. Struktur mikro proses *tempering* dengan temperatur 450 °C



Gambar 4.7. Struktur mikro proses *tempering* dengan temperatur 500 °C



Gambar 4.8. Struktur mikro proses *tempering* dengan temperatur 550 °C

Dari Gambar 4.6 terlihat bahwa proses *tempering* yang dilakukan pada temperatur  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$  akan merubah martensit hasil proses *flame hardening* menjadi martensit temper yang terdiri dari partikel-partikel sementit dalam matrik ferit. Pada tempering dengan temperatur ini, atom karbon dari martensit akan keluar membentuk partikel sementit. Keluarnya karbon ini disebabkan karena martensit yang dihasilkan dari proses *flame hardening* merupakan fasa metastabil yang akan membentuk fase yang lebih stabil apabila diberikan perlakuan panas. Pada tempering dengan temperatur  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$  tersebut, partikel sementit yang terbentuk masih kecil-kecil dan tersebar dalam matrik ferit. Keluarnya karbon dari martensit menyebabkan ketegangan martensit menjadi berkurang dan hal inilah yang menyebabkan kekerasannya semakin berkurang. Partikel sementit tersebut akan tumbuh menjadi lebih besar ketika temperatur tempering ditingkatkan. Hal ini terlihat dari Gambar 4.7 yang menunjukkan bahwa partikel sementit hasil tempering pada temperatur  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  lebih besar jika dibandingkan dengan partikel sementit yang dihasilkan pada temperatur tempering  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Demikian juga ketika temperatur tempering dinaikkan menjadi  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ , partikel sementit tumbuh menjadi lebih besar lagi seperti ditunjukkan pada Gambar 4.8.

Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi temperatur tempering maka sementit yang terbentuk akan tumbuh semakin besar sehingga kekerasan akan semakin turun. Tumbuhnya partikel sementit yang semakin besar tersebut menyebabkan berkurangnya daerah batas antara ferit dengan sementit sehingga menyebabkan kekerasannya menjadi turun. Penurunan kekerasan ini akan dibarengi dengan naiknya keuletan dan ketangguhan dari material yang ditemper tersebut. Proses yang terjadi selama tempering adalah proses difusi sehingga temperatur dan waktu memegang peranan yang sangat penting selama proses tempering tersebut. Oleh karena itu untuk mendapatkan kekerasan akhir yang seperti yang diinginkan harus dicari temperatur dan waktu penahanan yang tepat. Pada penelitian ini, tempering dengan temperatur  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  dan waktu penahanan selama 1 (satu) jam menghasilkan kekerasan akhir sesuai dengan standar kekerasan telapak roda kereta api yaitu antara 34-37 HRC. Oleh karena itu dalam proses optimasi kedalaman pengerasan akan dipilih temperatur *tempering*  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  dan waktu penahanan selama 1 (satu) jam.

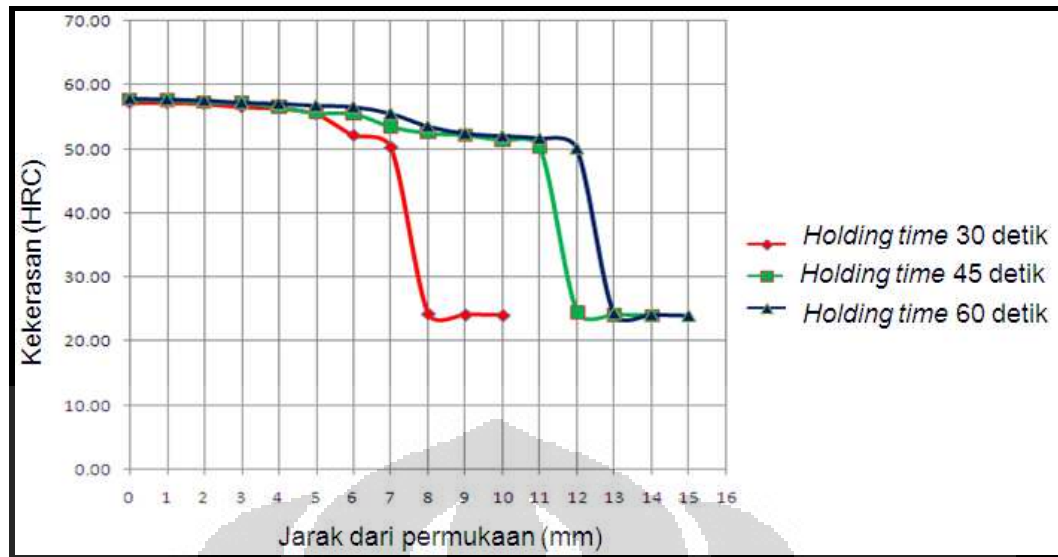
#### 4.8. Optimasi Kedalaman Pengerasan (*Depth of Hardening*) dengan Variasi Waktu Penahanan

Untuk mendapatkan kedalaman pengerasan yang lebih dalam, maka dilakukan optimasi proses *flame hardening* dengan variasi waktu penahanan. Waktu penahanan yang dipilih adalah 30, 45 dan 60 detik.

