



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI KETAHANAN *HYDROGEN EMBRITTLEMENT* DAN
PENGARUH VARIASI SUHU CANAI HANGAT TERHADAP
UKURAN BUTIR FERIT PADA STAINLESS STEEL AISI 430**

SKRIPSI

DEAN AGASA ARDIAN

0806455654

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL

UNIVERSITAS INDONESIA

DEPOK

JANUARI 2012



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI KETAHANAN *HYDROGEN EMBRITTLEMENT* DAN
PENGARUH VARIASI SUHU CANAI HANGAT TERHADAP
UKURAN BUTIR FERIT PADA STAINLESS STEEL AISI 430**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**DEAN AGASA ARDIAN
0806455654**

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

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : DeanAgasa Ardian

NPM : 0806455654

Tanda Tangan :



Tanggal : 20 Januari 2012

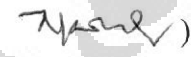
HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Dean Agasa Ardian
NPM : 0806455654
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi : Studi Ketahanan *Hydrogen Embrittlement* dan
Pengaruh Variasi Suhu Canai Hangat terhadap
Ukuran Butir Ferit pada Stainless Steel AISI 430

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Rini Riastuti, M.Sc

()

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

()

Penguji : Dra. Sari Katili, M.S

()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 20 Januari 2012

KATA PENGANTAR

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

- 1) Ir. Rini Riastuti, M.Sc, selaku pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini.
- 2) Seluruh dosen dan staf pengajar Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI yang telah memberikan pengetahuan dan ilmu yang bermanfaat.
- 3) Orang tua dan keluarga saya yang senantiasa mendoakan saya, memberikan bantuan baik moril maupun materil.
- 4) Terry Atmajaya, Cyintia Anindita, Kholilah Saadah, dan Hariansyah Permana selaku rekan kerja yang telah banyak membantu saya dalam penelitian ini.
- 5) Seluruh karyawan, staf, serta teknisi Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI.
- 6) Seluruh rekan-rekan metalurgi dan material 2008 yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini.
- 7) Sahabat dan teman-teman saya yang telah membantu saya di saat apapun.

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

Depok, 20 Januari 2012

Penulis

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

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

Nama : Dean Agasa Ardian
NPM : 0806455654
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Departemen : Metalurgi dan Material
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

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

Studi Ketahanan *Hydrogen Embrittlement* dan Pengaruh Variasi Suhu Canai Hangat terhadap Ukuran Butir Ferit pada Stainless Steel AISI 430

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 20 Januari 2012

Yang menyatakan



(Dean Agasa Ardian)

v

ABSTRAK

Nama : Dean Agasa Ardian
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul : Studi Ketahanan *Hydrogen Embrittlement* dan Pengaruh Variasi Suhu Canai Hangat terhadap Ukuran Butir Ferit pada Stainless Steel AISI 430

Penelitian dalam studi ketahanan *hydrogen embrittlement* dan pengaruh variasi suhu canai hangat terhadap ukuran butir ferit pada *stainless steel* AISI 430 diawali dengan melakukan pemanasan ulang pada sampel AISI 430 dengan temperatur reheating sebesar 1100°C untuk mendapatkan fasa *fully ferritic* pada struktur mikro sampel. Selanjutnya material mengalami *singlepass* dengan besaran deformasi 55% pada 3 variabel suhu dalam rangkaian proses canai hangat (*warm rolling*) untuk mengetahui pengaruhnya terhadap ukuran butir ferit yang dihasilkan pada proses TMCP. Langkah berikutnya adalah melakukan *hydrogen charging test* pada sampel yang belum mengalami deformasi dan sudah mengalami deformasi dari proses canai hangat. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa pengaruh proses canai hangat terhadap peningkatan sifat mekanis baja AISI 430 *stainless steel* dan pengaruh dari besar butir akibat dari deformasi yang dilakukan terhadap ketahanan dari *Hydrogen Embrittlement*.

Kata kunci:

besar butir, canai hangat (*warm rolling*), *hydrogen embrittlement*, nilai kekerasan, metalografi, stainless steel AISI 430

ABSTRACT

Name : Dean Agasa Ardian
Study Program : Metallurgy and Materials Engineering
Title : Study of Hydrogen Embrittlement Resistance and Effect of Deformation on Warm Rolling at Several Temperatures to Ferrite Grain Size in AISI 430 Stainless Steel

Research in study of hydrogen embrittlement resistance and effect of several temperature for ferrite grain size of AISI 430 Stainless Steel is initiated by reheating the sample of AISI 430 at temperature of 1100°C to obtain fully ferritic phase in microstructure. Furthermore, the material is 55% deformed in 3 temperature variables in series of warm rolling process to know the effect of warm rolling for the ferrite grain size of the material. The next step is doing hydrogen charging test on the both of sample which are not deformed and deformed from warm rolling process. This research objective is analyzing the effect of the warm rolling process on mechanical properties of AISI 430 Stainless Steel. The second objective of this research is analyzing the effect of ferrite grain size on hydrogen embrittlement resistance.

