



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH BESAR DEFORMASI PADA CANAI HANGAT  
500 °C , 550 °C, DAN 600 °C TERHADAP UKURAN BUTIR  
FERIT DAN PENGARUHNYA TERHADAP KETAHANAN  
*HYDROGEN INDUCED CRACKING* PADA BAJA KARBON  
RENDAH MELALUI *SEVERE PLASTIS DEFORMATION***

**SKRIPSI**

**R BASTIAN M  
0706268814**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL  
DEPOK  
JUNI 2011**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH BESAR DEFORMASI PADA CANAI HANGAT  
500 °C , 550 °C, DAN 600 °C TERHADAP UKURAN BUTIR  
FERIT DAN PENGARUHNYA TERHADAP KETAHANAN  
*HYDROGEN INDUCED CRACKING* PADA BAJA KARBON  
RENDAH MELALUI *SEVERE PLASTIS DEFORMATION***

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**R BASTIAN M  
0706268814**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL  
DEPOK  
JUNI 2011**

**HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS**

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

**Nama** : R Bastian M

**NPM** : 0706268814

**Tanda Tangan** : 

**Tanggal** : 23 Juni 2011

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : R Bastian M  
NPM : 0706268814  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul Skripsi : Pengaruh Besar Deformasi Pada Canai Hangat 500 °C , 550 °C, Dan 600 °C Terhadap Ukuran Butir Ferit Dan Pengaruhnya Terhadap Ketahanan *Hydrogen Induced Cracking* Pada Baja Karbon Rendah Melalui *Severe Plastic Deformation*.

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

### DEWAN PENGUJI

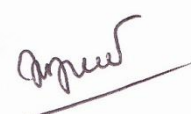
Pembimbing : Ir. Rini Riastuti, M.Sc

(  )

Penguji : Dr. Ir. Dedi Priadi D.E.A

(  )

Penguji : Dr. Ir. Myrna Ariati Mochtar M.Si

(  )

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 23 Juni 2011

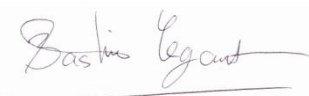
## KATA PENGANTAR

Puji syukur saya ucapkan kepada Allah SWT, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Program Studi Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Ir. Rini Riastuti, M.Sc, selaku pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini.
- (2) Seluruh dosen dan staf pengajar Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI yang telah memberikan pengetahuan dan ilmu yang bermanfaat.
- (3) Orang tua dan keluarga saya yang senantiasa mendoakan saya, memberikan bantuan baik moril maupun materil.
- (4) Astrini Wulandari dan Lendi Trigondo selaku rekan kerja yang telah banyak membantu saya dalam penelitian ini.
- (5) Bapak Budi dari toko sumber makmur mandiri yang telah mensuplai bahan-bahan keperluan untuk skripsi ini.
- (6) Seluruh karyawan, staf, serta teknisi Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI.
- (7) Rekan-rekan asisten laboratorium metalurgi mekanik dan metalografi yang telah membantu pengujian yang dibutuhkan dalam skripsi ini.
- (8) Seluruh rekan-rekan metalurgi dan material 2007 yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata, penulis berharap Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi semua pihak dalam pengembangan ilmu.

Depok, 23 Juni 2011



Penulis

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

---

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

Nama : R Bastian M  
NPM : 0706268814  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Departemen : Metalurgi dan Material  
Fakultas : Teknik  
Jenis Karya : Skripsi

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

Pengaruh Besar Deformasi Pada Canai Hangat 500 °C , 550 °C, Dan 600 °C  
Terhadap Ukuran Butir Ferit Dan Pengaruhnya Terhadap Ketahanan *Hydrogen Induced Cracking* Pada Baja Karbon Rendah Melalui *Severe Plastic Deformation*

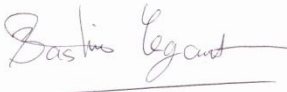
Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengaiimedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 23 Juni 2011

Yang menyatakan



(R Bastian M)

## ABSTRAK

Nama : R Bastian M  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul : Pengaruh Besar Deformasi Pada Canai Hangat 500 °C, 550 °C, dan 600 °C Terhadap Ukuran Butir Ferit Dan Pengaruhnya Terhadap Ketahanan *Hydrogen Induced Cracking* Pada Baja Karbon Rendah Melalui *Severe Plastic Deformation*.

Studi terhadap penghalusan butir terus dikembangkan untuk mendapatkan sifat mekanis yang lebih baik pada baja karbon rendah. Slab baja karbon rendah berbentuk tangga dideformasi dengan metode *warm rolling* dengan temperatur 500 °C, 550 °C, dan 600 °C untuk mendapatkan butir halus. Slab baja karbon rendah berbentuk tangga dideformasi sebesar 50 %, 66,67 %, 75 %, dan 80% di setiap temperatur, kemudian didinginkan dengan air. Rekristalisasi dinamis terjadi pada temperatur *warm working* di penelitian ini. Pengujian kekerasan dan *hydrogen charging test* dilakukan. Ketahanan baja karbon rendah terhadap serangan hidrogen dapat ditingkatkan dengan penghalusan butir ferit. Besar butir yang dihasilkan dari *warm rolling* mempengaruhi kekerasan dan ketahanannya terhadap serangan hidrogen.

Kata kunci: *warm rolling*, penghalusan butir, kekerasan, *hydrogen induced cracking* dan rekristalisasi dinamis.

## ABSTRACT

Name : R Bastian M  
Study Program : Metallurgy and Materials Engineering  
Title : Effect of Deformation on Warm Rolling 500 °C, 550 °C, and 600 °C to Ferrite Grain Size and Hydrogen Induce Cracking Resistance in Low Carbon Steel Through *Severe Plastic Deformation*.

Study of grain refinement have been developed to obtain better mechanical properties in low carbon steel. Wedge Shaped low carbon steel slabs were deformed with warm rolling method at temperature 500 °C, 550 °C, and 600 °C to obtain the refine grains. Wedge Shaped low carbon steel slabs were deformed with degree of deformation 50 %, 66,67 %, 75 %, and 80%. Dynamic recrystallization was confirmed at warm working temperature in this study. Hardness and hydrogen charging test had been done. Low carbon steel resistance to hydrogen attack can be improved with grain refinement. Grain size which been resulted from warm rolling process has an effect to hardness and hydrogen attack resistance.

Keywords: warm rolling, grain refinement, hardness, hydrogen induced cracking, and Dynamic recrystallization.



# DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	v
ABSTRAK .....	vi
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	xii
DAFTAR TABEL.....	xiv
DAFTAR RUMUS .....	xv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvi
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang Penelitian .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	2
1.3 Tujuan Penelitian .....	3
1.4 Ruang Lingkup.....	3
1.4.1 Material .....	3
1.4.2 Parameter Penelitian.....	3
1.4.3 Tempat Penelitian.....	4
1.5 Sistematika Penulisan .....	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA .....	6
2.1 Baja Karbon .....	6
2.1.1 Baja Karbon Rendah .....	7
2.2 Pengaruh Deformasi Plastis .....	8
2.3 Pengaruh Ukuran Butir Terhadap Sifat Mekanis Baja.....	10
2.4 Mekanisme Penguatan Dengan Penghalusan Butir.....	11
2.5 Proses Canai .....	13
2.6 <i>Thermo Mechanical Controlled Process</i> (TMCP).....	15
2.6.1 Canai Hangat.....	16
2.6.2 <i>Deformation Band</i> .....	17

2.6.3 <i>Strain Rate</i> .....	17
2.7 Rekoveri, Rekristalisasi, dan Pertumbuhan Butir .....	19
2.7.1 Rekoveri .....	20
2.7.2 Rekristalisasi .....	21
2.7.2.1 Rekristalisasi Dinamis.....	22
2.7.2.1 Rekristalisasi Statis .....	23
2.7.3 Pertumbuhan Butir .....	23
2.7.4 <i>Subgrain</i> .....	24
2.8 Pengaruh Pendinginan Cepat Pada Sifat Mekanis Baja.....	25
2.9 <i>Hydrogen Induced Cracking</i> pada Baja Karbon Rendah.....	26
2.9.1 Mekanisme Difusi Atom Hidrogen kedalam Logam .....	28
2.9.2 <i>Hydrogen Embrittlement</i> .....	30
2.9.3 Cacat Dalam .....	32
<b>BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	<b>33</b>
3.1 Diagram Alir Penelitian .....	33
3.2 Alat dan Bahan.....	34
3.2.1 Alat.....	34
3.2.2 Bahan .....	34
3.3 Prosedur Penelitian.....	35
3.3.1 Pemilihan Material.....	35
3.3.2 Preparasi Benda Uji .....	36
3.3.3 Proses TMCP dan <i>Warm Rolling</i> .....	37
3.3.4 Preparasi, Pengujian Metalografi dan Pengamatan Mikrostruktur .....	39
3.3.5 Pengukuran Besar Butir <i>Equiaxed</i> .....	40
3.3.6 Pengukuran Besar Butir <i>Non-Equiaxed</i> .....	42
3.3.7 Pengujian Kekerasan.....	43
3.3.8 Pengujian <i>Hydrogen Charging Test</i> .....	45
3.3.7 Pengamatan <i>Scanning Electron Microscope</i> .....	45
<b>BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	<b>46</b>
4.1 Hasil Pengukuran Dimensi Benda Uji .....	46
4.2 Hasil Pengamatan Metalografi.....	49

4.3 Hasil Perhitungan Butir.....	59
4.4 Pengujian Kekerasan.....	62
4.4.1 Hubungan Kekerasan Terhadap Kekuatan.....	66
4.6 Pengujian <i>Hydrogen Charging Test</i> .....	68
BAB 5 KESIMPULAN.....	72
REFERENSI .....	74



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Transformasi Fasa Pada Baja Karbon .....	7
Gambar 2.2 Kombinasi Elongasi dan Kekuatan untuk Berbagai Jenis Baja Karbon Rendah .....	8
Gambar 2.3 Analogi Pergerakan Dislokasi .....	9
Gambar 2.4 Pengaruh Bear Butir Terhadap Nilai Kekuatan dan Ketangguhan	11
Gambar 2.5 Ilustrasi batas butir dan pergerakan dislokasi .....	12
Gambar 2.6 Skema efek dari variasi penguatan material .....	13
Gambar 2.7 Skematik Proses Canai .....	14
Gambar 2.8 Transformasi Morfologi Butir Setelah Proses Canai a) <i>elongated grain</i> b) sebelum dideformasi ( <i>equiaxed grain</i> ) b) setelah dideformasi ( <i>elongated grain</i> ) .....	14
Gambar 2.9 Perbedaan Mikrostruktur Antara Proses Canai Konvensional dan Proses TMCP .....	16
Gambar 2.10 Mekanisme Terbentuknya Deformation Band .....	17
Gambar 2.11 Mikrostruktur AISI SS 316 .....	18
Gambar 2.12 Kurva <i>stress-strain</i> dengan berbagai <i>strain rate</i> pada pengerolan suhu 750 <sup>0</sup> C .....	18
Gambar 2.13 Pembentukan Sub-butir Skematik Proses Anil a) Butir yang Terdeformasi. b) Rekoveri c) Rekrystalisasi Sebagian d) Rekrystalisasi Penuh e) Pertumbuhan Butir f) <i>Abnormal Grain Growth</i> .....	20
Gambar 2.14 Skematik Perubahan Morfologi Butir yang Terdeformasi .....	22
Gambar 2.15 Skematis Proses Recovery, Rekrystalisasi dan Pertumbuhan Butir .....	23
Gambar 2.16 Model Dekohesi .....	28
Gambar 2.17 Model Plastis .....	29
Gambar 2.18 Skema Mekanisme <i>Hydrogen Blistering</i> .....	31
Gambar 2.19 Mekanisme <i>Hydrogen Blistering</i> .....	32
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian .....	33
Gambar 3.2 Skematik <i>Optical Emission Spectroscopy</i> .....	35

Gambar 3.3 Sketsa Benda Uji .....	36
Gambar 3.4 Ilustrasi Benda Uji Sebelum Dipreparasi .....	36
Gambar 3.5 Skematik Pengujian Benda Uji A, B, C, dan D .....	37
Gambar 3.6 Skematik Pengujian Benda Uji E, F, G, dan H .....	38
Gambar 3.7 Skematik Pengujian Benda Uji I, J, K, dan L .....	38
Gambar 3.8 <i>Furnace</i> Carbolite .....	39
Gambar 3.9 Mesin Onoroll dan Rangkaian Alat .....	39
Gambar 3.10 Mikroskop Optik .....	40
Gambar 3.11 Lingkaran yang Digunakan Untuk Penghitungan Besar Butir Dengan Metode Intercept Heyn .....	41
Gambar 3.12 Metode <i>Straight Line Test</i> .....	43
Gambar 3.13 Prinsip Pengujian Kekerasan Dengan Metode <i>Rockwell B</i> .....	44
Gambar 3.14 Rangkaian Proses <i>Hydrogen Charging</i> .....	45
Gambar 3.15 <i>Scanning Electron Microscope</i> .....	45
Gambar 4.1 Benda Uji Yang Telah Dideformasi .....	46
Gambar 4.2 Mekanisme <i>Roll Flatening</i> .....	47
Gambar 4.3 Mikrostruktur Sampel <i>Bulk</i> , Etsa Nital 2% .....	49
Gambar 4.4 Mikrostruktur Sampel <i>Reheating</i> , Etsa Nital 2% (a) 500 °C (b) 550 °C (c) 600 °C .....	50
Gambar 4.5 Sampel <i>Rolling</i> 500 °C, (a) Sampel A Deformasi 50 %, (b) Sampel B Deformasi 66,67 %, (c) Sampel C Deformasi 75 %, dan (d) Sampel D Deformasi 80 %. Nital 4 %, Perbesaran 200x ..	51
Gambar 4.6 Sampel <i>Rolling</i> 500 °C, (a) Sampel A Deformasi 50 %, (b) Sampel B Deformasi 66,67 %, (c) Sampel C Deformasi 75 %, dan (d) Sampel D Deformasi 80 %. Nital 4 %, Perbesaran 500x ..	52
Gambar 4.7 Sampel <i>Rolling</i> 550 °C, (a) Sampel E Deformasi 50 %, (b) Sampel F Deformasi 66,67 %, (c) Sampel G Deformasi 75 %, dan (d) Sampel H Deformasi 80 %. Nital 4 %, Perbesaran 100x ..	53
Gambar 4.8 Sampel <i>Rolling</i> 550 °C, (a) Sampel E Deformasi 50 %, (b) Sampel F Deformasi 66,67 %, (c) Sampel G Deformasi 75 %, dan (d) Sampel H Deformasi 80 %. Nital 4 %, Perbesaran 500x ..	54
Gambar 4.9 Sampel <i>Rolling</i> 600 °C, (a) Sampel I Deformasi 50 %, .....	

(b) Sampel J Deformasi 66,67 %, (c) Sampel K Deformasi 75 %, dan (d) Sampel L Deformasi 80 %. Nital 4 %, Perbesaran 100x ...	55
Gambar 4.10 Sampel <i>Rolling</i> 600 °C, (a) Sampel E Deformasi 50 %, (b) Sampel F Deformasi 66,67 %, (c) Sampel G Deformasi 75 %, dan (d) Sampel H Deformasi 80 %. Nital 4 %, Perbesaran 500x ..	56
Gambar 4.11 Perbedaan antara <i>continuous (normal) grain growth</i> dan <i>discontinuous (abnormal) grain growth</i> .....	58
Gambar 4.12 Grafik Pengaruh Deformasi Terhadap Ukuran Butir Pada Temperatur 500 °C .....	60
Gambar 4.13 Grafik Pengaruh Deformasi Terhadap Ukuran Butir Pada Temperatur 550 °C .....	60
Gambar 4.14 Grafik Pengaruh Deformasi Terhadap Ukuran Butir Pada Temperatur 600 °C .....	61
Gambar 4.15 Grafik Pengaruh Deformasi Terhadap Ukuran Butir Pada Temperatur 500 °C, 550 °C, dan 600 °C .....	61
Gambar 4.16 Grafik Pengaruh Deformasi Terhadap Kekerasan Pada Temperatur 500 °C .....	64
Gambar 4.17 Grafik Pengaruh Deformasi Terhadap Kekerasan Pada Temperatur 550 °C .....	64
Gambar 4.18 Grafik Pengaruh Deformasi Terhadap Kekerasan Pada Temperatur 600 °C .....	65
Gambar 4.19 Grafik Pengaruh Deformasi Terhadap Kekerasan Pada Temperatur 500 °C, 550 °C, dan 600 °C .....	65
Gambar 4.20 Grafik Pengaruh Deformasi Terhadap Kekuatan Pada Temperatur 500 °C, 550 °C, dan 600 °C .....	67
Gambar 4.21 Grafik Kekerasan Benda Uji Sebelum dan Setelah <i>Hydrogen Charging</i> .....	69

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Komposisi Sampel Baja Karbon Rendah .....	35
Tabel 3.2	Simbol dan Penandaan yang Berhubungan dengan Pengujian Rockwell B... ..	44
Tabel 4.1	Hasil Pengukuran Dimensi Benda Uji Sebelum Dan Sesudah Proses Pencanaan 500°C, 550°C, dan 600°C dengan Pendinginan Air.....	47
Tabel 4.2	Hasil Pengukuran <i>Strain Rate</i> Benda Uji Sebelum Dan Sesudah Proses Pencanaan 500°C, 550°C, dan 600°C dengan Pendinginan Air .....	48
Tabel 4.3	Pengukuran Besar Butir Benda Uji Sebelum dan Setelah Proses Pencanaan .....	59
Tabel 4.4	Hasil pengukuran Kekerasan .....	63
Tabel 4.5	Hasil pengukuran <i>Hydrogen Charging</i> .....	68

## DAFTAR RUMUS

Persamaan 2.1 Persamaan Hall-Petch .....	10
Persamaan 2.2 Konversi BHN-UTS (MPa) .....	10
Persamaan 2.3 Konversi BHN-UTS (Psi) .....	10
Persamaan 2.4 Perhitungan <i>Strain</i> .....	15
Persamaan 2.5 Perhitungan % Deformasi .....	15
Persamaan 2.6 Persamaan Zonner-Hollomon .....	18
Persamaan 2.7 Perhitungan <i>Strain Rate</i> .....	19
Persamaan 2.8 Reaksi Evolusi Hidrogen .....	30
Persamaan 2.9 Reaksi Evolusi Hidrogen .....	31
Persamaan 3.1 Rumus Jumlah Titik Potok Persatuan Panjang .....	41
Persamaan 3.2 Rumus Panjang Garis Terpotong .....	41
Persamaan 3.3 Rumus <i>G Number</i> .....	42
Persamaan 3.4 Perhitungan besar Butir <i>Non-Equiaxed</i> .....	42
Persamaan 4.1 Perhitungan % Deformasi .....	46
Persamaan 4.2 Konversi BHN-UTS (MPa) .....	67



## DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1. Hasil Uji Komposisi
- Lampiran 2. Grafik Akuisisi *Rolling* Pada Temperatur 500 °C
- Lampiran 3. Grafik Akuisisi *Rolling* Pada Temperatur 550 °C
- Lampiran 4. Grafik Akuisisi *Rolling* Pada Temperatur 600 °C
- Lampiran 5. Tabel Konversi Nilai Kekerasan ASTM E140
- Lampiran 6. Tabel Konversi Nilai Kekerasan ASTM E140
- Lampiran 7. Tabel Konversi Nilai Kekerasan ASTM E140



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pada saat ini, penggunaan baja sudah sangat luas, mulai dari peralatan rumah tangga hingga komponen industri berteknologi tinggi. Penggunaan baja dapat dijadikan patokan maju suatu negara. Baja karbon, material rekayasa yang paling banyak digunakan, diperkirakan penggunaannya mencapai 85% total produksi tahunan di seluruh dunia<sup>[1]</sup>. Baja merupakan bahan dasar yang utama untuk industri, seperti industri minyak dan gas, dan manufaktur. Kemajuan dalam sektor industri akan mempengaruhi perkembangan material. Perkembangan dalam dunia industri baja untuk menghasilkan baja dengan kekuatan yang tinggi tanpa mengurangi sifat ketangguhannya terus dilakukan untuk menyesuaikan kondisi pada pengaplikasiannya. Oleh karena itu, dilakukan riset bagaimana memperoleh material baru atau modifikasi dari material yang sudah ada untuk memenuhi kebutuhan industri.

Penggunaan Baja karbon rendah (%wtC < 0,25 %) masih mendominasi pada dunia industri. Baja karbon rendah memiliki kekuatan yang sangat rendah namun memiliki keuletan yang sangat tinggi sehingga membuat baja ini mudah dibentuk dan memiliki kemampuan yang baik<sup>[2]</sup>. Selain itu, baja karbon rendah banyak dipakai karena memiliki nilai ekonomis yang tinggi dibanding baja lainnya. Baja karbon rendah merupakan salah satu baja yang sering digunakan sebagai material pipa. Ketahanan korosi pada baja karbon rendah lebih tinggi daripada baja karbon menengah dan baja karbon tinggi. Sifat dari suatu baja tergantung berdasarkan struktur fasa yang membentuknya. Ferrite-pearlite merupakan struktur yang sering muncul pada baja karbon rendah. Sifat mekanik dari struktur ferrite-pearlite ini dipengaruhi besar butir ferit. Ada beberapa metode yang dapat digunakan untuk memperhalus butir ferit-pearlit ini, antara lain: modifikasi komposisi kimia, normalisasi, deformasi plastis melalui pengerolan terkendali, pendinginan cepat, dan pengerjaan hangat / *warm working*.

Salah satu pengembangan proses untuk menghasilkan baja dengan sifat-sifat tersebut yaitu dengan menggunakan proses kontrol terhadap mikrostruktur

pada saat proses manufaktur yang dapat dilakukan dengan menggunakan proses *Thermomechanical Control Process* (TMCP). Proses ini digunakan untuk menghaluskan ukuran butir ferit yang dapat memperbaiki sifat kekuatannya maupun ketangguhan dari baja<sup>[3]</sup>. Proses TMCP ini merupakan pengerjaan hangat (*warm working*) yang dilakukan pada temperatur kerja diantara pengerjaan panas dan pengerjaan dingin ( $500^{\circ}\text{C} - 800^{\circ}\text{C}$ ) sehingga material logam dapat menghasilkan struktur mikro yang halus. Deformasi yang terjadi dengan aplikasi temperatur pada rentang ini diharapkan tidak terlalu besar, seperti pada pengerjaan panas. Selain itu kualitas permukaan dan kontrol dimensionalnya terbukti lebih baik daripada pengerjaan panas.<sup>(4,5)</sup>

Proses *warm working* yang dilakukan adalah dengan *warm rolling* atau *ferritic rolling*. Selain itu, dengan adanya proses penghalusan butir diharapkan fenomena inklusi atom hidrogen pada kisi-kisi butir akan semakin sulit dengan demikian meningkatkan ketahanan baja terhadap ancaman retak akibat inklusi hidrogen (*Hydrogen Induced Cracking*).

Penelitian ini dilakukan untuk mempelajari perubahan mikrostruktur setelah dilakukan deformasi dengan temperatur canai hangat (*warm rolling* atau *ferritic rolling*) dan pengaruhnya terhadap ketahanan *Hydrogen Induced Cracking* (HIC).

## 1.2 Perumusan Masalah

Besarnya kebutuhan industri terhadap pemakaian baja untuk berbagai aplikasi mendorong dilakukannya beberapa penelitian agar mendapatkan sifat baja yang lebih baik dengan harga yang lebih ekonomis. Penggunaan *hot working* yang membutuhkan energi panas yang mahal serta pengerjaan *cold working* yang memerlukan *working force* yang tinggi merupakan faktor pemicu untuk melakukan pengerjaan baja pada temperatur yang lebih rendah atau biasa disebut dengan *warm working*<sup>[6]</sup>. Selama pengerjaan hangat pada baja, berbagai macam perubahan mikrostruktur ( *dynamic recovery* dan *dynamic strain aging* ) dapat terjadi dan mampu mengubah mikrostruktur akhir serta sifat-sifat mekanik baja<sup>[7]</sup>.

Masalah yang akan dikaji dalam penelitian ini adalah untuk melihat pengaruh *Severe Plastic Deformation* pada temperatur  $500^{\circ}\text{C}$ ,  $550^{\circ}\text{C}$ , dan  $600^{\circ}\text{C}$

dengan deformasi sebesar 50%, 66,7%, 75%, dan 80% dalam rangkaian proses *warm rolling* terhadap mikrostruktur serta ketahanan korosi akan adanya gas hidrogen pada baja karbon rendah.

### 1.3 Tujuan Penelitian

1. Mengamati perubahan mikrostruktur pada baja karbon rendah setelah *warm rolling* melalui *Severe Plastic Deformation* pada temperatur 500<sup>0</sup>C, 550<sup>0</sup>C, dan 600<sup>0</sup>C.
2. Mengamati kekerasan pada baja karbon rendah hasil proses *warm rolling* melalui *Severe Plastic Deformation* pada temperatur 500<sup>0</sup>C, 550<sup>0</sup>C, dan 600<sup>0</sup>C.
3. Membandingkan pengaruh bentuk benda uji *wedge shaped* dengan yang berbentuk balok terhadap sifat mekanik dan ukuran hasil akhir butir
4. Menagamati ketahanan *Hydrogen Induced Cracking* pada baja karbon rendah hasil proses *warm rolling* melalui *Severe Plastic Deformation* pada temperatur 500<sup>0</sup>C, 550<sup>0</sup>C, dan 600<sup>0</sup>C.

### 1.4 Ruang Lingkup

#### 1.4.1 Material

Penelitian menggunakan *slab* yang tergolong baja karbon rendah

#### 1.4.2 Parameter Penelitian

1. Temperatur Canai  
Temperatur canai dilakukan pada 500<sup>0</sup>C, 550<sup>0</sup>C, dan 600<sup>0</sup>C.
2. Metode Deformasi  
Deformasi dilakukan dengan metode *single-pass* searah proses canai.
3. Besaran Deformasi  
Deformasi dilakukan sebesar 50%, 66,7%, 75%, dan 80% setiap *pass*.
4. Media Pendinginan  
Media pendingin yang digunakan adalah air.

### 1.4.3 Tempat Penelitian

Proses penelitian dilakukan di beberapa tempat, yaitu :

1. Proses TMCP dilakukan di Laboratorium Teknologi Perubahan Bentuk Departemen Metalurgi dan Material FTUI.
2. Preparasi sampel dan pengamatan struktur mikro dilakukan di Laboratorium Metalografi dan HST Departemen Metalurgi dan Material FTUI.
3. Pengujian korosi dilakukan di Laboratorium Korosi Departemen Metalurgi dan Material FTUI.
4. Pengujian komposisi dan pengujian kekerasan dilakukan di *Central Material Processing and Failure Analysis*, Departemen Metalurgi dan Material FTUI.

### 1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika ini dibuat agar konsep penulisan tersusun secara berurutan sehingga didapatkan kerangka alur pemikiran yang mudah dan praktis. Sistematika tersebut digambarkan dalam bentuk bab-bab yang saling berkaitan satu sama lain. Adapun sistematika penulisan laporan penelitian ini adalah sebagai berikut:

#### **Bab 1 : Pendahuluan**

Pada bab ini dibahas mengenai latar belakang dari penelitian yang dilakukan, perumusan masalah, tujuan penelitian, ruang lingkup penelitian, dan sistematika penulisan laporan.

#### **Bab 2 : Dasar Teori**

Dalam bab ini dijelaskan tentang studi literatur yang berkaitan dengan penelitian tugas akhir ini.

#### **Bab 3 : Metodologi Penelitian**

Bab ini berisi mengenai langkah kerja, prosedur penelitian, prinsip pengujian, serta daftar alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian.

#### **Bab 4 : Hasil dan Pembahasan**

Bab ini berisi data-data hasil penelitian dan analisa dari hasil penelitian tersebut dibandingkan dengan hasil studi literatur.

### **Bab 5 :Kesimpulan**

Membahas mengenai kesimpulan akhir berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan.



## BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Baja Karbon

Baja karbon adalah logam paduan yang merupakan kombinasi dari besi dan karbon dan paduan elemen lain yang jumlahnya tidak terlalu banyak yang akan mempengaruhi sifat akhir dari baja karbon<sup>[8]</sup>. Komposisi baja karbon biasanya mengandung tidak lebih dari 1.0% karbon (C) serta sejumlah kecil paduan seperti mangan (Mn) dengan kadar maksimal 1,65%, silikon (Si) dengan kadar maksimal 0,6% dan tembaga (Cu) dengan kadar maksimal 0,6%<sup>[9]</sup>.

Karbon (C) berfungsi sebagai unsur peneras pada logam paduan dengan mencegah dan menghalangi dislokasi bergeser pada kisi kristal (*crystal lattice*). Karbon merupakan suatu elemen yang menstabilkan austenit (*austenite stabilizer*) dan meningkatkan rentang pembentukan austenit pada baja. Kandungan karbon dan unsur paduan lainnya akan mempengaruhi sifat-sifat baja yang didapatkan. Dengan penambahan kandungan karbon pada baja dapat meningkatkan kekerasan dan kekuatan tariknya, namun baja akan menjadi getas (*brittle*) dan sulit untuk dilas. Penambahan karbon juga menghasilkan beberapa perubahan penting terhadap fasa. Struktur kristal dari ferit yang mempunyai struktur kristal BCC (*Body Centered Cubic*) dan austenit yang mempunyai struktur kristal FCC (*Face Centered Cubic*) dimodifikasi dengan memasukkan atom karbon pada celah atau intertisi antara atom besi. Ketika batas kelarutan untuk karbon pada austenit terlewati maka karbida besi atau sementit akan terbentuk pada baja.