##### 4.8.1. Data Kedalaman Pengerasan Hasil Variasi Waktu Penahanan

Tabel 4.7. Distribusi kekerasan rata-rata hasil proses *flame hardening* dengan temperatur austenisasi 800 °C dan variasi *holding time* 30, 45 dan 60 detik.

No	Jarak dari permukaan (mm)	Kekerasan Rata-Rata (HRC)		
		<i>Holding time</i> 30 detik	<i>Holding time</i> 45 detik	<i>Holding time</i> 60 detik
1	0.00	57.27	57.60	57.83
2	1.00	57.23	57.53	57.73
3	2.00	57.07	57.23	57.57
4	3.00	56.57	57.10	57.23
5	4.00	56.33	56.50	57.07
6	5.00	55.47	55.57	56.77
7	6.00	52.13	55.43	56.57
8	7.00	50.23	53.43	55.53
9	8.00	24.17	52.43	53.53
10	9.00	24.13	52.10	52.43
11	10.00	24.03	51.27	52.03
12	11.00		50.17	51.67
13	12.00		24.13	50.13
14	13.00		24.13	24.17
15	14.00		24.10	24.10
16	15.00			24.07



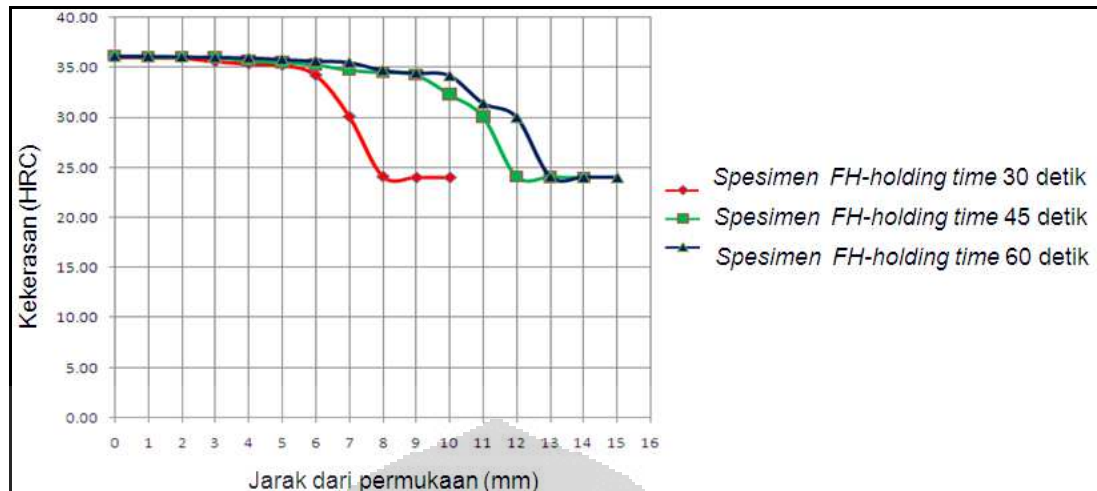
Gambar 4.9. Grafik distribusi kekerasan rata-rata hasil proses *flame hardening* dengan variasi *holding time* 30, 45 dan 60 detik

Dari Tabel 4.7 dan Gambar 4.9 terlihat bahwa untuk spesimen dengan *holding time* 30 detik, peningkatan kekerasan dibandingkan dengan spesimen awal terjadi sampai jarak 7 mm dari permukaan dengan kekerasan sebesar 50.23 HRC. Angka kekerasan yang dihasilkan ini masuk dalam kisaran kekerasan martensit (Calister, 2008). Dari data ini bisa disimpulkan bahwa sampai jarak 7 mm dari permukaan tersebut, panas yang dicapai spesimen bisa mencapai temperatur austenisasi dari baja yang digunakan dalam penelitian ini sehingga ketika dilakukan proses pendinginan cepat (*quenching*) menggunakan media air pada jarak tersebut terjadi transformasi fasa dari austenit menjadi martensit. Pada jarak lebih dari 7 mm dari permukaan spesimen, temperatur sudah berada di bawah temperatur austenisasi sehingga tidak terbentuk fasa martensit. Oleh karena itu kekerasan pada jarak lebih dari 7 mm tersebut relatif sama dengan kekerasan awal. Untuk spesimen dengan *holding time* 45 menit, peningkatan kekerasan yang dicapai lebih dalam yaitu pada jarak 11 mm dari permukaan dengan kekerasan sebesar 50.17 HRC. Sedangkan untuk spesimen dengan *holding time* 60 menit, peningkatan kekerasan yang dicapai lebih dalam lagi yaitu pada jarak 13 mm dari permukaan dengan kekerasan sebesar 50.13 HRC.

