



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI KETAHANAN SERANGAN HIDROGEN PADA BAJA
BEBAS INTERSTISI (*IF STEEL*) YANG MENGALAMI CANAI
HANGAT *MULTIPASS* SEARAH**

SKRIPSI

KHOLILAH SAADAH

0806455761

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
JANUARI 2012**



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI KETAHANAN SERANGAN HIDROGEN PADA BAJA
BEBAS INTERSTISI (*IF STEELS*) YANG MENGALAMI
CANAI HANGAT *MULTIPASSS REVERSIBLE* PADA 650⁰ C**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

CYINTIA ANINDITA

0806455641

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL

DEPOK

JANUARI 2012

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Cyintia Anindita

NPM : 0806455641

Tanda Tangan : 

Tanggal : 20 Januari 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Cyintia Anindita
NPM : 0806455641
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi : Studi Ketahanan Serangan Hidrogen Pada Baja
Bebas Interstisi (*IF Steels*) Yang Mengalami
Canai Hangat *Multipass Reversible* Pada 650⁰C

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 Riasuti, M.Sc ()

Penguji : Dra. Sari Katili, M.S ()

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

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 20 Januari 2012

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) Dean Agasa Ardian, Terry Atmajaya, Kholilah Saadah, dan Hariansyah Permana selaku rekan kerja yang telah banyak membantu saya dalam penelitian ini.
- 5) Seluruh karyawan, staf, serta teknisi Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI.
- 6) Seluruh rekan-rekan metalurgi dan material 2008 yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini.
- 7) Sahabat dan teman-teman saya yang telah membantu saya di saat apapun.

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, 20 Januari 2012

Penulis

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

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

Nama : Cyintia Anindita
NPM : 0806455641
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Departemen : Metalurgi dan Material
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

demikian 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:

Studi Ketahanan Serangan Hidrogen Pada Baja Bebas Interstisi (*IF Steels*)
Yang Mengalami Canai Hangat *Multipass Reversible* Pada 650⁰C

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengaihmedia/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 : 20 Januari 2012

Yang menyatakan



(Cyintia Anindita)

ABSTRAK

Nama : Cyintia Anindita
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul : Studi Ketahanan Serangan Hidrogen Pada Baja Bebas Interstisi (*IF Steels*) Yang Mengalami Canai Hangat *Multipass Reversible* Pada 650⁰C

Pada penelitian ini dilakukan deformasi *multipass reversible* proses canai hangat 650⁰ C yang bertujuan untuk mengamati pengaruh proses tersebut terhadap ukuran butir ferit dan ketahanan *Hydrogen Embrittlement* pada material baja bebas interstisi. Sampel dipanaskan pada 700⁰ C dan ditahan 5 menit, dideformasi pada temperatur 650⁰C dengan besar deformasi 20% x 3 diikuti pendinginan es. Proses canai hangat yang dilakukan dibawah temperatur rekristalisasi mengalami proses *strain hardening* dan terbentuk morfologi *elongated grain* dengan butir ferit yang halus. Ukuran butir ferit dapat mempengaruhi nilai kekerasan, kekuatan, dan ketahanan *Hydrogen Embrittlement* pada material. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan deformasi *multipass reversible* pada proses canai hangat akan meningkatkan kekerasan dan kekuatan material dari kekerasan awal sebesar 95.967 HVN dan kekuatan awal sebesar 301 MPa berturut-turut menjadi 118.333 HVN dan 304.519 MPa. Berkebalikan dengan ketahanan *Hydrogen Embrittlement*, pada sampel yang mengalami pemanasan dan pencanaian hangat lebih rentan terhadap *Hydrogen Embrittlement* yang disebabkan oleh ukuran butir yang lebih kecil dan batas butir yang lebih banyak.

Kata kunci:

Canai hangat, deformasi *multipass reversible*, *strain hardening*, *elongated grain*, kekerasan, dan *Hydrogen Embrittlement*

ABSTRACT

Name : Cyintia Anindita
Study Program : Metallurgy and Materials Engineering
Title : Study of Hydrogen Attack Resistance on Multipass
Reversible Warm-Rolled of Interstitial Free Steel at
650⁰C

In this study multipass reversible deformation 650⁰ C warm-rolled process which aims to observe the influence of the process of ferrite grain size and resistance of hydrogen embrittlement in interstitial free steel material. The samples heated at 700⁰ C and held 5 min, deformed at a temperature of 650⁰ C with a deformation of 20% x 3 followed by ice cooling. Warm-rolled process is performed under recrystallization temperature undergo a process of strain hardening and forming elongated grain morphology with fine ferrite grains. Ferrite grain size can affect the value of hardness, strength, and resistance of hydrogen embrittlement in materials. The results showed that the reversible multipass deformation on warm-rolled process will increase the hardness and material strength of the initial hardness of 95.967 HVN and the initial strength of 301 MPa successive to 118.333 HVN and 304.519 MPa. Contrary to resistance of hydrogen embrittlement, warm-rolled sample is more susceptible to Hydrogen embrittlement caused by the smaller grain size and more grain boundaries.

Keywords:

Warm rolling, multipass reversible deformation, strain hardening, elongated grain, hardness, and Hydrogen Embrittlement

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	v
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR RUMUS	xvi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Ruang Lingkup Penelitian.....	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
2.1.2 Baja Bebas Interstisi (IF Steels).....	9
2.1.3 Ferit	11
2.2 Pengaruh Besar Butir Terhadap Sifat Mekanis Material	12
2.3 Deformasi Plastis	14
2.4 Mekanisme Penguatan Pada Material Logam.....	15

2.4.1	Penghalusan Butir Ferit.....	17
2.4.2	Pengaruh Waktu Tahan Terhadap Besar Butir Ferit.....	18
2.5	Proses Canai.....	18
2.6	<i>Thermo-Mechanical Controlled Process (TMCP)</i>	20
2.6.1	Proses Canai Hangat (<i>Warm Rolling</i>).....	21
2.6.2	<i>Deformation Band</i>	22
2.6.3	<i>Strain Rate</i>	23
2.7	<i>Recovery</i> , Rekristalisasi, dan Pertumbuhan Butir.....	24
2.7.1	<i>Recovery</i>	25
2.7.2	Rekristalisasi	25
2.7.3	Pertumbuhan Butir	27
2.8	<i>Subgrain</i>	29
2.9	Pengaruh Pendinginan Cepat Pada Sifat Mekanis Baja.....	29
2.10	<i>Hydrogen Embrittlement</i>	30
2.11	<i>Hydrogen Embrittlement</i> Pada Baja Bebas Interstisi.....	32
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....		34
3.1	Diagram Alir Penelitian	34
3.2	Alat dan Bahan.....	35
3.2.1	Alat.....	35
3.2.2	Bahan	35
3.3	Prosedur Penelitian	36
3.3.1	Material	36
3.3.2	Persiapan Benda Uji.....	37
3.3.3	Proses TMCP dan <i>Warm Rolling</i>	37
3.3.4	Pengamatan Metalografi.....	39
3.3.5	Perhitungan Besar Butir.....	41
3.3.6	Pengujian Kekerasan.....	44
3.3.7	Pengujian Tarik.....	46
3.3.8	Pengujian <i>Hydrogen Charging</i>	47
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....		49
4.1	Preparasi Benda Uji	49

4.2	Hasil Pengukuran Ketebalan Benda Uji	50
4.3	Hasil Pengamatan Metalografi.....	51
4.3.1	Struktur Mikro Awal Baja Bebas Interstisi (<i>IF Steels</i>).....	52
4.3.2	Struktur Mikro Baja Bebas Interstisi (<i>IF Steels</i>) Setelah Dilakukan Pemanasan Hingga Temperatur 700 ⁰ C dan Ditahan 5 menit)	53
4.3.3	Struktur Mikro Baja Bebas Interstisi (<i>IF Steels</i>) Dengan Pemanasan Hingga Temperatur 700 ⁰ C Ditahan 5 Menit Yang Mengalami Canai Hangat <i>Multipass Reversible</i> Temperatur 650 ⁰ C Dengan Besar Deformasi 20%-20%-20% Diikuti Pendinginan Es)	55
4.4	Hasil Pengukuran Besar Butir.....	57
4.4.1	Pengaruh Proses Pemanasan dan Canai Hangat Terhadap Ukuran Diameter Butir Ferit.....	59
4.4.2	Pengaruh Kadar Karbon dan Silikon Terhadap Penghalusan Butir Ferit.....	60
4.5	Hasil Pengujian Kekerasan	61
4.5.1	Pengaruh Proses Pemanasan dan Canai Hangat Terhadap Nilai Kekerasan.....	62
4.6	Hasil Uji Tarik	64
4.7	Hasil Pengujian <i>Hydrogen Charging</i>	67
4.7.1	Hasil Pengujian Kekerasan dan Tarik Pada Baja Bebas Interstisi Sebelum dan Setelah Pengujian <i>Hydrogen Charging</i>	69
4.7.2	Hasil Pengujian Struktur Mikro Pada Baja Bebas Interstisi Setelah Dilakukan Pengujian <i>Hydrogen Charging</i>	72
BAB V KESIMPULAN.....		76
REFERENSI		77

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	Komposisi Kimia Lembaran Baja Bebas Interstisi	3
Tabel 2.1	Komposisi Kimia Tipikal Beberapa Jenis <i>IF Steels</i>	9
Tabel 4.1	Komposisi Benda Uji Baja Bebas Interstisi (<i>IF Steels</i>)	49
Tabel 4.2	Perbandingan Kadar Karbon dan Silikon pada Benda Uji Baja Bebas Interstisi dan Baja SS 400	50
Tabel 4.3	Hasil Pengukuran Dimensi Benda Uji Sebelum dan Sesudah Proses Pemanasan Lalu Dilakukan Canai Hangat 650 ⁰ C dengan Pendinginan Es.....	51
Tabel 4.4	Hasil Pengukuran <i>Strain Rate</i> Benda Uji Baja Bebas Interstisi dengan Proses Canai Hangat <i>Multipass Reversible</i> Deformasi 20%x3 pada Temperatur 650 ⁰ C dengan Pendinginan Es.....	51
Tabel 4.5	Tabel Perbandingan Hasil Pengukuran Diameter Butir Ferit pada Baja Bebas Interstisi dengan Baja SS 400.....	58
Tabel 4.6	Hasil Pengukuran Kekerasan Sebelum dan Setelah Proses Canai Hangat	62
Tabel 4.7	Data Hasil Uji Tarik pada Tiap Benda Uji.....	64
Tabel 4.8	Hasil Uji Keras dan Tarik Sebelum dan Setelah <i>Hydrogen Charging Test</i>	68

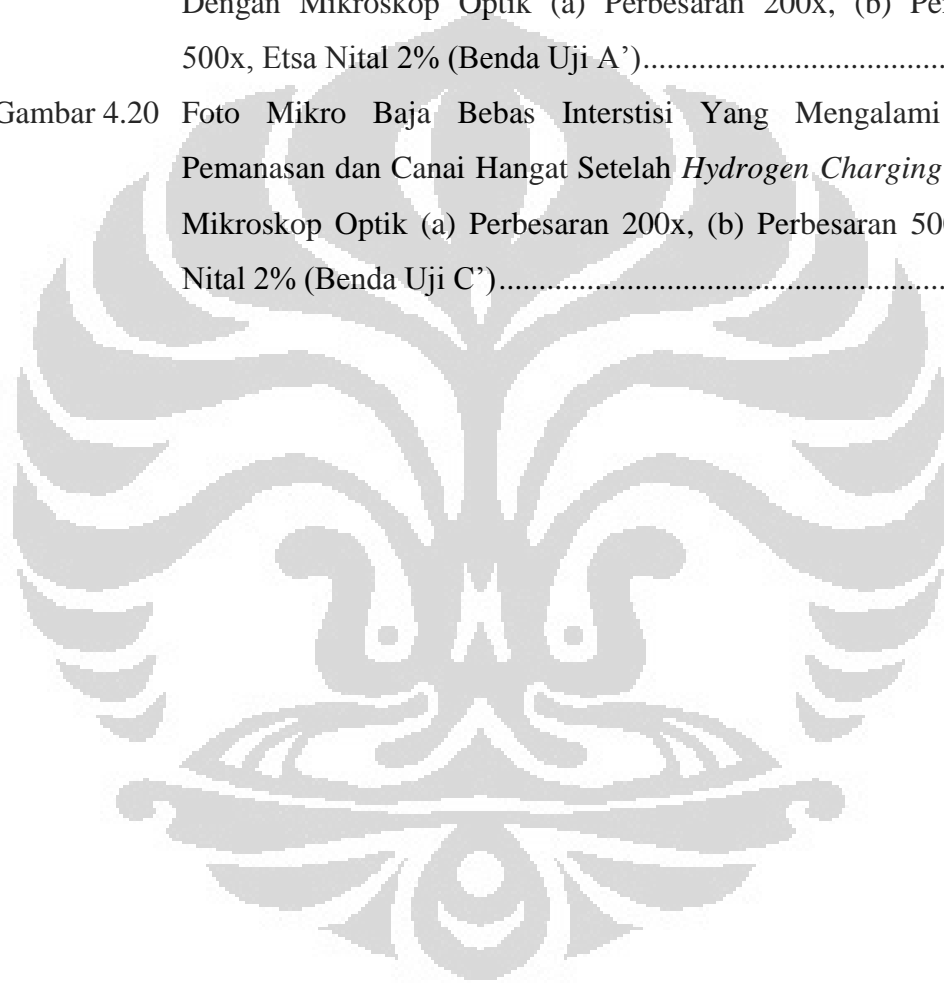
DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Transformasi Fasa pada Baja Karbon Rendah ^[6]	8
Gambar 2.2	Kombinasi Elongasi dan Kekuatan untuk Berbagai Jenis Baja Karbon Rendah ^[6]	8
Gambar 2.3	Struktur Mikro Baja dengan Karbon Sangat Rendah ^[4]	10
Gambar 2.4	Pengaruh Kadar Karbon Terhadap Sifat Mekanik Baja Dengan Karbon Sangat Rendah ^[4]	10
Gambar 2.5	Garis Kekuatan Luluh pada Baja Bebas Interstisi ^[9]	11
Gambar 2.6	Pengaruh Ukuran Butir Terhadap Kekuatan Luluh Paduan Kuningan (70% Cu-30% Zn) ^[6]	13
Gambar 2.7	Pengaruh Ukuran Butir Terhadap Nilai Kekuatan Luluh dan Ketangguhan Baja Karbon ^[10]	13
Gambar 2.8	Analogi Pergerakan Dislokasi ^[3]	15
Gambar 2.9	Mekanisme Penguatan pada Logam dalam Skala Mikroskopik ^[6]	16
Gambar 2.10	Ilustrasi Batas Butir dan Pergerakan Dislokasi ^[6]	16
Gambar 2.11	Skematik Proses Canai ^[16]	19
Gambar 2.12	Transformasi Morfologi Butir Setelah Proses Canai ^[15]	19
Gambar 2.13	Perubahan Mikrostruktur yang Terjadi Selama Proses TMCP ^[17]	21
Gambar 2.14	Mekanisme Terbentuknya <i>Deformation Band</i> ^[21]	23
Gambar 2.15	Skematik Proses Anil a) Butir yang Terdeformasi, b) <i>Recovery</i> , c) Rekrystalisasi Sebagian, d) Rekrystalisasi Penuh, e) Pertumbuhan Butir, f) <i>Abnormal Grain Growth</i> ^[25]	24
Gambar 2.16	Struktur Mikro <i>Dynamic Recrystallization on Ultrafined Ferrite Grains of Interstitial Free Steel</i> pada 450 ⁰ C ^[28]	27
Gambar 2.17	Skematis Proses <i>Recovery</i> , Rekrystalisasi, dan Pertumbuhan Butir ^[6]	28
Gambar 2.18	Mekanisme Difusi Hidrogen pada Suatu Logam ^[33]	31
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian.....	34
Gambar 3.2	Alat <i>Optical Emission Spectroscopy</i> (Laboratorium Metalurgi PT Krakatau Steel, Cilegon)	36

Gambar 3.3	Ilustrasi Benda Uji dan Pemasangan Termokopel.....	37
Gambar 3.4	Skematik Pengujian Benda Uji C	38
Gambar 3.5	Furnace Carbolite (Laboratorium Teknik Perubahan Bentuk DTMM FTUI)	38
Gambar 3.6	Mesin Onoroll (Laboratorium Teknik Perubahan Bentuk DTMM)	39
Gambar 3.7	Bagian Benda Uji yang akan Diamati Mikrostrukturnya, (a) transversal dan (b) longitudinal	39
Gambar 3.8	Mikroskop Optik (DTMM FT UI)	40
Gambar 3.9	Lingkaran yang Digunakan untuk Perhitungan Butir dengan Metode Intercept Heyn ^[40]	42
Gambar 3.10	Metode <i>Straight Line Test</i> ^[40]	44
Gambar 3.11	Alat Uji Vickers Frank Finotest (Laboratorium Metalurgi PT Krakatau Steel, Cilegon)	45
Gambar 3.12	Metode Uji Vickers ^[42]	45
Gambar 3.13	Mesin Uji Tarik Servopulser Shimadzu (Laboratorium Metalurgi Fisik DTMM FTUI)	46
Gambar 3.14	Kurva Tegangan-Regangan Benda Uji Yang Terbuat Dari Baja Ulet ^[42]	47
Gambar 3.15	Rangkaian Proses Hydrogen Charging Test[34]	48
Gambar 3.16	Susunan Alat dan Bahan <i>Hydrogen Charging Test</i> yang Dilakukan di Laboratorium Korosi dan Metalurgi Ekstraksi DTMM FTUI) .	48
Gambar 4.1	Foto Benda Uji Bebas Interstisi (<i>IF Steels</i>) (a) Yang Telah Dideformasi dan (b) Awal (Belum Dideformasi).....	50
Gambar 4.2	Foto Mikro Benda Uji Awal dengan Mikroskop Optik (a) Perbesaran 500x, (b) Perbesaran 200x, Etsa Nital 2% (Benda Uji A).....	52
Gambar 4.3	Foto Mikro Benda Uji yang Dilakukan Pemanasan 700 ⁰ C Ditahan 5 menit dengan Mikroskop Optik (a) Perbesaran 500x, (b) Perbesaran 200x, Etsa Nital 2% (Benda Uji B).....	53

Gambar 4.4	Foto Mikro Baja Benda Uji dengan Pemanasan 700 ⁰ C Ditahan 5 Menit dan Dilakukan Canai Hangat <i>Multipass Reversible</i> Temperatur 650 ⁰ C dengan Besar Deformasi 20%-20%-20% Diikuti Pendinginan Es Menggunakan Mikroskop Optik (a) Perbesaran 500x, (b) Perbesaran 200x, Etsa Nital 2% (Benda Uji C).....	55
Gambar 4.5	Grafik Pengaruh Proses <i>Reheating</i> dan <i>Warm Rolling</i> Terhadap Ukuran Diameter Butir Ferit	59
Gambar 4.6	Grafik Perbandingan Ukuran Diameter Butir Ferit yang Dihasilkan pada Baja Bebas Interstisi (<i>IF Steels</i>) dan Baja SS 400 Dengan Berbagai Perlakuan.....	60
Gambar 4.7	Grafik Nilai Kekerasan Benda Uji pada Baja Bebas Interstisi dengan Berbagai Perlakuan	62
Gambar 4.8	Foto Benda uji A (Tanpa Perlakuan) (a) Sebelum Uji Tarik dan (b) Setelah Uji Tarik.....	64
Gambar 4.9	Foto Benda uji C (<i>Reheating</i> dan <i>Warm Rolling</i> 20%-20%-20%) (a) Sebelum Uji Tarik dan (b) Setelah Uji Tarik.....	65
Gambar 4.10	Grafik Tegangan-Regangan Tarik pada Benda Uji Tanpa Perlakuan	66
Gambar 4.11	Grafik Regangan-Tegangan Tarik pada Benda Uji Yang Mengalami Proses Pemanasan dan Pencanaan	66
Gambar 4.12	Foto Benda uji A (Awal) (a) Sebelum <i>Hydrogen Charging Test</i> (b) Setelah <i>Hydrogen Charging Test</i>	68
Gambar 4.13	Foto Benda uji C (<i>Reheating</i> dan <i>Warm Rolling</i>) (a) Sebelum <i>Hydrogen Charging Test</i> (b) Setelah <i>Hydrogen Charging Test</i>	68
Gambar 4.14	Grafik Kekerasan Benda uji Sebelum dan Setelah <i>Hydrogen Charging Test</i>	69
Gambar 4.15	Grafik Regangan-Tegangan Tarik Pada Benda Uji Setelah <i>Hydrogen Charging Test</i>	69
Gambar 4.16	Grafik Perbandingan Regangan-Tegangan Tarik Pada Baja Bebas Interstisi (<i>IF Steels</i>) Tanpa Perlakuan dan Setelah Pengujian <i>Hydrogen Charging</i>	70

Gambar 4.17	Grafik Regangan-Tegangan Tarik Pada Benda Uji Yang Mengalami Proses Pemanasan dan Pencapaian Serta <i>Pengujian Hydrogen Charging</i>	70
Gambar 4.18	Grafik Kekuatan Tarik Pada Benda Uji Sebelum dan Setelah <i>Hydrogen Charging</i> Pada Benda Uji Yang Mengalami Proses Pemanasan dan Pencapaian	71
Gambar 4.19	Foto Mikro Baja Bebas Interstisi Setelah <i>Hydrogen Charging</i> Dengan Mikroskop Optik (a) Perbesaran 200x, (b) Perbesaran 500x, Etsa Nital 2% (Benda Uji A').....	73
Gambar 4.20	Foto Mikro Baja Bebas Interstisi Yang Mengalami Proses Pemanasan dan Canai Hangat Setelah <i>Hydrogen Charging</i> Dengan Mikroskop Optik (a) Perbesaran 200x, (b) Perbesaran 500x, Etsa Nital 2% (Benda Uji C').....	74



DAFTAR RUMUS

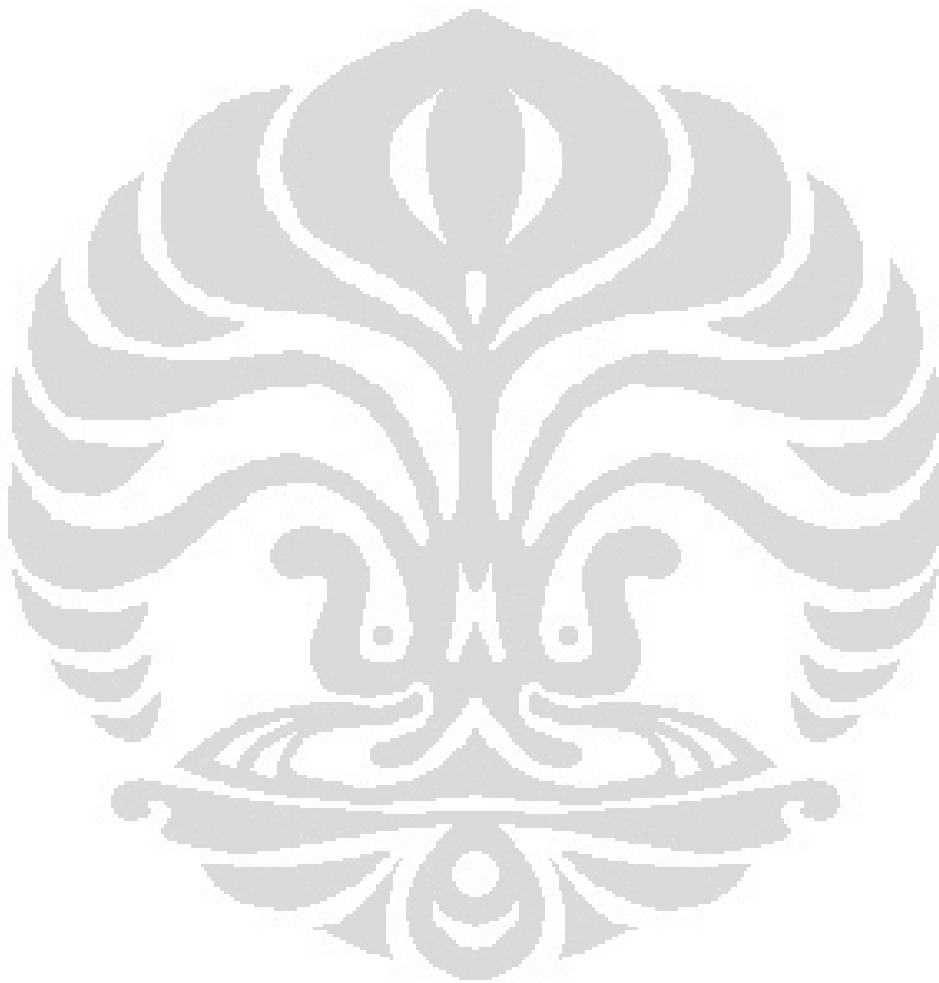
Persamaan 2.1 Persamaan Hall Petch.....	12
Persamaan 2.2 Rumus <i>Strain</i>	19
Persamaan 2.3 Rumus Persen Deformasi.....	19
Persamaan 2.4 Rumus <i>Strain Rate</i>	23
Persamaan 2.5 Rumus <i>Crack Length Ratio</i> (CLR).....	32
Persamaan 2.6 Rumus <i>Crack Thickness Ratio</i> (CTR).....	32
Persamaan 2.7 Rumus <i>Crack Sensitivity Ratio</i> (CSR).....	32
Persamaan 3.1 Rumus Jumlah Titik Potong Per Satuan Panjang.....	42
Persamaan 3.2 Rumus Panjang Garis Berpotongan.....	42
Persamaan 3.3 Rumus <i>Grain Size Number</i>	43
Persamaan 3.4 Rumus Besar Butir <i>Non-Equiaxed</i>	43
Persamaan 3.5 Rumus Kekerasan Vickers.....	45
Persamaan 4.1 Rumus Besar Derajat Deformasi.....	50

DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1. *Main Frame* Data Proses Benda Uji Bebas Interstisi No. Coil 365328 Grade OA0125AT di PT Krakatau Steel
- Lampiran 2. *Main Frame* Data Komposisi Benda Uji Bebas Interstisi No. Coil 365328 Grade OA0125AT di PT Krakatau Steel
- Lampiran 3. Grafik Akuisisi *Rolling* pada Temperatur 650⁰C Passing Ke-1
- Lampiran 4. Grafik Akuisisi *Rolling* pada Temperatur 650⁰C Passing Ke-2
- Lampiran 5. Grafik Akuisisi *Rolling* pada Temperatur 650⁰C Passing Ke-3 dan Pendinginan Es
- Lampiran 6. Standar Pengujian Uji Tarik JIZ Z 2201 pada Benda Uji Pelat dengan Ketebalan 3 – 6 mm
- Lampiran 7. Data Pengujian Tarik pada Benda Uji Baja Bebas Interstisi Tanpa Perlakuan dengan No. Coil 365328
- Lampiran 8. Grafik Tegangan Terhadap Regangan Uji Tarik pada Benda Uji Baja Bebas Interstisi Tanpa Perlakuan (Sampel Ke-3 Berwarna Biru Tua)
- Lampiran 9. Data Hasil Pengujian Uji Tarik pada Benda Uji Baja Bebas Interstisi yang Mengalami Pemanasan dan Canai Hangat 650⁰C
- Lampiran 10. Grafik Beban Terhadap Pertambahan Panjang Uji Tarik pada Benda Uji Baja Bebas Interstisi yang Mengalami Pemanasan dan Canai Hangat 650⁰C
- Lampiran 11. Data Hasil Pengujian Uji Tarik pada Benda Uji Baja Bebas Interstisi Tanpa Perlakuan dan yang Mengalami Pemanasan dan Canai Hangat 650⁰C
- Lampiran 12. Grafik Beban Terhadap Pertambahan Panjang Uji Tarik pada Benda Uji Baja Bebas Interstisi Tanpa Perlakuan Setelah Pengujian *Hydrogen Charging*
- Lampiran 13. Grafik Beban Terhadap Pertambahan Panjang Uji Tarik pada Benda Uji Baja Bebas Interstisi yang Mengalami Proses

Pemanasan dan Canai Hangat 650°C Setelah Pengujian *Hydrogen Charging*

Lampiran 14. Spesifikasi Alat-alat Pengujian



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Baja memegang peranan penting sebagai material rekayasa dalam peradaban kemajuan manusia. Perkembangan teknologi industri baja yang sangat pesat membawa perubahan yang besar terhadap proses pemilihan untuk penggunaan yang tepat pada material baja. Seiring dengan perkembangan yang terjadi, maka terjadi peningkatan karakteristik dan sifat yang sesuai pada baja untuk aplikasi yang dibutuhkan.

Untuk menghasilkan baja yang memiliki sifat mekanis dan juga ketahanan korosi yang baik dikembangkan suatu proses yaitu proses termomekanikal (*Thermo-Mechanical Control Process / TMCP*). Proses termomekanikal ini merupakan proses perubahan bentuk material yang melibatkan proses deformasi dengan disertai proses kontrol ataupun rekayasa proses perlakuan panas dan mikrostruktur untuk menghasilkan produk dengan sifat-sifat mekanis yang lebih baik. Proses TMCP ini telah berkembang dengan adanya proses dengan menggunakan pengerjaan hangat (*warm working*) dengan rentang temperatur antara 450-700°C^[1].