Berikut ini klasifikasi baja karbon berdasarkan kadar karbonnya yaitu<sup>[2]</sup>:

1. Baja Karbon Rendah (*Low carbon Steel*)

Baja karbon rendah memiliki komposisi karbon 0,006 - 0,3% C. Sifatnya relatif lunak, ulet dan tangguh. Selain itu baja ini memiliki mampu mesin dan mampu las yang baik, serta harganya yang murah.

2. Baja Karbon Sedang (*Medium Carbon Steel*)

Baja karbon sedang memiliki komposisi karbon 0,3 - 0,6% C. Baja jenis ini banyak dipakai dalam kondisi hasil *tempering* sehingga

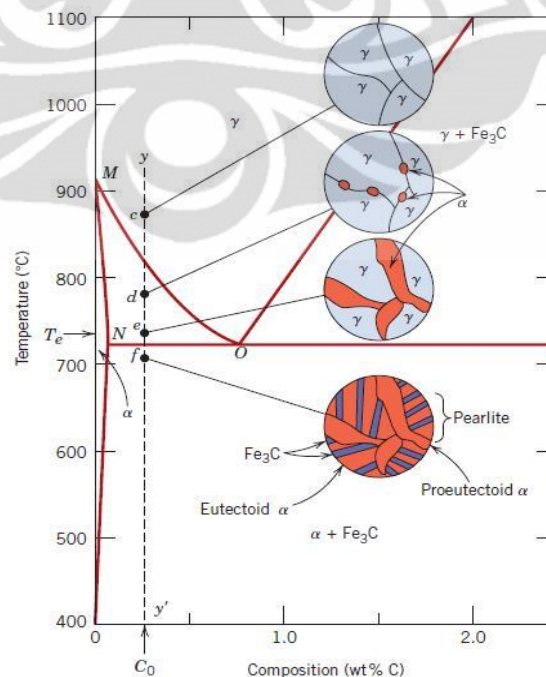
struktur mikronya berupa martensit. Baja ini lebih kuat dari baja karbon rendah.

### 3. Baja Karbon Tinggi (*High Carbon Steel*)

Baja karbon tinggi memiliki komposisi karbon 0,6 - 1,0% C Baja jenis ini memiliki sifat paling keras, paling kuat, paling getas di antara baja karbon lainnya, dan tahan aus.

#### 2.1.1 Baja Karbon Rendah

Baja jenis ini mengandung kadar karbon (% C) hingga 0.25. Baja karbon rendah diproduksi biasanya dalam bentuk lembaran atau gulungan baja yang dibuat dengan proses canai dingin (*cold work*) dan *anneal*. Mikrostrukturnya terdiri dari fasa ferit dan perlit yang membuat baja karbon rendah ini lunak dan kekuatannya lemah, tetapi memiliki keuletan dan ketangguhan yang sangat baik sehingga sifat mampu mesin dan mampu lasnya menjadi baik. Baja karbon rendah memiliki ketahanan korosi yang rendah, karena dengan semakin rendahnya kadar karbon maka ketahanan terhadap korosi juga semakin rendah. Baja karbon rendah kurang responsif terhadap perlakuan panas untuk mendapatkan mikrostruktur martensit, sehingga untuk meningkatkan kekuatan dari baja karbon rendah dapat dilakukan dengan proses canai dingin.

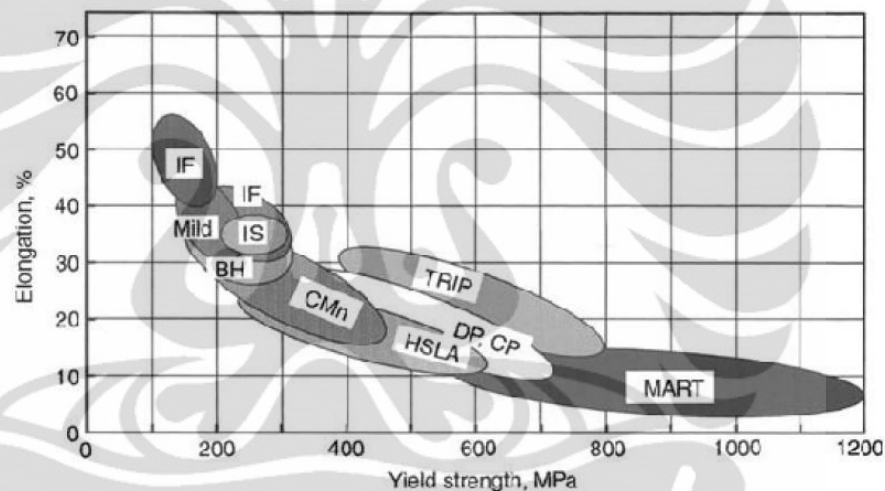


**Gambar 2.1** Transformasi Fasa pada Baja Karbon Rendah<sup>[2]</sup>.



Kadar karbon untuk baja dengan kemampuan bentuk yang baik (*high formability*) sangatlah rendah, kurang dari 0.10% C, dengan kadar mangan maksimal hingga 0.4% Mn. Penggunaannya digunakan pada *automobile body panels*, *tin plate*, dan produk kawat. Untuk produk baja struktural, kadar karbon ditingkatkan hingga kira-kira 0.30%, dengan kadar mangan yang lebih besar hingga 1.5%. Material ini dapat digunakan untuk *stamping*, *forging*, *seamless tube*, dan *boiler plate*.

Beberapa jenis baja karbon rendah yang telah dikembangkan adalah *hot-rolled low-carbon steels*, *cold-rolled and annealed low-carbon steels*, *interstitialfree* atau *ultra-low carbon steels*, *controlledrolled-microalloyed steels* (*highstrength low-alloy steels*), *dual-phase steels*, dan baja TRIP<sup>[2]</sup>.



Gambar 2.2 Kombinasi Elongasi dan Kekuatan untuk Berbagai Jenis Baja Karbon Rendah<sup>[2]</sup>.

## 2.2 Pengaruh Deformasi Plastis

Deformasi adalah perubahan dimensi atau bentuk akibat suatu beban. Deformasi disebabkan oleh aksi mekanik dari beban eksternal atau berbagai macam proses secara fisik. Deformasi plastis sering diklasifikasikan sebagai perlakuan yang selalu dilakukan pada pengerjaan panas atau pengerjaan dingin terhadap logam. Yang membedakan diantara keduanya adalah pada pengerjaan dingin proses deformasi plastis tidak diikuti proses rekristalisasi. Sedangkan pada pengerjaan panas terjadi proses rekristalisasi yang berlangsung secara bersamaan dengan proses deformasi.

Karakteristik pengerjaan dingin :

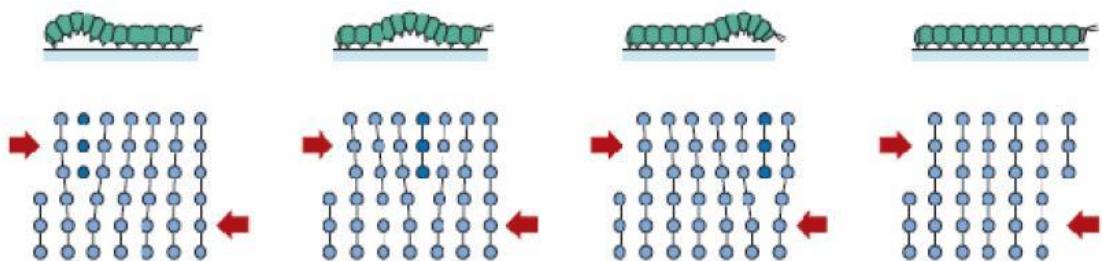
1. Memiliki kekerasan dan kekuatan yang tinggi
2. Memiliki ketangguhan dan keuletan yang rendah
3. Struktur butir yang terdiri dari butir yang berdeformasi meregang
4. Untuk baja karbon rendah, memperlihatkan titik regang yang kontinyu

Karakteristik pengerjaan panas :

1. Secara umum lebih halus dan memiliki kekuatan yang rendah
2. Ketangguhan yang rendah dan keuletan yang tinggi
3. Struktur butirnya terdiri dari butir yang terekristalisasi equiaxed
4. Untuk baja karbon rendah, memperlihatkan titik regang yang kontinyu

Deformasi plastis berhubungan dengan pergerakan sejumlah dislokasi<sup>[2]</sup>.

Berdasarkan proses yang dilakukan, deformasi plastis yang terjadi merupakan hasil dari pergerakan dari salah satu kristal yang disebut dislokasi (ASM 1973). Proses terjadinya deformasi plastis melalui pergerakan dislokasi merupakan mekanisme *slip*. Slip merupakan mekanisme terjadinya deformasi yang paling sering dijumpai. Slip menggambarkan pergerakan yang besar pada bagian kristal yang relatif terhadap yang lain sepanjang bidang kristalografi dan dalam arah kristalografi. Slip terjadi bila sebagian dari kristal tergeser relatif terhadap bagian kristal yang lain sepanjang bidang kristalografi tertentu. Bidang tempat terjadinya slip disebut bidang slip (*slip plane*) dan arah pergeserannya pada umumnya pada bidang slip disebut arah slip (*slip direction*). Slip terjadi pada bidang slip dan arah slip yang paling padat atom, karena untuk menggeser atom pada posisi ini memerlukan energi paling kecil. Pergerakan dislokasi dapat disamakan dengan cara bergerak yang dilakukan oleh ulat bulu seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3 di bawah ini.



Gambar 2.3 Analogi Pergerakan Dislokasi<sup>[2]</sup>

Apabila slip terjadi diseberang butir kristal maka slip akan diteruskan kebutir berikutnya dimana arah bidang slip akan berbeda sehingga dislokasi akan tertahan pada batas butir. Untuk membuat slip berikutnya pada bidang yang sama akan memerlukan gaya yang lebih besar. Sehingga logam yang telah mengalami deformasi akan bertambah kuat dan keras.

### 2.3 Pengaruh Besar Butir Terhadap Sifat Mekanis

Ukuran butir atau rata-rata diameter butir pada logam polikristalin akan mempengaruhi sifat-sifat mekanik logam tersebut. Butir yang lebih halus (butir lebih kecil) memiliki sifat lebih keras dan kuat dibandingkan butir yang lebih kasar (butir lebih besar), karena butir yang lebih halus memiliki total batas butir yang lebih banyak untuk menghalangi pergerakan dislokasi. Pengaruh ukuran butir terhadap kekuatan suatu material berdasarkan persamaan Hall-Petch adalah sebagai berikut<sup>[21]</sup>:

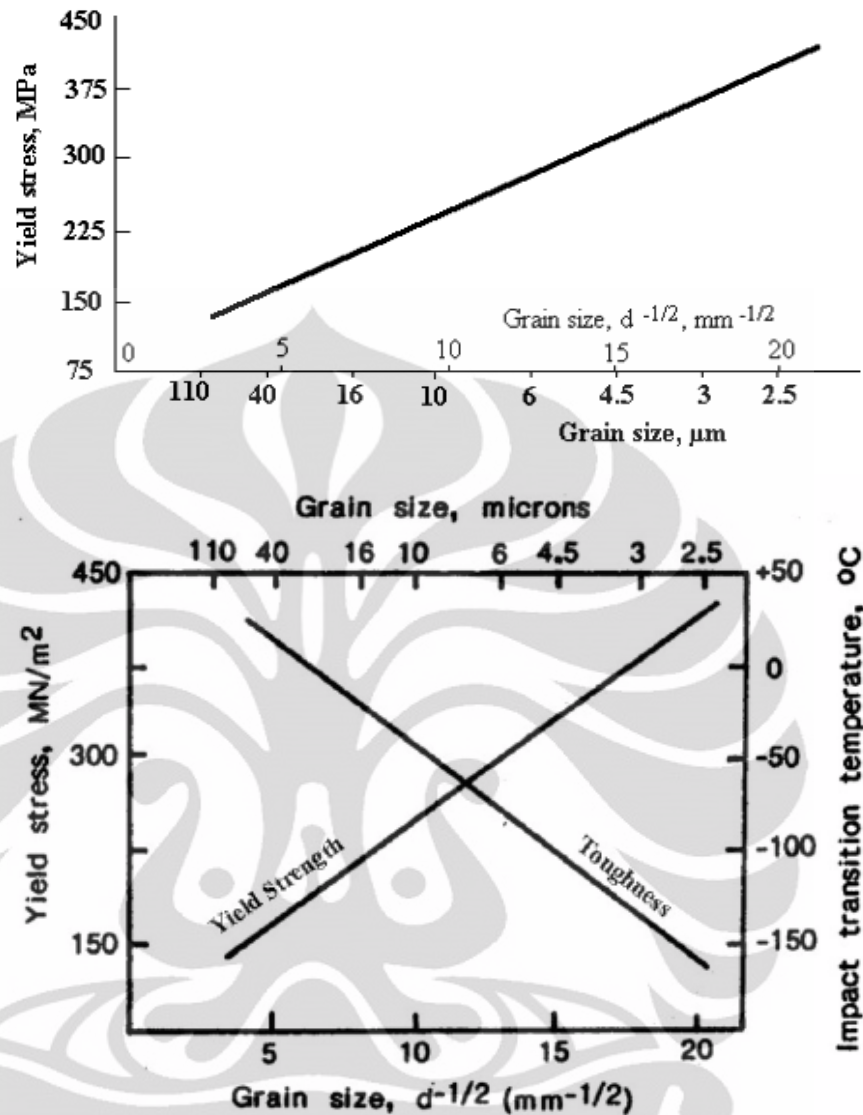
$$\sigma_y = \sigma_0 + K_y d^{-1/2} \dots \dots \dots (2.1)$$

Pada persamaan Hall-Petch di atas,  $\sigma_y$  adalah tegangan luluh baja,  $d$  adalah diameter butir rata rata,  $\sigma_0$  adalah *lattice resistance*, yaitu tegangan friksi yang melawan pergerakan dislokasi, dan  $K_y$  adalah konstanta untuk material tertentu. Persamaan di atas tidak berlaku untuk material polikristal yang sangat besar dan dengan butir yang amat sangat halus. Kekuatan material sebanding dengan kekerasannya sesuai dengan persamaan<sup>[21]</sup>:

$$TS \text{ (MPa)} = 3.45 \times HB \dots \dots \dots (2.2)$$

$$TS \text{ (Psi)} = 500 \times HB \dots \dots \dots (2.3)$$

Untuk sebagian besar material, kekuatan tarik  $y$  bervariasi dengan ukuran butir. Hal ini ditunjukkan oleh gambar 2.4 di bawah ini.



Gambar 2.4 Pengaruh besar butir terhadap nilai kekuatan dan ketangguhan<sup>[10]</sup>

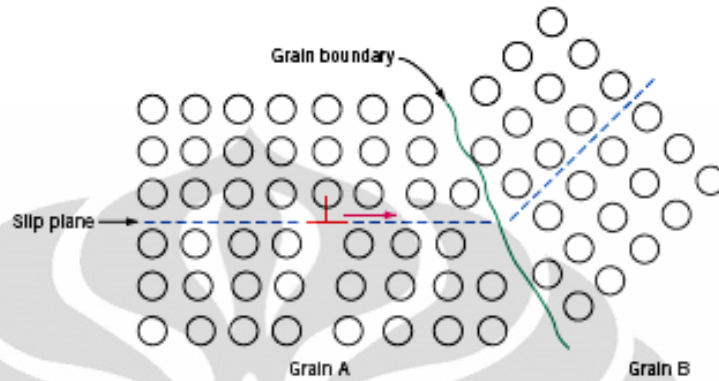
Untuk mengontrol ukuran butir ferit dapat dilakukan dengan cara dua pendekatan yang dapat digunakan (secara terpisah maupun dikombinasikan):

1. *Controlled rolling schedules*, contohnya yaitu dengan *thermo-mechanical controlled rolling*.
2. Mengontrol penambahan unsur paduan.

#### 2.4 Mekanisme Penguatan Dengan Penghalusan butir

Sifat mekanis dari suatu material sangat dipengaruhi oleh ukuran butir atau diameter butir rata-rata dalam logam polikristalin. Pada umumnya, butir yang bersebelahan biasanya memiliki orientasi yang berbeda. Hal ini berarti oleh

karena perbedaan orientasi tersebut maka akan timbul adanya batas butir. Saat deformasi plastis, slip atau pergerakan dislokasi berada dalam butir, misalnya dari butir A ke butir B yang dilustrasikan pada gambar 2.5.

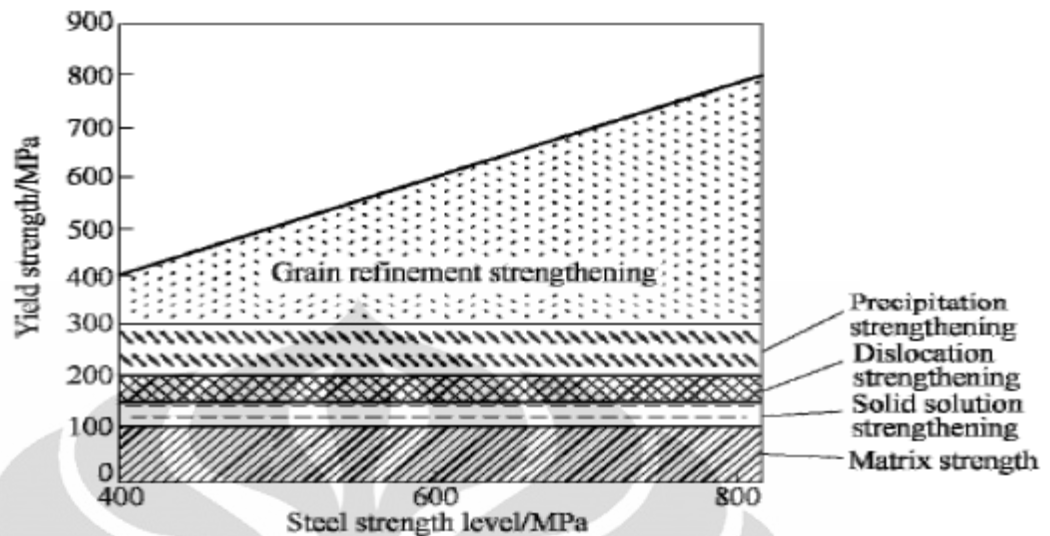


**Gambar 2.5** Ilustrasi batas butir dan pergerakan dislokasi<sup>[2]</sup>

Batas butir bertindak sebagai penghalang pergerakan dislokasi karena dua alasan yaitu sebagai berikut<sup>[2]</sup>:

1. Ketidaksamaan susunan atom dalam area batas butir akan menghasilkan berubahnya *slip plane* dari butir satu ke butir lainnya.
2. Butir memiliki orientasi yang berbeda-beda sehingga dislokasi yang menuju butir sebelahnya harus mengubah arah pergerakannya. Perbedaan orientasi tersebut juga mengakibatkan tingkat energi yang berbeda pula. Hal tersebut semakin sulit ketika misorientasi kristalografinya meningkat.

Pada gambar 2.5 dapat dilihat bahwa kekuatan baja meningkat lebih baik dengan melakukan penghalusan butir. Semakin meningkatnya kekuatan maka kekerasan pun akan meningkat. Proses penghalusan butir sangat berbeda bila dibandingkan dengan metode penguatan lainnya dimana pada proses penguatan dengan metode tersebut tidak hanya meningkatkan kekuatan tetapi juga tetap mempertahankan agar ketangguhan tidak menurun<sup>[11]</sup>.

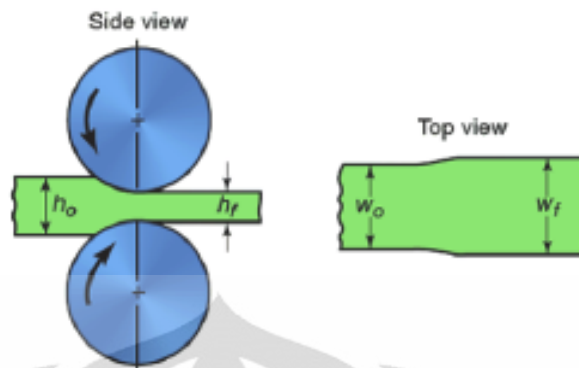


Gambar 2.6 Skema efek dari variasi penguatan material<sup>[11]</sup>

Penguatan baja dengan dislokasi, presipitat dan kandungan pearlit dari struktur mikro ferit memang dapat meningkatkan kekuatan tetapi juga akan meningkatkan temperatur transisi sehingga menurunkan keuletan baja. Namun dengan butir yang lebih halus akan meningkatkan tekanan perpatahan ulet dan menurunkan temperatur transisi ulet-getas sehingga penghalusan butir tidak hanya meningkatkan kekuatan atau kekerasan tapi juga meningkatkan keuletan pada baja. Ukuran butir dapat diatur dengan laju solidifikasi dari fasa cair atau melalui deformasi plastis yang diikuti dengan perlakuan panas tertentu.

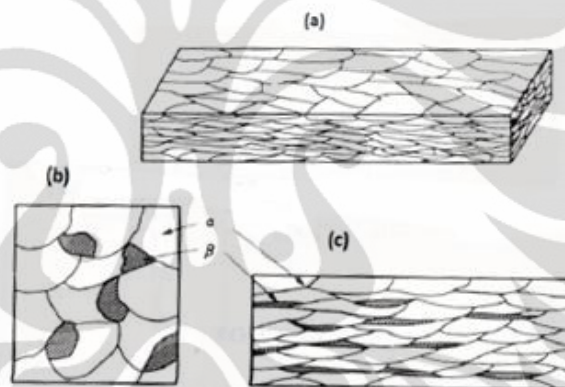
## 2.5 Proses Canai

Proses Canai (*rolling*) didefinisikan sebagai reduksi luas area penampang dari logam atau pembentukan umum dari produk logam menggunakan canai yang berputar (*rotating roll*)<sup>[12]</sup>. Selama proses canai terjadi proses perubahan bentuk pada benda uji dimana pada saat proses tersebut adanya gaya tekan (*compressive load*) terjadi pengurangan ketebalan dan penambahan panjang akan tetapi massa tetap konstan tidak mengalami perubahan.



Gambar 2.7 Skematik Proses Canai<sup>[13]</sup>.

Setelah terjadi proses canai, butir-butir dalam material yang sebelumnya *equiaxed* akan terdeformasi menjadi panjang (*elongated grain*).



Gambar 2.8 Transformasi Morfologi Butir Setelah Proses Canai a) *elongated grain* b) sebelum dideformasi (*equiaxed grain*) b) setelah dideformasi (*elongated grain*)<sup>[14]</sup>.

Secara umum, berdasarkan temperatur pengerjaan proses canai terbagi dua:

1. Canai dingin (*cold rolling*) yaitu proses canai yang dilakukan dengan menggunakan temperatur ruang atau temperatur di bawah temperatur rekristalisasi material.
2. Canai panas (*hot rolling*) yaitu proses canai yang dilakukan dengan menggunakan temperatur di atas temperatur rekristalisasi dari material.

Regangan dan besar deformasi yang diberikan terhadap material pada proses canai dapat di hitung dengan persamaan :

$$\varepsilon = \ln \frac{h_0}{h_f} \dots \dots \dots (2.4)$$

$$\% \text{ Deformasi} = \frac{h_0 - h_f}{h_0} \times 100\% \dots \dots \dots (2.5)$$

Dimana :

$\varepsilon$  : regangan yang diberikan

$h_0$  : tebal awal material (mm)

$h_f$  : tebal akhir material (mm)

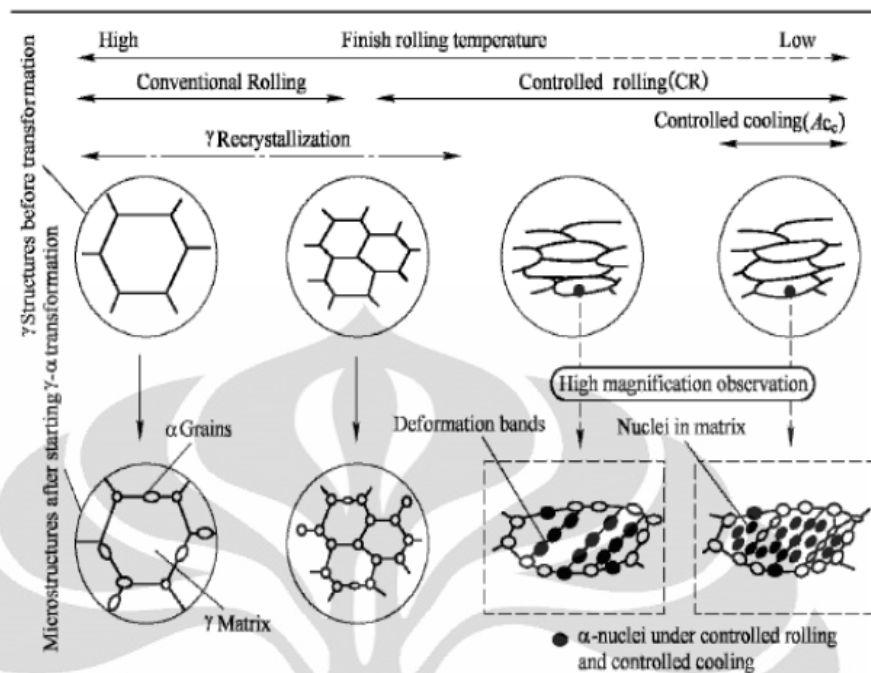
## 2.6 *Thermo-Mechanical Controlled Process (TMCP)*

*Thermomechanical processing* merupakan suatu proses untuk mengontrol mikrostruktur suatu material selama pembuatannya untuk menghasilkan sifat mekanis yang lebih baik. Peningkatan kekuatan dan ketangguhan dalam TMCP didapat dari adanya mekanisme pengecilan butir dengan proses deformasi panas yang terkontrol (*controlled rolling*) dan pendinginan yang terkontrol (*controlled cooling*)<sup>[11]</sup>.

Pada baja TMCP, sifat mekanis (*mechanical properties*) terutama ditentukan melalui kombinasi dari perlakuan mekanis (*mechanical working*), proses rekoveri (*recovery processes*), rekristalisasi (*recrystallisation*), dan pertumbuhan butir (*grain growth*)<sup>[15]</sup>.

Perbedaan mikrostruktur yang dihasilkan oleh pengerolan konvensional dan proses TMCP dapat dilihat pada Gambar 2.9 di bawah ini.





**Gambar 2.9** Perbedaan Mikrostruktur Antara Proses Canai Konvensional dan Proses TMCP<sup>[11]</sup>

### 2.6.1 Canai Hangat (*Warm Rolling*)

Proses TMCP telah berkembang dengan adanya proses dengan menggunakan pengerjaan hangat (*warm working*)<sup>[3]</sup>. Canai hangat adalah salah satu metode perlakuan terhadap material logam untuk menghasilkan mikrostruktur yang halus pada material logam dan paduannya dengan temperatur kerja berada di antara temperatur canai panas (*hot rolling*) dan temperatur canai dingin (*cold rolling*). Kisaran temperatur pengerjaan hangat berada pada 500°C-800°C<sup>[16]</sup>, berdasarkan *range* temperatur operasi canai hangat, setelah terjadi deformasi plastis, material sebagian mengalami pengerasan regangan/ *strain hardened* dan sebagian mengalami rekristalisasi<sup>[17]</sup>.

Pada proses ini tidak lagi dibutuhkan perlakuan panas lainnya. Selain menghasilkan butir yang lebih halus, proses ini akan mengalami pembentukan sub-butir (*subgrain*) yang berukuran *micrometer* maupun *sub-micrometer* pada butir yang berukuran lebih besar atau kasar. Sebagai hasil pembentukan sub-butir ini, sifat mekanis dari material akan meningkat.

Jika dibandingkan dengan canai panas yang membutuhkan energi panas yang besar dan mahal, proses canai hangat ini dapat menghasilkan material yang mendekati dimensi akhir yang diinginkan<sup>[18]</sup>. Selain itu metode ini menghasilkan mikrostruktur yang lebih halus dengan sifat mekanis yang tinggi, kualitas

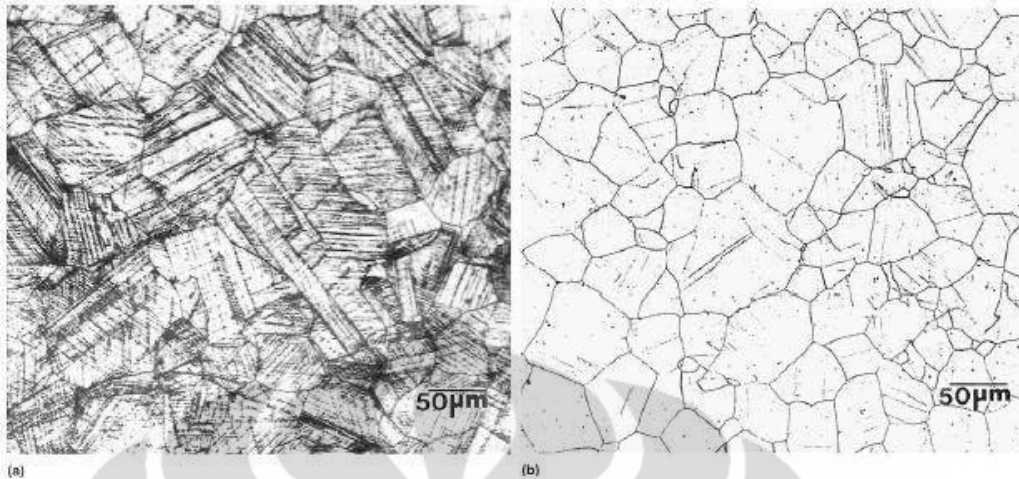
permukaan dan pengendalian dimensional yang lebih baik, material yang dibuang akibat proses dekarburisasi atau oksidasi yang lebih rendah<sup>[5]</sup>. Sedangkan jika dibandingkan dengan proses canai dingin, metode canai hangat membutuhkan *deformation forces* yang lebih rendah, dapat diaplikasikan pada baja dengan *range* yang luas, memberikan rasio deformasi yang lebih besar, menghasilkan deformasi yang lebih seragam terhadap daerah transversal dan menghasilkan struktur mikro dengan tegangan sisa yang lebih rendah<sup>[19]</sup>. Selama canai hangat pada baja, berbagai macam perubahan mikrostruktur dapat terjadi sehingga merubah sifat-sifat mekanik pada baja<sup>[20]</sup>.

