



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 STEEL*) YANG MENGALAMI
CANAI HANGAT *MULTIPASS* SEARAH**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

KHOLILAH SAADAH

0806455761

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL

DEPOK

JANUARI 2012

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Kholilah Saadah

NPM : 080455761

Tanda Tangan : 

Tanggal : 20 Januari 2012

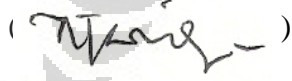
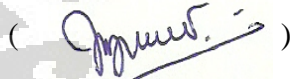

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Kholilah Saadah
NPM : 0806455761
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi : Studi Ketahanan Serangan Hidrogen Pada Baja Bebas Interstisi (*IF Steel*) Yang Mengalami Canai Hangat Multipass Searah

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Rini Riastuti, M.Sc ()
Penguji 1 : Dr. Ir. Myrna Ariati Mochtar, M.S ()
Penguji 2 : Dra. Sari Katili, M.S. ()

Ditetapkan : Depok, Januari 2012

KATA PENGANTAR

Pertama–tama, penulis mengucapkan syukur kepada Allah SWT karena berkat restu, nikmat dan bimbingan-Nya, penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan baik tanpa adanya hambatan yang cukup berarti dalam pengujian sampai akhirnya dapat menyelesaikan skripsi ini tepat pada waktunya. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka untuk memenuhi salah satu syarat untuk menggapai gelar Sarjana Teknik (S.T) jurusan Metalurgi dan Material di Departemen Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Penulis menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan hingga penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan masa perkuliahan dan skripsi ini. Oleh karena itu saya mengucapkan terima kasih kepada:

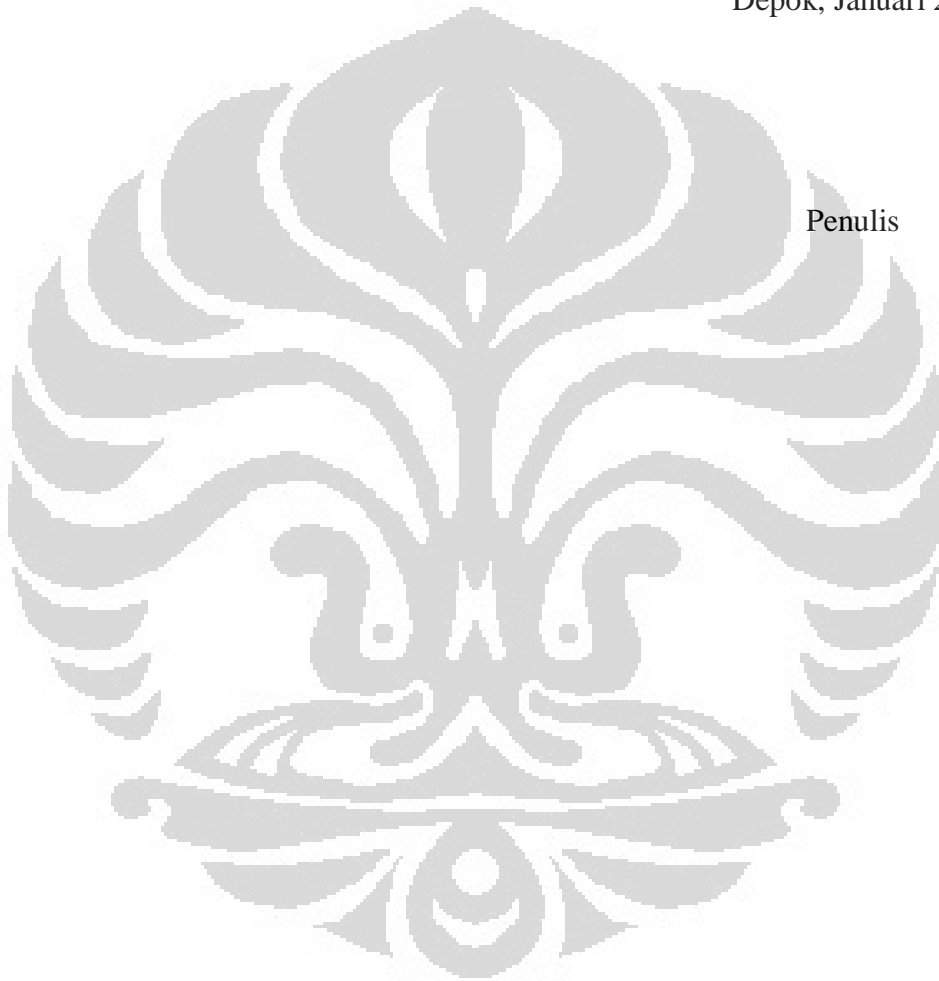
1. Ir. Rini Riastuti, M.Sc, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu dan pikiran untuk mengarahkan Penulis dalam penyusunan skripsi ini.
2. Prof. Dr-Ing. Ir. Bambang Suharno, selaku Kepala Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI.
3. Dr. Ir. Myrna Ariati Mochtar, M.S selaku Pembimbing Akademis Penulis selama menempuh studi di Teknik Metalurgi dan Material.
4. Pak Zulfrafrin Indra selaku pembimbing Kerja Praktek (KP) di Krakatau Steel, Cilegon yang banyak membantu penulis selama penyusunan skripsi.
5. Orang tuaku Prof. Dr. Herman Hidayat dan Dr. Yaniah Wardani atas perhatiannya, beserta dua orang kakakku Ana Sabhana dan M. Alfatih yang telah memberikan bantuan dukungan moral dan materil yang tak henti-hentinya. Penulis persembahkan skripsi ini untuk mereka.
6. Rekan sesama bimbingan skripsi, yaitu Cyintia Anindita, Terry Atmajaya, Dean Agasa Ardian, dan Hariansyah Permana yang selalu setia dalam susah dan senang serta sangat membantu penulis dalam penyusunan skripsi ini.
7. Semua dosen beserta karyawan yang ada di Departemen Metalurgi dan Material FTUI, yang telah memberikan bimbingan selama masa perkuliahan.
8. Teman-teman Metalurgi 2008.

9. Dan semua pihak yang tak dapat disebutkan satu per satu.

Akhir kata, penulis ingin menghaturkan ucapan termakasih sebesar-besarnya pada seluruh pihak, baik yang telah disebut maupun tidak. Harapannya dengan adanya skripsi ini dapat memicu semangat baik untuk diri penulis maupun untuk semua pihak dalam pengembangan ilmu pengetahuan.

Depok, 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 : Kholilah Saadah
NPM : 0806455761
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Departemen : Metalurgi dan Material
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

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

**Studi Ketahanan Serangan Hidrogen Pada Baja Bebas Interstisi (*IF Steel*)
Yang Mengalami Canai Hangat *Multipass* Searah**

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada Tanggal : 20 Januari 2012

Yang menyatakan



(Kholilah Saadah)

ABSTRAK

Nama : Kholilah Saadah
NPM : 0806455761
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi : Studi Ketahanan Serangan Hidrogen Pada Baja Bebas Interstisi (*IF Steel*) Yang Mengalami Canai Hangat *Multipass* Searah

Baja merupakan hal yang fundamental dalam setiap aspek kehidupan. Pada aplikasinya, seperti industri otomotif, dibutuhkan baja yang memiliki karakteristik yang sesuai dengan kondisi pemakaian. Baja Bebas Interstisi mempunyai keuletan yang sangat baik karena memiliki kadar karbon yang sangat rendah. Oleh karena itu dibutuhkanlah sifat baja bebas interstisi (*IF Steel*) yang sesuai dengan kondisi pemakaian, terutama pemakaian pada lingkungan yang mengandung hydrogen.

Penelitian ini bertujuan untuk melihat pengaruh canai hangat terhadap sifat mekanis dan ketahanan korosi serangan hidrogen pada baja bebas interstisi. Penelitian dilakukan dengan proses canai hangat untuk melihat sifat mekanis baja bebas interstisi dan metode *hydrogen charging* 0.5M H₂SO₄ dan thiourea sebagai *poison* untuk menguji ketahanan korosi terhadap serangan hidrogen. Hasil dari penelitian ini dapat menggambarkan sifat baja bebas interstisi saat digunakan sebagai material komponen otomotif baik sifat mekanis maupun sifat korosinya.

Hasil dari penelitian ini merupakan tahap awal, sebagai bahan masukan untuk melakukan upaya peningkatan sifat mekanis baja bebas interstisi dan melihat pengaruh canai hangat terhadap ketahanan korosi akibat serangan hydrogen pada material baja bebas interstisi. Sehingga baja bebas interstisi ini dapat digunakan dengan aman.

Kata kunci: Baja bebas interstisi, korosi serangan hidrogen, canai hangat, *multipass*, deformasi.

ABSTRACT

Name : Kholilah Saadah
NPM : 0806455761
Major : Metallurgy and Material Engineering
Title : Study of Hidrogen Attack Resistance on Multipass
Unidirectional Warm Rolled of Interstitial Free
Steel

Steel is fundamental in every aspect of life. In it's aplication, such as automotive industry, steel sholud have characteristics required in accordance with the service condition. Interstitial free steel has excellent ductility because it has very low carbon content. Therefore, we need Intertitial Free Steel properties in accordance with the service condition especially in the environment that have a lot of hydrogen.

This study aim to see the effect of warm-rolled on the mechanical properties and hydrogen corrosion attack resistance on Interstitial free steel. Research carried out by the warm-rolling process to study the mechanical properties and hydrogen charging 0.5 H₂SO₄ and Thiourea as a poison to test the hydrogen corrosion attack resistance. The results of this study may reflect the nature of the interstitial free steel material when used as aoutomotive parts.

This study is an early stage, as input to meke efforts to improve the mechanical properties of interstitial free steel and hydrogen corrosion attack resistance. So, its can be used safely

Key words: Interstitial Free Steel, Hidrogen Corrosion Attack, warm rolled, multipass, deformation.

DAFTAR ISI

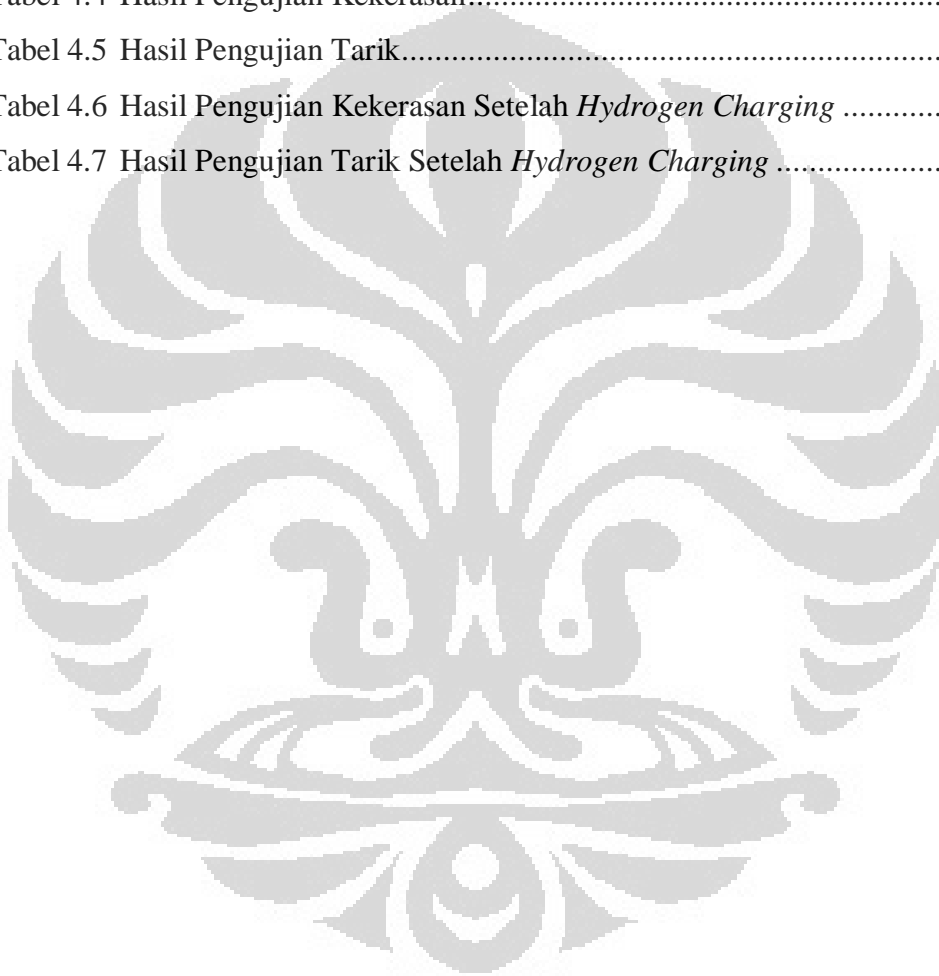
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINILITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR RUMUS	xv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvi
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Ruang Lingkup Penelitian.....	3
1.4.1 Material	3
1.4.2 Parameter Penelitian	4
1.4.1 Tempat Penelitian	4
1.5 Sistematika Penulisan	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Baja Karbon	6
2.1.1 Baja Karbon Rendah.....	6
2.2 Interstitial Free Steel.....	7
2.2.1 Pengaturan Komposisi Kimia.....	8
2.3 Thermo-Mechanical Controlled Process (TMCP)	10
2.4 Severe Plastic Deformation (SPD)	11

2.5 Canai Hangat	11
2.6 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Proses TMCP	14
2.6.1 Pengaruh Deformasi Plastis	14
2.6.2 Pengaruh Temperatur Terhadap Besar Butir Ferit.....	16
2.6.3 Pengaruh Waktu Tahan Terhadap Ukuran Butir Ferit.....	17
2.6.4 Pengaruh Besar Butir Terhadap Sifat Mekanis Material	18
2.6.5 Mekanisme Penguatan dan Penghalusan Butir	19
2.6.6 Pengaruh Pendinginan Cepat Pada Sifat Mekanis Baja.....	21
2.6.5 Laju Regangan (<i>Strain Rate</i>).....	21
2.7 Pemulihan, Rekristalisasi, dan Pertumbuhan Butir	23
2.7.1 Pemulihan.....	24
2.7.2 Rekristalisasi	24
2.7.2.1 Rekristalisasi Dinamis	25
2.7.2.2 Rekristalisasi Statis.....	27
2.7.3 Pertumbuhan Butir	27
2.8 Deformation Band	28
2.9 Sub butir	28
2.10 Hydrogen Induced Cracking Pada Baja Bebas Interstisi	29
2.11 Mekanisme Difusi Atom Hidrogen kedalam Logam.....	31
2.12 Hydrogen Embrittlement.....	33
2.13 Cacat Dalam	35
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	37
3.1 Diagram Alir Penelitian	37
3.2 Alat dan Bahan	38
3.2.1 Alat.....	38
3.2.2 Bahan	38
3.3 Prosedur Penelitian	39
3.3.1 Pemilihan Material.....	39
3.3.2 Persiapan Benda Uji.....	40
3.3.3 Proses TMCP dan <i>Warm Rolling</i>	40

3.3.4 Preparasi, Pengujian Metalografi dan Pengamatan Mikrostruktur	43
3.3.5 Perhitungan Besar Besar Butir <i>Equiaxed</i>	44
3.3.6 Perhitungan Besar Butir <i>Non-equiaxed</i>	46
3.3.7 Pengujian Nilai Kekerasan	47
3.3.8 Pengujian <i>Hydrogen Charging Test</i>	49
3.3.9 Pengujian Tarik.....	50
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	52
4.1 Preparasi Benda Uji	52
4.2 Hasil Pengukuran Ketebalan Benda Uji	52
4.3 Pengukuran Diameter Butir Ferit	54
4.4 Hasil Pengamatan Metalografi	58
4.5 Hasil Pengujian Kekerasan	65
4.6 Hasil Pengujian Kekuatan Tarik.....	68
4.7 Hasil Pengujian Hydrogen Charging	69
4.7.1 Pengaruh Ukuran Butir Terhadap Kekerasan Setelah <i>Hydrogen Charging</i>	70
4.7.2 Pengaruh Ukuran Butir Terhadap Kekuatan Tarik Setelah <i>Hydrogen Charging</i>	73
BAB 5 KESIMPULAN	77
DAFTAR PUSTAKA.....	79
LAMPIRAN.....	83

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Komposisi Standar dari Baja Bebas Interstisi (<i>IF Steel</i>)	8
Tabel 4.1 Komposisi Kimia Benda Uji Baja Bebas Interstisi (<i>IF Steel</i>).....	52
Tabel 4.2 Hasil Pengukuran Benda Uji Sebelum dan Sesudah Proses TMCP dan Warm Rolling.	54
Tabel 4.3 Hasil Pengukuran Diameter Butir Ferit.....	55
Tabel 4.4 Hasil Pengujian Kekerasan.....	65
Tabel 4.5 Hasil Pengujian Tarik.....	68
Tabel 4.6 Hasil Pengujian Kekerasan Setelah <i>Hydrogen Charging</i>	70
Tabel 4.7 Hasil Pengujian Tarik Setelah <i>Hydrogen Charging</i>	73



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Struktur Mikro Baja Bebas Interstisi (IF Steel)	9
Gambar 2.2 Perbedaan Mikrostruktur Antara Proses Canai Konvensional dan Proses TMCP	10
Gambar 2.3 Skematik Proses Canai	12
Gambar 2.4 Transformasi Morfologi Butir Setelah Proses Canai	13
Gambar 2.5 Pergerakan Dislokasi	15
Gambar 2.6 Migrasi Batas Butir Karena Pengaruh Temperatur	17
Gambar 2.7 Pengaruh Waktu Tahan serta Temperatur Terhadap Ukuran butir	18
Gambar 2.8 Pengaruh Besar Butir Terhadap Kekuatan Luluh	19
Gambar 2.9 Ilustrasi Batas butir dan pergerakan Dislokasi.....	20
Gambar 2.10 Kurva Stress-Strain Dengan Berbagai Strain rate Pada Pengerolan Suhu 750 ⁰ C	22
Gambar 2.11 Skematik Proses Anil	23
Gambar 2.12 Butir yang Menunjukkan Terjadinya Rekristalisasi Dinamis pada Suhu 450 ⁰ C	27
Gambar 2.13 Model Dekohesi.....	32
Gambar 2.14 Model Plastis	33
Gambar 2.15 Skema Mekanisme Hydrogen Blistering	36
Gambar 3.1 Dagram Alir Benda Uji.....	37
Gambar 3.2 Optical Emission Spectroscopy	39
Gambar 3.3 Ilustrasi Benda Uji dan Pemasangan Termokopel	40
Gambar 3.4 Skematik Pengujian Benda C.....	41
Gambar 3.5 Skematik Pengujian Benda D	41
Gambar 3.6 <i>Furnace Carbolite</i>	42
Gambar 3.7 Mesin Ono Roll	42
Gambar 3.8 Mikroskop Optik	44
Gambar 3.9 Lingkaran yang Digunakan Untuk Perhitungan Butir dengan Metode Intercept Heyne	46
Gambar 3.10 Skema Pengambilan Foto Mikro Butir <i>Elongated</i>	47

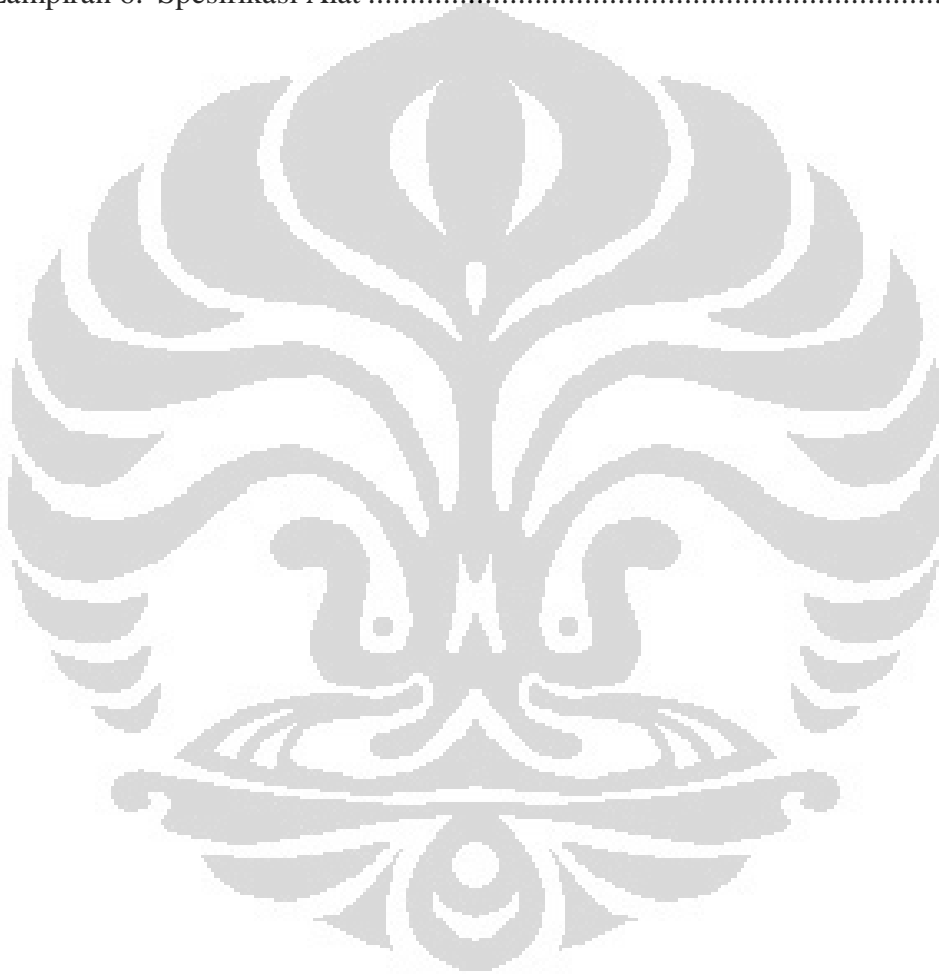
Gambar 3.11 Mesin Uji Kekerasan Vickers.....	48
Gambar 3.12 Skema Pengujian Kekerasan dengan Metode Vickers	49
Gambar 3.13 Rangkaian Proses Hydrogen Charging	49
Gambar 3.14 Mesin Uji Tarik Shimadzu	50
Gambar 3.15 Standar Benda Uji Lembaran Untuk Pengujian Tarik	51
Gambar 4.1 Benda Uji Awal	53
Gambar 4.2 Benda Uji yang Telah Mengalami Deformasi.....	53
Gambar 4.3 Grafik Pengaruh Temperatur <i>Reheating</i> dan Deformasi Terhadap Ukuran Diameter Butir Ferit Untuk Setiap Benda Uji.....	57
Gambar 4.4 Benda Uji A (tanpa perlakuan) etsa nital 2%	59
Gambar 4.5 Benda Uji B (<i>Reheating</i> 650 ⁰ C) etsa nital 2%	60
Gambar 4.6 Benda Uji C (<i>Heating</i> 600 ⁰ C dan Roll 20-20-20%) Etsa nital 2%	62
Gambar 4.7 Benda Uji D (<i>Heating</i> 650 ⁰ C dan Roll 20-20-20%) Etsa nital 2%	64
Gambar 4.8 Grafik Hubungan Antara Nilai Kekerasan Dengan Diameter Butir Untuk Setiap Benda Uji.....	66
Gambar 4.9 <i>Nuclei</i> Pada Batas Butir yang Terelongasi Untuk Benda Uji D yang Mengalami Deformasi Searah 20-20-20% Pada Suhu 650 ⁰ C.....	67
Gambar 4.10 Kurva Stress-Strain Antara Benda Uji A, Benda Uji C, dan Benda Uji D	69
Gambar 4.11 Perbandingan Antara Nilai Kekerasan Material Sebelum dan Sesudah Mengalami <i>Hydrogen Charging</i>	71
Gambar 4.12 Perbandingan Nilai Kekuatan Tarik Antara Benda Uji C Sebelum dan Sesudah Mengalami <i>Hydrogen Charging</i>	74
Gambar 4.13 Perbandingan Nilai Kekuatan Tarik Antara Benda Uji D Sebelum dan Sesudah Mengalami <i>Hydrogen Charging</i>	75

DAFTAR RUMUS

Persamaan 2.1 Perhitungan Strain	13
Persamaan 2.2 Perhitungan % Deformasi	13
Persamaan 2.3 Persamaan Hall-Petch.....	18
Persamaan 2.4 Konversi BHN-UTS (MPa)	19
Persamaan 2.5 Konversi BHN-UTS (Psi)	19
Persamaan 2.6 Persamaan Zener-Hollomon	21
Persamaan 2.7 Persamaan Menghitung Strain Rate	22
Persamaan 2.8 Reaksi Evolusi Hidrogen	35
Persamaan 2.9 Reaksi Evolusi Hidrogen	35
Persamaan 3.1 Rumus Jumlah Titik Potong Persatuan Panjang	44
Persamaan 3.2 Rumus Panjang Garis Terpotong	44
Persamaan 3.3 Rumus <i>G Number</i>	45
Persamaan 3.4 Rumus Perkalian <i>G Number</i> untuk Butir Elongated	47
Persamaan 3.5 Persamaan untuk Uji Kekerasan Vickers.....	48
Persamaan 4.1 Perhitungan % Deformasi.....	52

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Uji Komposisi Menggunakan OES	84
Lampiran 2. Grafik Akuisisi <i>Rolling</i> Multipass Searah pada Suhu 600 ⁰ C	85
Lampiran 3. Grafik Akuisisi <i>Rolling</i> Multipass Searah pada Suhu 650 ⁰ C	87
Lampiran 4. Standar Pengujian Uji Tarik JIS Z 2201	89
Lampiran 5. Hasil Pengujian Tarik	90
Lampiran 6. Spesifikasi Alat	94



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Baja merupakan suatu hal yang fundamental bagi kehidupan manusia dan sangat penting bagi pertumbuhan ekonomi. Baja merupakan material yang paling banyak digunakan dalam dunia industri^[1]. Semua segmen kehidupan, mulai dari peralatan dapur, transportasi, generator pembangkit listrik, kerangka gedung, enamel, dan jembatan menggunakan baja. Seiring dengan perkembangan yang ada di dalam dunia industri, maka dibutuhkan baja yang memiliki sifat dan karakteristik yang sesuai dengan kondisi pada saat baja tersebut diaplikasikan. Perkembangan teknologi yang semakin maju sekarang ini menyebabkan perlu adanya inovasi dalam hal rekayasa material. Pertimbangan dalam merekayasa material tidak hanya berdasarkan sifat mekanik yang baik tetapi sisi ekonomis dari material baru tersebut.

Dalam pembuatan otomotif dan enamel khususnya dalam aplikasi *houseware* atau *kitchenware* yang berupa peralatan berbentuk mangkuk (*bowl*, *pan*) yang dibuat melalui proses pembentukan logam (*press forming*), diperlukan kekuatan yang tinggi dan sifat mampu bentuk yang baik. Disinilah konsep pembentukkan baja bebas interstisi atau yang lebih populer dengan sebutan IF Steel (*Interstitial Free Steel*) telah mulai menggantikan baja karbon rendah sebagai bahan untuk komponen-komponen aplikasi otomotif dan komponen-komponen lain yang memiliki bentuk yang rumit. Karakteristik terpenting IF Steel adalah tingkat keuletan dan mampu bentuk dalam keadaan dingin yang baik serta tidak mengeras pada saat *ageing* (non-strain ageing), serta ketahanan korosi akibat difusi hidrogen yang jauh lebih baik daripada sifat baja karbon pada umumnya^[2].

Sifat dari suatu baja tergantung berdasarkan struktur fasa yang membentuknya. Lebih jauh jika dilihat dari kondisi mikro struktur, baja bebas interstisi (*IF Steel*) 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) dan dilakukan penambahan paduan Ti atau Nb sebagai elemen penstabil^[2]. Sifat mekanik dari struktur ferit ini dipengaruhi besar butir ferit. Ada beberapa

metode yang dapat digunakan untuk memperhalus butir ferit ini, antara lain modifikasi komposisi kimia, normalisasi, deformasi plastis melalui pengerolan terkendali, pendinginan cepat, dan pengerjaan hangat / *warm working*.

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

Proses *warm working* yang dilakukan adalah dengan *warm rolling* atau *ferritic rolling*. Selain itu, dengan adanya proses penghalusan butir diharapkan fenomena inklusi atom hidrogen pada kisi-kisi butir akan semakin sulit dengan demikian meningkatkan ketahanan baja terhadap ancaman retak akibat inklusi hidrogen (*Hydrogen Induced Cracking*). Penelitian ini dilakukan untuk mempelajari perubahan mikrostruktur setelah dilakukan deformasi dengan temperatur canai hangat (*warm rolling* atau *ferritic rolling*) dan pengaruhnya terhadap ketahanan *Hydrogen Embrittlement*.

1.2 Perumusan Masalah

Konsep dari penelitian ini adalah memperoleh sifat baja bebas interstisi (IF Steel) yang lebih baik, khususnya ketahanan korosi dalam lingkungan yang mengandung hidrogen dengan metode *warm rolling*. Hal ini dikarenakan penggunaan *hot working* yang membutuhkan energi panas yang mahal serta *cold working* yang memerlukan *working force* yang tinggi merupakan faktor pemicu

untuk melakukan pengerjaan baja pada temperatur yang lebih rendah atau biasa disebut *warm rolling*^[6].

Masalah yang akan dikaji dalam penelitian ini adalah melihat pengaruh material tidak terdeformasi maupun terdeformasi *multipass* searah 20%-20%-20% dengan temperatur *reheating* 650°C yang dilanjutkan dengan pendinginan es. Terdapat parameter temperatur deformasi yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu material terdeformasi pada suhu 600°C dan 650°C. Kemudian material akan mengalami *hydrogen charging test* untuk mengetahui pengaruh dari besar butir ferit dan sifat mekanis yang dihasilkan pada proses *warm rolling* serta ketahanan korosi akan adanya atom hidrogen pada baja bebas interstisi (*IF Steel*) hasil canai hangat.