Baja karbon rendah merupakan salah satu jenis baja yang dipakai secara meluas sebagai konstruksi gedung, jembatan, struktur pipa hingga komponen pada industri otomotif. Baja karbon rendah sifatnya dipengaruhi oleh kandungan karbonnya dan juga mikrostrukturnya. Dalam industri otomotif banyak digunakan baja dengan kadar karbon yang sangat rendah atau biasa disebut dengan baja bebas interstisi (*Interstitial Free Steel*). Baja bebas interstisi (*IF Steel*) merupakan baja yang mengandung atom interstisi (C, H, N, O) terlarut yang sangat rendah atau tidak ada sama sekali. Oleh karena itu baja IF memiliki kekuatan luluh yang rendah, elongasi tinggi, dan mampu bentuk yang sangat baik^[2].

Berdasarkan mikrostruktur, baja IF didefinisikan sebagai baja yang memiliki fasa ferit mendekati 100 % (fraksi perlit ~ nol), hal ini karena kadar C dan N kurang dari 0.0080 % (80 ppm)^[2]. Dengan proses rekayasa pada temperatur

hangat maka diharapkan terjadi reduksi ukuran butir ferit. Sehingga dengan perpaduan antara proses pengerjaan hangat dan juga penggunaan baja IF diharapkan mendapatkan peningkatan yang signifikan terhadap sifat akhir baja dan efisiensi dari segi biaya dengan adanya pengontrolan terhadap mikrostruktur baik ukuran dan bentuk butir serta memiliki ketahanan terhadap *Hydrogen Embrittlement* yang baik.

1.2 Perumusan Masalah

Masalah yang dikaji pada penelitian kali ini yaitu untuk melihat pengaruh besar deformasi pada proses canai hangat dengan temperatur sebesar 650°C terhadap ukuran butir ferit dan ketahanan *Hydrogen Embrittlement* pada spesimen baja bebas interstisi (*IF Steels*). Pada penelitian ini, spesimen akan dilakukan proses *reheating* pada temperature 700°C selama 15 menit, lalu ditahan selama 5 menit dan dilakukan *warm rolling* pada temperatur hangat sebesar 650°C dengan deformasi *multipass reversible* sebesar 60% melalui tiga kali passing (20%-20%-20%), kemudian dilakukan pendinginan cepat menggunakan es.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk:

1. Mengetahui dan menganalisis pengaruh besar deformasi 60 % (20%-20%-20%) dengan metode *multipass reversible* pada proses canai hangat terhadap peningkatan sifat mekanis dan ketahanan korosi akibat serangan hidrogen pada baja bebas interstisi (*IF Steels*).
2. Mengetahui dan menganalisis pengaruh dari besar butir akibat dari deformasi yang dilakukan terhadap ketahanan dari *Hydrogen Embrittlement*.

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

1.4.1 Material

Material yang digunakan pada penelitian ini adalah lembaran baja bebas interstisi (IF Steels) *grade* OA0125AT di mana memiliki karakteristik *Deep Drawing Quality* dengan nomor *coil* 365328 yang didapatkan dari PT Krakatau Steel. Material tersebut merupakan hasil produk dari proses HRC (*Hot Roll Coil*). Berikut merupakan tabel data komposisi kimia dari material baja bebas interstisi yang digunakan pada penelitian ini.

Tabel 1. 1 Komposisi Kimia Lembaran Baja Bebas Interstisi

Komposisi	C	Mn	S	N	Ni	Nb	Mo
% Berat	0.007	0.234	0.06	0.046	0.012	0.001	0.003
	Si	P	Al	Cr	Cu	V	Ti
	0.005	0.048	0.033	0.016	0.029	0.005	0.09

1.4.2 Parameter Penelitian

Parameter penelitian yang divariabelkan dalam penelitian ini sebagai berikut:

- a. Temperatur Canai
Temperatur canai dilakukan pada temperatur 650⁰C.
- b. Waktu Tahan
Proses pemanasan dilakukan pada temperatur 700⁰C selama 15 menit, kemudian ditahan selama 5 menit, lalu dideformasi pada suhu 650⁰C.
- c. Metode Deformasi
Deformasi 60% dilakukan dengan metode *multipass reversible* melalui tiga kali passing (20%-20%-20%) pada temperatur 650⁰C.
- d. Media Pendingin
Media pendingin yang digunakan adalah es.

1.4.3 Tempat Penelitian

Proses penelitian dilakukan di beberapa tempat, yaitu :

1. Pengujian komposisi dilakukan di Laboratorium Metalurgi PT Krakatau Steel, Cilegon.
2. Proses TMCP (*warm rolling*) dilakukan di Laboratorium Teknologi Pengubahan Bentuk Departemen Metalurgi dan Material FTUI.
3. Preparasi sampel dan pengamatan struktur mikro dilakukan di Laboratorium Metalografi dan HST Departemen Metalurgi dan Material FTUI.
4. Pengujian korosi *Hydrogen Embrittlement* dilakukan di Laboratorium Korosi Departemen Metalurgi dan Material FTUI.
5. Pengujian tarik dilakukan di Laboratorium Pengujian Tarik Departemen Metalurgi dan Material FTUI dan Laboratorium Metalurgi PT Krakatau Steel.

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 : Tinjauan Pustaka

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

Bab 3 : Metodologi Penelitian

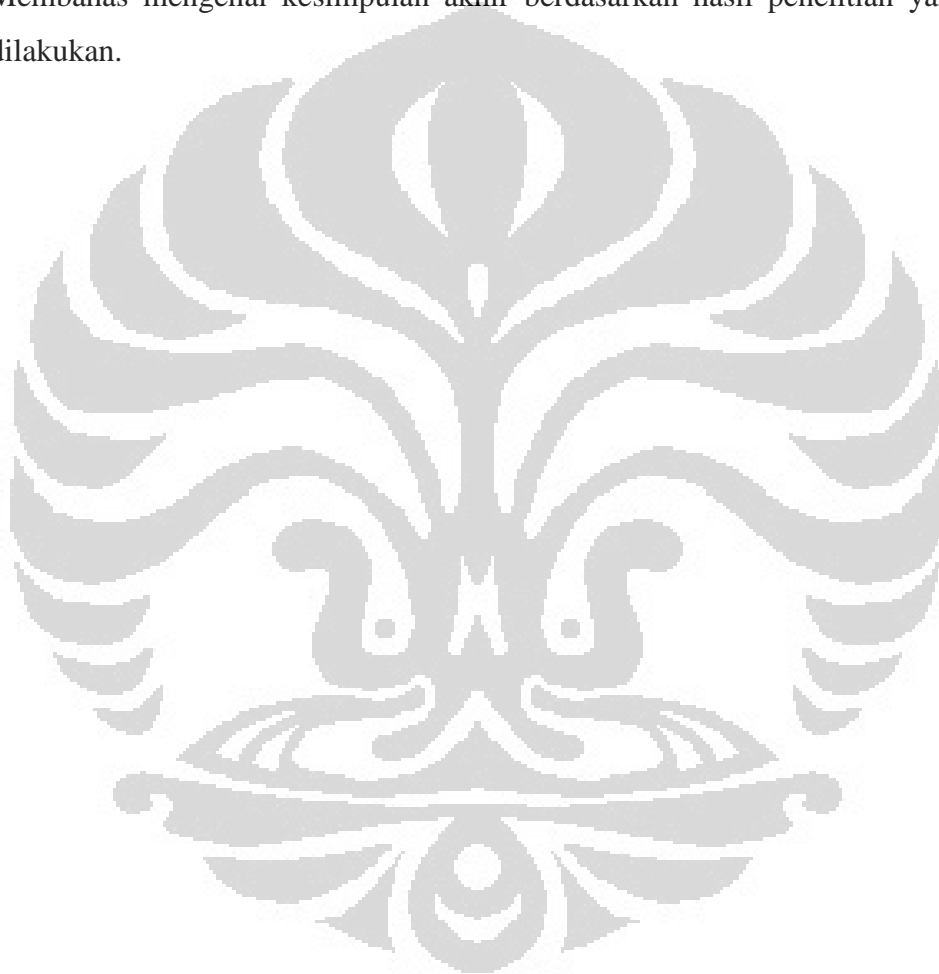
Bab ini berisi mengenai langkah kerja, prosedur penelitian, prinsip pengujian, serta daftar alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian.

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 adalah logam paduan antara besi (Fe) dan karbon (C), di mana besi sebagai unsur dasar dan karbon sebagai unsur paduan utamanya. Kandungan karbon dalam baja berkisar 0.2% hingga 1.7% berat sesuai grade-nya. Dalam proses pembuatan baja akan terdapat unsur-unsur lain selain karbon yang akan tertinggal di dalam baja, seperti mangan (Mn), silikon (Si), kromium (Cr) vanadium (V), dan unsur lainnya^[3]. Penambahan karbon dan unsur-unsur paduan lain pada kadar yang lebih tinggi sangat penting di dalam mendesain dan merekayasa sifat-sifat mekaniknya^[4]. Dalam hal aplikasi, baja sering digunakan sebagai bahan baku untuk alat-alat perkakas, alat-alat pertanian, komponen-komponen otomotif, kebutuhan rumah tangga, dan lain-lain.

Baja karbon (*carbon steel*) adalah salah satu jenis logam paduan besi karbon terpenting dengan presentase berat karbon hingga 2,11%^[4]. Karbon merupakan unsure penguat besi yang efektif dan murah. Oleh karena itu, pada umumnya sebagian besar baja hanya mengandung karbon dengan sedikit unsur paduan lainnya. Perbedaan presentase kandungan karbon dalam campuran logam baja menjadi salah satu pengklasifikasian baja. Berdasarkan kandungan karbon, baja diklasifikasikan ke dalam tiga jenis, yaitu^[5]:

1. Baja karbon rendah

Baja karbon rendah memiliki kandungan karbon kurang dari 0.3% C. Baja karbon rendah merupakan baja yang paling murah diproduksi di antara baja karbon lainnya, mudah di-*machining* dan dilas, serta keuletan dan ketangguhannya sangat tinggi tetapi kekerasannya tergolong rendah dan tahan aus.

2. Baja karbon menengah

Baja karbon menengah memiliki kandungan karbon antara 0.3% C - 0.6% C. Baja karbon menengah memiliki kekerasan yang lebih tinggi

dibandingkan baja karbon rendah. Selain itu, baja karbon menengah memiliki kekuatan tarik dan batas regang yang tinggi, tidak mudah dimachining dan dilas, dan dapat dikeraskan (di-*quenching*) dengan baik.

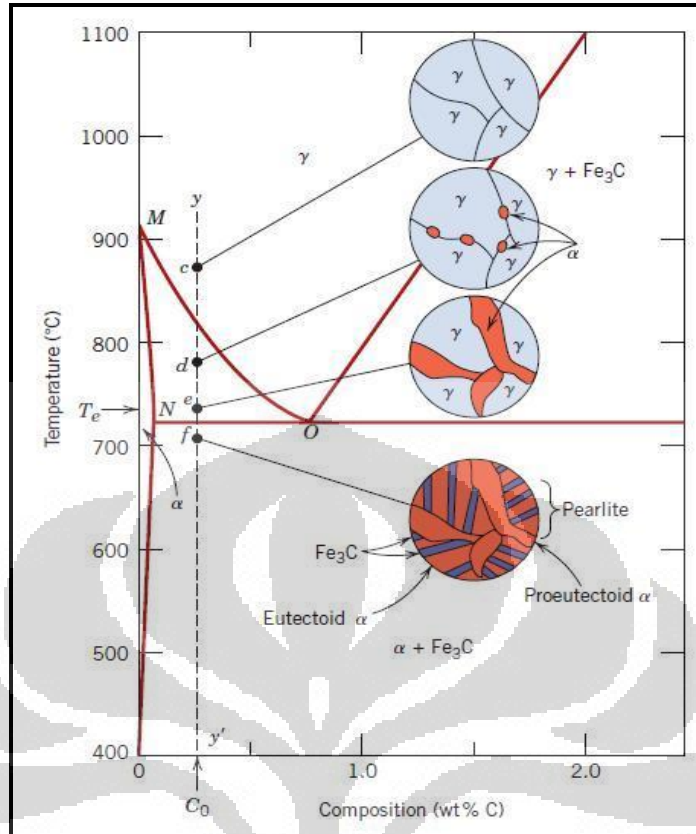
3. Baja karbon tinggi

Baja karbon tinggi memiliki kandungan karbon antara 0.6% C - 1.7% C. Baja ini memiliki sifat tahan panas yang tinggi, kekerasan tinggi, namun keuletannya rendah. Baja karbon tinggi mempunyai kekuatan tarik yang tinggi dan banyak digunakan untuk material perkakas.

2.1.1 Baja Karbon Rendah

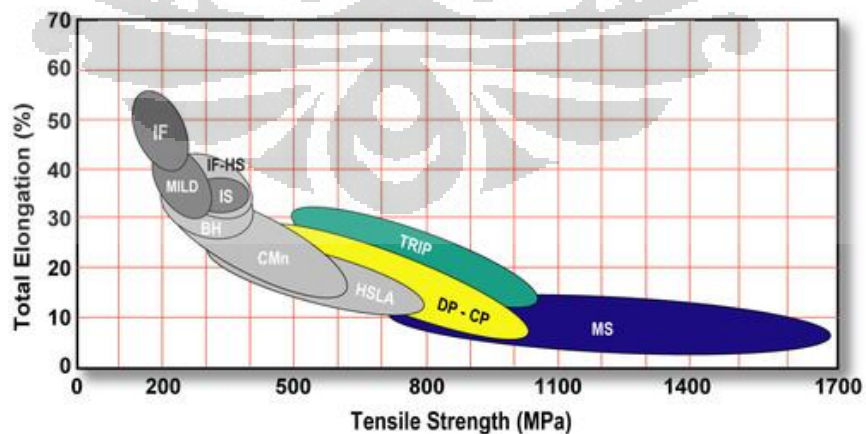
Baja karbon rendah banyak digunakan untuk proses pembentukan logam lembaran, misalnya untuk badan dan rangka kendaraan serta komponen-komponen otomotif lainnya. Mikrostrukturnya terdiri dari fasa ferit dan perlit yang membuat baja karbon rendah ini lunak dan kekuatannya lemah, tetapi memiliki keuletan 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.

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*.



Gambar 2. 1 Transformasi Fasa pada Baja Karbon Rendah^[6]

Beberapa jenis baja karbon rendah yang telah dikembangkan adalah *hot-rolled low-carbon steels*, *cold-rolled and annealed low-carbon steels*, *Interstitial free* atau *ultra-low carbon steels*, *controlled rolled-microalloyed steels (high strength low-alloy steels)*, *dual-phase steels*, dan baja *Transformation Induced Plasticity (TRIP)*^[6].



Gambar 2. 2 Kombinasi Elongasi dan Kekuatan untuk Berbagai Jenis Baja Karbon Rendah^[6]

2.1.2 Baja Bebas Interstisi (IF Steels)

Baja bebas interstisi (*IF Steel*) merupakan baja yang mengandung atom interstisi (C, H, N, O) terlarut yang sangat rendah atau tidak ada sama sekali. Lebih jauh jika dilihat dari kondisi mikro struktur, baja IF didefinisikan sebagai baja yang memiliki fasa ferit mendekati 100 % (fraksi perlit ~ nol), hal ini karena kadar C dan N kurang dari 0.0080 % (80 ppm)^[2]. Komposisi kimia baja bebas interstisi dapat dilihat pada tabel di bawah ini^[7].

Tabel 2. 1 Komposisi Kimia Tipikal Beberapa Jenis *IF Steels*

Jenis	Kadar dalam % Berat							
	C	Si	Mn	P	S	N	Ti	Nb
Ti	0.0030	0.015	0.2	0.015	0.02	0.0025	0.045	-
Nb	0.0020	0.020	0.2	0.015	0.02	0.0030	-	0.040
Ti-Nb	0.0035	0.030	0.2	0.015	0.02	0.0040	0.015	0.060
Ti-P	0.0040	0.030	0.2	0.053	0.02	0.0030	0.107	-

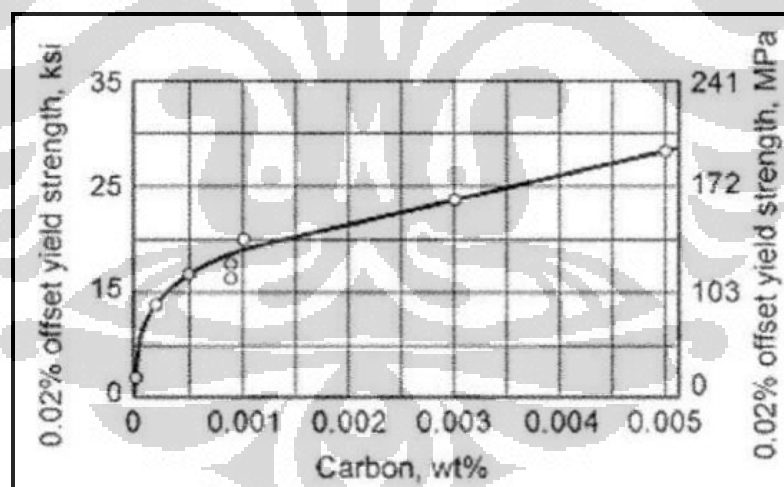
Ketidakhadiran unsur-unsur yang larut secara interstisi dalam matriks menyebabkan IF Steel memiliki kekuatan luluh yang rendah, elongasi yang tinggi, dan sifat mampu bentuk yang baik. Hal tersebut dapat dicapai dengan cara melakukan penambahan Ti, Nb, atau paduan Ti-Nb untuk membentuk senyawa TiC, TiN, NbC, atau NbN. Kombinasi ini menghasilkan sifat mampu bentuk yang sangat baik dan sifat *non-aging*^[8].

Baja bebas interstisi (*IF Steels*) merupakan baja karbon dengan kandungan karbon yang sangat rendah, sehingga sering disebut sebagai baja karbon sangat rendah (*ultra low carbon steel*). Baja jenis ini dibuat dan diaplikasikan dengan mengeksplorasi sifat-sifat ferite. Ferit adalah salah satu fasa penting di dalam baja yang bersifat lunak dan ulet. Baja karbon rendah umumnya memiliki kadar karbon di bawah komposisi eutektoid dan memiliki struktur mikro hampir seluruhnya ferit. Pada lembaran baja kadar karbon sangat rendah, jumlah atom karbonnya bahkan masih berada dalam batas kelarutannya pada larutan padat sehingga struktur mikronya adalah ferit seluruhnya (*fully ferritic*)^[4]. Mikrostruktur baja dengan kadar karbon sangat rendah dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Struktur Mikro Baja dengan Karbon Sangat Rendah^[4]

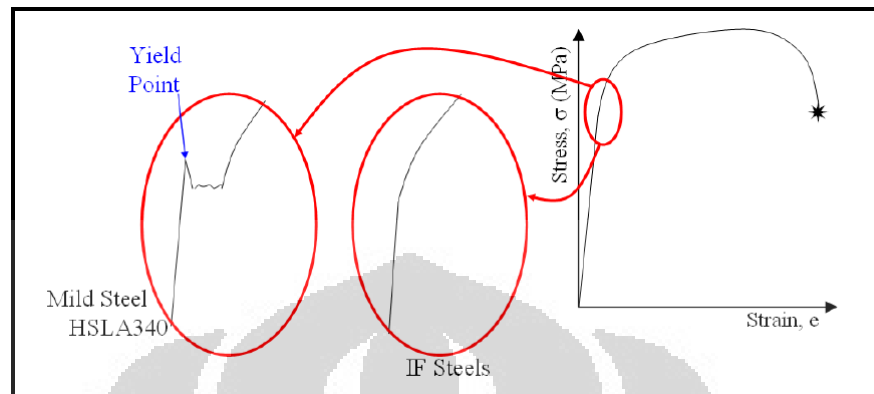
Hingga batas kelarutannya di dalam larutan padat ferit, penambahan karbon berpengaruh terhadap sifat-sifat mekanik baja dengan kadar karbon sangat rendah^[4]. Pengaruh kadar karbon tersebut dapat dilihat pada gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Pengaruh Kadar Karbon Terhadap Sifat Mekanik Baja Dengan Karbon Sangat Rendah^[4]

Menurut John Ioannou^[9], ketidakhadiran atom interstisi dalam keadaan bebas pada struktur matriks ferit pada baja bebas interstisi memberi keistimewaan dalam perilaku deformasi plastis, yaitu hilangnya *yield point strain (Lüders band)*, yang umum terjadi pada baja karbon biasa^[9]. *Lüders band* atau *stretcher strain mark* dalam istilah industri manufaktur baja adalah sejenis cacat berbentuk kerut

(*wrinkle atau flutting*) di permukaan. Cacat ini diketahui berkaitan erat dengan fenomena *strain aging*, yaitu meningkatnya kekuatan dan turunnya nilai elongasi akibat suatu deformasi dingin^[2].



Gambar 2. 5 Garis Kekuatan Luluh pada Baja Bebas Interstisi^[9]

Saat ini baja IF telah dikenal luas sebagai material berkualitas terbaik untuk aplikasi *deep drawing*. Baja jenis ini telah banyak digunakan untuk aplikasi mulai dari otomotif, galvanil, enamel, hingga peralatan rumah tangga.

2.1.3 Ferit

Ferit adalah fasa larutan padat yang memiliki struktur BCC (*body centered cubic*). Ferit dalam keadaan setimbang dapat ditemukan pada temperatur ruang, yaitu *alpha-ferrite* atau pada temperatur tinggi, yaitu *delta-ferrite*. Secara umum fasa ini bersifat lunak, ulet (*ductile*), dan magnetik hingga temperatur tertentu. Kelarutan karbon di dalam fasa ini relatif lebih kecil dibandingkan dengan kelarutan karbon di dalam fasa larutan padat lain di dalam baja, yaitu fasa austenit. Pada temperatur ruang, kelarutan karbon di dalam *alpha-ferrite* hanyalah sekitar 0,05%^[4].

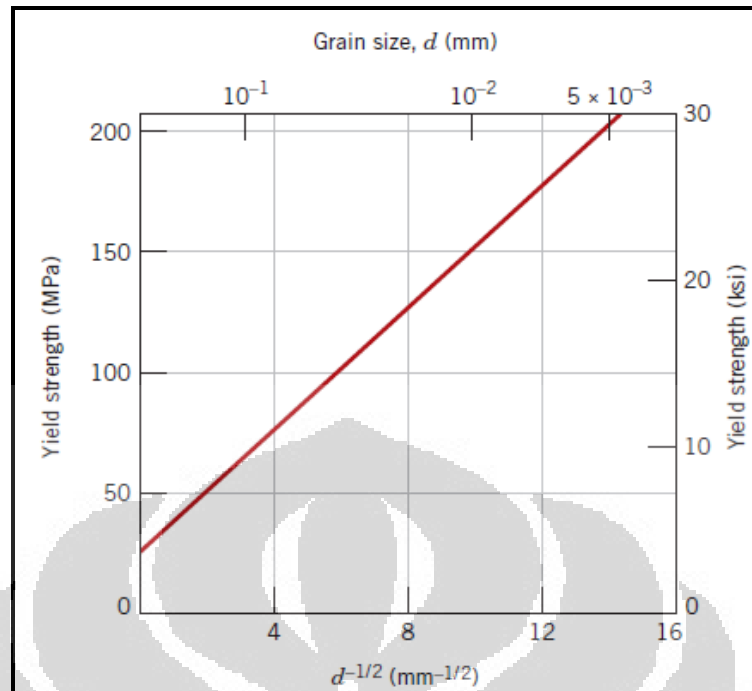
Berbagai jenis baja dan besi tuang dibuat dengan mengeksploitasi sifat-sifat ferit. Baja lembaran berkadar karbon sangat rendah dengan fasa tunggal ferit banyak diproduksi untuk proses pembentukan logam lembaran dengan karakteristik mampu bentuk yang lebih baik. Untuk paduan baja dengan fasa tunggal ferit seperti baja bebas interstisi (*IF Steels*), faktor lain yang berpengaruh signifikan terhadap sifat-sifat mekanik adalah ukuran butir.

2.2 Pengaruh Besar Butir Terhadap Sifat Mekanis Material

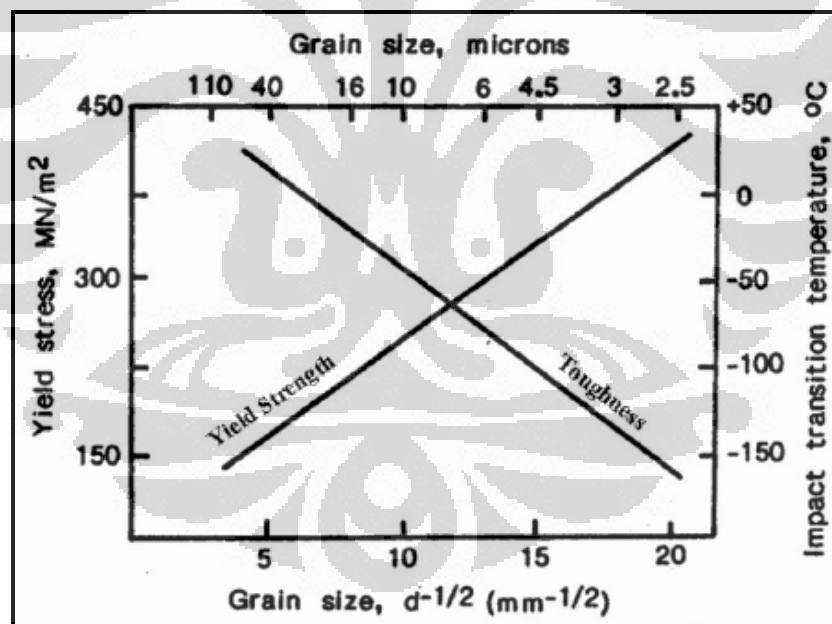
Selain kadar karbon, sifat-sifat mekanik baja karbon rendah dengan fasa tunggal ferit (*ferritic low carbon steel*) ditentukan pula oleh dimensi atau ukuran butir ferit^[4]. Secara umum diketahui bahwa baja dengan ukuran butir yang lebih kecil akan memiliki kekuatan yang lebih tinggi pada suhu kamar. Hubungan tersebut secara kuantitatif dikenal sebagai Persamaan Hall-Petch melalui persamaan berikut^[6]:

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

Pada persamaan Hall-Petch di atas, σ_y adalah tegangan luluh baja, d adalah diameter butir rata rata, σ_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 polikristalin dengan ukuran butir yang sangat besar dan ukuran butir yang sangat kecil. Persamaan Hall-Petch ini sangat penting dalam menjelaskan hubungan antara struktur mikro dan sifat-sifat baja. Hubungan ini dimanfaatkan di dalam pemrosesan baja, yaitu dengan mengatur atau mengendalikan ukuran butir untuk meningkatkan kekuatan baja. Penguatan baja dengan cara ini dilakukan melalui proses *thermomekanika* (*thermomechanical process*), proses perlakuan panas (*heat treatment*), dan pemberian paduan mikro (*micro alloying*)^[4].



Gambar 2. 6 Pengaruh Ukuran Butir Terhadap Kekuatan Luluh Paduan Kuningan (70% Cu-30% Zn)^[6]



Gambar 2. 7 Pengaruh Ukuran Butir Terhadap Nilai Kekuatan Luluh dan Ketangguhan Baja Karbon^[10]

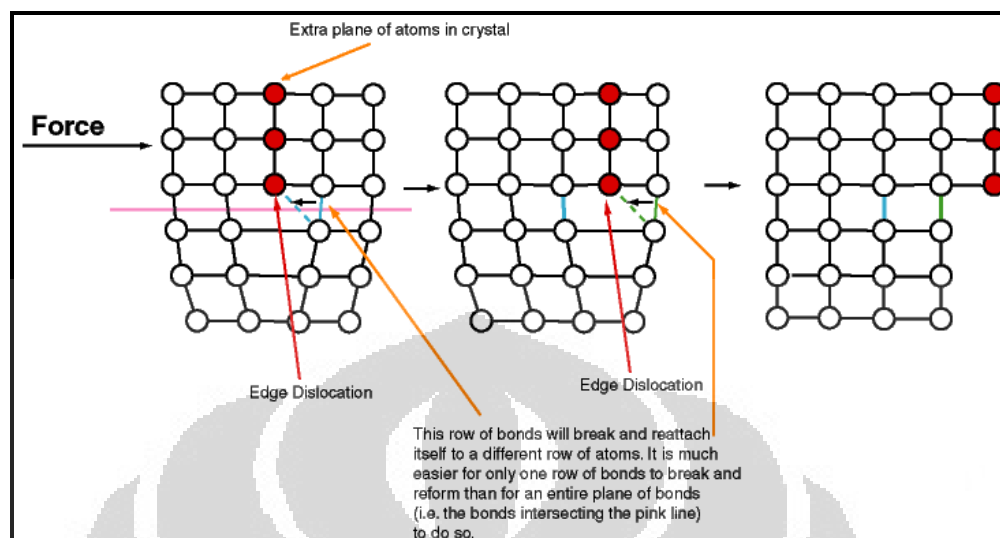
2.3 Deformasi Plastis

Deformasi adalah perubahan dimensi dan bentuk material akibat suatu beban yang diberikan pada material tersebut. Deformasi disebabkan oleh aksi mekanik dari beban eksternal atau berbagai macam proses secara fisik. Deformasi dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu deformasi plastis dan deformasi elastis. Deformasi elastis adalah deformasi atau perubahan bentuk material yang apabila gaya penyebab deformasi itu dihilangkan maka material akan kembali ke bentuk semula. Contoh pada uji tarik suatu material, akibat gaya yang diberikan kepada spesimen maka material akan terdeformasi sehingga menyebabkan perubahan bentuk. Perubahan bentuk yang terjadi pada material akibat uji tarik adalah perubahan panjang. Apabila gaya tarik dihilangkan maka material tersebut akan kembali ke bentuk semula dengan dimensi awal, dengan demikian tidak ada penambahan panjang. Sebaliknya dengan deformasi plastis, ketika gaya dihilangkan pada suatu material, maka perubahan bentuk material tidak dapat kembali ke bentuk semula sehingga ada penambahan panjang^[11].