Keywords:

warm rolling, grain size, hardness, hydrogen embrittlement, metallography, AISI 430 Stainless Steel

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR RUMUS	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xv
1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Ruang Lingkup	4
1.4.1 Material	4
1.4.2 Parameter Penelitian.....	4
1.4.3 Tempat Penelitian.....	4
1.5 Sistematika Penulisan	5
2. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 <i>Stainless Steel</i> AISI 430	6
2.2 Pengaruh Deformasi Plastis	8
2.3 Pengaruh Besar Butir Terhadap Sifat Mekanis	9
2.4 Proses Canai	11
2.4.1 Proses Canai Dingin.....	12
2.4.2 Proses Canai Panas.....	13
2.5 <i>Thermo Mechanical Controlled Process</i> (TMCP)	13
2.5.1 Canai Hangat (<i>Warm Rolling</i>)	14

2.5.2	<i>Strain Rate</i>	16
2.6	Recovery, Rekristalisasi, dan Pertumbuhan Butir	16
2.6.1	Recovery	18
2.6.2	Rekristalisasi	18
2.6.2.1	Rekristalisasi Dinamis	19
2.6.2.2	Rekristalisasi Statis	20
2.6.3	Pertumbuhan Butir	20
2.6.4	<i>Subgrain</i>	21
2.7	<i>Hydrogen Induced Cracking</i>	22
2.7.1	Mekanisme Difusi Atom Hidrogen ke dalam Logam	24
3.	METODOLOGI PENELITIAN	27
3.1	Diagram Alir Penelitian	27
3.2	Alat dan Bahan	28
3.2.1	Alat	28
3.2.2	Bahan	28
3.3	Prosedur Penelitian.....	29
3.3.1	Pemilihan Material	29
3.3.2	Preparasi Benda Uji	30
3.3.3	Proses TMCP dan <i>Warm Rolling</i>	31
3.3.4	Pengamatan Metalografi.....	32
3.3.4.1	Preparasi.....	32
3.3.4.2	Etsa.....	33
3.3.4.3	Pengamatan di bawah mikroskop.....	33
3.3.5	Perhitungan Besar Butir.....	34
3.3.5.1	Pengukuran Besar Butir <i>Equiaxed</i>	33
3.3.5.2	Pengukuran Besar Butir <i>Non-Equiaxed</i>	35
3.3.6	Pengujian Kekerasan	37
3.3.6.1	Metode Kekerasan Rockwell B.....	37
3.3.6.2	Metode Kekerasan Vickers.....	38
3.3.7	Pengujian <i>Hydrogen Charging Test</i>	38

4. HASIL DAN PEMBAHASAN	40
4.1 Hasil Uji Komposisi.....	40
4.2 Hasil Pengukuran Ketebalan Benda Uji	40
4.3 Hasil Pengamatan Metalografi	42
4.4 Hasil Perhitungan Butir	46
4.5 Pengujian Kekerasan	49
4.6 Pengujian <i>Hydrogen Embrittlement</i>	52
5. KESIMPULAN	54
DAFTAR REFERENSI	55



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Diagram Fasa Biner Fe-Cr.....	7
Gambar 2.2	Struktur Mikro AISI 430 dengan Menggunakan Berbagai Etsa	8
Gambar 2.3	Ilustrasi Batas Butir dan Pergerakan Dislokasi.....	9
Gambar 2.4	Pengaruh Besar Butir Terhadap Nilai Kekuatan.....	10
Gambar 2.5	Skematik Proses Canai	11
Gambar 2.6	Transformasi Morfologi Butir Setelah Proses Canai.....	11
Gambar 2.7	Perbedaan Mikrostruktur Antara Proses Canai Konvensional dan Proses TMCP	14
Gambar 2.8	Skematik Perubahan Morfologi Butir yang Terdeformasi	17
Gambar 2.9	Pembentukan Sub-butir Skematik Proses Anil a) Butir yang Terdeformasi. b) Rekoveri c) Rekristalisasi Sebagian d) Rekristalisasi Penuh e) Pertumbuhan Butir f) <i>Abnormal Grain Growth</i>	17
Gambar 2.10	Skematis Proses Recovery, Rekristalisasi dan Pertumbuhan Butir	21
Gambar 2.11	Skema Atom Hidrogen yang Masuk ke Dalam Logam dan Menyebabkan Crack.....	24
Gambar 2.12	Model Dekohesi.....	25
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian	27
Gambar 3.2	<i>Optical Emission Spectroscopy</i> di CMPFA DTMM UI.....	29
Gambar 3.3	Skema Penyambungan Benda Benda Uji dengan Termokopel	30
Gambar 3.4	Benda Uji setelah Dipreparasi.....	30
Gambar 3.5	<i>Furnace</i> Carbolite di lab TPB DTMM UI.....	32
Gambar 3.6	Mesin Onoroll dan Rangkaian Alat di lab TPB DTMM UI.....	32
Gambar 3.7	Mikroskop Optik	34
Gambar 3.8	Lingkaran yang Digunakan Untuk Penghitungan Besar Butir Dengan Metode Planimetric	34
Gambar 3.9	Metode <i>Straight Line Test</i>	36