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

- a. Menganalisis struktur mikro dan sifat mekanis pada baja bebas interstisi (*IF Steel*) yang telah mengalami proses *warm rolling* pada suhu 600°C dan 650°C.
- b. Studi perbandingan ketahanan korosi pada baja bebas interstisi (*IF Steel*) baik yang telah mengalami *warm rolling* dengan deformasi *multipass* searah 20%-20%-20% yang diikuti pendinginan es maupun tanpa *warm rolling* terhadap pengaruh adanya gas hidrogen pada lingkungan.
- c. Menganalisis dan mengetahui pengaruh besar butir terhadap ketahanan dari *Hydrogen Embrittlement*

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1.4.1 Material

Penelitian ini menggunakan lembaran baja bebas interstisi (*IF Steel*) grade OA0125AT yang merupakan *Deep Drawing Quality*, dengan nomor *coil* 365281. Material ini merupakan standar yang biasanya digunakan untuk spesifikasi baja

enamelling, otomotif, konstruksi, tabung gas, dan jalur pipa untuk minyak dan gas. Biasanya produknya berbentuk lembaran (*sheet*) dan strip.

1.4.2 Parameter Penelitian

Parameter penelitian yang divariabelkan dalam penelitian ini sebagai berikut:

- a. Temperatur Canai
Temperatur canai dilakukan pada temperatur 600⁰C dan 650⁰C
- b. Waktu Tahan
Proses pemanasan ulang (*reheating*) dilakukan pada temperatur 650⁰C selama 15 menit, kemudian ditahan pada temperatur tersebut selama 5 menit, lalu dideformasi pada temperatur 600⁰C dan 650⁰C
- c. Metode Deformasi
Deformasi 60% dilakukan dengan metode *multipass* searah sebesar 20%-20%-20% pada temperatur 600⁰C dan 650⁰C
- d. Media Pendingin
Media pendingin yang digunakan adalah es.

1.4.3 Tempat Penelitian

Proses penelitian dilakukan di beberapa tempat, yaitu :

- a. Pengujian komposisi dilakukan di Laboratorium Metalurgi Krakatau Steel, Cilegon, Bandung
- b. Proses TMCP dilakukan di Laboratorium Teknologi Pengubahan Bentuk Departemen Metalurgi dan Material (DTMM) FTUI.
- c. Preparasi sampel dan pengamatan struktur mikro dilakukan di dua tempat, yaitu Laboratorium HST dan Metalografi DTMM FTUI serta Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT) Serpong
- d. Pengujian korosi *Hydrogen Embrittlement* dilakukan di Laboratorium Korosi Departemen Metalurgi dan Material FTUI.
- e. Pengujian tarik dilakukan di dua tempat, yaitu Laboratorium Metalurgi Fisik DTMM FTUI serta Laboratorium Metalurgi

Krakatau Steel, Cilegon, Bandung

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 karbon (*carbon steel*) adalah salah satu jenis logam paduan besi karbon terpenting dengan persentase berat karbon hingga 2,11%. Umumnya baja karbon diklasifikasikan menjadi: baja karbon rendah (*low carbon steel*), baja karbon menengah (*medium carbon steel*), dan baja karbon tinggi (*high carbon steel*) berdasarkan persentase karbonnya. Jika penambahan elemen-elemen lain selain karbon untuk tujuan-tujuan tertentu cukup signifikan, maka baja diklasifikasikan sebagai baja paduan (*alloy steel*) atau baja paduan rendah (*low alloy steel*)^[7].

Karbon (C) berfungsi sebagai unsur peneras pada logam paduan dengan mencegah dan menghalangi dislokasi bergeser pada kisi kristal (*crystal lattice*)^[8]. Karbon merupakan suatu elemen yang menstabilkan austenit (*austenite stabilizer*) dan meningkatkan rentang pembentukan austenit pada baja. Kandungan karbon dan unsur paduan lainnya akan mempengaruhi sifat-sifat baja yang didapatkan. Dengan penambahan kandungan karbon pada baja dapat meningkatkan kekerasan dan kekuatan tariknya, namun baja akan menjadi getas (*brittle*) dan sulit untuk dilas. Penambahan karbon juga menghasilkan beberapa perubahan penting terhadap fasa. Struktur kristal dari ferit yang mempunyai struktur kristal BCC (*body centered cubic*) dan austenit yang mempunyai struktur kristal FCC (*face centered cubic*) dimodifikasi dengan memasukkan atom karbon pada celah atau interstisi antara atom besi. Ketika batas kelarutan untuk karbon pada austenit terlewati maka karbida besi atau sementit akan terbentuk pada baja.

2.1.1 Baja Karbon Rendah

Baja karbon rendah atau *low carbon steel* merupakan bahan yang sering digunakan dalam aplikasi pengubahan bentuk material karena sifat-sifatnya yang mudah dalam proses pembentukan. Baja karbon rendah memiliki kadar karbon di bawah 0,2%. Dengan jumlah karbon tersebut, maka baja akan memiliki mampu

bentuk yang baik dan energi *rolling* yang relatif tidak besar. Hal ini akan menguntungkan dalam proses produksi.

Mikrostruktur baja karbon rendah 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.

2.2 Interstitial Free Steel

Interstitial Free Steel (IF-Steel) merupakan salah satu jenis baja feritik dengan kadar C yang sangat rendah (*Ultra Low Carbon Steel*), di mana kandungan atom-atom interstisial seperti C, H, O, N sangat rendah. Semakin rendah jumlah atom interstisi yang terlarut dalam baja maka akan semakin rendah pula jumlah dislokasi di struktur kristal baja sehingga baja akan semakin mudah dideformasi^[9].

Semenjak kehadirannya, baja bebas interstisi atau yang lebih populer dengan sebutan *IF Steel* (*Interstitial Free Steel*) telah mulai menggantikan baja karbon rendah sebagai bahan untuk komponen-komponen aplikasi otomotif dan komponen-komponen lain yang memiliki bentuk yang rumit. Karakteristik terpenting baja bebas interstisi (*IF Steel*) adalah tingkat keuletan dan mampu bentuk dalam keadaan dingin yang baik serta tidak mengeras pada saat *ageing* (*non-strain ageing*) yang jauh lebih baik daripada sifat baja karbon pada umumnya. Kombinasi dari kuat luluh yang rendah dan rasio regangan atau koefisien anisotropi normal (r) yang lebih tinggi dibandingkan baja umumnya menyebabkan baja bebas interstisi (IF Steel) mampu dibentuk menjadi komponen-komponen untuk operasi penarikan (*deep drawing*) yang sukar dicapai oleh bahan lain^[9]. Anisotropi adalah kemampuan material yang memperlihatkan sifat tidak sama saat diberikan gaya dari arah yang berbeda. Semakin besar daerah anisotropi, “*drawability*” suatu material akan semakin bagus karena memiliki ketahanan penipisan yang cukup tinggi.

Paduan yang digunakan untuk aplikasi dari baja bebas interstisi (*IF-Steel*) ini bervariasi, antara lain paduan Ti, paduan Ti dan Nb, paduan Nb dan P, dll.

2.2.1 Pengaturan Komposisi Kimia

Komposisi kimia untuk baja yang diharapkan memiliki mampu bentuk yang baik merupakan komposisi dengan kadar C yang sangat rendah (<0.01) sehingga merupakan baja dengan komposisi *ultra low carbon*. Penambahan unsur-unsur paduan mikro Nb dan Ti yang akan mengikat karbon terlarut dan nitrogen sebagai presipitat TiC dan TiN sehingga menghasilkan struktur yang bebas dari interstisi atom C atau lebih dikenal dengan *Interstitial Free Steel (IF Steel)*. Lebih jauh jika dilihat dari kondisi mikro struktur, baja IF didefinisikan sebagai baja yang memiliki fasa ferit mendekati 100 % (fraksi perlit \sim nol), hal ini karena kadar C dan N kurang dari 0.0080 % (80 ppm) dan dilakukan penambahan paduan Ti atau Nb sebagai elemen penstabil^[9]. Berikut tabel komposisi standar dari baja bebas interstisi (*IF Steel*):

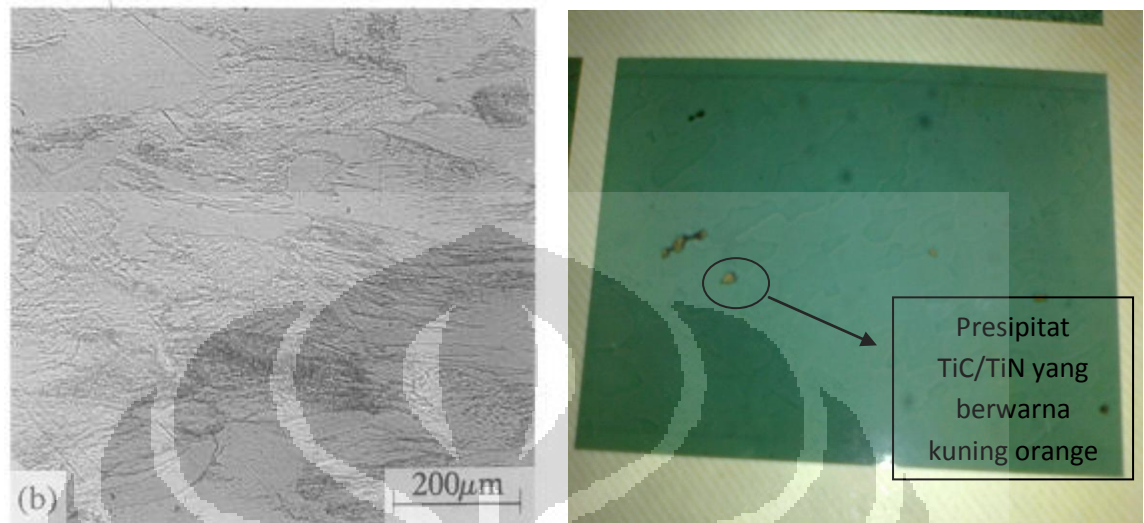
Tabel 2.1 Komposisi Standar dari Baja Bebas Interstisi (*IF Steel*)^[10]

Tipe	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	-

Dalam keadaan matriks yang terbebas dari atom interstisi ini, baja bebas interstisi (*IF Steel*) akan terbebas dari cacat-cacat titik yang merupakan prinsip untuk menghasilkan baja dengan sifat mampu bentuk yang baik. Perubahan bentuk baja pada prinsipnya merupakan pergerakan atom-atom logam dan dalam hal ini dislokasi dalam struktur logam sehingga peranan atom-atom interstisi terhadap pembentukan dislokasi sangat menentukan sifat mampu bentuk logam. Semakin banyak atom interstisi yang bebas, dislokasi akan semakin banyak dan deformasi akan semakin sukar dilakukan.

Untuk mengurangi atom-atom interstisial dalam struktur kristal baja, faktor utama yang harus dilakukan adalah menurunkan kadar C dan N dalam komposisi kimia baja serendah mungkin. Hal ini karena C dan N merupakan

unsur-unsur utama yang banyak digunakan dalam pembuatan baja. Berikut gambar struktur mikro dari baja bebas interstisi (*IF Steel*).



Gambar 2.1 Struktur Mikro Baja Bebas Interstisi, (a) Deformasi 50% pada 500⁰C-800⁰ C dan terdapat microbands^[11], (b) Presipitat TiC/TiN^[2]

Ketidakhadiran atom interstisi dalam keadaan bebas pada struktur matriks ferit pada baja bebas interstisi (*IF Steel*) memberi keistimewaan dalam perilaku deformasi plastis, yaitu hilangnya *yield point strain (Lüders band)*^[2] yang umum terjadi pada baja karbon biasa. *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. Fenomena *strain aging* pada baja karbon sangat dipengaruhi oleh kehadiran atom interstisial C dan N. Disinilah muara konsep pembuatan baja bebas interstisi (*IF Steel*), sejenis baja yang memiliki struktur kristal yang bebas dari semua atom interstisi terlarut agar efek *strain aging* benar-benar dapat dihilangkan dengan sempurna sehingga sifat mampu bentuk akan lebih unggul.

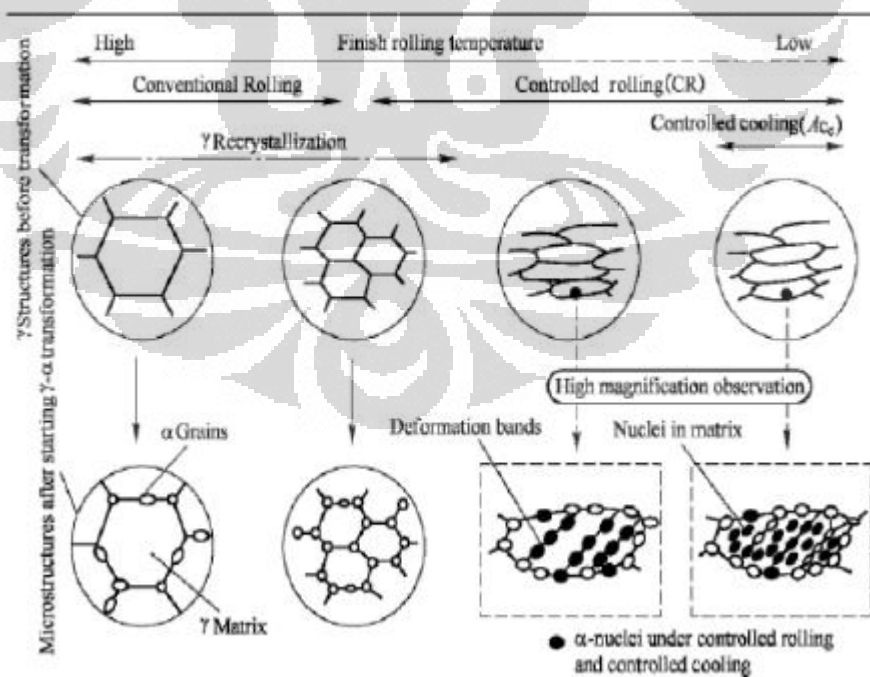
Atom C dan N harus dibuat dalam keadaan “tidak bebas” atau terikat sebagai presipitat, sehingga ditambahkan unsur paduan seperti Ti yang memiliki

afinitas yang tinggi terhadap kedua unsur tersebut untuk membentuk partikel presipitat karbida dan nitride yang stabil^[9].

2.3 Thermo-Mechanical Controlled Process (TMCP)

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

Pada baja TMCP, sifat mekanis (*mechanical properties*) terutama ditentukan melalui kombinasi dari perlakuan mekanis (*mechanical working*), proses pemulihan (*recovery process*), rekristalisasi (*recrystallisation*), dan pertumbuhan butir (*grain growth*)^[12]. Perbedaan mikrostruktur yang dihasilkan oleh pengerolan konvensional dan proses TMCP dapat dilihat pada Gambar 2.2 di bawah ini.



Gambar 2.2 Perbedaan Mikrostruktur Antara proses Canai Konvensional dan Proses TMCP^[12]

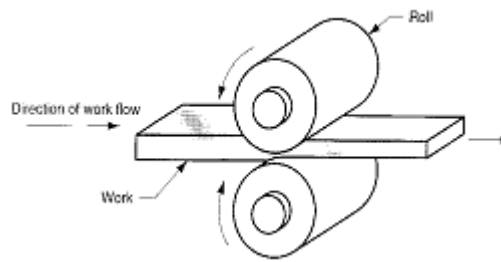
2.4 *Severe Plastic Deformation*

Mekanisme penguatan butir merupakan satu dari beberapa mekanisme yang meningkatkan kekuatan material, akan tetapi tetap menyisakan sejumlah keuletan dan mampu alir. Melalui *severe plastic deformation* (SPD), didapatkan ukuran butir sangat halus (*Ultrafine Grain Sizes*) yang melibatkan regangan plastis sangat besar selama proses deformasi tanpa mengubah dimensi dari benda uji secara signifikan^[13]. *Severe Plastic Deformation* (SPD) adalah pemberian deformasi yang tinggi dan merata pada material melalui pengerolan^[14], ekstrusi tekan, puntir kecepatan tinggi (*high speed torsion*), dan ECAE (*equal channel angular extrusion*). Dari beberapa metode tersebut, ECAE sangat berpotensi untuk diaplikasikan dalam dunia industri karena dapat menghasilkan penghalusan struktur mikro atau sub-mikro

Proses ECAE ini dapat diaplikasikan pada semua logam dengan struktur kristal yang berbeda. Proses ECAE ini memungkinkan penguatan dalam baja bebas interstisi (IF Steel) karena kemampuan penghalusan butirnya. Tidak hanya butir-butir yang dikelilingi oleh sudut batas yang tajam, tetapi juga *subgrain* yang berkontribusi terhadap *strengthening*. Namun demikian, masih banyak hal yang harus diamati dalam proses ini. Diantaranya adalah berapa besar tingkat deformasi, pengaruh jumlah laluan, pengaruh rute, faktor sudut yang dibentuk oleh kedua alur dan sudut kelengkungan.

2.5 *Canai Hangat*

Proses Canai (*rolling*) didefinisikan sebagai reduksi luas area penampang dari logam atau pembentukan umum dari produk logam menggunakan canai yang berputar (*rotating roll*)^[15]. Selama proses canai terjadi proses perubahan bentuk pada benda uji dimana pada saat proses tersebut adanya gaya tekan (*compressive load*) terjadi pengurangan ketebalan dan penambahan panjang akan tetapi massa tetap konstan tidak mengalami perubahan.



Gambar 2.3 Skematik Proses Canai^[16]

Setelah terjadi proses canai, butir-butir dalam material yang sebelumnya *equiaxed* akan terdeformasi menjadi memanjang (*elongated grain*). Secara umum, berdasarkan temperatur pengerjaan proses canai terbagi dua:

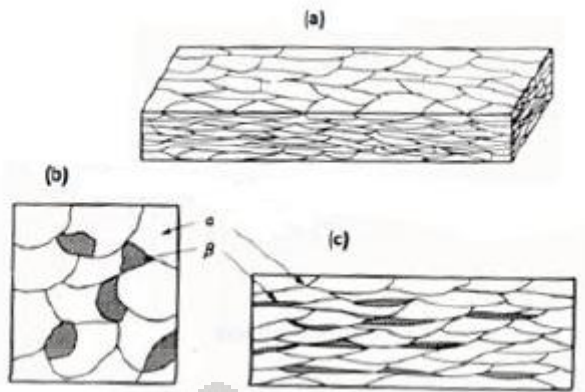
1. Canai dingin (*cold rolling*) yaitu proses canai yang dilakukan dengan menggunakan temperatur ruang atau temperatur di bawah temperatur rekristalisasi material.
2. Canai panas (*hot rolling*) yaitu proses canai yang dilakukan dengan menggunakan temperatur di atas temperatur rekristalisasi dari material.

Karakter pengerjaan dingin sebagai berikut:

- a. Memiliki kekerasan dan kekuatan yang tinggi
- b. Memiliki ketangguhan dan keuletan yang rendah
- c. Struktur butir yang terdiri dari butir yang berdeformasi meregang
- d. Untuk baja karbon rendah, memperlihatkan titik regang yang kontinyu

Sedangkan karakter pengerjaan panas sebagai berikut:

- a. Secara umum lebih halus dan memiliki kekuatan yang rendah
- b. Ketangguhan yang rendah dan keuletan yang tinggi
- c. Struktur butirnya terdiri dari butir yang terekristalisasi *equiaxed*



Gambar 2.4 Transformasi Morfologi Butir Setelah Proses Canai a) *elongated grain* b) sebelum dideformasi (*equiaxed grain*) c) setelah dideformasi (*elongated grain*)^[17]

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

$$\varepsilon = \ln \frac{H_0}{H_f} \quad (2.1)$$

$$\% \text{ Deformasi} = \frac{H_0 - H_f}{H_0} \times 100\% \quad (2.2)$$

Dimana :

ε : regangan yang diberikan

H_0 : tebal awal material (mm)

H_f : tebal akhir material (mm)

Proses TMCP telah berkembang dengan adanya proses yang menggunakan pengerjaan hangat (*warm working*)^[3]. Canai hangat adalah salah satu metode perlakuan terhadap material logam untuk menghasilkan struktur mikro yang halus pada material logam dan paduannya dengan temperatur kerja berada di antara temperatur canai panas (*hot rolling*) dan temperatur canai dingin (*cold rolling*). Kisaran temperatur pengerjaan hangat berada pada 500°C- 800°C^[18]. Berdasarkan *range* temperatur operasi canai hangat ini, setelah terjadi deformasi plastis, material sebagian 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.

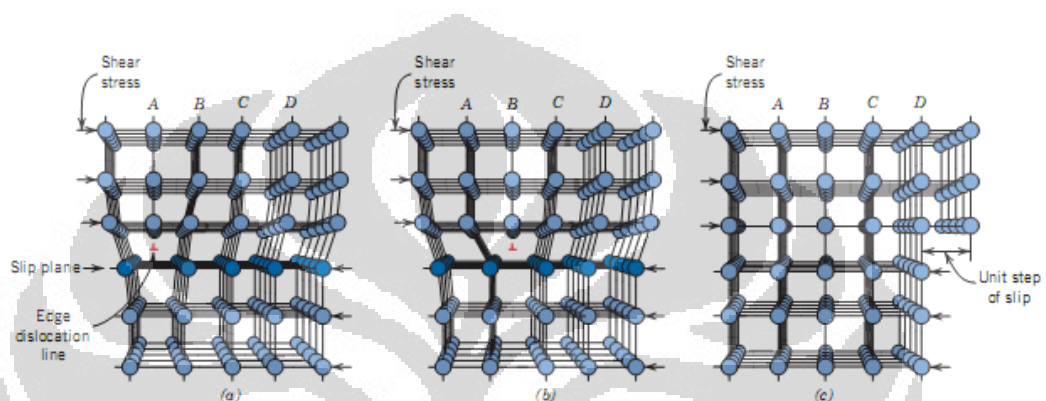
Jika dibandingkan dengan canai panas yang membutuhkan energi panas yang besar dan mahal, proses canai hangat ini dapat menghasilkan material yang mendekati dimensi akhir yang diinginkan^[18]. Selain itu metode ini menghasilkan struktur mikro yang lebih halus dengan sifat mekanis yang tinggi, kualitas permukaan dan pengendalian dimensional yang lebih baik, material yang dibuang akibat proses dekarburisasi atau oksidasi yang lebih rendah^[11]. Sedangkan jika dibandingkan dengan proses canai dingin, metode canai hangat membutuhkan *deformation forces* yang lebih rendah, dapat diaplikasikan pada baja dengan *range* yang luas, memberikan rasio deformasi yang lebih besar, menghasilkan deformasi yang lebih seragam terhadap daerah transversal dan menghasilkan struktur mikro dengan tegangan sisa yang lebih rendah^[19]. Selama canai hangat pada baja, berbagai macam perubahan mikrostruktur dapat terjadi sehingga merubah sifat-sifat mekanik pada baja^[20].

2.6 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Proses TMCP

2.6.1 Pengaruh Deformasi Plastis

Deformasi dapat dilihat sebagai perubahan bentuk dan ukuran secara makroskopis. Perubahan tersebut dibedakan atas deformasi elastis dan deformasi plastis. Sedangkan hakekat proses pembentukan logam adalah mengusahakan deformasi plastis yang terkontrol, namun dalam berbagai hal pengaruh deformasi elastis cukup besar sehingga tidak dapat diabaikan begitu saja^[21]. Dari penjelasan awal diatas, dapat dijelaskan mekanisme deformasi logam dalam kaitannya dengan teknik pembentukan logam, yaitu perubahan bentuk secara mikro, baik deformasi elastis maupun deformasi plastis, disebabkan oleh bergesernya kedudukan atom-atom dari tempatnya yang semula^[22].

Pada deformasi elastis, adanya tegangan akan menggeser atom-atom ke tempat kedudukannya yang baru, dan atom-atom tersebut akan kembali ke tempatnya yang semula bila tegangan tersebut diiadakan. Sedangkan pada deformasi plastis, atom-atom yang bergeser menempati kedudukannya yang baru dan stabil, meskipun beban (tegangan) dihilangkan, atom-atom tersebut tetap berada pada kedudukan yang baru. Model pergeseran atom-atom tersebut disebut slip^[8].



Gambar 2.5 Pergerakan Dislokasi^[8]

Deformasi menyebabkan kenaikan energi dalam pada logam, yaitu dalam bentuk kerapatan dislokasi yang lebih tinggi. Deformasi plastis sering diklasifikasikan sebagai perlakuan yang selalu dilakukan pada pengerjaan panas atau pengerjaan dingin terhadap logam.

Deformasi plastis berhubungan dengan pergerakan sejumlah dislokasi^[8]. Berdasarkan proses yang dilakukan, deformasi plastis yang terjadi merupakan hasil dari pergerakan dari salah satu kristal yang disebut dislokasi.

Proses terjadinya deformasi plastis melalui pergerakan dislokasi merupakan mekanisme *slip*. *Slip* merupakan mekanisme terjadinya deformasi yang paling sering dijumpai. *Slip* menggambarkan pergerakan yang besar pada bagian kristal yang relatif terhadap yang lain sepanjang bidang kristalografi dan dalam arah kristalografi. *Slip* terjadi bila sebagian dari kristal tergeser relatif terhadap bagian kristal yang lain sepanjang bidang kristalografi tertentu. Bidang tempat terjadinya slip disebut bidang *slip* (*slip plane*) dan arah pergeserannya pada umumnya pada bidang slip disebut arah *slip* (*slip direction*). *Slip* terjadi pada bidang *slip* dan arah *slip* yang paling padat atom, karena untuk menggeser atom

pada posisi ini memerlukan energi paling kecil^[8]. Apabila *slip* terjadi diseberang butir kristal maka *slip* akan diteruskan ke butir 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.

Dari penjelasan diatas, terdapat hubungan deformasi dengan dislokasi:

1. Akibat adanya tegangan, maka dislokasi akan bergerak menuju permukaan luar, sehingga terjadi deformasi
2. Selama bergerak, dislokasi tersebut bereaksi satu dengan lainnya. Hasil reaksinya ada yang mudah bergerak dan ada pula yang sukar bergerak. Hasil reaksi yang sukar bergerak justru akan berfungsi sebagai sumber dislokasi baru, sehingga kecepatan dislokasi akan bertambah.
3. Akibat meningkatnya kerapatan dislokasi, maka gerakan dislokasi akan lebih sulit karena banyaknya hasil yang sukar bergerak. Akibat nyata dari sukarnya gerakan dislokasi adalah meningkatnya kekuatan logam.

2.6.2 Pengaruh Temperatur Terhadap Besar Butir Ferit

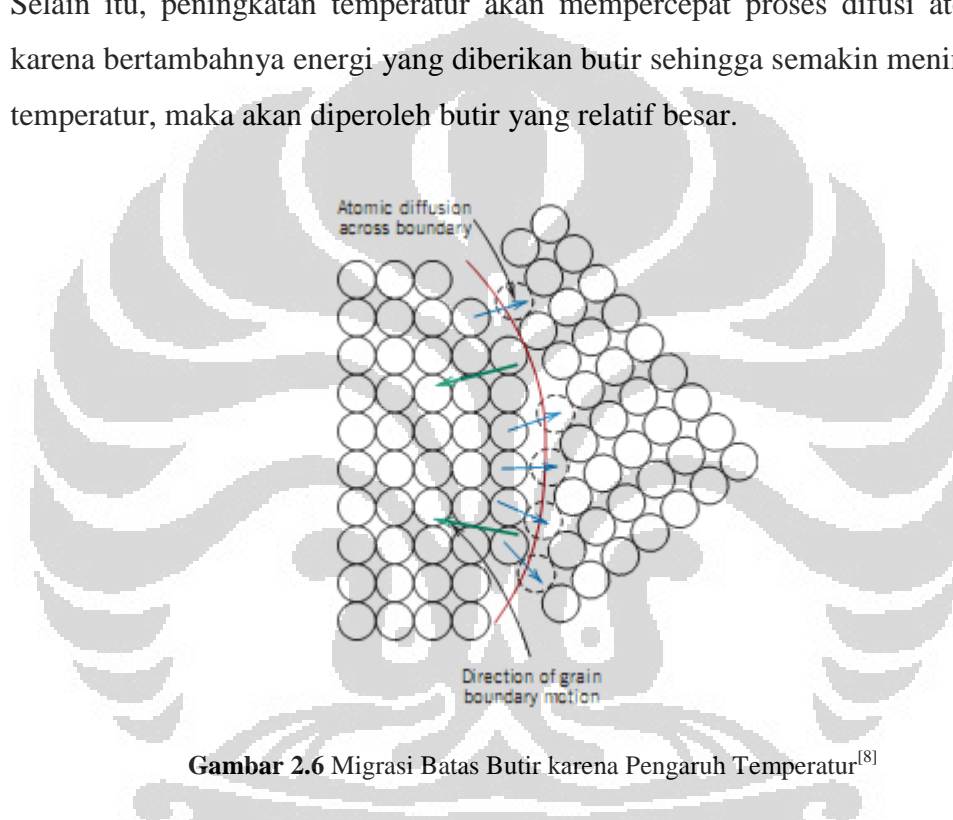
Perubahan sifat mekanis akibat deformasi juga bergantung pada temperatur pemanasan^[8]. Prinsip dasarnya ialah bahwa pemanasan terhadap benda kerja yang telah mengalami deformasi akan menurunkan kerapatan dislokasinya. Pemanasan pada daerah yang dibawah temperatur rekristalisasi akan menyebabkan dua hal :

1. Terjadinya gerakan dislokasi yang disebut gerakan memanjat (climb)^[22].
2. Adanya pengaturan kembali susunan dislokasi yang tadinya kurang teratur menjadi lebih teratur. Peristiwa ini disebut poligonisasi.