### 2.6.2 *Deformation Band*

Ketika material dideformasi dibawah ditemperatur rekristalisasi mikrostruktur yang dihasilkan akan mempunyai cacat dalam butir (intragranular defect) yang biasa disebut deformation band. Deformation band merupakan salah satu tempat untuk terjadinya nukleasi butir baru (nucleation sites). Deformation band yang terdapat didalam butir mempunyai densitas dislokasi sangat tinggi<sup>[21]</sup>. Densitas dislokasi yang sangat tinggi mengakibatkan dislokasi menjadi sulit bergerak sehingga material sulit dideformasi dan kekerasannya meningkat<sup>[22]</sup>. Densitas dari deformation band akan meningkat jika temperatur deformasi diturunkan<sup>[23]</sup>.



**Gambar 2.10** Mekanisme Terbentuknya Deformation Band.



**Gambar 2.11** Mikrostruktur AISI SS 316 (a) Adanya Deformation Band (b) Setelah Dianil<sup>[24]</sup>.

### 2.6.3 Strain Rate

Parameter Zener-Hollomon,  $Z$ , menyatakan bahwa temperatur dan laju regangan pada proses deformasi dapat didefinisikan pada persamaan dibawah:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT) \dots\dots\dots(2.6)$$

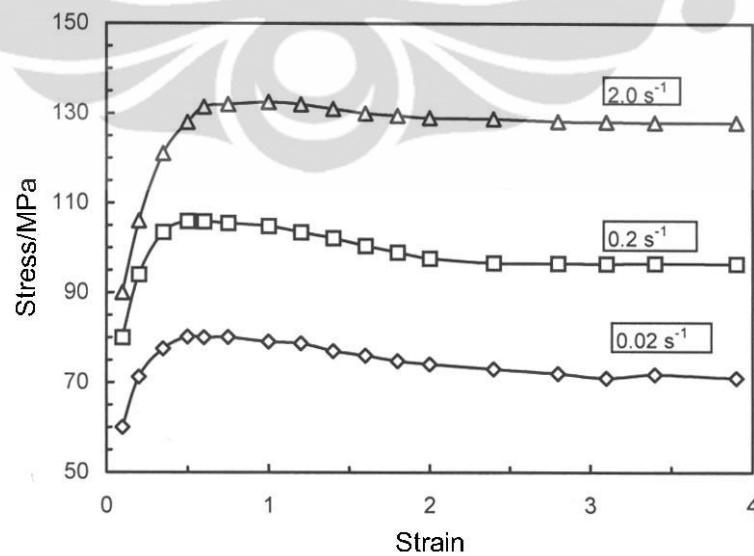
Dimana :

$\dot{\epsilon}$  : Laju regangan ( $s^{-1}$ )

$Q$  : Energi aktivasi deformasi (J/mol)

$R$  : Konstanta gas (8.31 J.K /mol)

$T$  : Temperatur Absolut (K)



**Gambar 2.12** kurva *stress-strain* dengan berbagai *strain rate* pada pengerolan suhu 750°C<sup>[25]</sup>

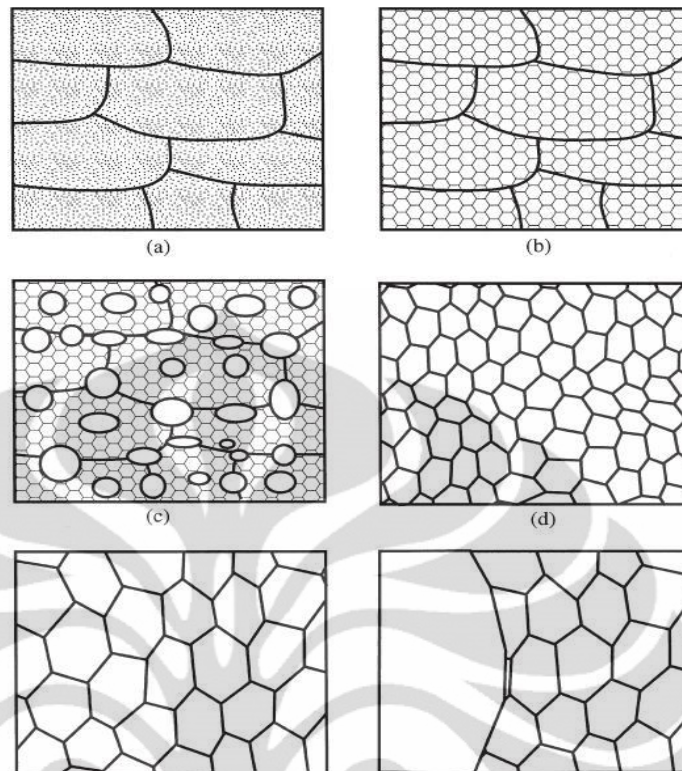
Pada gambar diatas bisa dijelaskan, bahwa semakin tinggi laju regangan pada pengerolan hangat (750<sup>0</sup>C) maka kekuatan dari material yang didapat akan lebih baik. Berdasarkan pada persamaan:

$$\dot{\epsilon} = F \sqrt{\frac{2}{D\Delta h}} \ln \frac{h_0}{h_f} \dots\dots\dots(2.7)$$

Maka semakin besar deformasi (dengan meningkatnya  $\Delta h$ ) maka laju regangan semakin meningkat, yang artinya semakin tinggi deformasi berarti semakin banyak penumpukan dislokasi (semakin meningkatnya *strain hardening*), maka kekerasan akan semakin meningkat.

## 2.7 Rekoveri, Rekristalisasi, dan Pertumbuhan Butir

Material polikristalin yang mengalami deformasi plastis menunjukkan terjadinya perubahan pada bentuk butir, pengerasan regangan (*strain hardening*) dan peningkatan pada kepadatan dislokasi<sup>[2]</sup>. Beberapa sisa energi internal disimpan dalam material sebagai energi regangan (*strain energy*), yang mana berhubungan dengan area tegangan (*tensile*), tekan (*compressive*), dan geser (*shear*) disekeliling dislokasi yang baru terbentuk. Kecenderungan sifat penyimpanan energi internal tersebut dapat dihilangkan setelah tahap pengerjaan dingin dengan perlakuan panas seperti proses anil (*annealing*). Penghilangan energi tersebut dilakukan dengan dua proses berbeda yang terjadi pada temperatur yang dinaikkan yang kemudian diidentifikasi sebagai proses rekoveri dan rekristalisasi, yang juga dimungkinkan untuk pertumbuhan butir.



**Gambar 2.13** Skematik Proses Anil a) Butir yang Terdeformasi. b) Rekoveri c) Rekristalisasi Sebagian d) Rekristalisasi Penuh e) Pertumbuhan Butir f) *Abnormal Grain Growth*<sup>[26]</sup>.

### 2.7.1 Rekoveri

Proses rekoveri merupakan proses yang pertama terjadi ketika material yang terdeformasi dipanaskan ke temperatur tinggi. Rekoveri adalah proses penghilangan energi internal (*internal strain energy*) yang tersimpan yang diperoleh selama proses pengerjaan dingin melalui perlakuan panas (*heat treatment*). Mekanisme penghilangan energi internal yang tersimpan dari material adalah dengan penghilangan dan penyusunan kembali dislokasi<sup>[26]</sup>. Selama proses rekoveri, sifat fisik dan mekanik dari baja pengerjaan dingin akan kembali seperti sebelum dilakukan pengerjaan dingin<sup>[19]</sup>. Perubahan mikrostruktur selama rekoveri relatif homogen dan biasanya tidak mempengaruhi batas butir material yang terdeformasi. Perubahan mikrostruktur dari material selama tahapan rekoveri ini tidak melibatkan pergerakan batas butir dengan sudut yang besar.

### 2.7.2 Rekristalisasi

Pada saat rekoveri tidak semua dislokasi menghilang dan ketika tahap rekoveri akan berakhir, pembentukan inti dari butir baru akan mulai terjadi dengan memanfaatkan energi internal yang masih tersimpan setelah tahap rekoveri. Proses ini disebut rekristalisasi. Rekristalisasi merupakan proses transformasi nukleasi dan pertumbuhan butir. Rekristalisasi dalam proses laku panas merupakan proses aktivasi termal dalam perubahan mikrostruktur dengan jalan pembentukan butir baru bebas regang yang terjadi karena adanya penggabungan sub butir. Inti dari butir baru terjadi dari bergabungnya sub-butir dan permukaan untuk nukleasi heterogen adalah cacat mikrostruktur seperti permukaan batas butir dan inklusi. Butir yang baru tumbuh merupakan butir yang bebas regangan (*strain-free*) dan terikat dengan batas butir bersudut besar yang memiliki mobilitas sangat tinggi yang akan menyapu semua jejak dari butir yang terdahulu. Sehingga proses rekristalisasi mengarah kepada pembentukan formasi butir yang bebas energi internal dalam material yang telah mengalami proses pengerjaan dingin<sup>[19]</sup>.

Ketika semua butir terdahulu telah digantikan oleh butir baru yang bebas regangan, maka dapat dikatakan material tersebut telah terekristalisasi dengan sempurna (*fully recrystallized*). Seperti telah dijelaskan bahwa gaya penggerak untuk proses rekristalisasi adalah energi yang tersimpan saat pengerjaan dingin, maka jika energi pengerjaan dinginnya tinggi, semakin kecil energi termal yang digunakan, berarti semakin rendah temperatur dari rekristalisasi. Butir yang baru merupakan butir yang bebas regangan sehingga efek pengerasan dari pengerjaan dingin akan menghilang. Hal tersebut akan menyebabkan material memiliki kekuatan dan kekerasan yang sama sebelum dilakukan pengerjaan dingin.

Faktor yang paling penting yang mempengaruhi proses rekristalisasi pada logam dan paduannya adalah ; (1) besaran deformasi / *amount of prior deformation*, (2) temperatur, (3) waktu, (4) besar butir awalan / *initial grain size*, dan (5) komposisi logam atau paduan (Smith 2004).

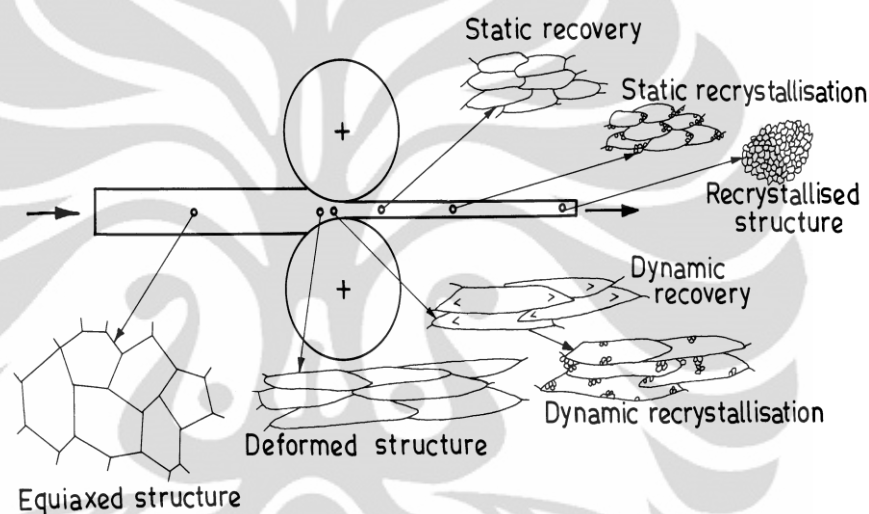
Proses rekristalisasi memungkinkan untuk mengontrol ukuran besar butir dan sifat mekanis dari material. Ukuran besar butir dari material yang terekristalisasi akan tergantung pada besarnya pengerjaan dingin, temperatur

*annealing*, waktu tahan dan komposisi dari material. Ini didasarkan pada hukum rekristalisasi<sup>[20]</sup>.

Rekristalisasi secara kinetiknya dapat dibagi menjadi dua yaitu rekristalisasi dinamis dan statis.

### 2.7.2.1 Rekristalisasi Dinamis

Proses rekristalisasi yang terjadi saat material sedang dideformasi disebut rekristalisasi dinamis. Kombinasi antara proses deformasi plastis dan pemanasan memicu terjadinya rekristalisasi.



**Gambar 2.14** Skematik Perubahan Morfologi Butir yang Terdeformasi<sup>[27]</sup>.

Pada rekristalisasi dinamis, saat material mengalami deformasi, terjadi regangan di dalam material, dan apabila regangan tersebut adalah regangan kritis ( $\epsilon_0$ ) maka akan tersedia cukup energi untuk terbentuk nuklei pada batas butir yang terdeformasi. Proses ini dipengaruhi faktor – faktor antara lain regangan, kecepatan regangan dan temperatur, seperti yang telah diteliti oleh Zener-Hollomon.

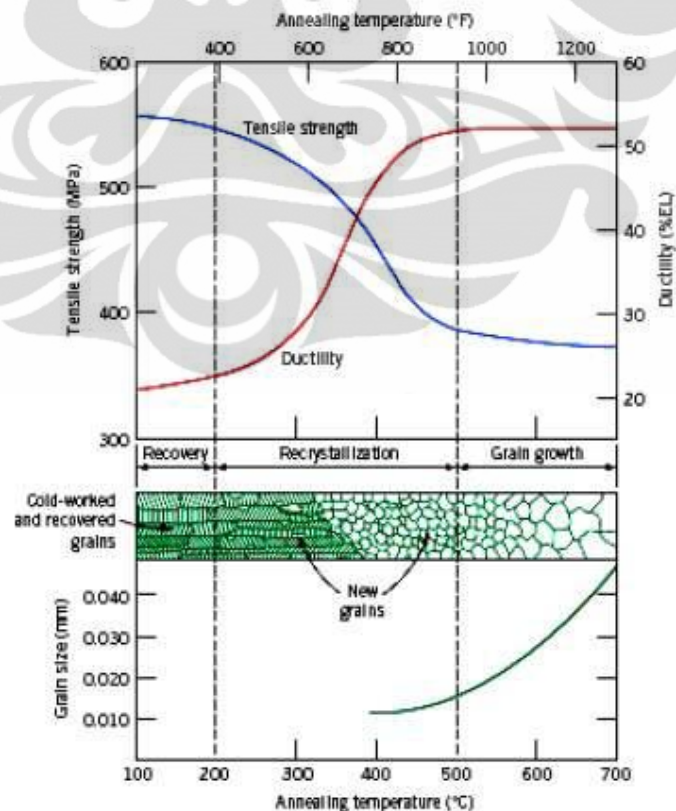
### 2.7.2.2 Rekristalisasi Statis

Rekristalisasi statis terjadi sesaat setelah material mengalami deformasi. Sama seperti proses rekristalisasi dinamis, pada proses rekristalisasi statis juga terbentuk nuklei, hanya saja pembentukan tersebut terjadi setelah deformasi. Dengan adanya temperatur yang tinggi (diatas temperatur rekristalisasi dari

material), maka proses munculnya nuklei pada batas butir dapat terjadi dan proses rekristalisasi dapat berlangsung.

### 2.7.3 Pertumbuhan Butir

Setelah proses rekristalisasi selesai, butir dengan bebas regangan selanjutnya akan tumbuh jika spesimen baja dibiarkan pada temperatur yang tinggi. Pertumbuhan butir ditunjukkan sebagai peningkatan besar butir rata-rata pada material polikristalin. Pertumbuhan butir biasanya merupakan lanjutan setelah proses rekoveri dan proses rekristalisasi. Hal ini terjadi disebabkan adanya migrasi pada batas butir. Tidak semua butir dapat membesar, butir yang lebih besar akan tumbuh yang kemudian menghabiskan butir yang lebih kecil atau yang dikenal dengan grain cannibalism<sup>[2]</sup>. Penambahan proses anil (extended annealing) pada temperature tinggi dapat menyebabkan beberapa butir tumbuh menjadi butir dengan ukuran yang sangat besar, yang mana dikenal sebagai rekristalisasi sekunder (secondary recrystallization) atau pertumbuhan butir yang abnormal<sup>[28]</sup>.



**Gambar 2.15** Skematis Proses Recovery, Rekristalisasi dan Pertumbuhan Butir<sup>[2]</sup>.



#### 2.7.4 *Subgrain*

Pembahasan mengenai *subgrain* erat kaitannya dengan proses laku panas. Salah satu proses laku panas tersebut adalah proses rekristalisasi yaitu proses aktivasi termal dimana terjadi perubahan mikrostruktur dengan cara pembentukan butir baru yang bebas regangan. Terbentuknya butir baru tersebut berasal dari penggabungan sub butir. Sub butir merupakan inti dari butir baru pada proses rekristalisasi ini, dimana sub butir ini akan bergabung untuk nantinya membentuk butir baru.

Untuk benda kerja yang butirnya memipih setelah canai dingin, setelah proses rekoveri tidak terlihat perubahan pada butir tersebut. Namun pada tingkatan submikroskopis, terjadi perubahan pada titik cacat dan klusternya, penghilangan dan pengaturan ulang dislokasi, serta pembentukan sub-butir dan pertumbuhannya. Perubahan mikrostruktural ini akan melepas sebagian besar tegangan dalam dan tahapan rekoveri ini dipergunakan untuk proses *stress-relieving*.

Hilangnya beberapa dislokasi mengakibatkan berkurangnya kekuatan dari material, tetapi hilangnya dislokasi ini diimbangi dengan pembentukan subbutir, yaitu butir dengan batas butir bersudut kecil ( $2-3^\circ$  misorientasi). Selama proses rekoveri, dislokasi yang terkena deformasi dapat bergerak, berinteraksi, dan saling menghalangi satu sama lain. Dislokasi yang tersisa kembali berkumpul (menyusun diri) untuk membentuk *subgrain* yang terdapat dalam butir ferit.

Proses rekoveri yang disertai dengan pembentukan *subgrain* ini juga dikenal dengan poligonisasi<sup>[29]</sup>. Proses utama yang terjadi saat poligonisasi adalah distribusi ulang dislokasi yang disertai dengan terbentuknya dinding dislokasi (*dislocation walls*). Dinding dislokasi ini memisahkan batas *subgrain* yang satu dan yang lainnya.

### 2.8 Pengaruh Pendinginan Cepat Pada Sifat Mekanis Baja

*Quenching* adalah proses pendinginan cepat suatu komponen logam dari temperatur austenisasi ke temperatur dimana fasa yang kita inginkan dapat terbentuk, pada baja umumnya adalah struktur mikro martensit. *Quenching* dikatakan berhasil jika kita telah mampu mendapatkan struktur mikro, kekerasan,

kekuatan maupun ketangguhan yang kita inginkan dengan tetap meminimalisasi tegangan sisa, distorsi dan kemungkinan terjadinya retak/*cracking*<sup>[30]</sup>.

Pemilihan media *quench* yang tepat tergantung pada kemampukerasan/*hardenability* material, ketebalan dan geometri benda, serta kecepatan pendinginan untuk mendapatkan struktur mikro yang diinginkan. Media *quench* atau *quenchant* yang biasa digunakan antara lain: Air; oli; lelehan garam; lelehan logam; dan larutan polimer.

Kemampukerasan adalah kemampuan material untuk mengalami pengerasan dengan membentuk martensit. Baja karbon rendah memiliki kemampukerasan yang rendah karena kelarutan karbonnya yang rendah. Sebaliknya pada baja karbon menengah dan tinggi akan mudah membentuk martensit karena kelarutan karbonnya cukup tinggi untuk memudahkan terbentuknya martensit.

Selama proses *quenching*, bentuk maupun ketebalan akan mempengaruhi kecepatan pendinginan dari benda. Hal ini terjadi karena energi panas di dalam komponen akan terlebih dahulu mengalir ke permukaan benda sebelum nantinya dibuang ke media *quench*. Inilah yang menyebabkan kecepatan pendinginan antara di dalam dan di permukaan benda berbeda tergantung dari ketebalan dan geometri bentuknya<sup>[30]</sup>.

## 2.9 *Hydrogen Induced Cracking* pada Baja Karbon Rendah

Baja karbon rendah memiliki ketahanan korosi yang rendah, termasuk ketahanan korosi terhadap adanya hidrogen. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Samerjit<sup>[6]</sup>, atom hidrogen lebih dominan berdifusi pada lokasi yang tingkat energi bebasnya rendah seperti inklusi (dimana *interface* antara matriks dan cacat berikatan secara lemah), kemudian membentuk gas hidrogen yang menghasilkan tekanan dan menginisiasi *microcracks* pada permukaan serta bagian dalam spesimen. Inisiasi *microcracks* paling banyak ditemukan pada pearlite/ferrite *interface*.

Samerjit<sup>[6]</sup> juga menyatakan bahwa waktu jenuh serta besar konsentrasi hidrogen pada baja bergantung kepada prosedur *hydrogen charging* dan material itu sendiri. Dengan densitas arus, lamanya proses *charging*, serta konsentrasi

larutan yang lebih besar, akan semakin besar pula konsentrasi hidrogen yang terdifusi. Inisiasi serta propagasi *microcracks* pada penelitian Samerjit ditentukan berdasarkan mekanisme penggetasan hidrogen, yakni teori dekohesi dan tekanan hidrogen. Selain itu, hidrogen memiliki pengaruh yang signifikan terhadap *ductility* baja. *Ductility* dari baja akan menurun karena adanya hidrogen<sup>[6]</sup>. Dengan ataupun tanpa adanya tegangan eksternal, hidrogen dapat menginduksikan terjadinya *crack* ataupun *microcrack* kemudian berlanjut kepada perambatan *crack* yang cepat. *Microcracks* hidrogen juga dapat menurunkan nilai modulus elastis baja<sup>[6]</sup>. Kerusakan dan levelnya tergantung pada beberapa faktor yang meliputi<sup>[31]</sup> :

1. Sumber hidrogen, eksternal (misalnya gas) ataupun internal (hidrogen terlarut).
2. Waktu paparan.
3. Tekanan dan temperatur.
4. Adanya pelarut atau larutan yang dapat bereaksi dengan logam (misalnya larutan asam).
5. Bentuk logam atau paduan itu sendiri dan metode produksinya.
6. Perlakuan akhir permukaan logam.
7. Metode perlakuan panas.
8. Level tegangan sisa dan tegangan yang diaplikasi.

Secara umum model kerusakannya meliputi :

1. Penggetasan Hidrogen (*Hydrogen Embrittlement*).
2. Penyerangan Hidrogen (*Hydrogen Attack*).
3. *Sulfide Stress Cracking* (SCC).
4. Pelepuhan Hidrogen (*Hydrogen Blistering*).

Kerusakan akibat hidrogen dapat dicegah melalui modifikasi terhadap lingkungan dan pemilihan material yang sesuai yang lebih tahan terhadap *embrittlement*<sup>[32]</sup>. Pengurangan kadar sulfida mencapai dibawah 50 ppm mempunyai pengaruh signifikan dan meningkatkan ketahanan pada sebagian besar baja karbon dan *low alloy steel*. HIC yang dipengaruhi sulfida dapat dikurangi dengan mengatur kadar pH menjadi diatas 8. Selain itu pengurangan kelembaban dari aliran gas H<sub>2</sub>S dapat mengurangi proses penggetasan.

Penggunaan inhibitor juga dapat mengurangi generasi hidrogen pada permukaan logam dan dapat menghambat mitigasi kerusakan akibat hidrogen<sup>[33]</sup>.

Akibat dari masuknya hidrogen pada permukaan logam, maka akan terjadi berbagai kerusakan yang meliputi pengurangan ketangguhan, keuletan, kekuatan tarik dan terutama sifat mekanik logam. Kerusakan ini biasanya disebabkan oleh beberapa faktor yang meliputi<sup>[34]</sup> :

1. Bentuk dari hidrogen yang dapat menimbulkan kerusakan pada logam seperti atom hidrogen (H), gas hidrogen (H<sub>2</sub>), dan jenis gas lainnya.
2. Sumber hidrogen yang berasal dari proses elektrokimia (proteksi katodik ataupun elektroplating), gas hidrogen pada atmosfer, H<sub>2</sub>S dan jenis-jenis zat kimia lainnya.
3. Ada atau tidaknya tegangan pada material.

### 2.9.1 Mekanisme Difusi Atom Hidrogen kedalam Logam

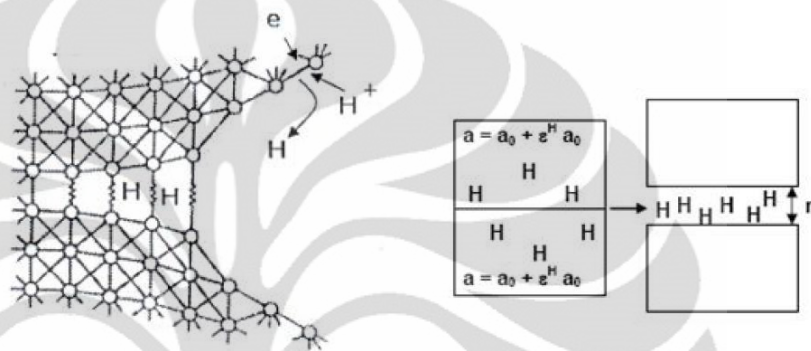
Penggetasan hidrogen merupakan masuknya atom hidrogen kedalam permukaan logam dan menyebabkan berkurangnya ketangguhan dan menurunkan kekuatan tarik suatu material. Terdapat beberapa mekanisme penggetasan hidrogen yang berbeda. Dalam perkembangannya beberapa peneliti berpendapat mengenai model penggetasan akibat hidrogen. Model ini antara lain dibahas sebagai berikut<sup>[35]</sup> :

#### 1. Model Tekanan

Model ini berhubungan dengan difusi atom hidrogen kedalam logam dan terakumulasi pada cacat atau *void* didalam material. Akibat akumulasi atom hidrogen pada suatu cacat ataupun *void* maka atom hidrogen ini akan kembali membentuk molekul hidrogen yang menghasilkan tekanan yang besar. Tekanan yang dihasilkan dapat meningkatkan tegangan kerja dan juga menurunkan tegangan patahnya. Selain itu tekanan yang dihasilkan sebagai akibat rekombinasi atom hidrogen menjadi molekul dapat menginisiasikan terjadinya *crack* atau retakan. Model ini sesuai dengan pembentukan *blistering*.

## 2. Model Dekohesi

Model ini didasarkan pada pendapat Troiano dan Oriani. Hidrogen yang larut akan menurunkan gaya kohesi antar atom logam. Model ini sangat cocok untuk menjelaskan fenomena penggetasan pada patah getas dengan modulus pembelahan butir (*cleavage*) ataupun patah intergranular karena pada model ini tidak terjadi deformasi lokal pada material tersebut.



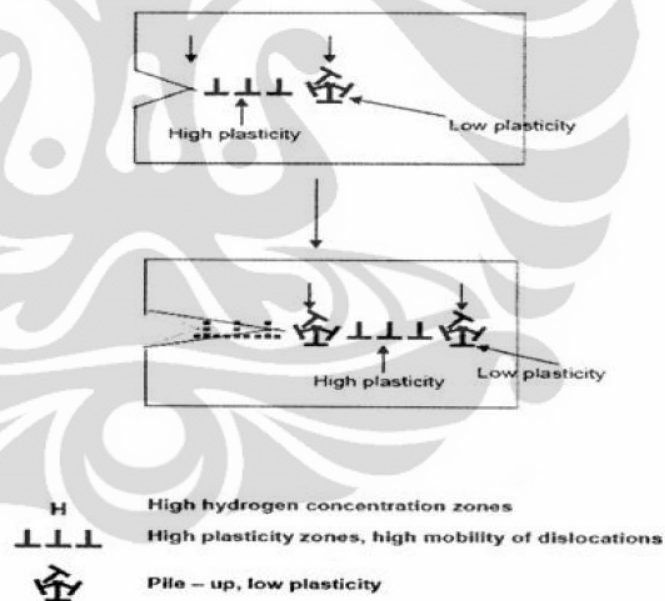
Gambar 2.16 Model Dekohesi <sup>[36]</sup>

Pada saat hidrogen masuk kedalam logam maka ia akan menempati kisi dan akan memperlemah gaya kohesi antar atom. Konsentrasi hidrogen yang masuk kedalam logam apabila mencapai batas kritisnya maka akan memperlemah ikatan antar atom logamnya akibat distorsi kisi yang terjadi antar atom logam. Gaya kohesi atau gaya tarik-menarik antar logam akan menurun bila jarak antar atomnya semakin jauh. Masuknya atom hidrogen kedalam kisi antar atom akan memperbesar jarak antar kisi sehingga bila material diberikan beban yang akan memperbesar jarak antar atom pada kisi logam akan membuat gaya kohesi logam menjadi lebih lemah dan akan menyebabkan material patah getas.