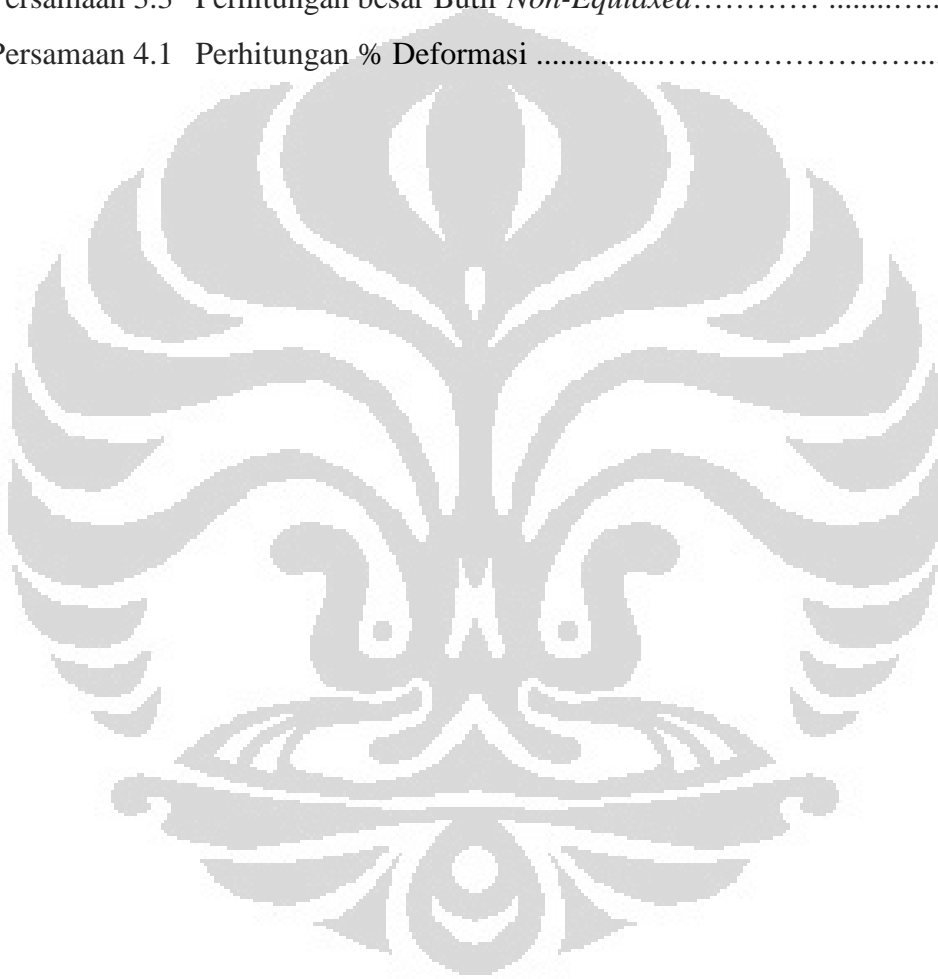
Gambar 3.10 Prinsip Pengujian Kekerasan Dengan Metode <i>Rockwell B</i>	37
Gambar 3.11 Ilustrasi Jejak yang Dihasilkan Selama Penjejakan.....	38
Gambar 3.12 Mesin Uji Kekerasan Vickers.....	39
Gambar 3.13 Skema Proses <i>Hydrogen Charging</i>	40
Gambar 3.14 Rangkaian Proses <i>Hydrogen Charging</i>	40
Gambar 4.1 Benda Uji Yang Telah Dideformasi dan Belum Dideformasi	41
Gambar 4.2 Mekanisme <i>Roll Flatening</i>	41
Gambar 4.3 Mikrostruktur Sampel Awal (<i>Bulk</i>) AISI 430 dengan perbesaran 500x. Elektroetsa <i>Nitric Acid</i> 60%.....	42
Gambar 4.4 Mikrostruktur Sampel Pemanasan Ulang (<i>Reheating</i>) AISI 430 dengan perbesaran 500x. Elektroetsa <i>Nitric Acid</i> 60%.....	43
Gambar 4.5 Mikrostruktur Benda Uji Canai Hangat suhu 600°C AISI 430 dengan perbesaran 500x. Elektroetsa <i>nitric acid</i> 60%.....	44
Gambar 4.6 Mikrostruktur Benda Uji Canai Hangat suhu 700°C AISI 430 Dengan perbesaran 500x. Elektroetsa <i>nitric acid</i> 60%.....	44
Gambar 4.7 Mikrostruktur Benda Uji Canai Hangat suhu 800°C AISI 430 dengan perbesaran 500x. Etsa 30% Picral + HCl 2 tetes.....	45
Gambar 4.8 Mikrostruktur Benda Uji <i>Hydrogen Embrittlement</i> Canai Hangat suhu 700°C dengan perbesaran 500x. Etsa 30% Picral + HCl 2 tetes.....	46
Gambar 4.9 Grafik Pengaruh <i>Reheating</i> Terhadap Ukuran Butir.....	48
Gambar 4.10 Grafik Pengaruh Deformasi Terhadap Ukuran Butir Dengan Tiga Variasi Temperatur	48
Gambar 4.11 Grafik Nilai Kekerasan Sampel.....	50
Gambar 4.12 Grafik Kekerasan Benda Uji Sebelum dan Sesudah <i>Hydrogen Charging</i>	52