Kekuatan dan keuletan logam yang telah dideformasi dapat diukur dengan mengubah kondisi pemanasannya. Pada operasi pengerolan, keseragaman suhu

sangat penting karena berpengaruh pada aliran logam dan plastisitas^[22]. Proses pengerjaan panas dengan pengerolan ini biasanya digunakan untuk membuat rel, bentuk profil, pelat dan batang.

Perubahan sifat mekanik material dalam proses pengerjaan panas, dikarenakan temperatur dan waktu pemanasannya. Ukuran butir akan bertambah besar karena adanya migrasi batas butir^[8]. Migrasi batas butir ini terjadi karena adanya difusi atom dalam butir menuju batas butir yang lain seperti pada gambar. Selain itu, peningkatan temperatur akan mempercepat proses difusi atom-atom karena bertambahnya energi yang diberikan butir sehingga semakin meningkatnya temperatur, maka akan diperoleh butir yang relatif besar.



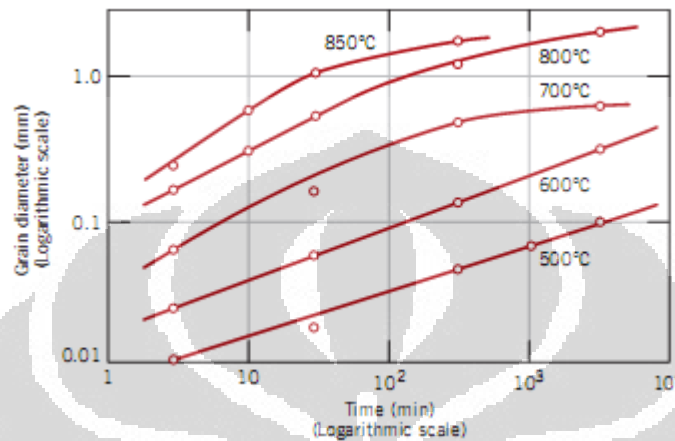
Gambar 2.6 Migrasi Batas Butir karena Pengaruh Temperatur^[8]

2.6.3 Pengaruh Waktu Tahan Terhadap Ukuran 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 mengurangi energi bebasnya dengan cara mengurangi 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^[8]. Oleh sebab itu waktu tahan akan memberikan kesempatan atom-atom tersebut untuk bergabung.

Sedangkan waktu tahan akan memberikan kesempatan lebih besar pada atom-atom untuk bergabung sebagaimana dibuktikan oleh gambar 2.7.



Gambar 2.7 Pengaruh Waktu Tahan Serta Temperatur Terhadap Ukuran Butir^[8]

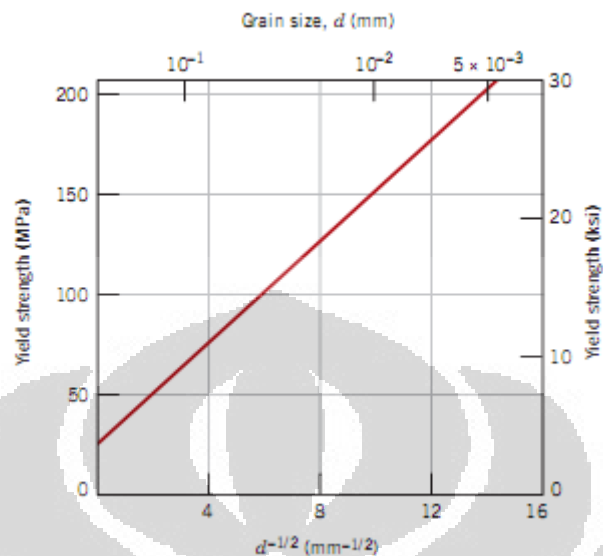
2.6.4 Pengaruh Besar Butir Terhadap Sifat Mekanis Material

Ukuran butir atau rata-rata diameter butir pada logam polikristalin akan mempengaruhi sifat-sifat mekanik logam tersebut. Butir yang lebih halus memiliki sifat lebih keras dan kuat dibandingkan butir yang lebih kasar karena butir yang lebih halus memiliki total batas butir yang lebih banyak untuk menghalangi pergerakan dislokasi. Pengaruh ukuran butir terhadap kekuatan suatu material berdasarkan persamaan Hall-Petch adalah sebagai berikut^[8]:

$$\sigma_y = \sigma_0 + K_y d^{-1/2} \quad (2.3)$$

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 butir yang sangat besar dan dengan butir yang amat sangat halus. Untuk sebagian besar material, kekuatan luluh (yield strength) mempunyai hubungan dengan ukuran

butir. Hal ini ditunjukkan oleh gambar 2.8.



Gambar 2.8 Pengaruh Besar Butir Terhadap Kekuatan Luluh^[8]

Gambar 2.8 menunjukkan bahwa dengan semakin kecil ukuran butir, maka kekuatan luluh material akan semakin tinggi. Selain itu, kekuatan material (σ_{TS}) sebanding dengan kekerasannya sesuai dengan persamaan^[8]:

$$\sigma_{TS} \text{ (MPa)} = 3.45 \times \text{HB} \quad (2.4)$$

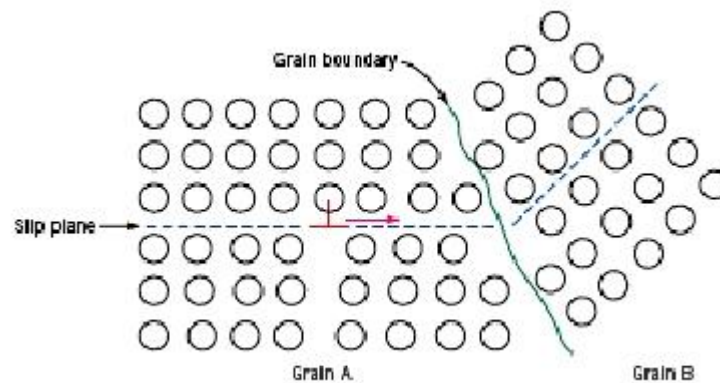
$$\sigma_{TS} \text{ (Psi)} = 500 \times \text{HB} \quad (2.5)$$

Keterangan:

σ_{TS} = Kekuatan Tarik Maksimum

2.6.5 Mekanisme Penguatan dan Penghalusan Butir

Sifat mekanis dari suatu material sangat dipengaruhi oleh ukuran butir atau diameter butir rata-rata dalam logam polikristalin. Pada umumnya, butir yang satu dengan lainnya memiliki orientasi yang berbeda. Hal ini berarti karena perbedaan orientasi tersebut maka akan timbul batas butir. Peristiwa deformasi plastis, misalnya *slip* atau pergerakan dislokasi berada dalam butir, dapat dilihat pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 Ilustrasi Batas Butir dan Pergerakan Dislokasi^[8]

Pada gambar 2.9 dapat dilihat bahwa pergerakan dislokasi akan terhalang pada batas butir. 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^[12].

Batas butir bertindak sebagai penghalang pergerakan dislokasi karena dua alasan yaitu sebagai berikut^[8]

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 sebelah lainnya harus mengubah arah pergerakannya. Perbedaan orientasi tersebut juga mengakibatkan tingkat energi yang berbeda pula. Hal tersebut semakin sulit ketika misorientasi kristalografinya meningkat.

Penguatan baja dengan dislokasi, presipitat dan kandungan perlit dari struktur mikro ferit memang dapat meningkatkan kekuatan tetapi juga akan meningkatkan temperatur transisi sehingga menurunkan keuletan baja. Namun dengan butir yang lebih halus akan meningkatkan tekanan perpatahan ulet dan menurunkan temperatur transisi ulet-getas sehingga penghalusan butir tidak hanya

meningkatkan kekuatan atau kekerasan tapi juga meningkatkan keuletan pada baja. Ukuran butir dapat diatur dengan laju solidifikasi dari fasa cair atau melalui deformasi plastis yang diikuti dengan perlakuan panas tertentu.

2.6.6 Pengaruh Pendinginan Cepat Pada Sifat Mekanis Baja

Tujuan pendinginan cepat adalah untuk mendapatkan struktur mikro, kekerasan, kekuatan maupun ketangguhan yang kita inginkan dengan tetap meminimalisasi tegangan sisa, distorsi dan kemungkinan terjadinya retak/*cracking*^[23].

Pemilihan media pendinginan yang tepat tergantung pada kemampukerasan/*hardenability* material, ketebalan dan geometri benda, serta kecepatan pendinginan untuk mendapatkan struktur mikro yang diinginkan. Media pendingin 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 pendinginan cepat, 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 pendinginan. Inilah yang menyebabkan kecepatan pendinginan antara di dalam dan di permukaan benda berbeda tergantung dari ketebalan dan geometri bentuknya^[23].

2.6.7 Laju Regangan (*Strain Rate*)

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

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

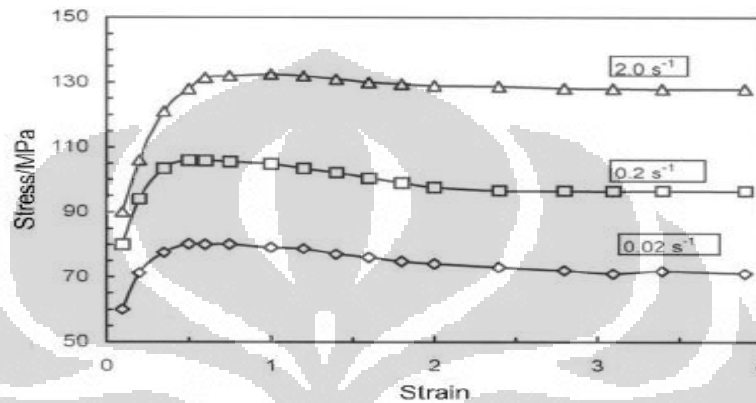
Dimana:

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

Q : Energi aktivasi deformasi (J/mol)

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

T : Temperatur Absolut (K)



Gambar 2.10 Kurva *Stress-Strain* dengan Berbagai Strain Rate pada Pengerolan Suhu $750^{\circ}C$ ^[24]

Pada gambar diatas dapat dijelaskan bahwa semakin tinggi laju regangan pada pengerolan hangat ($750^{\circ}C$) maka kekuatan dari material yang didapat akan lebih baik. Berdasarkan pada persamaan^[25]:

$$\dot{\epsilon} = \frac{V/R}{\sqrt{r}} \times \sqrt{\frac{R}{H_0}} \times \ln \left[\frac{1}{(1-r)} \right] \quad (2.7)$$

Keterangan:

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

V = kecepatan roll (133.33 mm/s)

R = jari-jari roll (52 mm)

r = Deformasi

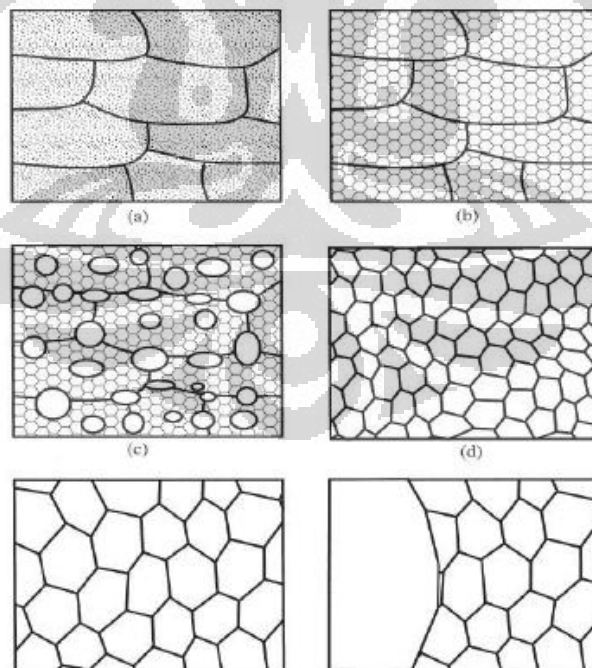
H_0 = tebal awal (mm)

Maka semakin besar deformasi (dengan meningkatnya Δh) maka laju

regangan semakin meningkat, yang artinya semakin tinggi deformasi berarti semakin banyak penumpukan dislokasi (semakin meningkatnya *strain hardening*), maka kekerasan akan semakin meningkat.

2.7 Pemulihan, 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^[8]. Beberapa sisa energi internal disimpan dalam material sebagai energi regangan (*strain energy*), yang mana berhubungan dengan area tegangan (*tensile*), tekan (*compressive*), dan geser (*shear*) disekeliling dislokasi yang baru terbentuk. Kecenderungan sifat penyimpanan energi internal tersebut dapat dihilangkan setelah tahap pengerjaan dingin dengan perlakuan panas seperti proses anil (*annealing*). Penghilangan energi tersebut dilakukan dengan dua proses berbeda yang terjadi pada temperatur yang dinaikkan yang kemudian diidentifikasi sebagai proses rekoveri dan rekristalisasi, yang juga dimungkinkan untuk pertumbuhan butir.



Gambar 2.11 Skematik Proses Anil a) Butir yang Terdeformasi. B) Rekoveri c) Rekristalisasi Sebagian d) Rekristalisasi Penuh e) Pertumbuhan Butir f) *Abnormal Grain Growth*^[26]

2.7.1 Pemulihan (*recovery*)

Proses pemulihan merupakan proses yang pertama terjadi ketika material yang terdeformasi dipanaskan ke temperatur tinggi. Pemulihan (*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^[26]. Selama proses pemulihan (*recovery*), sifat fisik dan mekanik dari baja pengerjaan dingin akan kembali seperti sebelum dilakukan pengerjaan dingin^[20]. Perubahan mikrostruktur selama pemulihan (*recovery*) relatif homogen dan biasanya tidak mempengaruhi batas butir material yang terdeformasi. Perubahan mikrostruktur dari material selama tahapan pemulihan (*recovery*) ini tidak melibatkan pergerakan batas butir dengan sudut yang besar.

2.7.2 Rekristalisasi

Pada saat pemulihan (*recovery*), tidak semua dislokasi menghilang dan ketika tahap pemulihan (*recovery*) akan berakhir, pembentukan inti dari butir baru akan mulai terjadi dengan memanfaatkan energi internal yang masih tersimpan setelah tahap pemulihan (*recovery*). Proses ini disebut rekristalisasi. Rekristalisasi merupakan proses transformasi nukleasi dan pertumbuhan butir. Rekristalisasi dalam proses laku panas merupakan proses aktivasi termal dalam perubahan mikrostruktur dengan jalan pembentukan butir baru bebas regang yang terjadi karena adanya penggabungan sub butir. Inti dari butir baru yaitu bergabungnya sub-butir adalah dengan melalui cacat mikrostruktur seperti permukaan batas butir dan inklusi^[22]. Butir yang baru tumbuh merupakan butir yang bebas regangan (*strain-free*) dan terikat dengan batas butir bersudut besar yang memiliki mobilitas sangat tinggi yang akan menyapu semua jejak dari butir yang terdahulu. Sehingga proses rekristalisasi mengarah kepada pembentukan formasi butir yang bebas energi internal dalam material yang telah mengalami proses pengerjaan dingin^[20].

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 dinginnnya tinggi, semakin kecil energi termal yang digunakan, berarti semakin rendah temperatur dari rekristalisasi. Butir yang baru merupakan butir yang bebas regangan sehingga efek pengerasan dari pengerjaan dingin akan menghilang. Hal tersebut akan menyebabkan material memiliki kekuatan dan kekerasan yang sama sebelum dilakukan pengerjaan dingin.

Faktor yang paling penting yang mempengaruhi proses rekristalisasi pada logam dan paduannya adalah ; (1) besaran deformasi, (2) temperatur, (3) waktu, (4) besar butir awalan / *initial grain size*, dan (5) komposisi logam atau paduan^[8].

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, temperature *annealing*, waktu tahan dan komposisi dari material. Ini didasarkan pada hukum rekristalisasi^[21]. Rekristalisasi secara kinetiknya dapat dibagi menjadi dua yaitu rekristalisasi dinamis dan statis.

2.7.2.1 Rekristalisasi Dinamis

Proses rekristalisasi yang terjadi saat material sedang dideformasi disebut rekristalisasi dinamis. Kombinasi antara proses defomasi plastis dan pemanasan memicu terjadinya rekristalisasi. 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 Proses ini dipengaruhi faktor – faktor antara lain regangan, kecepatan regangan dan temperatur, seperti yang telah diteliti oleh Zener-Hollomon^[24].

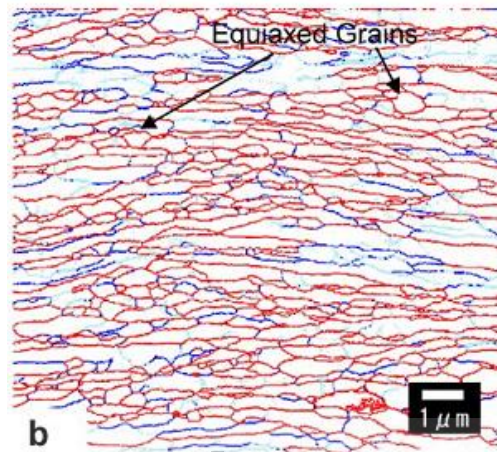
Secara umum ada enam faktor yang mempengaruhi rekristalisasi. yaitu:

1. Banyaknya deformasi terdahulu.
2. Temperatur.
3. Waktu.
4. Ukuran butiran intern.
5. Komposisi.

6. Banyaknya pemulihan atau poligonisasi sebelum rekristalisasi.

Sedangkan secara ringkas hubungan variabel di atas tadi dengan proses rekristalisasi dapat disusun sebagai berikut:

1. Diperlukan sejumlah kecil deformasi untuk menyebabkan rekristalisasi.
2. Makin kecil tingkat deformasi maka makin tinggi temperatur rekristalisasinya.
3. Memperpanjang waktu anil berarti menurunkan temperatur rekristalisasi. Tetapi temperatur jauh lebih penting daripada waktu. Penggandaan waktu pelunakan kira-kira setara dengan mempertinggi temperatur anil dengan 10°C .
4. Ukuran terakhir butir terutama tergantung pada tingkat deformasi dan kurang tergantung pada temperatur pelunakan. Makin besar tingkat deformasi dan makin rendah temperatur pelunakan, makin kecil ukuran butiran yang direkristalisasi.
5. Makin besar ukuran butir asli, makin besar banyaknya pengerjaan dingin yang perlu untuk menghasilkan temperatur rekristalisasi yang setara.
6. Temperatur rekristalisasi turun dengan meningkatnya kemurnian logam. Perpaduan larutan padat yang ditambahkan selalu menaikkan temperatur rekristalisasi.
7. Banyaknya deformasi yang perlu untuk menghasilkan perilaku rekristalisasi yang meningkat bersamaan dengan naiknya temperatur kerja.
8. Untuk mengurangi penampang melintang tertentu, pada proses pengolahan logam seperti roll, penarikan dan sebagainya, menghasilkan deformasi yang berhasilguna yang agak berbeda. Karena itu perilaku rekristalisasi yang indentik mungkin tidak diperoleh.



Gambar 2.12 Butir yang Menunjukkan Terjadinya Rekristalisasi Dinamis Pada Suhu 450°C ^[27]

2.7.2.2 Rekristalisasi Statis

Rekristalisasi statis terjadi sesaat setelah material mengalami deformasi. Sama seperti proses rekristalisasi dinamis, pada proses rekristalisasi statis juga terbentuk nuklei, hanya saja pembentukan tersebut terjadi setelah deformasi. Dengan adanya temperatur yang tinggi (diatas temperatur rekristalisasi dari material), maka proses munculnya nuklei pada batas butir dapat terjadi dan proses rekristalisasi dapat berlangsung.

2.7.3 Pertumbuhan Butir

Setelah proses rekristalisasi selesai, butir dengan bebas regangan selanjutnya akan tumbuh jika spesimen baja dibiarkan pada temperatur yang tinggi. Pertumbuhan butir dimulai dengan bermigrasinya batas butir dengan lambat. Ukuran butir meningkat dan menyeragam. Hal ini merupakan pertumbuhan butiran normal. Dalam kondisi tertentu sebagian butiran tumbuh dengan cepat dan mengorbankan butiran yang lain. Gejala ini merupakan pertumbuhan butiran yang berlebihan atau abnormal^[28]. Energi penggerak pertumbuhan butir normal berasal dari energi simpanan yang berasosiasi dengan batas butir. Ketika ukuran butiran meningkat maka total luas batas butiran akan

berkurang, akibatnya energi logam berkurang. Sedangkan yang abnormal menggunakan energi permukaan.

2.8 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 di dalam butir mempunyai densitas dislokasi sangat tinggi^[29]. Densitas dislokasi yang sangat tinggi mengakibatkan dislokasi menjadi sulit bergerak sehingga material sulit dideformasi dan kekerasannya meningkat^[30]. Densitas dari *deformation band* akan meningkat jika temperatur deformasi diturunkan^[31].

2.9 Sub butir

Pembahasan mengenai sub butir 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.

Dengan proses TMCP berupa warm rolling, cenderung terbentuk sub butir yang diindikasikan dengan adanya *microbands* didalam butir terelongasi dengan arah sekitar +35 maupun -35 terhadap arah rolling. Akan tetapi, arah dari *microbands* ini tidak terpengaruh pada temperatur dan *strain*.

Pada semua temperatur, dimana mulai deformasi dengan 5% reduksi ketebalan, *microbands* tampak di pada arah yang berbeda antara butir satu dengan lainnya.^[11]. Sedangkan penampakan *microbands* itu sendiri bergantung pada temperatur dan *strain rate*^[11]. Semakin tinggi temperatur dan *strain rate*, maka *microbands* yang dihasilkan juga akan semakin jelas. Proses TMCP dan warm

rolling ini cenderung terbentuknya *subgrain*.

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

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

Proses rekoveri yang disertai dengan pembentukan *subgrain* ini juga dikenal dengan poligonisasi^[32]. 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.

2.10 Hydrogen Induced Cracking Pada Baja Bebas Interstisi

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

Penelitian sebelumnya^[6] juga menyatakan bahwa waktu jenuh serta besar konsentrasi hidrogen pada baja bergantung kepada prosedur *hydrogen charging*

dan material itu sendiri. Dengan densitas arus, lamanya proses *charging*, serta konsentrasi larutan yang lebih besar, akan semakin besar pula konsentrasi hidrogen yang terdifusi. Inisiasi serta propagasi *microcraks* pada penelitian Samerjit ditentukan berdasarkan mekanisme penggetasan hidrogen, yakni teori dekohesi dan tekanan hidrogen. Selain itu, hidrogen memiliki pengaruh yang signifikan terhadap *ductility* baja. *Ductility* dari baja akan menurun karena adanya atom hidrogen^[6]. Dengan ataupun tanpa adanya tegangan eksternal, hidrogen dapat menginduksikan terjadinya *crack* ataupun *microcrack* kemudian berlanjut kepada perambatan *crack* yang cepat. *Microcracks* karena adanya atom hidrogen juga dapat menurunkan nilai modulus elastis baja^[6]. Kerusakan dan levelnya tergantung pada beberapa faktor yang meliputi^[33] :

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. Besar 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]. Pengurangan kadar sulfida mencapai dibawah 50 ppm mempunyai pengaruh signifikan dan meningkatkan ketahanan pada sebagian

besar baja karbon dan *low alloy steel*. HIC yang dipengaruhi sulfida dapat dikurangi dengan mengatur kadar pH menjadi diatas 8. Selain itu pengurangan kelembaban dari aliran gas H₂S dapat mengurangi proses penggetasan. Penggunaan inhibitor juga dapat mengurangi generasi hidrogen pada permukaan logam dan dapat menghambat mitigasi kerusakan akibat hidrogen^[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^[34] :

1. Bentuk dari hidrogen yang dapat menimbulkan kerusakan pada logam seperti atom hidrogen (H), gas hidrogen (H₂), dan jenis gas lainnya.
2. Sumber hidrogen yang berasal dari proses elektrokimia (proteksi katodik ataupun elektroplating), gas hidrogen pada atmosfer, H₂S dan jenis-jenis zat kimia lainnya.
3. Ada atau tidaknya tegangan pada material.

2.11. Mekanisme Difusi Atom Hidrogen kedalam Logam

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

1. Model Tekanan

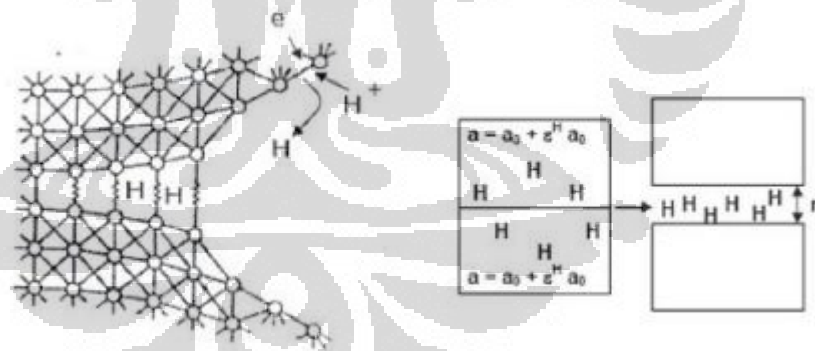
Model ini berhubungan dengan difusi atom hidrogen kedalam logam dan terakumulasi pada cacat atau *void* didalam material. Akibat akumulasi atom hidrogen pada suatu cacat ataupun *void* maka atom hidrogen ini akan kembali membentuk molekul hidrogen yang menghasilkan tekanan yang besar. Tekanan yang dihasilkan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

hidrogen menjadi molekul dapat menginisiasikan terjadinya *crack* atau retakan. Model ini sesuai dengan pembentukan *blistering*.

2. Model Dekohesi

Hidrogen yang larut akan menurunkan gaya kohesi antar atom logam^[36]. Model ini sangat cocok untuk menjelaskan fenomena penggetasan pada patah getas dengan modulus pembelahan butir (*cleavage*) ataupun patah intergranular karena pada model ini tidak terjadi deformasi lokal pada material tersebut.

Pada saat hidrogen masuk kedalam logam maka ia akan menempati kisi dan akan memperlemah gaya kohesi antar atom. Konsentrasi hidrogen yang masuk kedalam logam apabila mencapai batas kritisnya maka akan memperlemah ikatan antar atom logamnya akibat distorsi kisi yang terjadi antar atom logam. Gaya kohesi atau gaya tarik-menarik antar logam akan menurun bila jarak antar atomnya semakin jauh. Masuknya atom hidrogen

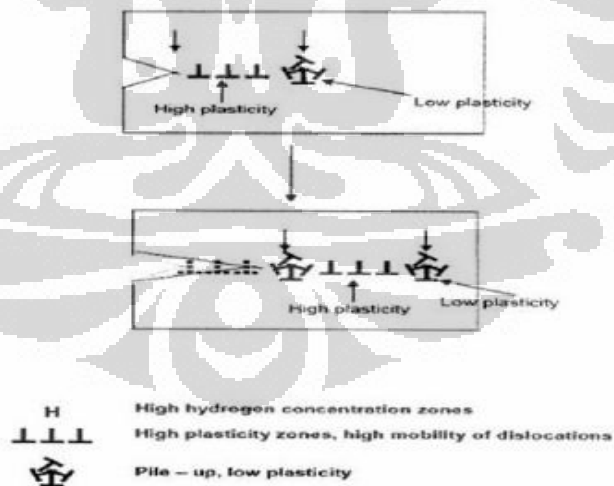


Gambar 2.13 Model Dekohesi^[36]

kedalam kisi antar atom akan memperbesar jarak antar kisi sehingga bila material diberikan beban yang akan memperbesar jarak antar atom pada kisi logam akan membuat gaya kohesi logam menjadi lebih lemah dan akan menyebabkan material patah getas.

3. Model Plastis

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



Gambar 2.14 Model Plastis^[36]

2.12. 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^[37]. Penggetasan hidrogen terjadi dengan beberapa cara namun yang paling umum adalah melalui aplikasi tegangan tarik dan kelarutan hidrogen di dalam material.

Hydrogen Induced Cracking (HIC) merupakan salah satu bentuk *hydrogen embrittlement* yang terjadi akibat adanya hidrogen yang berdifusi. Bentuk perputahan dari HIC dapat transgranular dan intergranular dan biasanya memiliki ujung perputahan yang tajam dengan sedikit percabangan dan memiliki morfologi patah *cleavage* pada permukaannya^[38].

1. *Loss in Tensile Ductility and Other Mechanical Properties*^[36]

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

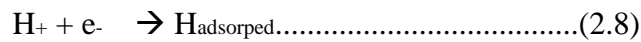
2. *Hydrogen Stress Cracking*^[36]

Atom hidrogen (H) yang berdifusi ke dalam logam dan berekombinasi menjadi molekul hidrogen (H₂) akan menghasilkan tekanan yang tinggi. Tekanan ini akan menginisiasi fenomena pelepuhan (*blistering*). Dengan kombinasi adanya atom hidrogen dan pemberian pembebanan atau adanya tegangan sisa akan mengakibatkan cacat *blistering* yang saling terhubung. Cacat ini akan berkembang seiring dengan pemberian tegangan sampai terjadi kerusakan pada logam.