Berkaitan dengan struktur mikro, pada saat material mengalami deformasi elastis tidak akan ada perubahan pada struktur mikro. Begitu juga ketika deformasi elastis itu hilang. Secara sederhana deformasi elastis itu dapat digambarkan dengan dua buah atom Fe yang diikat dengan sebuah pegas. Ketika terjadi deformasi elastis maka pegas akan berusaha melawan Fe yang mengalami uji tarik^[11].

Deformasi plastis berhubungan dengan pergerakan sejumlah dislokasi^[6]. Proses terjadinya deformasi plastis melalui pergerakan dislokasi merupakan mekanisme *slip*. Slip merupakan mekanisme deformasi yang paling sering dijumpai. Slip menggambarkan pergerakan yang besar pada bagian kristal yang satu menuju bagian kristal lain di sepanjang bidang dan arah dalam kristalografi. Bidang tempat terjadinya slip disebut bidang slip (*slip plane*) dan arah pergeserannya disebut arah slip (*slip direction*). Slip terjadi pada bidang slip dan arah slip yang terpadat pada atom-atomnya, karena untuk menggeser atom pada

posisi ini memerlukan energi yang paling kecil. Pergerakan dislokasi ditunjukkan pada gambar 2.8 di bawah ini.

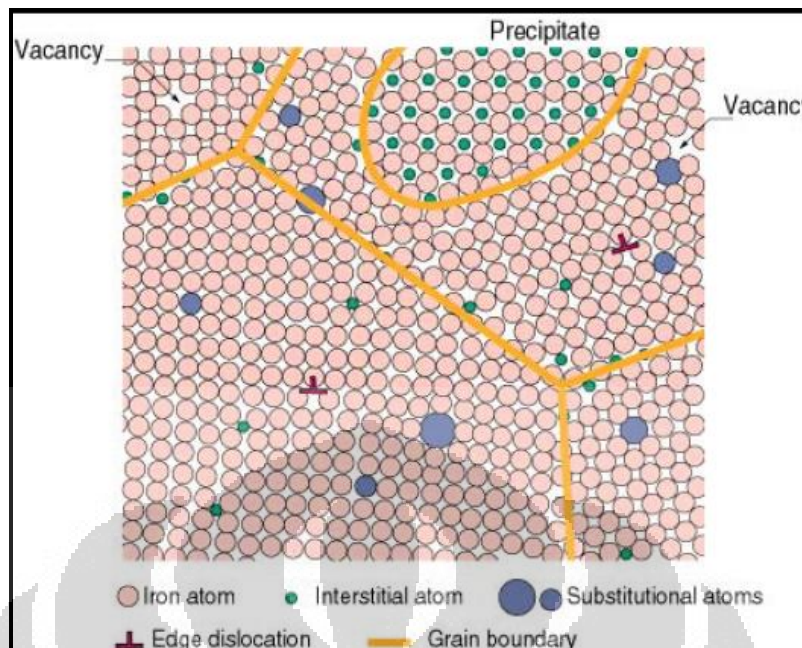


Gambar 2. 8 Analogi Pergerakan Dislokasi^[3]

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.

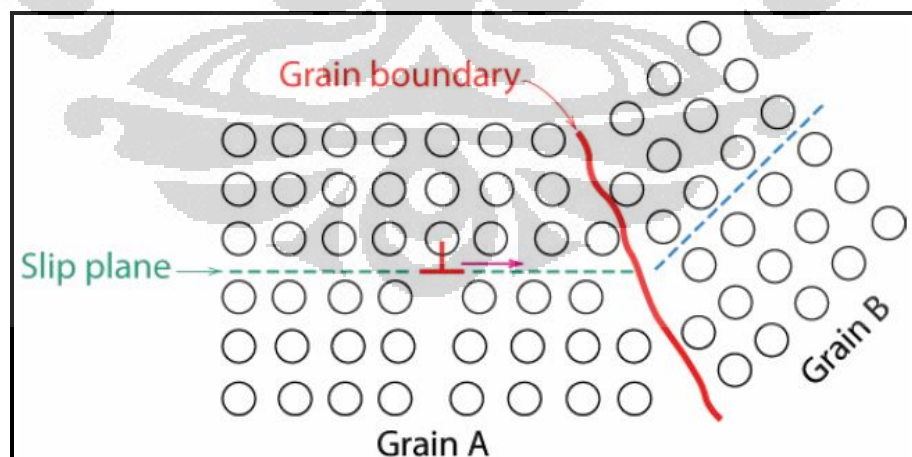
2.4 Mekanisme Penguatan Pada Material Logam

Mekanisme penguatan pada material logam merupakan hubungan antara pergerakan dislokasi dan sifat mekanik dari logam. Kemampuan suatu material logam untuk diubah secara plastis tergantung pada kemampuan dislokasi untuk dapat bergerak. Dengan mengurangi pergerakan dislokasi, kekuatan mekanik dapat ditingkatkan, di mana disebabkan energy mekanik yang dibutuhkan untuk membuat deformasi plastis akan semakin besar. Sebaliknya apabila pergerakan dislokasi tidak ada yang menahan, logam akan lebih mudah untuk terdeformasi. Secara umum mekanisme penguatan yang digunakan pada material logam adalah melalui pengerasan regang, penguatan larutan padat, penguatan presipitasi, dan penguatan batas butir^[12]. Gambar 2.9 di bawah ini memperlihatkan mekanisme penguatan yang terjadi pada logam.



Gambar 2. 9 Mekanisme Penguatan pada Logam dalam Skala Mikroskopik^[6]

Penghalusan butir adalah salah satu cara yang efektif bagi penguatan logam yang dihasilkan dengan menghalangi pergerakan dislokasi di sekitar batas butir. Dengan mengecilnya ukuran dari butir akan meningkatkan batas butir per unit volume dan mengurangi garis edar bebas dari slip yang berkelanjutan. Pergerakan selanjutnya membutuhkan tegangan yang tinggi untuk membuka atau menghasilkan suatu dislokasi baru pada butir berikutnya. Gambar 2.10 menunjukkan pengaruh dari batas butir terhadap pergerakan dislokasi.



Gambar 2. 10 Ilustrasi Batas Butir dan Pergerakan Dislokasi^[6]

Pada gambar 2.10 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^[13].

Batas butir bertindak sebagai penghalang pergerakan dislokasi karena dua alasan yaitu sebagai berikut^[6]:

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.

Struktur butir dengan kehalusan tinggi pada material baja dapat diperoleh dengan kombinasi dari proses pengerjaan panas dan pendinginan yang terkendali serta pengaruh penambahan paduan. Dalam hal ini ukuran butir dikendalikan melalui pengaturan temperature dan besar deformasi dalam suatu konsep perlakuan termomekanik atau TMCP^[12].

2.4.1 Penghalusan Butir Ferit

Pada proses pemanasan ulang, fasa ferit terbentuk pada selama proses pendinginan lanjut (*continous cooling*) dengan menggunakan pendinginan udara. Selain itu pembentukan fasa ferit tergantung pada kandungan karbon, kandungan paduan, laju pendinginan. Pada proses pengerjaan panas, baja dalam keadaan fasa austenit akan bertransformasi menjadi struktur ferit dan perlit. Pengaturan terhadap mikrostruktur dan sifat selama pengerjaan panas disebut sebagai canai terkendali. Pada proses ini butir austenit diubah menjadi butir ferit yang halus melalui pendinginan terkendali. Deformasi pada proses ini terjadi di atas temperatur rekristalisasi. Selain itu untuk mendapatkan butir yang halus dapat dilakukan dengan proses anil yang didahului oleh pengerjaan dingin. Pada proses anil temperatur rendah (480°C) selama satu jam, terjadi pengurangan densitas dislokasi dalam butir sehingga menghasilkan butir yang lebih halus yang tidak mengalami rekristalisasi, pada temperatur sedang (540°C) terbentuk

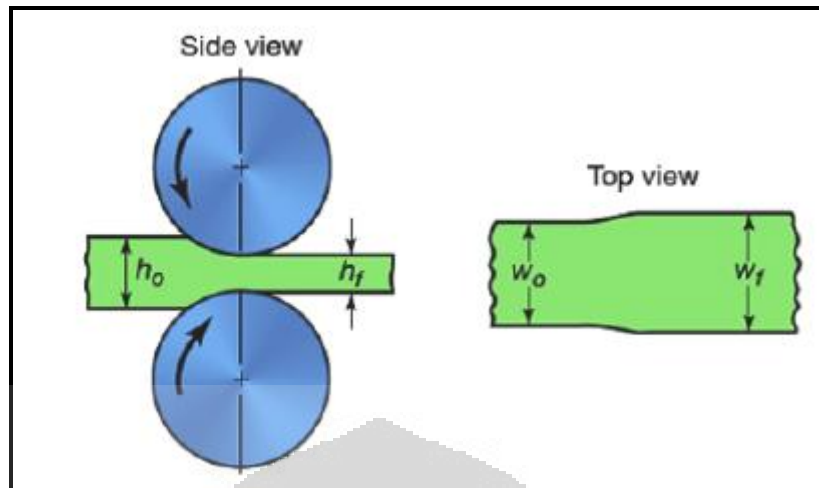
butir yang lebih besar, sedangkan pada anil temperatur tinggi (600°C) dihasilkan butir dengan ukuran yang lebih besar^[14].

2.4.2 Pengaruh Waktu Tahan Terhadap Besar Butir Ferit

Selain temperatur, waktu tahan juga mempengaruhi besar butir ferit yang terbentuk. Pertumbuhan butir terjadi karena adanya pengurangan energi bebas pada batas butir, seperti yang telah diketahui bahwa pada batas butir terdapat atom-atom dengan energi bebas yang lebih tinggi daripada atom-atom pada butir. Untuk mencapai kestabilan, maka atom-atom pada batas butir akan mengurangi energi bebasnya dengan cara mereduksi permukaan batas butir. Akibatnya terjadi migrasi batas butir, dimana migrasi batas butir ini adalah difusi atom-atom pada batas butir menuju ke butir yang semakin lama akan bergabung (*coalescence*) membentuk butir yang lebih besar. Oleh sebab itu waktu tahan akan memberikan kesempatan atom-atom tersebut untuk bergabung.

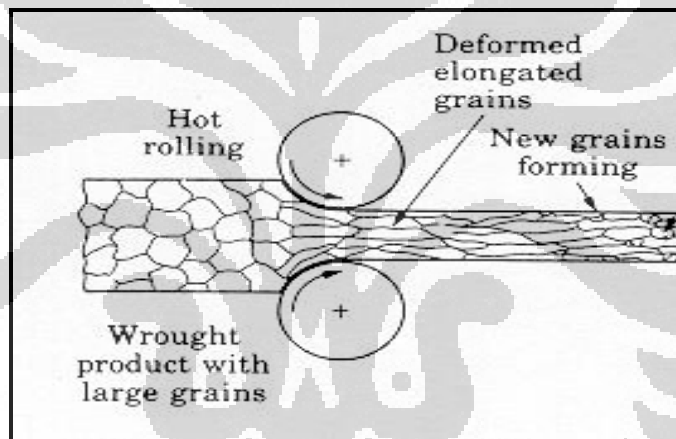
2.5 Proses Canai

Rolling atau pencanaian merupakan suatu proses deformasi dimana ketebalan dari benda kerja direduksi dengan menggunakan gaya tekan dan menggunakan dua buah rol atau lebih. Pada proses pencanaian, benda kerja dikenai tegangan kompresi yang tinggi yang berasal dari gerakan jepit rol dan tegangan geser-gesek permukaan sebagai akibat gesekan antara rol dan logam. Selama proses canai, rol memberikan tegangan tekan pada bagian-bagian dari benda kerja. Tegangan-tegangan ini mengakibatkan benda kerja mengalami deformasi plastis. Deformasi plastis tersebut menyebabkan sampel mengalami reduksi ketebalan^[15].



Gambar 2. 11 Skematik Proses Canai^[16]

Selain itu, pada proses rolling tidak hanya terjadi perubahan deformasi tetapi juga perubahan butir dari butir *equiaxed* menjadi butir yang terelongasi.



Gambar 2. 12 Transformasi Morfologi Butir Setelah Proses Canai^[15]

Pada saat sampel dimasukkan ke dalam mesin *roll*, akan terjadi pengurangan ketebalan pada sampel. Besar pengurangan ketebalan ini dapat diketahui dengan melihat persen reduksi dari tiap *passing* dengan menggunakan rumus berikut^[15]:

$$\epsilon = \ln \frac{h_0}{h_f} \dots\dots\dots(2.2)$$

$$\% \text{ Deformasi} = \frac{h_0 - h_f}{h_0} \times 100\% \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana:

% Deformation = Besar presentase perubahan ketebalan

h₀ = Ketebalan awal (mm)

h_f = Ketebalan akhir (mm)

Ada dua jenis proses canai yang berdasarkan temperatur yang digunakan, yaitu:

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.

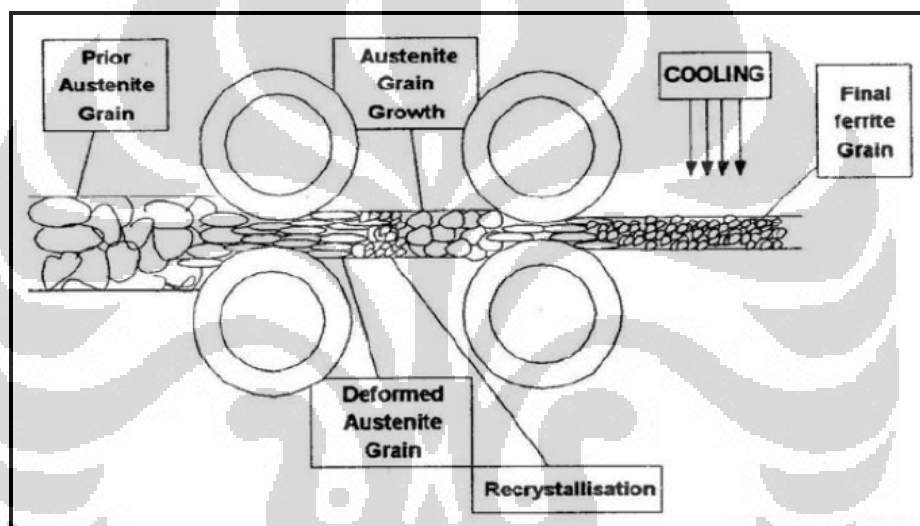
2.6 *Thermo-Mechanical Controlled Process (TMCP)*

Dahulu proses canai hangat hanya digunakan untuk mendapatkan dimensi dari *slabs* atau benda uji seperti ketebalan, lebar dan panjang. Seiring berkembangnya perkembangan teknologi, maka tuntutan peningkatan kualitas yang tinggi dari baja terus dilakukan. Sehingga proses perlakuan panas seperti *normalizing* atau *quench* dan *tempering* terus dilakukan proses lanjutan yang dikenal dengan *Thermomechanical processing (TMCP)*.

Thermomechanical processing merupakan suatu proses untuk mengontrol struktur mikro 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*)^[13]. Secara umum, proses TMCP terdiri dari proses pemanasan awal (*reheating*), canai panas (*hot rolling*), dan pendinginan (*cooling*). Proses pemanasan ini sangat penting dalam menghasilkan sifat mekanis benda jadi sebab dengan pemanasan awal dapat diprediksi struktur mikro akhir yang terbentuk. Untuk menghasilkan butir ferit dengan ukuran yang halus di akhir proses, maka butir austenit juga harus dibuat menjadi halus. Pengontrolan butir austenit ini terjadi pada saat proses pemanasan awal. Hal lain yang juga bisa mempengaruhi pertumbuhan besar butir austenit yaitu temperatur *reheating* dan waktu tahan. Seiring dengan kenaikan temperatur pemanasan maka ukuran butir menjadi semakin besar. Begitu juga halnya dengan waktu tahan, makin lama waktu tahan, maka besar butir austenit menjadi semakin besar. Hal ini terjadi

Universitas Indonesia

karena adanya difusi butir ke butir lainnya yang dipengaruhi oleh besaran temperatur pemanasan dan waktu tahan. Pada proses TMCP, pemanasan *slabs* yang diikuti oleh proses deformasi plastis pada temperatur yang lebih rendah yang mendekati temperature rekristalisasi akan menghasilkan ukuran butir yang halus (*fine grain sizes*). Selanjutnya pada proses pendinginan terjadi transformasi austenit ke ferit yang menghasilkan butir ferit halus (*fine ferrite grains*). Pada sebagian baja, tahap akhir selama pendinginan, transformasi telah terjadi sepenuhnya dipercepat dengan pendinginan air untuk menghasilkan ukuran butir yang lebih halus. Pendinginan yang dipercepat (*accelerated cooling*) terkadang dapat menghasilkan formasi bainit sama seperti, atau sebagai ganti, formasi ferit.



Gambar 2. 13 Perubahan Mikrostruktur yang Terjadi Selama Proses TMCP^[17]

2.6.1 Proses Canai Hangat (*Warm Rolling*)

Warm Rolling atau pengerolan hangat adalah sebuah metode perlakuan pada material logam dimana pada prosesnya akhirnya dihasilkan material dengan butir yang lebih halus. Kisaran temperatur pengerjaan hangat berada pada 500°C-800°C^[12] dimana pada kisaran temperatur tersebut berada antara pengerjaan hangat (*hot working*) dan pengerjaan dingin (*cold working*) sehingga proses ini dapat menghemat energi dan juga setelah terjadi deformasi pada pengerjaan hangat ini material akan mengalami pengerasan regangan (*strain hardened*) dan sebagian mengalami rekristalisasi^[19]. 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. Deformasi plastis yang terjadi memberikan kontribusi pada pembentukan *grain sub-division* dan *local dynamic recovery* dan pengerjaan hangat akan terjadi proses rekristalisasi berkontribusi pada proses penghalusan butir^[20].

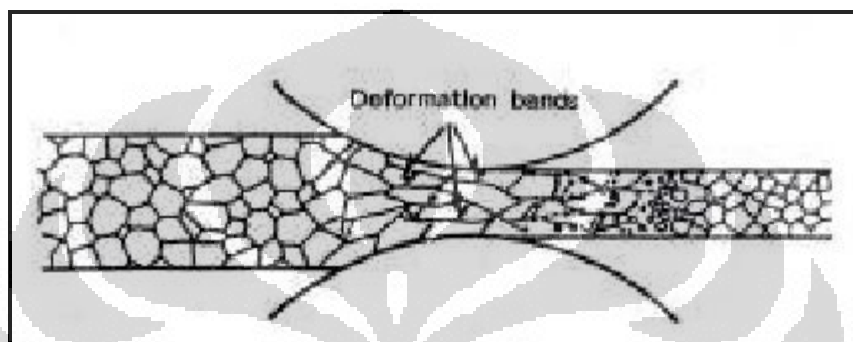
Menurut G. H. Akbari et al^[18], mikrostruktur yang terbentuk pada baja bebas interstisi (IF Steels) setelah mengalami proses canai hangat (500-800⁰C) adalah *microbands* atau *subgrain*. Selain itu, butir ferit akan menjadi *elongated* pada arah rol dan terdeformasi lebih homogen seiring dengan peningkatan *strain*. Melalui pengamatan TEM, pada *strain* yang tinggi, *microbands* tampak berada dalam dua arah berbeda tanpa memotong batas butir, sedangkan pada *strain* yang rendah, *microbands* berada pada satu arah dan tidak berpotongan dengan batas butir. Lebar *microbands* ini meningkat seiring dengan peningkatan temperatur deformasi dan penurunan *strain*^[18].

Jika dibandingkan dengan pengerjaan panas yang membutuhkan energi panas yang besar dan mahal, proses pengerjaan hangat ini dapat menghasilkan material yang mendekati dimensi akhir yang diinginkan^[18]. Selain itu, metode ini dapat menghasilkan sifat mekanis yang lebih baik dan mikrostruktur yang lebih halus. Sedangkan jika dibandingkan dengan proses pengerjaan dingin yang membutuhkan *deformation forces* dan *die-pressure* yang lebih besar dari pengerjaan hangat yang membutuhkan kedua jenis gaya tersebut lebih rendah, juga dapat diaplikasikan pada baja dengan kisaran yang lebih luas dan menghasilkan mikrostruktur dengan tegangan sisa yang lebih rendah dan proses ini menghasilkan deformasi yang lebih seragam terhadap daerah transversal^[17].

2.6.2 Deformation Band

Ketika material dideformasi dibawah temperatur 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^[21]. Densitas dislokasi yang sangat tinggi mengakibatkan dislokasi menjadi sulit bergerak sehingga material sulit dideformasi dan kekerasannya meningkat^[22]. Densitas dari *deformation band* akan meningkat jika temperatur deformasi diturunkan^[23].



Gambar 2. 14 Mekanisme Terbentuknya *Deformation Band*^[21]

2.6.3 Strain Rate

Perhitungan *strain rate* pada proses pencanaian dapat dihitung melalui rumus sebagai berikut^[24]:

$$\dot{\epsilon} = \frac{V}{\sqrt{r}} \times \sqrt{\frac{R}{H_0}} \times \ln \left[\frac{1}{(1-r)} \right] \dots \dots \dots (2.4)$$

Dimana,

$\dot{\epsilon}$ = laju regangan (/s)

V = kecepatan roll (133.33 mm/s)

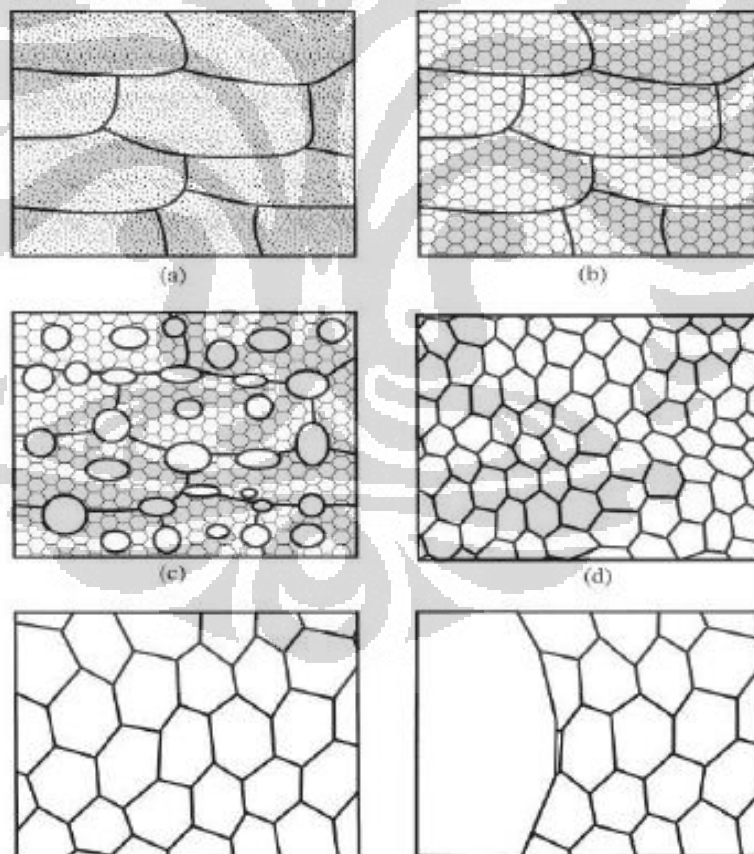
R = jari-jari roll (52 mm)

r = reduksi (dalam desimal)

H₀ = tebal awal (mm)

2.7 Recovery, 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^[6]. 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 *recovery* dan rekristalisasi, yang juga dimungkinkan untuk pertumbuhan butir.



Gambar 2. 15 Skematik Proses Anil a) Butir yang Terdeformasi, b) *Recovery*, c) Rekristalisasi Sebagian, d) Rekristalisasi Penuh, e) Pertumbuhan Butir, f) *Abnormal Grain Growth*^[25]

2.7.1 *Recovery*

Proses *recovery* merupakan proses yang pertama terjadi ketika material yang terdeformasi dipanaskan ke temperatur tinggi. *Recovery* 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^[25]. Selama proses *recovery*, sifat fisik dan mekanik dari baja pengerjaan dingin akan kembali seperti sebelum dilakukan pengerjaan dingin^[26]. Perubahan mikrostruktur selama *recovery* relatif homogen dan biasanya tidak mempengaruhi batas butir material yang terdeformasi. Perubahan mikrostruktur dari material selama tahapan *recovery* ini tidak melibatkan pergerakan batas butir dengan sudut yang besar.

2.7.2 Rekrystalisasi

Pada saat *recovery* 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 rekrystalisasi. Rekrystalisasi merupakan proses transformasi nukleasi dan pertumbuhan butir. Rekrystalisasi 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 rekrystalisasi mengarah kepada pembentukan formasi butir yang bebas energi internal dalam material yang telah mengalami proses pengerjaan dingin^[26].

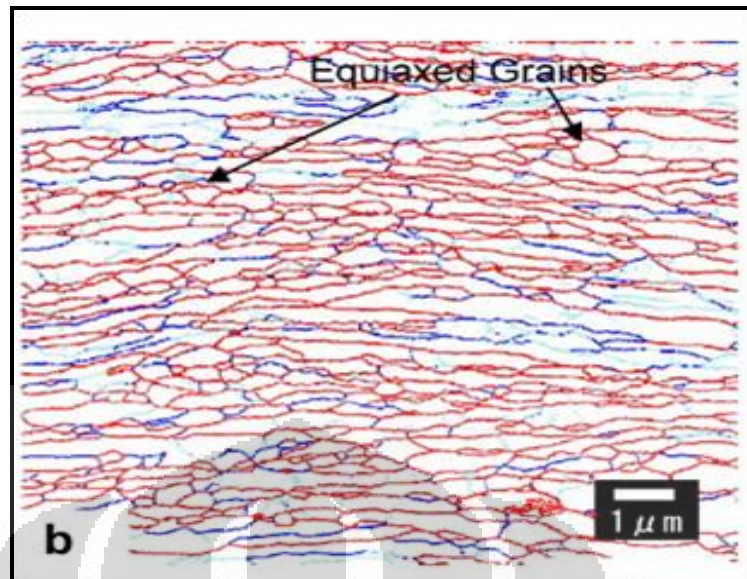
Ketika semua butir terdahulu telah digantikan oleh butir baru yang bebas regangan, maka dapat dikatakan material tersebut telah terekristalisasi dengan sempurna (*fully recrystallized*). Seperti telah dijelaskan bahwa gaya penggerak untuk proses rekristalisasi adalah energi yang tersimpan saat pengerjaan 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 yaitu sebagai berikut:

1. Besaran deformasi / *amount of prior deformation*
2. Temperatur
3. Waktu
4. Besar butir awalan (*initial grain size*)
5. Komposisi logam atau paduan

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^[27]. Rekristalisasi secara kinetiknya dapat dibagi menjadi dua yaitu rekristalisasi dinamis dan statis.

2.7.1 Rekristalisasi Dinamis

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



Gambar 2. 16 Struktur Mikro *Dynamic Recrystallization on Ultrafine Ferrite Grains of Interstitial Free Steel* pada 450°C ^[28]

Pada rekristalisasi dinamis, saat material mengalami deformasi, terjadi regangan di dalam material, dan apabila regangan tersebut adalah regangan kritis (ϵ_0) maka akan tersedia cukup energi untuk terbentuk nuklei pada batas butir yang terdeformasi. Seperti yang terlihat pada Gambar 2.16, di mana terbentuk butir-butir *equiaxed* di antara butir-butir *elongated* akibat proses deformasi pada baja bebas interstisi yang memiliki butir-butir ferit yang sangat halus.