## 3. Model Plastis

Model penggetasan ini pertama kali dikemukakan oleh Beachem. Mekanismenya didasarkan pada observasi hidrogen didalam larutan padat akan meningkatkan mobilitas dari dislokasi dan akan menginisiasikan terjadinya deformasi yang tinggi pada daerah

tertentu. Peningkatan mobilitas dislokasi ini disebabkan karena adanya penurunan interaksi antara dislokasi dengan dislokasi, dislokasi dengan penghalang seperti batas butir, atom karbon dan lain-lain. Kondisi ini terjadi ketika atom hidrogen berada didalam logam. Hidrogen akan menempati diantara dislokasi dengan dislokasi sehingga membuat dislokasi susah untuk bertemu dengan dislokasi lainnya ataupun penghalang dan akan membuat dislokasi tersebut pile up. Akibat hal ini terjadi maka akan membuat adanya daerah tertentu yang mempunyai derajat deformasi yang tinggi sehingga menyebabkan daerah tersebut menjadi lebih getas bila dibandingkan dengan daerah lain. Jika ada tegangan luar yang bekerja pada material maka tegangan tersebut akan terkonsentrasi pada daerah *low plasticity*.



Gambar 2.17 Model Plastik<sup>[36]</sup>

### 2.9.2 Hydrogen Embrittlement

Penggetasan hidrogen merupakan bentuk penurunan kualitas yang dapat dikaitkan dengan korosi. Reaksinya mencakup masuknya hidrogen ke dalam komponen, tahapan yang dapat menyebabkan penurunan keuletan dan kapasitas menahan beban yang kemudian mengakibatkan retakan dan kegagalan getas yang fatal pada aplikasi tegangan dibawah tegangan luluh material<sup>[37]</sup>. Penggetasan

hidrogen terjadi dengan beberapa cara namun yang paling umum adalah melalui aplikasi tegangan tarik dan kelarutan hidrogen di dalam material.

*Hydrogen Induced Cracking* (HIC) merupakan salah satu bentuk *hydrogen embrittlement* yang terjadi akibat adanya hidrogen yang berdifusi. Bentuk perpatahan dari HIC dapat transgranular dan intergranular dan biasanya memiliki ujung perpatahan yang tajam dengan sedikit percabangan dan memiliki morfologi patah *cleavage* pada permukaannya<sup>[33]</sup>.

1. *Loss in Tensile Ductility and Other Mechanical Properties*<sup>[36]</sup>

Masuknya hidrogen ke dalam permukaan logam akan mengakibatkan penurunan sifat mekanik dan ketangguhannya. Hidrogen yang masuk ke dalam logam dapat berekombinasi kembali membentuk molekul hidrogen yang bertekanan tinggi. Akibatnya logam akan bersifat getas dan kehilangan keuletan serta menurunnya kekuatan tarik.

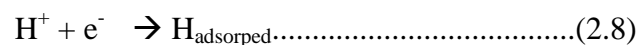
2. *Hydrogen Stress Cracking*<sup>[36]</sup>

Atom hidrogen (H) yang berdifusi ke dalam logam dan berkombinasi menjadi molekul hidrogen (H<sub>2</sub>) akan menghasilkan tekanan yang tinggi. Tekanan ini akan menginisiasi fenomena pelepuhan (*blistering*). Dengan kombinasi adanya atom hidrogen dan pemberian beban atau adanya tegangan sisa akan mengakibatkan cacat *blistering* yang saling terhubung. Cacat ini akan berkembang seiring dengan pemberian tegangan sampai terjadi kerusakan pada logam.

3. *Hydrogen Environmental Embrittlement*<sup>[36]</sup>

Terjadi keretakan pada logam di dalam larutan secara elektrokimia akibat kombinasi hidrogen secara absorpsi katodik. Penggetasan akibat lingkungan hidrogen dapat berasal dari :

a) Pada katoda akan terjadi reaksi evolusi hidrogen :



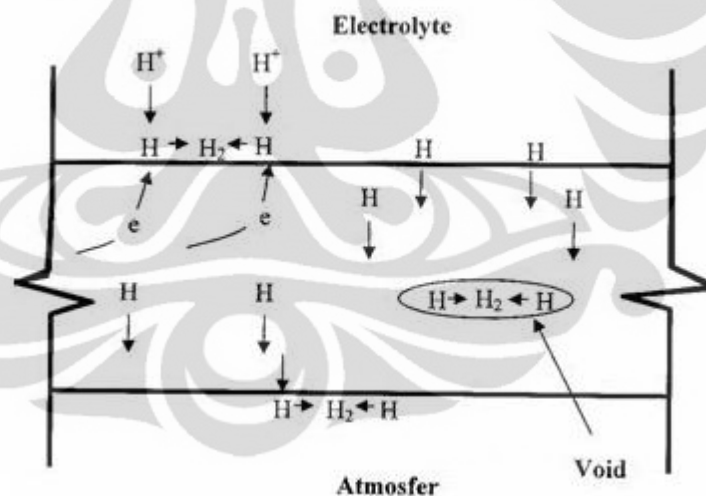


- b) Penggunaan proteksi katodik yang overpotensial pada pengendalian korosi.

### 2.9.3 Cacat Dalam (*Creation of Internal Defect*)<sup>[34]</sup>

Kerusakan yang terjadi pada bagian dalam logam ini biasanya disebabkan oleh gas hidrogen yang berkombinasi dengan tegangan sisa ataupun pembebanan yang mengakibatkan *time delay fracture* akibat proses-proses pengerjaan pada industri.

1. *Blistering*, merupakan formasi atau gabungan molekul hidrogen pada bagian cacat dalam logam seperti batas butir ataupun inklusi yang menyebabkan kerusakan akibat tekanan tinggi yang terbentuk dari kombinasi hidrogen didalam logam. Mekanisme *hydrogen blistering* dapat digambarkan secara skematik pada gambar berikut ini :

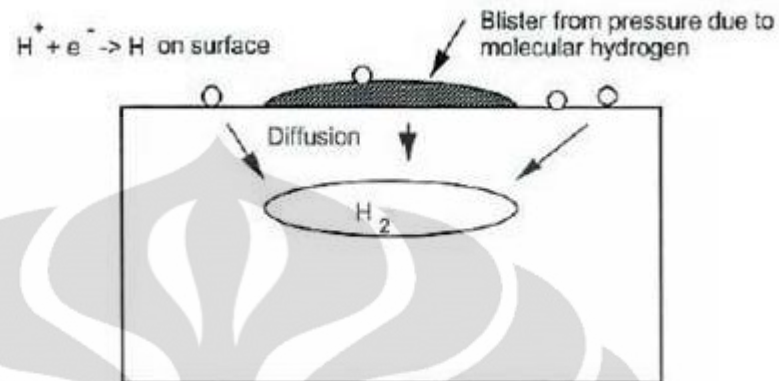


**Gambar 2.18** Skema Mekanisme *Hydrogen Blistering*<sup>[32]</sup>

Pada skema diatas dapat dilihat suatu penampang yang terekspos larutan elektrolit pada bagian dalamnya dan pada bagian luar terekspos atmosfer. Masuknya hidrogen dari bagian dalam sebagai hasil dari proses proteksi katodik ataupun korosi menyebabkan ketersediaan hidrogen di permukaan logam. Difusi atom hidrogen ke dalam permukaan logam dan berekombinasi kembali membentuk



molekul hidrogen menuju suatu *void* yang dapat menghasilkan tekanan yang sangat besar. Tekanan yang dihasilkan bisa mencapai ribuan atmosfer dan dapat menyebabkan kegagalan material.



**Gambar 2.19** Mekanisme *Hydrogen Blistering*

## 2. *Hydrogen Attack*

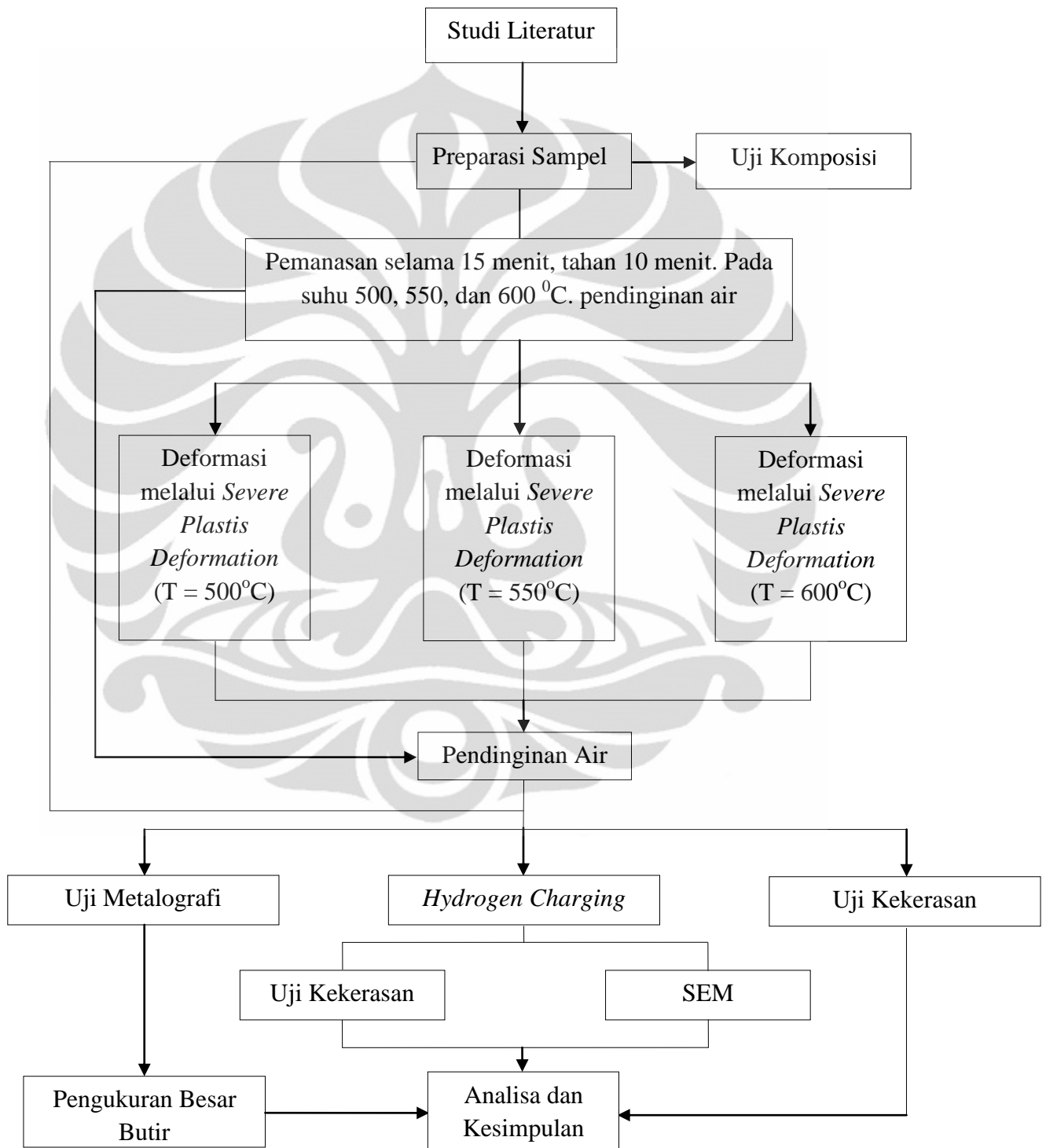
Material logam yang bertemu langsung dengan hidrogen pada kondisi temperatur dan tekanan yang tinggi akan mudah terserang oleh hidrogen. Difusi atom hidrogen pada logam dan kemudian bereaksi dengan karbon yang berasal dari metana pada batas butir akan menghasilkan *void* pada bagian dalam logam. Tekanan metana pada logam ini akan menyebabkan kerusakan.

## 3. Porositas

Logam cair yang mengandung atom hidrogen dalam jumlah tertentu yang pada saat pembekuan hanya melepaskan sebagian saja akan membentuk *void-void* dalam material dan mengakibatkan porositas pada logam.

## BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir Penelitian



**Gambar 3.1** Diagram alir penelitian

## 3.2 Alat dan Bahan

### 3.2.1 Alat

1. Mesin Roll dengan kapasitas 20 ton
2. Dapur Pemanas / *Oven Carbolite*
3. *Furnace Portable*
4. Pengatur temperatur dapur (*controller*)
5. Termokopel
6. *Termowire*
7. Mesin Komputer Pengukur Temperatur
8. Jangka Sorong
9. Mesin Amplas
10. Mesin Poles
11. Mikroskop Optik
12. *Beaker glass*
13. Pipet
14. Grafit
15. Kabel Listrik
16. *Rectifier*
17. Amperemeter
18. *Scanning Electron Microscope*

### 3.2.2 Bahan

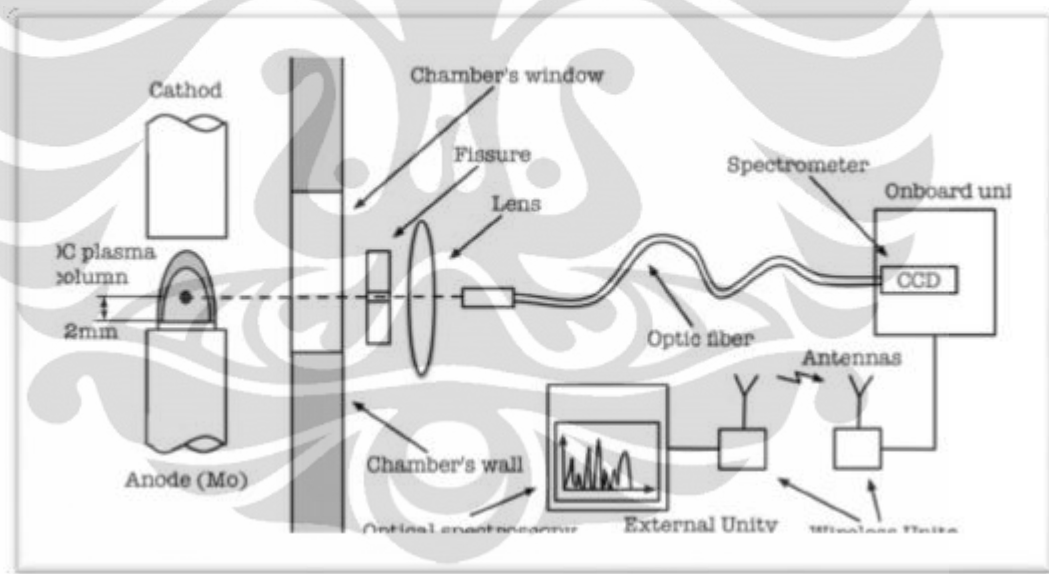
1. *Slab* (Baja Karbon Rendah)
2. Resin dan *hardener*
3. Kertas ampelas Grid #80, #120, #240, #400, #600, #800, #1000, #1200, dan #1500
4. Titanium Dioksida ( $\text{TiO}_2$ )
5. Kain Beludru
6. Zat Etsa Kimia : Larutan Alkohol 96% dan larutan  $\text{HNO}_3$
7. Larutan  $\text{H}_2\text{SO}_4$
8. Thiourea  $\text{CS}[\text{NH}_2]_2$

### 3.3 Prosedur Penelitian

#### 3.3.1 Pemilihan Material

Penelitian diawali dengan pemilihan material sampel uji berdasarkan relevansi antara studi literatur. Material baja yang menjadi sampel uji adalah *slab* yang merupakan baja karbon rendah. Pada tahap awal dilakukan uji komposisi material dengan menggunakan *Optical Emission Spectroscopy* (OES).

OES merupakan suatu metode karakterisasi material dengan cara mengeksitasi atom dengan menggunakan perbedaan potensial antara sampel dan elektroda. Akibat dari energi tersebut, elektron pada sampel akan memancarkan sinar yang akan ditangkap oleh detektor. Perbedaan intensitas yang terjadi kemudian dikarakterisasi oleh *analyzer* sehingga didapatkan komposisi penyusun dari material yang dikarakterisasi. Secara umum pengujian OES terhadap sampel yang digunakan adalah sebagai berikut:



**Gambar 3.2** Skematik *Optical Emission Spectroscopy*<sup>[35]</sup>

Komposisi dari benda uji terdapat pada Tabel 3.1, yaitu:

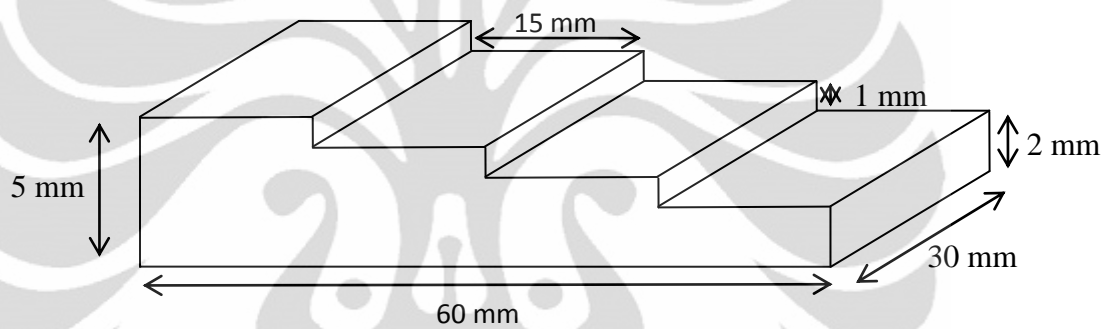
**Tabel 3.1** Komposisi Kimia Spesimen Uji

Komposisi	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Zr
% Berat	99.6	0.114	0.005	0.0236	0.005	0.005	0.005	0.0133	0.0497	0.003

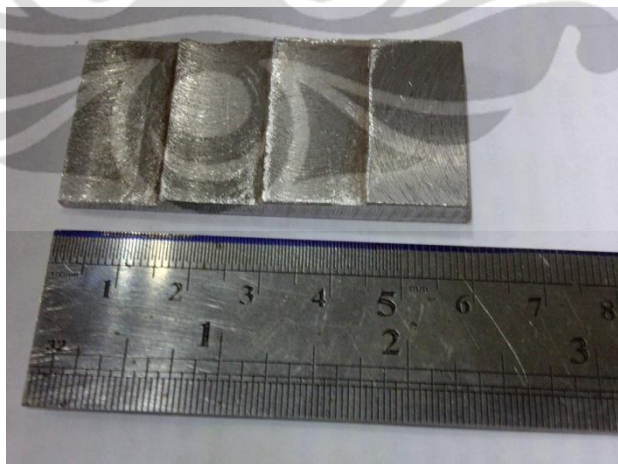
Komposisi	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	Sn	B
% Berat	0.002	0.009	0.061	0.003	0.004	0.002	0.025	0.01	0.017	0.003

### 3.3.2 Preparasi Benda Uji

Benda uji yang digunakan pada penelitian ini dipotong sehingga berbentuk *wedge shaped* dengan dimensi seperti pada gambar 3.3 di bawah. Spesimen diberi lubang untuk meletakkan kawat termokopel sebagai alat pengukur temperatur benda uji. Pengukuran temperatur menggunakan *data acquisition system* yang dihubungkan dengan komputer. Kedalaman lubang adalah  $\pm 5$  mm dengan diameter 2,5 mm yang disesuaikan diameter kawat termokopel.



**Gambar 3.3** Sketsa Benda Uji



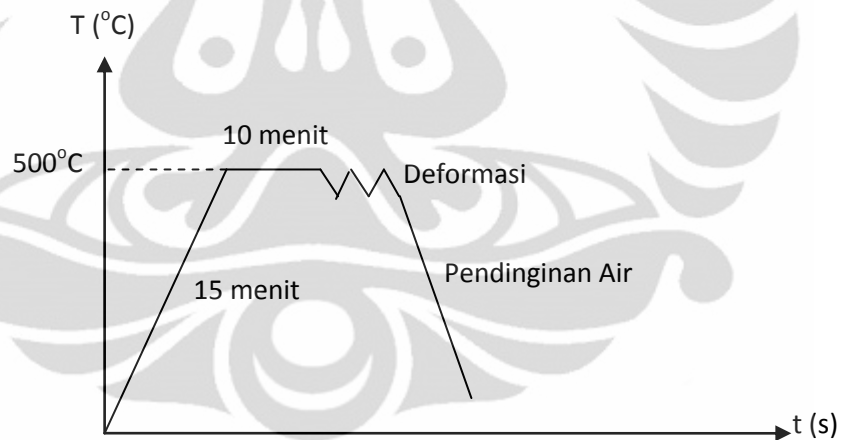
**Gambar 3.4** Ilustrasi Benda Uji Setelah Dipreparasi

### 3.3.3 Proses TMCP dan *Warm Rolling*

Seluruh spesimen yang telah diukur disiapkan untuk berbagi tes, kemudian masing-masing dimasukkan ke dalam *furnace* atau dapur perapian untuk dipanaskan hingga suhu 500 °C, 550 °C, dan 600°C selama 15 menit, kemudian ditahan selama 10 menit. Kemudian dengan melakukan canai searah dengan maksimal besaran deformasi 80%, dilanjutkan dengan pendinginan air. Proses canai dilakukan dengan menggunakan mesin *OnoRoll* berkapasitas 20 ton.

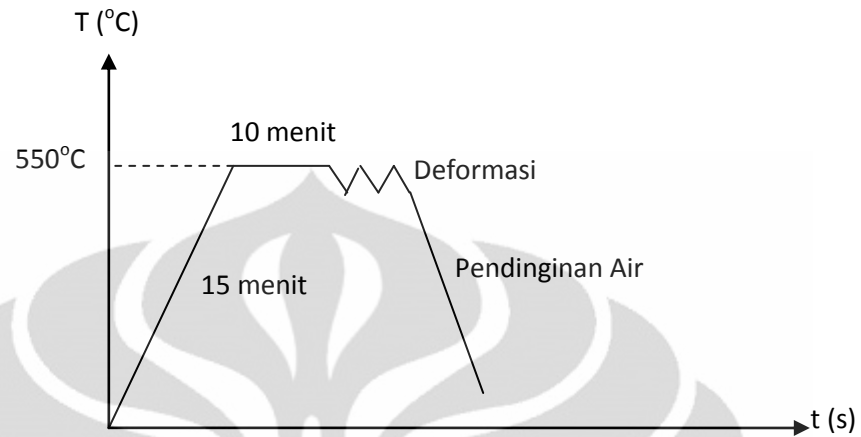
Penelitian ini terbagi atas beberapa variasi proses. Tiap variasi memiliki parameter tersendiri pada hasil akhir. Variasi-variasi proses yang dilakukan yaitu :

1. Benda Uji A<sub>0</sub> adalah benda uji awal yang tidak mengalami perlakuan panas, yang diidentifikasi mikrostruktur, dan kekerasannya sebagai pembanding untuk benda uji berikutnya.
2. Benda Uji A, B, C, dan D dipanaskan hingga suhu 500 °C selama 15 menit, ditahan selama 10 menit, lalu didinginkan dengan media air.



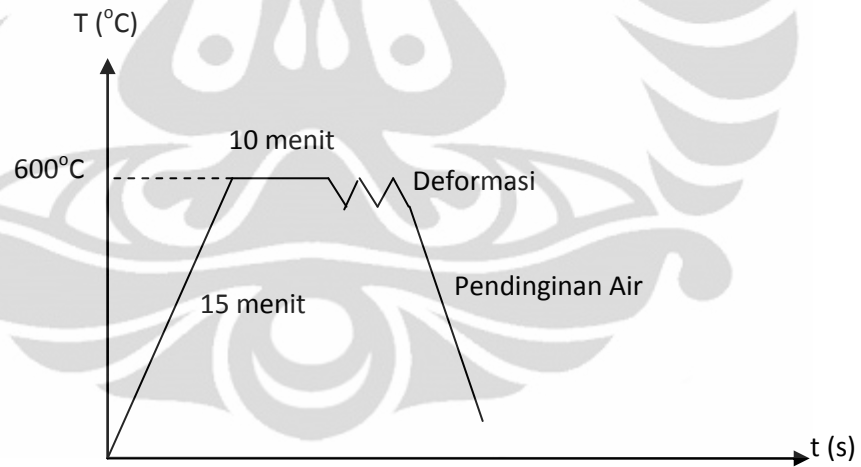
**Gambar 3.5** Skematik Pengujian Benda Uji A, B, C, dan D

3. Benda Uji E, F, G, dan H dipanaskan hingga suhu  $550^{\circ}\text{C}$  selama 15 menit, ditahan selama 10 menit, lalu didinginkan dengan media air.

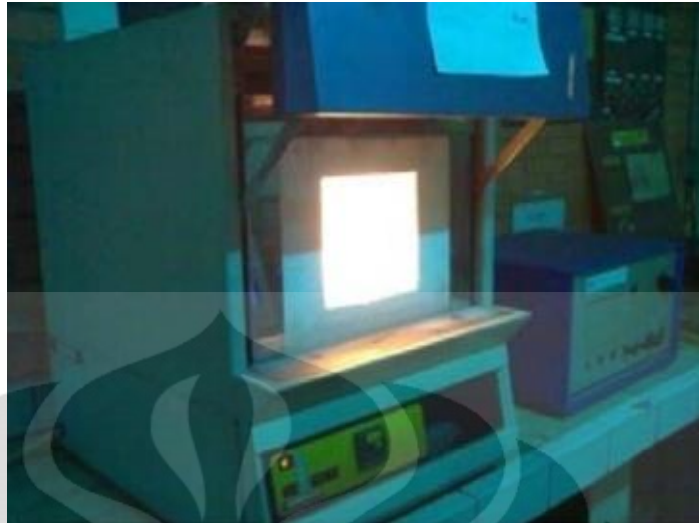


**Gambar 3.6** Skematik Pengujian Benda Uji E, F, G, dan H

4. Benda Uji I, J, K, dan L dipanaskan hingga suhu  $600^{\circ}\text{C}$  selama 15 menit, ditahan selama 10 menit, lalu didinginkan dengan media air.



**Gambar 3.7** Skematik Pengujian Benda Uji I, J, K, dan L



**Gambar 3.8** *Furnace Carbolite*



**Gambar 3.9** Mesin Onoroll dan Rangkaian Alat

### **3.3.4 Preparasi, Pengujian Metalografi dan Pengamatan Mikrostruktur**

Pengujian metalografi bertujuan untuk mengamati mikrostruktur dari benda uji. Preparasi benda uji berdasarkan *ASTM E 3 – 01 “Standard Guide for Preparation for Metallographic Specimens”* [38].

Untuk benda uji yang berukuran kecil dilakukan proses *mounting* terlebih dahulu untuk mempermudah penanganan benda uji metalografi. Setelah itu dilakukan proses pengamplasan untuk meratakan bagian benda uji yang akan di amati mikrostrukturnya. Pengamplasan dilakukan dengan menggunakan kertas amplas yang dimulai dari amplas kasar hingga amplas halus agar didapat

**Universitas Indonesia**



permukaan benda uji yang halus dan rata di seluruh permukaan. Ukuran kekasaran dari kertas amplas yang digunakan yaitu: #80, #120, #240, #400, #600, #800, #1000, #1200, #1500 (dalam *mesh*). Dalam melakukan pengamplasan, arah pengamplasan diubah setiap mengganti tingkat kekasaran kertas amplas, hal ini bertujuan untuk menghilangkan sisa pengamplasan sebelumnya sehingga didapat permukaan yang halus pada benda uji.

Setelah selesai melakukan pengamplasan, maka benda uji dipoles agar mendapatkan permukaan yang lebih halus dan mengkilap serta menghilangkan bekas goresan akibat pengamplasan. Benda uji dipoles dengan menggunakan kain beludru dan zat poles yang digunakan adalah alumina. Setelah dilakukan proses poles, benda uji dietsa dengan Nital 2% untuk untuk memunculkan jejak batas butir struktur akhir dari benda uji sehingga dapat diamati morfologi butir ferrit. Setelah itu dilakukan pengamatan dengan mikroskop optik.

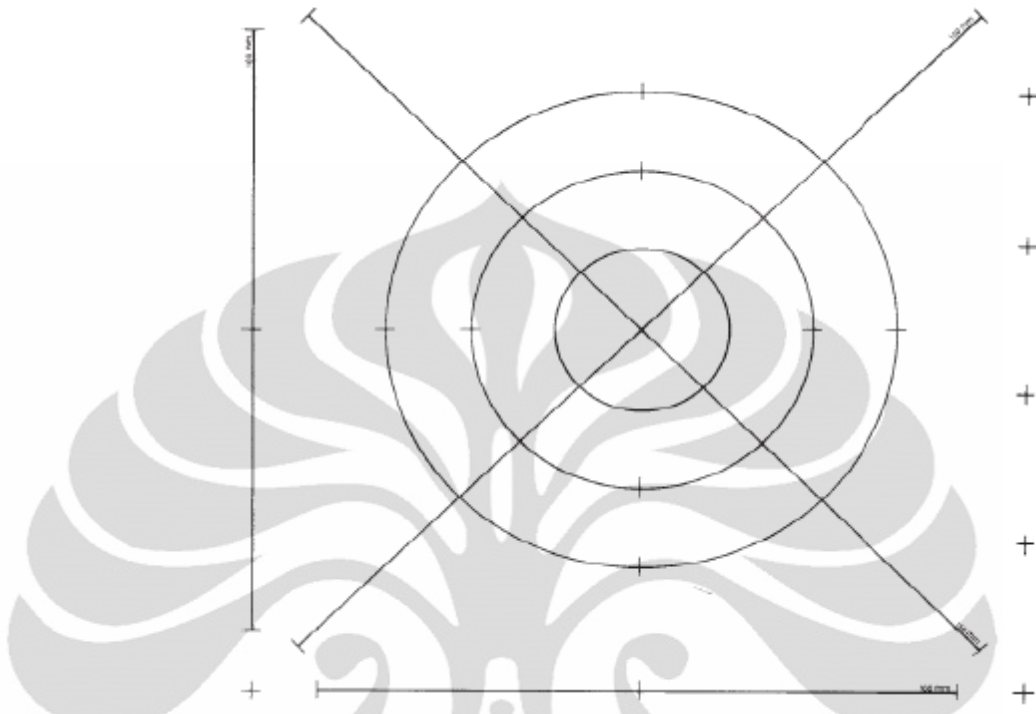


**Gambar 3.10** Mikroskop Optik

### **3.3.5 Perhitungan Besar Butir *Equiaxed***

Pengujian dan perhitungan besar butir dilakukan dengan menggunakan standar ASTM E112<sup>[39]</sup>. Terdapat berbagai metode perhitungan besar butir yang ada dalam ASTM E112, namun yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah metode *Intercept* Heyn. Prinsip perhitungan besar butir metode Heyn yaitu dengan membuat 3 lingkaran masing-masing memiliki diameter sebesar 79.58 mm, 53.05 mm, 26,53 mm dimana ketiga lingkaran tersebut digabung menjadi satu dengan panjang total ketiga garis lingkaran tersebut 500 mm. Kemudian

perpotongan garis ketiga lingkaran dengan batas butir antara satu butir dijumlahkan dengan mengabaikan butir twins.