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Tabel Komposisi Kimia dari AISI 430.....	6
Tabel 2.2	Tabel <i>Properties</i> dari AISI 430.....	6
Tabel 3.1	Simbol dan Penandan yang berhubungan dengan pengujian <i>Rockwell B</i>	38
Tabel 4.1	Komposisi Kimia Spesimen Uji AISI 430.....	40
Tabel 4.2	Hasil Pengukuran Dimensi Benda Uji Sebelum Dan Sesudah Proses Pencanaan 600 °C, 700 °C, dan 800 °C serta Nilai Strain Rate.....	41
Tabel 4.3	Pengukuran Besar Butir Benda Uji Sebelum Dan Setelah Proses Pencanaan.....	47
Tabel 4.4	Hasil Pengukuran Kekerasan.....	49
Tabel 4.5	Hasil Pengujian <i>Hydrogen Charging</i>	52

DAFTAR RUMUS

Persamaan 2.1	Persamaan Hall-Petch	10
Persamaan 2.2	Perhitungan <i>Strain</i>	11
Persamaan 2.3	Perhitungan % Deformasi	12
Persamaan 3.1	Rumus Perhitungan <i>Number of Grains</i>	35
Persamaan 3.2	Rumus Perhitungan <i>ASTM Grain Size Number</i>	35
Persamaan 3.3	Perhitungan besar Butir <i>Non-Equiaxed</i>	42
Persamaan 4.1	Perhitungan % Deformasi	40



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Hasil Uji Komposisi

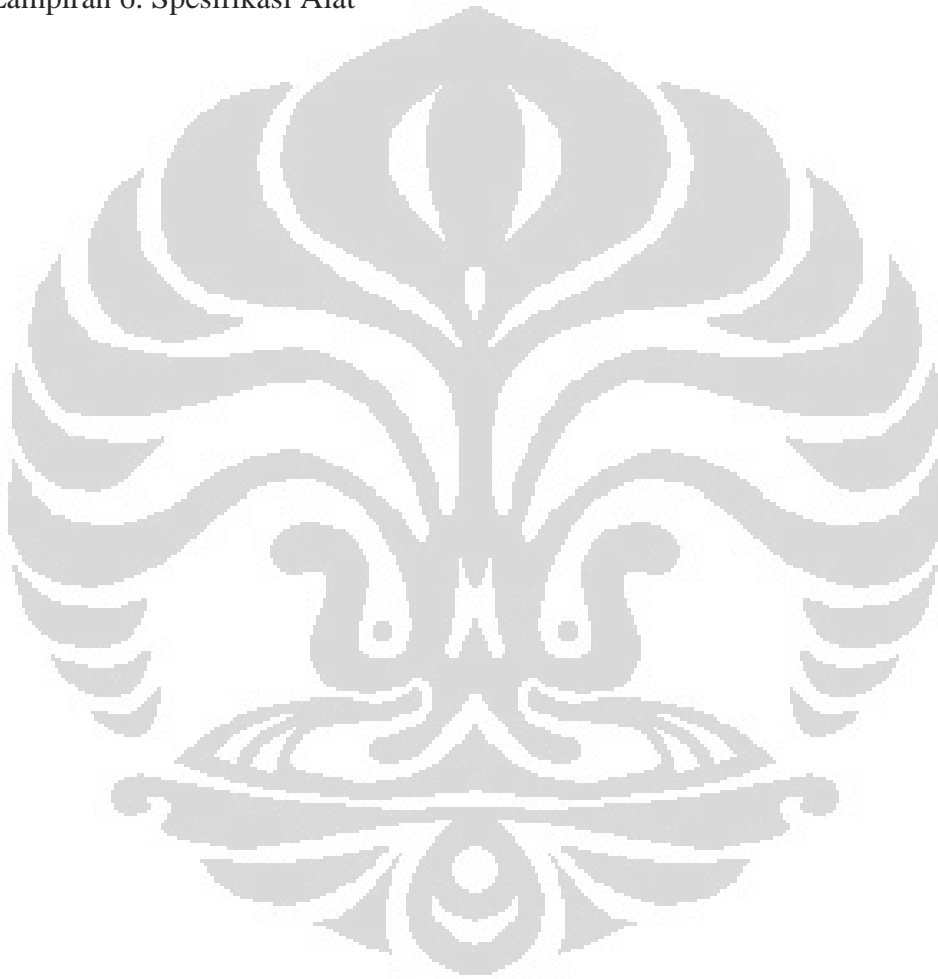
Lampiran 2. Grafik Akuisisi *Rolling* Pada Temperatur 600 0C