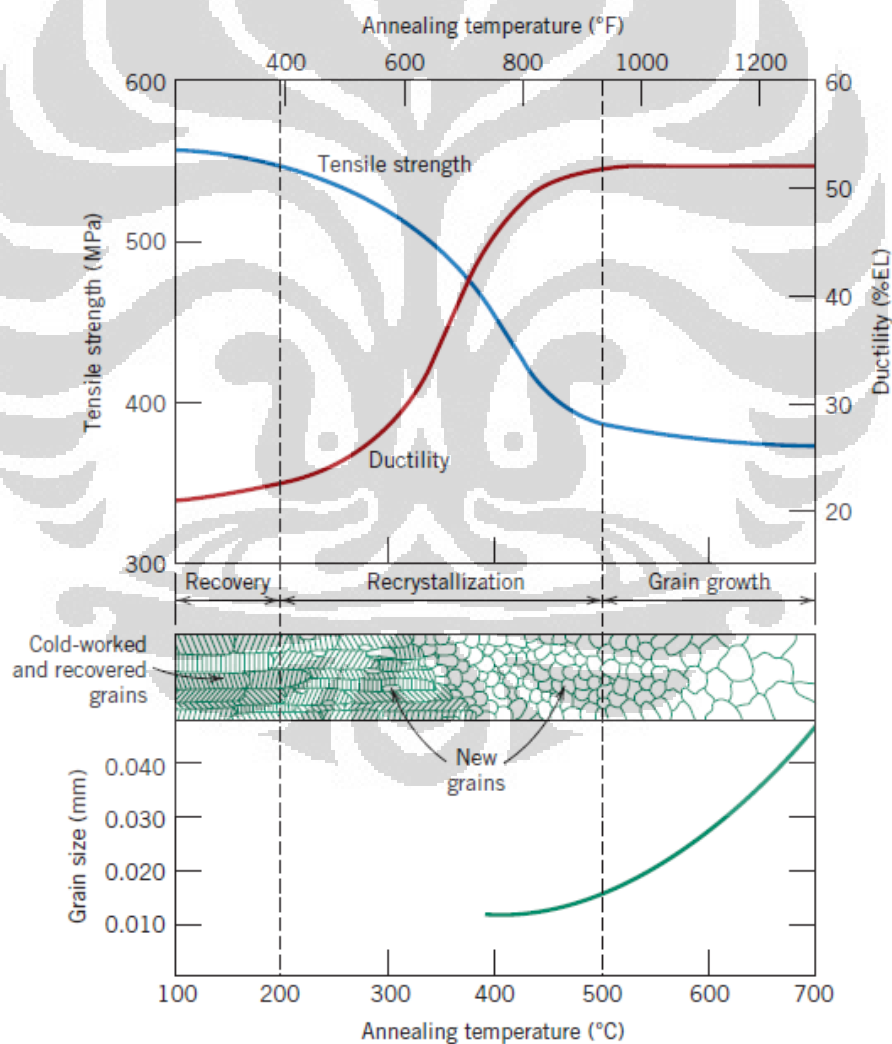
2.7.2 Rekristalisasi Statis

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^[6].

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 *recovery* dan proses rekristalisasi. Hal ini terjadi disebabkan karena 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*^[6]. Penambahan proses anil (*extended annealing*) pada temperatur 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*^[29].



Gambar 2. 17 Skematis Proses *Recovery*, Rekristalisasi, dan Pertumbuhan Butir^[6]

2.8 *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 *recovery* ini dipergunakan untuk proses *stress-relieving*.

Hilangnya beberapa dislokasi mengakibatkan berkurangnya kekuatan dari material, tetapi hilangnya dislokasi ini diimbangi dengan pembentukan sub butir, yaitu butir dengan batas butir bersudut kecil ($2-3^\circ$ misorientasi). Selama proses *recovery*, 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 *recovery* yang disertai dengan pembentukan *subgrain* ini juga dikenal dengan poligonisasi^[24]. 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.

2.9 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*^[31].

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^[31].

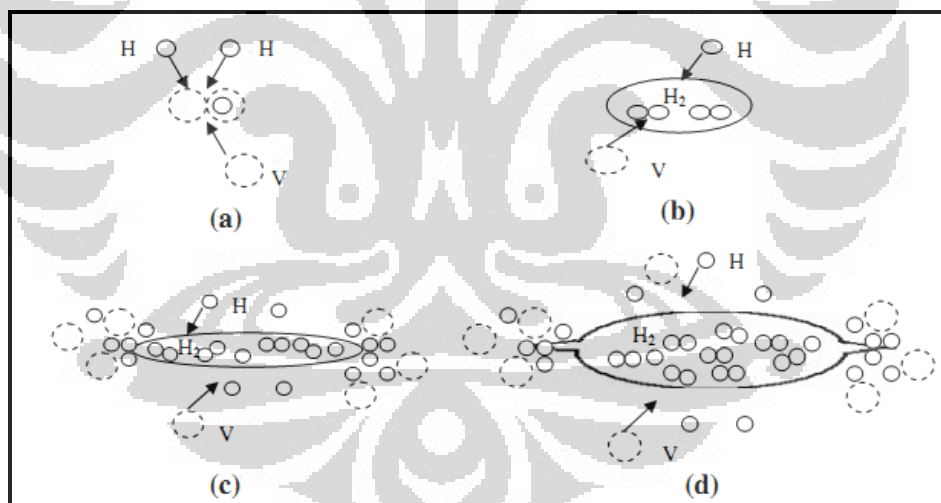
2.10 *Hydrogen Embrittlement*

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^[34]. 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 atom hidrogen yang berdifusi.

Hydrogen Induced Cracking (HIC) merupakan suatu bentuk kerusakan internal yang disebabkan oleh menjalarnya retak paralel dengan permukaan baja walaupun tanpa diberi tegangan eksternal. Atom hidrogen yang dihasilkan oleh reaksi korosi Fe dengan H_2S masuk ke dalam baja dan terakumulasi pada tempat awal HIC; *void-void, non metallic inclusion* (paling sering inklusi MnS), *slag particle*, dislokasi dan retak mikro^[32]. Gas hidrogen ini selain ada di lingkungan aplikasi sering kali bisa dihasilkan dari hasil reaksi reduksi pada aplikasi proteksi katodik yang selama ini dipakai sebagai perlindungan material dari serangan lingkungan yang korosif.

Atom hidrogen membentuk gas hidrogen yang menimbulkan tegangan cukup tinggi untuk memulai terjadinya penjalaran retak. Salah satu penyebab terjadinya HIC pada lingkungan *sour gas* adalah karena terbentuknya *microvoid* pada batas antarmuka inklusi-matriks^[33].



Gambar 2. 18 Mekanisme Difusi Hidrogen pada Suatu Logam^[33]

Menurut F. Huang X. G. Li et al^[32], kerentanan terhadap *Hydrogen Induced Cracking* pada suatu logam dapat diukur dengan menggunakan *Hydrogen Permeation Test*. Pengujian tersebut menggunakan larutan berdasarkan standar NACE TM0284-2003 (0,5% CH_3COOH + 5% NaCl, lalu dijenuhkan dengan H_2S) sebagai larutan uji. Sel yang digunakan ada dua yaitu *Hydrogen Oxidation Cell* dan *Hydrogen Charging Cell*. Sampel diletakkan di antara kedua sel sehingga

akan menghasilkan suatu reaksi elektrokimia (korosi) pada permukaan sampel, sehingga lama kelamaan sampel akan mengalami *crack*. Kemudian dilakukan perhitungan *crack* dengan tiga parameter, yaitu sebagai berikut^[32]:

$$\text{Crack Length Ratio (CLR)} = \frac{\sum a}{W} \times 100\% \dots\dots\dots(2.5)$$

$$\text{Crack Thickness Ratio (CTR)} = \frac{\sum b}{T} \times 100\% \dots\dots\dots(2.6)$$

$$\text{Crack Sensitivity Ratio (CSR)} = \frac{\sum(axb)}{W \times T} \times 100\% \dots\dots\dots(2.7)$$

Dengan a = *crack length*, b = *crack thickness*, W = lebar, dan T = tebal spesimen.

2.11 *Hydrogen Embrittlement Pada Baja Bebas Interstisi*

Baja bebas interstisi merupakan baja karbon dengan kandungan karbon yang sangat rendah. Umumnya baja karbon rendah memiliki ketahanan korosi yang rendah, termasuk ketahanan korosi terhadap adanya serangan hidrogen.

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Samerjit^[35], 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^[35] 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. Selain itu, hidrogen memiliki pengaruh yang signifikan terhadap *ductility* baja. *Ductility* dari baja akan menurun karena adanya hidrogen^[28]. 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^[35]. Kerusakan dan levelnya tergantung pada beberapa faktor yang meliputi^[36]:

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*^[33].

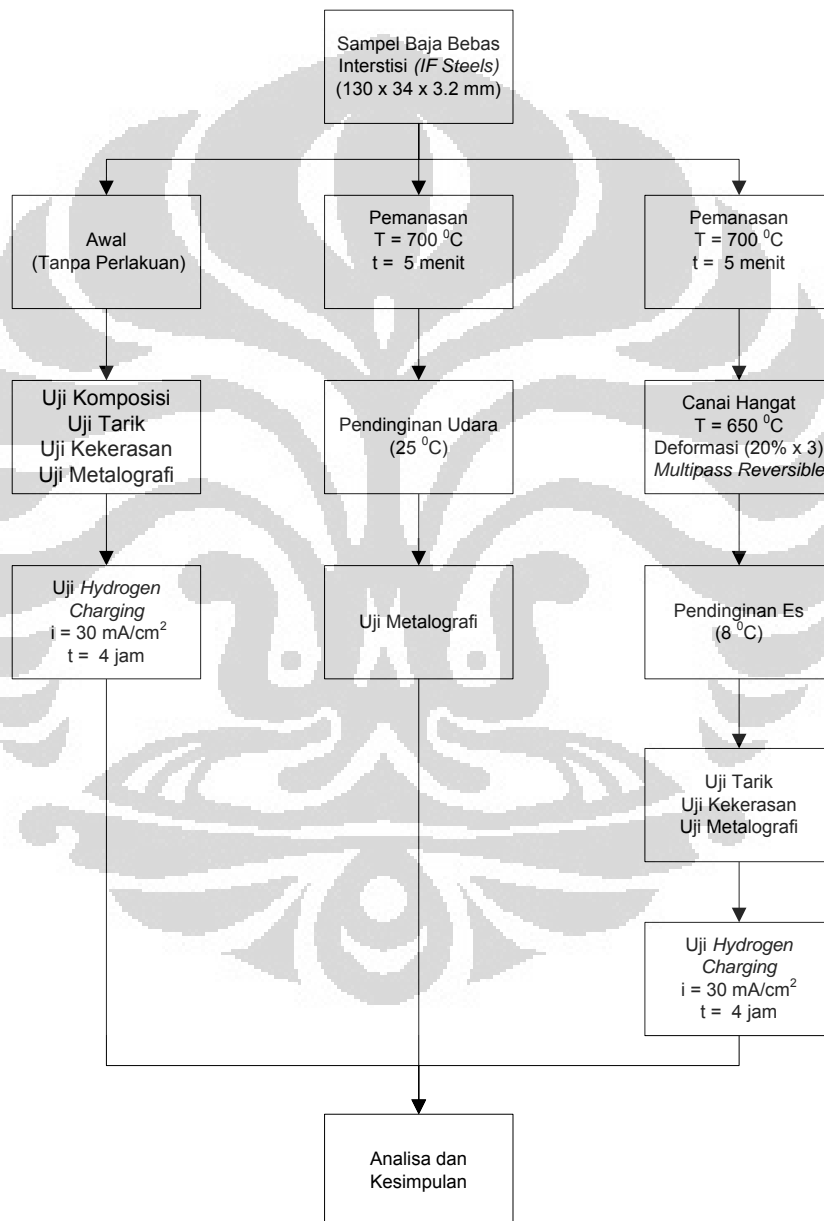
Akibat dari masuknya hidrogen pada permukaan logam, maka akan terjadi berbagai kerusakan yang meliputi pengurangan ketangguhan, keuletan, kekuatan tarik dan terutama sifat mekanik logam. Kerusakan ini biasanya disebabkan oleh beberapa faktor yang meliputi^[37]:

1. Bentuk dari hidrogen yang dapat menimbulkan kerusakan pada logam seperti atom hidrogen (H^+), gas hidrogen (H_2), dan jenis gas lainnya.
2. Sumber hidrogen yang berasal dari proses elektrokimia (proteksi katodik ataupun elektroplating), gas hidrogen pada atmosfer, H_2S dan jenis-jenis zat kimia lainnya.
3. Ada atau tidaknya tegangan pada material.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir dalam penelitian ini dapat ditunjukkan melalui gambar berikut ini.



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat

1. Mesin Roll dengan kapasitas 20 ton
2. Alat Uji Vickers (*Frank Finotest*)
3. *Universal Testing Machine*, Servopulser Shimadzu dengan kapasitas 30 ton
4. Dapur Pemanas / *Oven Carbolite*
5. *Furnace Portable*
6. Pengatur temperatur dapur (*controller*)
7. Termokopel
8. *Termowire*
9. Mesin Komputer Pengukur Temperatur
10. Jangka Sorong
11. Mesin Amplas
12. Mesin Poles
13. Mikroskop Optik
14. *Beaker glass*
15. Pipet
16. Grafit
17. Kabel Listrik
18. *Rectifier*
19. Amperemeter
20. *Scanning Electron Microscope*

3.2.2 Bahan

1. Lembaran Baja Bebas Interstisi (*IF Steels*)
2. Resin dan *hardener*
3. Kertas amplas Grid #80, #120, #240, #400, #600, #800, #1000, dan #1200
4. Titanium Dioksida (TiO_2)
5. Kain Beludru

6. Zat Etsa Kimia: Larutan Alkohol 96% dan larutan HNO_3 65%
7. Larutan H_2SO_4 0.5 M
8. Thiourea $\text{CS}[\text{NH}_2]_2$

3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Material

Material yang digunakan pada penelitian ini adalah lembaran baja bebas interstisi (*IF Steels*) yang merupakan produk hasil HRC (*Hot Roll Coil*) grade OA0125AT dengan nomor *coil* 365328 sesuai standar spesifikasi material di PT Krakatau Steel. Pada tahap awal, uji komposisi material dilakukan di Laboratorium Metalurgi PT Krakatau Steel dengan menggunakan *Optical Emission Spectroscopy* (OES) seperti yang terlihat pada gambar 3.2.

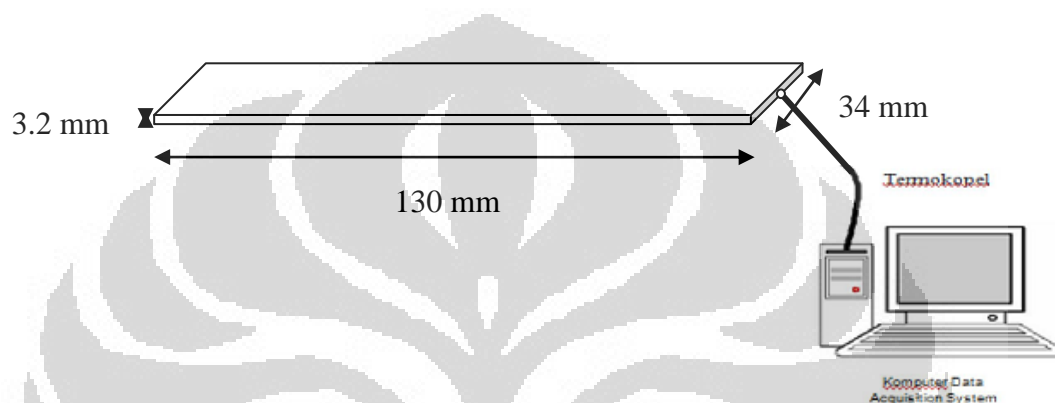
OES merupakan suatu metode karakterisasi material dengan cara mengeksitasi atom dengan menggunakan perbedaan potensial antara sampel dan elektroda. Akibat dari energi tersebut, elektron pada sampel akan memancarkan sinar yang akan ditangkap oleh detektor. Perbedaan intensitas yang terjadi kemudian dikarakterisasi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



Gambar 3. 2 Alat *Optical Emission Spectroscopy* (Laboratorium Metalurgi PT Krakatau Steel, Cilegon)

3.3.2 Persiapan Benda Uji

Benda uji yang digunakan pada penelitian ini berupa *sheet* dengan ukuran panjang 130 mm, lebar 34 mm, dan tebal 3.2 mm. 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 ± 5 mm dengan diameter 2 mm yang disesuaikan diameter kawat termokopel.



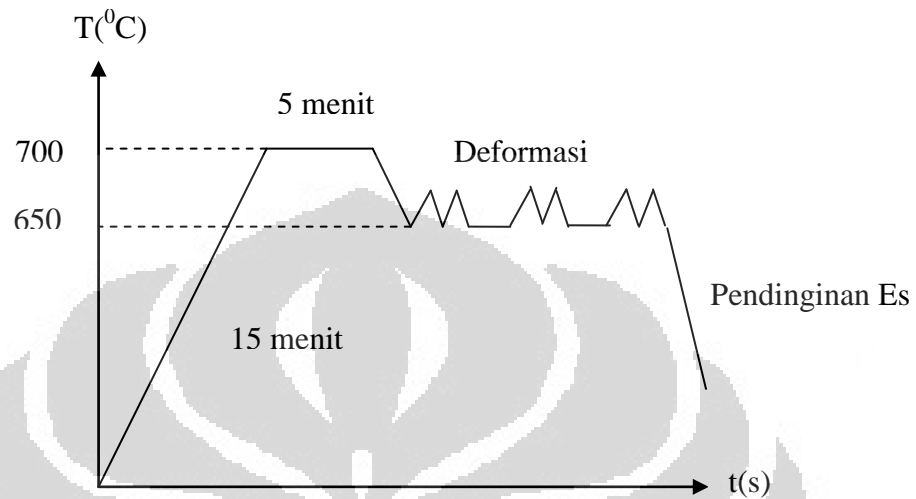
Gambar 3. 3 Ilustrasi Benda Uji dan Pemasangan Termokopel

3.3.3 Proses TMCP dan *Warm Rolling*

Seluruh spesimen yang telah diukur disiapkan untuk berbagai pengujian, kemudian masing-masing dipanaskan dalam dapur *carbolite* hingga suhu 700⁰C selama 15 menit, kemudian ditahan selama 5 menit. Kemudian dengan melakukan canai hangat *multipass reversible* dengan besar deformasi 60% (20%-20%-20%), dilanjutkan dengan pendinginan es. Proses canai dilakukan dengan menggunakan mesin *OnoRoll* berkapasitas 20 ton. Penelitian ini dilakukan dengan beberapa variasi proses. Tiap variasi memiliki parameter tersendiri pada hasil akhir. Variasi proses yang dilakukan yaitu :

1. Benda Uji A adalah benda uji awal yang tidak mengalami perlakuan panas, yang diidentifikasi mikrostruktur, uji tarik, dan uji kekerasannya sebagai pembanding untuk benda uji berikutnya.
2. Benda Uji B dipanaskan hingga suhu 700⁰C selama 15 menit, ditahan selama 5 menit, lalu didinginkan dengan udara.

3. Benda Uji C dipanaskan hingga suhu 700°C selama 15 menit, ditahan selama 5 menit, lalu canai hangat pada suhu 650°C dengan deformasi 20%-20%-20%, diikuti pendinginan es.



Gambar 3. 4 Skematik Pengujian Benda Uji C



Gambar 3. 5 Furnace Carbolite (Laboratorium Teknik Pengubahan Bentuk DTMM FTUI)



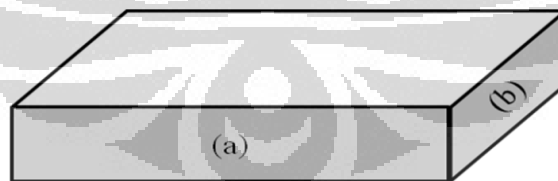
Gambar 3. 6 Mesin Onoroll (Laboratorium Teknik Perubahan Bentuk DTMM)

3.3.4 Pengamatan Metalografi

Pengujian metalografi bertujuan untuk mengamati mikrostruktur dari benda uji. Preparasi benda uji berdasarkan *ASTM E 3 – 01 “Standard Guide for Preparation for Metallographic Specimens”*^[39].

3.3.4.1 Preparasi Benda Uji Baja Bebas Interstisi (*IF Steels*)

Pada penelitian ini bagian benda uji yang akan diamati mikrostrukturnya dibagi menjadi dua yaitu sisi transversal dan longitudinal.



Gambar 3. 7 Bagian Benda Uji yang akan Diamati Mikrostrukturnya, (a) transversal dan (b) longitudinal

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 diamati mikrostrukturnya. Pengamplasan dilakukan dengan menggunakan kertas amplas yang dimulai dari amplas kasar hingga amplas halus agar didapat

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 (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 serbuk TiO_2 yang dilarutkan dengan aquades. Setelah dilakukan proses poles, benda uji dietsa dengan Nital 2% (97 ml alkohol 96% + 3 ml HNO_3 65%) untuk memunculkan jejak batas butir struktur akhir dari benda uji sehingga dapat diamati morfologi butir ferit.

3.3.4.2 Pengamatan Mikrostruktur

Setelah dilakukan proses pengetsaan, maka dilakukan pengamatan menggunakan mikroskop optik dengan perbesaran 200 x dan 500 x.



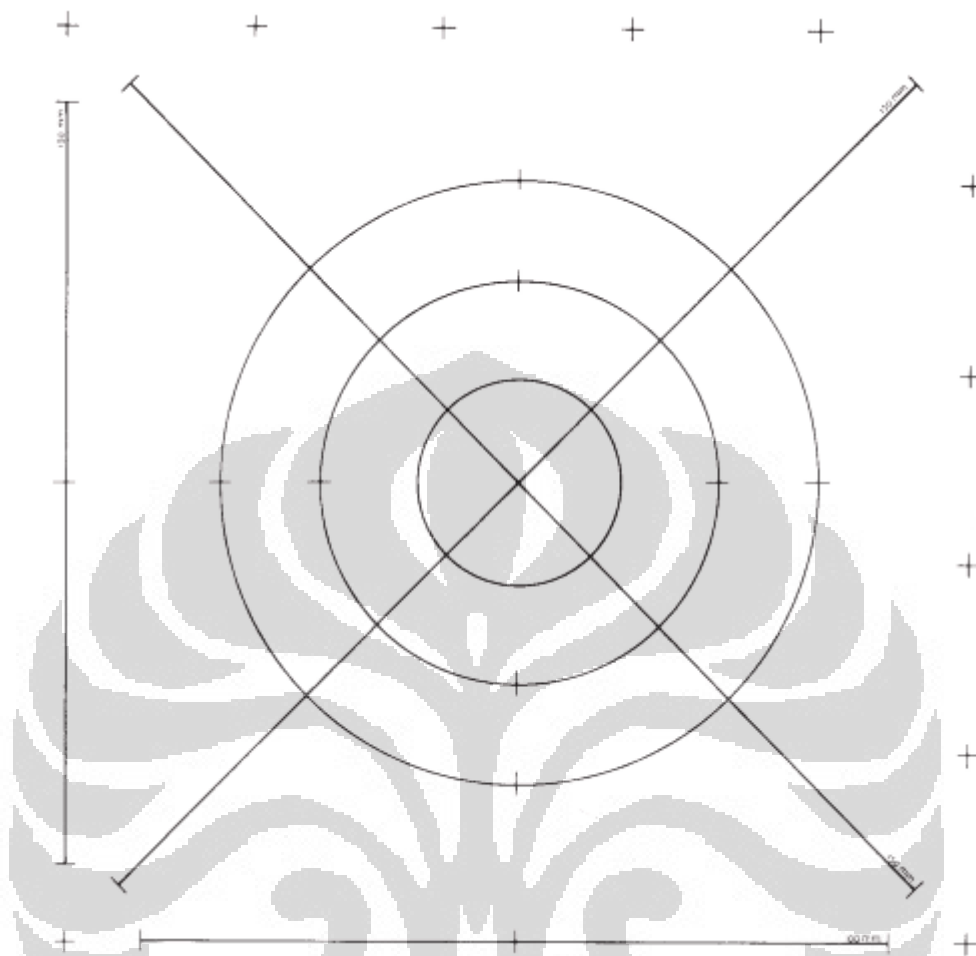
Gambar 3. 8 Mikroskop Optik (DTMM FT UI)

3.3.5 Perhitungan Besar Butir

Berdasarkan hasil pengamatan mikrostruktur, didapatkan perbedaan morfologi butir ferit pada sampel awal dengan sampel hasil pemanasan dan pencanaan. Morfologi butir ferit yang diamati pada sampel awal berbentuk *equiaxed*. Sedangkan morfologi butir ferit yang diamati pada sampel hasil pemanasan dan pencanaan berbentuk *elongated*. Oleh karena itu perhitungan besar butir pada kedua sampel dibedakan. Pengujian dan perhitungan besar butir dilakukan dengan menggunakan standar ASTM E112^[40]. Pada penelitian ini, perhitungann besar butir dilakukan pada hasil foto mikro dari benda uji dengan perbesaran 500 x.

3.3.5.1 Perhitungan Besar Butir Equiaxed

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 kembaran (*twins*).



Gambar 3. 9 Lingkaran yang Digunakan untuk Perhitungan Butir dengan Metode Intercept Heyn^[40]

Besar butir dihitung dengan menggunakan metode *intercept* sesuai dengan standar perhitungan metalografi kuantitatif ASTM E112. Jumlah titik potong per satuan panjang (P_L) dihitung dengan :

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

dan panjang garis perpotongan (L_3) adalah:

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

Dimana:

- P = Jumlah titik potong batas butir dengan total panjang garis yang dalam hal ini berbentuk lingkaran
- P_L = Jumlah titik potong persatuan panjang
- L_T = Panjang garis total (sesuai standar ASTM = 500 mm)
- L_3 = Panjang garis perpotongan (mm)
- M = Perbesaran

Dari P_L atau L_3 , dapat dilihat di tabel besar butir ASTM E 112, atau dimasukkan ke dalam persamaan :

$$G = [-6,6439 \log (L_3) - 3,2877] \dots \dots \dots (3.3)$$

Selanjutnya untuk menentukan diameter besar butir dilakukan dengan mencocokkan nomor G yang didapat dalam perhitungan dengan tabel besar butir standar pada ASTM E112.

3.3.5.2 Perhitungan Besar Butir Non-Equiaxed

Pengukuran besar butir dilakukan dengan metode *Straight Line Test*^[40]. Dengan membuat suatu garis lurus (L_t) pada gambar struktur mikro dan menggunakan besaran tertentu 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 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 melalui persamaan sebagai berikut:

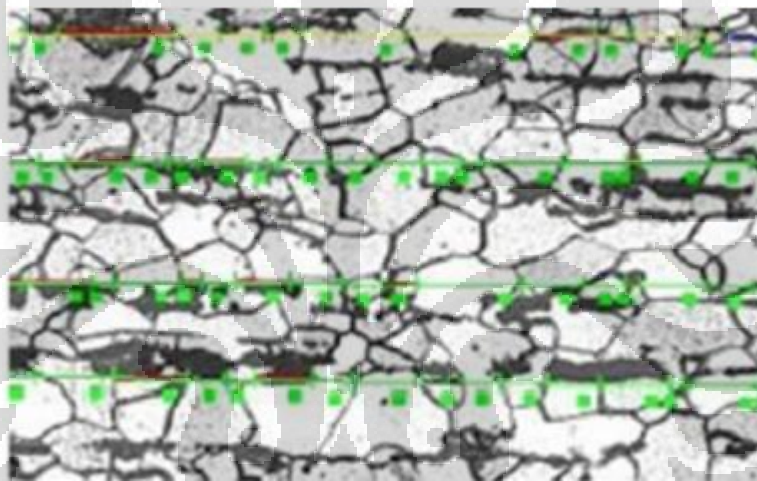
$$L = \frac{V_v \times L_t}{N \alpha \times M} \dots \dots \dots (3.4)$$

Universitas Indonesia

Dimana:

- L : Besar butir rata-rata (μm)
- Vv : Fraksi volume fasa tertentu
- Lt : Panjang garis total (μm)
- Na : Jumlah butir terpotong garis
- M : Perbesaran

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



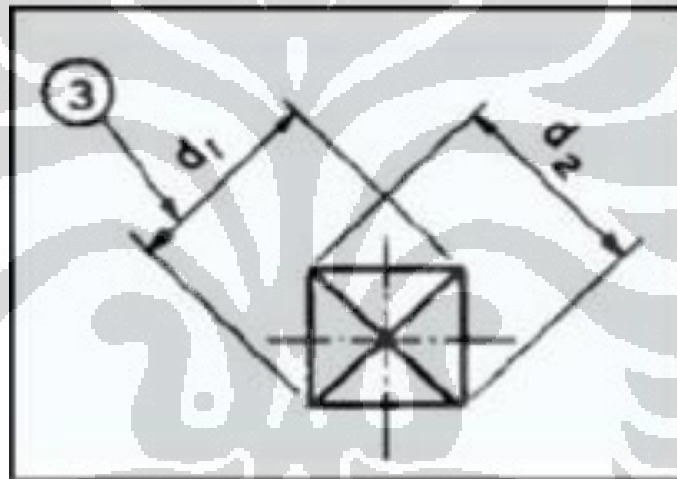
Gambar 3. 10 Metode *Straight Line Test*^[40]

3.3.6 Pengujian Kekerasan

Metode pengujian kekerasan yang dipakai yaitu metode kekerasan Vickers yang menggunakan standar ASTM E92^[41]. Prinsip pengujiannya yaitu dengan melakukan penjejakan atau indentasi pada sampel dengan indenter intan berbentuk piramida dengan kemiringan sekitar 136° . Jejak indentasi yang terdapat pada sampel akan berbentuk segi empat atau belah ketupat yang dapat dihitung panjang diagonal-diagonalnya (lihat gambar 3.12).