**Gambar 3.11** Lingkaran yang digunakan untuk penghitungan butir dengan metode *Intercept Heyn*<sup>[39]</sup>

Setelah metode etsa dapat menampilkan batas butir Austenit, maka besar butir dihitung dengan menggunakan metode *intercept*, sesuai dengan standar perhitungan metalografi kuantitatif ASTM E112. Jumlah titik potong persatuan panjang (PL) dihitung dengan :

$$PL = P / L_T / M \dots \dots \dots (3.1)$$

dan panjang garis perpotongan (L3) adalah:

$$L_3 = 1 / P_L \dots \dots \dots (3.2)$$

dimana :

- P = Jml titik potong batas butir dengan total panjang garis yang dalam hal ini berbentuk lingkaran.
- P<sub>L</sub> = Jumlah titik potong persatuan panjang
- L<sub>T</sub> = Panjang Garis Total (Sesuai standar ASTM =500 mm)
- L<sub>3</sub> = panjang garis perpotongan (mm)
- M = Perbesaran

Dari PL atau L3 , dapat dilihat di tabel besar butir ASTM E 112, atau dimasukkan ke dalam persamaan :

$$G = [-6,6439 \log (L3) - 3,2877] \dots \dots \dots (3.3)$$

Perhitungan besar butir dalam penelitian ini dilakukan pada satu sampel dari setiap variabel dengan foto mikro pada tiga arah yang berbeda pada satu sampel. Selanjutnya untuk menentukan diameter besar butir dilakukan dengan mencocokkan nomor G yang didapat dalam perhitungan dengan tabel besar butir standar pada ASTM E112.

### 3.3.5 Perhitungan Besar Butir *Non-Equiaxed*

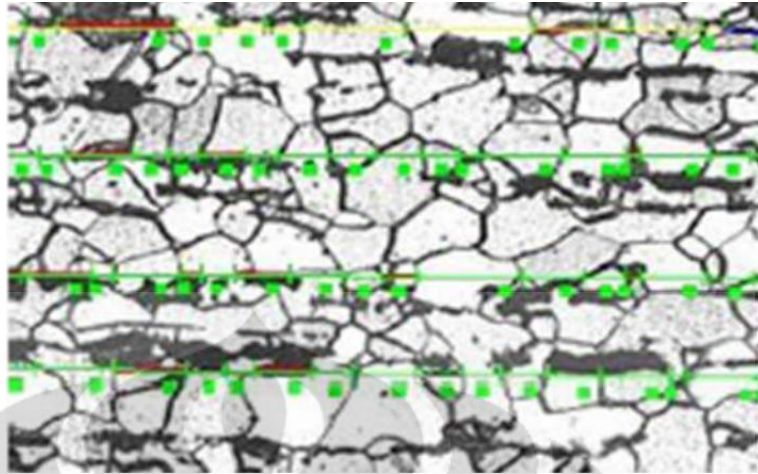
Pengukuran besar butir dilakukan dengan metode *Straight Line Test*. Dengan membuat suatu garis lurus ( $L_t$ ) pada gambar struktur mikro dan menggunakan besaran tertentu sedemikian sehingga jumlah butir terpotong oleh suatu garis dapat dihitung dengan akurat. Panjang garis yang digunakan harus menghasilkan jumlah butir terpotong antara 50-150 butir oleh garis pada perbesaran yang dipilih.

Ketentuan perhitungan jumlah butir yang terpotong adalah: jika garis memotong penuh satu butir maka dihitung satu. Jika ujung garis tepat berakhir pada pertengahan butir, maka dihitung setengah. Pertemuan antara 3 butir dihitung satu setengah dan jika garis menyinggung batas butir, maka dihitung setengah. Kemudian hasil perhitungan jumlah butir terpotong digunakan dalam perhitungan dengan persamaan sebagai berikut:

$$L = \frac{V_v \times L_t}{N_\alpha \times M} \dots \dots \dots (3.4)$$

Dimana ,     L       : Besar butir rata-rata ( $\mu\text{m}$ )  
                $V_v$      : Fraksi volume fasa tertentu  
                $L_t$      : Panjang garis total ( $\mu\text{m}$ )  
                $N_\alpha$     : Jumlah butir terpotong garis  
               M       : Perbesaran

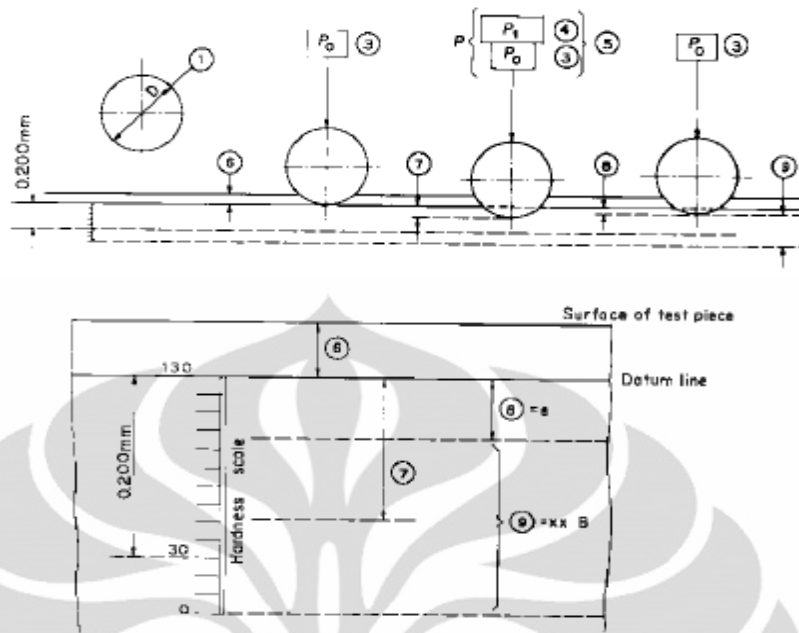
Kemudian dari hasil perhitungan besar butir rata-rata diatas dikonversikan menjadi ukuran butir menurut standard ASTM E 112 mengenai *Grain Size Measurement*.



Gambar 3.12 Metode *Straight Line Test*

### 3.3.6 Pengujian Nilai Kekerasan

Metode pengujian kekerasan yang dipakai yaitu metode kekerasan Rockwell (ASTM E 18) “*Standard Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials*”<sup>[40]</sup>. Indentor yang digunakan kerucut intan dengan sudut yang dibentuk muka intan  $120^\circ$ . Pembebanan dilakukan dengan dua tahap; tahap pertama adalah pembebanan minor kemudian pembebanan mayor. Nilai kekerasan ditentukan dengan perbandingan kedalaman kedua tahap pembebanan. Berbeda dengan metode Brinell dan Vickers dimana kekerasan suatu bahan dinilai dari diameter atau diagonal jejak yang dihasilkan, maka metode Rockwell merupakan uji kekerasan dengan pembacaan langsung (*direct reading*). Metode ini banyak dipakai dalam industri karena pertimbangan praktis. Variasi dalam beban dan indentor yang digunakan membuat metode ini memiliki banyak macamnya. Metode Rockwell yang digunakan pada penelitian ini adalah Rockwell B (dengan indentor bola baja berdiameter 1/6 inci dan beban 100 kg). Waktu yang digunakan untuk indentasi yaitu 5 detik.



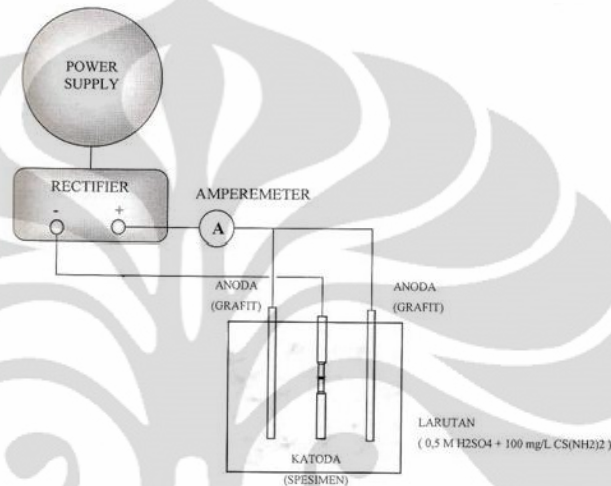
**Gambar 3.13** Prinsip pengujian kekerasan dengan metode *Rockwell B* menggunakan indenter 1/6 bola baja<sup>[40]</sup>

**Tabel 3.2** Simbol dan Penandaan yang berhubungan dengan pengujian *Rockwell B* <sup>[40]</sup>.

Number	Symbol	Designation
1	$D$	Diameter of ball = $\frac{1}{16}$ in. (1.588 mm)
3	$P_0$	Preliminary Test Force = 10 kgf (98 N)
4	$P_1$	Additional force = 90 kgf (883 N)
5	$P$	Total Test Force = $P_0 + P_1 = 10 + 90 = 100$ kgf (981 N)
6	...	Depth of penetration under preliminary test force before application of additional force
7	...	Increase in depth of penetration under additional force
8	$e$	Permanent increase in depth of penetration under preliminary test force after removal of the additional force, the increase being expressed in units of 0.002 mm
9	xx HRB	Rockwell B hardness = $130 - e$

### 3.3.7 Pengujian *Hydrogen Charging Test*<sup>[37]</sup>

*Hydrogen Charging* merupakan proses elektrokimia yang memasukkan atom hidrogen ke permukaan logam dengan cara difusi. Proses ini menggunakan larutan  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0.5 M ditambah Thiourea  $\text{CS}[\text{NH}_2]_2$  100 mg/l dengan menggunakan rapat arus  $1\text{mA}/\text{cm}^2$  selama 10 menit. Sel elektrokimia ini terdiri dari grafit sebagai anoda dan spesimen uji sebagai katoda.



Gambar 3.14 Rangkaian proses *Hydrogen Charging*<sup>[37]</sup>.

### 3.3.8 Pengamatan *Scanning Electron Microscope*<sup>[37]</sup>

Pengamatan ini memberikan informasi tentang sejauh mana ketahanan material terhadap difusi atom hidrogen dan pengaruhnya terhadap kekuatan dan ketangguhan material. Pengamatan *Scanning Electron Microscope* meliputi pengamatan mikro terhadap difusi atom hidrogen dengan perbesaran 1000x.



Gambar 3.15 *Scanning Electron Microscope*

## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Hasil Pengukuran Ketebalan Benda Uji

Deformasi yang akan terjadi pada benda uji terlebih dahulu dihitung melalui persamaan berikut:

$$\% \text{ Deformasi} = \frac{H_0 - H_f}{H_0} \dots\dots\dots (4.1)$$

Dimana,

- % Deformasi = Besar Derajat Deformasi
- $H_0$  = Ketebalan Awal (mm)
- $H_f$  = Ketebalan Akhir (mm)

Setiap benda uji diukur ketebalannya menggunakan jangka sorong. Pengukuran ketebalan benda uji dilakukan sebanyak tiga kali sehingga didapat rata-rata ketebalan untuk setiap benda uji. Hasil pengukuran ketebalan benda uji dapat dilihat pada Tabel 4.1.

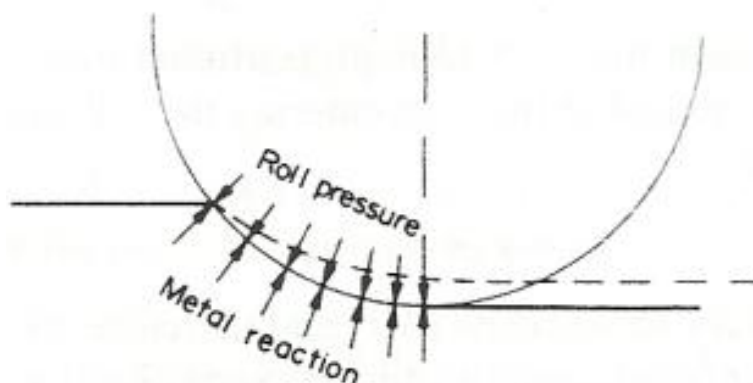


**Gambar 4.1** Benda Uji Yang Telah Dideformasi

**Tabel 4.1** Hasil Pengukuran Dimensi Benda Uji Sebelum Dan Sesudah Proses Pencanaan 500 °C, 550 °C, dan 600 °C dengan Pendinginan Media Air

No	Sampel	Temperatur (°C)	$h_0$ (mm)	$h_f$ teoritis (mm)	$h_f$ aktual (mm)	% Deformation (Teoritis)	% Deformation (Aktual)
1	A <sub>0</sub> (Bulk)		-	-	-	-	-
2	A <sub>1</sub>	500	-	-	-	-	-
3	A		2,0	1,0	1,38	50	31,00
4	B		3,0	1,0	1,38	66,7	53,48
5	C		4,0	1,0	1,38	75	65,21
6	D		5,0	1,0	1,38	80	72,40
7	A <sub>2</sub>	550	-	-	-	-	-
8	E		1,8	1,0	1,40	50	20,75
9	F		3,0	1,0	1,40	66,7	53,59
10	G		4,1	1,0	1,40	75	65,57
11	H		5,0	1,0	1,40	80	72,00
12	A <sub>3</sub>	600	-	-	-	-	-
13	I		2,1	1,0	1,41	50	33,91
14	J		3,2	1,0	1,41	66,7	55,94
15	K		4,2	1,0	1,41	75	66,43
16	L		5,0	1,0	1,41	80	71,80

Dari data tabel 4.1 terlihat perbedaan ketebalan akhir aktual ( $h_f$  aktual) dan ketebalan akhir teoritis ( $h_f$  teoritis) dari setiap benda uji. Perbedaan yang terjadi pada nilai ketebalan akhir benda uji ini disebabkan adanya mekanisme *roll flattening* pada saat proses canai. Ketika sampel uji masuk kedalam roller, terjadi interaksi antara *roller* dengan material, *roll* melakukan tekanan dan material mengalami reaksi. Jika benda uji memiliki kekerasan yang cukup tinggi, reaksi yang terjadi juga meningkat yang mengakibatkan roller terdeformasi secara elastis<sup>[14]</sup>.



**Gambar 4.2** Mekanisme *Roll Flattening*<sup>[14]</sup>.

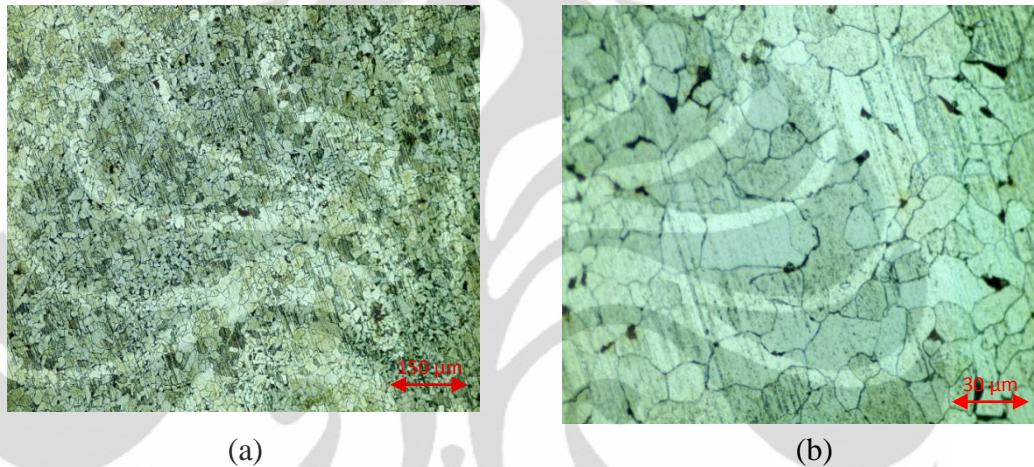


**Tabel 4.2** Hasil Pengukuran *Strain Rate* Benda Uji Baja Karbon Rendah Dengan Proses Pencanaan 500 °C, 550 °C, Dan 600 °C Dengan Pendinginan Media Air

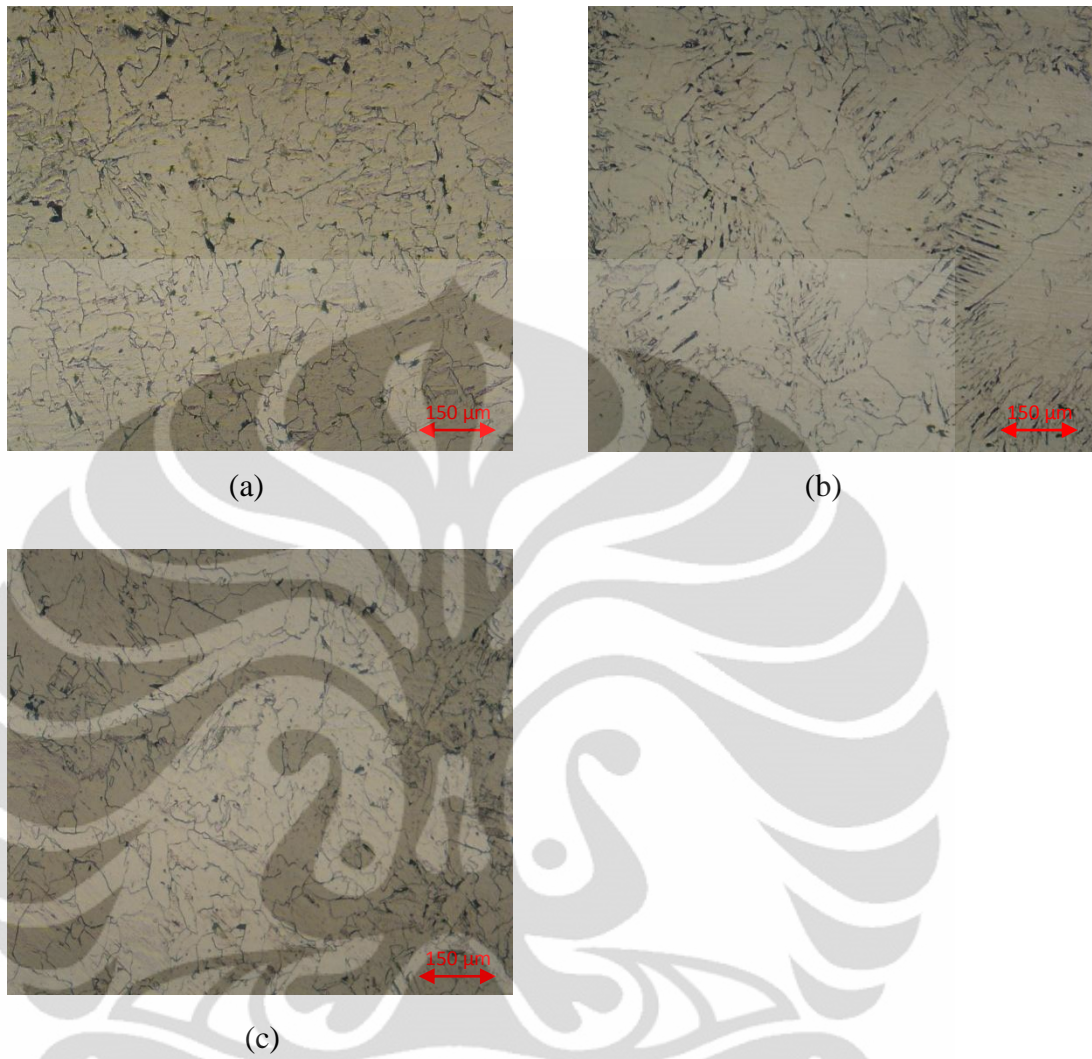
Sampel	Temperatur (°C)	$\epsilon$ (Teoritis)	$\epsilon$ (Aktual)	$\epsilon'$ (teoritis)	$\epsilon'$ (aktual)
A	500	0,693	0,371	12,82	8,71
B		1,087	0,765	14,34	11,23
C		1,378	1,056	14,79	12,14
D		1,609	1,287	14,88	12,51
E	550	0,569	0,233	12,02	7,10
F		1,104	0,768	14,38	11,16
G		1,403	1,066	14,81	12,07
H		1,609	1,273	14,88	12,40
I	600	0,758	0,414	13,16	9,00
J		1,163	0,820	14,50	11,33
K		1,435	1,091	14,83	12,08
L		1,609	1,266	14,88	12,35

#### 4.2 Hasil Pengamatan Metalografi

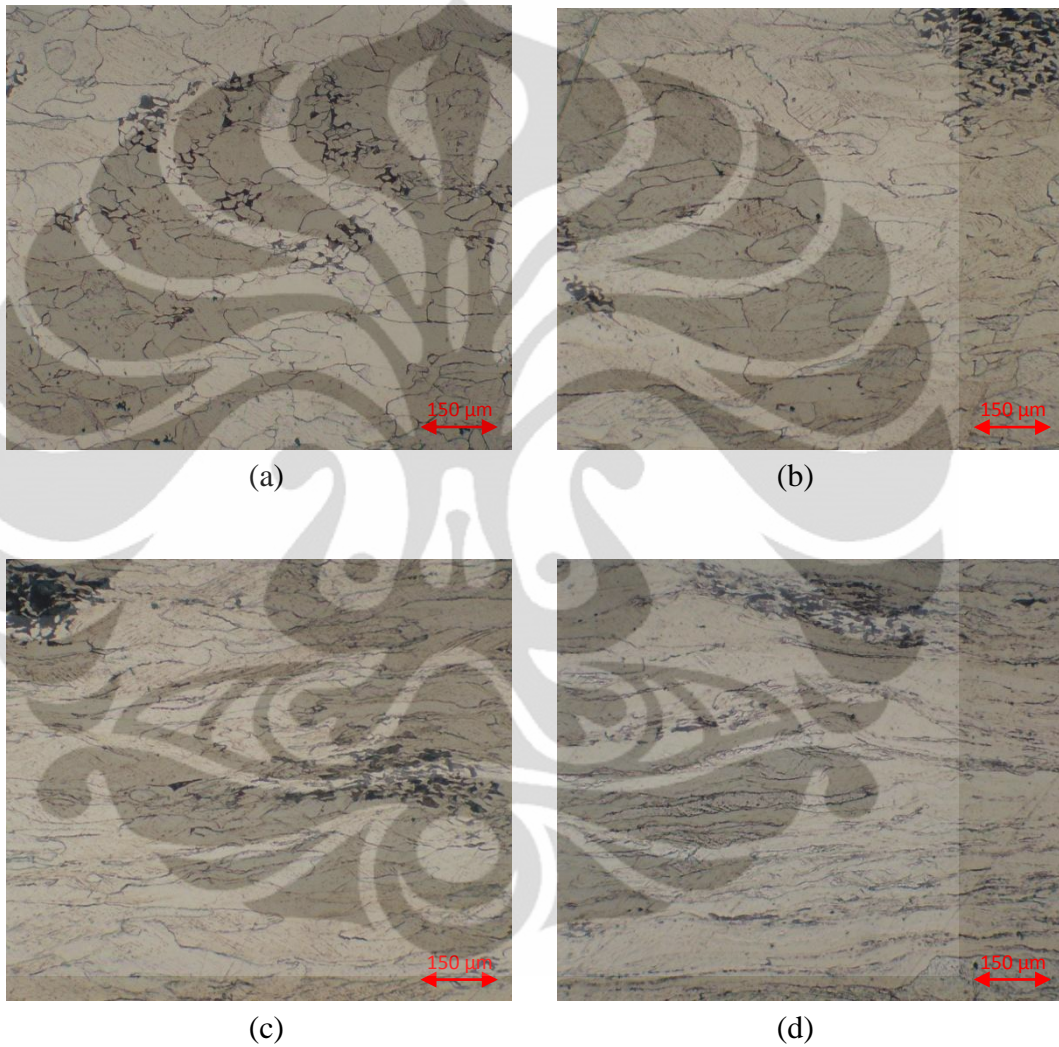
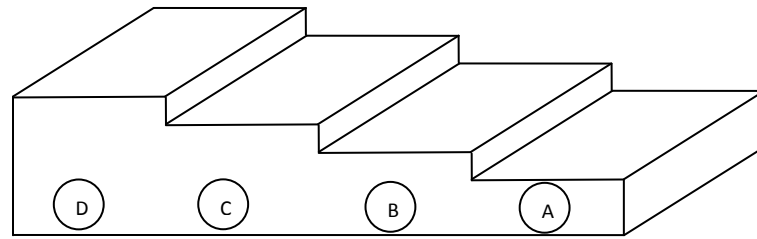
Pada penelitian ini terlihat bahwa perbedaan perlakuan panas dan besar deformasi hasil proses pencanaian yang dilakukan pada benda uji sangat berpengaruh terhadap struktur mikro bahan. Pengamatan dilakukan dengan menggunakan etsa nital 4% selama 4 - 10 detik. Pengamatan ini meliputi morfologi dan ukuran butir sebelum dan sesudah proses.