Dari data-data tersebut dapat disimpulkan bahwa semakin lama *holding time*, maka semakin dalam jarak yang bisa ditingkatkan kekerasannya. Namun demikian peningkatan ini tidak linear dan akan mencapai batas pada kedalaman tertentu. Hal ini dapat kita ketahui dari data di atas dimana pada *holding time* 30 detik kedalaman pengerasannya mencapai jarak 7 mm, sedangkan pada *holding time* 45 detik kedalaman pengerasannya mencapai 11 mm, meningkat 4 mm jika dibandingkan dengan *holding time* 30 detik dan pada *holding time* 60 detik kedalaman pengerasannya mencapai 13 mm, meningkat 2 mm jika dibandingkan dengan *holding time* 45 detik.

Tabel 4.8. Distribusi kekerasan rata-rata hasil proses *tempering* dengan temperatur *tempering* 500 °C, waktu penahanan 1 jam, media pendingin udara

No	Jarak dari permukaan (mm)	Kekerasan Rata-Rata (HRC)		
		Spesimen dengan waktu tahan 30 dtk	Spesimen dengan waktu tahan 45 dtk	Spesimen dengan waktu tahan 60 dtk
1	0.00	36.07	36.13	36.17
2	1.00	36.03	36.07	36.13
3	2.00	36.00	36.03	36.10
4	3.00	35.63	36.00	36.03
5	4.00	35.40	35.67	36.00
6	5.00	35.27	35.50	35.83
7	6.00	34.27	35.27	35.67
8	7.00	30.13	34.73	35.53
9	8.00	24.13	34.50	34.73
10	9.00	24.03	34.23	34.47
11	10.00	24.03	32.30	34.20
12	11.00		30.07	31.43
13	12.00		24.10	30.03
14	13.00		24.03	24.10
15	14.00		24.00	24.00
16	15.00			24.00



Gambar 4.10. Grafik distribusi kekerasan rata-rata hasil proses *tempering* dari spesimen *flame hardening* dengan variasi *holding time* 30, 45 dan 60 detik

Dari Tabel 4.8 dan Gambar 4.10 diketahui bahwa untuk spesimen yang sebelumnya diberi perlakuan *flame hardening* dengan *holding time* 30 detik, setelah proses *tempering* kekerasan yang memenuhi standar dicapai sampai kedalaman 6 mm sebesar 34.27 HRC. Sementara itu untuk spesimen yang sebelumnya diberi perlakuan *flame hardening* dengan *holding time* 45 detik, setelah proses *tempering* kekerasan yang memenuhi standar dicapai sampai kedalaman 9 mm sebesar 34.23 HRC dan untuk untuk spesimen yang sebelumnya diberi perlakuan *flame hardening* dengan *holding time* 60 detik, setelah proses *tempering* kekerasan yang memenuhi standar dicapai sampai kedalaman 10 mm sebesar 34.20 HRC. Dari data tersebut nampak bahwa spesimen yang diberi perlakuan *flame hardening* dengan *holding time* yang lebih lama akan menghasilkan kekerasan akhir yang memenuhi standar pada jarak yang lebih dalam jika dibandingkan dengan spesimen yang diberi perlakuan *flame hardening* dengan *holding time* yang lebih singkat. Karakteristik kedalaman pengerasan spesimen hasil proses *tempering* hampir sama dengan kedalaman pengerasan hasil proses *flame hardening*.

## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

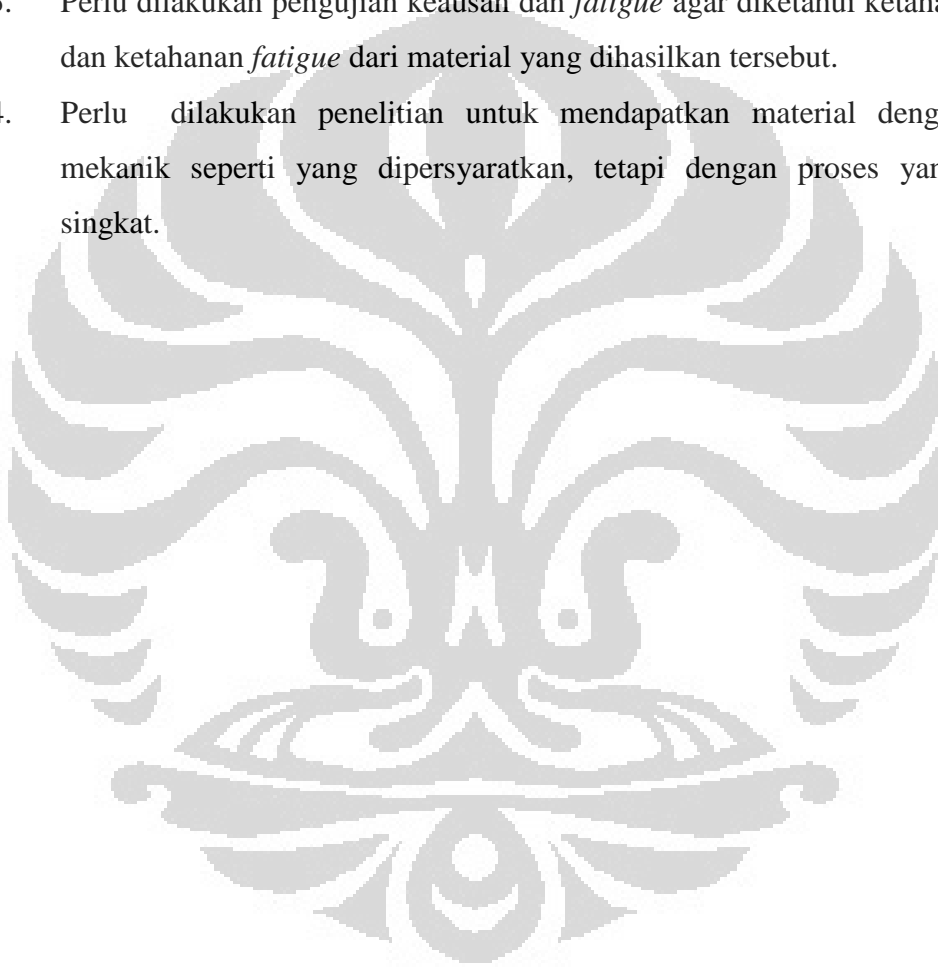
#### 5.1. Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan beberapa hal seperti di bawah ini:

1. Proses perlakuan panas mempengaruhi sifat mekanik roda kereta api buatan lokal. Proses *normalizing* yang dilakukan pada temperatur 850 °C, waktu penahanan selama 2 (dua) jam dan didinginkan di udara mampu meningkatkan kekuatan tarik dari 881.3 Mpa menjadi 906.1 Mpa, kekerasan dari 22 HRC menjadi 24 HRC dan elongasi dari 3.3% menjadi 9.5%. Proses *flame hardening* yang dilakukan pada temperatur 800 °C, waktu penahanan selama 30 detik dengan media *quenching* air meningkatkan kekerasan dari 24 HRC menjadi 57.3 HRC. Proses tempering yang temperatur 500 °C, waktu penahanan selama 1 (satu) jam dan didinginkan di udara bebas menghasilkan kekerasan akhir yang sesuai dengan standar yaitu 34-37 HRC.
2. Proses perlakuan panas juga merubah struktur mikro roda dimana struktur mikro awal material roda kereta api adalah perlit. Proses *normalizing* merubah perlit hasil pengecoran menjadi lebih halus. Proses *flame hardening* merubah perlit menjadi martensit dan austenit sisa. Proses tempering merubah martensit menjadi martensit temper (sementit dan ferit).
3. Waktu penahanan pada proses *flame hardening* mempengaruhi kedalaman pengerasan dimana semakin lama waktu penahanan maka semakin dalam kedalaman pengerasannya. Penahanan temperatur selama 30 detik pada temperatur 800°C menghasilkan kedalaman pengerasan total sebesar 7 mm, penahanan selama 45 detik menghasilkan kedalaman pengerasan sebesar 11 mm dan penahanan selama 60 detik menghasilkan kedalaman pengerasan sebesar 12 mm. Setelah dilakukan proses tempering pada 500 °C, kedalaman pengerasan efektif yang sesuai dengan target (minimal 8 mm) dapat dicapai dengan proses *flame hardening* dengan waktu penahanan selama 45 detik dan 60 detik dengan kedalaman pengerasan sebesar 9 dan 10 mm.

## 5.2. Saran

1. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut pengaruh jarak *flame head* terhadap benda kerja serta perbandingan campuran antara oksigen dan *acetylene* terhadap kedalaman pengerasan.
2. Perlu dilakukan percobaan perlakuan panas tersebut pada roda kereta api ukuran sebenarnya untuk mendapatkan parameter proses perlakuan panas yang paling tepat.
3. Perlu dilakukan pengujian keausan dan *fatigue* agar diketahui ketahanan aus dan ketahanan *fatigue* dari material yang dihasilkan tersebut.
4. Perlu dilakukan penelitian untuk mendapatkan material dengan sifat mekanik seperti yang dipersyaratkan, tetapi dengan proses yang lebih singkat.