Lampiran 3. Grafik Akuisisi *Rolling* Pada Temperatur 700 0C

Lampiran 4. Grafik Akuisisi *Rolling* Pada Temperatur 800 0C

Lampiran 5. Tabel *Grain Size Number* ASTM E112

Lampiran 6. Spesifikasi Alat



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dewasa ini, penggunaan material baja banyak digunakan untuk berbagai kebutuhan. Mulai dari aplikasi peralatan rumah tangga yang sederhana hingga peralatan industri berteknologi tinggi. Baja merupakan bahan dasar utama untuk industri, seperti industri minyak dan gas, dan manufaktur. 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.

Dalam dunia industri minyak dan gas, baja berperan penting sebagai peralatan utama dan pendukung. Namun, permasalahan yang sering dihadapi oleh dunia perminyakan adalah korosi pada peralatan migas yang digunakan akibat lingkungan asam, lingkungan laut, lingkungan yang mengandung gas dan fluida yang korosif bahkan sampai lingkungan dengan temperatur serta tekanan yang tinggi. Beberapa diantaranya yang rentan akan korosi terdapat pada pipa, *exchanger tube*, dan *heat exchanger*.

Salah satu jenis korosi yang ada pada industri migas adalah korosi *Hydrogen Induced Cracking*. Korosi ini terjadi karena adanya ion H^+ yang masuk ke dalam logam dan kemudian menyebabkan inisiasi retak. Bahaya yang ditimbulkan oleh korosi ini pada dunia migas contohnya adalah kegagalan pada pipa migas dan *heat exchanger* yang dapat menyebabkan kecelakaan atau *shut down* distribusi migas.

Akibat bahaya yang ditimbulkan oleh permasalahan di atas, maka pemilihan material yang digunakan diharuskan memiliki ketahanan korosi dan *mechanical properties* yang baik. Salah satu material yang digunakan sebagai *heat exchanger* dan *exchanger tube* adalah *AISI 430 stainless steel*. Material ini ketahanan korosinya jauh lebih baik dibandingkan baja karbon biasa. Namun perkembangan ilmu metalurgi dan material yang semakin pesat selalu mencari penemuan-

penemuan baru dan memodifikasinya untuk meningkatkan *performance* dari material tersebut.

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

Proses *warm working* yang dilakukan adalah dengan *warm 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*), pengaruhnya terhadap ketahanan *Hydrogen Induced Cracking* (HIC), dan mencari satu metode dan teknik yang tepat dalam peningkatan kinerja baja tahan karat dalam aplikasi lingkungan gas. Dengan harapan metode ini bisa dilakukan untuk penghematan biaya *maintenance* pada industri migas pada khususnya.

1.2 Perumusan Masalah

Penelitian ini difokuskan untuk memperoleh sifat *stainless steel AISI 430* yang lebih baik, khususnya ketahanan korosi terhadap lingkungan yang dapat memicu hadirnya *Hydrogen Induced Cracking*, melalui metode *warm rolling*.

Masalah yang akan dikaji dalam penelitian ini adalah dengan melihat pengaruh material tidak terdeformasi maupun terdeformasi (55% deformasi) dengan temperature *reheating* sebesar 1100°C ^[2] untuk mendapatkan *fully ferritic* yang dilanjutkan dengan pendinginan udara. Selanjutnya material mengalami *singlepass* pada 3 variabel suhu dalam rangkaian proses *warm rolling* untuk mengetahui pengaruhnya terhadap ukuran butir ferit yang dihasilkan pada proses TMCP serta ketahanan korosi akan adanya hidrogen pada *stainless steel AISI 430 ferritic* hasil canai hangat.

Dengan kata lain penelitian ini mengacu pada pengamatan mikroskopik dan *mechanical properties* sampel baja *stainless steel AISI 430* sebelum dan sesudah mengalami perlakuan *heat treatment* dan *hydrogen charging*.

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

- a. Menganalisa pengaruh proses canai hangat terhadap peningkatan sifat mekanis dan ketahanan korosi baja AISI 430 *stainless steel*.
- b. Menganalisa pengaruh dari besar butir akibat dari deformasi yang dilakukan terhadap ketahanan dari *Hydrogen Embrittlement*.