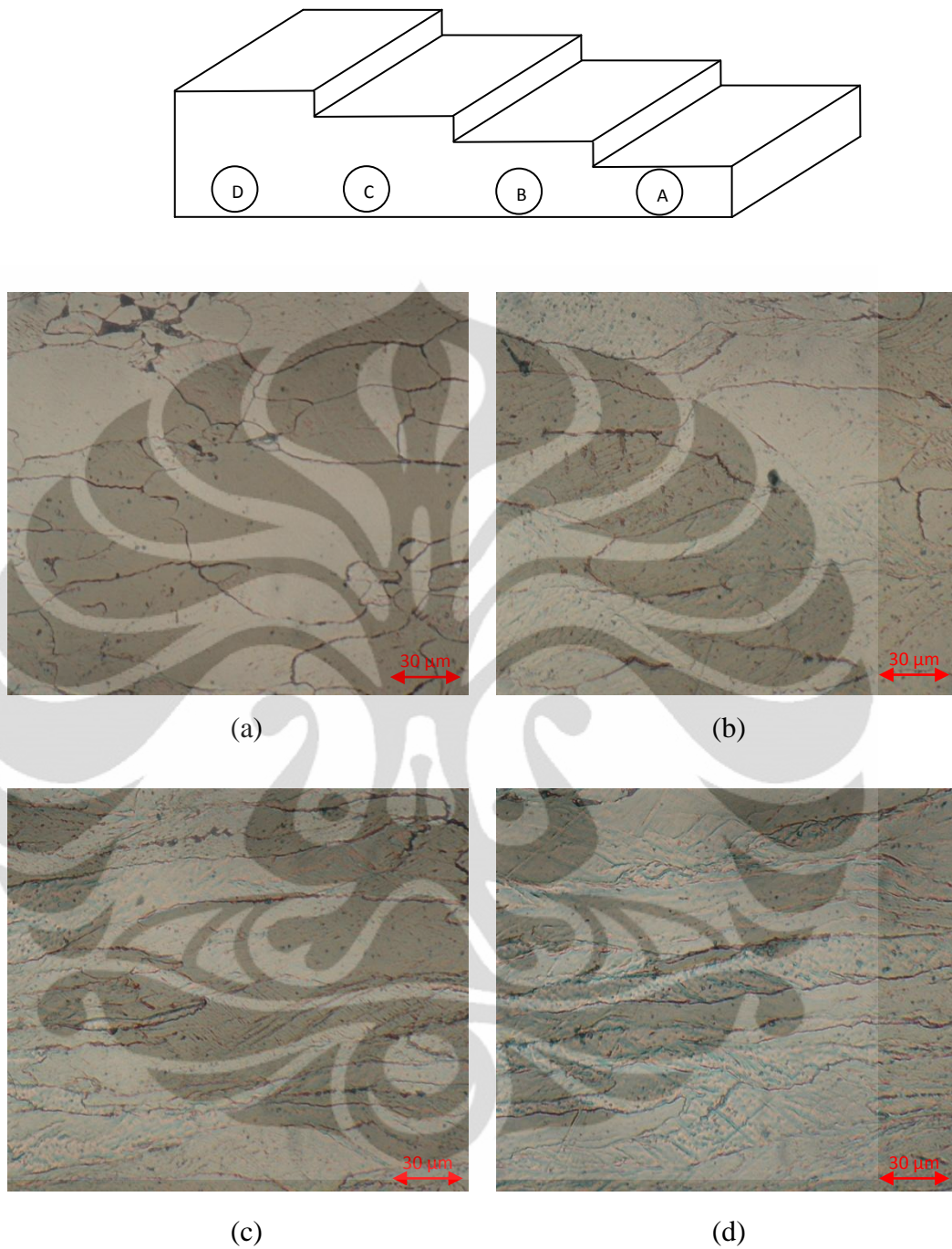
**Gambar 4.3** Mikrostruktur Sampel *Bulk*, Etsa Nital 2%



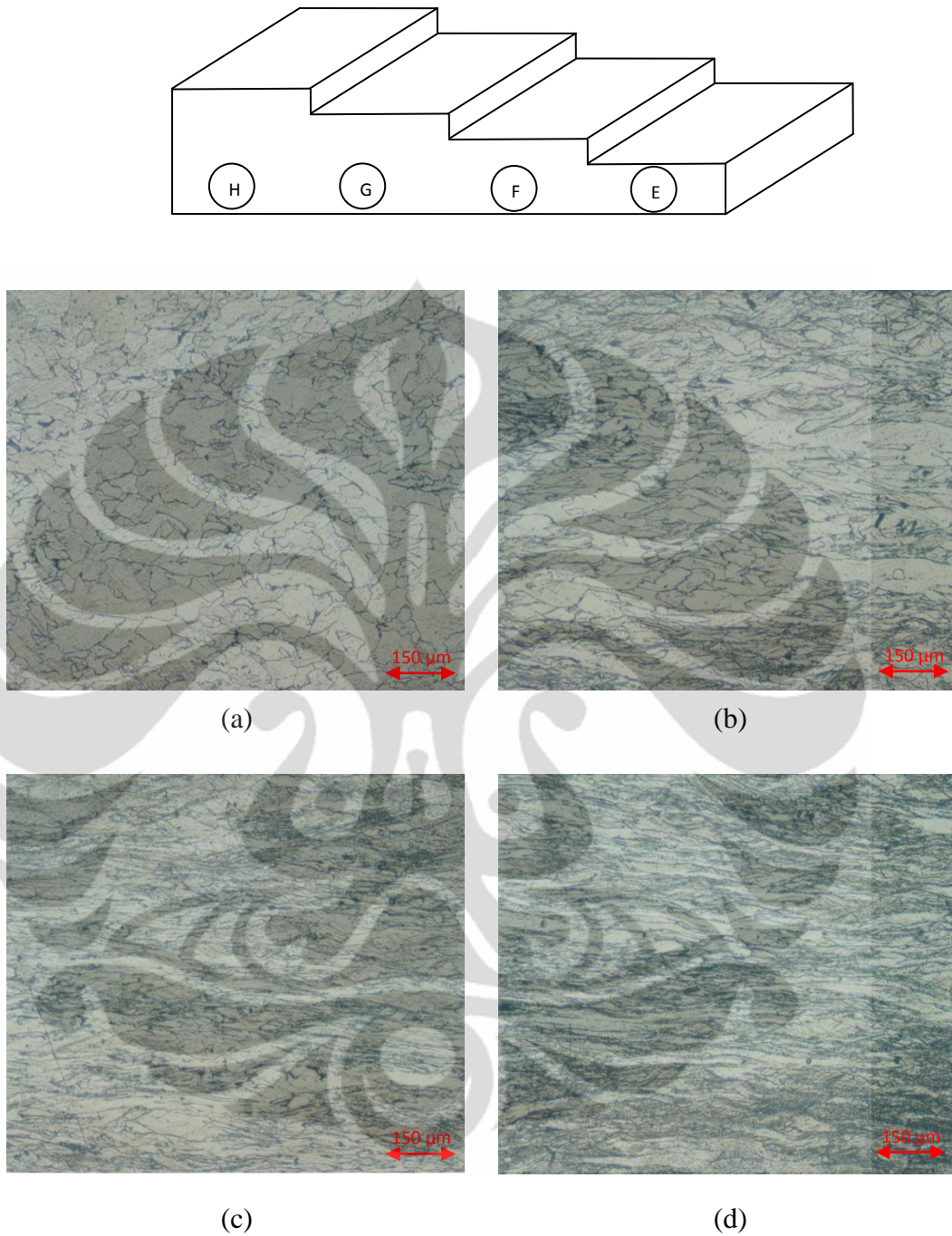
**Gambar 4.4** Mikrostruktur Sampel *Reheating* Etsa Nital 2%, (a) 500 °C  
(b) 550 °C (c) 600 °C.



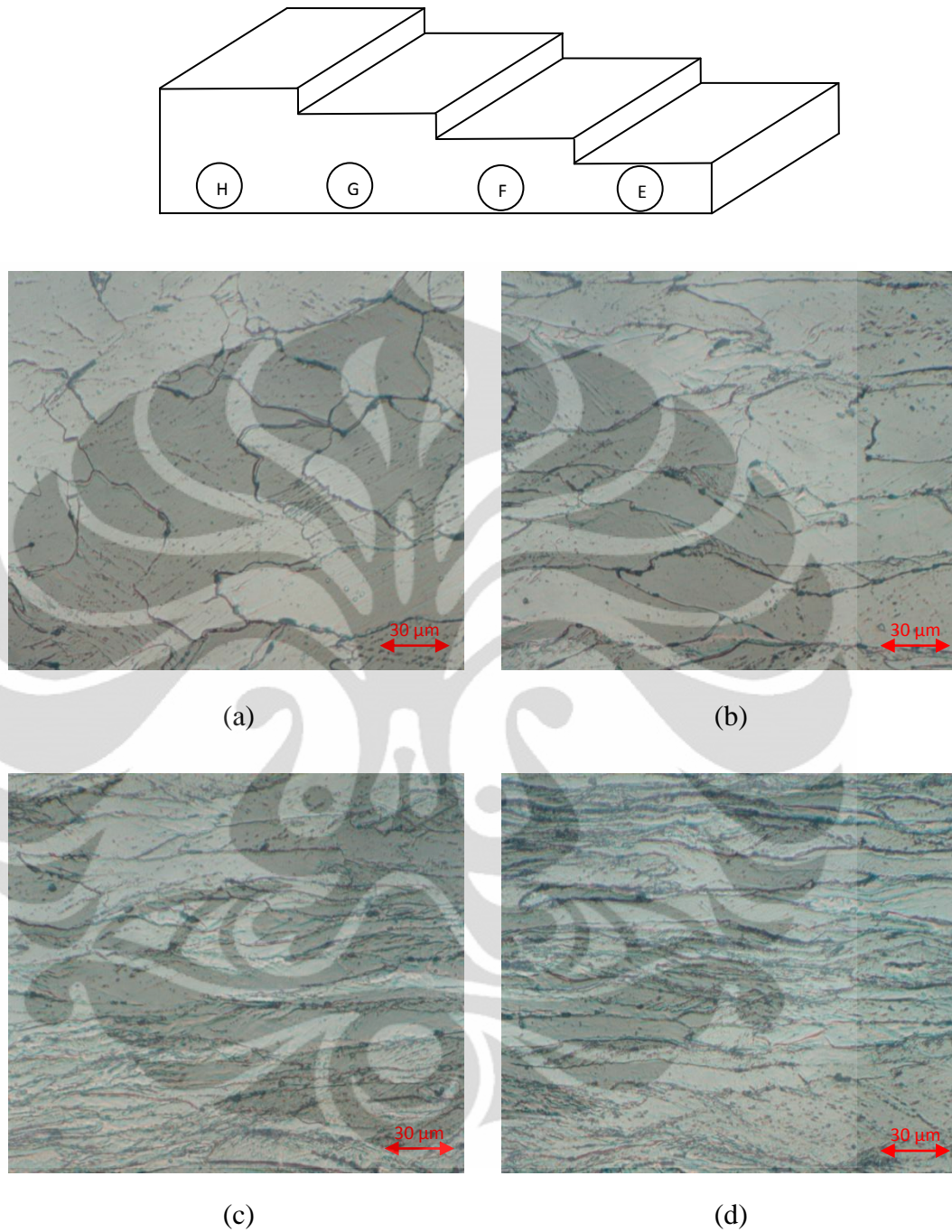
**Gambar 4.5** Sampel *Rolling* 500 °C, (a) Sampel A Deformasi 50 %, (b) Sampel B Deformasi 66,67 %, (c) Sampel C Deformasi 75 %, dan (d) Sampel D Deformasi 80 %. Nital 4 %, Perbesaran 100 x



**Gambar 4.6** Sampel *Rolling* 500 °C, (a) Sampel A Deformasi 50 %, (b) Sampel B Deformasi 66,67 %, (c) Sampel C Deformasi 75 %, dan (d) Sampel D Deformasi 80 %. Nital 4 %, Perbesaran 500 x



**Gambar 4.7** Sampel *Rolling* 550 °C, (a) Sampel E Deformasi 50 %, (b) Sampel F Deformasi 66,67 %, (c) Sampel G Deformasi 75 %, dan (d) Sampel H Deformasi 80 %. Nital 4 %, Perbesaran 100 x

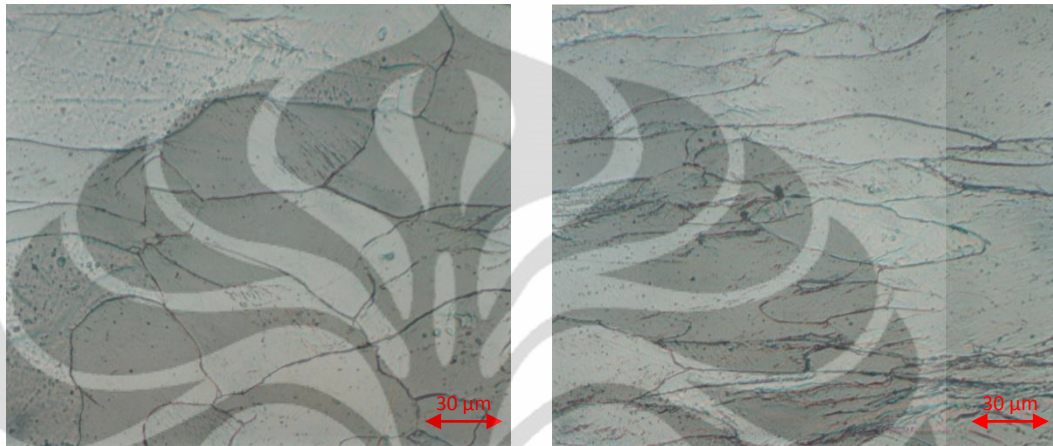
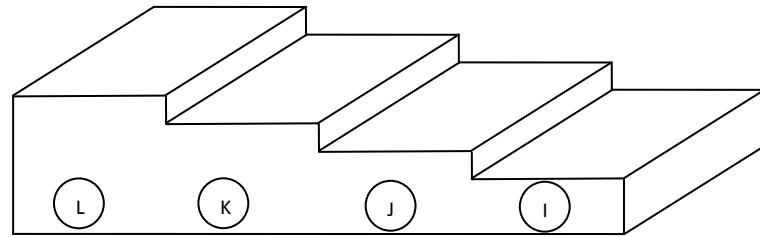


**Gambar 4.8** Sampel *Rolling* 550 °C, (a) Sampel E Deformasi 50 %, (b) Sampel F Deformasi 66,67 %, (c) Sampel G Deformasi 75 %, dan (d) Sampel H Deformasi 80 %. Nital 4 %, Perbesaran 500 x



**Gambar 4.9** Sampel *Rolling* 600 °C, (a) Sampel I Deformasi 50 %, (b) Sampel J Deformasi 66,67 %, (c) Sampel K Deformasi 75 %, dan (d) Sampel L Deformasi 80 %. Nital 4 %, Perbesaran 100x





(a)

(b)



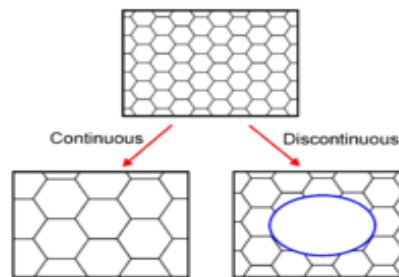
(a)

(b)

**Gambar 4.10** Sampel *Rolling* 600 °C, (a) Sampel I Deformasi 50 %, (b) Sampel J Deformasi 66,67 %, (c) Sampel K Deformasi 75 %, dan (d) Sampel L Deformasi 80 %. Nital 4 %, Perbesaran 500 x

Gambar 4.5 (a) dan 4.9 (a) merupakan hasil foto mikro benda uji yang telah mengalami *reheating* selama 10 menit pada temperatur 500 °C dan 600 °C kemudian dideformasi sebesar 50 % dilanjutkan dengan pendinginan air, dan menghasilkan *strain rate* sebesar 8,71 s<sup>-1</sup> dan 9,00 s<sup>-1</sup>. Pada gambar tersebut menunjukkan adanya butir – butir kecil baru yang berbentuk *equiaxed* terbentuk disekitar kumpulan – kumpulan *pearlite*. Hal ini mengindikasikan bahwa rekristalisasi dinamis telah terjadi walaupun hanya tahap awal<sup>[41]</sup>. Pada gambar 4.9 (a), terlihat jumlah butir *equiaxed* yang baru lebih banyak dari pada gambar 4.5 (a), ini dikarenakan rekristalisasi dinamis dapat terjadi ketika temperatur tinggi dan *strain rate* rendah, namun dengan syarat *strain* harus diatas nilai kritisnya<sup>[41]</sup>. Gambar 4.5 (a) mengalami temperatur *reheating* yang lebih rendah sehingga fenomena rekristalisasi yang terjadi menjadi lebih sedikit. Pada gambar 4.7 (a), hasil foto mikro yang mengalami *reheating* selama 10 menit pada temperatur 550 °C kemudian dideformasi sebesar 50 % dilanjutkan dengan pendinginan air, dan menghasilkan *strain rate* sebesar 7,10 s<sup>-1</sup>, tidak terlihat adanya butir – butir *equiaxed* yang baru terbentuk. Hal ini disebabkan rekristalisasi dinamis belum terjadi.

Dari ketiga gambar tersebut, terlihat bahwa morfologi butirnya menjadi pipih akibat proses pencanaian dan butir – butir awal menjadi lebih besar dari semula (*grain growth*). Pertumbuhan butir (*grain growth*) terjadi karena adanya migrasi batas butir akibat difusi atom – atom dari suatu butir ke butir lainnya sehingga terjadi perubahan batas butir. Pertumbuhan butir tidak terlalu signifikan karena temperatur yang di berikan tidak cukup tinggi untuk proses pertumbuhan butir. Pertumbuhan butir dapat dibagi menjadi dua mekanisme yaitu *continuous (normal) grain growth*, dimana semua butir tumbuh menjadi lebih besar dengan laju yang sama dan *discontinuous (abnormal) grain growth* dimana beberapa butir tumbuh dengan laju yang lebih besar daripada butir lainnya<sup>[26]</sup>.



**Gambar 4.11** Perbedaan antara *continuous (normal) grain growth* dan *discontinuous (abnormal) grain growth* <sup>[26]</sup>

Gambar 4.5 merupakan hasil foto mikro yang mengalami *reheating* selama 15 menit pada temperature  $500^{\circ}\text{C}$  kemudian didinginkan dengan air. Pada gambar 4.5 (b), deformasi sebesar 66,7 %, terlihat butir menjadi lebih pipih dibandingkan gambar 4.5 (a) akibat dari derajat deformasi yang lebih besar. *Pearlite* pada gambar ini mengalami *spheroidization*. Hal ini disebabkan karena adanya *strain* pada temperatur tinggi menyebabkan meningkatnya difusi atom karbon, dengan kata lain, atom karbon dari *cementite* awalnya larut ke dalam *ferrite* kemudian mengendap selama proses deformasi<sup>[42]</sup>. Pada gambar 4.5 (c) dan (d), deformasi sebesar 75 % dan 80 %, memiliki kemiripan, dimana *pearlite* yang mengalami *spheroidization* cenderung memipih dikarenakan deformasi yang makin membesar. Deformasi yang membesar tidak hanya mempengaruhi *pearlite* saja tetapi *ferrite* juga terpengaruhi. Ini terlihat pada gambar 4.5 (d) memiliki butir yang jauh lebih pipih dibandingkan dengan gambar 4.5 (c)

Gambar 4.7 merupakan hasil foto mikro yang mengalami *reheating* selama 15 menit pada temperatur  $550^{\circ}\text{C}$  didinginkan dengan air. Pada gambar 4.7 (b), deformasi sebesar 66,7 %, terlihat sudah terjadi rekristalisasi dinamis, dimana terbentuknya butir – butir *equiaxed* di dekat kumpulan *pearlite*. Namun, dengan adanya deformasi yang besar membuat butir – butir *equiaxed* yang mulai terbentuk cenderung menjadi pipih. Pada hasil foto mikro ini juga terlihat perbedaan butir pada permukaan sampel dan bagian tengah sampel. *Strain* pada bagian permukaan dua kali lebih besar dari pada bagian tengah sampel, hal ini dapat menghasilkan perbedaan penghalusan butir *ferrite*. Pada gambar 4.7 (c) dan (d), deformasi sebesar 75 % dan 80 %, terlihat butir semakin memipih akibat adanya deformasi yang cukup besar dan pendinginan air yang termasuk dengan

pendinginan cepat. Pendinginan cepat dapat menghambat terjadinya difusi batas butir sehingga butir tidak terus tumbuh dan butir yang dihasilkan tetap pipih.

Gambar 4.9 merupakan hasil foto mikro yang mengalami *reheating* selama 15 menit pada temperatur 600 °C dan didinginkan dengan air. Pada gambar 4.9 (b), deformasi sebesar 66,7 %, terlihat butir *equiaxed* yang mulai terbentuk di dekat kumpulan *pearlite* cenderung menjadi pipih akibat adanya deformasi yang besar. Pada gambar 4.9 (c) dan (d), terlihat butir *ferrite* dan *pearlite* menjadi lebih pipih akibat adanya deformasi yang sangat besar.

### 4.3 Hasil Perhitungan Butir

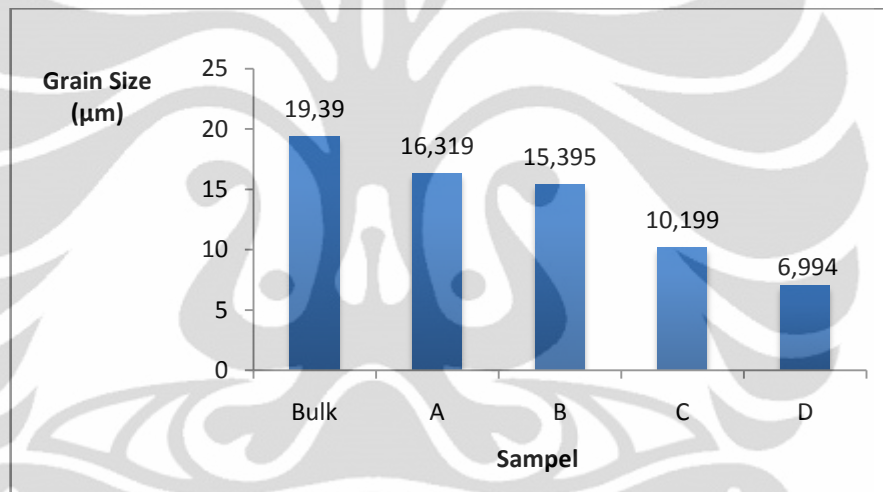
Perhitungan butir dilakukan sebanyak 3 kali perhitungan. Setelah dilakukan 3 kali perhitungan maka dapat diperoleh rata-rata diameter butir. Perhitungan diameter butir ferit dilakukan menggunakan metode *Intercept Heyn* sesuai dengan standar ASTM E112 untuk butir *equiaxed*, sedangkan untuk butir *elongated* menggunakan metode *Straight Line Test* (Subbab 3.3.5).

Hasil perhitungan diameter butir ferit dari baja karbon rendah terlihat pada tabel 4.3 berikut :

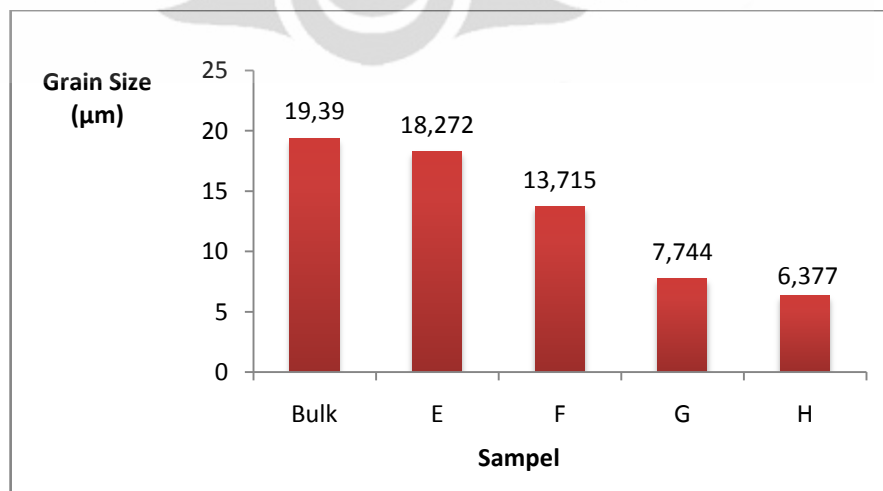
**Tabel 4.3** Pengukuran Besar Butir Benda Uji Sebelum Dan Setelah Proses Pencanaan.

No	Sampel	Temperatur (°C)	Grain Size (µm)	Grain Size Number (ASTM E 112)
1	Bulk	---	19,39	8,5
2	A <sub>1</sub>	500	37,8	6,5
3	A		16,319	9,0
4	B		15,395	9,0
5	C		10,199	10,5
6	D		6,994	11,5
7	A <sub>2</sub>		550	38,9
8	E	18,272		8,5
9	F	13,715		9,5
10	G	7,744		11,0
11	H	6,377		11,5
12	A <sub>3</sub>	600	53,8	5,5
13	I		15,848	9,0
14	J		10,565	10,0
15	K		6,215	11,5
16	L		5,196	12,5

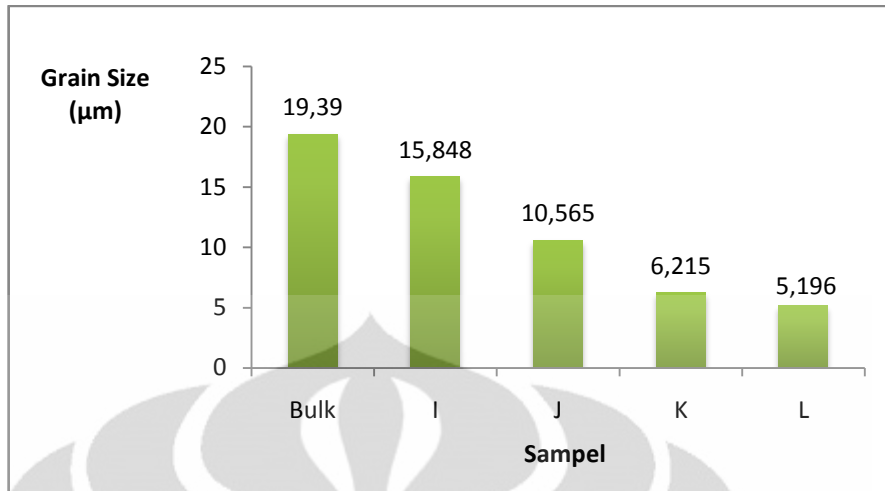
Berdasarkan tabel 4.3, diameter rata-rata yang didapat dari perhitungan pada sampel menunjukkan hasil sebagai berikut; sampel *bulk* memiliki ukuran butir sebesar 19,39  $\mu\text{m}$ . Sampel A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, dan A<sub>3</sub> dengan perlakuan pemanasan selama 15 menit dan ditahan selama 10 menit pada temperatur 500 °C, 550 °C, dan 600 °C, kemudian dilakukan pendinginan air menghasilkan ukuran butir 37,8  $\mu\text{m}$ , 38,9  $\mu\text{m}$ , dan 53,8  $\mu\text{m}$ . Sampel A, B, C, dan D dengan temperatur *rolling* 500 °C menghasilkan butir yang lebih halus dengan ukuran butir 16,319  $\mu\text{m}$ , 15,395  $\mu\text{m}$ , 10,199  $\mu\text{m}$ , dan 6,994  $\mu\text{m}$ . Sampel E, F, G, dan H dengan temperatur *rolling* 550 °C menghasilkan butir dengan ukuran butir 18,272  $\mu\text{m}$ , 13,715  $\mu\text{m}$ , 7,744  $\mu\text{m}$ , dan 6,377  $\mu\text{m}$ . Sampel I, J, K, dan L dengan temperatur *rolling* 600 °C menghasilkan butir dengan ukuran butir 15,848  $\mu\text{m}$ , 10,565  $\mu\text{m}$ , 6,215  $\mu\text{m}$ , dan 5,196  $\mu\text{m}$ .



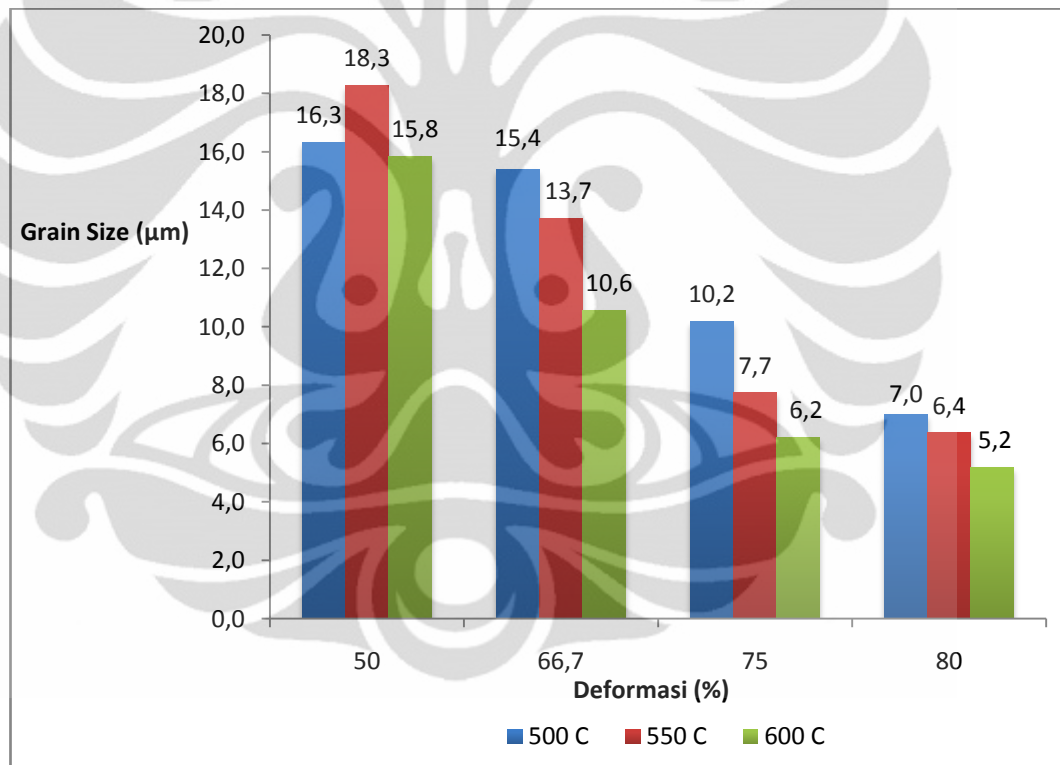
Gambar 4.12 Grafik Pengaruh Deformasi Terhadap Ukuran Butir Pada Temperatur 500 °C.



Gambar 4.13 Grafik Pengaruh Deformasi Terhadap Ukuran Butir Pada Temperatur 550 °C.



**Gambar 4.14** Grafik Pengaruh Deformasi Terhadap Ukuran Butir Pada Temperatur 600 °C.



**Gambar 4.15** Grafik Pengaruh Deformasi Terhadap Ukuran Butir Pada Temperatur 500 , 550, dan 600 °C.

Pada gambar 4.12 sampai 4.13, terlihat semakin besar deformasi yang diberikan maka ukuran butir yang dihasilkan semakin kecil. Deformasi yang besar dapat menyebabkan butir menjadi pipih, dengan memipihnya butir akan mengakibatkan dalam suatu luasan daerah dapat menampung lebih banyak butir dibandingkan bila butir itu berbentuk *equiaxed*.

Pada gambar 4.14 menunjukkan bahwa dengan meningkatnya temperatur canai memungkinkan terjadinya fenomena rekristalisasi dinamis, namun rekristalisasi dinamis hanya terjadi pada deformasi 50 – 66,7 %, sehingga butir yang dihasilkan akan menjadi lebih kecil. Pada temperatur 550 °C dengan deformasi 50 % memiliki ukuran butir yang paling besar pada bagian pertama. Hal ini disebabkan deformasi aktual yang terjadi pada temperatur 550 °C paling kecil daripada ukuran butir dengan deformasi 50% yang terjadi di temperatur 500 °C dan 600 °C. Deformasi yang actual yang terlalu kecil menyebabkan rekristalisasi dinamis belum terjadi. Rekristalisasi dinamis dapat terjadi ketika temperatur tinggi dan *strain rate* rendah, namun dengan syarat *strain* harus diatas nilai kritisnya<sup>[41]</sup>, dimana *strain* dipengaruhi oleh besarnya deformasi. Perbedaan ukuran butir yang terjadi pada temperatur antara 500, 550, dan 600 °C tidak menunjukkan perbedaan ukuran butir yang sangat signifikan.