Gambar 3. 11 Alat Uji Vickers Frank Finotest (Laboratorium Metalurgi PT Krakatau Steel, Cilegon)



Gambar 3. 12 Metode Uji Vickers^[42]

Panjang diagonal jejak yang dihasilkan selama proses penjejakan dapat dihitung dengan menggunakan skala penghitung yang terdapat pada mikroskop mesin uji kekerasan Vickers. Setelah panjang diagonal-diagonalnya diketahui maka nilai kekerasan dari sampel dapat diketahui dengan menggunakan rumus kekerasan Vickers. Berikut merupakan persamaan untuk mencari kekerasan Vickers (ASTM E 92)^[41]:

$$VHN = \frac{1.854P}{d^2} \dots\dots\dots (3.5)$$

Dimana:

P = beban yang digunakan (kg)

d = rata-rata diagonal jejak (mm)

Pengujian kekerasan dilakukan pada benda uji awal, benda uji setelah dilakukan pemanasan dan pencanaian, dan benda uji setelah dilakukan pengujian *hydrogen charging* untuk membandingkan nilai kekerasannya.

3.3.7 Pengujian Tarik

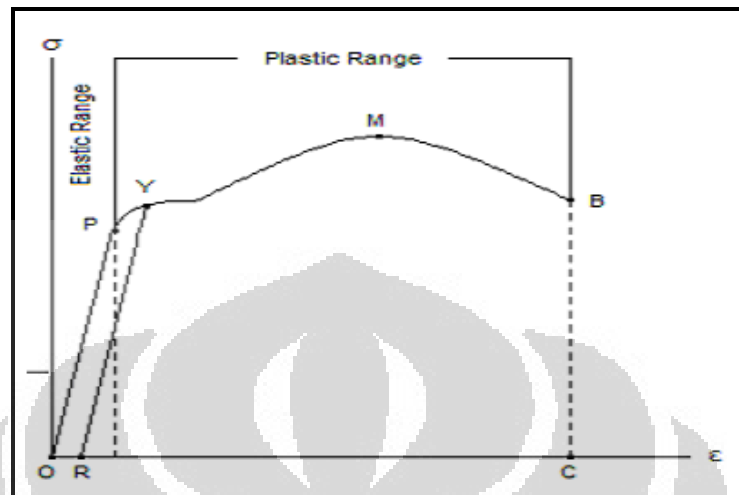
Pengujian tarik pada dasarnya bertujuan untuk mengetahui dan menentukan respon mekanis material dari suatu konstruksi, komponen atau rakitan fabrikasi saat dikenakan beban atau deformasi tertentu dari yang terus meningkat secara kontinyu. Pengujian ini menggunakan standar ASTM E8 untuk mengetahui degradasi sifat mekanik material yang meliputi kekuatan tarik dan ketangguhannya akibat proses *hydrogen charging* ke dalam material^[43].



Gambar 3. 13 Mesin Uji Tarik Servopulser Shimadzu (Laboratorium Metalurgi Fisik DTMM FTUI)

Sebelum dilakukan pengujian, benda uji yang berbentuk plat terlebih dahulu dilakukan preparasi pengujian tarik dengan menggunakan standar JIS Z 2201^[44]. Prinsip pengujian tarik adalah benda uji yang sudah memenuhi standar ditarik dengan beban kontinyu sambil diukur pertambahan panjangnya. *Output*

data yang dihasilkan adalah berupa perubahan panjang dan perubahan beban yang selanjutnya diolah ke dalam bentuk grafik tegangan-regangan (gambar 3.14).

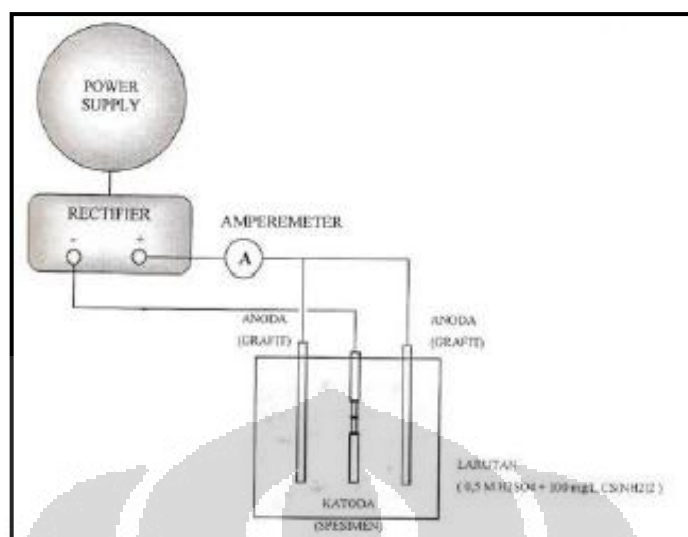


Gambar 3. 14 Kurva Tegangan-Regangan Benda Uji Yang Terbuat Dari Baja Ulet^[42]

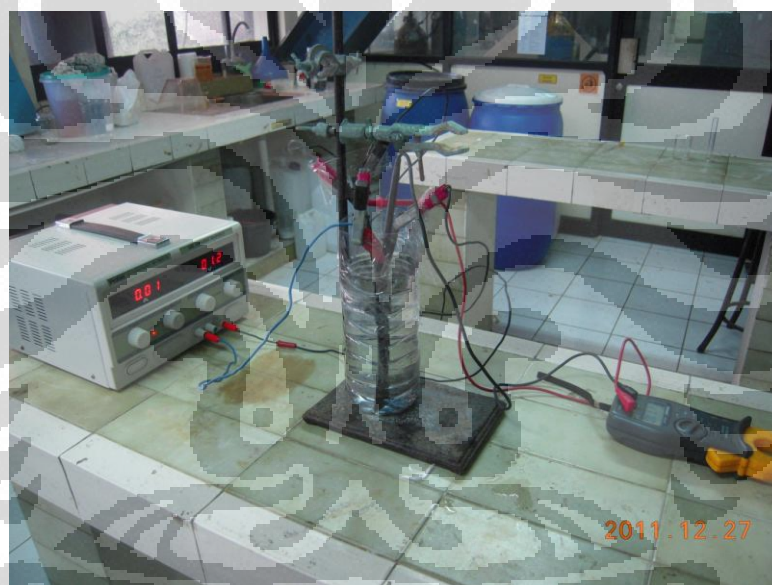
Pengujian tarik dilakukan pada benda uji awal, benda uji setelah dilakukan pemanasan dan pencanaian, dan benda uji setelah dilakukan pengujian *hydrogen charging* untuk membandingkan nilai kekuatan tariknya.

3.3.8 Pengujian *Hydrogen Charging*

Hydrogen Charging merupakan proses elektrokimia yang memasukkan atom hidrogen ke permukaan logam dengan cara difusi. Proses ini menggunakan larutan H_2SO_4 0.5 M ditambah Thiourea $\text{CS}[\text{NH}_2]_2$ 100 mg/l dengan menggunakan rapat arus $30\text{mA}/\text{cm}^2$ selama 4 jam^[45]. Penentuan lama charging selama 4 jam berdasarkan pada penelitian sebelumnya^[34]. Sel elektrokimia ini terdiri dari grafit sebagai anoda dan spesimen uji sebagai katoda.



Gambar 3. 15 Rangkaian Proses *Hydrogen Charging Test*^[34]



Gambar 3. 16 Susunan Alat dan Bahan *Hydrogen Charging Test* yang Dilakukan di Laboratorium Korosi dan Metalurgi Ekstraksi DTMM FTUI)

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Preparasi Benda Uji

Benda uji yang digunakan adalah baja bebas interstisi (*IF Steel*) dengan kandungan karbon yang sangat rendah. Berikut merupakan tabel komposisi benda uji baja bebas interstisi (*IF Steels*) yang digunakan pada penelitian ini.

Tabel 4. 1 Komposisi Benda Uji Baja Bebas Interstisi (*IF Steels*)

Komposisi	C	Mn	S	N	Ni	Nb	Mo
% Berat	0.007	0.234	0.06	0.046	0.012	0.001	0.003
	Si	P	Al	Cr	Cu	V	Ti
	0.005	0.048	0.033	0.016	0.029	0.005	0.09

Pada penelitian ini digunakan tiga benda uji yang mengalami perlakuan berbeda-beda diantaranya:

1. Benda uji A adalah benda uji awal yang tidak mengalami perlakuan panas.
2. Benda uji B dilakukan pemanasan hingga suhu 700⁰C selama 15 menit, ditahan selama 5 menit, lalu didinginkan dengan udara.
3. Benda uji C dilakukan pemanasan hingga suhu 700⁰C selama 15 menit, ditahan selama 5 menit, lalu dilakukan canai hangat pada suhu 650⁰C dengan deformasi 20%-20%-20%, diikuti pendinginan es.

Pada penelitian ini juga dilakukan pengamatan mengenai pengaruh kadar karbon terhadap penghalusan butir ferit. Sehingga digunakan pula sampel pembandingan dengan kadar karbon dan silikon yang berbeda dari sampel yang digunakan pada penelitian ini. Benda uji sebagai pembandingan yang digunakan pada penelitian adalah baja SS 400 yang merupakan benda uji penelitian sebelumnya^[38]. Berikut tabel perbandingan dari kedua benda uji dengan kadar karbon dan silikon yang berbeda.

Tabel 4. 2 Perbandingan Kadar Karbon dan Silikon pada Benda Uji Baja Bebas Interstisi dan Baja SS 400

Material	Komposisi (% Berat)		Fasa
	C	Si	
Baja Bebas Interstisi (Benda Uji Yang Digunakan Pada Penelitian)	0.007	0.005	<i>Fully Ferritic</i>
Baja SS 400 (Benda Uji Perbandingan)	0.165	0.295	Ferit + Perlit

4.2 Hasil Pengukuran Ketebalan Benda Uji

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

$$Deformasi = \ln \frac{h_o}{h_f} \dots \dots \dots (4.1)$$

Dimana,

Deformasi = Besar derajat deformasi (%)

h_o = Ketebalan awal (mm)

h_f = Ketebalan akhir (mm)

Setelah benda uji mengalami proses deformasi pada temperatur hangat, pengukuran terhadap ketebalan benda uji dilakukan. Pengukuran dimensi ketebalan benda uji menggunakan jangka sorong.



Gambar 4. 1 Foto Benda Uji Bebas Interstisi (*IF Steels*) (a) Yang Telah Dideformasi dan (b) Awal (Belum Dideformasi)

Berikut merupakan tabel hasil pengukuran dimensi benda uji sebelum dan sesudah proses pemanasan dan canai hangat.

Tabel 4. 3 Hasil Pengukuran Dimensi Benda Uji Sebelum dan Sesudah Proses Pemanasan Lalu Dilakukan Canai Hangat 650⁰C dengan Pendinginan Es

Benda Uji	Temperatur Deformasi (°C)	h_o (mm)	h_f teoritis (mm)	h_f aktual (mm)	% Deformation (Teoritis)	% Deformation (Aktual)
A	-	3.2	3.2	3.2	0	0
B	-	3.2	3.2	3.2	0	0
C	650	3.2	1.28	1.6	60	50

Dari data tabel 4.3 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^[46]. Ketika benda uji masuk ke dalam *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 akan meningkat sehingga mengakibatkan *roller* terdeformasi secara elastis.

Berikut merupakan tabel hasil pengukuran *strain rate* pada benda uji baja bebas interstisi yang mengalami deformasi.

Tabel 4. 4 Hasil Pengukuran *Strain Rate* Benda Uji Baja Bebas Interstisi dengan Proses Canai Hangat *Multipass Reversible* Deformasi 20% \times 3 pada Temperatur 650⁰C dengan Pendinginan Es

Benda Uji	Temperatur (°C)	ϵ teoritis	ϵ aktual	$\dot{\epsilon}$ teoritis	$\dot{\epsilon}$ aktual
C	650 ⁰ C	0.916	0.693	12.227	10.132

4.3 Hasil Pengamatan Metalografi

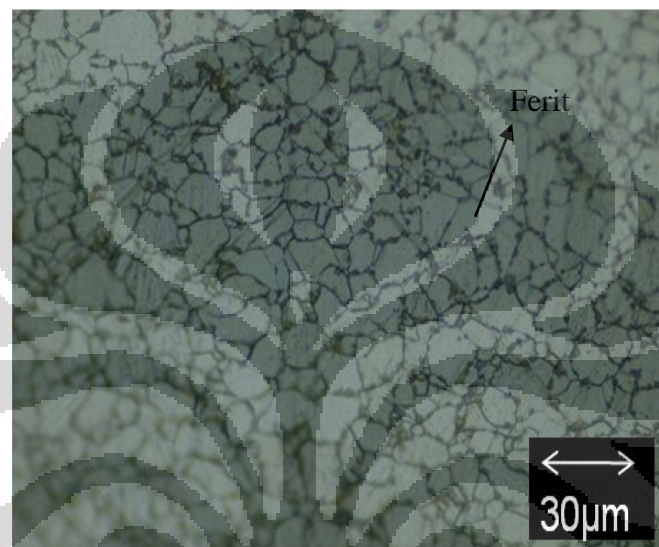
Pengujian metalografi dilakukan terhadap benda uji baik sebelum dan sesudah pemanasan dan pencanaian. Dalam penelitian ini akan diamati perubahan morfologi butir, struktur mikro, dan fasa ferit. Untuk mendapatkan struktur mikro baja yang diamati dengan mikroskop optik dengan perbesaran 200 x dan 500 x,

Universitas Indonesia

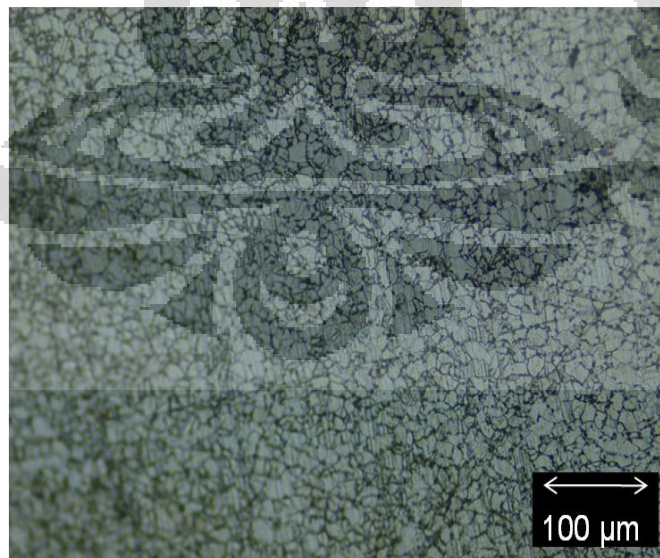
dilakukan proses etsa menggunakan nital 2% (di mana benda uji dicelupkan selama 10-12 detik, kemudian dibersihkan dengan air dan alkohol).

4.3.1 Struktur Mikro Awal Baja Bebas Interstisi (*IF Steels*)

Berikut gambar struktur mikro dari benda uji awal (tanpa perlakuan) baja bebas interstisi.



(a)

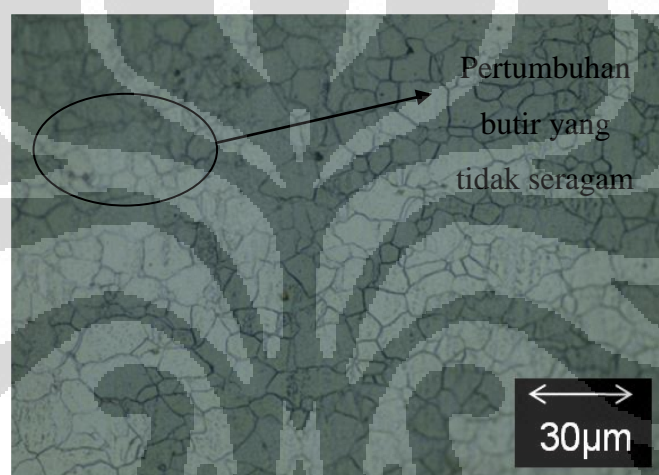


(b)

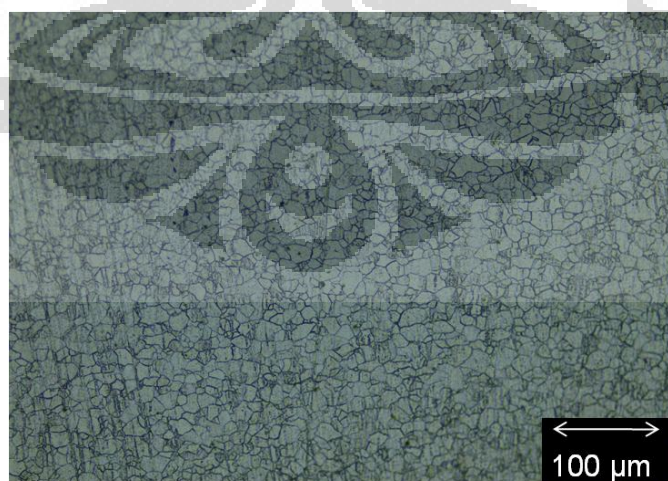
Gambar 4. 2 Foto Mikro Benda Uji Awal dengan Mikroskop Optik (a) Perbesaran 500x, (b) Perbesaran 200x, Etsa Nital 2% (Benda Uji A)

Berdasarkan literatur, baja bebas interstisi memiliki struktur *fully ferritic* di mana fasa yang ada dalam mikrostruktur hanya ferit^[2]. Teori tersebut sesuai dengan hasil foto mikro yang didapatkan pada penelitian ini. Gambar 4.2 (a) dan (b) merupakan foto mikro baja bebas interstisi tanpa perlakuan di mana terlihat struktur yang berwarna putih biasa disebut fasa ferit dengan bentuk butir yang *equiaxed*. Sedangkan warna hitam yang tampak di batas butir hanyalah kotoran hasil proses etsa yang kurang sempurna.

4.3.2 Struktur Mikro Baja Bebas Interstisi (*IF Steels*) Setelah Dilakukan Pemanasan Hingga Temperatur 700⁰C dan Ditahan 5 menit)



(a)



(b)

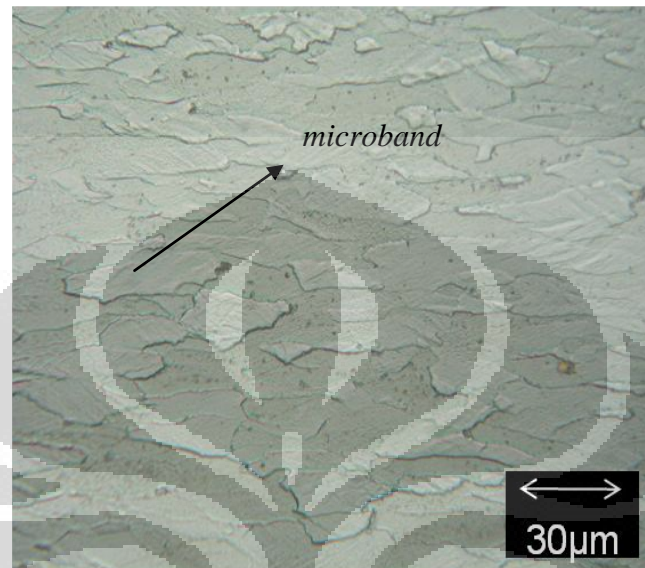
Gambar 4. 3 Foto Mikro Benda Uji yang Dilakukan Pemanasan 700⁰C Ditahan 5 menit dengan Mikroskop Optik (a) Perbesaran 500x, (b) Perbesaran 200x, Etsa Nital 2% (Benda Uji B)

Universitas Indonesia

Gambar 4.3 (a) dan (b) merupakan foto mikro baja bebas interstisi yang dilakukan pemanasan ulang pada temperatur 700°C selama 15 menit lalu ditahan selama 5 menit. Gambar tersebut memperlihatkan bentuk butir ferit (berwarna putih) yang masih *equiaxed* dengan bentuk butir yang tidak seragam. Benda uji ini dilakukan pengamatan struktur mikro hanya untuk memastikan bahwa pada pemanasan awal 700°C , baja bebas interstisi masih tetap memiliki fasa *fully ferritic*. Adanya bintik-bintik hitam yang sedikit di batas butir hanyalah kotoran debu yang diakibatkan proses pengetsaan yang belum sempurna.

Dapat dilihat perbedaan antara bentuk butir pada benda uji A dengan B di mana pada benda uji B, morfologi butir terlihat lebih besar dibandingkan benda uji A. Hal ini disebabkan adanya pengaruh temperatur dan waktu tahan terhadap morfologi butir yang dihasilkan. Temperatur pemanasan ulang yang dilakukan pada benda uji B adalah sebesar 700°C . Pada temperatur tersebut, baja bebas interstisi telah mengalami proses pertumbuhan butir. Pertumbuhan butir (*grain growth*) terjadi karena adanya migrasi batas butir akibat difusi atom – atom dari suatu butir ke butir lainnya sehingga terjadi pergeseran batas 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^[10]. Pada benda uji B, mekanisme yang terjadi adalah *discontinuous (abnormal) grain growth*.

4.3.3 Struktur Mikro Baja Bebas Interstisi (*IF Steels*) Dengan Pemanasan Hingga Temperatur 700⁰C Ditahan 5 Menit Yang Mengalami Canai Hangat *Multipass Reversible* Temperatur 650⁰C Dengan Besar Deformasi 20%-20%-20% Diikuti Pendinginan Es)



(a)



(b)

Gambar 4. 4 Foto Mikro Baja Benda Uji dengan Pemanasan 700⁰C Ditahan 5 Menit dan Dilakukan Canai Hangat *Multipass Reversible* Temperatur 650⁰C dengan Besar Deformasi 20%-20%-20% Diikuti Pendinginan Es Menggunakan Mikroskop Optik (a) Perbesaran 500x, (b) Perbesaran 200x, Etsa Nital 2% (Benda Uji C)

Gambar 4.4 merupakan foto mikro baja bebas interstisi yang dilakukan pemanasan ulang pada temperatur 700°C selama 15 menit lalu ditahan selama 5 menit, kemudian dideformasi sebesar 20%-20%-20% pada temperatur 650°C . Gambar tersebut memperlihatkan morfologi butir yang dihasilkan sangat jauh berbeda dengan gambar-gambar sebelumnya. Morfologi butir yang dihasilkan adalah butir yang terelongasi dan lebih pipih. Hal ini dikarenakan pengaruh dari deformasi yang diberikan kepada benda uji C. Selain itu, terlihat pula ketidakseragaman struktur butir yang dihasilkan, di mana ada beberapa butir yang terelongasi namun ada pula butir yang sudah mulai berbentuk equiaxed. Fenomena ini menunjukkan bahwa pada benda uji C telah mengalami proses rekristalisasi yang ditandai dengan munculnya butir-butir kecil yang *equiaxed* di antara butir-butir yang terelongasi. Namun proses rekristalisasi ini hanya terjadi di beberapa bagian butir sehingga belum sempurna.

Selain morfologi butir yang dihasilkan, dapat juga diamati pada benda uji baja bebas interstisi (benda uji C) yang mengalami deformasi sebesar 20%-20%-20% pada temperatur 650°C akan terbentuknya *microband*. *Microband* sangat jelas terlihat pada gambar 4.4 (a) di mana berpenampakan seperti kumpulan-kumpulan garis yang ada di dalam butir dari tahap awal deformasi. Pada setiap butir, *microband* menampakan arah yang berbeda-beda. Regangan dan temperatur tidak akan mempengaruhi arah *microband* di dalam butir. Namun, ada satu karakteristik dari *microband* yaitu memiliki sudut rata-rata sekitar $+35^{\circ}$ atau -35° terhadap arah *roll*^[18]. *Microband* itu sendiri merupakan cikal bakal terbentuknya *subgrain*.

Berdasarkan hasil foto mikro yang diamati pada ketiga benda uji yang tampak pada gambar 4.2, 4.3, 4.4, dapat dilihat bahwa dengan adanya proses TMCP dan canai hangat akan terjadi evolusi morfologi butir di mana terjadi perubahan dari butir awal yang *equiaxed* menjadi butir yang terelongasi. Akibat dari deformasi pada proses canai hangat ini, material akan mengalami pengerasan regangan yang dibuktikan dengan peningkatan nilai kekerasan dan sebagian mengalami rekristalisasi seperti yang didapatkan pada penelitian ini.

4.4 Hasil Pengukuran Besar Butir

Ukuran diameter butir ferit akan berubah setelah dilakukan pemanasan. Hal ini ditunjukkan oleh hasil perhitungan butir ferit dengan menggunakan metode *Intercept Heyn* sesuai dengan standar ASTM E112 untuk butir *equiaxed*, sedangkan untuk butir *elongated* menggunakan metode *Straight Line Test* (Subbab 3.3.6) dan contoh perhitungannya dapat dilihat pada lampiran. Perhitungan ukuran diameter butir ferit dilakukan pada benda uji awal, hasil proses pemanasan, dan hasil proses pemanasan dan pencanaan dengan foto mikro perbesaran 500 x. Perhitungan butir dilakukan sebanyak tiga kali sehingga didapatkan diameter butir rata-rata pada tiap benda uji.

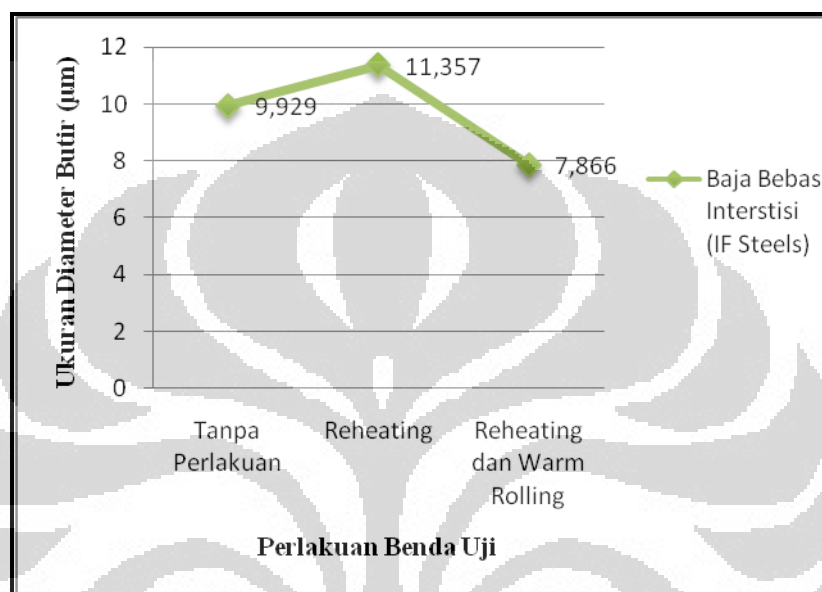
Pada penelitian ini juga dilakukan pengamatan mengenai pengaruh kadar karbon terhadap penghalusan butir ferit. Pengamatan dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran butir ferit pada pengujian benda uji baja bebas interstisi ini dengan hasil pengukuran butir ferit pada benda uji baja SS 400 yang merupakan hasil penelitian sebelumnya. SS 400 merupakan jenis baja karbon rendah dan ekuivalen dengan baja ASTM A36. Hasil pengukuran butir ferit yang dibandingkan adalah hasil perhitungan ukuran diameter butir ferit pada benda uji awal dengan benda uji hasil pemanasan dan pencanaan. Berikut tabel perbandingan hasil perhitungan diameter butir ferit dari baja bebas interstisi (*IF Steels*) dan baja SS 400.

Tabel 4. 5 Tabel Perbandingan Hasil Pengukuran Diameter Butir Ferit pada Baja Bebas Interstisi dengan Baja SS 400

Benda uji	Grain Size Number (ASTM E 112)	Diameter Butir (μm)	Diameter rata-rata (μm)	Keterangan
Baja Bebas Interstisi (0.007% C dan 0.005% Si)				
A	10.341	9.97	9.929	Awal (Tanpa Perlakuan)
	10.341	9.97		
	10.376	9.846		
B	9.975	11.305	11.357	Pemanasan awal 700 ⁰ C selama 15 menit dan ditahan 5 menit
	9.947	11.423		
	9.966	11.343		
C	11.024	7.843	7.866	Pemanasan awal 700 ⁰ C selama 15 menit, ditahan 5 menit, dan dideformasi (20%-20%-20%) <i>multipass reversible</i> pada 650 ⁰ C, diikuti pendinginan es
	11.022	7.847		
	10.998	7.908		
Baja SS 400 (0.165% C dan 0.295% Si)				
A ^M	8.34	-	19.33	Awal (Tanpa Perlakuan)
	8.48			
	8.33			
C ^M	10.903	-	8.013	Pemanasan awal hingga 400 ⁰ C selama 40 menit dan ditahan 20 menit, pemanasan lanjutan hingga 650 ⁰ C selama 25 menit dan ditahan 15 menit, lalu dideformasi (20%-20%-20%) <i>multipass reversible</i> pada 650 ⁰ C, diikuti pendinginan udara
	10.924			
	11.126			

4.4.1 Pengaruh Proses Pemanasan dan Canai Hangat Terhadap Ukuran Diameter Butir Ferit

Dari tabel 4.4 dapat digambarkan suatu hubungan antara proses pemanasan dan canai hangat terhadap ukuran diameter butir ferit yang digambarkan dalam sebuah grafik seperti yang tertera pada gambar 4.5.