1.4 Ruang Lingkup

1.4.1 Material

Penelitian menggunakan pelat *stainless steel* AISI 430.

1.4.2 Parameter Penelitian

a. Temperatur Canai

Temperatur canai dilakukan pada 600°C, 700°C, dan 800°C.

b. Metode Deformasi

Deformasi dilakukan dengan metode *single-pass* searah proses canai.

c. Besaran Deformasi

Deformasi dilakukan sebesar 55% setiap *pass*.

d. Media Pendinginan

Media pendingin yang digunakan adalah air.

1.4.3 Tempat Penelitian

Proses penelitian dilakukan di beberapa tempat, yaitu :

a. Proses TMCP dilakukan di Laboratorium Teknologi Perubahan Bentuk Departemen Metalurgi dan Material FTUI.

b. Preparasi sampel dan pengamatan struktur mikro dilakukan di Laboratorium Metalografi dan HST Departemen Metalurgi dan Material FTUI.

c. Pengujian korosi dilakukan di Laboratorium Korosi Departemen Metalurgi dan Material FTUI.

d. Pengujian komposisi dan pengujian kekerasan dilakukan di *Central Material Processing and Failure Analysis*, Departemen Metalurgi dan Material FTUI.

1.5 Sistematika Penulisan

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

Bab 1 : Pendahuluan

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

Bab 2 : Dasar Teori

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

Bab 3 : Metodologi Penelitian

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

Bab 4 : Hasil dan Pembahasan

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

Bab 5 : Kesimpulan

Membahas mengenai kesimpulan akhir berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Stainless Steel* AISI 430

Baja tahan karat jenis ini termasuk dalam keluarga baja tahan karat ferritic yang mana memiliki struktur kristal BCC (*Base Centered Cubic*). Secara umum, baja tahan karat ferritic tidak memiliki kekuatan dan ketangguhan sebaik baja *austenite*. Namun baja ini memiliki ketahanan yang baik dari *chloride stress-corrosion-cracking* dan *atmospheric corrosion* ^[1].

Tabel 2.1. Tabel Komposisi Kimia dari AISI 430^[1].

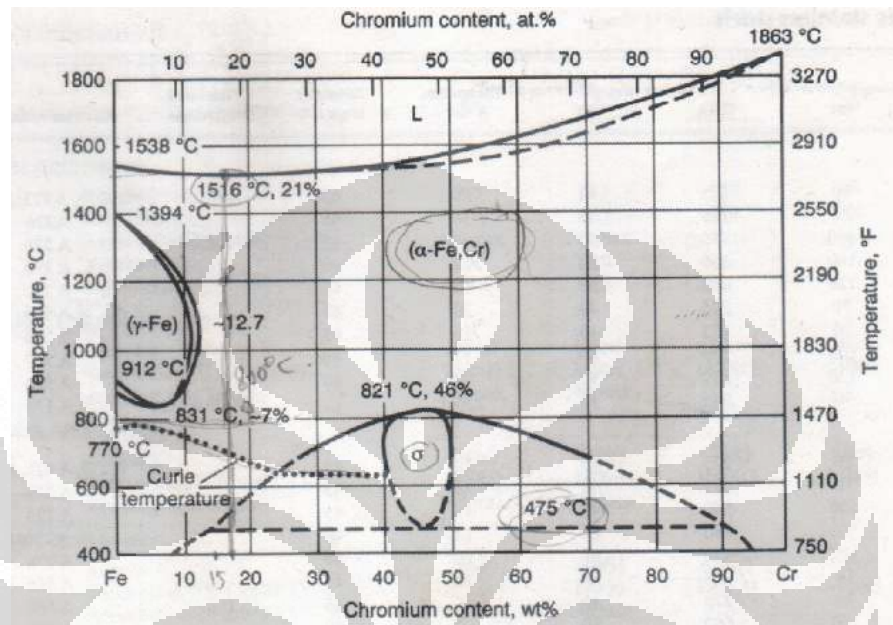
Material Spec.	Composition										
	C	Cr	Ni	Si	Mn	Mo	Cu	P	S	N	Ti
AISI 430	0.12	16-18	-	0.75	1.0	-	-	0.040	0.30	-	-

Kehadiran unsur-unsur paduan mempengaruhi *performance* dan struktur mikro pada baja ini. Karbon berfungsi untuk meningkatkan kekuatan dan kekerasan pada baja, Chromium berfungsi untuk meningkatkan ketahanan korosi, Silikon berperan sebagai penguat ferrit, dan kehadiran Mangan meningkatkan *hardenability* pada baja.

Tabel 2.2. Tabel *Properties* dari AISI 430^[1].