## DAFTAR REFERENSI

- ASM. (1991). *ASM metals handbook Vol. 4: Heat treating*. New York: ASM Handbook Committee
- Budiyanto, Dwi. (2011). *Pembuatan ulang roda kereta api dengan metoda bandage, reverse engineering dengan memanfaatkan kemampuan industri kecil menengah*. Riset Insentif KRT. Jakarta: BPPT
- Callister, W. D. (2007). *Materials sciences and engineering: An introduction, 7th ed.*. New York: John Wiley and Sons.
- Darmawan. (2001). *Teknologi jalan rel*. Bandung: Percetakan Jatayu.
- Davis, J.R. (2002). *Surface hardening of steels*. New York: McGraw-Hill
- Esveld, Coenraad. (2001). *Modern railway track (2nd ed.)*. Zaltbommel: MRT-Productions.
- Hartono. (2011,Sept). *Pengalaman menggunakan roda kereta api dan harapan penggunaan produk lokal*. Makalah disampaikan pada seminar pengembangan sistem transportasi di Indonesia, Bandung.
- Hernandez et.all. (2011). Properties and microstructure of high performance wheels. *Journal of Wear* 271, 374-381
- Jae lee, Seok.(2005). Effect of austenite grain size on martensitic transformation of a low alloy steel. *Materials Science Forum* Vol. 475-479, 3619-3172
- Krauss, George. (1990). *Steel: heat treatment and processing principles*. Ohio: ASM international
- Lingamanik, SivaN., Chen and Bernard. (2011). Thermo-mecanical modelling of residual stresses induced by martensitic phase transformation and cooling during quenching of railway wheels. *Jurnal of Materials processing technology* 266, 119-124
- Panagiotidis, Antonatos A.S., and Tsananas, G.M. (2007). Case depth determination using vicker micro-hardness test method at TRSC/PPC SA. *Journal of Wear* 273, 223-229
- Poshmann, Tsapowetz, Rinhover. (2009). *Heat treatment process and facility for railway wheel*. AFT and Werkstoff Service

- Sahay, Satyam S. (2009). Overview of pearlitic rail steel: accelerated cooling, quenching, microstructure and mechanical properties. *Journal of ASTM* vol.7, 215-222
- Sivaprasad et.al. (2007). Fatigue and fracture behavior of forged and cast railway wheels. *Journal of Wear* 167, 174-179
- Suherman, Wahid. (1988). *Perlakuan Panas*. Surabaya: ITS
- Suratman, Rochim.(1994). *Panduan perlakuan panas*. Bandung: Lembaga Penelitian ITB
- Smith, J.L., Russel, G.M., & Bhatia, S.C. (2009). *Heat treatment of metals vol 1*. Singapore: Alkem Company.
- Tarafderi, S., Sivaprasad, S., Ranganath, V.R. (2007). Comparative assessment of fatigue and fracture behaviour of cast and forged railway wheels. *Journal of Wear* 167, 190-195
- Totten, G.E., Howes, M.A.H. (1997). *Steel Heat Treatment Handbook*. New York: Marcel Dekker, Inc., USA (1997).
- Vander Voort, G.F. (1984). *Metallography principle and practice*. New York: Mc. Grawhill Book Company
- Wang, Kexiu (2010). The probabilistic study of heat treatment process for railroad wheels using ANSYS/PDS. *Jurnal of Materials processing technology* 260, 222-227
- Wang, Kexiu. (2009). Investigation of heat treating of railroad wheel and its effect on braking using finite element analysis. *Jurnal of Materials processing technology* 200, 102-107
- Yokoyama, Hiroyasu. (2002). Development of high strength pearlitic steel rail (SP rail) with excellent wear and damage resistance. *Jurnal of Materials processing technology* 166, 111-115

## Lampiran 1. Hasil pengujian komposisi kimia roda kereta api bekas


**KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN  
POLITEKNIK MANUFAKTUR NEGERI BANDUNG**

 JALAN KANGYAKAN 21, DAGU - BANDUNG 40132, TELEPON (022) 259041 FAKS (022) 259249  
 homepage: <http://www.polman-bandung.ac.id> e-mail: sekretariat@polman-bandung.ac.id

**LAPORAN HASIL PENGUJIAN**

 No. Lab : 263/Spectro/Ext.Polman/VI/2012  
 No. Order : EF-12.0.0169

 Pemesan  
**BPPT**

 Kode Sampel : RKA Metode Uji : Spektrometri (OES)  
 Lokasi Pengujian : Lab. Material - FE Polman Mesin Uji : ARL 3640

 Program : FELAST  
 Hasil Pengujian:

No.	Unsur/Elemen	Nilai Rata-Rata (%)
1	Carbon (C)	0.60618
2	Sulfur (S)	0.00812
3	Manganese (Mn)	0.71074
4	Phosphorus (P)	0.01138
5	Silicon (Si)	0.21522

 Bandung, 20 Juni 2012  
 Ka. Jur. Teknik Pengecoran Logam,

  
 Achmad Sambas, ST., MT.  
 NIP. 197012271995121001

Keterangan:

Hasil pengujian hanya berlaku untuk contoh sampel yang bersangkutan

## Lampiran 2. Hasil pengujian komposisi kimia spesimen hasil pengecoran


**KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN  
POLITEKNIK MANUFAKTUR NEGERI BANDUNG**

 JALAN KAWAYANAN 21, DAGU - BANDUNG 40132, TELEPON (022) 2599041 FAKSIMILE (022) 2502649  
 homepage: <http://www.polman-bandung.ac.id> e-mail: [sukstata@polman-bandung.ac.id](mailto:sukstata@polman-bandung.ac.id)
**LAPORAN HASIL PENGUJIAN**

 No. Lab : 263/Spectro/Ext.Polman/VI/2012  
 No. Order : EF-12.0.0169

 Pemesan  
 BPPT

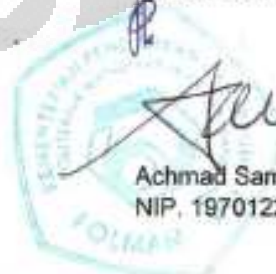
 Kode Sampel : RKA Metode Uji : Spektrometri (OES)  
 Lokasi Pengujian : Lab. Material - FE Polman Mesin Uji : ARL 3640

 Program : FELAST  
 Hasil Pengujian :

No.	Unsur/Elemen	Nilai Rata-Rata (%)
1	Carbon (C)	0.60371
2	Sulfur (S)	0.00406
3	Manganese (Mn)	0.80323
4	Phosphorus (P)	0.01723
5	Silicon (Si)	0.22713

Bandung, 20 Juni 2012

Ka. Jur. Teknik Pengecoran Logam,


 Achmad Sambas, ST., MT.  
 NIP. 197012271995121001

Keterangan:

Hasil pengujian hanya berlaku untuk contoh sampel yang bersangkutan

## Lampiran 3. Hasil pengujian kekuatan tarik rata-rata spesimen hasil pengecoran


**KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN  
POLITEKNIK MANUFAKTUR NEGERI BANDUNG**

 JALAN KANAYAKAN TI. DAGU - BANDUNG 40133, TELEPON (022) 2592041 FAKS (022) 2592049  
 homepage : <http://www.polman-bandung.ac.id> e-mail : sekretariat@polman-bandung.ac.id

**LAPORAN HASIL PENGUJIAN**

 No. Lab : 263/Tarik/Ext.Polman/VI/2012  
 No. Order : EF-12.0.0169

 Pemesan  
 BPPT

 Kode Sampel : Roda Kereta Metode Uji : Tensile Test  
 Lokasi Pengujian : Lab. Material - FE Polman Mesin Uji : Hung Ta – 5201, 18 Ton

Hasil Pengujian :

No.	Kondisi	$\sigma_y$ (MPa)	UTS (MPa)	Elongasi (%)
1	As-cast	754.5	881.3	3.3

 Bandung, 20 Juni 2012  
 Ka. Jur. Teknik Pengecoran Logam,


 Achmad Sambas, ST., MT.  
 NIP. 197012271995121001

Keterangan:

Hasil pengujian hanya berlaku untuk contoh sampel yang bersangkutan

Lampiran 4. Hasil pengujian kekuatan tarik rata-rata spesimen hasil *normalizing*

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN  
POLITEKNIK MANUFAKTUR NEGERI BANDUNG**

JALAN KADAWAKAN 21, DAHO - BANDUNG 40135, TELEPON (022) 2509041-5, FAKS (022) 2502649  
 laman web : <http://www.polman-bandung.ac.id> e-mail : sekretariat@polman-bandung.ac.id

**LAPORAN HASIL PENGUJIAN**

No. Lab : 263/Tarik/Ext.Polman/VI/2012  
 No. Order : EF-12.0.0169


Pemesan  
 BPPT

Kode Sampel : Roda Kereta Metode Uji : Tensile Test  
 Lokasi Pengujian : Lab. Material - FE Polman Mesin Uji : Hung.Ta - 5201, 18 Ton

Hasil Pengujian :

No.	Kondisi	$\sigma_y$ (MPa)	UTS (MPa)	Elongasi (%)
1	As-normalized	794.8	906.1	9.5

Bandung, 20 Juni 2012  
 Ka. Jur. Teknik Pengecoran Logam,

  
 Achmad Sambas, ST., MT.  
 NIP. 197012271995121001

Keterangan:

Hasil pengujian hanya berlaku untuk contoh sampel yang bersangkutan

## Lampiran 5. Hasil pengujian kekerasan spesimen hasil pengecoran


**KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN  
POLITEKNIK MANUFAKTUR NEGERI BANDUNG**

 JALAN KANAYAKAN 21, DAGO - BANDUNG 40135, TELEPON (022) 2509241 FAKSIMILE: (022) 2502648  
 Homepage: <http://www.pnlman-bandung.ac.id> e-mail: [sukretuslut@pnlman-bandung.ac.id](mailto:sukretuslut@pnlman-bandung.ac.id)
**LAPORAN HASIL PENGUJIAN**

 No. Lab : 263/Keras/Ext.Polman/VI/2012  
 No. Order : EF-12.0.0169

 Pemesan  
 BPPT

 Kode Sampel : Roda Kereta Metode Uji : Rockwell Hardness Test  
 Lokasi Pengujian : Lab. Material - FE Polman Mesin Uji : Fr-1e (Future -Tech Corp.)