3. *Hydrogen Environmental Embrittlement*^[36]

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

a) Pada katoda akan terjadi reaksi evolusi hidrogen :

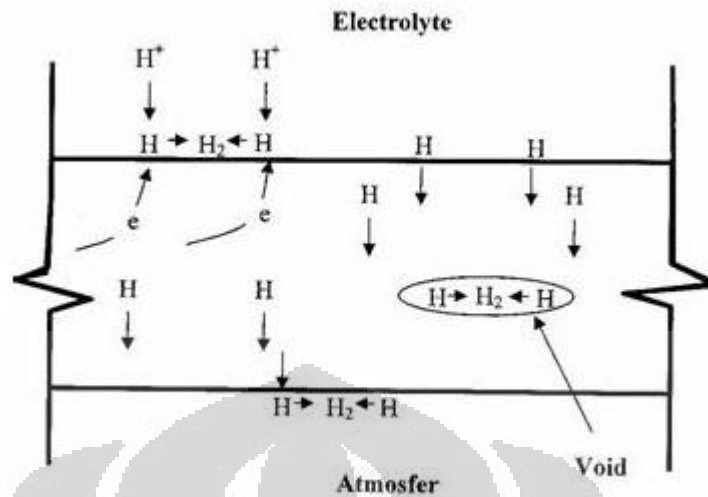


b) Penggunaan proteksi katodik yang overpotensial pada pengendalian korosi.

2.13 Cacat Dalam

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

1. *Blistering*, merupakan formasi atau gabungan molekul hidrogen pada bagian cacat dalam logam seperti batas butir ataupun inklusi yang menyebabkan kerusakan akibat tekanan tinggi yang terbentuk dari kombinasi hidrogen didalam logam. Pada gambar 2.15 dapat dilihat suatu penampang yang terekspos larutan elektrolit pada bagian dalamnya dan pada bagian luar terekspos atmosfer. Masuknya hidrogen dari bagian dalam sebagai hasil dari proses proteksi katodik ataupun korosi menyebabkan ketersediaan hidrogen di permukaan logam. Difusi atom hidrogen ke dalam permukaan logam dan berekombinasi kembali membentuk molekul hidrogen menuju suatu *void* yang dapat menghasilkan tekanan yang sangat besar. Tekanan yang dihasilkan bisa mencapai ribuan atmosfer dan dapat menyebabkan kegagalan material. Mekanisme *hydrogen blistering* dapat digambarkan secara skematik pada gambar 2.15 berikut ini :



Gambar 2.15 Skema Mekanisme *Hydrogen Blistering*^[32]

2. Hydrogen Attack

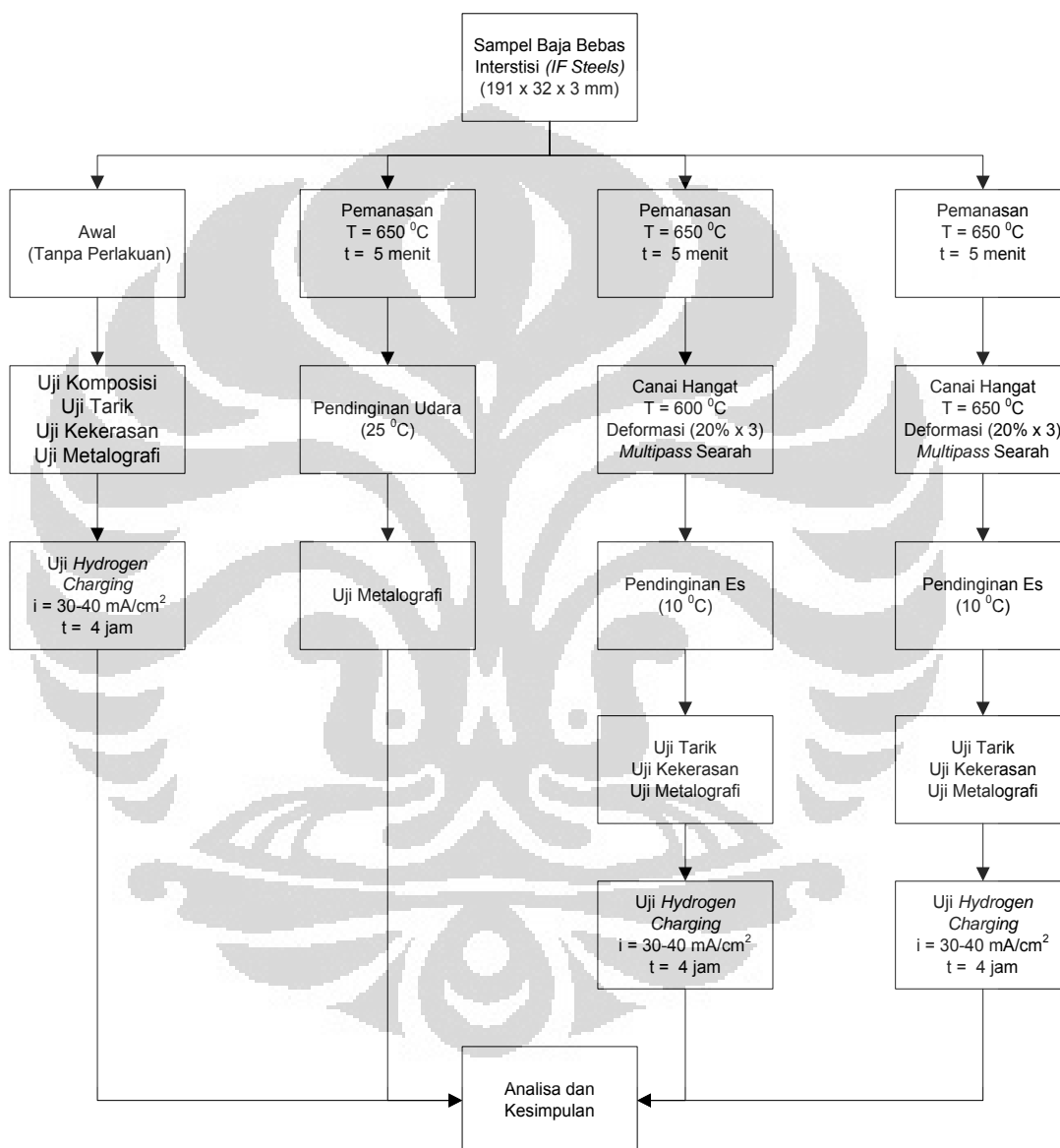
Material logam yang bertemu langsung dengan hidrogen pada kondisi temperatur dan tekanan yang tinggi akan mudah terserang oleh hidrogen. Difusi atom hidrogen pada logam dan kemudian bereaksi dengan karbon yang berasal dari metana pada batas butir akan menghasilkan *void* pada bagian dalam logam. Tekanan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

3. Porositas

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

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alir Benda Uji

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat

1. Mesin Roll dengan kapasitas 20 ton
2. Dapur Pemanas / *Oven Carbolite*
3. *Furnace Portable*
4. Pengatur temperatur dapur (*controller*)
5. Termokopel
6. Kawat termokopel tipe K, diameter 2 mm.
7. Mesin Komputer Pengukur Temperatur
8. *Universal Testing Machine*, Servopulser Shimadzu, kapasitas 30 ton
9. Mesin Uji Kekerasan Vickers
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

3.2.2 Bahan

1. *Sheet* (Baja Karbon Bebas Interstisi)
2. Resin dan *hardener*
3. Kertas ampelas Grid #120, #240, #400, #600, #800, #1000, #1200, dan #1500
4. Titanium Dioksida (TiO_2)
5. Kain Beludru
6. Zat Etsa Kimia : Larutan Alkohol 96% dan larutan HNO_3
7. Larutan H_2SO_4

8. Thiourea $\text{CS}[\text{NH}_2]_2$

3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Pemilihan Material

Penelitian diawali dengan pemilihan material sampel uji berdasarkan relevansi dengan literatur. Sampel uji yang digunakan adalah baja bebas interstisi (IF Steel) berupa lembaran *grade* OA0125AT yang merupakan *Deep Drawing Quality*, dengan nomor *coil* 365281. Pada tahap awal, uji komposisi material dilakukan di Krakatau Steel dengan menggunakan *Optical Emission Spectroscopy* (OES).

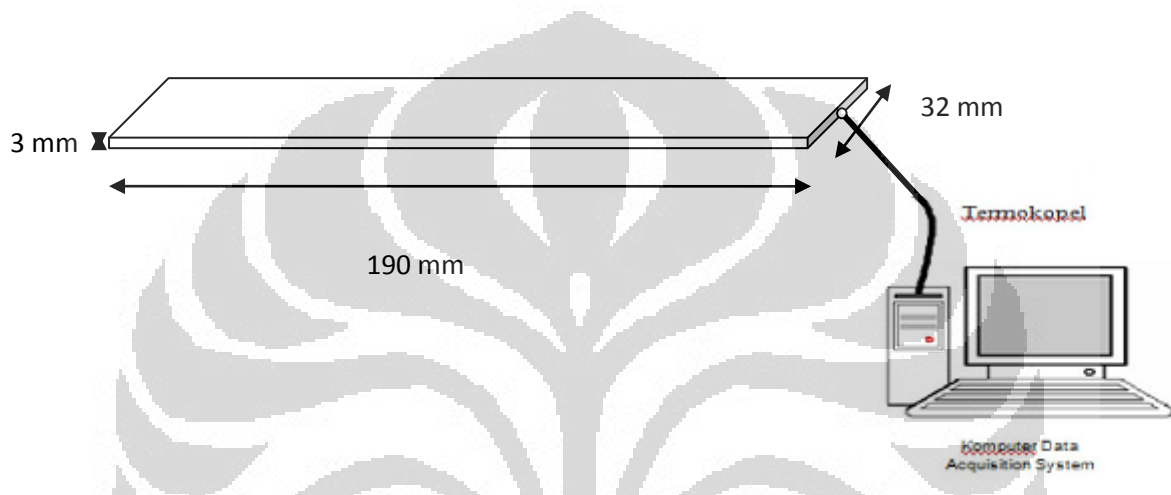
OES merupakan suatu metode karakterisasi material dengan cara mengeksitasi atom dengan menggunakan perbedaan potensial antara sampel dan elektroda. Akibat dari energi tersebut, elektron pada sampel akan memancarkan sinar yang akan ditangkap oleh detektor. Perbedaan intensitas yang terjadi kemudian dikarakterisasi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



Gambar 3.2 Optical Emission Spectroscopy yang Terdapat Pada DTMM FTUI

3.3.2 Persiapan Benda Uji

Benda uji yang digunakan pada penelitian ini berupa lembaran dengan ukuran panjang 190 mm, lebar 32 mm, dan tebal 3 mm. Spesimen diberi lubang untuk meletakkan kawat termokopel sebagai alat pengukur temperatur benda uji. Pengukuran temperatur benda uji menggunakan *data acquisition system* yang dihubungkan dengan komputer. Kedalaman lubang adalah ± 5 mm dengan diameter 2,5 mm yang disesuaikan diameter kawat termokopel.



Gambar 3.3 Ilustrasi Benda Uji dan Pemasangan Termokopel

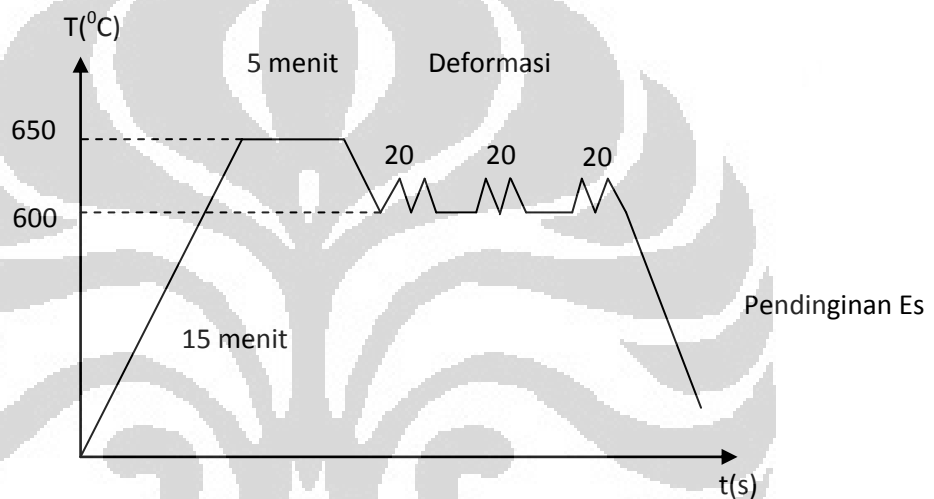
3.3.3 Proses TMCP dan Warm Rolling

Seluruh spesimen yang telah diukur disiapkan untuk berbagai pengujian, kemudian masing-masing dimasukkan ke dalam *furnace* atau dapur pemanasan untuk dipanaskan hingga suhu 650°C selama 15 menit, kemudian ditahan selama 10 menit. Kemudian dilanjutkan dengan canai searah *multipass* dengan besar deformasi 20-20-20%, dan dilanjutkan dengan pendinginan es. Proses canai dilakukan dengan menggunakan mesin *OnoRoll* berkapasitas 20 ton. Penelitian ini terbagi atas beberapa variasi proses. Tiap variasi memiliki parameter tersendiri pada hasil akhir. Variasi-variasi proses yang dilakukan yaitu :

1. Benda Uji A adalah benda uji awal yang tidak mengalami perlakuan panas, yang diamati struktur mikro, nilai kekuatan tarik, dan nilai

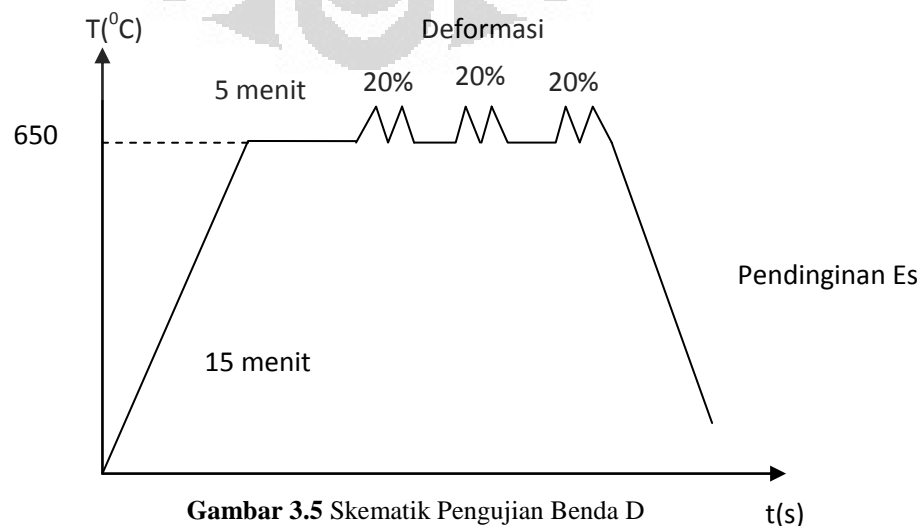
kekerasannya sebagai pembanding untuk benda uji berikutnya.

2. Benda Uji B adalah benda uji yang mengalami pemanasan hingga suhu 650°C selama 15 menit, ditahan selama 10 menit, lalu didinginkan dengan media udara.
3. Benda Uji C adalah benda uji yang dipanaskan hingga suhu 650°C selama 15 menit, ditahan selama 10 menit, diteruskan dengan deformasi *multipass* searah 20-20-20% pada suhu 600°C lalu didinginkan dengan media es.



Gambar 3.4 Skematik Pengujian Benda C

4. Benda Uji D adalah benda uji yang dipanaskan hingga suhu 650°C selama 15 menit, ditahan selama 10 menit, diteruskan dengan deformasi *multipass* searah 20-20-20% pada suhu 650°C lalu didinginkan dengan media es.



Gambar 3.5 Skematik Pengujian Benda D



Gambar 3.6 *Furnace Carbolite* yang terdapat pada Laboratorium Teknik Perubahan Bentuk DTMM FTUI



Gambar 3.7 Mesin *Ono roll* yang terdapat pada Laboratorium Teknik Perubahan Bentuk DTMM FTUI

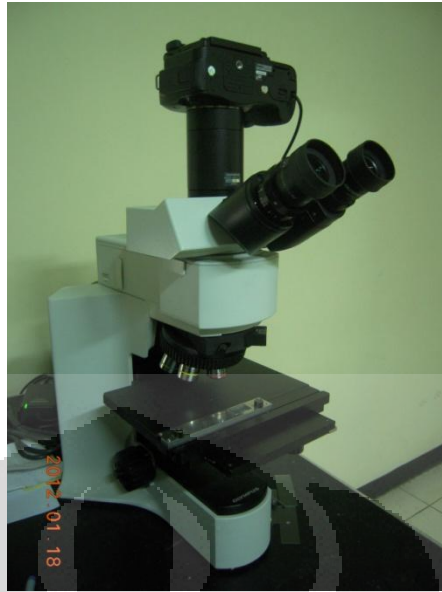
3.3.4 Preparasi, Pengujian Metalografi, dan Pengamatan Mikrostruktur

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

Untuk benda uji yang berukuran kecil dilakukan proses *mounting* terlebih dahulu untuk mempermudah penanganan benda uji metalografi. Setelah itu dilakukan proses pengamplasan untuk meratakan bagian benda uji yang akan di amati mikrostrukturnya. Pengamplasan dilakukan dengan menggunakan kertas amplas yang dimulai dari amplas kasar hingga amplas halus agar didapat permukaan benda uji yang halus dan rata di seluruh permukaan. Ukuran kekasaran dari kertas amplas yang digunakan yaitu #120, #240, #400, #600, #800, #1000, #1200, #1500 (dalam *mesh*).

Dalam melakukan pengamplasan, arah pengamplasan diubah setiap mengganti tingkat kekasaran kertas amplas, hal ini bertujuan untuk menghilangkan sisa pengamplasan sebelumnya sehingga didapat permukaan yang halus pada benda uji. Selain itu, hal yang harus diperhatikan pada saat pengamplasan adalah pemberian air. Air berfungsi sebagai pemindah geram, memperkecil kerusakan akibat panas yang timbul yang dapat merubah struktur mikro sampel dan memperpanjang masa pemakaian kertas amplas.

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 Titanium dioksida. Hal ini agar permukaan sampel yang akan diamati di bawah mikroskop harus benar-benar rata dan bebas goresan. Apabila permukaan sampel kasar atau bergelombang, maka pengamatan struktur mikro akan sulit untuk dilakukan karena cahaya yang datang dari mikroskop dipantulkan secara acak oleh permukaan sampel. Setelah dilakukan proses poles, benda uji dietsa dengan Nital 2% (97 mL alkohol 96% + 3 mL HNO₃ 65%) untuk memunculkan jejak batas butir struktur akhir dari benda uji sehingga dapat diamati morfologi butir ferrit. Setelah itu dilakukan pengamatan dengan mikroskop optik dengan perbesaran 100x, 200x, 500x, dan 1000x.



Gambar 3.8 Mikroskop Optik yang Terdapat Pada DTMM FTUI

3.3.5 Perhitungan Besar Butir Equiaxed

Pengujian dan perhitungan besar butir dilakukan dengan menggunakan standar ASTM E112^[40]. 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. Jumlah titik potong persatuan panjang (PL) dihitung dengan :

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

dan panjang garis perpotongan (L3) adalah:

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

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)

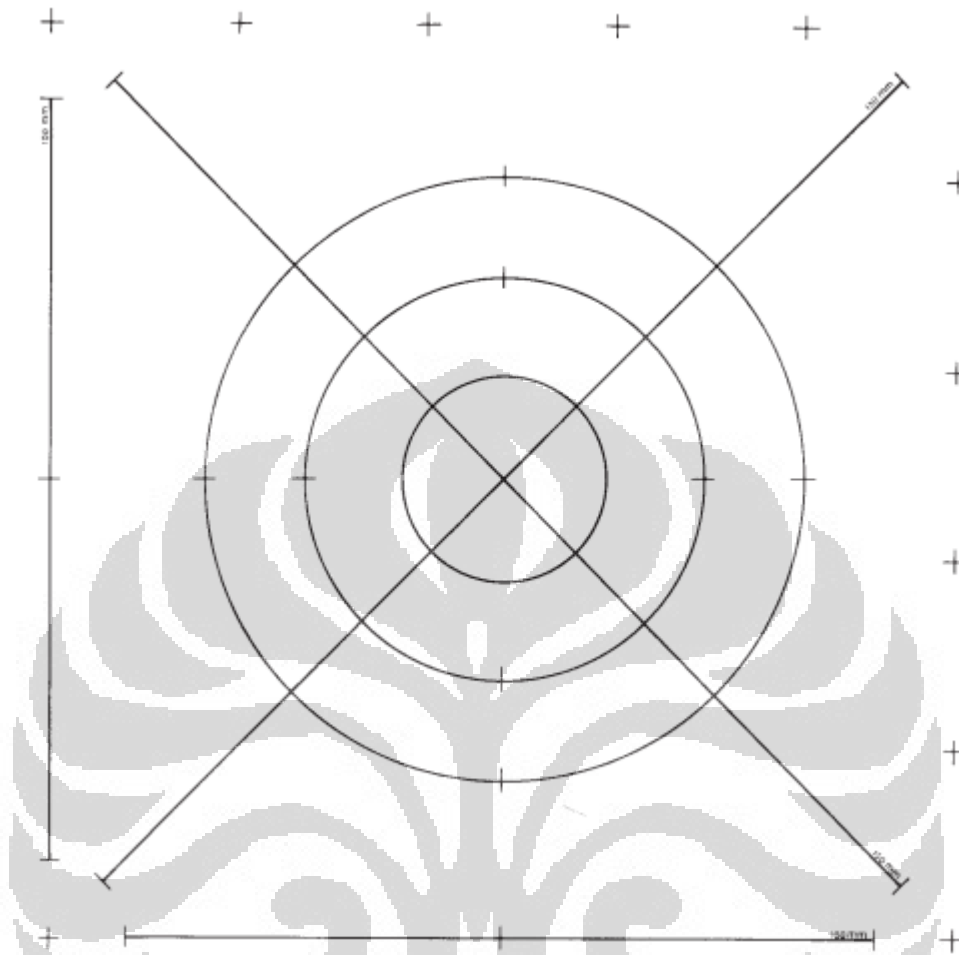
L_3 = Panjang garis perpotongan (mm)

M = Perbesaran

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

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

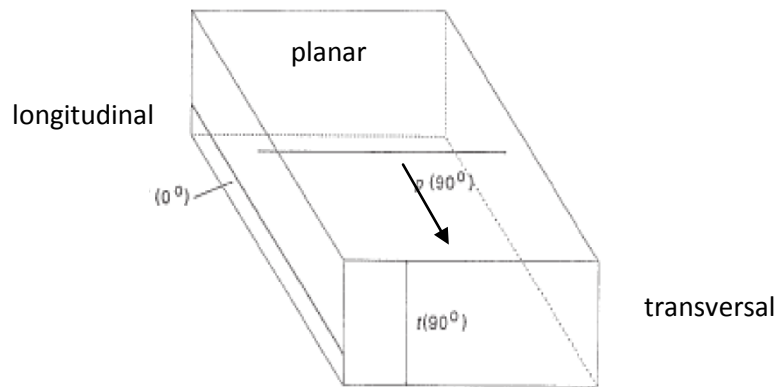
Perhitungan besar butir dalam penelitian ini dilakukan pada satu sampel dari setiap variabel dengan foto mikro pada tiga arah yang berbeda pada satu sampel. Selanjutnya untuk menentukan diameter besar butir dilakukan dengan mencocokkan nomor G yang didapat dalam perhitungan dengan tabel besar butir standar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



Gambar 3.9 Lingkaran yang Digunakan Untuk Perhitungan Butir dengan Metode *Intercept Heyne*^[40]

3.3.6 Perhitungan Besar Butir Non-Equiaxed

Pengukuran besar butir dilakukan dengan metode *Straight Line*^[40]. Metode ini dilakukan dengan membuat suatu garis lurus (L_t) pada gambar struktur mikro dan menggunakan besaran tertentu sedemikian sehingga jumlah butir terpotong oleh suatu garis dapat dihitung dengan akurat. Pada metode ini kita menghitung diameter rata-rata butir secara longitudinal, transversal dan planar. Sehingga setiap sisi (longitudinal, transversal dan planar) dari benda uji harus didapat foto mikronya terlebih dahulu.



Gambar 3.10 Skema Pengambilan Foto Mikro *Elongated* ^[40]

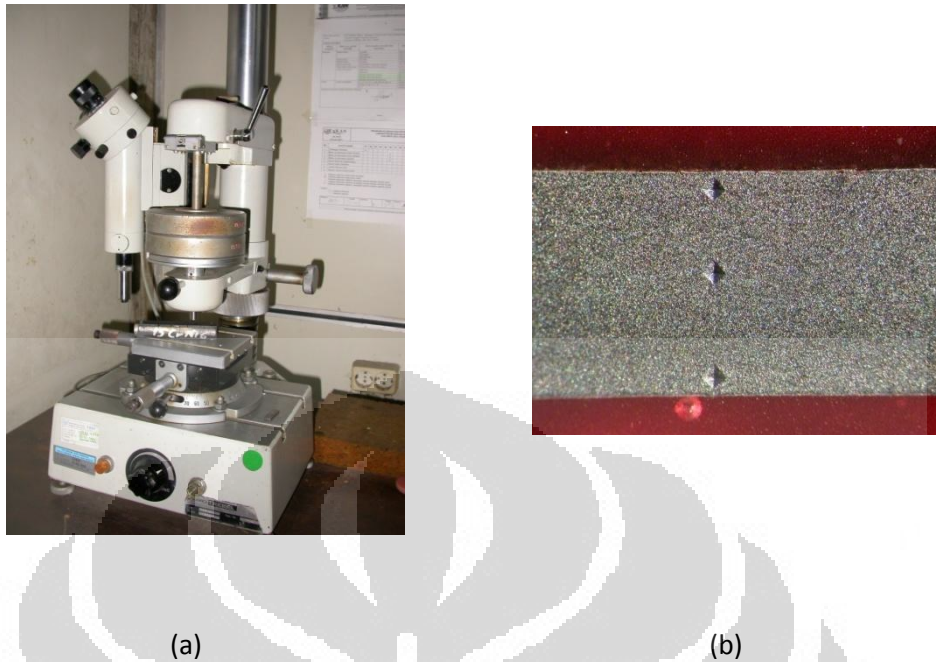
Setelah mendapatkan foto mikro dari ketiga sisi tersebut, dibuatlah garis (3-6 buah) dengan panjang total 500 mm pada bidang masing-masing. Selanjutnya, dicarilah nilai G dari masing-masing bidang dengan rumus yang sama dengan rumus perhitungan butir *equiaxed*. Setelah didapat nilai G masing-masing bidang, maka nilai G dapat dimasukkan melalui persamaan:

$$G_{\text{Total}} = (G_{\text{Longitudinal}} \times G_{\text{Transversal}} \times G_{\text{Planar}})^{0.3} \quad (3.4)$$

Nilai G_{Total} yang telah didapat dikonversi ke diameter rata-rata butir pada ASTM E112^[40].

3.3.7 Pengujian Nilai 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.



Gambar 3.11 Mesin Uji Kekerasan Vickers (a) Mesin Vickers Frank-Finotest (b) Jejak Indentasi Vickers

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. Salah satu keuntungan metode Vickers dibanding dengan metode Brinell ialah memiliki pembacaan pada mesin yang lebih akurat dibandingkan dengan pembacaan diameter lingkaran pada metode Brinell. Mesin Vickers dapat digunakan pada logam setebal 0,15 mm. Berikut merupakan persamaan untuk mencari kekerasan Vickers (ASTM E 92):

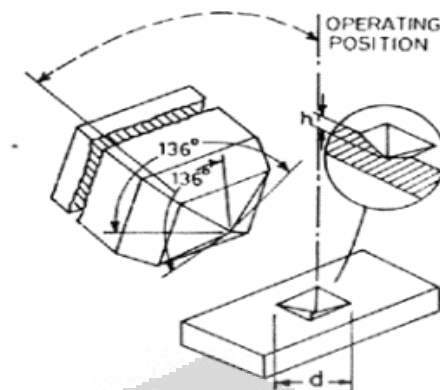
$$VHN = \frac{1.854P}{d^2} \quad (3.5)$$

Dimana:

P = beban yang digunakan (kg)

d = rata-rata diagonal jejak (mm)

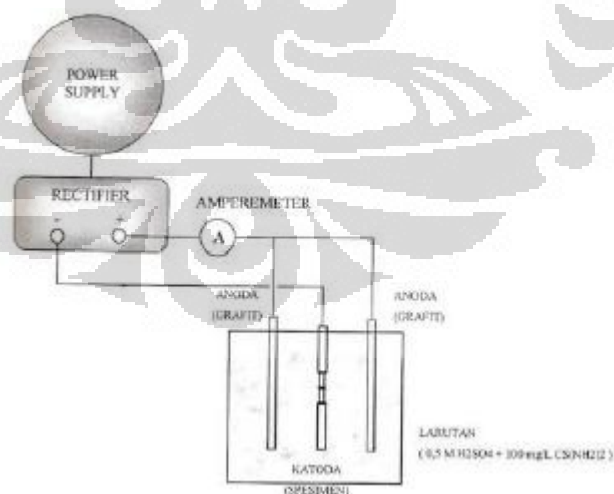
α = sudut kemiringan intan = 136°



Gambar 3.12 Skema Pengujian Kekerasan Dengan Metode Vickers^[41]

3.3.8 Pengujian *Hydrogen Charging Test*^[42]

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 30-40 mA/cm² selama 4 jam. Sel elektrokimia ini terdiri dari grafit sebagai anoda dan spesimen uji sebagai katoda.