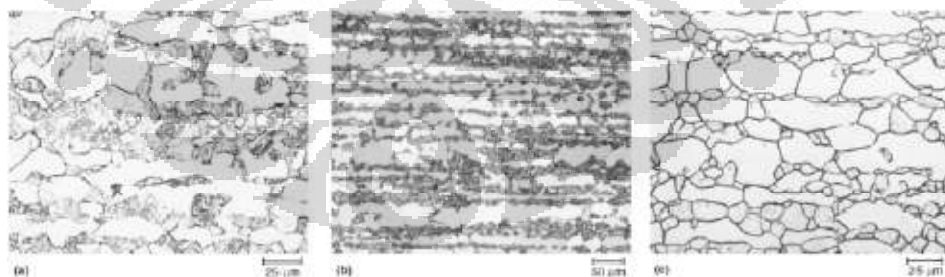
AISI type	condition	Rockwell hardness	Yield Strength	Ultimate Strength	Elongation in 50.8 mm	Reduction of are, %	Charpy, Impact strength
430	annealed	82 HRB	310 Mpa	517 MPa	30	65	217 J

Dari literatur ASM Specialty Handbook diketahui bahwa paduan ini akan menjadi *fully ferritic* pada temperature di atas 1100° C. Pendinginan yang cepat akan memunculkan karbida.



Gambar 2.1. Diagram Fasa Biner Fe-Cr^[1].

Berikut ini gambar struktur mikro dari *stainless steel* AISI 430 dengan berbagai metode etsa yang diambil dari ASM Handbook vol 09.



Gambar 2.2. Struktur Mikro AISI 430 dengan Menggunakan Berbagai Etsa (a) glyceric acid, (b) Beraha's tint etch, and (c) aqueous 60% HNO₃ at 1 V dc for 60 s^[7].

2.2 Pengaruh Deformasi Plastis

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

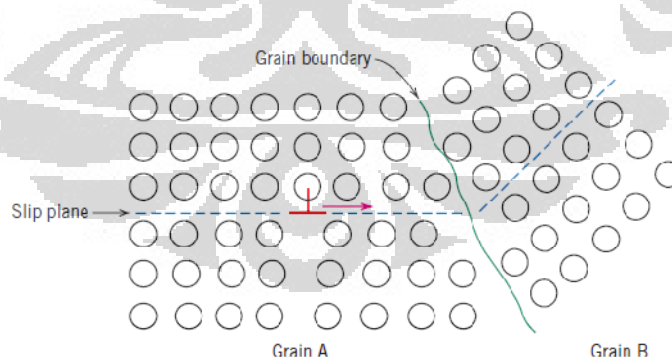
Deformasi plastis berhubungan dengan pergerakan sejumlah dislokasi^[2]. Berdasarkan proses yang dilakukan, deformasi plastis yang terjadi merupakan hasil dari pergerakan dari salah satu kristal yang disebut dislokasi (ASM 1973). Proses terjadinya deformasi plastis melalui pergerakan dislokasi merupakan mekanisme *slip*. *Slip* merupakan mekanisme terjadinya deformasi yang paling sering dijumpai. *Slip* menggambarkan pergerakan yang besar pada bagian kristal yang relatif terhadap yang lain sepanjang bidang kristalografi dan dalam arah kristalografi. *Slip* terjadi bila sebagian dari kristal tergeser relatif terhadap bagian kristal yang lain sepanjang bidang kristalografi tertentu. Bidang tempat terjadinya *slip* disebut bidang *slip* (*slip plane*) dan arah pergeserannya pada umumnya pada bidang *slip* disebut arah *slip* (*slip direction*). *Slip* terjadi pada bidang *slip* dan arah *slip* dengan atom terpadat, karena untuk menggeser atom pada posisi ini memerlukan energi paling kecil.

Apabila *slip* terjadi di seberang 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.

2.3 Pengaruh Besar Butir Terhadap Sifat Mekanis

Sifat mekanis dari suatu material sangat dipengaruhi oleh ukuran butir atau diameter butir rata-rata dalam logam polikristal^[7]. Baja dengan ukuran butir yang kasar (besar) memiliki keuletan yang tinggi, namun kekuatannya rendah. Berbeda dengan baja dengan ukuran butir halus (kecil) memiliki kekuatan yang tinggi. Perbedaan sifat yang dimiliki oleh material yang berbeda ukuran butirnya disebabkan adanya perbedaan jumlah batas butir yang dimiliki material tersebut. Batas butir terjadi karena adanya perbedaan orientasi dari kisi kristal. Batas butir merupakan penghalang bagi pergerakan dislokasi. Sehingga ketika dislokasi terhalang oleh batas butir maka akan dibutuhkan energi yang lebih besar untuk menggerakkan dislokasi sehingga material menjadi lebih keras. Material dengan ukuran butir yang besar memiliki batas butir yang sedikit menyebabkan dislokasi lebih mudah bergerak sehingga material menjadi lebih ulet, sedangkan material dengan ukuran butir yang kecil memiliki batas butir yang banyak yang menyebabkan dislokasi sulit bergerak sehingga material menjadi keras.