#### 4.4 Pengujian Kekerasan

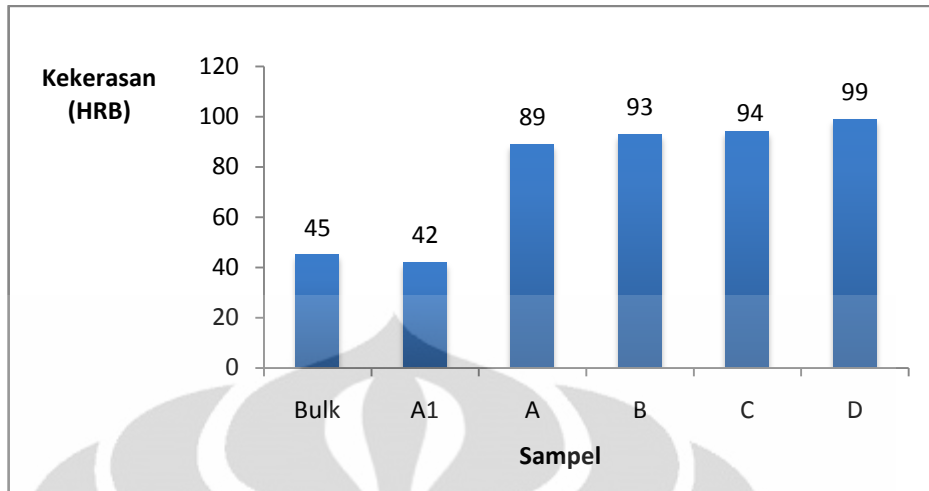
Pengujian kekerasan dilakukan dengan Metode Rockwell.. Nilai kekerasan Rockwell tersebut kemudian dikonversi ke dalam satuan Metode Brinell dengan menggunakan tabel perbandingan yang terdapat pada standar ASTM E140 “*Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness*”<sup>[43]</sup>. Hasil pengukuran dapat dilihat di Tabel 4.4

Tabel 4.4 Hasil Pengukuran Kekerasan

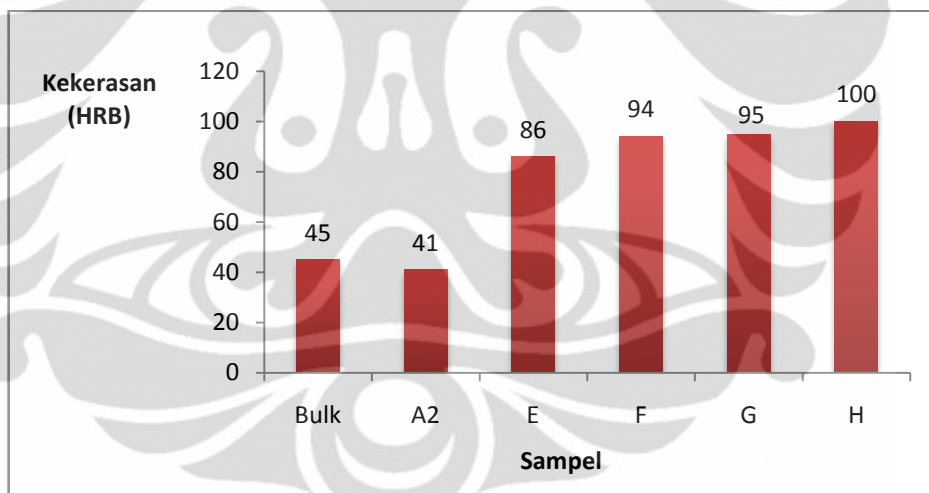
Sampel	Temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )	HRB	BHN	$\sigma$ (MPa)	Grain Size ( $\mu\text{m}$ )
Bulk		45			19,39
A <sub>1</sub>	500	42			37,8
A		89	181	624,450	16,319
B		93	201	693,450	15,395
C		94	204	703,800	10,199
D		99	231	796,950	6,994
A <sub>2</sub>	550	41			38,9
E		86	167	576,150	18,272
F		94	207	714,150	13,715
G		95	208	717,600	7,744
H		100	237	817,650	6,377
A <sub>3</sub>	600	40			53,8
I		91	188	648,600	15,848
J		95	212	731,400	10,565
K		96	216	745,200	6,215
L		102			5,196

Berdasarkan tabel 4.4, nilai kekerasan yang didapat dari pengujian kekerasan dengan menggunakan *Rockwell B* pada sampel menunjukkan hasil sebagai berikut; sampel *bulk* memiliki kekerasan sebesar 45 HRB. Sampel A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, dan A<sub>3</sub> dengan perlakuan pemanasan selama 15 menit dan ditahan selama 10 menit pada temperatur 500  $^{\circ}\text{C}$ , 550  $^{\circ}\text{C}$ , dan 600  $^{\circ}\text{C}$ , kemudian dilakukan pendinginan air menghasilkan kekerasan 42 HRB, 41 HRB, dan 40 HRB. Sampel A, B, C, dan D dengan temperatur *rolling* 500  $^{\circ}\text{C}$  menghasilkan kekerasan sebesar 89 HRB, 93 HRB, 94 HRB, dan 99 HRB. Sampel E, F, G, dan H dengan temperatur *rolling* 550  $^{\circ}\text{C}$  menghasilkan kekerasan sebesar 86 HRB, 94 HRB, 95 HRB, dan 100 HRB. Sampel I, J, K, dan L dengan temperatur *rolling* 600  $^{\circ}\text{C}$  menghasilkan kekerasan sebesar 91 HRB, 95 HRB, 96 HRB, dan 102 HRB.

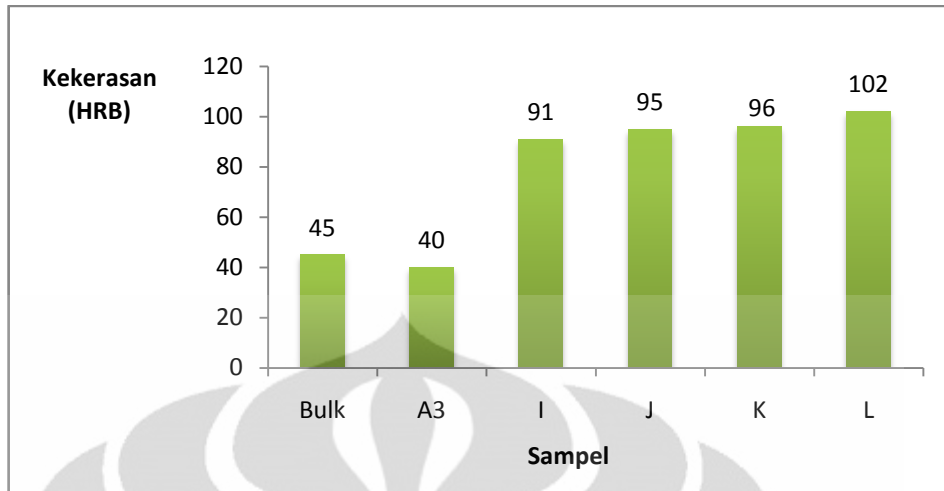




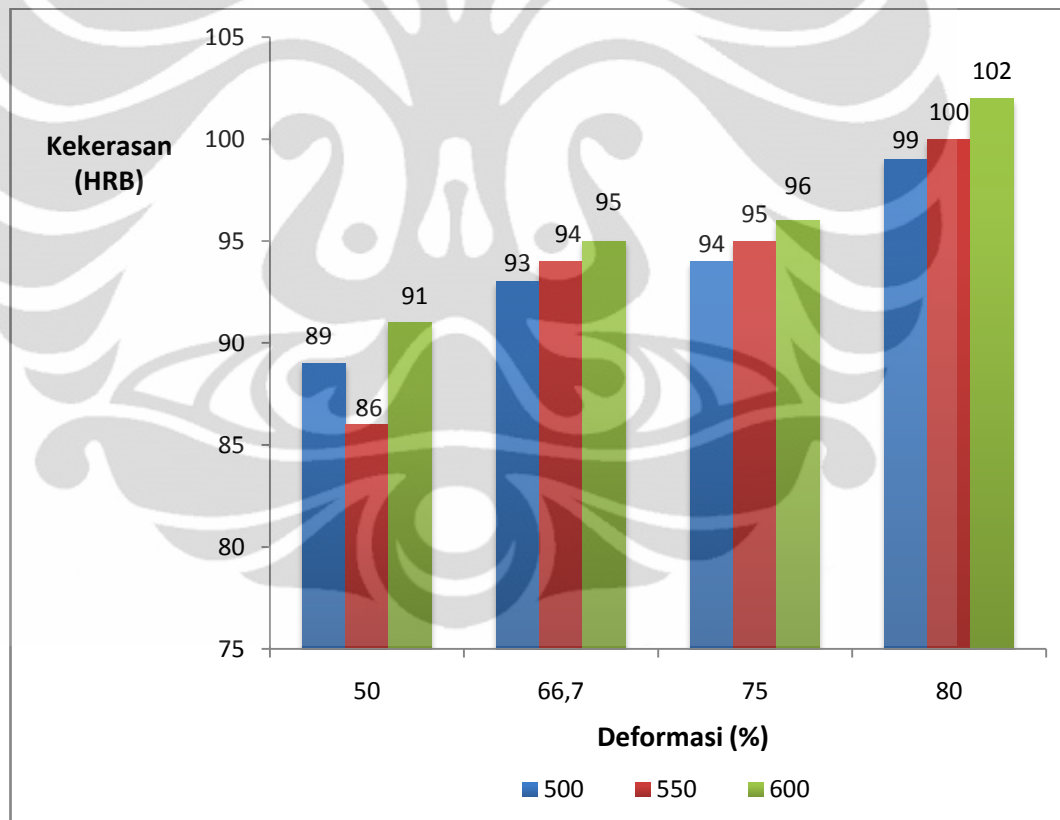
**Gambar 4.16** Grafik Pengaruh Deformasi Terhadap Kekerasan Pada Temperatur 500 °C.



**Gambar 4.17** Grafik Pengaruh Deformasi Terhadap Kekerasan Pada Temperatur 550 °C.



**Gambar 4.18** Grafik Pengaruh Deformasi Terhadap Kekerasan Pada Temperatur 600 °C.



**Gambar 4.19** Grafik Pengaruh Deformasi Terhadap Kekerasan Pada Temperatur 500 , 550, dan 600 °C.

Pada gambar 4.15 sampai 4.17, terlihat semakin besar deformasi yang terjadi semakin besar kekerasan yang dihasilkan. Hal ini berbanding terbalik dengan ukuran butir yang dihasilkan, dimana semakin besar deformasi akan

semakin kecil ukuran butir yang di hasilkan. Ukuran butir mempunyai pengaruh terhadap nilai kekerasan. Ukuran butir yang besar akan mengurangi kekerasan karena dengan butir yang besar mengakibatkan area batas butir antara satu butir dengan butir lainnya menjadi lebih sedikit. Batas butir merupakan tempat dimana dislokasi sulit bahkan berhenti bergerak karena batas butir memiliki energi yang tinggi untuk terjadinya pergerakan dislokasi. Dengan demikian jika batas butirnya sedikit maka dislokasi akan lebih mudah bergerak (energi untuk menggerakkan dislokasi sedikit) sehingga material akan lebih mudah mengalami deformasi (kekerasan rendah). Namun, apabila batas butirnya semakin banyak yaitu material dengan butir yang semakin halus, maka dislokasi semakin sulit untuk bergerak (energi yang dibutuhkan untuk menggerakkan dislokasi besar). Pergerakan dislokasi yang terhambat ini akan menyebabkan material sulit untuk dideformasi sehingga sifat mekanis material seperti kekerasan dan kekuatan semakin tinggi<sup>[2]</sup>.

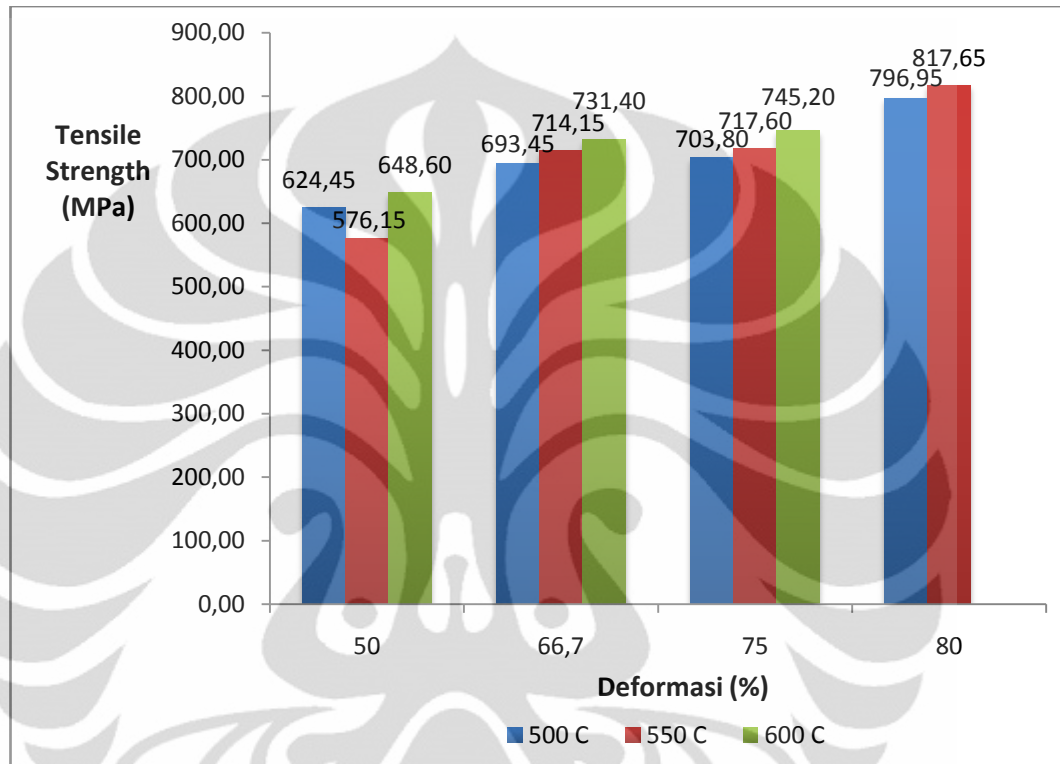
Pada gambar 4.18 menunjukkan bahwa dengan meningkatnya temperatur canai memungkinkan terjadinya fenomena rekristalisasi dinamis, namun rekristalisasi dinamis hanya terjadi pada deformasi 50 – 66,7 %, sehingga butir yang dihasilkan akan menjadi lebih kecil. Pada temperatur 550 °C dengan deformasi 50 % memiliki ukuran butir yang paling besar pada bagian pertama. Hal ini disebabkan deformasi aktual yang terjadi pada temperatur 550 °C paling kecil daripada ukuran butir dengan deformasi 50% yang terjadi di temperatur 500 °C dan 600 °C. Rekristalisasi dinamis adalah peristiwa dimana timbulnya butir – butir baru yang lebih kecil sehingga menyebabkan jumlah batas butir semakin banyak. Bertambahnya jumlah batas butir mengakibatkan dislokasi menjadi lebih sulit bergerak sehingga material menjadi lebih keras. Perbedaan kekerasan yang terjadi pada temperatur antara 500, 550, dan 600 °C tidak menunjukkan perbedaan kekerasan yang sangat signifikan.

#### 4.4.1 Hubungan Kekerasan Terhadap Kekuatan

Setelah didapatkan nilai kekerasan *Rockwell B*, nilai tersebut dikonversi ke nilai kekerasan *Brinell* dan kemudian dihitung nilai kekuatan tarik (*tensile strength*) dari benda uji dengan menggunakan persamaan 4.2 berikut.

$$TS \text{ (MPa)} = 3,45 \times BHN \dots\dots\dots(4.2)$$

Persamaan 4.2 menunjukkan nilai *tensile strength* suatu material berbanding lurus dengan kekerasannya (BHN). Semakin tinggi nilai kekerasan suatu material (BHN) maka semakin tinggi nilai kekuatan tariknya (*tensile strength*).



**Gambar 4.20** Grafik Pengaruh Deformasi Terhadap Kekuatan Pada Temperatur 500 , 550, dan 600 °C.

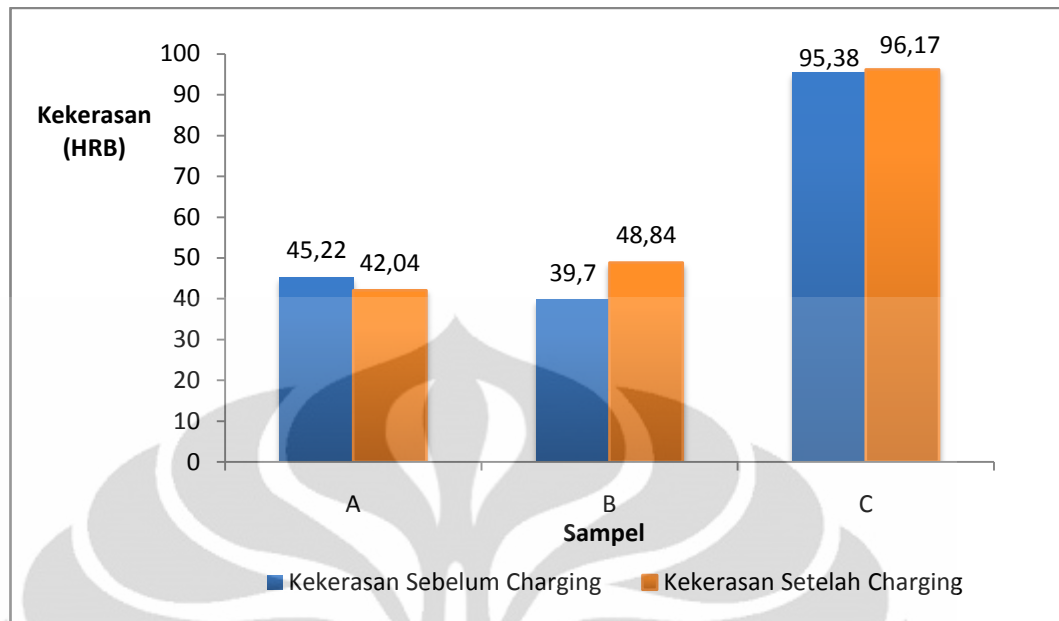
Gambar 4.19 menunjukkan hal yang serupa dengan gambar 4.18. Semakin besar deformasi yang terjadi semakin kecil ukuran butir yang dihasilkan, semakin besar kekerasan yang dihasilkan, dan semakin besar juga nilai *tensile strength* yang dihasilkan. Hasil ini selaras dengan Teori *Hall-Petch* yang menyatakan bahwa butir yang lebih halus memiliki area batas butir total yang lebih luas untuk menghalangi pergerakan dislokasi, maka material dengan butir yang halus (yang memiliki butir kecil) lebih keras dan kuat dibandingkan material dengan butir kasar<sup>[2]</sup>.

#### 4.5 Pengujian *Hydrogen Charging*

Pengujian *Hydrogen Charging Test* bertujuan untuk melihat mekanisme ketahanan sampel setelah canai hangat terhadap difusi atom hidrogen. Pengamatan terhadap ketahanan *Hydrogen Induced Cracking* tersebut dilakukan melalui uji kekerasan terhadap benda uji yang telah di *charging* serta pengamatan difusi hidrogen melalui *Scanning Electron Microscope*. Proses pengujian kekerasan pada benda uji dilakukan untuk mengetahui pengaruh masuknya hidrogen (*hydrogen charging*) terhadap kekerasan benda uji. Proses *hydrogen charging* dilakukan dengan menggunakan 0.5 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> sebagai sumber hidrogen ditambah 100 mg/l larutan Thiourea (CS[NH<sub>2</sub>]<sub>2</sub>) untuk mengurangi efek rekombinasi pada permukaan logam dan menggunakan rapat arus sebesar 1 mA/cm<sup>2</sup> selama 10 menit. Reaksi yang terjadi pada proses ini merupakan reaksi elektrokimia yang mereduksi ion hidrogen menjadi atom hidrogen yang kemudian karena reaktifitas dan ukurannya yang sangat kecil dapat berdifusi hingga ke kisi kristal dalam logam.

Tabel 4.5 Hasil Pengujian *Hydrogen Charging*

Sampel	Luas permukaan (mm <sup>2</sup> )	i (mA)	Kekerasan (HRB)	Kekerasan Setelah Charging (HRB)	Grain Size (μm)
A	2301,46	23,01	45,22	42,04	19,39
B	2066,06	20,66	38,7	48,84	53,8
C	1383,88	13,83	95,38	96,17	10,57



**Gambar 4.21** Grafik Kekerasan Benda Uji Sebelum dan Setelah *Hydrogen Charging*

Sampel A adalah sampel awal benda uji tanpa mengalami perlakuan apapun. Ukuran butir sebesar  $19,39 \mu\text{m}$  dan memiliki kekerasan 45,22 HRB, dilakukan *hydrogen charging* dengan diberikan rapat arus sebesar 23,01 mA menghasilkan kekerasan setelah *charging* sebesar 42,04 HRB. Pada gambar 4.20, terlihat perbedaan kekerasan yang tidak signifikan antara kekerasan sebelum *charging* dan kekerasan setelah *charging*. Hal ini disebabkan oleh durasi pengujian *hydrogen charging* yang berlangsung selama 10 menit tidak cukup untuk memberi efek kepada benda uji A. Semakin lama pengujian *hydrogen charging* yang dilakukan akan meningkatkan jumlah hidrogen yang terperangkap pada cacat – cacat yang berbeda. Terperangkapnya hidrogen menyebabkan perubahan dari sifat mekanis suatu material<sup>[44]</sup>. Apabila atom hidrogen telah terdifusi kedalam material dan berkumpul pada cacat yang ada pada material, akan terjadi reaksi kombinasi atom-atom hidrogen yang membentuk molekul  $\text{H}_2$  yang menghasilkan tekanan yang sangat besar dan menginisiasi terjadinya retakan pada material. Dengan adanya inisiasi retakan, apabila material diberikan pembebanan, akan terjadi propagasi retakan dari material yang dapat menurunkan sifat mekanik material tersebut serta perpatahannya menjadi getas<sup>[34]</sup>.

Sampel B adalah sampel yang mengalami *reheating* pada temperatur 600°C kemudian didinginkan dengan air. Sampel ini menghasilkan ukuran butir paling besar sebesar 53,8 µm dengan kekerasan 38,7 HRB. Setelah mengalami proses *charging*, dengan diberikan rapat arus 20,66 mA, kekerasan meningkat menjadi 48,84 HRB. Hal ini dapat disebabkan difusi hidrogen pada material akan mengakibatkan interaksi antara hidrogen dengan dislokasi<sup>[44]</sup>. Adanya kehadiran atom hidrogen diantara dislokasi membuat mobilitas dislokasi menjadi terhambat, sehingga dislokasi di dalam logam membutuhkan tegangan yang lebih besar untuk berpindah dan perpindahannya tidak akan terlalu jauh karena atom hidrogen yang lain akan kembali memasuki daerah dislokasi, oleh karena itu material akan memiliki nilai kekerasan yang lebih tinggi. Ketika hidrogen yang terperangkap melebihi batas kritisnya akan menginisiasi terjadinya *crack* atau pertumbuhan dari *crack* itu sendiri. Hal ini yang dapat mengakibatkan fenomena *embrittlement* pada baja dan menyebabkan turunnya sifat mekanis baja<sup>[44]</sup>. Sampel B menunjukkan semakin besar butir dari baja karbon rendah maka akan semakin rentan ketahannya terhadap serangan hidrogen.

Sampel C adalah sampel yang mengalami proses canai pada temperatur 600 °C dengan deformasi aktual 55,94 % kemudian mengalami pendinginan dengan air. Sampel ini memiliki kekerasan sebesar 95,38 HRB dan ukuran butir sebesar 10,57 µm kemudian dilakukan *hydrogen charging* dengan diberikan rapat arus sebesar 13,83 mA menghasilkan kekerasan setelah *charging* sebesar 96,17 HRB. Pada gambar 4.20, terlihat perbedaan kekerasan yang tidak signifikan antara kekerasan sebelum *charging* dan kekerasan setelah *charging*. Hal ini disebabkan oleh durasi pengujian *hydrogen charging* yang berlangsung selama 10 menit tidak cukup untuk memberi efek kepada benda uji C. Semakin lama pengujian *hydrogen charging* yang dilakukan akan meningkatkan jumlah hidrogen yang terperangkap pada cacat – cacat yang berbeda. Terperangkapnya hidrogen menyebabkan perubahan dari sifat mekanis suatu material<sup>[44]</sup>.

Berdasarkan penelitian Purnama Riyanti<sup>[37]</sup>, terjadi penurunan dan peningkatan nilai kekuatan tarik pada specimen uji. Peningkatan nilai kekuatan tarik disebabkan karena adsorpsi hidrogen kedalam logam yang kemudian menginisiasi penggetasan benda uji. Masuknya atom hidrogen ke dalam logam

akan mengurangi gaya kohesi antar atom dalam logam tersebut. Dengan menurunnya gaya kohesif dari logam akan mengakibatkan semakin mudahnya logam mengalami kegagalan akibat hidrogen yang masuk dan mencapai konsentrasi kritisnya. Selain itu, terjadinya reaksi kombinasi atom hidrogen yang membentuk molekul  $H_2$  yang menghasilkan tekanan yang cukup untuk menginisiasi suatu retak. Dengan adanya inisiasi retak ini, saat benda uji dipapar dengan suatu pembebanan maka tegangan akan terkonsentrasi dan hal ini menurunkan kekuatan material.





## BAB 5

### KESIMPULAN

1. Perubahan mikrostruktur pada baja karbon rendah setelah *warm rolling* melalui *Severe Plastic Deformation* pada temperatur 500<sup>0</sup>C, 550<sup>0</sup>C, dan 600<sup>0</sup>C menunjukkan hal yang serupa. Semakin besar temperatur menghasilkan ukuran butir yang lebih kecil. Pada temperatur 500<sup>0</sup>C, benda uji A, B, C, dan D menghasilkan kekerasan 16,32  $\mu\text{m}$ , 15,39  $\mu\text{m}$ , 10,19  $\mu\text{m}$ , dan 6,99  $\mu\text{m}$ . Pada temperatur 550<sup>0</sup>C, benda uji E, F, G, dan H menghasilkan kekerasan 18,27  $\mu\text{m}$ , 13,71  $\mu\text{m}$ , 7,74  $\mu\text{m}$ , dan 6,37  $\mu\text{m}$ . Pada temperatur 600<sup>0</sup>C, benda uji I, J, K, dan L menghasilkan kekerasan 15,84  $\mu\text{m}$ , 10,56  $\mu\text{m}$ , 6,21  $\mu\text{m}$ , dan 5,19  $\mu\text{m}$ .
2. Perubahan Kekerasan pada baja karbon rendah setelah *warm rolling* melalui *Severe Plastic Deformation* pada temperatur 500<sup>0</sup>C, 550<sup>0</sup>C, dan 600<sup>0</sup>C menunjukkan seiring bertambahnya temperatur akan meningkatkan kekerasan begitu pula dengan meningkatnya deformasi akan menambah kekerasannya. Pada temperatur 500<sup>0</sup>C, benda uji A, B, C, dan D menghasilkan kekerasan 89,23 HRB, 93,23 HRB, 93,9 HRB, dan 98,53 HRB. Pada temperatur 550<sup>0</sup>C, benda uji E, F, G, dan H menghasilkan kekerasan 85,63 HRB, 94,37 HRB, 94,67 HRB, dan 99,77 HRB. Pada temperatur 600<sup>0</sup>C, benda uji I, J, K, dan L menghasilkan kekerasan 90,70 HRB, 95,30 HRB, 96,03 HRB, dan 102,23 HRB.
3. Menggunakan sampel berbentuk *wedge shaped* kita dapat mengetahui perbedaan mikrostruktur akibat deformasi pada canai hangat. Benda uji *wedge shaped* menunjukkan seiring bertambahnya temperatur akan meningkatkan kekerasan. Benda uji *wedge shaped* menunjukkan seiring bertambahnya temperatur akan mengurangi ukuran butir.
4. Ketahanan *Hydrogen Induced Cracking* pada baja karbon rendah menunjukkan benda uji dengan ukuran butir lebih besar lebih rentan terhadap serangan hidrogen. Benda uji B dengan ukuran butir 53,8 rentan terserang dengan hidrogen, ditunjukkan dengan nilai kekerasan yang bertambah dari 39,7 HRB menjadi 48,84 HRB. Benda uji A dan C tidak menunjukkan adanya perubahan yang signifikan terhadap kekerasan. Benda uji A dengan kekerasan awal 45,22

HRB menjadi 42,04 HRB, sedangkan benda uji C dengan kekerasan awal 95,38 HRB menjadi 96,17 HRB. Hal ini menunjukkan semakin besar butir baja karbon, semakin mudah terserang hidrogen.