Hasil Pegujian :

No.	Kondisi	Kekerasan (HRC)			
		I	II	III	AVG
1	As-cast	22.2	21.8	22.0	22.0

 Bandung, 20 Juni 2012  
 Ka. Jur. Teknik Pengecoran Logam,


 Achmad Sambas, ST., MT.  
 NIP. 197012271995121001

Keterangan:

Hasil pengujian hanya berlaku untuk contoh sampel yang bersangkutan

Lampiran 6. Hasil pengujian kekerasan spesimen hasil *normalizing*
**KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN  
POLITEKNIK MANUFAKTUR NEGERI BANDUNG**

 JALAN KANAYAKAN 21, DAQD - BANDUNG 40135, TELEPON (022) 250041 FAKSIMILE (022) 250269  
 homepage: <http://www.polman-bandung.ac.id> e-mail: [sekretariat@polman-bandung.ac.id](mailto:sekretariat@polman-bandung.ac.id)
**LAPORAN HASIL PENGUJIAN**

 No. Lab : 263/Keras/Ext.Polman/VI/2012  
 No. Order : EF-12.0.0169

 Pemesan  
 BPPT

 Kode Sampel : Roda Kereta Metode Uji : Rockwell Hardness Test  
 Lokasi Pengujian : Lab. Material - FE Polman Mesin Uji : Fr-1e (Future -Tech Corp.)

Hasil Pegujian :

No.	Kondisi	Kekerasan (HRC)			
		I	II	III	AVG
1	As-normalized	24.1	23.9	24	24.00

 Bandung, 20 Juni 2012  
 Ka. Jur. Teknik Pengecoran Logam,

Achmad Sambas, ST., MT.  
 NIP. 197012271995121001

Keterangan:

Hasil pengujian hanya berlaku untuk contoh sampel yang bersangkutan



Lampiran 7. Hasil pengujian kekerasan spesimen hasil *flame hardening*
**KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN  
POLITEKNIK MANUFAKTUR NEGERI BANDUNG**

 JALAN KANAYAKAN 21, DAUD - BANDUNG 40175, TELEPON (022) 2509241 FAKSIMILE (022) 2502449  
 homepage: http://www.polman-bandung.ac.id e-mail: sekretariat@polman-bandung.ac.id

**LAPORAN HASIL PENGUJIAN**

 No. Lab : 263/Keras/Ext.Polman/VI/2012  
 No. Order : EF-12.0.0169

 Pemesan  
 BPPT

 Kode Sampel : Roda Kereta Metode Uji : Rockwell Hardness Test  
 Lokasi Pengujian : Lab. Material - FE Polman Mesin Uji : Fr-1e (Future –Tech Corp.)

Hasil Pegujian :

No.	Kondisi	Kekerasan (HRC)			
		I	II	III	AVG
1	As-hardened	57.30	57.10	57.60	57.33

 Bandung, 20 Juni 2012  
 Ka. Jur. Teknik Pengecoran Logam,

Achmad Sambas, ST., MT.  
 NIP. 197012271995121001

Keterangan:

Hasil pengujian hanya berlaku untuk contoh sampel yang bersangkutan

Lampiran 8. Hasil pengujian kekerasan spesimen hasil *tempering*
**KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN  
POLITEKNIK MANUFAKTUR NEGERI BANDUNG**

 JALAN KANAYARAN 21, DAMBO - BANDUNG - 40132, TELEPON (022) 290241 - 022) 290249  
 homepage: <http://www.polman-bandung.ac.id> e-mail: sekretariat@polman-bandung.ac.id

**LAPORAN HASIL PENGUJIAN**

 No. Lab : 203/Keras/External Polman/VI/2012  
 No. Order : EF-12.0.0169

 Pemesan  
**BPPT**

 Kode Sample : Roda Kereta ; Sample III ( Mn:0,83323% )  
 As Normalising 850°C ; Hardening 800°C & Tempering

 Metoda Uji :  
 Rockwell Hardness

Lokasi Pengujian : Lab. Material FE - Polman

 Mesin Uji :  
 FR-1e (Future-Tech Corp.)