Gambar 4. 5 Grafik Pengaruh Proses *Reheating* dan *Warm Rolling* Terhadap Ukuran Diameter Butir Ferit

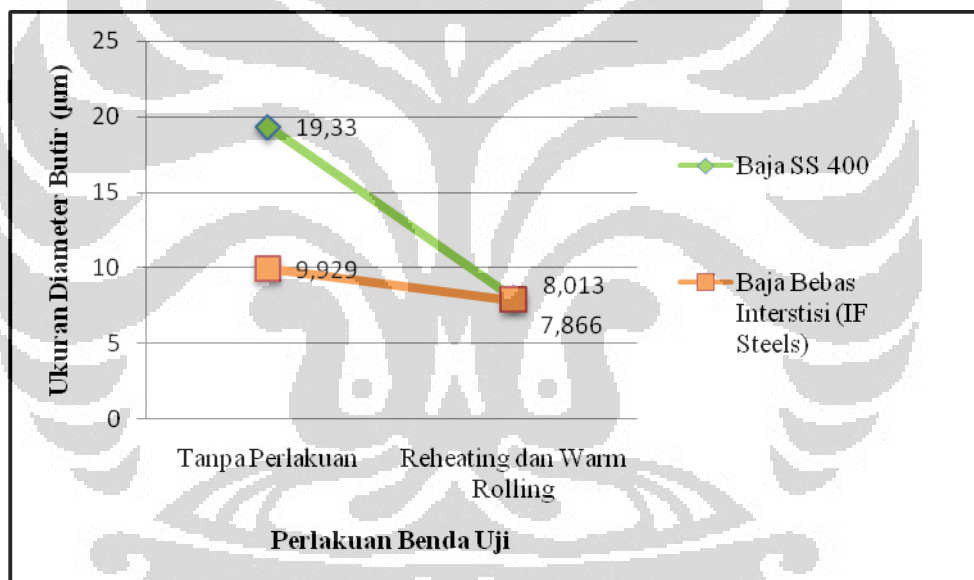
Berdasarkan gambar 4.5 dapat dilihat bahwa benda uji A tanpa perlakuan memiliki ukuran diameter butir sebesar 9.929 µm. Sedangkan pada benda uji B dengan pemanasan ulang pada 700°C mengalami pertumbuhan butir sehingga ukuran diameter butir menjadi 11.357 µm. Untuk benda uji C yang mengalami pemanasan ulang dan deformasi sebesar 20%-20% pada 650°C terjadi penghalusan butir di mana ukuran diameter butir ferit menjadi 7.866 µm.

Bila dibandingkan antara benda uji A dengan benda uji B, benda uji B memiliki diameter butir ferit yang lebih besar dari pada benda uji A. Hal ini dikarenakan pada benda uji B terjadi pertumbuhan butir akibat proses pemanasan. Pertumbuhan butir terjadi karena adanya migrasi batas butir akibat difusi atom-atom dari suatu butir ke butir lainnya sehingga terjadi perubahan batas butir. Peningkatan temperatur akan mempercepat proses difusi tersebut akibat bertambahnya energi yang diberikan butir sehingga butir yang dihasilkan relatif

besar. Untuk benda uji C di mana benda uji mengalami pemanasan ulang dan deformasi, ukuran diameter butir ferit mengecil. Hal ini disebabkan karena terjadinya proses rekristalisasi. Energi regangan yang berasal dari derajat deformasi yang diberikan berkolaborasi dengan panas yang diberikan melebihi energi aktivasi untuk terbentuknya butir baru sehingga terjadi proses rekristalisasi.

4.4.2 Pengaruh Kadar Karbon dan Silikon Terhadap Penghalusan Butir Ferit

Berikut merupakan grafik perbandingan ukuran butir ferit pada benda uji baja bebas interstisi dan baja SS 400 di mana masing-masing benda uji mengalami perlakuan yang sama namun komposisi kimia dari kedua benda uji berbeda.



Gambar 4. 6 Grafik Perbandingan Ukuran Diameter Butir Ferit yang Dihasilkan pada Baja Bebas Interstisi (*IF Steels*) dan Baja SS 400 Dengan Berbagai Perlakuan

Pada gambar 4.6 tampak adanya hubungan antara komposisi kimia dari masing-masing benda uji terhadap penghalusan butir ferit yang dihasilkan akibat proses pencanaan hangat *multipass reversible* pada temperatur 650°C dengan besar deformasi 20%-20%-20%. Pada benda uji bebas interstisi dengan kadar karbon 0.007% C dan kadar Si 0.005% Si, didapatkan persentase penghalusan butir yang dihasilkan adalah sebesar 20.78%. Pada benda uji SS 400 dengan kadar karbon 0.165% C dan kadar Si 0.295% Si, didapatkan persentase penghalusan

butir yang dihasilkan adalah sebesar 58.55%. Terlihat bahwa dengan kadar karbon dan silikon pada benda uji SS 400 yang lebih tinggi sekitar dua kali lipat dari benda uji baja bebas interstisi, didapatkan penghalusan butir ferit yang lebih signifikan dibanding baja bebas interstisi.

Karbon merupakan unsur terpenting yang dapat meningkatkan kekerasan dan kekuatan pada baja, namun apabila terlalu berlebihan dapat menurunkan ketangguhan baja. Sedangkan silikon merupakan unsur paduan yang ada pada setiap baja dengan kandungan lebih dari 0.4% yang mempunyai pengaruh untuk menaikkan kekuatan tarik dan kekerasan pada baja. Unsur silikon juga merupakan unsur pembentuk ferit dan cenderung membentuk partikel oksida sehingga memperbanyak pengintian kristal dan mengurangi pertumbuhan butir sehingga struktur butir semakin halus^[12]. Teori tersebut dibuktikan dengan jelas pada penelitian ini, di mana dengan kadar karbon dan silikon yang tinggi, maka mekanisme terjadinya penghalusan butir ferit akan semakin besar.

4.5 Hasil Pengujian Kekerasan

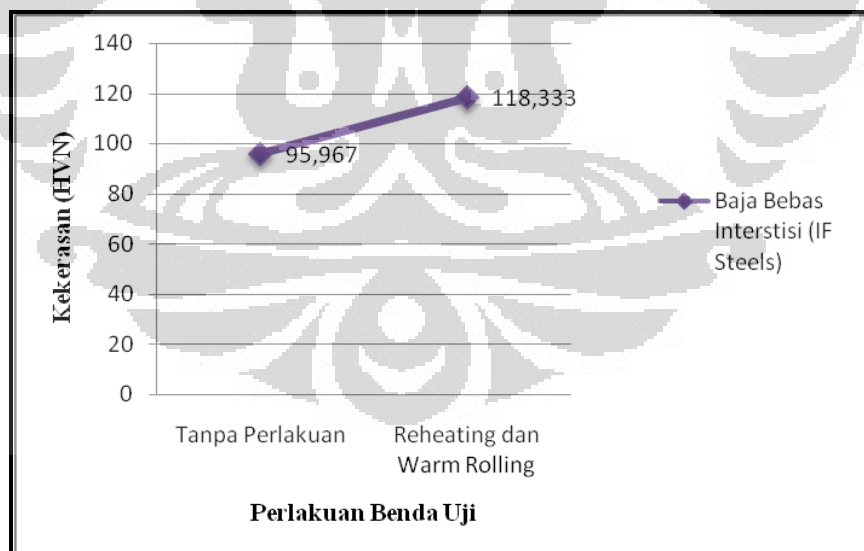
Pengujian kekerasan menggunakan metode Vickers. Metode ini menggunakan piramid intan dengan sudut 136° sebagai indentor. Standar metode pengujian Vickers diatur dalam ASTM E 92 (*Standard Test Methode for Vickers Hardness of Metallic Materials*). Pengujian kekerasan pada tiap benda uji dilakukan sebanyak tiga kali sehingga didapatkan nilai kekerasan rata-rata dari tiap benda uji. Hasil pengukuran dapat dilihat pada tabel 4.5.

Tabel 4. 6 Hasil Pengukuran Kekerasan Sebelum dan Setelah Proses Canai Hangat

Benda uji	HVN	HVN rata-rata	Diameter Butir (μm)	Keterangan
A	97.8	95.967	9.929	Awal (Tanpa Perlakuan)
	90.5			
	99.6			
C	118	118.333	7.866	Pemanasan Pada 700°C selama 15 menit, ditahan 5 menit, dan dideformasi (20%-20%-20%) pada 650°C , diikuti pendinginan es
	123			
	114			

4.5.1 Pengaruh Proses Pemanasan dan Canai Hangat Terhadap Nilai Kekerasan

Berdasarkan tabel 4.5 dapat digambarkan suatu hubungan antara proses pemanasan dan canai hangat terhadap nilai kekerasan pada baja bebas interstisi yang digambarkan dalam sebuah grafik seperti yang tertera pada gambar 4.7.



Gambar 4. 7 Grafik Nilai Kekerasan Benda Uji pada Baja Bebas Interstisi dengan Berbagai Perlakuan

Bentuk dan besar butir akan sangat berkaitan dengan perubahan sifat mekanik material terutama kekuatan dan kekerasan bahan. Deformasi yang

diberikan pada material yang telah mengalami deformasi *multipass* pada proses *warm rolling* mengubah butir menjadi *elongated grain*. Pada saat yang bersamaan sifat mekanis material menjadi anisotropi. Dengan derajat deformasi yang tinggi struktur mikro material tampak berserat karena butir mengalami elongasi yang tinggi, sifat awal material cenderung berubah sama sekali.

Perubahan struktur mikro tersebut berpengaruh terhadap peningkatan kekerasan. Kenaikan kekerasan tersebut ditunjukkan oleh gambar 4.8. Kekerasan benda uji A yang merupakan benda uji awal tanpa perlakuan panas dan deformasi sebesar 95.967 HVN. Benda uji B tidak dilakukan uji kekerasan karena benda uji B dilakukan hanya untuk memastikan bahwa pada pemanasan ulang 700⁰C, baja bebas interstisi masih tetap memiliki fasa *fully ferriti*. Sehingga benda uji B hanya diperlukan untuk uji mikrostruktur.

Pada benda uji C yang telah mengalami pemanasan dan deformasi sebesar 20%-20%-20% diikuti pendinginan es menghasilkan kekerasan yang lebih tinggi (118.333 HVN) dari benda uji A. Butir-butir benda uji yang semakin pipih akibat deformasi mengakibatkan kerapatan dislokasi semakin meningkat dan terdapat tegangan sisa di area batas butir-butir pipih tersebut. Terjadinya deformasi akan menyebabkan dislokasi sulit untuk bergerak, dengan meningkatnya regangan maka dislokasi semakin sulit bergerak sehingga beberapa dislokasi menjadi tertahan di dalam kristal dan bertindak sebagai sumber tegangan dalam yang berlawanan dengan pergerakan dislokasi lainnya. Selain itu, peningkatan kekerasan tersebut dipengaruhi oleh adanya mekanisme proses *strain hardening* yaitu proses pengerasan akibat deformasi plastis yang menjadikan butir menjadi lebih pipih. Butir pipih dan terelongasi memiliki energi batas butir yang lebih besar daripada butir yang *equiaxed*. Selain itu, penggunaan es sebagai media pendinginan sangat berpengaruh terhadap nilai kekerasan dimana es merupakan salah satu media pendinginan cepat (*rapid cooling*) yang menyebabkan laju pendinginan menjadi lebih cepat sehingga difusi batas butir terhambat dan butir yang dihasilkan lebih halus yang pada akhirnya akan meningkatkan kekerasan material.

Dari seluruh rangkaian proses TMCP dan *warm rolling* yang dilakukan pada penelitian ini, secara umum *trend* peningkatan nilai kekerasan material

Universitas Indonesia

dipengaruhi oleh temperatur dan deformasi. Seperti yang telah dijelaskan pada pembahasan struktur mikro, selama perlakuan panas dan deformasi yang dilakukan terjadi proses *strain hardening* dan juga proses *dynamic recovery*. Mekanisme *strain hardening* menyebabkan material menjadi lebih keras. Akibat *strain hardening* yang terjadi pada material adalah peningkatan densitas dislokasi sehingga dislokasi sulit untuk bergerak. Jika dislokasi sulit bergerak akan mengakibatkan material sulit terdeformasi yang akhirnya material makin keras.

4.6 Hasil Uji Tarik

Pengujian uji tarik menggunakan standar yang diatur dalam ASTM E8 (*Standard Test Methode for Tension Testing of Metallic Materials*). Pengujian ini dilakukan pada benda uji yang tidak mengalami perlakuan dan pada benda uji yang mengalami reheating dan warm rolling sehingga didapatkan nilai kekuatan tarik dan kekuatan luluh dari tiap benda uji. Hasil pengukuran dapat dilihat pada tabel 4.6.

Tabel 4. 7 Data Hasil Uji Tarik pada Tiap Benda Uji

Sampel	Diameter Butir (μm)	Kekerasan (HV)	Kekuatan Tarik (Mpa)	Kekuatan Luluh (Mpa)	Elongasi (%)	Keterangan
A	9.929	95.967	301	226	49.37	Tanpa Perlakuan
C	7.866	118.333	304.52	245.15	22.8	Reheating dan Warm Rolling



Gambar 4. 8 Foto Benda uji A (Tanpa Perlakuan) (a) Sebelum Uji Tarik dan (b) Setelah Uji Tarik

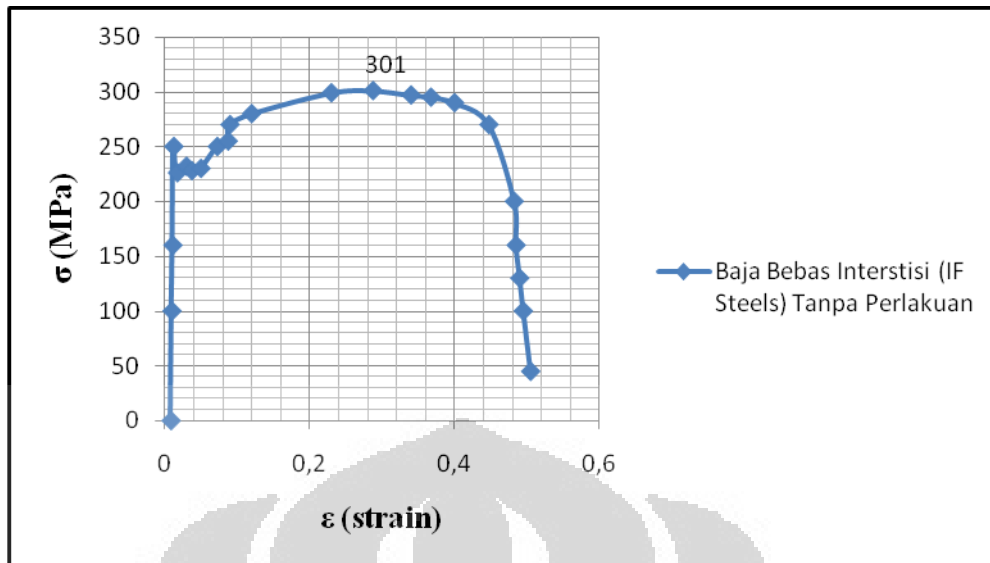
Berdasarkan gambar 4.8 terlihat adanya pertambahan panjang *gauge length* pada benda uji setelah dilakukan pengujian tarik. Pada gambar 4.8 (a), benda uji sebelum dilakukan uji tarik memiliki *gauge length* sebesar 85 mm dan pada gambar 4.8 (b) benda uji setelah dilakukan uji tarik memiliki *gauge length* sebesar 112 mm. Terlihat adanya pertambahan panjang yang dihasilkan pada benda uji setelah dilakukan uji tarik.



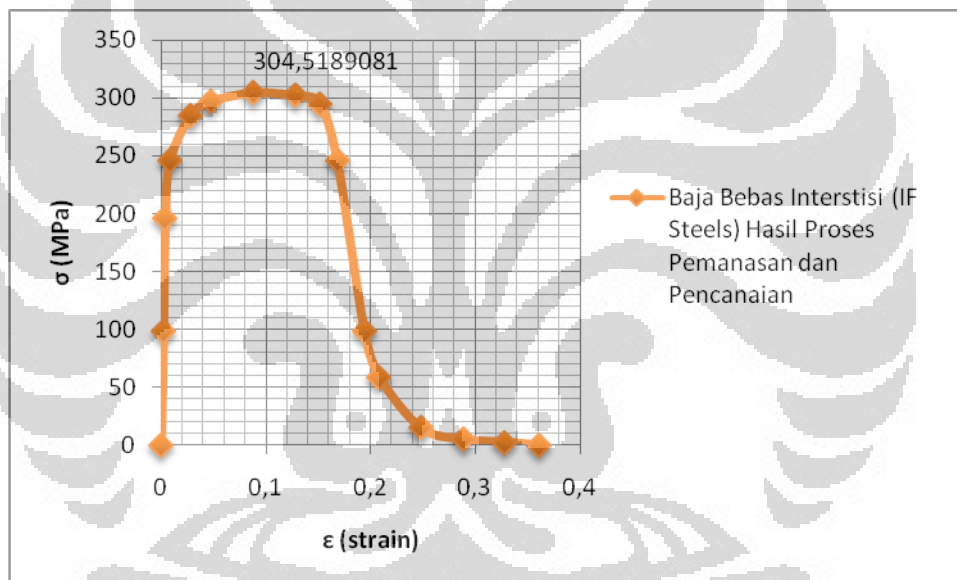
Gambar 4. 9 Foto Benda uji C (*Reheating* dan *Warm Rolling* 20%-20%-20%) (a) Sebelum Uji Tarik dan (b) Setelah Uji Tarik

Pada gambar 4.9 terlihat adanya pertambahan panjang *gauge length* pada benda uji setelah dilakukan pengujian tarik. Pada gambar 4.10 (a), benda uji sebelum dilakukan uji tarik memiliki *gauge length* sebesar 84 mm dan pada gambar 4.9 (b) benda uji setelah dilakukan uji tarik memiliki *gauge length* sebesar 101 mm. Terlihat adanya pertambahan panjang yang dihasilkan pada benda uji setelah dilakukan uji tarik.

Berikut merupakan grafik tegangan-regangan tarik pada benda uji baja bebas interstisi yang didapatkan pada pengujian.



Gambar 4.10 Grafik Tegangan-Regangan Tarik pada Benda Uji Tanpa Perlakuan



Gambar 4.11 Grafik Regangan-Tegangan Tarik pada Benda Uji Yang Mengalami Proses Pemanasan dan Pencanaian

Berdasarkan gambar 4.10 dapat dilihat bahwa benda uji A tanpa perlakuan memiliki kekuatan tarik sebesar 301 MPa dan benda uji C di mana mengalami proses *reheating* dan *warm rolling* 20% x 3 memiliki kekuatan tarik sebesar 304.52 MPa. Terlihat bahwa perbedaan kekuatan tarik yang cukup signifikan pada kedua benda uji.

Kekuatan material bergantung pada struktur mikronya. Teknik-teknik yang dilakukan pada material dapat menentukan struktur mikro dari material tersebut. Proses *warm rolling* yang dilakukan pada penelitian ini menghasilkan

struktur mikro akhir material dengan butir yang pipih dan terelongasi. Bentuk pipih dan terelongasi tersebut disebabkan karena proses deformasi *rolling* yang diberikan pada benda uji. Bentuk butir pipih atau memanjang sebagai hasil dari proses perubahan bentuk memiliki nilai *tensile strength* lebih tinggi dibandingkan dengan material yang memiliki bentuk butir bulat. Ketika lebar dari *elongated grain* menurun, total area batas butir dengan volume yang tetap akan menurun sehingga dislokasi akan sulit bergerak yang akhirnya akan mengakibatkan material lebih kuat dengan mekanisme penghambatan pergerakan dislokasi oleh ukuran *elongated grain* yang lebih pipih. Disisi lain, penurunan ukuran *elongated grain* justru akan menurunkan ketahanan *creep* material tersebut. Struktur mikro yang mengalami perkembangan secara cepat setelah deformasi selama pendinginan dimana rekristalisasi ferit telah terjadi pada tahap awal dan berperan lebih lanjut dalam mereduksi ukuran butir.

4.7 Hasil Pengujian *Hydrogen Charging*

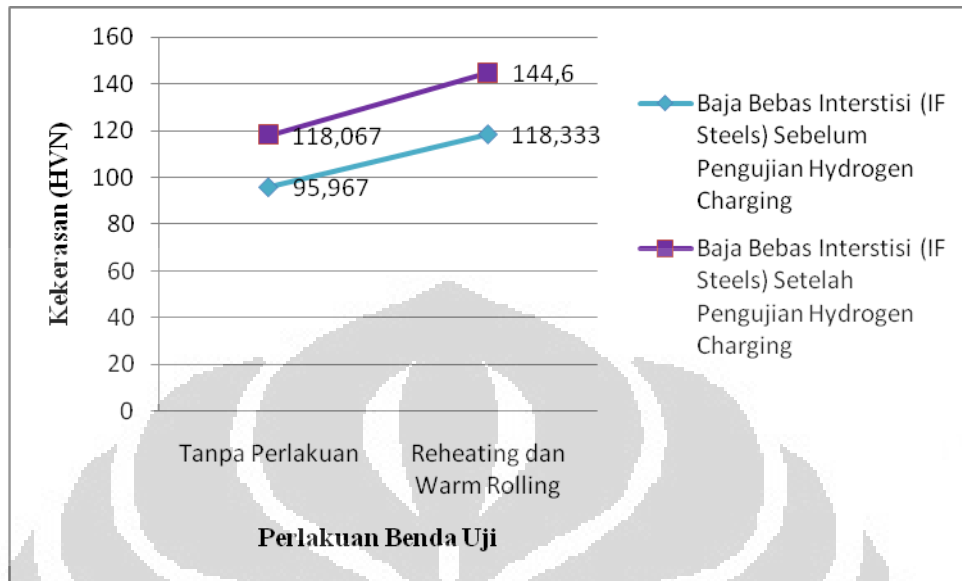
Pengujian *hydrogen charging* bertujuan untuk melihat mekanisme ketahanan benda uji setelah canai hangat terhadap difusi atom hidrogen. Pengamatan terhadap ketahanan *Hydrogen Induced Cracking* tersebut dilakukan melalui uji kekerasan dan uji tarik terhadap benda uji yang telah di *charging* serta pengamatan difusi hidrogen melalui *Optical Microscopy*. Proses pengujian kekerasan dan kekuatan pada benda uji dilakukan untuk mengetahui pengaruh masuknya hidrogen (*hydrogen charging*) terhadap kekerasan dan kekuatan benda uji. Proses *hydrogen charging* dilakukan dengan menggunakan 0.5 M H₂SO₄ sebagai sumber hidrogen ditambah 100 mg/l larutan Thiourea (CS[NH₂]₂) untuk mengurangi efek rekombinasi pada permukaan logam dan menggunakan rapat arus sebesar 30 mA/cm² selama 4 jam. Berikut merupakan tabel data hasil uji kekerasan dan tarik sebelum dan setelah pengujian *hydrogen charging*.

Tabel 4. 8 Hasil Uji Keras dan Tarik Sebelum dan Setelah *Hydrogen Charging Test*

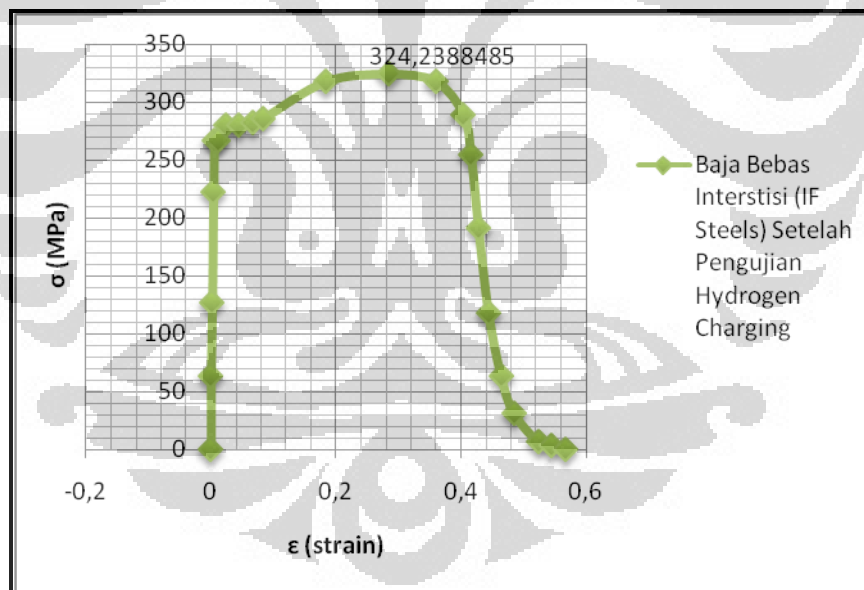
Benda uji	Diameter Butir (μm)	Kekerasan (HV)	Kekuatan Tarik (Mpa)	Kekuatan Luluh (Mpa)	Elongasi (%)	Keterangan
Sebelum <i>Hydrogen Charging Test</i>						
A	9.929	95.967	301	226	49.37	Awal (Tanpa Perlakuan)
C	7.866	118.333	304.52	245.15	22.8	<i>Reheating</i> dan <i>Warm Rolling</i>
Setelah <i>Hydrogen Charging Test</i>						
A'	9.929	118.067	324.239	274.568	49.96	Awal (Tanpa Perlakuan)
C'	7.866	144.6	320.507	254.945	24.1	<i>Reheating</i> dan <i>Warm Rolling</i>

Gambar 4. 12 Foto Benda uji A (Awal) (a) Sebelum *Hydrogen Charging Test* (b) Setelah *Hydrogen Charging Test*Gambar 4. 13 Foto Benda uji C (*Reheating* dan *Warm Rolling*) (a) Sebelum *Hydrogen Charging Test* (b) Setelah *Hydrogen Charging Test*

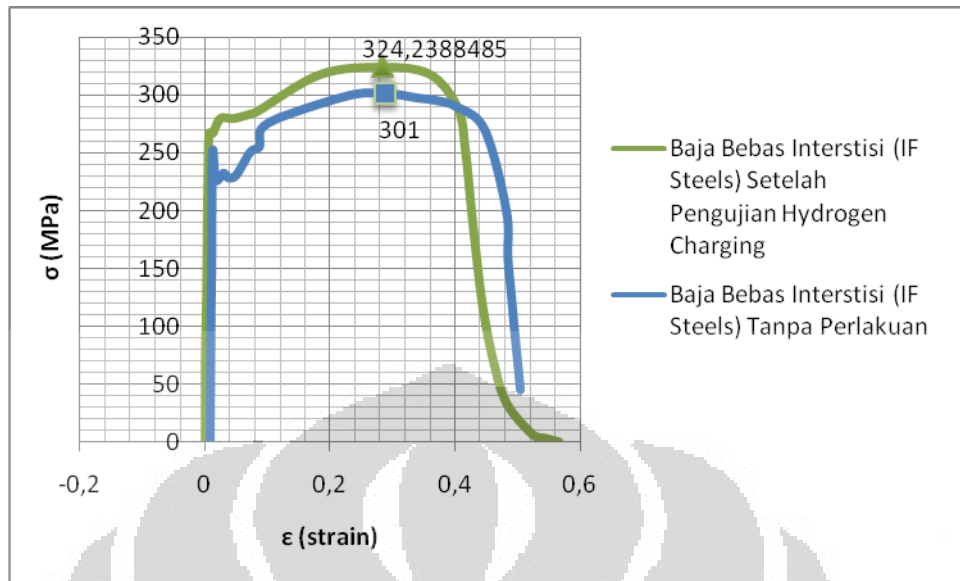
4.7.1 Hasil Pengujian Kekerasan dan Tarik Pada Baja Bebas Interstisi Sebelum dan Setelah Pengujian *Hydrogen Charging*