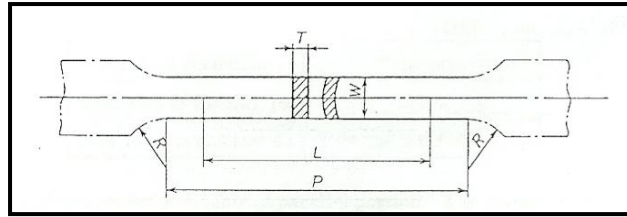
Gambar 3.13 Rangkaian Proses *Hydrogen Charging*^[38]

3.3.9 Pengujian Tarik

Pengujian tarik merupakan salah satu metoda karakterisasi untuk mengetahui sifat mekanik material. Pengujian ini menggunakan standar JIS Z2201^[43] untuk mengetahui degradasi sifat mekanik material yang meliputi kekuatan tarik dan ketangguhannya akibat proses pemasukan hidrogen ke dalam logam. Prinsip pengujian ini adalah sample yang berbentuk *dog-bone* dan 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 Mesin Uji Tarik Shimadzu yang Terdapat Pada Laboratorium Metalurgi Fisik DTMM FTUI



Remarks Table 2 Standard dimensions of 14B test piece

Unit : mm

Plate thickness	Width W	Gauge length L	Parallel length P
Over 5.5 mm up to and incl. 7.5 mm	12.5	50	80
Over 7.5 mm up to and incl. 10 mm		60	
Over 10 mm up to and incl. 13 mm	20	85	130
Over 13 mm up to and incl. 19 mm		100	
Over 19 mm up to and incl. 27 mm	40	170	265
Over 27 mm up to and incl. 40 mm		205	

Gambar 3.15 Standar Benda Uji Lembaran Untuk Pengujian Tarik^[43]

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. Tabel komposisi dapat dilihat sebagai berikut:

Tabel 4.1 Komposisi Kimia Benda Uji Baja Bebas Interstisi (*IF Steel*)

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, benda uji awal dilakukan proses *reheating* pada temperatur 650⁰C. Teknik canai hangat dilakukan pada temperatur 600⁰ C dan 650⁰ C. Kemudian, benda uji mengalami deformasi *multipass* searah dengan deformasi sebesar 20-20-20%. Kemudian dilakukanlah pengujian metalografi, kekerasan, kekuatan tarik, dan *hydrogen charging*.

4.2. Hasil Pengukuran Ketebalan Benda Uji

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

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

Dimana:

- % Deformasi = Besar Derajat Deformasi
- H₀ = Ketebalan Awal (mm)
- H_f = Ketebalan Akhir (mm)



Gambar 4.1 Benda Uji Awal



Gambar 4.2 Benda Uji yang Telah Mengalami Deformasi

Gambar 4.1 merupakan benda uji awal tanpa dilakukan deformasi. Tebal benda uji adalah 3 mm. Setelah dilakukan proses deformasi *multipass* searah 20-20-20% pada temperatur 600⁰C (Benda Uji C), terlihat pada gambar 4.2 dimana benda uji mengalami pertambahan panjang dan pengurangan tebal. Perbedaan yang terjadi pada nilai ketebalan akhir benda uji ini disebabkan adanya mekanisme roll *flattening* pada saat proses canai. Ketika sampel uji masuk kedalam roller, terjadi interaksi antara *roller* dengan material, *roll* melakukan tekanan dan material mengalami reaksi. Jika benda uji memiliki kekerasan yang cukup tinggi, reaksi yang terjadi juga meningkat yang mengakibatkan roller terdeformasi secara elastis^[17].

Tabel 4.2 Hasil Pengukuran Benda Uji Sebelum dan Sesudah Proses TMCP dan *Warm Rolling*

Benda Uji	Tebal Awal H_0 (mm)	Derajat Deformasi Teoritis (%)	Tebal Akhir H_f (mm)	Tebal Akhir H_f Teoritis (mm)	Derajat Deformasi Aktual (%)	ϵ teoritis	ϵ aktual	ϵ' teoritis	ϵ' aktual
A	3	-	3	3	0	0	0	0	0
B	3	-	3	3	0	0	0	0	0
C	3	20+20+20	1.536	1.6	48.8	0.63	0.67	12.63	10.21
D	3	20+20+20	1.536	1.6	48.8	0.63	0.67	12.63	10.21

Tabel 4.2 menunjukkan bahwa benda uji C (deformasi *multipass* searah 20-20-20% pada temperatur 600⁰C) yang memiliki ketebalan awal sebesar 3 mm akan mengalami pengurangan ketebalan menjadi 1.57 mm. Sedangkan benda uji D (deformasi *multipass* searah 20-20-20% pada temperatur 650⁰C) juga mengalami pengurangan ketebalan dari 3 mm menjadi 1.6 mm. Dapat dilihat bahwa deformasi *multi pass* memberi pengaruh terhadap ketebalan akhir h_f aktual yang diharapkan. Nilai ketebalan akhir pada sampel lebih mendekati nilai perhitungan teoritisnya. Maka *multi pass* dengan 3 kali *pass* lebih dapat mendekati nilai perhitungan.

4.3. Pengukuran Diameter Butir Ferit

Reheating maupun proses deformasi akan mengubah ukuran diameter butir ferit. Pada penelitian ini, pengukuran butir ferit dilakukan tiga kali. Dengan mengetahui besar dan perubahan dimensi diameter butir, kita dapat mengamati evolusi struktur mikro dan hubungannya dengan perubahan sifat mekanis yang dihasilkan setelah perlakuan, khususnya terhadap nilai kekerasan dan kekuatan. Untuk mengukur butir *equiaxed*, digunakanlah metode *Intercept Heyn* sesuai dengan ASTM E-112^[39]. Sedangkan untuk butir yang memanjang (*highly elongated*) dan pipih menggunakan pengukuran *Straight Line Test*^[39]. Hasil pengukuran diameter butir dapat dilihat pada Tabel 4.3 :

Tabel 4.3 Hasil pengukuran diameter butir ferit

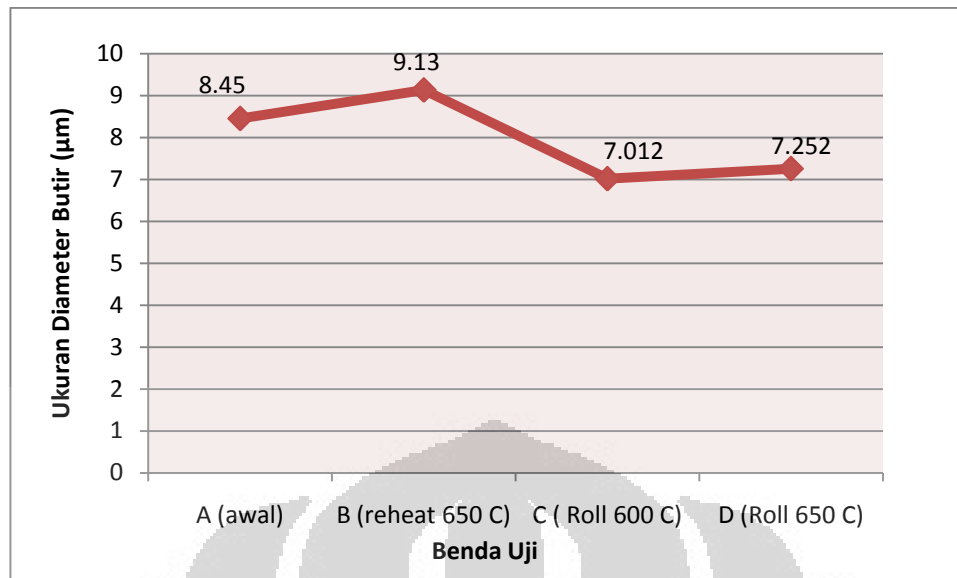
Benda Uji	G No. (ASTM E112)	Diameter Butir (μm)	Diameter Rata-Rata (μm)	Keterangan
A	10.99	7.9255	8.45	Tanpa perlakuan
	10.88	8.239		
	10.57	9.178		
B	10.59	9.109	9.13	Pemanasan 650 ⁰ C selama 15 menit, holding 5 menit
	10.59	9.109		
	10.57	9.178		
C	11.05		7.012	Pemanasan 600 ⁰ C selama 15 menit, holding 5 menit, deformasi 20%-20%-20%, pendinginan es
	11.74			
	11.34			
D	10.45		7.252	Pemanasan 650 ⁰ C selama 15 menit, holding 5 menit, deformasi 20%-20%-20%, pendinginan es
	12.07			
	11.36			
Perbandingan Ukuran Butir dengan Penelitian lainnya^[44] yang Mengalami Proses Canai Hangat Reversibel dengan Material dan Komposisi yang Sama				
A ^c	10.341	9.97	9.929	Tanpa perlakuan
	10.341	9.97		
	10.376	9.846		
B ^c	9.975	11.305	11.357	Pemanasan 650 ⁰ C selama 15 menit, holding 5 menit
	9.947	11.423		
	9.966	11.343		
D ^c		7.843	7.866	Pemanasan 650 ⁰ C selama 15 menit, holding 5 menit, deformasi 20%-20%-20%, pendinginan es
		7.847		
		7.866		

Dari Tabel 4.3 dapat kita lihat bahwa antara benda uji A dan B terjadi perbedaan ukuran diameter butir. Ukuran butir benda uji A (awal) adalah 8.45 μm dimana lebih kecil dari ukuran butir benda uji B (*reheating* 650⁰ C), yaitu sebesar 9.13 μm . Hal ini dikarenakan benda uji B mengalami *reheating* pada temperatur 650⁰C. Dengan proses *reheating*, maka akan terjadi proses pertumbuhan butir (*grain growth*). Proses pertumbuhan butir ini terjadi karena adanya migrasi batas butir akibat difusi atom-atom dari suatu butir ke butir lainnya sehingga terjadi

perubahan batas butir yang menyebabkan ukuran butir menjadi besar. Faktor yang mempengaruhi pertumbuhan butir adalah temperatur dan waktu tahan. Peningkatan temperatur akan mempercepat proses difusi tersebut karena bertambahnya energi yang diberikan butir sehingga semakin meningkat temperatur maka akan diperoleh butir yang relatif besar^[8]. Mekanisme yang terjadi adalah butir yang besar akan bergabung dengan butir yang kecil, seakan-akan butir kecil dimakan oleh butir yang besar. Mekanisme ini dikenal dengan *grain cannibalism*^[8]. Hal tersebut terjadi seiring dengan peningkatan temperatur. Sedangkan waktu tahan akan memberikan kesempatan atom-atom pada butir untuk bergabung dan meningkatkan ukuran butir. Waktu tahan yang semakin lama akan membuat kesempatan atom-atom untuk bergabung semakin besar sehingga dengan waktu tahan yang semakin lama maka ukuran butir akan semakin besar. Dari perbedaan antara ukuran butir benda uji A (awal) dengan ukuran butir benda B (*reheating* 650⁰C), diketahui perbedaan ukuran butir adalah sebesar 0.68 μ m. Sehingga dapat disimpulkan bahwa waktu tahan selama 5 menit belumlah cukup dalam memberikan kesempatan atom-atom untuk bergabung.

Lebih lanjut, diameter butir ferit dari benda uji C (Deformasi 20-20-20% searah pada suhu 600⁰ C) maupun butir ferit benda uji D (Deformasi 20-20-20% searah pada suhu 600⁰ C) juga memiliki perbedaan. Benda uji C mempunyai ukuran butir sebesar 7.012 μ m, sementara benda uji D mempunyai ukuran butir sebesar 7.252 μ m. Terlihat terjadinya penghalusan butir dari benda uji A (awal) terhadap benda uji C maupun D yang mengalami deformasi. Hal ini dikarenakan proses deformasi maupun pendinginan cepat menggunakan es sangat berpengaruh terhadap ukuran butir. Proses pendinginan cepat menghambat terjadinya difusi atom, oleh sebab itu semakin tinggi kecepatan pendinginan, semakin terhambat difusi atom – atom, semakin halus dan seragam pula butir yang dihasilkan. Semakin tinggi kecepatan pendinginan, semakin halus butir yang dihasilkan^[45].

Sehingga dari ukuran masing-masing diameter butir ferit, dapat digambarkan suatu hubungan antara proses perlakuan panas dan deformasi terhadap ukuran diameter butir ferit yang digambarkan dalam sebuah grafik yang dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Grafik Pengaruh Temperatur Reheating dan Deformasi Terhadap Ukuran Diameter Butir Ferrit Untuk Setiap Benda Uji

Jika dibandingkan dengan penelitian lainnya^[44] yang menggunakan metode *multipass* reversibel dengan nilai deformasi yang sama, benda uji D (Deformasi 20-20-20% searah pada suhu 650⁰C) memiliki ukuran butir 7.252µm. Sedangkan penelitian yang melalui proses *multipass* reversibel dengan deformasi yang sama memiliki ukuran butir sebesar 7.866µm. Butir yang dihasilkan akan sama-sama lebih pipih akibat proses deformasi, hanya saja terletak pada mekanisme pemulihannya (*recovery*). Pola *reversible* akan mempersingkat waktu yang diperlukan untuk memindahkan kembali sampel. Sehingga akan menahan proses *recovery* bentuk butir setelah keluar dari mesin canai pada setiap *pass*nya. Akan tetapi pada penelitiannya, sebelum dilakukan *pass* yang kedua, benda uji penelitian tersebut tetap dipanaskan ulang untuk tetap menjaga suhu deformasi reversibel. Sehingga perbandingan ini tidak mempunyai pengaruh yang signifikan, karena baik pola reversibel maupun searah, setelah melewati *pass* yang pertama akan tetap menjalani proses pemanasan kembali untuk menjaga suhu agar tetap di 650⁰C. Butir yang dihasilkan juga sama-sama lebih pipih/terelongasi dibandingkan butir benda uji awal.

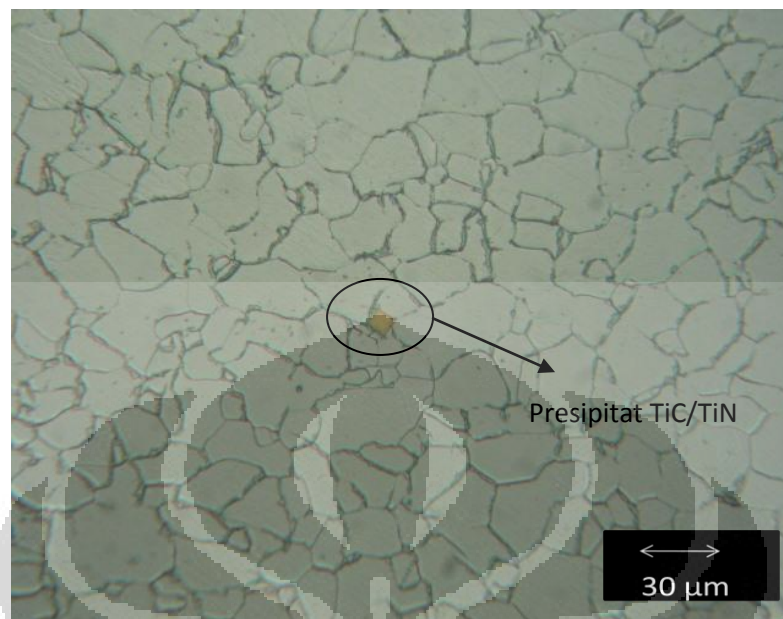
4.4. Hasil Pengamatan Metalografi

Pada penelitian ini terlihat bahwa perbedaan perlakuan panas dimana deformasi yang dilakukan pada temperatur 600°C dan 650°C serta besarnya deformasi itu sendiri, yaitu 20-20-20% hasil proses *warm rolling* yang dilakukan pada benda uji sangat berpengaruh terhadap struktur mikro material. Pengamatan ini meliputi bentuk dan ukuran butir sebelum dan sesudah proses deformasi.

Pada keseluruhan proses *warm rolling* yang dilakukan, tidak terjadi transformasi fasa karena temperatur kerja saat proses *warm rolling* dibawah rekristalisasi baja ($<723^{\circ}\text{C}$). Hal ini juga dikarenakan pengaruh kadar karbon yang sangat kecil (<0.01). Berikut gambar struktur mikro dari benda uji awal.



(a)

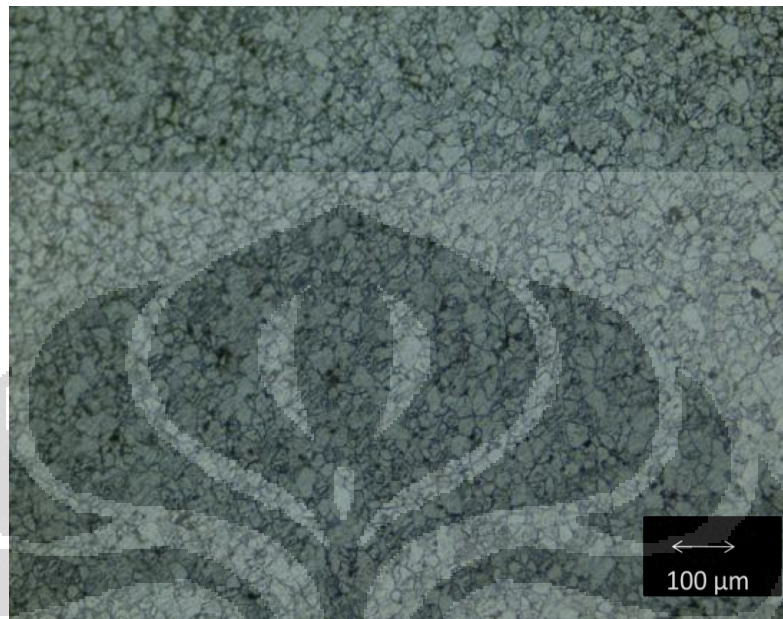


(b)

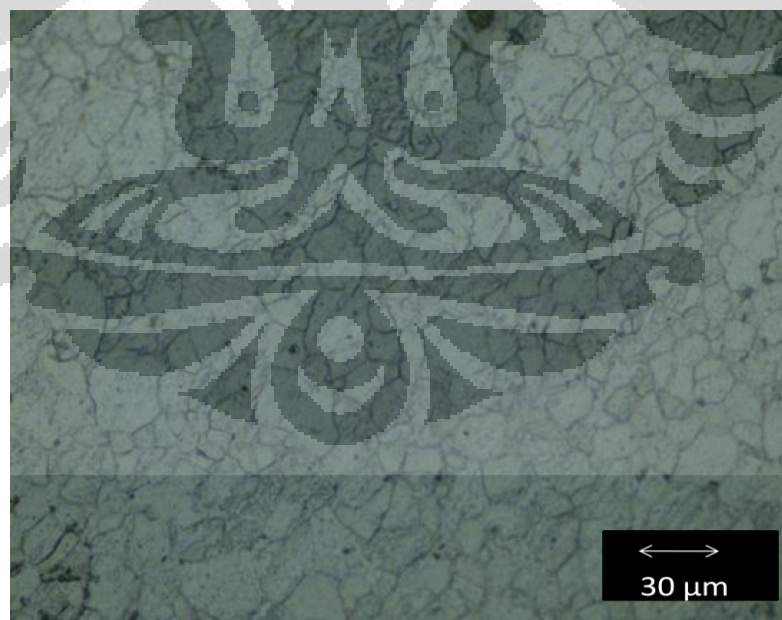
Gambar 4.4 Benda uji A (tanpa perlakuan) Etsa Nital 2%, (a) perbesaran 200x, (b) perbesaran 500x

Gambar 4.4 (a) dan (b) merupakan mikrostruktur dari benda uji awal yang tidak mengalami perlakuan (*as received*). Gambar yang didapatkan merupakan gambar penampang memanjang (longitudinal) dari benda uji. Dapat dilihat, bahwa butir yang terbentuk adalah *equiaxed* karena mempunyai panjang dan lebar yang hampir sama. Distribusi butir beserta ukurannya cukup homogen. Terlihat bahwa fasa yang terbentuk adalah 100% ferit. Selain itu, pada Gambar 4.4 (b), kita dapat melihat adanya presipitat TiC ataupun TiN yang berwarna kuning atau orange^[9]. Presipitat inilah yang berperan untuk mengikat atom interstisi (karbon) dalam matrix sehingga struktur bebas dari atom interstisi^[9]. Salah satu mekanisme penguatan logam adalah melalui adanya atom interstisi yang menghalangi pergerakan dislokasi. Benda uji yang digunakan merupakan material yang bebas dari atom interstisi. Itulah sebabnya mengapa baja bebas interstisi memiliki sifat mampu bentuk yang baik, yaitu karena tidak adanya atom interstisi yang menghalangi pergerakan dislokasi. Kemudian benda uji A mengalami *reheating*

pada temperatur 650°C (benda uji B). Berikut penampang memanjang (longitudinal) dari benda uji B:



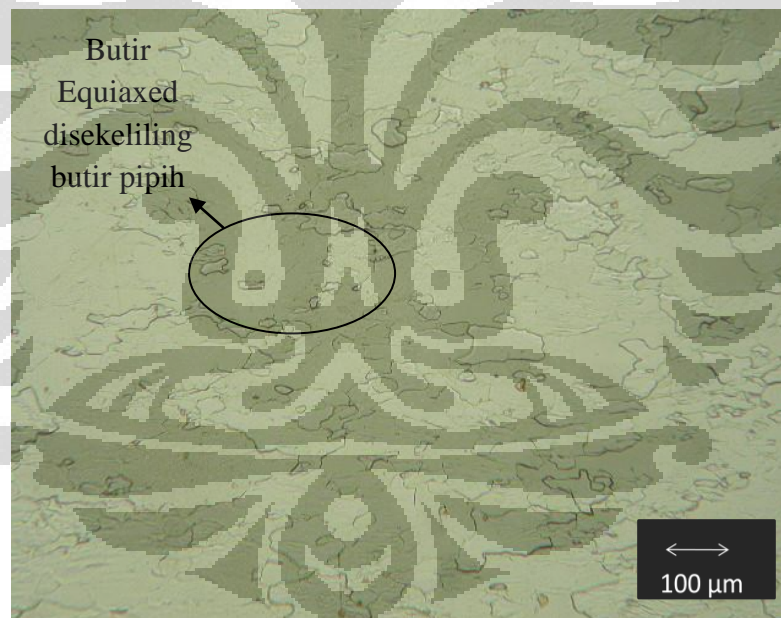
(a)



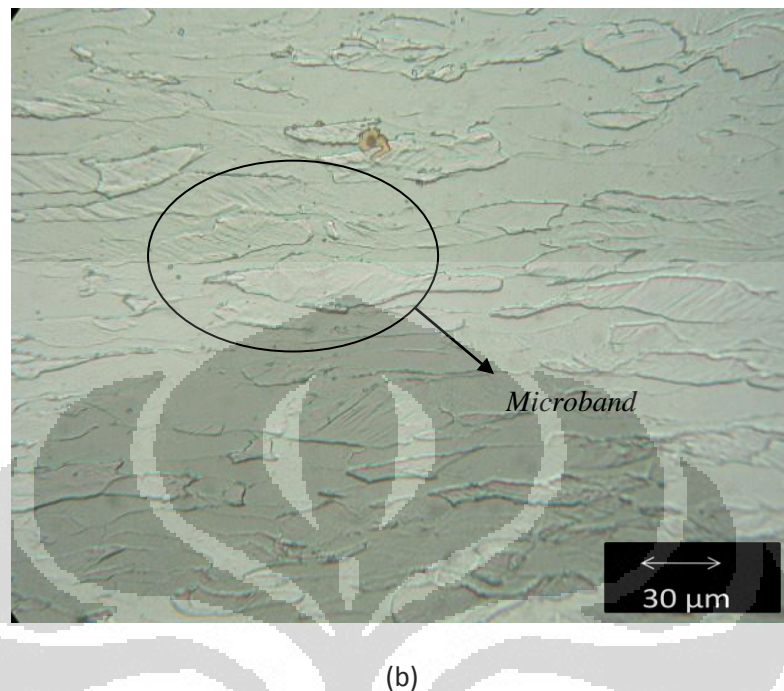
(b)

Gambar 4.5 Benda Uji B (*Reheating* 650°C) Etsa Nital 2% (a) perbesaran 200x, (b) perbesaran 500x

Gambar 4.5 (a) dan (b) merupakan mikrostruktur dari benda uji yang telah mengalami pemanasan ulang. Pada gambar terlihat butir yang dihasilkan *equiaxed*. Dari struktur mikro yang didapatkan, terlihat bahwa benda uji B (ukuran butir $9.13\mu\text{m}$) memiliki ukuran butir yang lebih besar daripada benda uji A ($8.45\mu\text{m}$). Hal ini disebabkan adanya mekanisme pertumbuhan butir karena perlakuan panas yang diberikan terhadap benda uji B. Faktor yang mempengaruhi pertumbuhan butir adalah temperatur dan waktu tahan. Semakin tinggi temperatur dan waktu tahan, maka akan semakin besar juga butir yang dihasilkan. Fenomena pertumbuhan 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^[26].



(a)



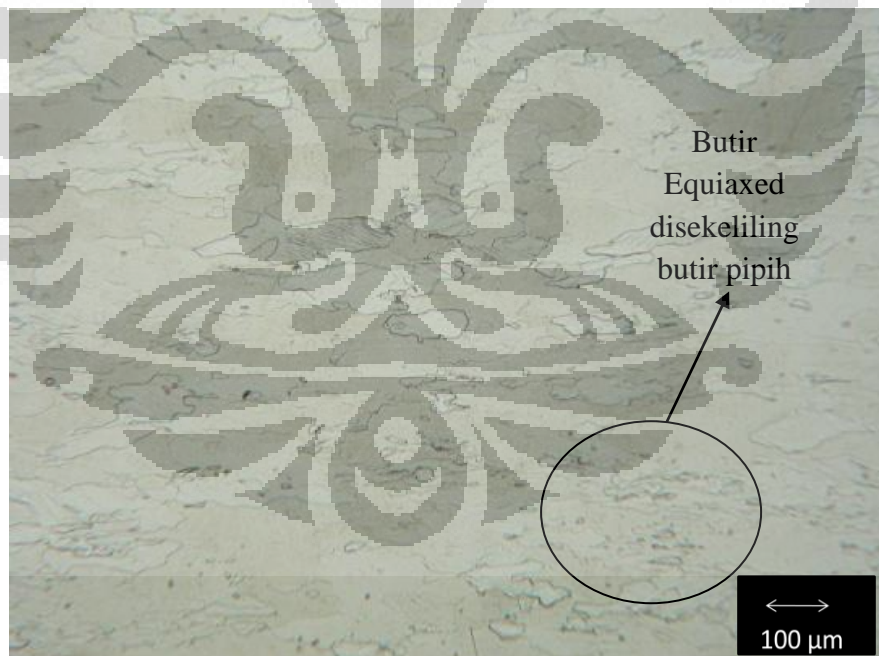
Gambar 4.6 Sampel C (*Heating* 600⁰C dan *roll* 20-20-20%) Etsa Nital 2%, (a) perbesaran 200x, (b) perbesaran 500x

Gambar 4.6 (a) dan (b) merupakan mikrostruktur longitudinal (memanjang) dari benda uji C yang mengalami pemanasan ulang pada temperatur 650⁰C lalu ditahan selama lima menit dan mengalami deformasi *multipass* searah pada temperatur 600⁰C sebesar 20%-20%-20% kemudian didinginkan secara cepat dengan menggunakan media es. Media pendingin berupa es merupakan media pendinginan sangat cepat yang akan menghambat terjadinya difusi batas butir sehingga butir tidak terus tumbuh dan butir yang dihasilkan lebih pipih karena pengaruh deformasi yang dialami benda uji. Selain itu, apabila diamati lagi, terlihat adanya sebagian kecil butir berbentuk *equiaxed* disekitar butir-butir yang pipih. Hal ini dikarenakan sudah terjadinya rekristalisasi dinamis walaupun masih dalam tahap awal^[45]. Syarat untuk terjadinya rekristalisasi dinamis adalah material terdeformasi pada temperatur yang tinggi dan *strain rate* yang rendah, dengan catatan *strain rate* harus diatas nilai kritisnya^[45]. Benda uji C ini

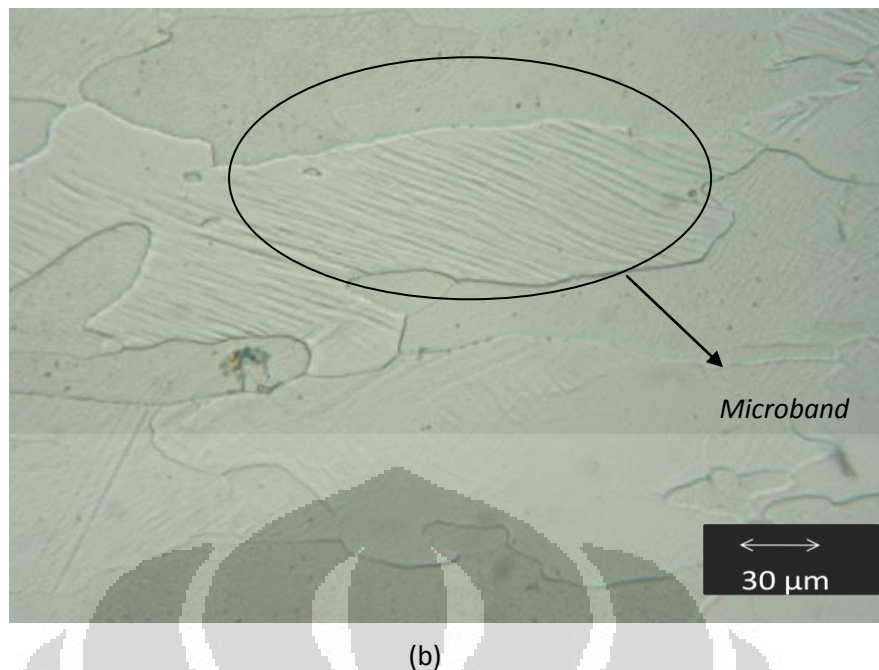
mempunyai *strain rate* sebesar 10.21 s^{-1} .