Hasil Pengujian :

No. Urut Pengujian	Hasil Pengujian (HRC)		
	Tempering 450°C ; 1 jam	Tempering 500°C ; 1 jam	Tempering 550°C ; 1 jam
1	42,0	36,3	32,3
2	42,1	36,2	30,9
3	40,8	35,8	30,8
<b>Avg</b>	<b>41,6</b>	<b>36,0</b>	<b>31,3</b>

 Bandung, 20 Juni 2012  
 Ka. Jur. Teknik Pengecoran Logam,


 Achmad Sambas, ST., MT.  
 NIP. 197012271995121001

 Keterangan :  
 Hasil Pengujian hanya berlaku untuk contoh sample yang bersangkutan

Lampiran 9. Hasil pengujian distribusi kekerasan proses *flame hardening*
**KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN  
POLITEKNIK MANUFAKTUR NEGERI BANDUNG**

 JALAN KANDAYAN 1, 11400 - BANDUNG 40132, TELEPON (022) 259041 FAKS (022) 259049  
 Homepage : <http://www.polman-bandung.ac.id> e-mail : [sakbertata@polman-bandung.ac.id](mailto:sakbertata@polman-bandung.ac.id)
**LAPORAN HASIL PENGUJIAN**

No. Lab : 263/Keras/Ext.Polman/VI/2012  
 No. Order : EF-12.0.0169  
 Pemesan  
**BPPT**  
 Kode Sampel : Roda Kereta Metode Uji : Rockwell Hardness Test  
 Lokasi Pengujian : Lab. Material - FE Polman Mesin Uji : Fr-1e (Future –Tech Corp.)  
 Hasil Pegujian :

No	Jarak dari permukaan (mm)	Kekerasan Rata-Rata (HRC)		
		Spesimen dengan waktu tahan 30 dtk	Spesimen dengan waktu tahan 45 dtk	Spesimen dengan waktu tahan 60 dtk
1	0.00	57.27	57.60	57.83
2	1.00	57.23	57.53	57.73
3	2.00	57.07	57.23	57.57
4	3.00	56.57	57.10	57.23
5	4.00	56.33	56.50	57.07
6	5.00	55.47	55.57	56.77
7	6.00	52.13	55.43	56.57
8	7.00	50.23	53.43	55.53
9	8.00	24.17	52.43	53.53
10	9.00	24.13	52.10	52.43
11	10.00	24.03	51.27	52.03
12	11.00		50.17	51.67
13	12.00		24.13	50.13
14	13.00		24.13	24.17
15	14.00		24.10	24.10
16	15.00			24.07

Bandung, 20 Juni 2012  
 Ka. Jur. Teknik Pengecoran Logam,

Achmad Sambas, ST., MT.  
 NIP. 197012271995121001

Keterangan:  
 Hasil pengujian hanya berlaku untuk contoh sampel yang bersangkutan

Lampiran 10. Hasil pengujian distribusi kekerasan proses *tempering*
**KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN  
POLITEKNIK MANUFAKTUR NEGERI BANDUNG**

 JALAN KANAYARAN 21, DASAR - BANDUNG 40132, TELPON (022) 239041 FAKSIMILI (022) 230049  
 homepage: <http://www.polman-bandung.ac.id> e-mail: [sekretariat@polman-bandung.ac.id](mailto:sekretariat@polman-bandung.ac.id)
**LAPORAN HASIL PENGUJIAN**

 No. Lab : 263/Keras/Ext.Polman/VI/2012  
 No. Order : EF-12.0.0169

 Pemesan  
**BPPT**

 Kode Sampel : Roda Kereta Metode Uji : Rockwell Hardness Test  
 Lokasi Pengujian : Lab. Material - FE Polman Mesin Uji : Fr-1e (Future -Tech Corp.)

Hasil Pegujian :

No	Jarak dari permukaan (mm)	Kekerasan Rata-Rata (HRC)		
		Spesimen dengan waktu tahan 30 dtk	Spesimen dengan waktu tahan 45 dtk	Spesimen dengan waktu tahan 60 dtk
1	0.00	36.07	36.13	36.17
2	1.00	36.03	36.07	36.13
3	2.00	36.00	36.03	36.10
4	3.00	35.63	36.00	36.03
5	4.00	35.40	35.67	36.00
6	5.00	35.27	35.50	35.83
7	6.00	34.27	35.27	35.67
8	7.00	30.13	34.73	35.53
9	8.00	24.13	34.50	34.73
10	9.00	24.03	34.23	34.47
11	10.00	24.03	32.30	34.20
12	11.00		30.07	31.43
13	12.00		24.10	30.03
14	13.00		24.03	24.10
15	14.00		24.00	24.00
16	15.00			24.00

 Bandung, 20 Juni 2012  
 Ka. Jur. Teknik Pengecoran Logam,


 Achmad Sambas, ST., MT.  
 NIP. 197012271995121001

Keterangan:

Hasil pengujian hanya berlaku untuk contoh sampel yang bersangkutan