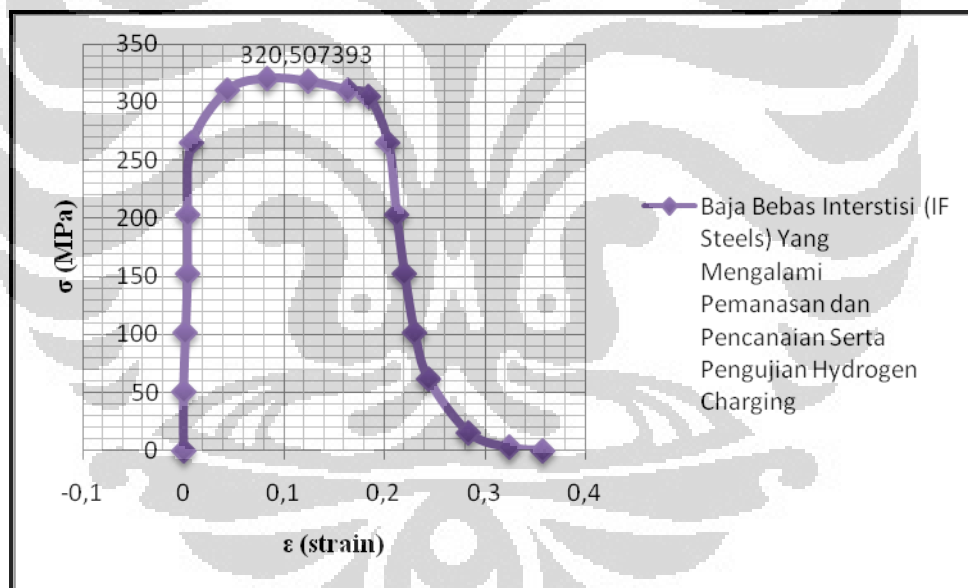
Gambar 4. 14 Grafik Kekerasan Benda uji Sebelum dan Setelah *Hydrogen Charging Test*



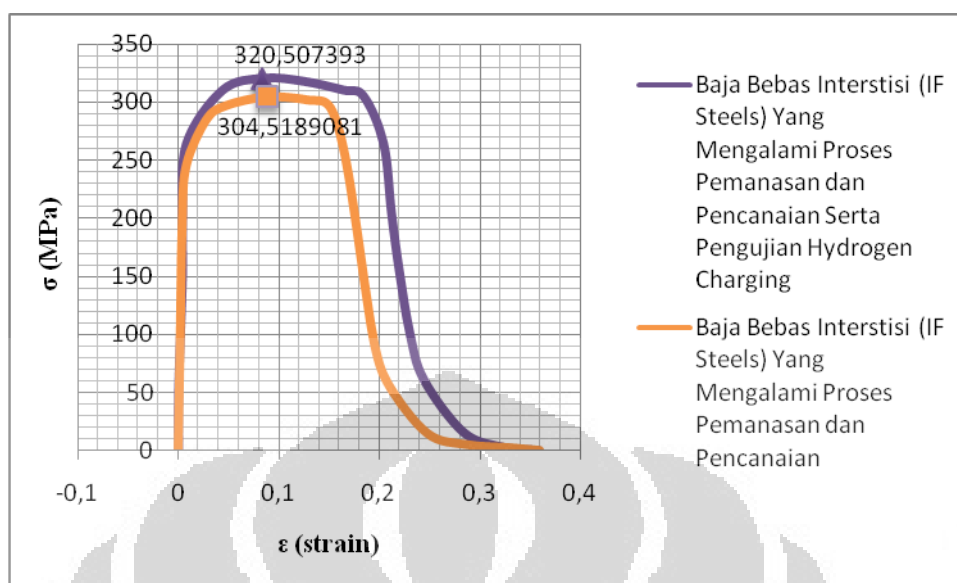
Gambar 4. 15 Grafik Regangan-Tegangan Tarik Pada Benda Uji Setelah *Hydrogen Charging Test*



Gambar 4. 16 Grafik Perbandingan Regangan-Tegangan Tarik Pada Baja Bebas Interstisi (*IF Steels*) Tanpa Perlakuan dan Setelah Pengujian *Hydrogen Charging*



Gambar 4. 17 Grafik Regangan-Tegangan Tarik Pada Benda Uji Yang Mengalami Proses Pemanasan dan Pencanaan Serta *Pengujian Hydrogen Charging*



Gambar 4. 18 Grafik Kekuatan Tarik Pada Benda Uji Sebelum dan Setelah *Hydrogen Charging* Pada Benda Uji Yang Mengalami Proses Pemanasan dan Pencanaian

Benda uji A adalah benda uji awal benda uji tanpa mengalami perlakuan apapun. Dengan ukuran butir sebesar $9.929 \mu\text{m}$, benda uji A memiliki kekerasan 95.967 HVN dan kekuatan tarik sebesar 301 MPa . Kemudian dilakukan *hydrogen charging* dengan diberikan rapat arus sebesar 30 mA/cm^2 selama 4 jam (benda uji A') menghasilkan kekerasan setelah *charging* sebesar 118.067 HVN dan kekuatan tarik sebesar 324.239 MPa . Pada gambar 4.14, terlihat perbedaan kekerasan yang cukup signifikan antara kekerasan sebelum *charging* dan kekerasan setelah *charging*. Begitu pula dengan kekuatan tariknya yang terlihat pada gambar 4.16.

Benda uji C adalah benda uji yang mengalami proses pemanasan ulang pada temperatur 700°C dan canai hangat pada temperatur 650°C dengan deformasi $20\%+20\%+20\%$ diikuti pendinginan dengan es. Benda uji ini memiliki ukuran butir sebesar $7.866 \mu\text{m}$, kekerasan sebesar $118,333 \text{ HVN}$, dan kekuatan tarik sebesar 304.519 MPa . Kemudian dilakukan hydrogen charging dengan diberikan rapat arus sebesar 30 mA/cm^2 selama 4 jam (benda uji C') menghasilkan kekerasan setelah *charging* sebesar 144.6 HVN dan kekuatan tarik sebesar 320.507 MPa . Pada gambar 4.14, terlihat perbedaan kekerasan yang cukup signifikan antara kekerasan sebelum *charging* dan kekerasan setelah *charging*.

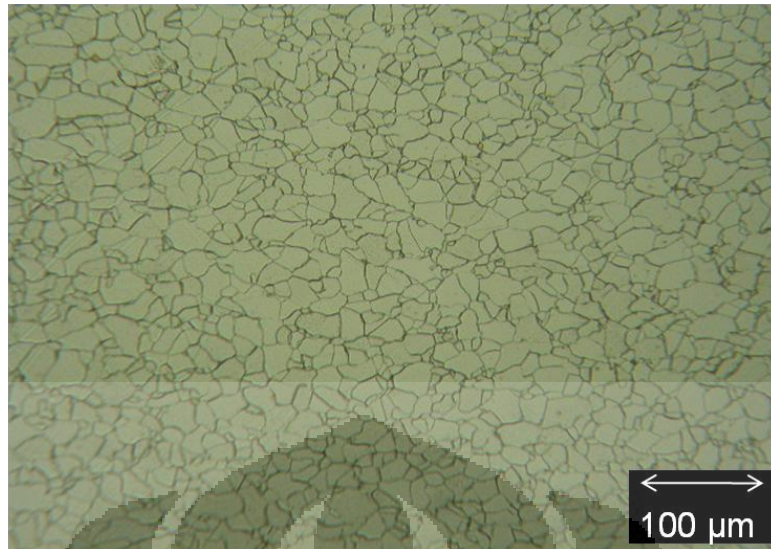
Begitu pula dengan kekuatannya yang semakin meningkat seperti yang terlihat pada gambar 4.18.

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. Apabila atom hidrogen telah terdifusi ke dalam material dan berkumpul pada cacat yang ada pada material, akan terjadi reaksi kombinasi atom-atom hidrogen yang membentuk molekul 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 perpisahannya menjadi getas.

4.7.2 Hasil Pengujian Struktur Mikro Pada Baja Bebas Interstisi Setelah Dilakukan Pengujian *Hydrogen Charging*

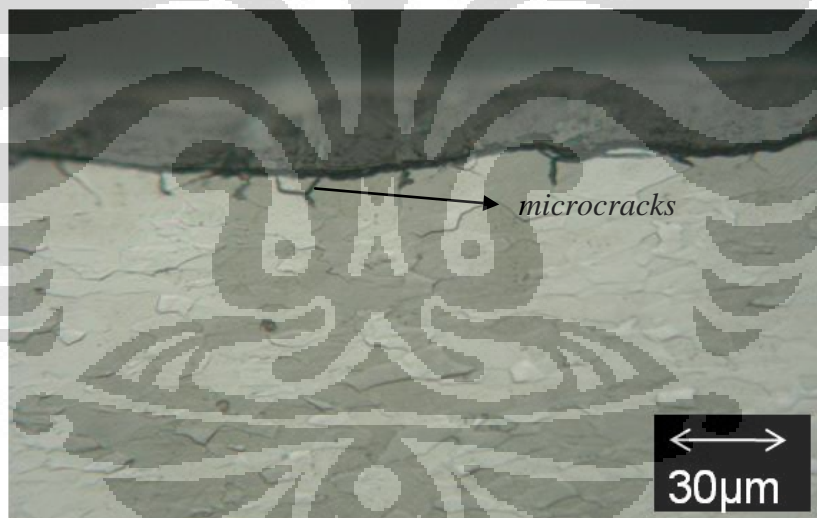


(a)

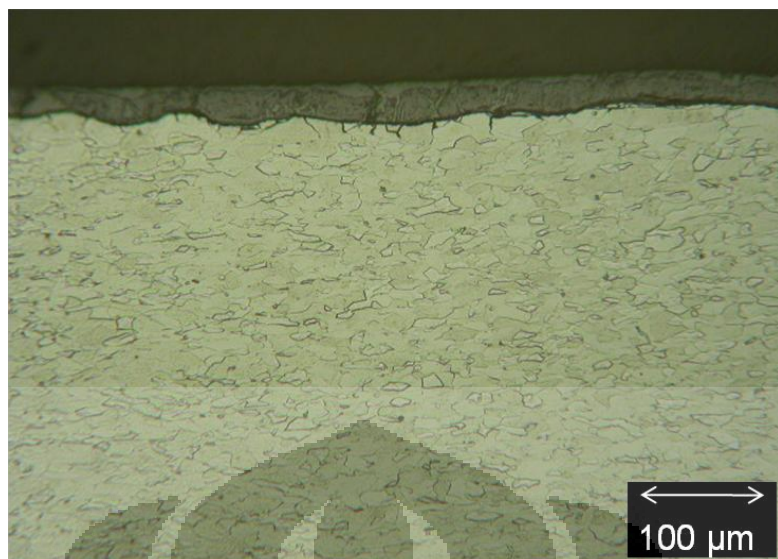


(b)

Gambar 4. 19 Foto Mikro Baja Bebas Interstisi Setelah *Hydrogen Charging* Dengan Mikroskop Optik (a) Perbesaran 200x, (b) Perbesaran 500x, Etsa Nital 2% (Benda Uji A')



(a)



(b)

Gambar 4. 20 Foto Mikro Baja Bebas Interstisi Yang Mengalami Proses Pemanasan dan Canai Hangat Setelah *Hydrogen Charging* Dengan Mikroskop Optik (a) Perbesaran 200x, (b) Perbesaran 500x, Etsa Nital 2% (Benda Uji C')

Gambar 4.19 merupakan foto mikro baja bebas interstisi setelah pengujian *hydrogen charging* di mana terlihat struktur yang berwarna putih yang biasa disebut fasa ferit dengan bentuk butir yang *equiaxed*. Hasil foto mikro tersebut tidak menunjukkan adanya perbedaan pada hasil foto mikro benda uji tanpa perlakuan seperti yang terlihat dalam gambar 4.2. Sedangkan pada benda uji yang mengalami proses pemanasan dan pencanaian hangat multipass reversible temperatur 650°C dengan besar deformasi 20%-20%-20% tampak perbedaan foto mikro setelah pengujian *hydrogen charging* dengan sebelum pengujian *hydrogen charging*. Pada hasil foto mikro setelah *hydrogen charging* yang terlihat pada gambar 4.20, menunjukkan adanya *microcracks* di sepanjang batas butir dengan kedalaman sekitar $2\ \mu\text{m}$. *Microcracks* ini terjadi pada daerah ujung benda uji dalam arah transversal terhadap arah *roll* yang menunjukkan terjadi pada awal deformasi. Ketika terjadi *microcracks*, batas butir yang lemah menjadi tempat menjalarnya retak. Morfologi perpatahan karena *hydrogen embrittlement*, dipengaruhi oleh perilaku difusi hidrogen secara makroskopis pada material, yang tergantung pada rapat arus dan juga tegangan dan memiliki perpatahan yang getas (*brittle*). Sebagai penangkap hidrogen adalah daerah diskontinyu seperti rongga ataupun void-void dan inklusi ataupun dislokasi. Atom hidrogen akan

Universitas Indonesia

berakumulasi pada bidang slip yang terletak pada batas butir, yang akan menjadi tempat inisiasi *crack*^[47]. Semakin kecil butir, maka batas butir akan semakin banyak sehingga semakin rentan terhadap serangan hidrogen. Hal ini sudah sesuai dengan penelitian, di mana hasil foto mikro pada benda uji yang mengalami proses pemanasan dan pencapaian hangat temperatur 650⁰C setelah dilakukan *hydrogen charging test* tampak adanya *microcracks* sehingga menunjukkan kerentananan terhadap *hydrogen embrittlement* yang tinggi bila dibandingkan dengan hasil foto mikro pada benda uji tanpa perlakuan setelah *hydrogen charging* yang tidak menunjukkan adanya *microcracks*. Pada penelitian ini belum bisa membuktikan apakah *microcracks* tersebut merupakan akibat dari serangan hidrogen dengan adanya atom hidrogen yang berdifusi ke batas butir. Oleh karena itu diperlukan pengamatan lebih lanjut untuk mengetahui penyebab dari *microcracks* tersebut pada penelitian berikutnya. Contohnya dengan menggunakan alat *hydrogen analyzer* dan *Transmission Electron Microscope*.

BAB V

KESIMPULAN

Dari hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Proses pemanasan ulang pada temperatur 700°C menghasilkan ukuran butir ferit yang lebih besar yaitu $11.357\ \mu\text{m}$ dibandingkan benda uji tanpa perlakuan yang memiliki ukuran butir ferit sebesar $9.929\ \mu\text{m}$. Hal ini dikarenakan proses pemanasan ulang menyebabkan pertumbuhan butir pada benda uji sehingga ukuran butir ferit meningkat.
2. Deformasi pada canai hangat sebesar 20%-20%-20% menghasilkan butir ferit berukuran $7.866\ \mu\text{m}$ dengan temperatur deformasi 650°C . Hal tersebut menunjukkan adanya mekanisme penghalusan butir pada saat dilakukan proses TMCP. Penghalusan butir ferit memberikan efek terhadap peningkatan nilai kekerasan dan kekuatan tarik benda uji. Kekerasan dan kekuatan tarik awal benda uji berturut-turut sebesar $95.967\ \text{HVN}$ dan $301\ \text{MPa}$. Sedangkan kekerasan dan kekuatan tarik benda uji setelah canai hangat sebesar $118.333\ \text{HVN}$ dan $304.519\ \text{MPa}$.
3. Ketahanan *Hydrogen Embrittlement* pada baja bebas interstisi menunjukkan benda uji dengan ukuran butir lebih kecil dengan batas butir yang lebih banyak cenderung lebih rentan terhadap serangan hidrogen.

REFERENSI

- [1] 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
- [2] zulsafirin.indra@krakatausteel.com, Studi SPP PT Krakatau Steel, Divisi Riset dan Pengembangan Produk.
- [3] http://repository.upi.edu/operator/upload/s_fis_0608682_chapter2.pdf, diakses pada tanggal 23 Desember 2011.
- [4] Pengetahuan Bahan 2008, Pak Rahmat Saptono. Bab 3 Logam dan Paduan Berbasis Besi. DTMM FTUI.
- [5] ASM Handbook Vol 1:329 (1993).
- [6] William D. Callister, Jr., *Materials Science and Engineering, An Introduction*, 6th ed., John Wiley & Son, Inc., 2003.
- [7] Black, B, Bode, Hanh, "Interstitial free steel, processing, properties, and application" *Thyssen Stahl AG*, Germany. 1995.
- [8] <http://pradoto.blogspot.com/2010/02/interstitial-free-steel-if-steel-baja.html>, diakses pada tanggal 24 Desember 2011.
- [9] John Iannou. 2009. *A Thesis of Mechanical Behaviour and Corrosion of Interstitial-Free Steel to Aluminium Alloy Self-piercing Riveted Joints*. Material Science and Engineering, University of Hertfordshire.
- [10] Pickering, F. B., *Physical Metallurgy and the design of the steels*. Applied Science Publishers. London. 1978. pp. 1-88.
- [11] D.T. Llewellyn and R.C. Hudd. *Steels: Metallurgy and Applications (3rd Edition)*. Reed Educational and Professional Publishing Ltd. 1998
- [12] Shey, John A., *Introduction to Manufacturing Processes, 2nd Edition*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1987.
- [13] Weng, Yuqing. “Ultra-Fine Grained Steels.” *Metallurgical Industry Press*, 2009.
- [14] Kyung-Tae Park, Dong Hyuk Shin. “Annealing behavior of submicrometer grained ferrite in a low carbon steel fabricated by severe

- plastic deformation.” *ElSevier Materials Science and Engineering A334* (2002) 79–86).
- [15] Laboratorium Metalurgi Proses Departemen Metalurgi dan Material FTUI. *Modul Praktikum Teknik Pengubahan Bentuk*. Laboratorium Metalurgi Proses Departemen Metalurgi dan Material FTUI : Depok, 2011.
- [16] Kalpakjian, Serope dan S. R. Schmid. *Manufacturing Processes for Engineering Materials* 5th ed. Pearson Education : UK. 2008
- [17] E.S. Siradj. “Peluang penelitian dalam Thermomechanical Treatment Baja High Strength Low Alloy.” Seminar sehari Fakultas Teknik Universitas Tarumanegara.2001.
- [18] G. H. akbari, C. M. Sellars and J. A. Whiteman. “Microstructural Development During Warm Rolling of an IF Steels.” Pergamon. *Acta mater, Acta Metallurgica*. Vol. 45, No. 12, PP. 5047-5058, 1997.
- [19] H. K. D. H. Bhadeshia. 2001. “Bainite In Steels: Transformations, Microstructure And Properties.” Second Edition. *IOM Communications Ltd.*
- [20] Mars. G Fontana. *Corrosion Engineering, 3th Edition*. New York:McGraw Hill Book Company.1986.
- [21] Beladi, Hossein et al. “The Effect of Multiple Deformations on the Formation of Ultrafine Grained Steel.” *Metallurgical And Materials Transactions A*. Vol 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] Ginzburg, Vladimir G. *Flat-Rolled Steel Processes : Advanced Technology*. CRC Press : New York. 2009.
- [25] Humphreys, F.J. and M. Hatherly, *Recrystallization and Related Annealing Phenomena*. Pergamon Press. 2004.

- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] Murty, Narayana and Torizuka, Shiro. *Dynamic Recrystallization of Ferrite During Warm Deformation of Ultrafine Grained Ultra-Low Carbon Steel*. 2005.
- [29] ASM Handbook. Vol. 09, *Metallography and Microstructure*, (ASM International). 1991.
- [30] Tootten, Goerge E. *Steel Heat Treatment*. Taylor and Francis Group. 2006.
- [31] ASM Handbook. 1991. Vol. 04, *Heat Treating*, (ASM International).
- [32] F. Huang et al. "Hydrogen-induced Cracking Susceptibility and Hydrogen Trapping Efficiency of Different Microstructure X80 Pipeline Steel." *Springer Science & Business Media*, LLC 2010.
- [33] Jones, Denny A. *Principles and Prevention of Corrosion*. Maxwell Macmillan International Publishing group: New York. 1992.
- [34] Riastuti, Rini, dkk. "Effect of Hydrogen Charging on Microstructure Morphology of Warm Rolled Low Carbon Steel". 2012
- [35] Samerjit. *Hydrogen Induced Cracking in Low Strength Steels*. Thammasat Int.J.Sc.Tech Vol 9 No.2. 2004.
- [36] Thomas J. C. Eun, *Hydrogen Damages in Oil Refinery and Petroleum Plants*, Keyano College Suncor Energy, 2005.
- [37] Namboodhiri, T.K.G, "Hydrogen Damage of Metallic Material". Banaras Hindu University. Varanasi.
- [38] Pribadi, Mohammad. *Studi Pengaruh Deformasi Proses Warm Rolling Terhadap Perubahan Struktur Mikro Ferritic Dan Ketahanan Korosi Baja Karbon Rendah*. Tesis Program Magister FTUI. 2010.
- [39] ASTM E3. "Standard Guide for Preparation for Metallographic Specimens". 2003.

- [40] ASTM E112. “*Standard Test Method for Determining Average Grain Size*”. 2003.
- [41] ASTM E92. “*Standard Test Methods for Vickers Hardness of Metallic Materials*”. 2003.
- [42] Diktat Teori Dasar Praktikum Karakterisasi Material 1. Laboratorium Metalurgi Fisik, Departemen Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Depok : Oktober 2009.
- [43] ASTM E8. “*Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*”. 2003.
- [44] JIS Z 2201. “*Test pieces for tensile test for metallic materials*”. 1998.
- [45] R.D. McCright: *Stress Corrosion Cracking and Hydrogen Embrittlement of Iron Base Alloys*. NACE, (1973), pp. 306-325.
- [46] Harris, John Noel. 1983. *Mechanical Working of Metals : Theory and Practice*. Pergamon Press : UK.
- [47] R.F. Hochman. “Mechanical Study of Transgranular Stress Corrosion Cracking of Stainless Steel.” *Met. Transaction 22A*, 1991.



Lampiran 1. Main Frame Data Proses Benda Uji Bebas Interstisi No. Coil 365328

Grade OA0125AT di PT Krakatau Steel

```
Pt. Krakatau Steel - Cold Rolling Mill      Date : 15-11-2011
OA08                                         Time  : 14:54:22
      | DISPLAY DETAIL HOTBAND |
      -02 02 00 14 22 16
CRM CoilNo.: 365328      HSM CoilNo.: 988617      Schedmon : 11-2011
Vanadium   : 0005      AI Number   :                SchedIno  : 009
Order Cls  : 11        Vnd.Ord.No.: C10239 02      Itemno   : 0680
Order No.  : C10597 02 Vnd.Ord.It.: 02        Fin.Tem.Avg.: 91
Act. Gauge :          Vnd.Gauge  : 3.000      Fin.Tem.Max.: 91
Act. Width :          Vnd.Width   : 1235.00    Fin.Tem.Min.: 74
Act. Weight:          Vnd.Weighth: 20.840     Coil.Tem.Max.: 72
Stl. Grade : OA0125AT Def.Degree  :          Coil.Tem.Min.: 68
Asg. Date  : 08-11-2011 Def.Rate   :          Coil.Tem.Avg.: 70
Rec. Date  : 18-07-2011 Location   : CPL-0084    Act.Gaug.Min.: 2.980
Char.Date  :          Slab No.    : 5600      Act.Gaug.Max.: 3.020
Insp Date&Time : 18-07-2011 22:37:36 Act.Gaug.Avg.: 3.000
Disposit.  : 1        Hold Reas.  :          Act. Wd. Min.: 1249.00
HRC Source : L        Crown       :          Act. Wd. Max.: 1249.00
Scheduled  :          Ship.Tiket  : CA1G00320 01 Act. Wd. Avg.: 1251.00
Def. Loc.  :          Reason Code :          Confirm Date:
Qual. Code : DDQ      Heat.Numb.  : 06877Y      18-07-2011 08.42
----- PT. KRAKATAU STEEL -----
Enter =Return  F01 =I Menu  F02 =P Menu  F07 =Prev  F08 =Next  F09 =To Scroll
Display data OK ....
:00.1 05/15
```

Lampiran 2. Main Frame Data Komposisi Benda Uji Bebas Interstisi No. Coil
365328 Grade OA0125AT di PT Krakatau Steel

```
QA03          P.T Krakatau Steel - Cold Rolling Mill   DATE : 15/11/2011
USER-ID :          DISPLAY HEAT ANALYSIS             TIME : 14:58:05
PASSWORD:                                     SHIFT:

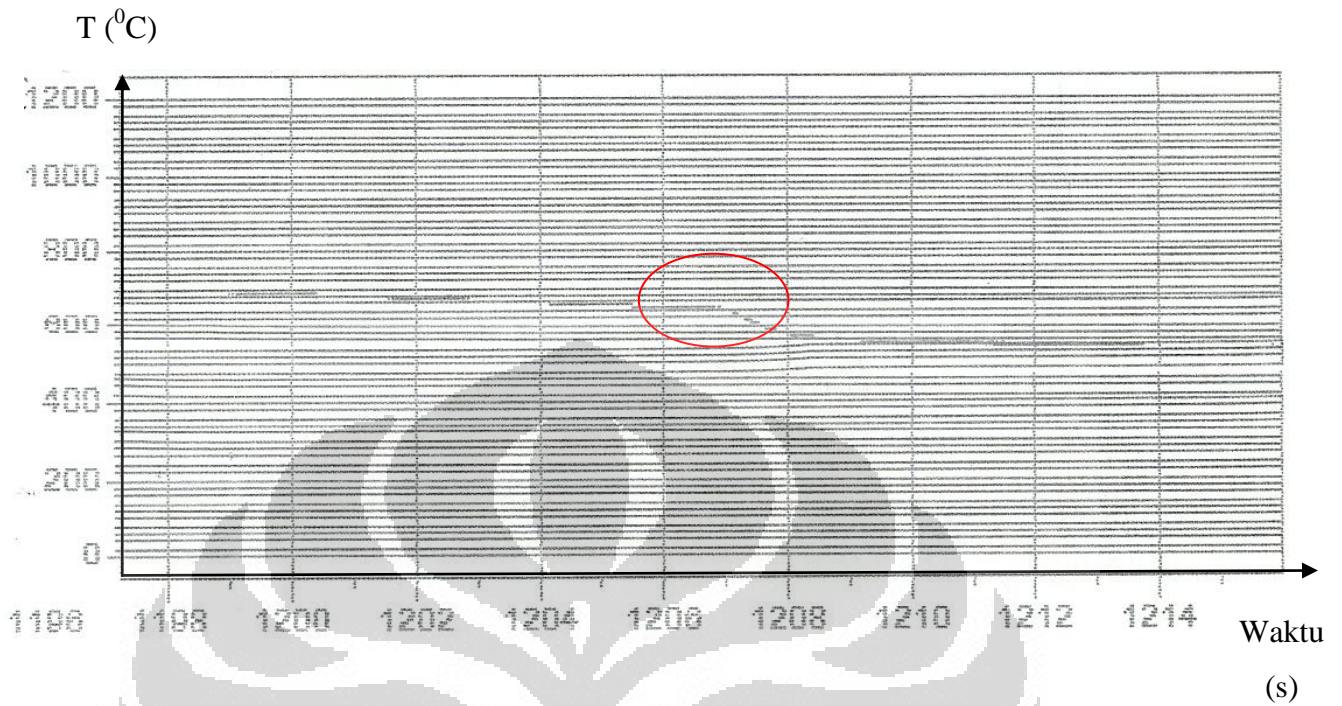
Heat No  : 06877Y-----   Source   :
Slab No  :                Grade    : OA0125AT
Recv Date: 00700/0000

C-100    : 0007           Si-100    : 0005
MN-100   : 0234           P-1000   : 0048
S-1000   : 0060           Al-1000  : 0033
N-10000  : 0046           Cr-100   : 0016
Ni-100   : 0012           Cu-100   : 0029
Nb-1000  : 0001           V-1000   : 0005
Mo-1000  : 0003           Ti-1000  : 0090
Sn-1000  :                B-10000  : 0001

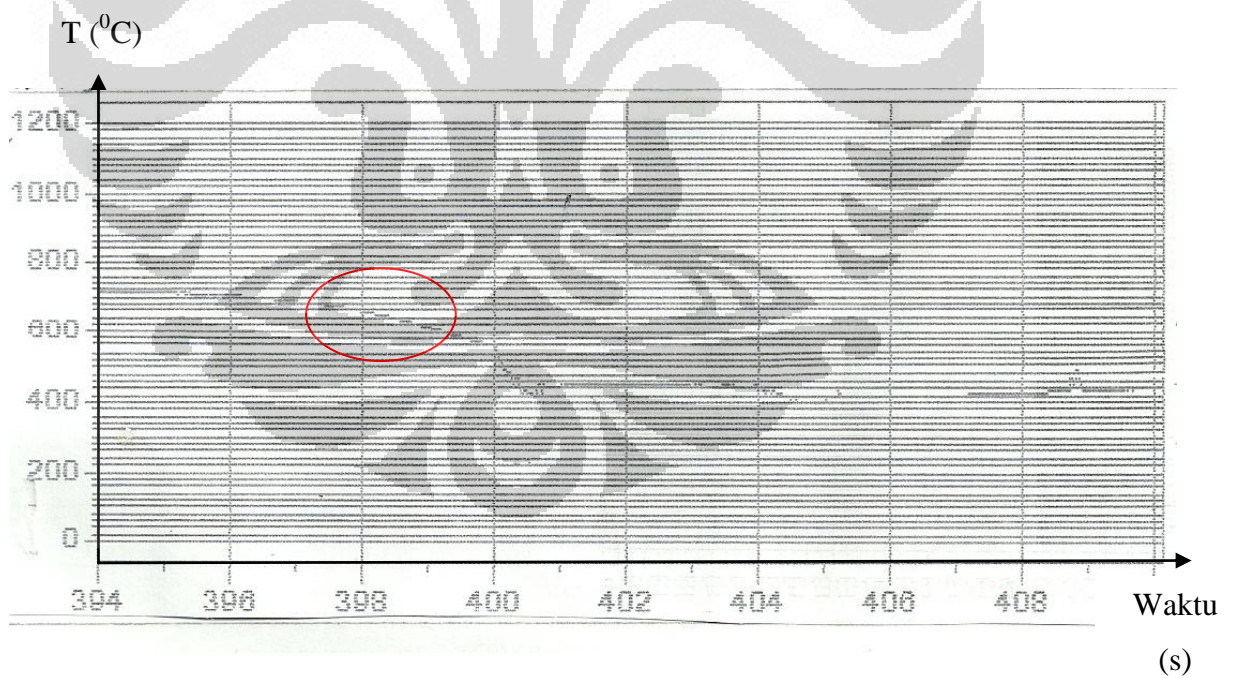
ENT=ENTER F01=T_MENU F02=P_MENU F08=NEXT F10=SCROLL F12=TUTOR
Display data OK ...

:11.0 06/32
```