Lebih jauh lagi, gambar 4.6 (b) memperlihatkan adanya *microbands*, yang ditunjukkan adanya garis parallel dalam butir yang berasal dari tahapan awal deformasi. Hal ini sesuai dengan penelitian sebelumnya^[11] bahwa dengan proses TMCP berupa warm rolling, cenderung terbentuk *subgrain* yang diindikasikan dengan adanya *microbands* didalam butir terelongasi dengan arah sekitar +35 maupun -35 terhadap arah rolling. Akan tetapi, arah dari *microbands* ini tidak terpengaruh pada temperatur dan *strain*.

Pada semua temperatur, dimana mulai deformasi dengan 5% reduksi ketebalan, *microbands* tampak di pada arah yang berbeda antara butir satu dengan lainnya.^[18] Sedangkan penampakan *microbands* itu sendiri bergantung pada temperatur dan *strain rate*^[18]. Semakin tinggi temperatur dan *strain rate*, maka *microbands* yang dihasilkan juga akan semakin jelas. Proses TMCP dan warm rolling ini dapat cenderung terbentuknya *subgrain*.



(a)



(b)

Gambar 4.7 Sampel D (*Heating* 650⁰C dan *roll* 20-20-20%) Etsa Nital 2%, (a) perbesaran 200x,(b) perbesaran 500x

Gambar 4.7 (a) dan (b) merupakan mikrostruktur longitudinal (memanjang) dari benda uji D yang mengalami pemanasan ulang pada temperatur 650⁰C yang ditahan selama lima menit dan mengalami deformasi *multi-pass* searah pada temperatur 650⁰C sebesar 20%-20%-20% kemudian didinginkan secara cepat dengan menggunakan media es. Terlihat dari mikrostruktur yang tampak, bahwa butir menjadi lebih pipih (terelongasi). Dapat dilihat bahwa butir *equiaxed* yang terbentuk sedikit lebih banyak daripada benda uji C, yaitu Gambar 4.6 (a). Telah disebutkan sebelumnya, bahwa dalam hal ini terjadi rekristalisasi dinamis dimana temperatur dan *strain rate* memainkan peranan yang penting. *Strain rate* pada benda uji D ini memiliki nilai yang sama dengan *strain rate* pada benda uji C, yaitu 10.21 s⁻¹ dikarenakan nilai deformasi yang sama. Perbedaan hanya terdapat pada temperturnya. Dengan semakin tingginya temperatur, maka butir baru *equiaxed* yang terbentuk akan lebih banyak dibanding benda uji C.

Lebih jauh lagi, gambar 4.7 (d) memperlihatkan adanya *microbands*, yang ditunjukkan adanya garis parallel dalam butir yang berasal dari tahapan awal deformasi. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan Akbari^[18] bahwa dengan proses TMCP berupa warm rolling, akan didapatkan *subgrain* yang

diindikasikan dengan adanya *microbands* didalam butir terelongasi terdapat *microbands* dengan arah sekitar +35 maupun -35 terhadap arah rolling. Akan tetapi, arah dari *microbands* ini tidak terpengaruh pada temperatur dan *strain*.

Semakin tinggi temperatur dan *strain rate*, maka *microbands* yang dihasilkan juga akan semakin jelas. Hal ini dapat dibandingkan pada gambar 4.6 (d) yang terdeformasi pada temperatur 650°C dengan gambar 4.5 (c) yang terdeformasi pada temperature 600°C dimana *microbands* yang dihasilkan gambar 4.5 (d) akan lebih tampak jelas dibanding gambar 4.5 (c). Proses TMCP dan warm rolling ini cenderung terbentuknya *subgrain*.

4.5. Hasil Pengujian Kekerasan

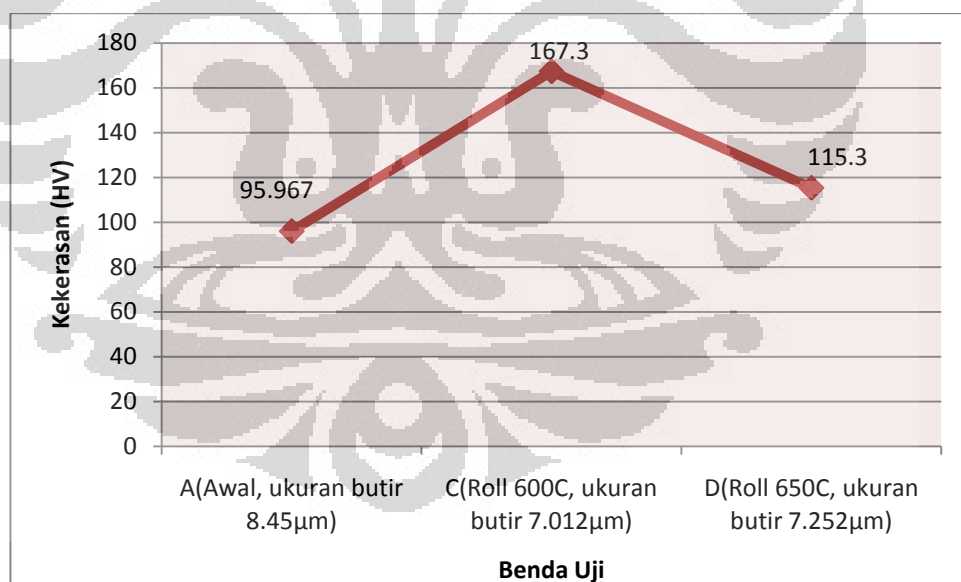
Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui nilai kekerasan dari bahan. Bentuk dan besar butir akan sangat berkaitan dengan perubahan sifat mekanik material terutama kekuatan dan kekerasan bahan. Pengujian kekerasan dilakukan dengan metode Vickers^[40]. Hasil pengujian kekerasan dapat dilihat pada tabel 4.4.

Tabel 4.4 Hasil Pengujian Kekerasan

No	Benda Uji					
	A (Awal)		C (Roll 600 C)		D (Roll 650 C)	
	HV	HV _{rata2}	HV	HV _{rata2}	HV	HV _{rata2}
1	97.8		170.5		117.2	
2	90.5	95.967	170.5	167.333	113.2	115.333
3	99.6		161		115.6	

Dari tabel 4.4, dapat dijelaskan bahwa terjadi peningkatan kekerasan dari benda uji awal A terhadap benda uji C (Deformasi 20-20-20% searah pada suhu 600 C) maupun D (Deformasi 20-20-20% searah pada suhu 650 C) yang terdeformasi. Sampel A yang ukuran butirnya 8.45µm mempunyai nilai kekerasan sebesar 95.967 HV, Sampel C yang ukuran butirnya 7.012µm mempunyai nilai kekerasan sebesar 167.3 HV, dan sampel D yang ukuran butirnya 7.252µm mempunyai nilai kekerasan sebesar 115.3 HV. Apabila dikaitkan dengan sifat

mekanis, butir yang lebih besar akan menurunkan sifat mekanis seperti kekerasan dan kekuatan material, dikarenakan dengan semakin besarnya butir, maka batas butir semakin berkurang. Batas butir merupakan tempat dimana dislokasi sulit bahkan berhenti bergerak dikarenakan batas butir memiliki energi yang tinggi untuk terjadinya pergerakan dislokasi. Oleh karena itu, jika batas butirnya sedikit maka dislokasi akan lebih mudah bergerak (energi untuk menggerakkan dislokasi sedikit) sehingga material akan lebih mudah mengalami deformasi. Namun, apabila batas butirnya semakin banyak yaitu material dengan butir yang semakin halus, maka dislokasi semakin sulit untuk bergerak (energi yang dibutuhkan untuk menggerakkan dislokasi besar). Seperti kita ketahui, prinsip dasar untuk menguatkan material adalah dengan melalui penghambatan dislokasi untuk bergerak. Pergerakan dislokasi yang terhambat ini akan menyebabkan material sulit untuk dideformasi sehingga sifat mekanis material seperti kekerasan dan kekuatan semakin tinggi^[9]. Sehingga dapat digambarkan suatu hubungan antara kekerasan dengan ukuran diameter butir ferit.

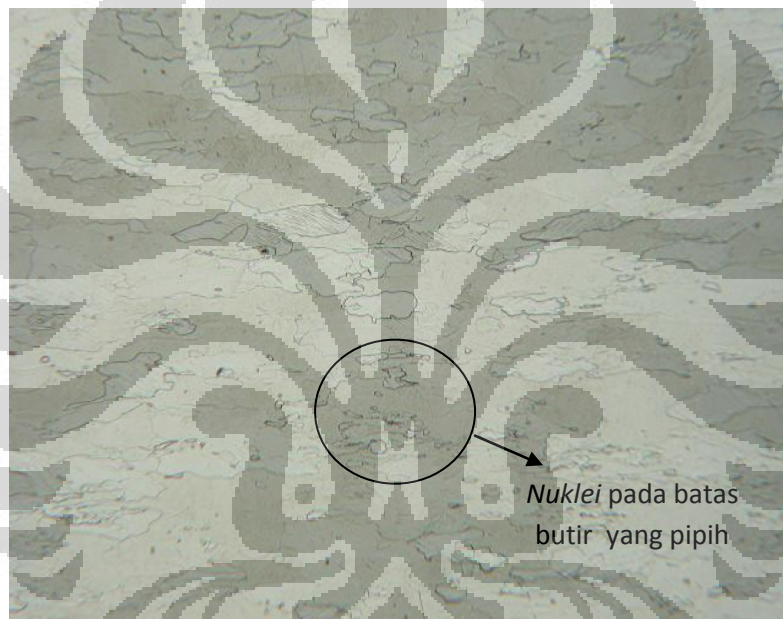


Gambar 4.8 Grafik Hubungan Antara Nilai Kekerasan Dengan Diameter Butir Untuk Setiap Benda Uji

Selain itu, proses deformasi menyebabkan butir dari benda uji C (Deformasi 20-20-20% searah pada suhu 600⁰ C) dan D (Deformasi 20-20-20% searah pada suhu 650⁰ C) menjadi terelongasi / pipih. Butir-butir sampel yang

semakin pipih akibat deformasi mengakibatkan kerapatan dislokasi semakin meningkat dan terdapat tegangan sisa di area batas butir pipih tersebut.

Penurunan nilai kekerasan yang terjadi pada benda uji D seiring dengan berkurangnya ukuran butir pada proses pemanasan 650°C disebabkan oleh energi termal dari proses pemanasan akan menghilangkan tegangan sisa pada batas butir hasil proses canai. Proses penghilangan tegangan sisa ini lebih dikenal dengan istilah *recovery*. Penghilangan tegangan sisa pada batas butir ini mengakibatkan berkurangnya kekerasan material. Jika energi yang diberikan cukup tinggi maka akan terjadi pembentukan *nuclei* pada batas butir.



Gambar 4.9 *Nuclei* Pada Batas Butir yang Terelongasi Untuk Benda Uji D yang Mengalami Deformasi Searah 20-20-20% Pada Suhu 650°C

Nuclei tersebut akan mengalami transformasi nukleasi sehingga timbul butir-butir poligon baru yang bebas dari tegangan. Tahapan ini dikenal dengan istilah rekristalisasi. Peningkatan temperatur pada benda uji juga memperbesar energi kinetik antar atom yang memudahkan pergerakan dislokasi yang akhirnya menurunkan kekerasan material.

4.6. Hasil Pengujian Kekuatan Tarik

Pengujian tarik dilakukan terhadap benda uji A, B, C, maupun D. Proses pengujian tarik dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari *warm rolling* terhadap kekuatan benda uji. Dalam hal ini, ukuran butir mempunyai pengaruh terhadap nilai kekuatan bahan. Teori *Hall-Petch* yang menyatakan bahwa butir yang lebih halus memiliki area batas butir total yang lebih luas untuk menghalangi pergerakan dislokasi, maka material dengan butir yang halus (memiliki butir kecil) memiliki nilai kekerasan dan nilai UTS yang lebih tinggi dibandingkan material dengan butir kasar^[8]. Hasil dari pengujian tarik dapat dilihat pada tabel 4.5 dibawah.

Tabel 4.5 Hasil Pengujian Tarik

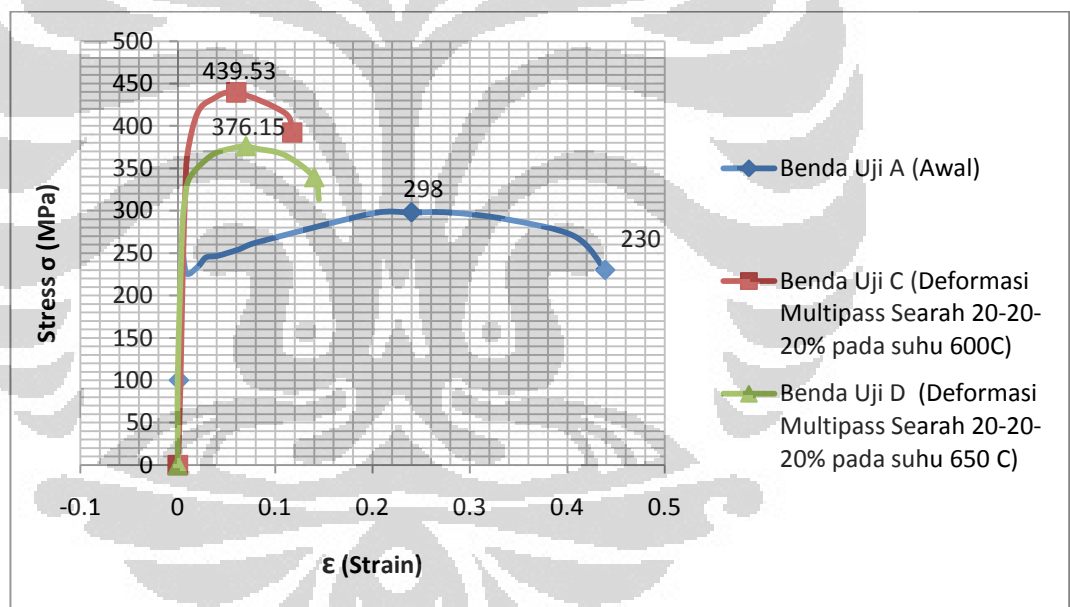
No	Benda Uji	Ket	Dimensi Benda Uji	Luas Penampang (mm ²)	Panjang Ukur (mm)	ΔL (mm)	Ultimate Stress, σ_u (MPa)	Yield Stress, σ_y (MPa)	Elongasi e (%)
1	A	Origin	t=3, w=24.97	78.66	50	8.7	298	242	85.18
2	B	Tidak mengalami uji tarik	-	-	-	-	-	-	-
3	C	Rolling deformasi 20-20-20% pada suhu 600 ⁰ C	t=1.7 w=25	42.5	50	7.9	439.54	392	15.8
4	D	Rolling deformasi 20-20-20% pada suhu 650 ⁰ C	t=1.5, w=25.03	37.54	50	8.7	376.15	303.8	17.4

Dari hasil pengujian tersebut, dapat kita lihat bahwa kekuatan tarik sampel awal adalah sebesar 298 MPa. Ketika benda uji mengalami deformasi, maka kekuatan tarik akan meningkat. Baik benda uji C (*rolling* suhu 600⁰ C) dan D (*rolling* suhu 650⁰C) akan memiliki kekuatan tarik yang jauh lebih tinggi dibanding benda uji awal (A). Hal ini dikarenakan material yang telah mengalami

deformasi *rolling* akan mempunyai bentuk butir yang pipih. 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^[46].

Selain itu, mengenai pengaruh ukuran diameter butir ferit, dijelaskan bahwa butir benda uji C lebih kecil daripada butir D. Hasil ini selaras dengan Teori *Hall-Petch*^[8] yang menyatakan bahwa butir yang lebih halus memiliki area batas butir total yang lebih luas untuk menghalangi pergerakan dislokasi, maka material dengan butir yang halus (yang memiliki butir kecil) lebih keras dan kuat dibandingkan material dengan butir kasar^[8]

Berikut hubungan antara nilai kekuatan tarik dengan benda uji yang sesuai dengan diameter butir ferit dijelaskan pada gambar 4.10



Gambar 4.10 Kurva *Stress-Strain* antara Benda Uji A (ukuran butir $8.45\mu\text{m}$), Benda Uji C (ukuran butir $7.012\mu\text{m}$), dan Benda Uji D (ukuran butir $7.252\mu\text{m}$)

4.7 Hasil Pengujian Hydrogen Charging

Pengujian *Hydrogen Charging* bertujuan untuk melihat ketahanan dari benda uji canai hangat yang telah mengalami deformasi terhadap difusi atom hidrogen. Pengamatan terhadap ketahanan *Hydrogen Induced Cracking* tersebut dilakukan melalui uji kekerasan terhadap benda uji yang telah di *charging* serta

melalui uji tarik terhadap benda uji setelah di *charging*.

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 30-40 mA/cm² selama 4 jam^[42]. Reaksi yang terjadi pada proses ini merupakan reaksi elektrokimia yang mereduksi ion hidrogen menjadi atom hidrogen yang kemudian karena reaktifitas dan ukurannya yang sangat kecil dapat berdifusi hingga ke kisi kristal dalam logam.

4.7.1. Pengaruh Ukuran Butir Terhadap Kekerasan Setelah *Hydrogen Charging*

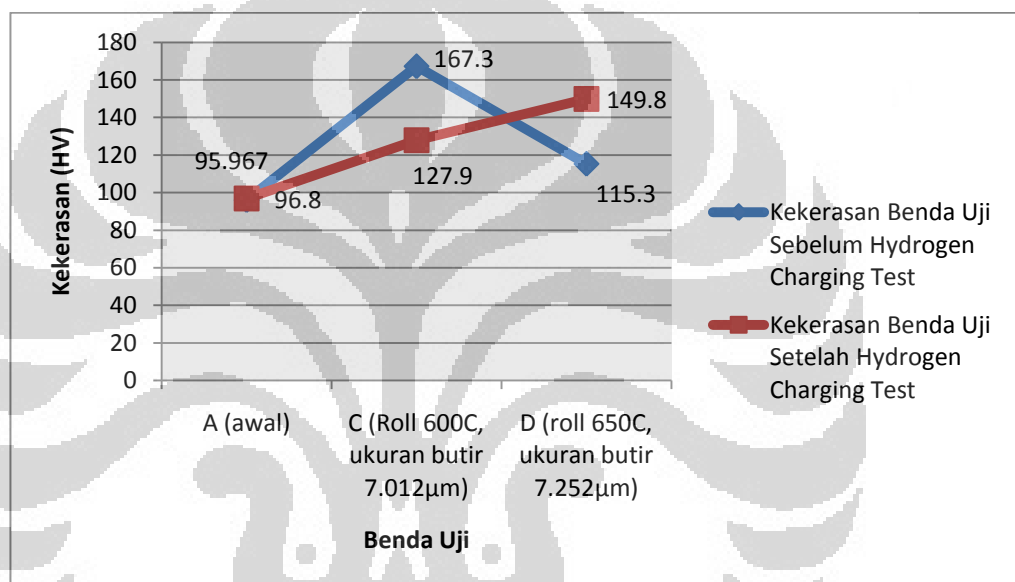
Benda uji, baik A (awal), C (deformasi 20-20-20% searah pada suhu 600°C), maupun D (deformasi 20-20-20% searah pada suhu 650°C) dilakukan pengujian kekerasan kembali setelah *hydrogen charging* untuk dikomparasi dengan uji kekerasan material yang terdeformasi tanpa pengaruh hidrogen. Berikut data kekerasan sesuai dengan tabel 4.6.

Tabel 4.6 Hasil Pengujian Kekerasan Setelah *Hydrogen Charging*

Benda Uji	Keterangan	Diameter Butir (μm)	HV awal	Waktu Charging	HV akhir (H ₂)
A	Origin	8.45	95.967	4 Jam	96.8
C	Rolling deformasi 20-20-20% pada suhu 600°C	7.012	167.3	4 Jam	127.9
D	Rolling deformasi 20-20-20% pada suhu 650°C	7.252	115.3	4 Jam	149.8

Dari tabel 4.6, kekerasan sampel A yang mempunyai diameter butir 8.45μm, setelah dilakukan *hydrogen charging* mengalami kenaikan nilai

kekerasan dari 95.967 HV menjadi sebesar 96.8 HV. Kenaikan tidak terlalu signifikan, hanya sebesar 0.833 HV. Sementara itu, untuk benda uji C yang mempunyai diameter butir $7.012\mu\text{m}$, justru terjadi penurunan kekerasan dari 167.3 HV menjadi 127.9 HV. Penurunan kekerasan sebesar 39.44 HV. Untuk benda uji D yang mempunyai diameter $7.252\mu\text{m}$, terjadi perubahan kekerasan yang signifikan dari 115.3 HV menjadi 149.8 HV. Kenaikan nilai kekerasan sebesar 34.5 HV. Hubungan perbandingan kekerasan antara material sebelum dan sesudah mengalami *hydrogen charging* dapat dilihat pada gambar 4.11.



Gambar 4.11 Perbandingan Nilai Kekerasan antara Material Sebelum dan Sesudah Mengalami *Hydrogen Charging*

Seperti yang kita ketahui, terjadinya difusi atom hidrogen kedalam kisi kristal dapat menyebabkan perapuhan (*embrittlement*) yang dapat menyebabkan material menjadi getas. Masuknya atom hidrogen ke dalam logam akan mengurangi gaya kohesi antar atom dalam logam tersebut. Dengan menurunnya gaya kohesif dari logam akan mengakibatkan semakin mudahnya logam mengalami kegagalan akibat hidrogen yang masuk dan mencapai konsentrasi kritis. Ketika hidrogen yang terperangkap melebihi batas kritisnya akan menginisiasi terjadinya *crack* atau pertumbuhan dari *crack* itu sendiri. Hal ini yang dapat mengakibatkan fenomena *embrittlement* pada baja dan menyebabkan turunnya sifat mekanis baja^[47].

Perbedaan dari sampel A dan D adalah ukuran diameter butirnya. Ukuran butir A mempunyai ukuran yang lebih besar dari ukuran butir D, dan kenaikan kekerasannya lebih sedikit dibanding kenaikan kekerasan benda uji D yang sebesar 34.5 HV. Ukuran butir mempunyai hubungan dengan banyaknya jumlah batas butir. Semakin kecil butir (benda uji D), maka batas butir akan semakin banyak. Batas butir inilah yang menjadi kunci dalam difusi atom hidrogen. Difusi atom hidrogen akan lebih mudah terjadi pada batas butir dibanding di dalam butir. Batas butir mempunyai susunan atom yang lebih longgar, sehingga segala macam impurities, inklusi, maupun segregasi akan berakhir di batas butir. Sekali atom hidrogen masuk, maka akan terperangkap didalam cacat ini, dimana akan berakhir di batas butir. *Microvoid* disekitar inklusi dapat menyediakan tempat untuk hidrogen berkumpul dan menyebabkan crack initiation^[48]

Menurut penelitian yang sebelumnya^[37] terjadinya reaksi kombinasi atom hidrogen membentuk molekul H₂ yang menghasilkan tekanan yang cukup untuk menginisiasi suatu retak. Dengan adanya inisiasi retak ini, saat benda uji dipapar dengan suatu pembebanan maka tegangan akan terkonsentrasi dan hal ini menurunkan kekuatan material. Inilah sebabnya benda uji C mengalami penurunan kekerasan.

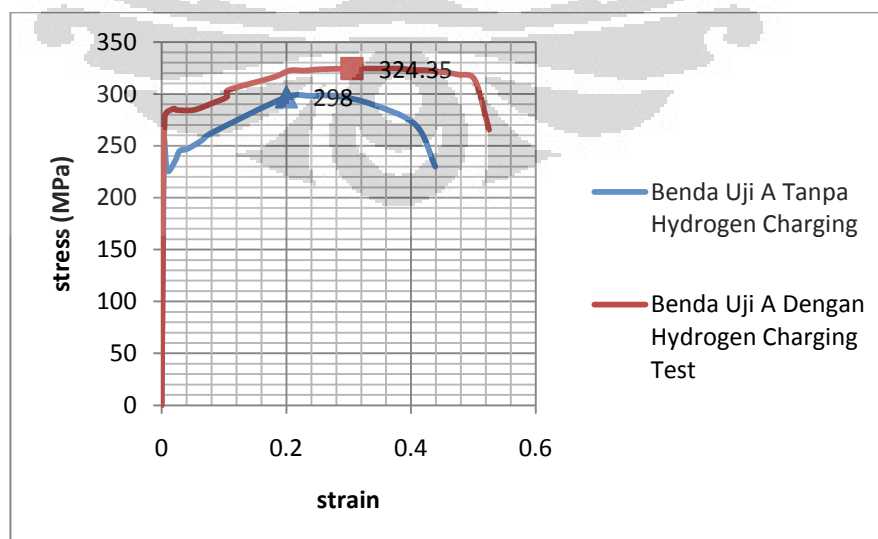
Selain itu, mengacu kepada penelitian sebelumnya^[49] semakin lama durasi pengujian *hydrogen charging* dan semakin besar rapat arus yang diaplikasikan, semakin besar pula konsentrasi hidrogen yang terkandung didalam material, yang dapat diindikasikan dengan adanya peningkatan nilai kekerasan pada material. Benda uji A, C, maupun D yang terpapar dalam lingkungan aqueous hidrogen selama 4 jam sudah memberikan pengaruh yang cukup untuk terdifusinya atom hidrogen kedalam kisi logam. Hal ini dibuktikan dengan bertambahnya nilai kekerasan setelah dilakukan *hydrogen charging*.

4.7.2. Pengaruh Ukuran Butir Terhadap Kekuatan Tarik Setelah *Hydrogen Charging*

Tabel 4.7 Hasil Pengujian Tarik Setelah *Hydrogen Charging*

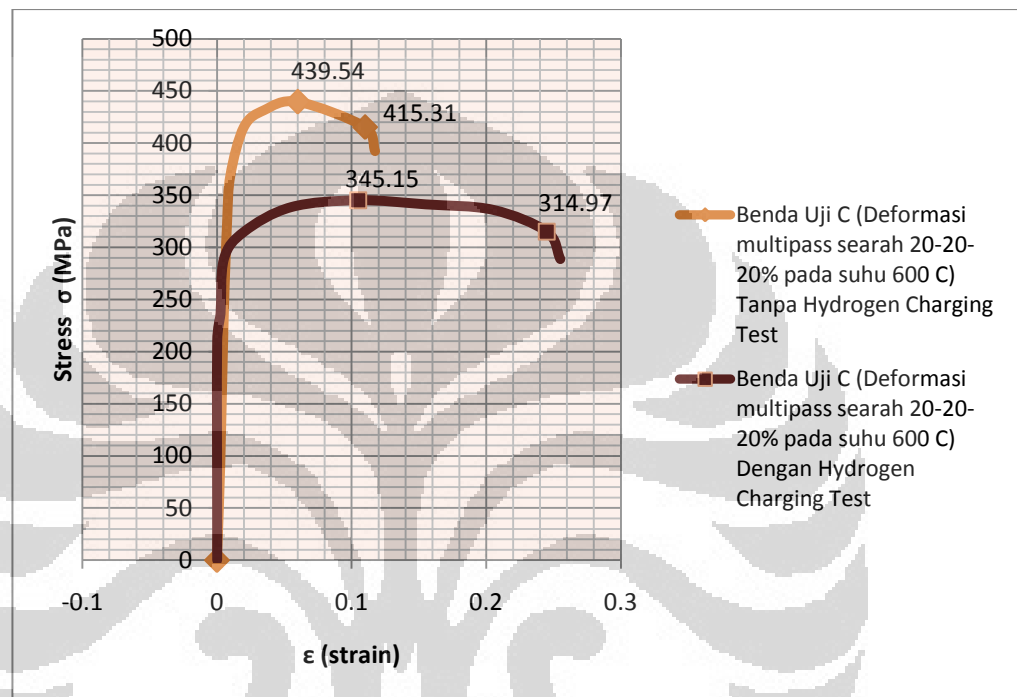
Benda Uji	Keterangan	Diameter Butir (μm)	σ_{UTS} Awal (MPa)	Waktu Charging	$\sigma_{\text{UTS H}_2}$ (MPa)
A	Origin	8.45	298	4 Jam	324.35
C	Rolling deformasi 20-20-20% pada suhu 600°C	7.012	439.54	4 Jam	345.15
D	Rolling deformasi 20-20-20% pada suhu 650°C	7.252	376.15	4 Jam	454.44

Dari tabel 4.7, kekuatan tarik Benda uji A (awal) yang mempunyai diameter butir 8.45 μm , setelah dilakukan *hydrogen charging* mengalami kenaikan nilai kekuatan dari 298 MPa menjadi sebesar 323.4 MPa. Kenaikan tidak terlalu signifikan, hanya sebesar 25.4 MPa. Berikut grafik yang menggambarkan peningkatan nilai kekuatan tarik benda uji A.



Gambar 4.12 Perbandingan Nilai Kekuatan Tarik antara Benda uji A (ukuran butir 8.45 μm) Sebelum dan Sesudah Mengalami *Hydrogen Charging*

Sementara itu, untuk benda uji C (Deformasi *multipass* searah 20-20-20% pada suhu 600⁰ C) yang mempunyai diameter butir 7.012 μ m, justru terjadi penurunan kekuatan tarik dari 439.54 MPa menjadi 345.15 MPa. Penurunan kekuatan tarik sebesar 94.39 MPa. Berikut grafik yang menggambarkan peningkatan nilai kekuatan tarik benda uji C.