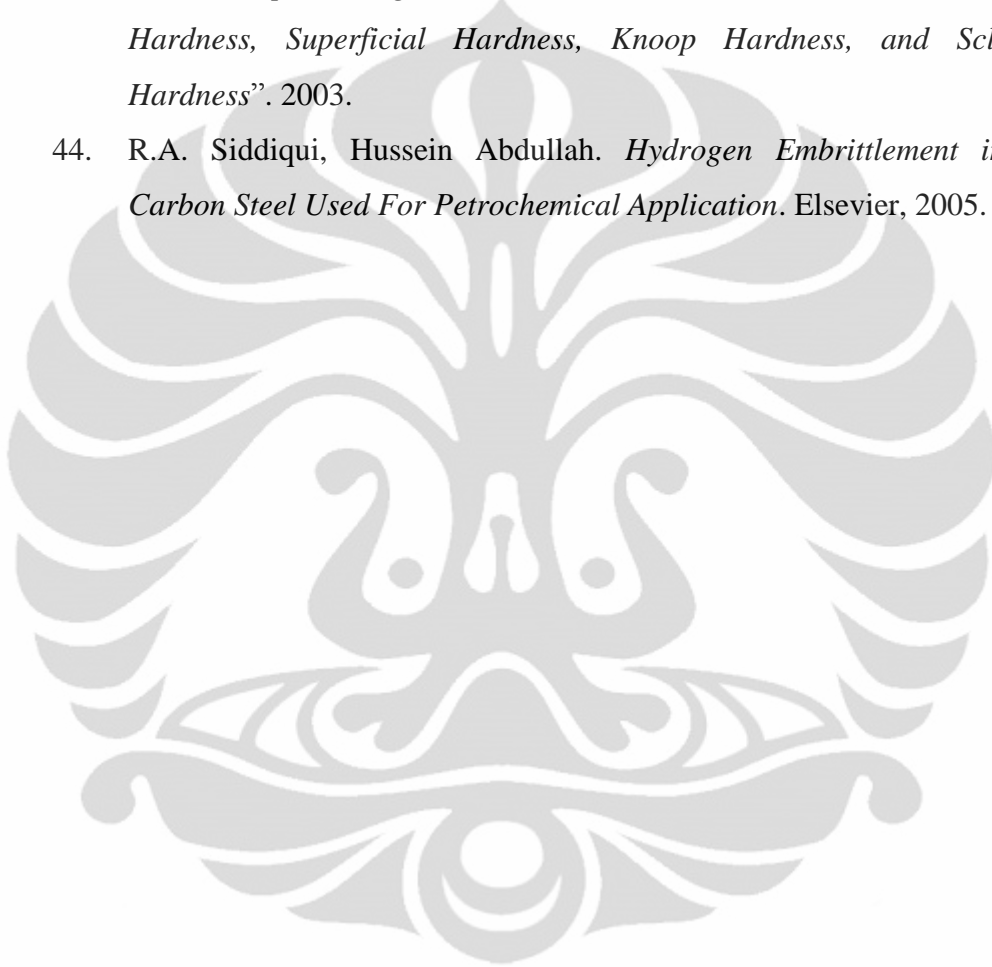
## REFERENSI

1. Edwin Scott, Jr., —*ASA Materials Market Digest*”, www.asa.net, 2009, hal 1-6.
2. William D. Callister, Jr., *Materials Science and Engineering, An Introduction*, 6th ed., John Wiley & Son, Inc., 2003.
3. Yoshitaka Adachi , Masayuki Wakita , Hossein Beladi , Peter Damian Hodgson “*The formation of ultrafine ferrite through static transformation in low carbon steels*”, *acta materialia elsevier* 55 (2007) 4925-4934
4. J. Zrník, J. Drnek, Z. Nový, S. V. Dobatkin, O. Stejskal, —*Structure Evolution During Severe Warm Plastic Deformation of Carbon Steel*, *Rev. Adv. Mater. Sci.* 10, 2005, hal. 45-53.
5. I. Kozasu, *Material Science and Technology*, Vol. 7, Constitution and Properties of Steel Ed by F. B. Pickering, VCH, 1993, hal. 184
6. Samerjit. *Hydrogen Induced Cracking in Low Strength Steels*. Thammasat Int.J.Sc.Tech Vol.9 No.2, 2004.
7. Hadi, Nurul. Pengaruh Ukuran Butir dan Pemberian Tegangan Terhadap Sifat Mekanik Baja Karbon Rendah Akibat *Hydrogen Embrittlement*, Teknik Material ITB, 2008.
8. ASM Specialty Handbook, Carbon and Alloy Steel, (ASM International, 1996)
9. George Krauss. *STEEL: Processing, Structure, and Performance*, ASM International.USA: 2005.
10. Pickering, F. B., Physical Metallurgy and the design of the steels. Applied Science Publishers. London. 1978. pp. 1-88.
11. Weng, Yuqing. Ultra-Fine Grained Steels. Metallurgical Industry Press, 2009. Trans. Chaoxijing Gang--Gang de Zuzhi Xihua Lilun yu Kongzhi Jishu, 2003.
12. Shey, John A., *Introduction to Manufacturing Processes*, 2nd Edition, McGraw-Hill Book Company, New York. 1987.
13. Kalpakjian, Serope dan S. R. Schmid. *Manufacturing Processes for Engineering Materials* 5th ed. Pearson Education : UK. 2008

14. Harris, John Noel. *Mechanical Working of Metals : Theory and Practice*. Pergamon Press : UK. 1983.
15. Nicholas, Joanne. *What are TMCP (Thermo-Mechanically Controlled Processed) steels*. Copyright © 2000, TWI Ltd.
16. Yuwei Gao, Tianfu Jing, Guiying Qiao, Jinku Yu, Tiansheng Wang, Qun Li, Xinyu Song, Shuqiang Wang, and Hong Gao. *Microstructural evolution and tensile properties of low-carbon steel with martensitic microstructure during warm deforming and annealing*.
17. S. Dobatkin, J. Zrnik, I. Mamuzic, *Ultrafine-Grained Low Carbon Steels By Severe Plastic Deformation*, METALURGIJA 47. 2008. 181-186
18. G. H Akbari, C. M Sellars and J.A Whiteman. *Microstrutural development During Warm Rolling of an IF Steel*. Pergamon. Acta Mater. Acta Metallurgica. Vol 45, No 12. 1997. PP 5047-5058.
19. Yajima et al., '*Extensive Application of TMCP-manufactured High Tensile Steel Plates to Ship Hulls and Offshore Structures*' Mitsubishi Heavy Industries Technical Review Vol 24 No. 1. February 1987.
20. B K Panigrahi, *Processing Of Low Carbon Steel Plate And Hot Strip An Overview R&D Centre For Iron And Steel*, Steel Authority Of India Ltd., Ranchi 834 002. India
21. Beladi, Hossein et al. The Effect of Multiple Deformations on the Formation of Ultrafine Grained Steel. METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A. VOLUME 38A. MARCH 2007.
22. Smallman R.E and R.J Bishop. *Modern Physical Metallurgy and Materials Engineering*. 6th ed. Butterworth-Heinemann. 1999.
23. Toroghinejad Mohammad R. et al. Effect of Rolling Temperature on the Deformation and Recrystallization Textures of Warm-Rolled Steels. METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A. VOLUME 34A. MAY 2003.
24. Bramfitt, Bruce L and Arlan O. Benschoter. *Metallographer's Guide Practices and Procedures for Irons and Steels*. ASM International. 2002.
25. A.Najafi. *Effect of Delay Time on Microstructural Evolution during Warm Rolling of Ti-Nb-IF Steel*. J. Mater. Sci. Technol., Vol.20 No.1, 2004.

26. Humphreys, F.J. and M. Hatherly, *Recrystallization and Related Annealing Phenomena*. Pergamon Press. 2004 .
27. Yang, Zhongmin and Ruizhen WANG. *Formation of Ultra-fine Grain Structure of Plain Low Carbon Steel through Deformation Induced Ferrite Transformation ISIJ International*, Vol. 43. 2003. 761–766.
28. ASM Handbook. Vol. 09, Metallography and Microstructure , (ASM International). 1991.
29. Tootten, Goerge E. *Steel Heat Treatment*. Taylor and Francis Group. 2006.
30. ASM Handbook. 1991. Vol. 04, *Heat Treating*, (ASM International).
31. Thomas J. C. Eun, *Hydrogen Damages in Oil Refinery and Petroleum Plants*, Keyano College Suncor Energy, 2005.
32. D.A. Jones, *Principles and Prevention of Corrosion*, 1996.
33. Pribadi, Mohammad. *Studi Pengaruh Deformasi Proses Warm Rolling Terhadap Perubahan Struktur Mikro Ferritic dan Ketahanan Korosi Baja Karbon Rendah*. Tesis Program Magister FTUI. 2010.
34. Namboodhiri, T.K.G, “*Hydrogen Damage of Metallic Material*”. Banaras Hindu University. Varanasi.
35. Hadi, Nurul. *Pengaruh Ukuran Butir dan Pemberian Tegangan Terhadap Sifat Mekanik Baja Karbon Rendah Akibat Hydrogen Embrittlement*. Skripsi Program Sarjana Fakultas Teknik Mesin ITB. 2008.
36. Elvira. S, Mioara “ *Hydrogen Embrittlement in Ferrous Materials*”, Universite Libere de Bruxelles France. 2006
37. Riyanti, Purnama. *Studi Penghalusan Butir Ferrite Melalui Severe Plastic Deformation dan Evaluasi Ketahanan Korosi Baja Karbon GR X42*. Tesis Program Magister FTUI. 2010.
38. ASTM E3. “*Standard Guide for Preparation for Metallographic Specimens*”. 2003.
39. ASTM E112. “*Standard Test Method for Determining Average Grain Size*”. 2003.
40. ASTM E18. “*Standard Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials*”. 2003.

41. Longfei, Yang Wangyue, and Sun Zuqing, “*Dynamic Recrystallization of Ferrite in a Low Carbon Steel*”. 2006.
42. Mingyuan Liu, Bi Shi, Hanging Cao, X Cai, Hongwei Song, “*A Submicron Mild Steel Produced by Simple Warm Deformation*”. 2003
43. ASTM E140. “*Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness*”. 2003.
44. R.A. Siddiqui, Hussein Abdullah. *Hydrogen Embrittlement in 0.31% Carbon Steel Used For Petrochemical Application*. Elsevier, 2005.





## Lampiran 1. Hasil Uji Komposisi

PMI Master Pro 13M0031 Optiknr. 13M0031

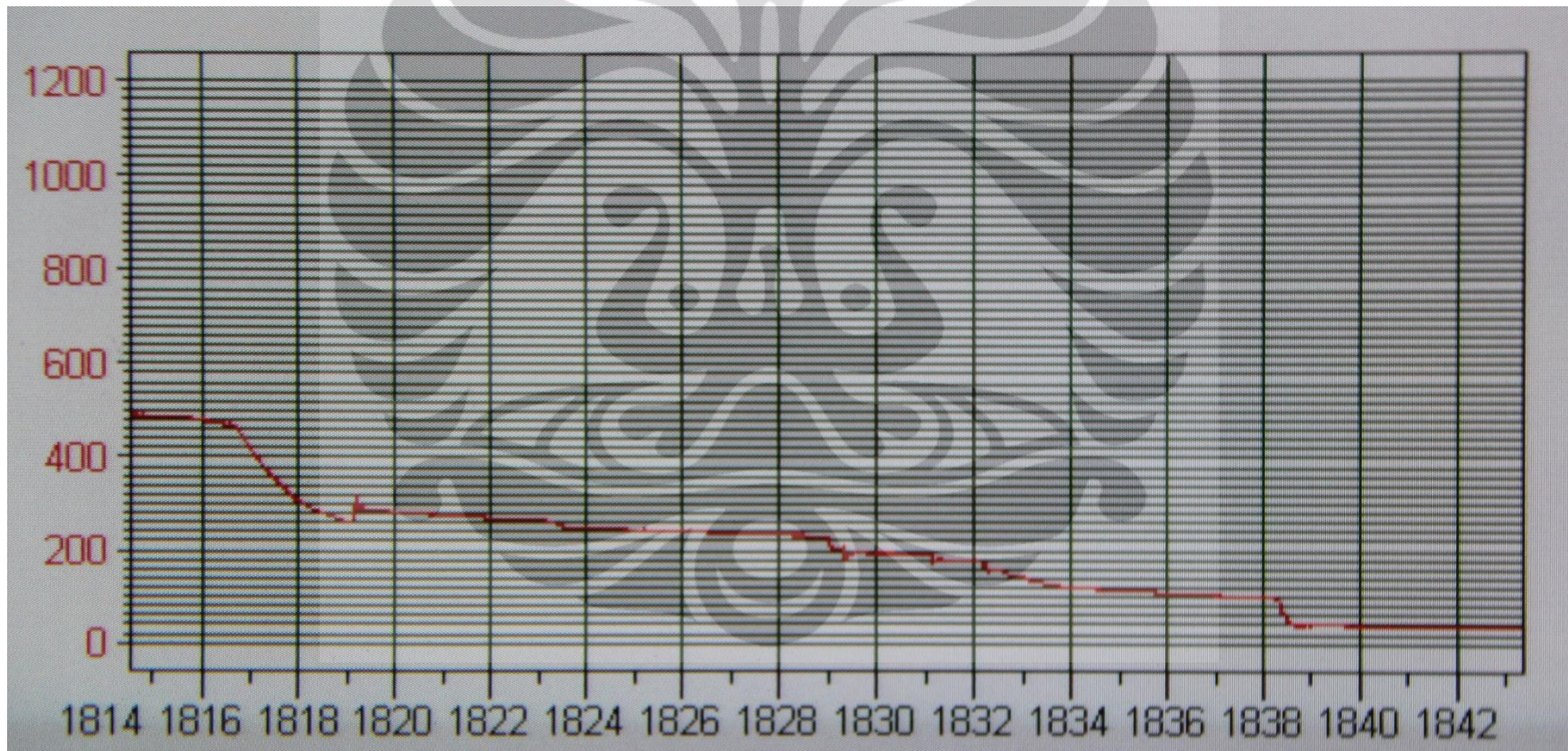
Sample :1136

Alloy : FE\_U\_100 Mode : PA 21.10.2010 15:11:24

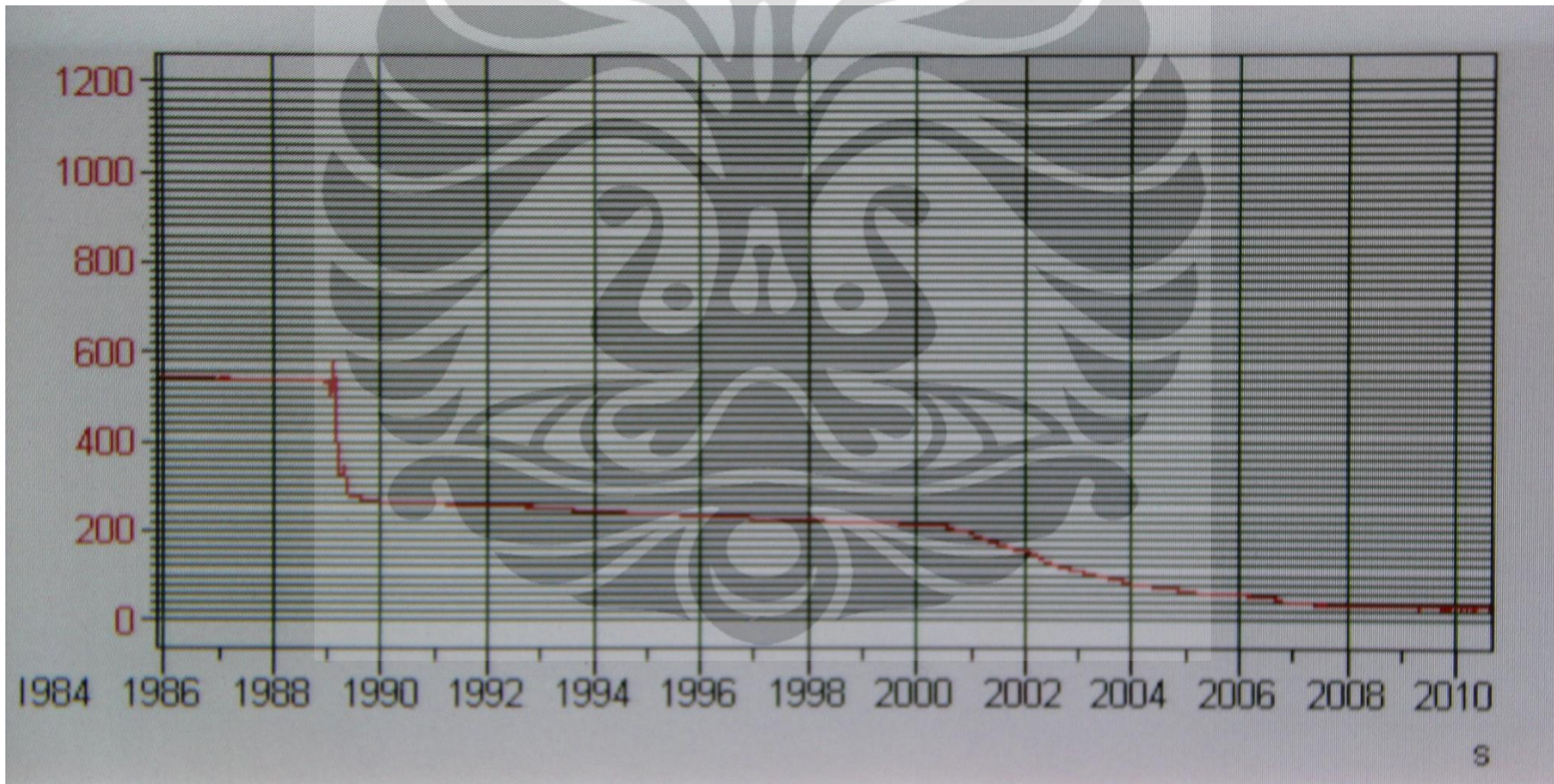
	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr
1	99,7	0,119	< 0,0050	0,0285	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050
2	99,6	0,108	< 0,0050	0,0188	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050
<b>Average</b>	<b>99,6</b>	<b>0,114</b>	<b>&lt; 0,0050</b>	<b>0,0236</b>	<b>&lt; 0,0050</b>	<b>&lt; 0,0050</b>	<b>&lt; 0,0050</b>
	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti
1	0,0047	0,0380	0,0022	0,0082	0,0590	< 0,0030	0,0020
2	0,0219	0,0613	0,0026	0,0115	0,0645	< 0,0030	0,0059
<b>Average</b>	<b>0,0133</b>	<b>0,0497</b>	<b>0,0024</b>	<b>0,0098</b>	<b>0,0617</b>	<b>&lt; 0,0030</b>	<b>0,0039</b>
	V	W	Pb	Sn	B	Zr	
1	< 0,0020	< 0,0250	< 0,0100	0,0153	< 0,0030	< 0,0030	
2	< 0,0020	< 0,0250	< 0,0100	0,0206	< 0,0030	0,0033	
<b>Average</b>	<b>&lt; 0,0020</b>	<b>&lt; 0,0250</b>	<b>&lt; 0,0100</b>	<b>0,0179</b>	<b>&lt; 0,0030</b>	<b>&lt; 0,0030</b>	



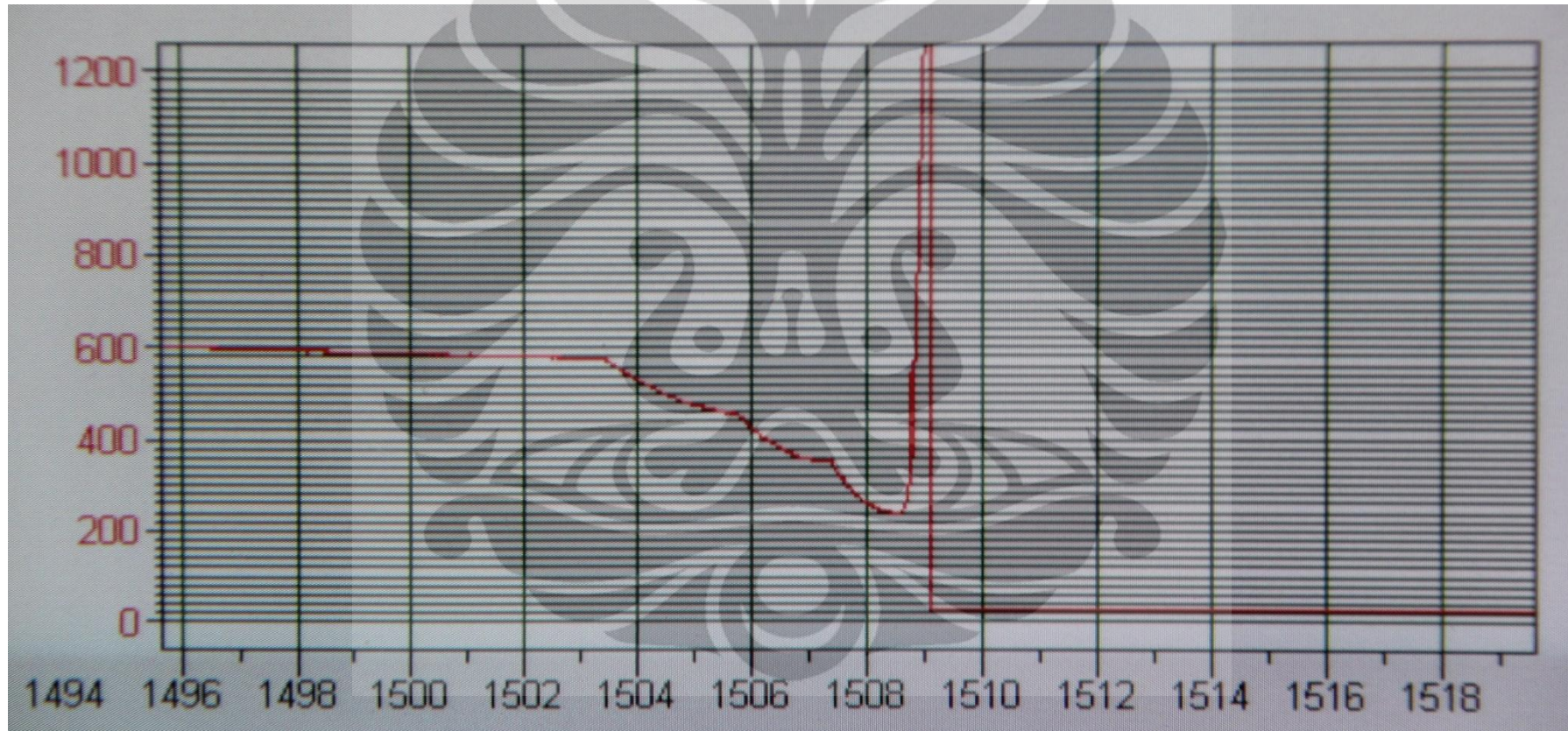
Lampiran 2. Grafik Akuisisi *Rolling* Pada Temperatur 500 °C



Lampiran 3. Grafik Akuisisi *Rolling* Pada Temperatur 550 °C



Lampiran 4. Grafik Akuisisi *Rolling* Pada Temperatur 600 °C



Lampiran 5. Tabel Konversi Nilai Kekerasan ASTM E140

Rockwell B Hardness Number, 100-kgf (HRB)	Vickers Hardness Number (HV)	Brinell Hard- ness Number, 3000-kgf, (HBS)	Knoop Hard- ness Number, 500-gf, and Over (HK)	Rockwell A Hardness Number, 60-kgf, (HRA)	Rockwell F Hardness Number, 60-kgf, (HRF)	Rockwell Superficial Hardness Number			Rockwell B Hardness Number, 100-kgf, (HRB)
						15-T Scale, 15-kgf, (HR 15-T)	30-T Scale, 30-kgf, (HR 30-T)	45-T Scale, 45-kgf, (HR 45-T)	
100	240	240	251	61.5	...	93.1	83.1	72.9	100
99	234	234	246	60.9	...	92.8	82.5	71.9	99
98	228	228	241	60.2	...	92.5	81.8	70.9	98
97	222	222	236	59.5	...	92.1	81.1	69.9	97
96	216	216	231	58.9	...	91.8	80.4	68.9	96
95	210	210	226	58.3	...	91.5	79.8	67.9	95
94	205	205	221	57.6	...	91.2	79.1	66.9	94
93	200	200	216	57.0	...	90.8	78.4	65.9	93
92	195	195	211	56.4	...	90.5	77.8	64.8	92
91	190	190	206	55.8	...	90.2	77.1	63.8	91
90	185	185	201	55.2	...	89.9	76.4	62.8	90
89	180	180	196	54.6	...	89.5	75.8	61.8	89
88	176	176	192	54.0	...	89.2	75.1	60.8	88
87	172	172	188	53.4	...	88.9	74.4	59.8	87
86	169	169	184	52.8	...	88.6	73.8	58.8	86
85	165	165	180	52.3	...	88.2	73.1	57.8	85
84	162	162	176	51.7	...	87.9	72.4	56.8	84
83	159	159	173	51.1	...	87.6	71.8	55.8	83
82	156	156	170	50.6	...	87.3	71.1	54.8	82
81	153	153	167	50.0	...	86.9	70.4	53.8	81
80	150	150	164	49.5	...	86.6	69.7	52.8	80
79	147	147	161	48.9	...	86.3	69.1	51.8	79
78	144	144	158	48.4	...	86.0	68.4	50.8	78
77	141	141	155	47.9	...	85.6	67.7	49.8	77
76	139	139	152	47.3	...	85.3	67.1	48.8	76
75	137	137	150	46.8	99.6	85.0	66.4	47.8	75
74	135	135	147	46.3	99.1	84.7	65.7	46.8	74
73	132	132	145	45.8	98.5	84.3	65.1	45.8	73
72	130	130	143	45.3	98.0	84.0	64.4	44.8	72
71	127	127	141	44.8	97.4	83.7	63.7	43.8	71
70	125	125	139	44.3	96.8	83.4	63.1	42.8	70
69	123	123	137	43.8	96.2	83.0	62.4	41.8	69
68	121	121	135	43.3	95.6	82.7	61.7	40.8	68
67	119	119	133	42.8	95.1	82.4	61.0	39.8	67
66	117	117	131	42.3	94.5	82.1	60.4	38.7	66
65	116	116	129	41.8	93.9	81.8	59.7	37.7	65
64	114	114	127	41.4	93.4	81.4	59.0	36.7	64
63	112	112	125	40.9	92.8	81.1	58.4	35.7	63
62	110	110	124	40.4	92.2	80.8	57.7	34.7	62
61	108	108	122	40.0	91.7	80.5	57.0	33.7	61
60	107	107	120	39.5	91.1	80.1	56.4	32.7	60

Lampiran 6. Tabel Konversi Nilai Kekerasan ASTM E140

Rockwell B Hardness Number, 100-kgf, (HRB)	Vickers Hardness Number (HV)	Brinell Hardness Number, 3000-kgf, 10-mm Ball	Knoop Hardness Number, 500-gf and Over	Rockwell A Hardness Number, 60-kgf, Diamond Penetrator	Rockwell F Hardness Number, 60-kgf, 1/16-in. (1.588-mm) Ball	Rockwell Superficial Hardness Number			Rockwell B Hardness Number, 100-kgf, 1/16-in. (1.588-mm) Ball
						15-T Scale, 15-kgf, 1/16-in. (1.588-mm) Ball	30-T Scale, 30-kgf, 1/16-in. (1.588-mm) Ball	45-T Scale, 45-kgf, 1/16-in. (1.588-mm) Ball	
59	106	106	118	39.0	90.5	79.8	55.7	31.7	59
58	104	104	117	38.6	90.0	79.5	55.0	30.7	58
57	103	103	115	38.1	89.4	79.2	54.4	29.7	57
56	101	101	114	37.7	88.8	78.8	53.7	28.7	56
55	100	100	112	37.2	88.2	78.5	53.0	27.7	55
54	...	...	111	36.8	87.7	78.2	52.4	26.7	54
53	...	...	110	36.3	87.1	77.9	51.7	25.7	53
52	...	...	109	35.9	86.5	77.5	51.0	24.7	52
51	...	...	108	35.5	86.0	77.2	50.3	23.7	51
50	...	...	107	35.0	85.4	76.9	49.7	22.7	50
49	...	...	106	34.6	84.8	76.6	49.0	21.7	49
48	...	...	105	34.1	84.3	76.2	48.3	20.7	48
47	...	...	104	33.7	83.7	75.9	47.7	19.7	47
46	...	...	103	33.3	83.1	75.6	47.0	18.7	46
45	...	...	102	32.9	82.6	75.3	46.3	17.7	45
44	...	...	101	32.4	82.0	74.9	45.7	16.7	44
43	...	...	100	32.0	81.4	74.6	45.0	15.7	43
42	...	...	99	31.6	80.8	74.3	44.3	14.7	42
41	...	...	98	31.2	80.3	74.0	43.7	13.6	41
40	...	...	97	30.7	79.7	73.6	43.0	12.6	40

Lampiran 7. Tabel Konversi Nilai Kekerasan ASTM E140

Rockwell B Hardness Number, 100-kgf, (HRB)	Vickers Hardness Number (HV)	Brinell Hardness Number, 3000-kgf, 10-mm Ball	Knoop Hardness Number, 500-gf and Over	Rockwell A Hardness Number, 60-kgf, Diamond Penetrator	Rockwell F Hardness Number, 60-kgf, 1/16-in. (1.588-mm) Ball	Rockwell Superficial Hardness Number			Rockwell B Hardness Number, 100-kgf, 1/16-in. (1.588-mm) Ball
						15-T Scale, 15-kgf, 1/16-in. (1.588-mm) Ball	30-T Scale, 30-kgf, 1/16-in. (1.588-mm) Ball	45-T Scale, 45-kgf, 1/16-in. (1.588-mm) Ball	
39	...	...	96	30.3	79.1	73.3	42.3	11.6	39
38	...	...	95	29.9	78.6	73.0	41.6	10.6	38
37	...	...	94	29.5	78.0	72.7	41.0	9.6	37
36	...	...	93	29.1	77.4	72.3	40.3	8.6	36
35	...	...	92	28.7	76.9	72.0	39.6	7.6	35
34	...	...	91	28.2	76.3	71.7	39.0	6.6	34
33	...	...	90	27.8	75.7	71.4	38.3	5.6	33
32	...	...	89	27.4	75.2	71.0	37.6	4.6	32
31	...	...	88	27.0	74.6	70.7	37.0	3.6	31
30	...	...	87	26.6	74.0	70.4	36.3	2.6	30

<sup>a</sup> In table headings, kgf refers to total test force.

<sup>b</sup> Appendix X2 contains equations converting determined hardness numbers to Rockwell B hardness numbers for non-austenitic steels. Refer to 1.11 before using conversion equations.