Lampiran 3. Grafik Akuisisi *Rolling* pada Temperatur 650⁰C Passing Ke-1



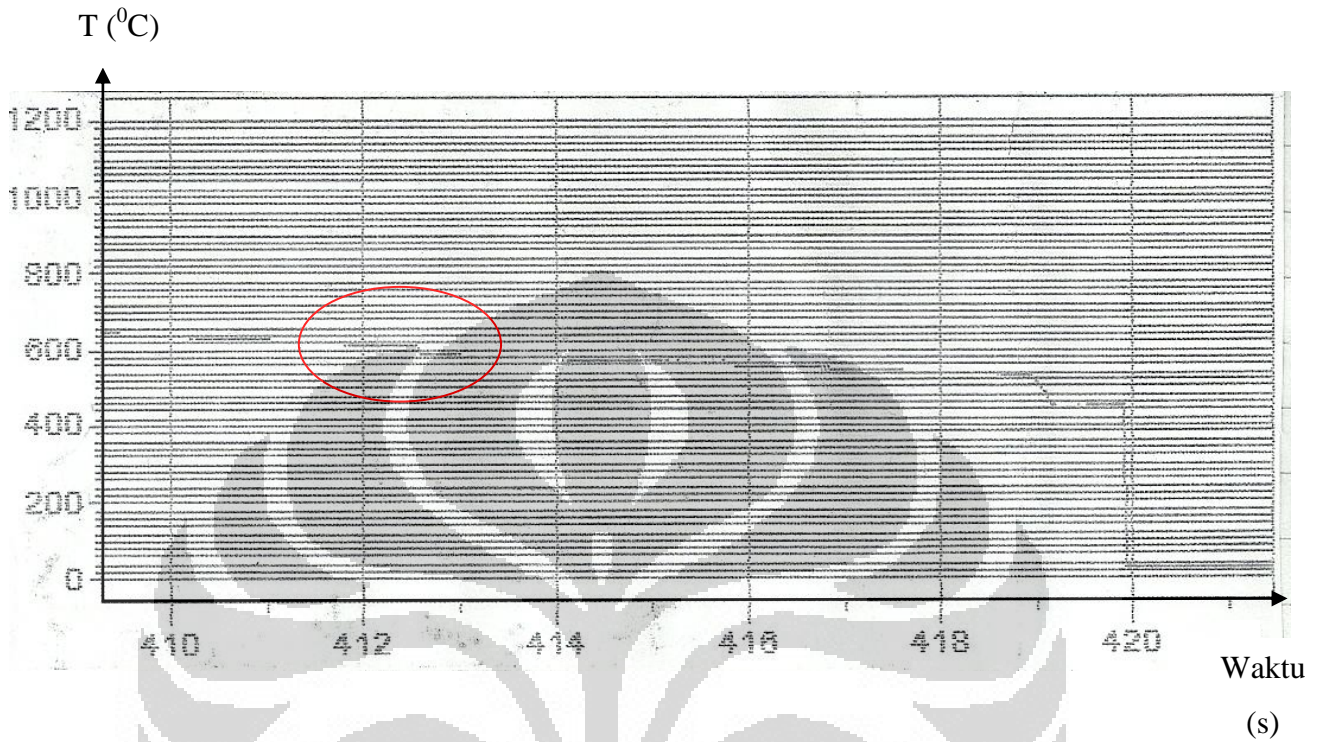
Lampiran 4. Grafik Akuisisi *Rolling* pada Temperatur 650⁰C Passing Ke-2



Keterangan:

Tanda  merupakan indikasi terjadinya deformasi

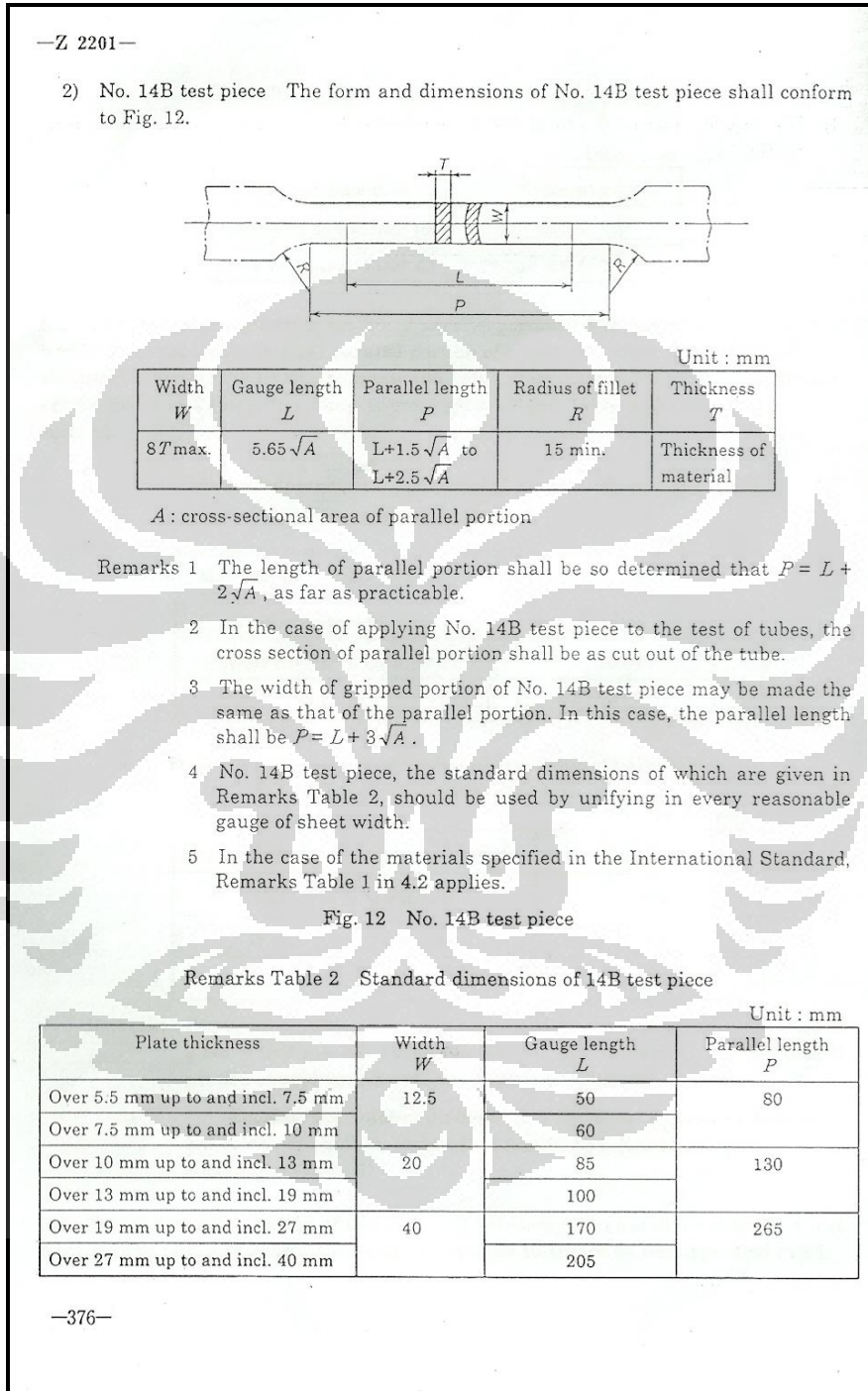
Lampiran 5. Grafik Akuisisi *Rolling* pada Temperatur 650⁰C Passing Ke-3 dan Pendinginan Es




Keterangan:

Tanda  merupakan indikasi terjadinya deformasi

Lampiran 6. Standar Pengujian Uji Tarik JIZ Z 2201 pada Benda Uji Pelat dengan Ketebalan 3 – 6 mm



Lampiran 7. Data Pengujian Tarik pada Benda Uji Baja Bebas Interstisi Tanpa
Perlakuan dengan No. Coil 365328



PT KRAKATAU STEEL
LABORATORIUM UJI METALURGI - BLD
Gedung Test Center Lt. 1, JL. Temper Tip. 371477- Cilegon


LAPORAN PENGUJIAN MEKANIK

Nomor : 74 / MK / MET-BLD / XII / 2011	Tanggal Laporan : 14 / 12 / 2011	
Nomor Order : TC 74 / LAB / XII / 2011	Tanggal Penerimaan : 12 / 12 / 2011	
Komoditi : PLAT	Tanggal Pengujian : 13 / 12 / 2011	
Nama Pelanggan : DIV.PPBLD	Pengujian : UJI TARIK - JS Z	
Alamat Pelanggan : PT.KRAKATAU STEEL CILEGON	Halaman : 1 / 1	

SAMP NO	ID. NO.	GAGE (mm)	QUALITY CODE	PENGUJIAN TARIK					
				ACT GA (mm)	ACT WD. (mm)	YIELD LOAD (N)	YS (N/mm ²)	Lf (mm)	
				SAMP. POS	AREA (mm ²)	ULTIM. LOAD (N)	TS (N/mm ²)	GL	EL (%)
1	365281	3.160	RD	3.150	24.97	19049	242	74.18	
					78.66	23472	298	50	48.36
2	365281	3.123	RD	3.123	24.96	17796	228	73.68	
					77.95	23359	300	50	47.76
3	365328	3.130	RD	3.130	24.95	17647	226	74.69	
					78.09	23473	301	50	49.37
4	365328	3.130	RD	3.130	24.98	17998	230	74.20	
					78.19	23744	304	50	48.40

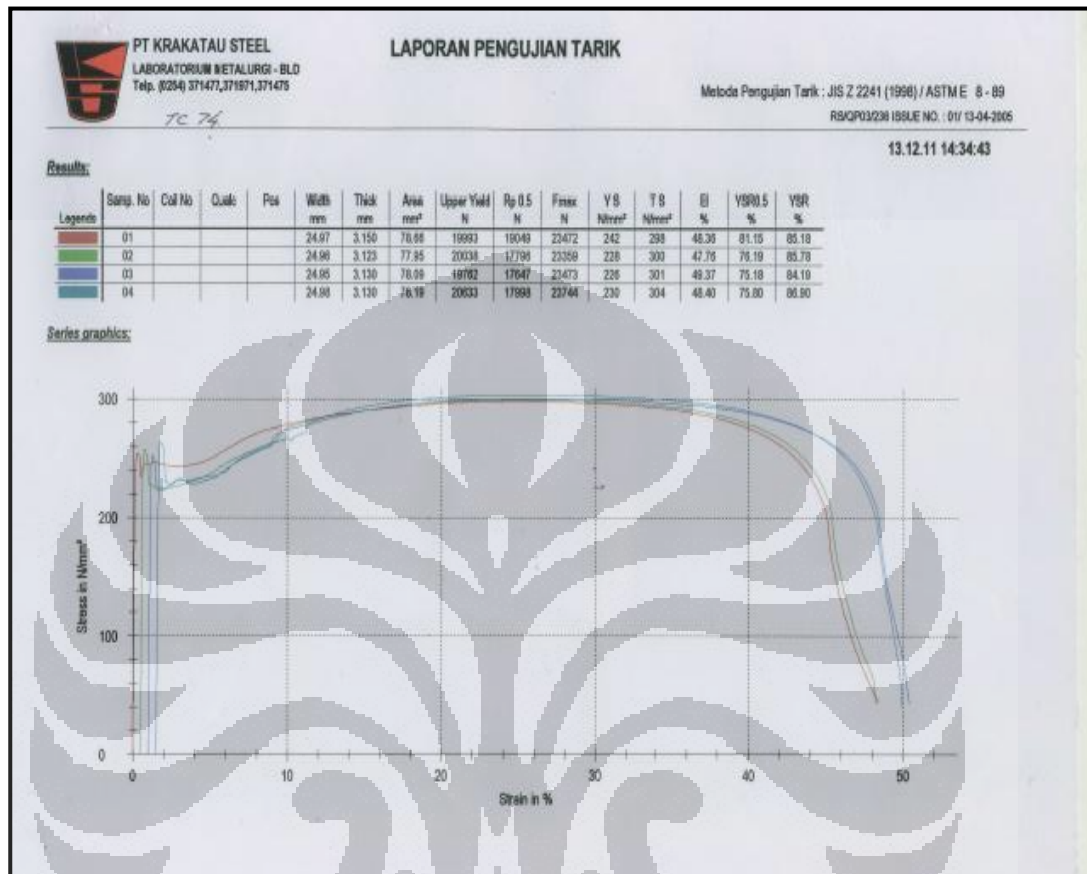
Hati-hati pengujian ini hanya berlaku untuk sampel yang dipaparkan.
Laporan ini tidak boleh diproses/diakses oleh pihak lain. Revisi: BLD

Catatan: Pengujian ini dilakukan dengan mesin uji tarik ZWICK / Z 250
Caliper Mikroya 500 - 120 dan Mikrometer Mikroya 253 - 201




Ria Kurniasih
Supv. Lab. Met-BLD

Lampiran 8. Grafik Tegangan Terhadap Regangan Uji Tarik pada Benda Uji Baja Bebas Interstisi Tanpa Perlakuan (Sampel Ke-3 Berwarna Biru Tua)



Lampiran 9. Data Hasil Pengujian Uji Tarik pada Benda Uji Baja Bebas Interstisi yang Mengalami Pemanasan dan Canai Hangat 650°C

 FAKULTAS TEKNIK – UNIVERSITAS INDONESIA LABORATORIUM UJI DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI & MATERIAL KAMPUS BARU UI - DEPOK 16424 - INDONESIA Telp: 021 – 7863510, 78849045 Fax : 021 – 7872350 E-mail : lum@metal.ui.ac.id		Lembar Data Pengujian Tarik (Tensile Testing Data Sheet)			
Mesin Uji	DHIMAS2U	No. Koprak	CYNTIA	Tanggal Uji :	
Bahan	BASA	Teknisi Penguji :	NURDIN	Paraf Teknisi :	
Identitas Bahan	PLAT	Standar/Metode Uji :	Z-2201	Tanggal Bahan diterima :	

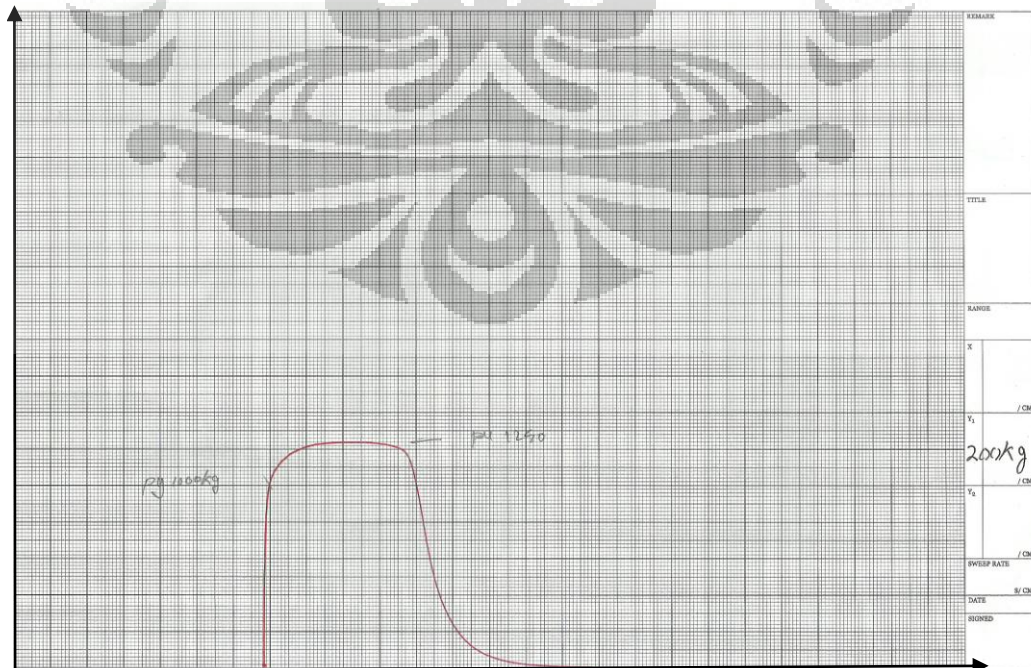
No	Kode Sampel	Bentuk Sampel	Dimensi Sampel (mm)	Luas penampang (mm ²)	Panjang Ukur (mm)	Pu (kg)	Py (kg)	ΔL (mm)	σu (kg/mm ²)	σy (kg/mm ²)	e (%)	Ket.
1	A (80°)	<input checked="" type="checkbox"/> Rod <input checked="" type="checkbox"/> Plat	t = 1,15 W = 25,02	28,77	50	895	465	18,15	31	16	36,30	
2	B (60°) (C)	<input checked="" type="checkbox"/> Rod <input checked="" type="checkbox"/> Plat	t = 1,60 W = 24,96	39,93	50	1290	1000	11,90	31	25	22,80	
		<input type="checkbox"/> Rod <input type="checkbox"/> Plat										
		<input type="checkbox"/> Rod <input type="checkbox"/> Plat										
		<input type="checkbox"/> Rod <input type="checkbox"/> Plat										
		<input type="checkbox"/> Rod <input type="checkbox"/> Plat										
		<input type="checkbox"/> Rod <input type="checkbox"/> Plat										
		<input type="checkbox"/> Rod <input type="checkbox"/> Plat										
		<input type="checkbox"/> Rod <input type="checkbox"/> Plat										
		<input type="checkbox"/> Rod <input type="checkbox"/> Plat										

* Coret yang tidak perlu

FF-26/LU-DTMM Rev 2

Lampiran 10. Grafik Beban Terhadap Pertambahan Panjang Uji Tarik pada Benda Uji Baja Bebas Interstisi yang Mengalami Pemanasan dan Canai Hangat 650°C


Beban
(kg)



0

ΔL
(cm)

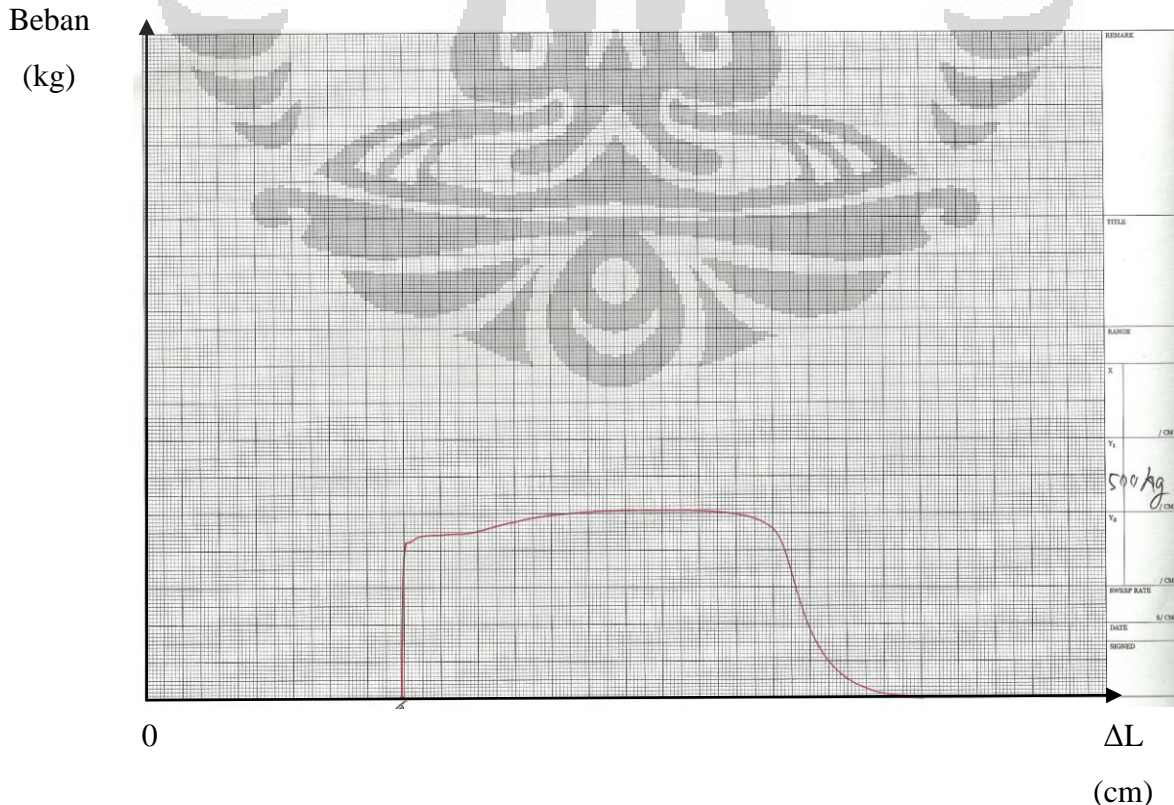
Lampiran 11. Data Hasil Pengujian Uji Tarik pada Benda Uji Baja Bebas Interstisi Tanpa Perlakuan dan yang Mengalami Pemanasan dan Canai Hangat 650°C

 FAKULTAS TEKNIK – UNIVERSITAS INDONESIA LABORATORIUM UJI DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI & MATERIAL KAMPUS BARU UI - DEPOK 16424 - INDONESIA Telp: 021 – 7863510, 78849045 Fax : 021 – 7872350 E-mail : lum@metalui.ac.id		Lembar Data Pengujian Tarik (Tensile Testing Data Sheet)										
Mesin Uji	SHIMADZU	No. Kontrak :	Tanggal Uji :									
Bahan	BAJA	Teknisi Penguji :	Paraf Teknisi :									
Identitas Bahan	PLAT	Standar/Metode Uji :	Tanggal Bahan diterima :									
		Z-2201										
No	Kode Sampel	Bentuk Sampel	Dimensi Sampel (mm)	Luas penampang (mm ²)	Panjang Ukur (mm)	Pu (kg)	Py (kg)	ΔL (mm)	σu (kg/mm ²)	σy (kg/mm ²)	e (%)	Ket.
1	THC 600 c	<input type="checkbox"/> Rod <input checked="" type="checkbox"/> Plat	t = 1,70 w = 25,00	42,50	50	1305	1700	7,30	44	40	15,80	
2	HIC 600 c	<input type="checkbox"/> Rod <input checked="" type="checkbox"/> Plat	t = 1,50 w = 24,91	37,36	50	1315	1100	13,25	35	29	26,50	
3	COH (E)	<input type="checkbox"/> Rod <input checked="" type="checkbox"/> Plat	t = 1,55 w = 24,88	38,55	50	1260	1020	12,05	32	26	24,10	
4	COH (D)	<input type="checkbox"/> Rod <input checked="" type="checkbox"/> Plat	t = 3,10 w = 24,88	77,12	50	2550	2200	23,48	33	28	46,96	
5	650 L HIC	<input type="checkbox"/> Rod <input checked="" type="checkbox"/> Plat	t = 1,60 w = 24,95	39,92	50	1850	1690	7,70	46	42	15,40	
6	NORMAL HIC L	<input type="checkbox"/> Rod <input checked="" type="checkbox"/> Plat	t = 3,10 w = 25,00	77,50	50	2575	2300	25,42	33	29	40,84	
		<input type="checkbox"/> Rod <input type="checkbox"/> Plat <input type="checkbox"/> Rod <input type="checkbox"/> Plat	t = w =									

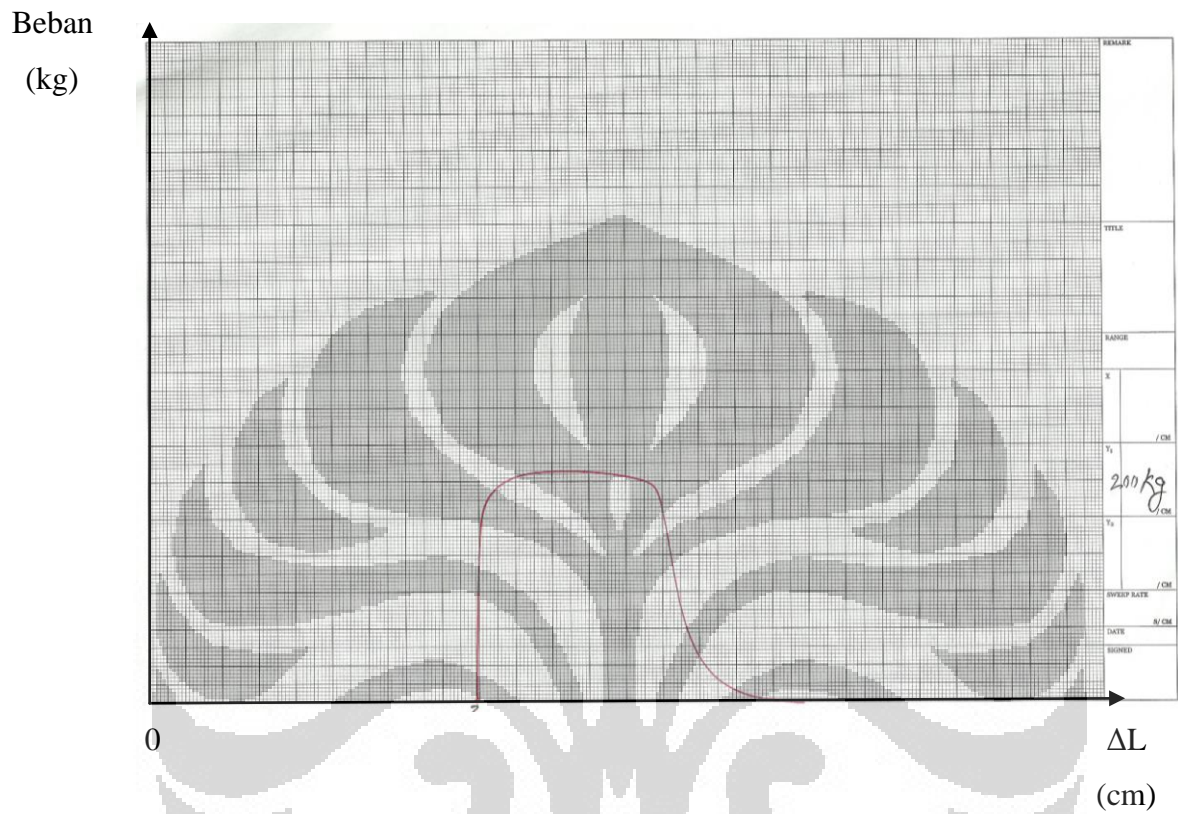
* Coret yang tidak perlu

FF-26/LU-DTMM Rev 2

Lampiran 12. Grafik Beban Terhadap Pertambahan Panjang Uji Tarik pada Benda Uji Baja Bebas Interstisi Tanpa Perlakuan Setelah Pengujian Hydrogen Charging



Lampiran 13. Grafik Beban Terhadap Pertambahan Panjang Uji Tarik pada Benda Uji Baja Bebas Interstisi yang Mengalami Proses Pemanasan dan Canai Hangat 650⁰C Setelah Pengujian *Hydrogen Charging*



Lampiran 14. Spesifikasi Alat-alat Pengujian

1. Mesin roll dua tingkat Ono Roll Japan

- Flat rolling
- Capacity = 20 ton F
- Max Roll gap = 15 mm
- Roll Dimension = 104 x 140 mm
- Rolling Speed = 8 mm / minutes
- Torsee = 71,8 kg.m
- Load measurement system = load cell 20 ton F max. dynamic strain ampilifier

2. Dapur Pemanas (furnace)

- carbolite, type RHF 16/8. Serial 10.96/2775
- max temperature 1600 C
- VOH = 380220
- Phase = 3tn
- Watts = 8000 w
- 17/ph Amps max

3. Mesin Amplas (grinding)

- Buehler Ltd Polimet 1
- 220 v
- 15 Amps
- 1 pH
- Serial no 412-ccc-4887

4. Mesin Poles

- Union
- Serial 6P-102
- 50/60 Hz, 100 W

5. Alat Uji Vickers (Frank Finotest)

- Nama Alat: Frank Finotest
- Beban uji: 5 kgf
- Temperatur: 28⁰C
- Sudut identor: 136⁰