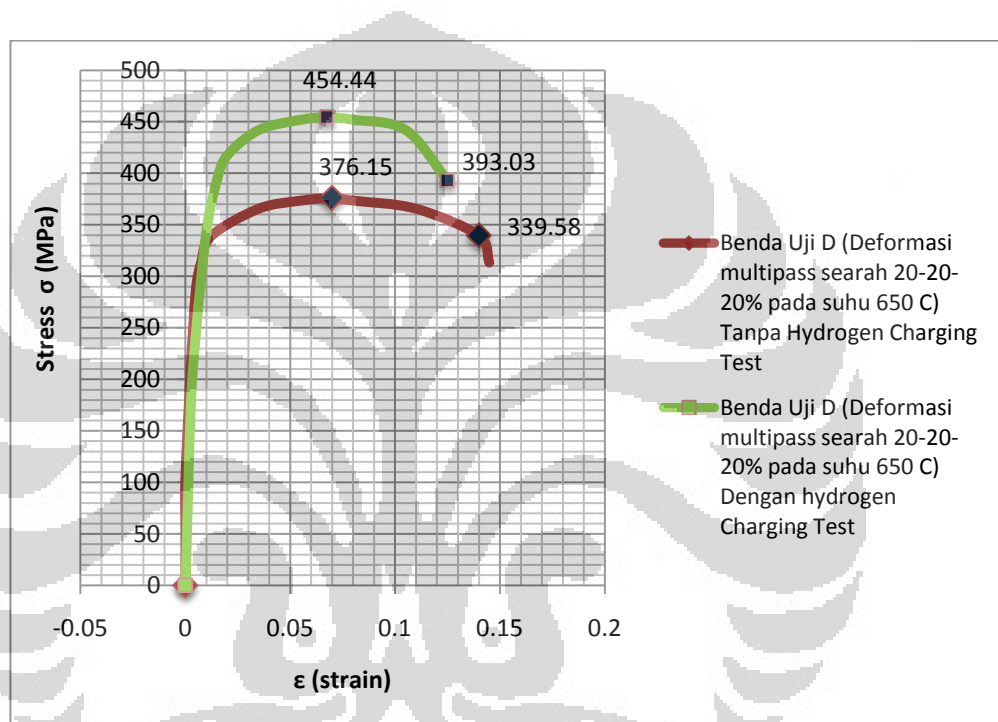


Gambar 4.13 Perbandingan Nilai Kekuatan Tarik antara Benda uji C (ukuran butir 7.012 μ m) Sebelum dan Sesudah Mengalami *Hydrogen Charging*

Pada benda uji C (Deformasi *multipass* searah 20-20-20% pada suhu 600⁰C), penurunan nilai kekuatan tarik disebabkan karena adsorpsi hidrogen kedalam logam yang kemudian menginisiasi penggetasan benda uji, sesuai dengan model tekanan^[35]. Model ini berhubungan dengan difusi atom hidrogen kedalam logam dan terakumulasi pada cacat atau *void* didalam material. Akibat akumulasi atom hidrogen pada suatu cacat ataupun *void* maka atom hidrogen ini akan kembali membentuk molekul hidrogen yang menghasilkan tekanan yang besar. Tekanan yang dihasilkan dapat meningkatkan tegangan kerja dan juga menurunkan tegangan patahnya. Dengan adanya inisiasi retak ini, saat benda uji dipapar dengan suatu pembebanan maka tegangan akan terkonsentrasi dan hal ini

menurunkan kekuatan material.

Untuk benda uji D yang mempunyai diameter $7.252\mu\text{m}$, terjadi perubahan kekuatan yang signifikan dari 376.15 MPa menjadi 454.44 MPa . Kenaikan nilai kekuatan sebesar 78.29 MPa . Penurunan maupun kenaikan nilai kekuatan ini sebanding dengan kekerasan. Karena sifat mekanis tersebut berbanding lurus. Hubungan perbandingan kekuatan tarik antara benda uji D sebelum dan sesudah mengalami *hydrogen charging* dapat dilihat pada gambar 4.14.



Gambar 4.14 Perbandingan Nilai Kekuatan Tarik antara Benda Uji D (ukuran butir $7.252\mu\text{m}$) Sebelum dan Sesudah *Hydrogen Charging*

Mengacu kepada penelitian yang dilakukan oleh Siddiqui^[47], semakin lama durasi pengujian *hydrogen charging*, semakin meningkat pula nilai *tensile strength* dari material. Dengan meningkatnya durasi pengujian *hydrogen charging*, jumlah atom hidrogen yang terdifusi ke dalam material akan semakin banyak. Durasi waktu 4 jam yang digunakan dalam *hydrogen charging* dirasakan cukup untuk mengetahui efek masuknya difusi atom hidrogen. Selain itu, semakin kecil ukuran butir, dimana semakin banyak batas butir akan menyebabkan lebih banyaknya atom hidrogen yang berdifusi ke batas butir. Dalam pengamatan

mikroskop optik, untuk benda uji yang telah mengalami *hydrogen charging*, tidak terlihat adanya *microcracks* pada batas butir. Hal ini dikarenakan benda uji merupakan material baja bebas interstisi. Sehingga, kecenderungan untuk crack akibat difusi hidrogen rendah. Namun demikian, diyakini bahwa atom hidrogen telah berdifusi dan menyebabkan kegetasan pada struktur logam.

Pada benda uji A (diameter butir $8.45\mu\text{m}$) dan benda uji D (diameter butir $7.252\mu\text{m}$), Adsorpsi atom hidrogen kedalam logam kemudian menginisiasi penggetasan benda uji sesuai dengan model dekohesi^[36]. Masuknya atom hidrogen ke dalam logam akan mengurangi gaya kohesi antar atom dalam logam tersebut. Pada saat atom hidrogen masuk kedalam logam maka atom hidrogen akan menempati kisi dan akan memperlemah gaya kohesi antar atom logam. Konsentrasi atom hidrogen yang masuk kedalam logam apabila mencapai batas kritisnya maka akan memperlemah ikatan antar atom logamnya akibat distorsi kisi yang terjadi antar atom logam. Gaya kohesi atau gaya tarik-menarik antar logam akan menurun bila jarak antar atomnya semakin jauh.

Masuknya atom hidrogen kedalam kisi antar atom akan memperbesar jarak antar kisi sehingga bila material diberikan beban yang akan memperbesar jarak antar atom pada kisi logam akan membuat gaya kohesi logam menjadi lebih lemah dan akan menyebabkan material menjadi lebih getas^[50]. Material yang lebih getas akan memiliki nilai UTS yang lebih tinggi daripada material yang ulet, namun kemampuan elongasi dari material yang getas lebih rendah dari material yang ulet^[8].

Dapat dilihat bahwa kenaikan kekuatan tarik benda uji A yang mempunyai diameter lebih besar ($8.45\mu\text{m}$) dari benda uji D ($7.252\mu\text{m}$) tidaklah terlalu signifikan, hanya 25.4 MPa. Sedangkan benda uji D mempunyai kenaikan uji tarik sebesar 78.29 MPa. Dalam kejadian ini, ternyata hidrogen akan lebih mudah masuk kedalam logam yang memiliki ukuran diameter butir lebih kecil, yang berarti dengan semakin banyaknya batas butir, maka atom hidrogen akan mudah masuk kedalam batas butir tersebut.

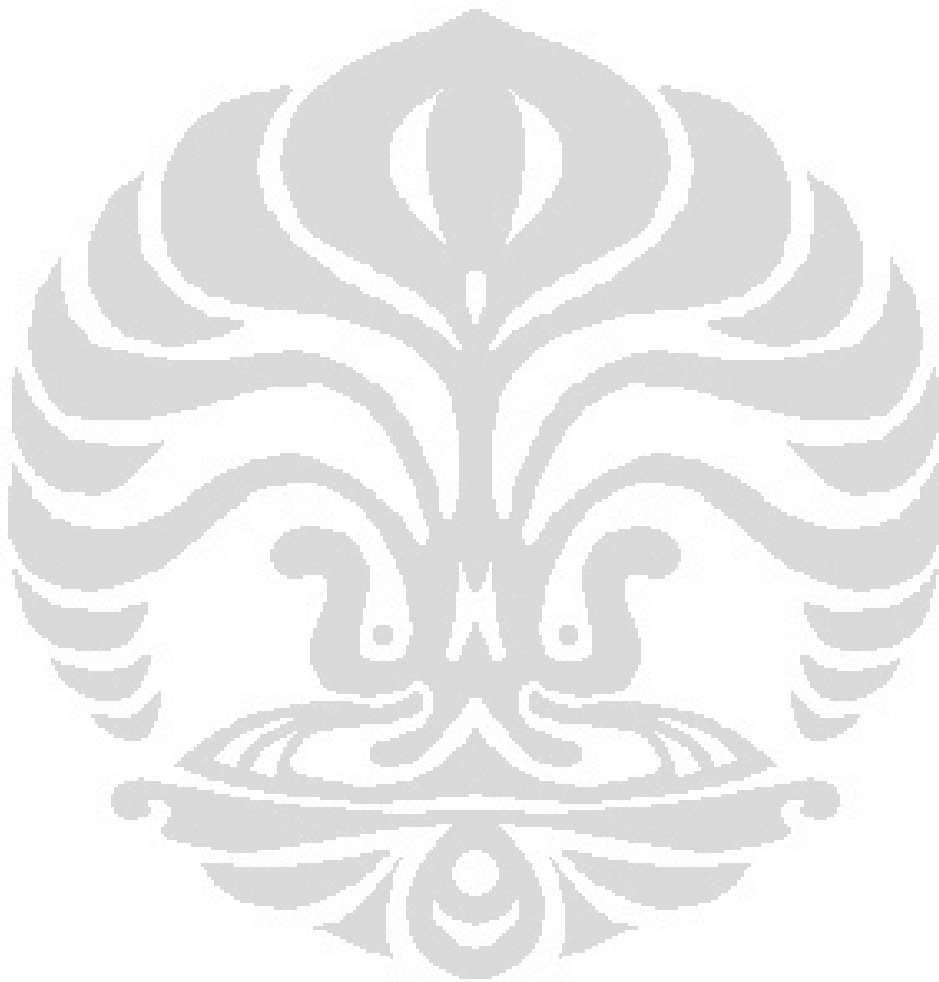
BAB 5

KESIMPULAN

Dari penelitian yang dilakukan terhadap material baja bebas interstisi (*IF Steel*) OA0125AT yang merupakan *Deep Drawing Quality*, yaitu dengan deformasi *multi-pass* searah 20-20-20% pada proses *warm rolling* 600⁰C dan 650⁰C menggunakan media pendinginan es, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Adanya deformasi *multi-pass* pada proses *warm rolling*, temperatur *reheating*, dan waktu tahan mengakibatkan perubahan struktur mikro baja bebas interstisi (*IF Steel*). Pada penelitian ini terjadi perubahan bentuk butir dari bentuk *equiaxed grain* menjadi *elongated grain*. Selain itu dengan adanya pola *microbands* pada butir pipih hasil proses *warm rolling* mempunyai kecenderungan untuk terbentuknya sub butir.
2. Dari analisis struktur mikro dan pengukuran nilai kekerasan serta kekuatan tarik diketahui bahwa material yang memiliki bentuk *elongated grain* (ukuran butir 7.012 μ m dan 7.252 μ m) memiliki kekerasan dan kekuatan tarik yang lebih tinggi daripada *equiaxed grain* (8.45 μ m)
3. Terdapat dua model teori difusi atom hidrogen kedalam logam. Dari hasil pengujian nilai kekerasan dan kekuatan tarik, diperoleh bahwa ukuran diameter butir yang lebih kecil (Benda uji D dengan diameter 7.252 μ m) memiliki ketahanan difusi atom hidrogen yang lebih rendah daripada benda uji dengan ukuran diameter butir yang lebih besar (Benda uji A dengan diameter 8.45 μ m. Semakin kecil butir, semakin banyak pula batas butir yang ada, membuat atom hidrogen dengan mudah berdifusi kedalam batas butir sesuai dengan teori dekohesi. Sedangkan Benda uji D dengan ukuran butir 7.012 μ m mengalami penurunan nilai kekerasan dan kekuatan tarik, ditunjukkan dengan nilai kekerasan yang berkurang dari 167.3 HV menjadi 127.9 HV serta nilai kekuatan tarik dari 439.54 MPa menjadi 345.15 MPa. Penurunan nilai tersebut sesuai dengan model tekanan bahwa difusi atom hidrogen kedalam logam dan terakumulasi pada cacat atau

void didalam material. Akibat akumulasi atom hidrogen pada suatu cacat ataupun *void* maka atom hidrogen ini akan kembali membentuk molekul hidrogen yang menghasilkan tekanan yang besar. Tekanan yang dihasilkan dapat meningkatkan tegangan kerja dan juga menurunkan tegangan patahnya.



REFERENSI

1. D. Gandy. Carbon Steel Handbook. Electric Power Research Institute. Final Report Hal 1-1. March 2007.
2. Indra, Zulfarin. Baja Untuk Industri Enamel, Sejarah dan Perkembangannya. Krakatau Steel. 2000.
3. Yoshitaka Adachi , Masayuki Wakita , Hossein Beladi , Peter Damian Hodgson. "The formation of ultrafine ferrite through static transformation in low carbon steels". Acta Materialia Elsevier 55 (2007) 4925-4934.
4. J. Zrník, J. Drnek, Z. Nový, S. V. Dobatkin, O. Stejskal. —*Structure Evolution During Severe Warm Plastic Deformation of Carbon Steel*, Rev. Adv. Mater. Sci. 10 hal. 45-53. 2005.
5. I. Kozasu. *Material Science and Technology*, Vol. 7, Constitution and Properties of Steel Ed by F. B. Pickering hal. 184. VCH 1993.
6. Samerjit. *Hydrogen Induced Cracking in Low Strength Steels*. Thammasat Int.J.Sc.Tech Vol.9 No.2. 2004.
7. Rahmat Saptono. Pengetahuan Bahan 2008. Departemen Metalurgi dan Material FTUI. 2008.
8. William D. Callister, Jr., *Materials Science and Engineering, An Introduction*, 6th ed., John Wiley & Son, Inc., 2003.
9. Takechi, H., "Metallurgical aspects of interstitial free sheet steel from industrial viewpoints", ISIJ International, Vol. 34, 1994, No. 1, pp. 1-8.
10. Black, B, Bode, Hanh, "Interstitial free steel, processing, properties, and application" Thyssen Stahl AG, Germany 1995.
11. G. H Akbari, C. M Sellars and J.A Whiteman. *Microstructural development During Warm Rolling of an IF Steel*. Pergamon. Acta Mater. Acta Metallurgica. Vol 45, No 12. 1997. PP 5047-5058.
12. Weng, Yuqing. Ultra-Fine Grained Steels. Metallurgical Industry Press, 2009.
13. BHOWMIK, AYAN. *Evolution of Grain Boundary Microstructure and Texture in Interstitial Free Steel Processed by Equal-Channel Angular*

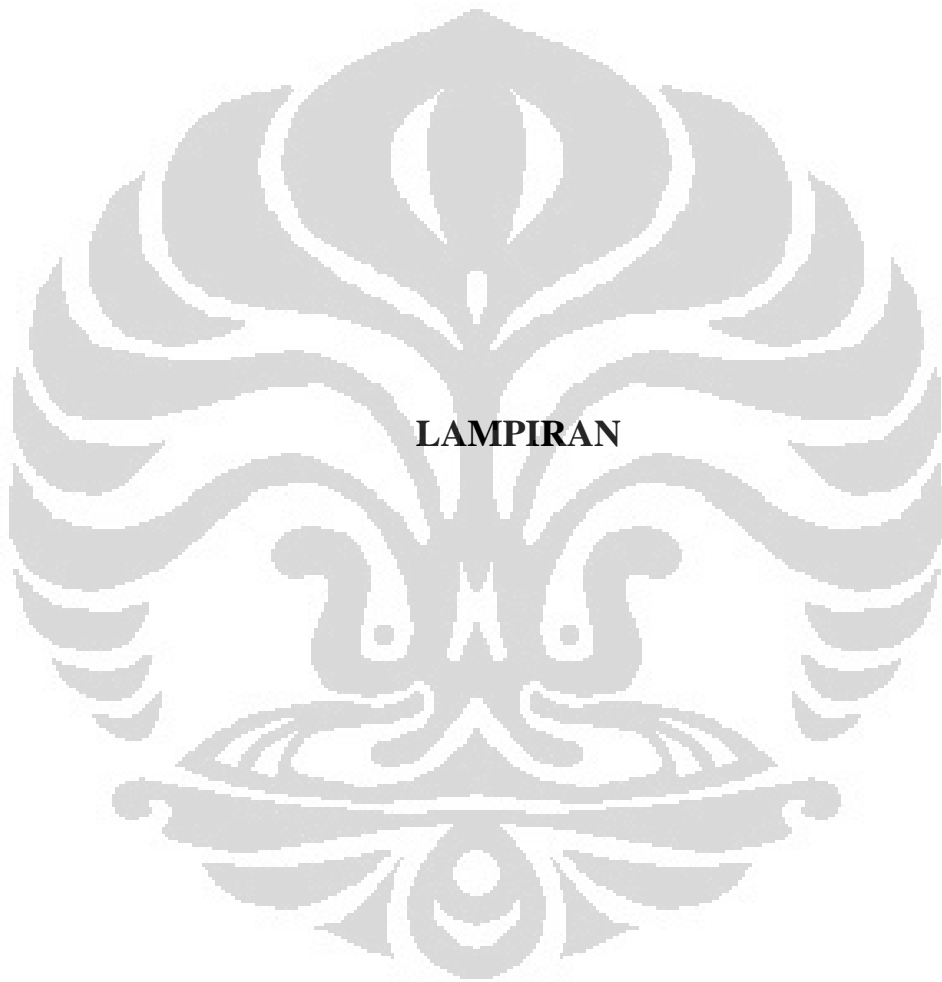
Extrusion.2009.

14. Hadi, Qomarul. Pengaruh Jumlah Lajuan Arah Bolak-Balik Pada Aluminium Komersil Dengan Proses ECAP Terhadap Sifat Mekanik. 2011.
15. Shey, John A. Introduction to manufacturing Process, 2nd Edition. McGraw-Hill Book Company, New York 1987.
16. Groover M.P., Fundamentals of Modern Manufacturing, John-Wiley and Sons, New York, 1999.
17. Harris, John Noel. *Mechanical Working of Metals : Theory and Practic* Pergamon Press : UK. 1983.
18. Yuwei Gao, Tianfu Jing, Guiying Qiao, Jinku Yu, Tiansheng Wang, Qun Li, Xinyu Song, Shuqiang Wang, and Hong Gao. *Microstructural evolution and tensile properties of low-carbon steel with martensitic microstructure during warm deforming and annealing*.
19. S. Dobatkin, J. Zrnik, I. Mamuzic, *Ultrafine-Grained Low Carbon Steels By Severe Plastic Deformation*, METALURGIJA 47 Vol. 181-186. 2008.
20. 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.
21. 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.
22. Kalpakjian, Serope dan S. R. Schmid. *Manufacturing Processes for Engineering Materials* 5th ed. Pearson Education : UK. 2008.
23. ASM Handbook. Vol. 09, Metallography and Microstructure , (ASM International). 1991.
24. A.Najafi. *Effect of Delay Time on Microstructural Evolution during Warm Rolling of Ti-Nb-IF Steel*. J. Mater. Sci. Technol., Vol.20 No.1, 2004.
25. Ginzburg, Vladimir G. *Flat-Rolled Steel Processes : Advanced Technology*. CRC Press : New York. 2009
26. Humphreys, F.J. and M. Hatherly, *Recrystallization and Related Annealing Phenomena*. Pergamon Press. 2004 .
27. Murty, Narayana and Torizuka, Shiro. *Dynamic Recrystallization of Ferrite*

During Warm Deformation of Ultrafine Grained Ultra-Low Carbon Steel. 2005.

28. ASM Handbook.1991. Vol. 04, *Heat Treating*, (ASM International).
29. Beladi, Hossein et al. The Effect of Multiple Deformations on the Formation of Ultrafine Grained Steel. *METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A. VOLUME 38A. MARCH 2007.*
30. Smallman R.E and R.J Bishop. *Modern Physical Metallurgy and Materials Engineering.* 6th ed. Butterworth-Heinemann. 1999.
31. 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.*
32. Tootten, Goerge E.*Steel Heat Treatment.*Taylor and Francis Group.2006.
33. D.A. Jones, *Principles and Prevention of Corrosion*, 1996.
34. Namboodhiri, T.K.G, “*Hydrogen Damage of Metallic Material*”. Banaras Hindu University. Varanasi.
35. Hadi, Nurul. Pengaruh Ukuran Butir dan Pemberian Tegangan Terhadap Sifat Mekanik Baja Karbon Rendah Akibat *Hydrogen Embrittlement*. Skripsi Program Sarjana Fakultas Teknik Mesin ITB. 2008.
36. Elvira. S, Mioara “ *Hydrogen Embrittlement in Ferrous Materials*”, Universite Libere de Bruxelles France. 2006.
37. Riastuti, Rini, dkk. “*Effect of Hydrogen Charging on Microstructure Morphology of Warm Rolled Low Carbon Steel*”. 2012.
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 Determinining Average Grain Size*”. 2003.
41. ASTM E92. “*Standard Test Methods for Vickers Hardness of Metallic Materials*”. 2003.

42. Capriotti R, et al. *Hydrogen Embrittlement Detection on High Strength Steels by Means of XRD Residual Stress Determination Technique*. 2000.
43. JIS Z 2201. “*Test Pieces for Tensile Test for Metallic Material*”. 1980.
44. Anindita, Cyintia. Studi Ketahanan Serangan Hidrogen Pada Baja Bebas Interstisi (*IF Steel*) yang Mengalami Canai Hangat *Multipass Reversibel* Pada 650⁰ C.
45. Longfei, Yang Wangyue, and Sun Zuqing, “*Dynamic Recrystallization of Ferrite in a Low Carbon Steel*”. 2006.
46. Yu. X.Q dan Sun Y.S. *Effect of elongated grain structure on the mechanical properties of an Fe3A-based alloy*.1996.
47. R.A. Siddiqui, Hussein Abdullah. *Hydrogen Embrittlement in 0.31% Carbon Steel Used for Petrochemical Application*. Elsevier,2005.
48. F.Huang, X.G Li, and J. Liu. *Hydrogen Induced Cracking Susceptibility and Hydrogen Trapping efficiency of Different Microstructure X-80 Pipeline Steel*. Springer Science. 2010.
49. C.F. Dong. *Effect of Hydrogen Charging on the Susceptibility of X100 Pipeline Steel to Hydrogen Induced Cracking*. Elsevier, 2009.
50. Thomas J. C. Eun, *Hydrogen Damages in Oil Refinery and Petroleum Plants*, Keyano College Suncor Energy, 2005.



LAMPIRAN

Lampiran 1. Uji Komposisi Menggunakan OES

MAINFRAME - EXTRA! Personal Client

Pt. Krakatau Steel - Cold Rolling Mill Date : 15-11-2011
 Time : 14:53:41

QA08 I DISPLAY DETAIL HOTBAND

-06 06 00 13 14 14

F06 ==> Display CRC Import

CRM CoilNo.: 365281	HSM CoilNo.: 988020	Schedmon: 11-2011
Vanadium : 0005	AI Number : 44	SchedIno : 009
Order CIs : 11	Vnd.Ord.No : C10239 06	Itemno : 0680
Order No. : C10597 02	Vnd.Ord.It : 06	
Act. Gauge : 3.000	Vnd.Gauge : 1235.00	Fin.Tem.Avg.: 90
Act. Width : 20.680	Vnd.Width : 20.680	Fin.Tem.Max.: 92
Act. Weight : 3.000	Vnd.Weigth : 20.680	Fin.Tem.Min.: 88
Stl. Grade : 0A0125AT	Def.Degree :	Coil.Tem.Max.: 72
Asg. Date : 08-11-2011	Def.Rate :	Coil.Tem.Min.: 65
Rec. Date : 16-07-2011	Location : CPL-0072	Coil.Tem.Avg.: 70
Char.Date :	Slab No. : 1500	Act.Gaug.Min.: 2.940
Insp Date&Time : 16-07-2011 14:24:41		Act.Gaug.Max.: 3.060
Disposit. : 1	Hold Reas. :	Act.Gaug.Avg.: 3.000
HRC Source : L	Crown :	Act. Wd. Min.: 1248.00
Scheduled :	Ship.Tiket : CAIG00309 02	Act. Wd. Max.: 1248.00
Def. Loc. :	Reason Code :	Act. Wd. Avg.: 1249.00
Qual. Code : DDQ	Heat.Numb. : 06877Y	Confirm Date : 16-07-2011 09:57
	Asal Slab : PT. KRAKATAU STEEL	

Enter =Return F01 =T Menu F02 =P Menu F07 =Prev F08 =Next F09 =To Scroll

Display data OK

Connected to host 10.132.1.150

MAINFRAME - EXTRA! Personal Client

P.T Krakatau Steel - Cold Rolling Mill DATE : 15/11/2011
 TIME : 14:58:05

QA03 I DISPLAY HEAT ANALYSIS

USER-ID :
 PASSWORD :

SHIFT :

Heat No : 06877Y	Source :
Slab No :	Grade : 0A0125AT
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

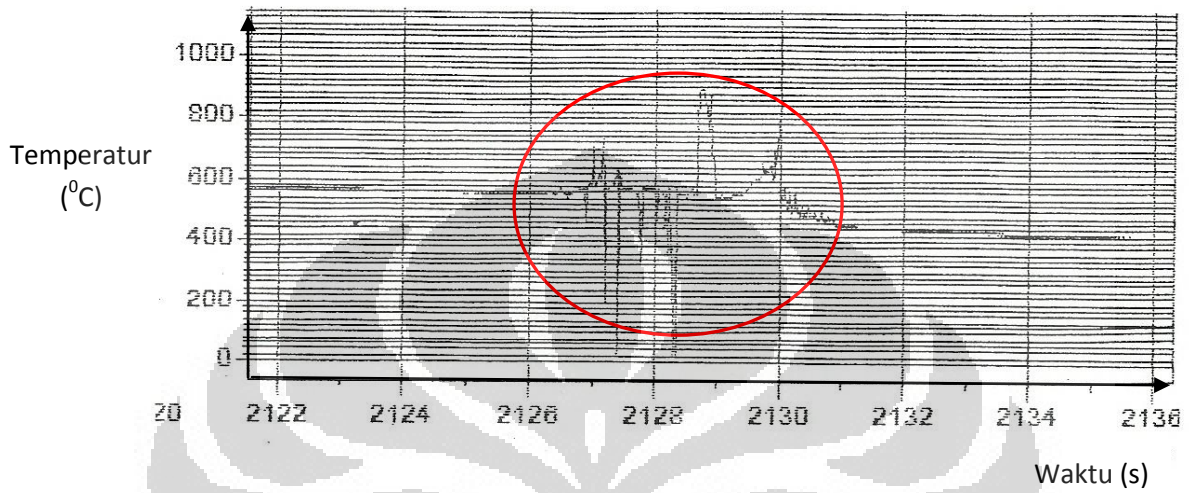
ENT=ENTER F01=T_MENU F02=P_MENU F08=NEXT F10=SCROLL F12=TUTOR

Display data OK ...

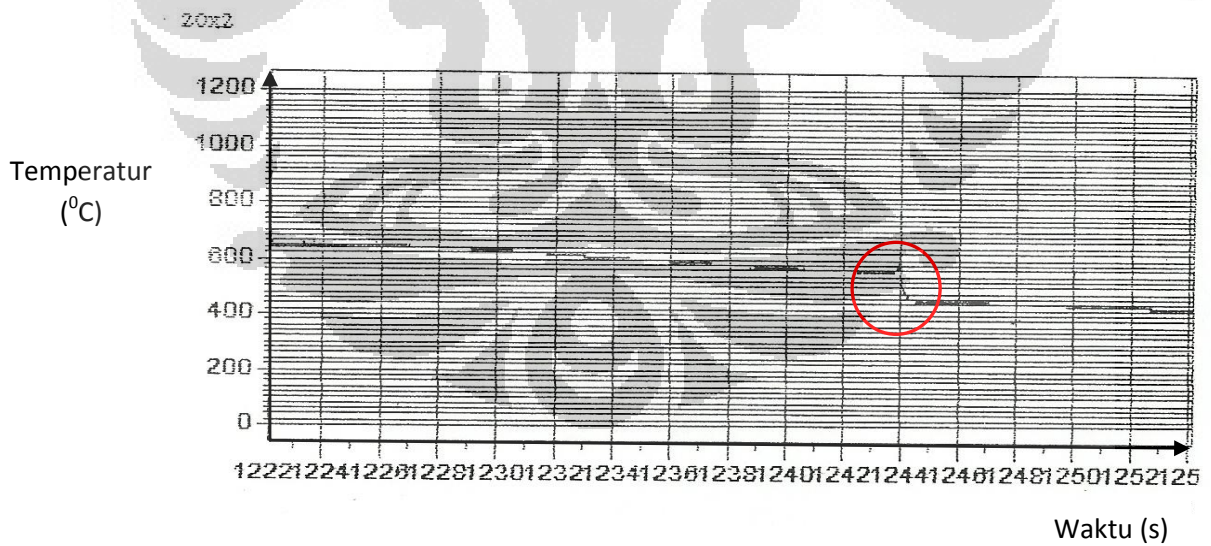
Connected to host 10.132.1.150

Lampiran 2. Grafik Akuisisi *Rolling* Multipass Searah pada Suhu 600⁰ C

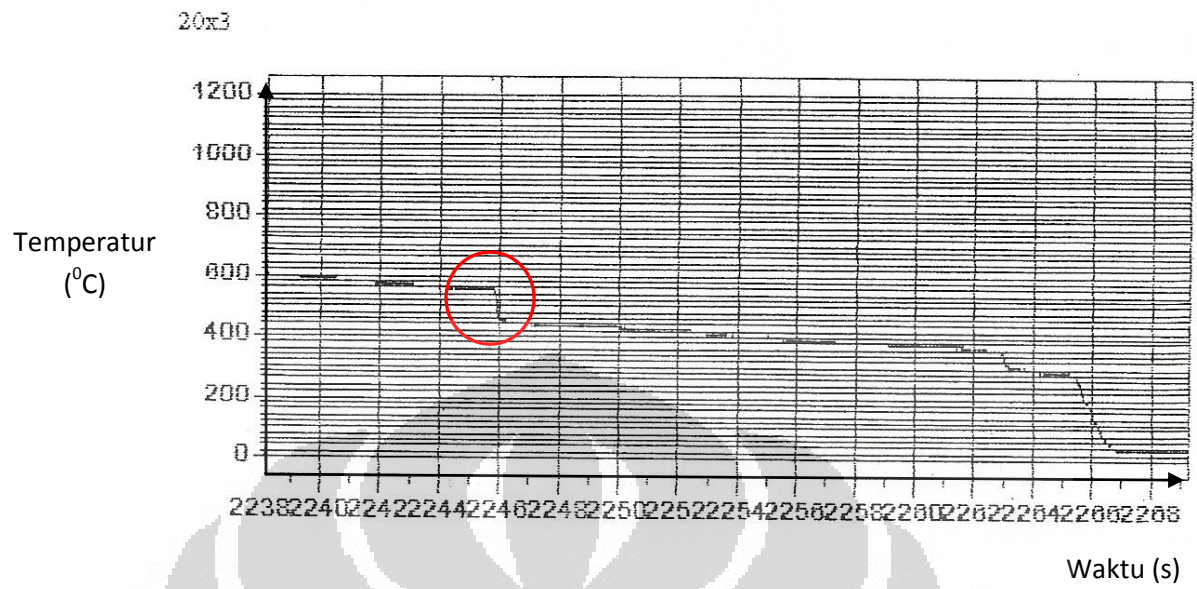
1. *Pass* ke 1



2. *Pass* ke 2

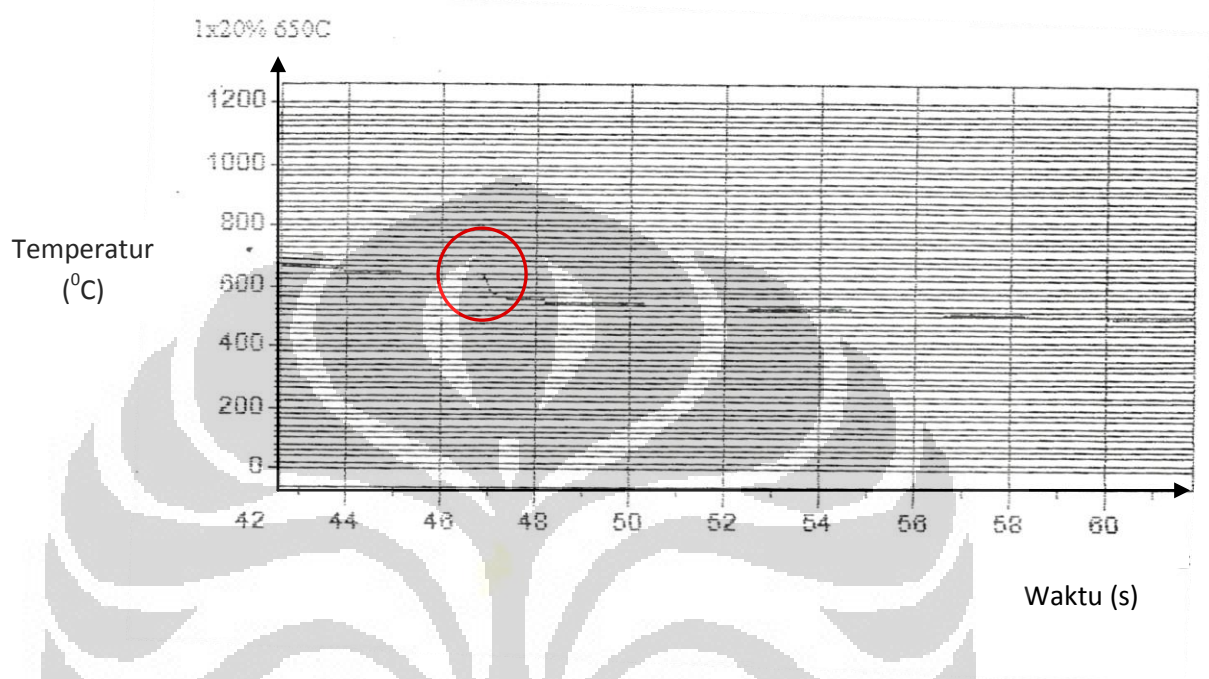
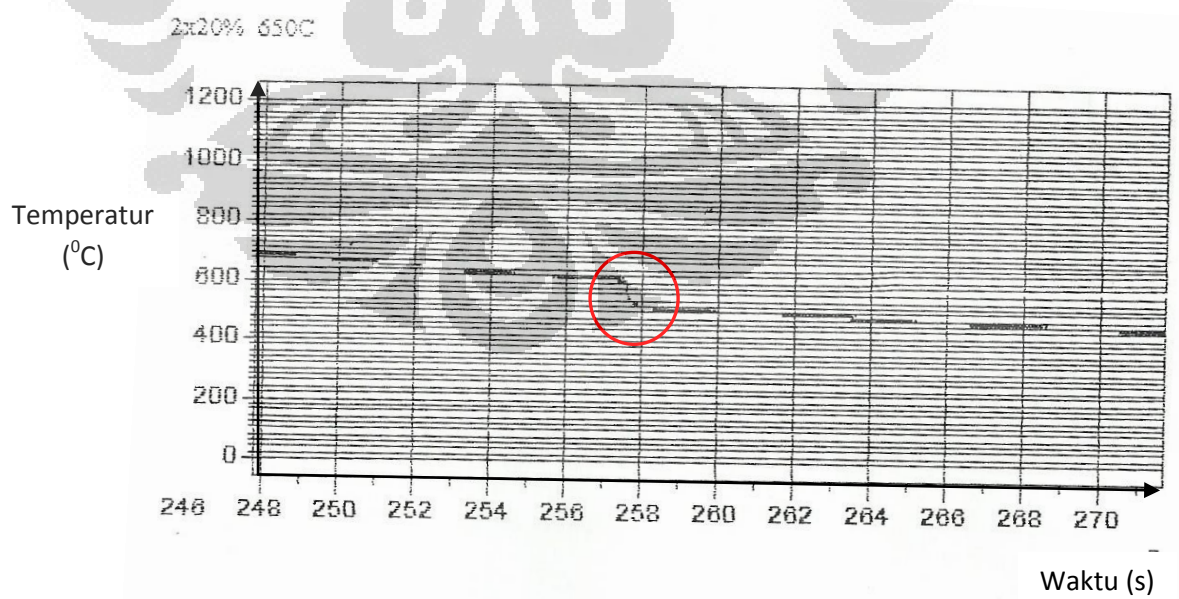


3. Pass ke 3

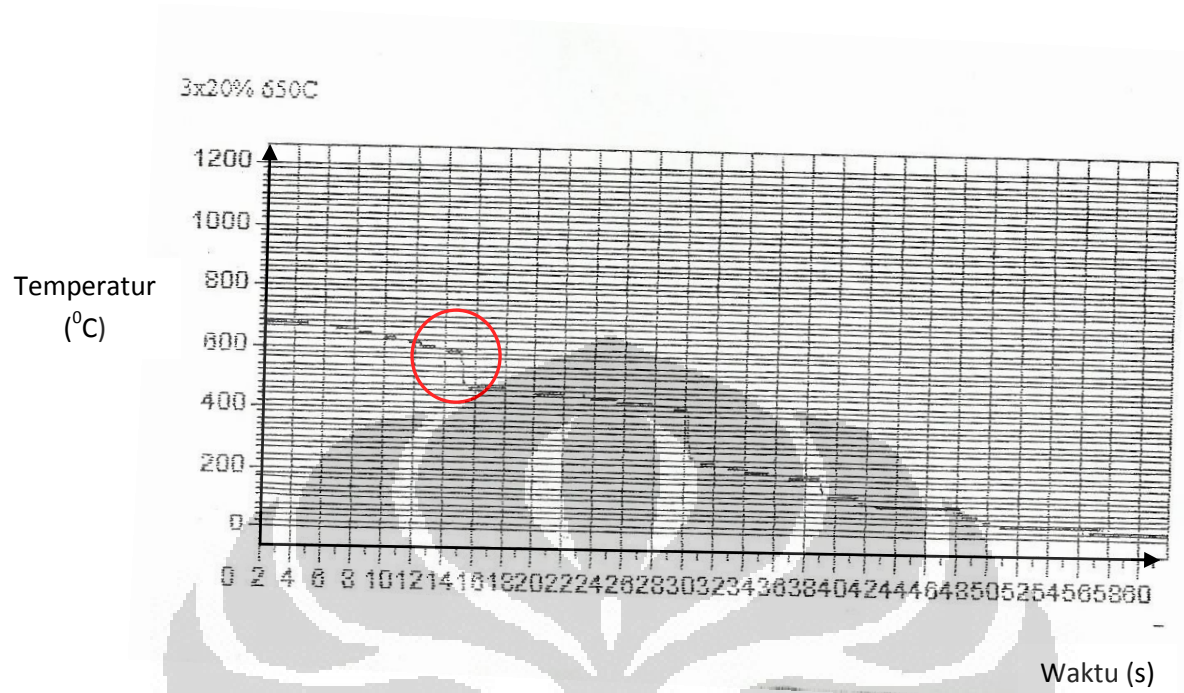


Keterangan:

Tanda **O** merupakan indikasi terjadinya deformasi.

Lampiran 3. Grafik Akuisisi *Rolling* Multipass Searah pada Suhu 650⁰ C1. *Pass* ke 12. *Pass* ke 2

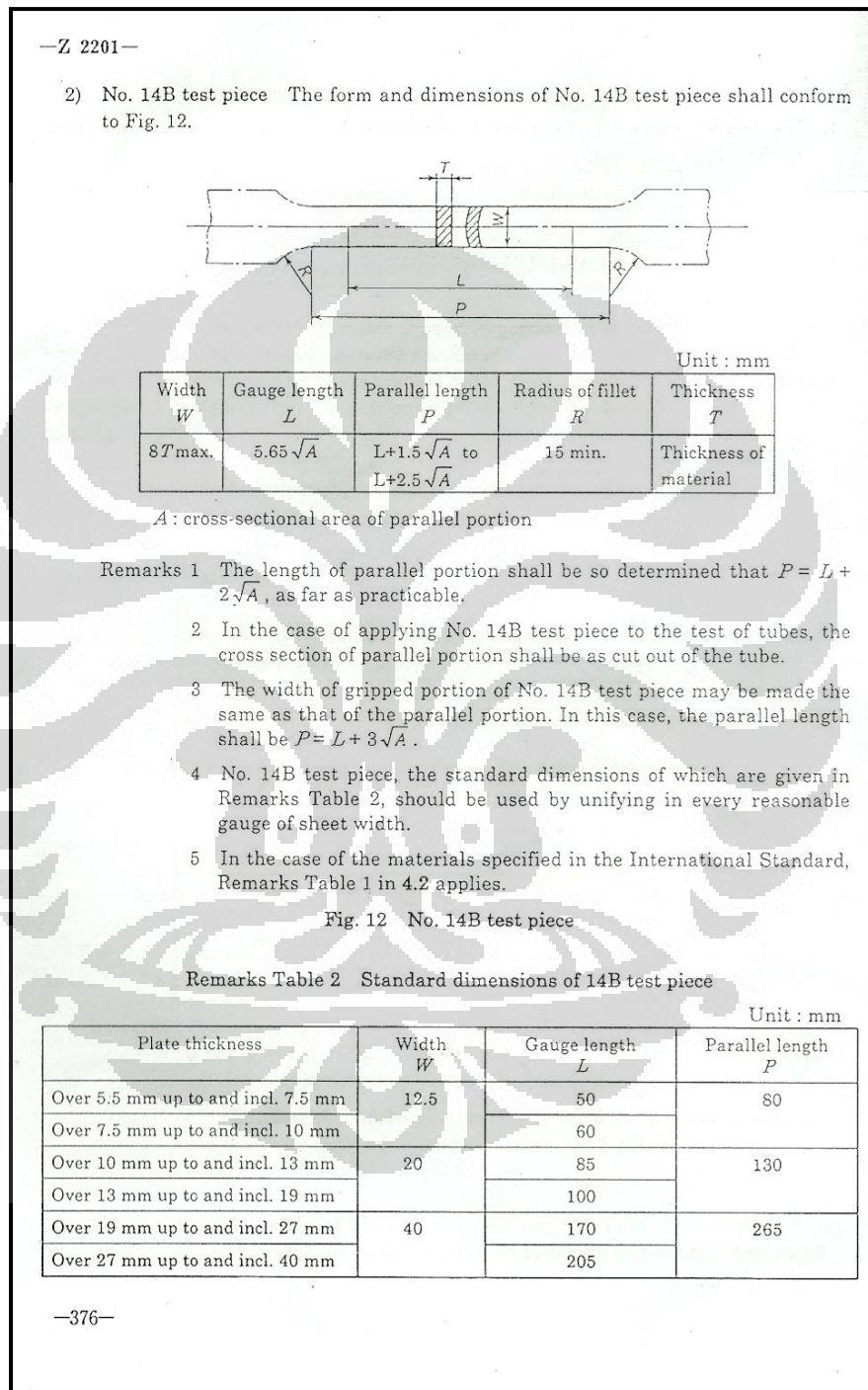
3. Pass ke 3



Keterangan:

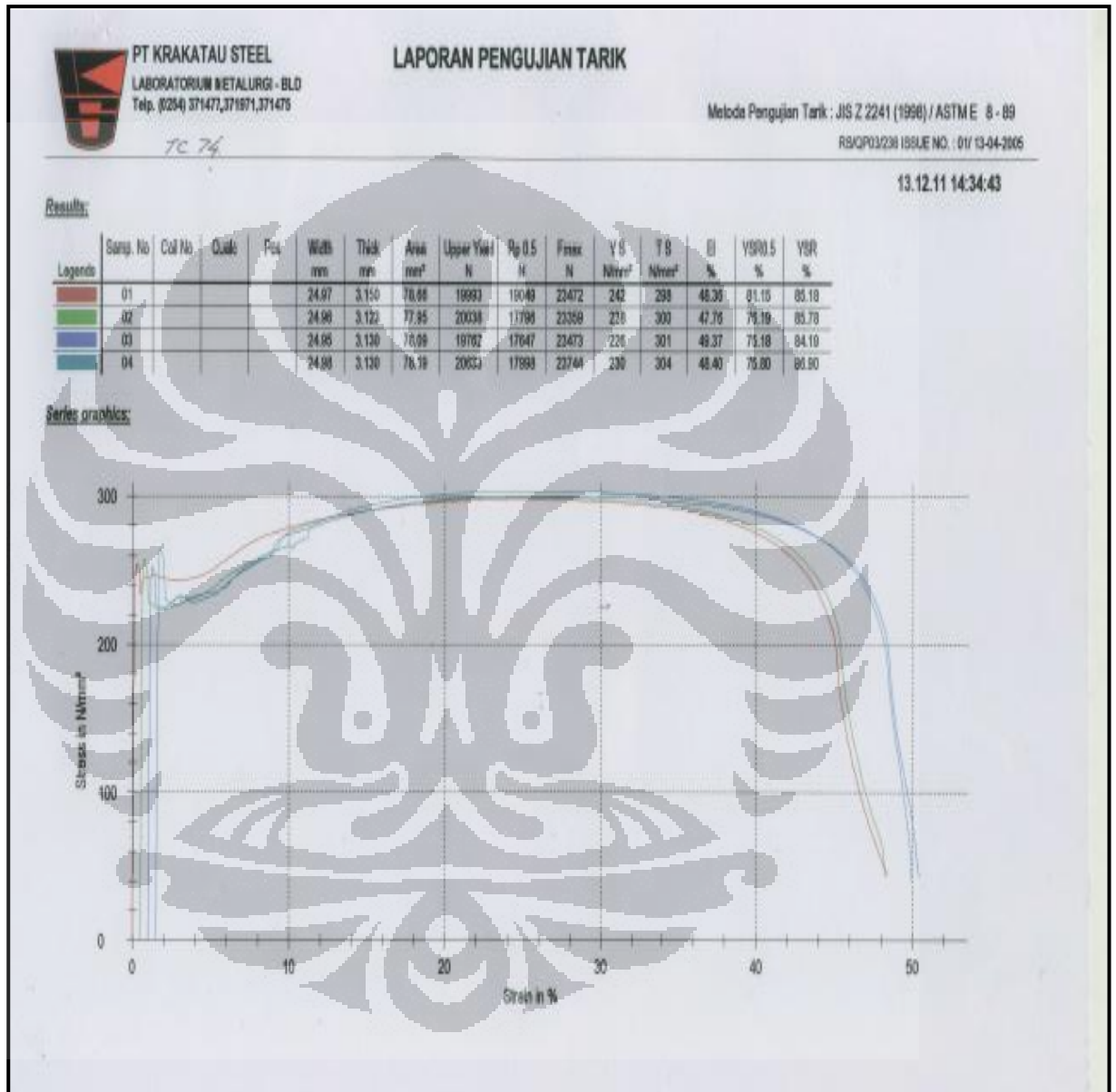
Tanda **O** merupakan indikasi terjadinya deformasi.

Lampiran 4. Standar Pengujian Uji Tarik JIS Z 2201 pada Benda Uji Pelat dengan Ketebalan 3 mm-4 mm

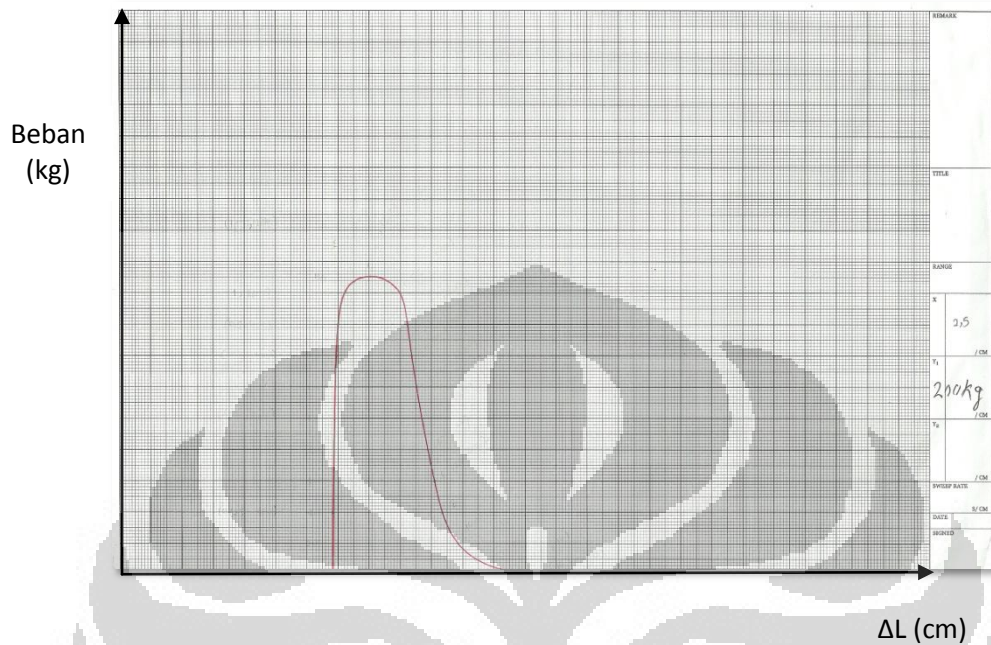


Lampiran 5. Hasil Pengujian Tarik

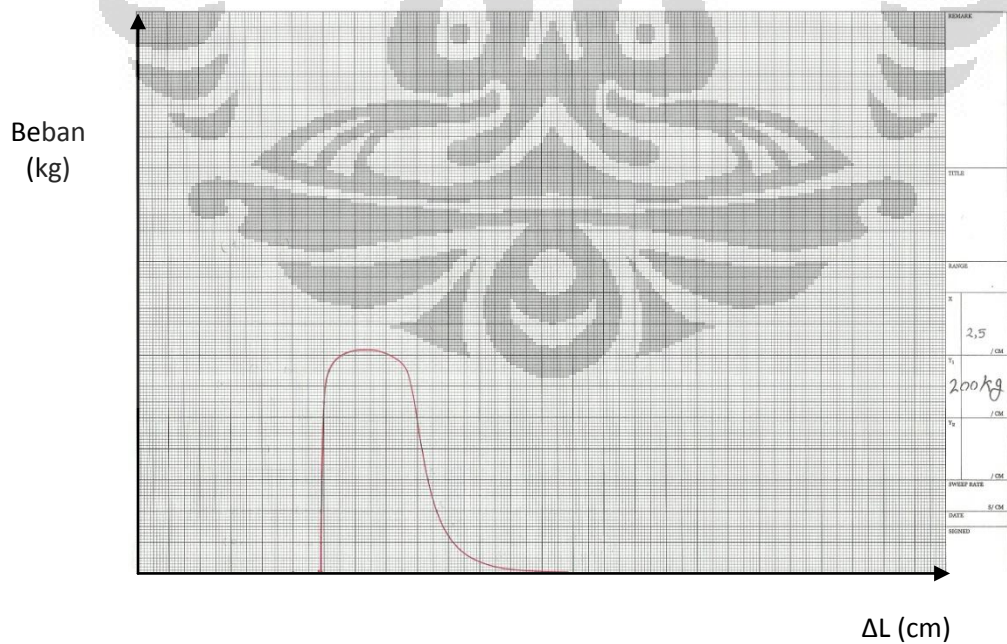
1. Grafik Tegangan Terhadap Regangan Uji Tarik pada Benda Uji Baja Bebas Interstisi Tanpa Perlakuan (Sampel Ke-1 Berwarna Merah)



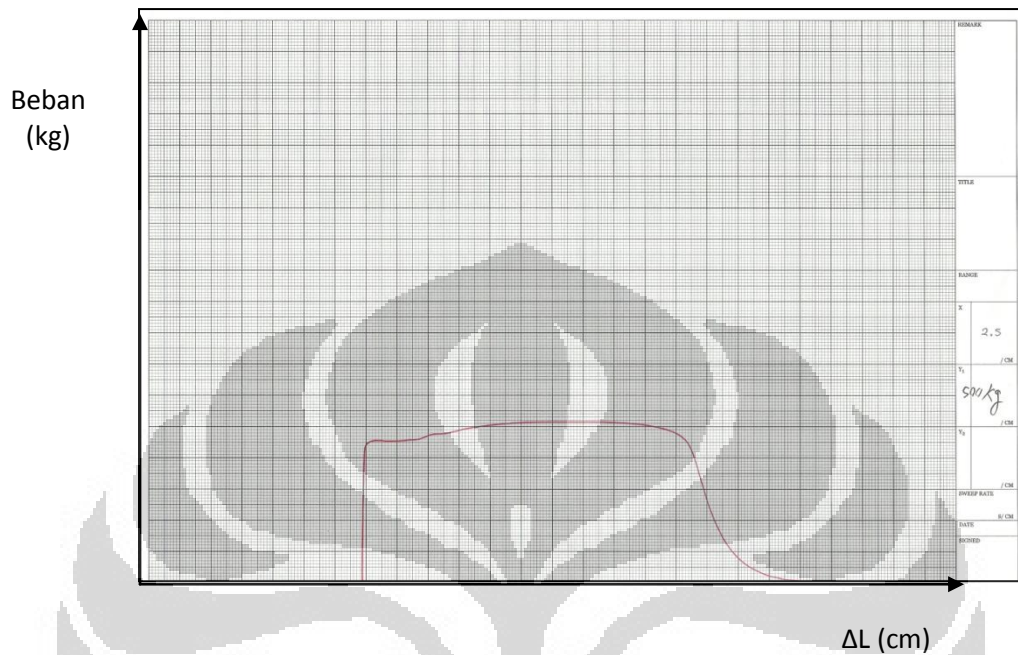
2. Grafik Uji Tarik Beban Terhadap Pertambahan Panjang pada Benda Uji Baja Bebas Interstisi Deformasi 20-20-20% *Multipass* Searah pada Suhu 600⁰ C



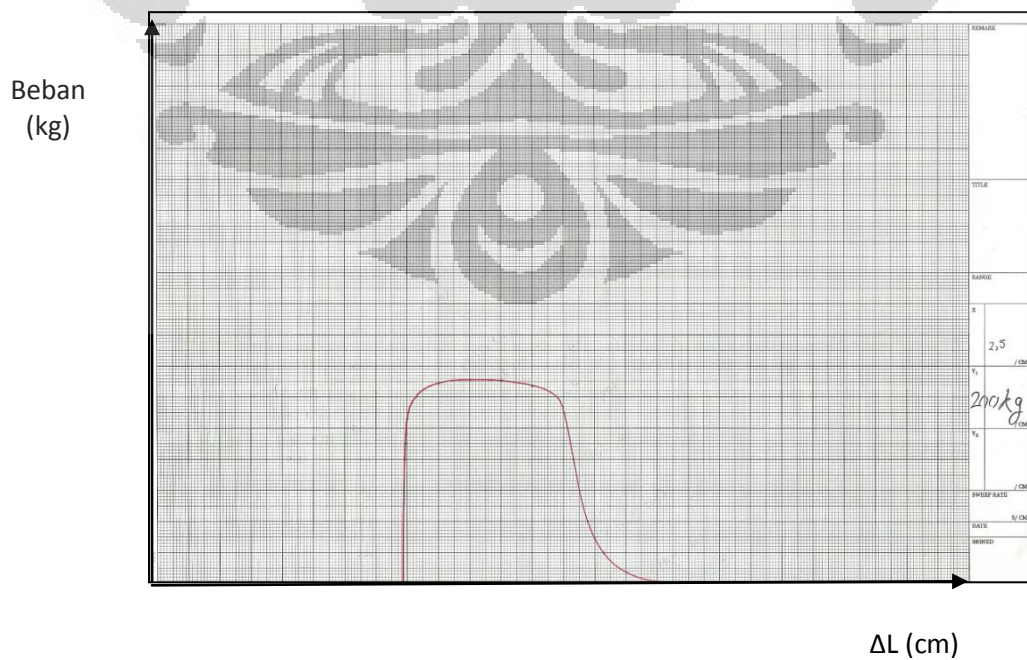
3. Grafik Uji Tarik Beban Terhadap Pertambahan Panjang pada Benda Uji Baja Bebas Interstisi Deformasi 20-20-20% *Multipass* Searah pada Suhu 650⁰ C



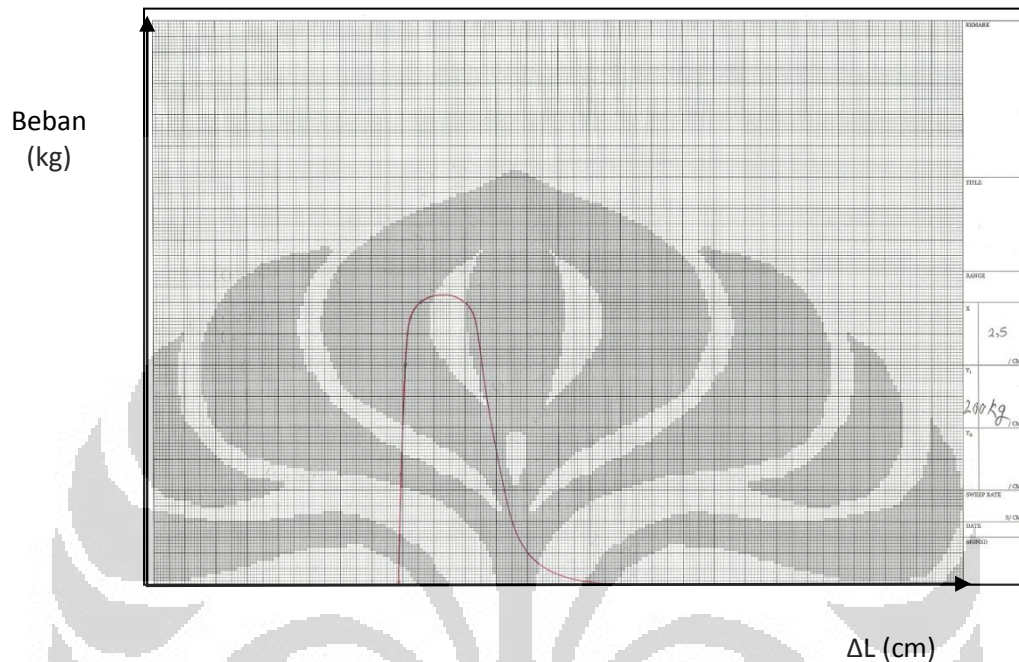
4. Grafik Uji Tarik Beban Terhadap Pertambahan Panjang pada Benda Uji Baja Bebas Interstisi Tanpa Perlakuan Setelah *Hydrogen Charging*.



5. Grafik Uji Tarik Beban Terhadap Pertambahan Panjang pada Benda Uji Baja Bebas Interstisi Deformasi 20-20-20% *Multipass* Searah pada Suhu 600⁰ C Setelah *Hydrogen Charging*



6. Grafik Uji Tarik Beban Terhadap Pertambahan Panjang pada Benda Uji Baja Bebas Interstisi Deformasi 20-20-20% *Multipass* Searah pada Suhu 650⁰ C Setelah *Hydrogen Charging*



Lampiran 6. Spesifikasi Alat

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-cccv-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