Ketika deformasi plastis, terjadi pergerakan dislokasi dengan mekanisme *slip*. Dislokasi bergerak di dalam butir menuju batas butir pada arah dan orientasi terpadat dalam suatu kisi kristal.



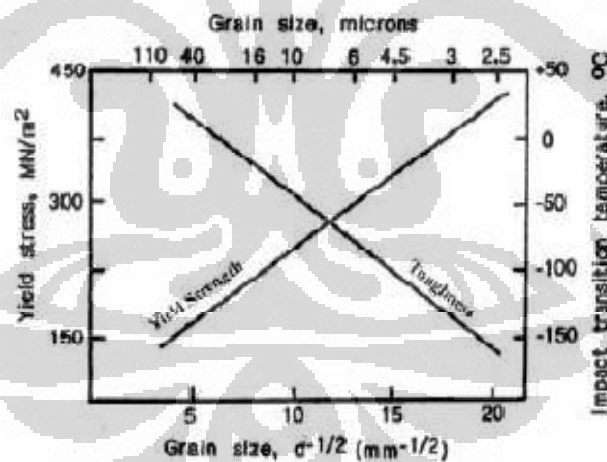
Gambar 2.3. Ilustrasi Batas Butir dan Pergerakan Dislokasi^[2].

Batas butir bertindak sebagai penghalang pergerakan dislokasi karena dua alasan^[2]:

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

Untuk mengetahui pengaruh ukuran butir dari teori diatas dapat buktikan dengan persamaan Hall Petch dengan d adalah diameter butir rata rata, σ_0 dan k_y adalah konstanta untuk material tertentu. Persamaan 2.1 ini tidak berlaku untuk material polikristal dengan butir yang sangat besar dan dengan butir yang amat sangat halus.

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-\frac{1}{2}} \quad (2.1)$$

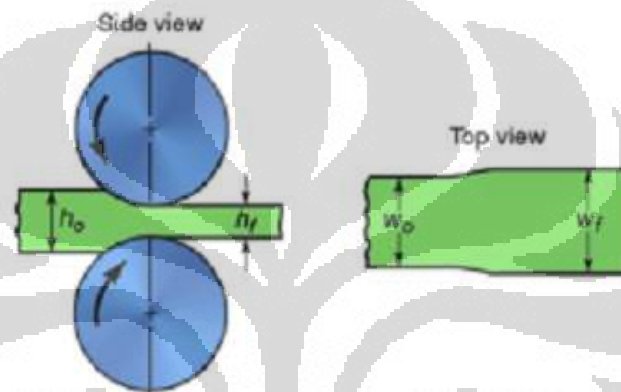


Gambar 2.4. Pengaruh Besar Butir terhadap Nilai Kekuatan^[2].

Ukuran butir dapat diatur oleh laju solidifikasi dari fasa cair, dan juga oleh deformasi plastis yang diikuti dengan perlakuan panas yang sesuai. Dalam hal ini harus diperhatikan bahwa penghalusan butir (*grain size reduction*) tidak hanya meningkatkan kekuatan namun juga dapat meningkatkan ketangguhan pada hampir kebanyakan paduan.

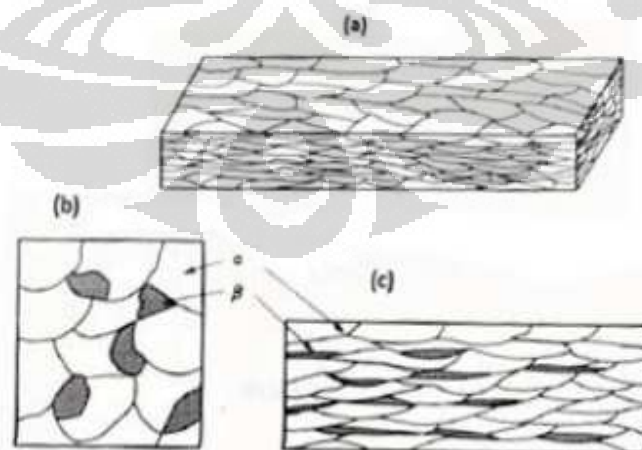
2.4 Proses Canai

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



Gambar 2.5. Skematik Proses Canai^[8].

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



Gambar 2.6. Transformasi Morfologi Butir Setelah Proses Canai a) elongated grain b) sebelum dideformasi (*equiaxed grain*) b) setelah dideformasi (*elongated grain*)^[9]

Regangan dan besar deformasi yang diberikan terhadap material pada proses canai dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$\varepsilon = \ln \frac{h_0}{h_f} \quad (2.2)$$

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

Keterangan :

ε : regangan yang diberikan

h_0 : tebal awal material (mm)

h_f : tebal akhir material (mm)

2.4.1 Proses Canai Dingin

Canai dingin (*cold rolling*) yaitu proses canai yang dilakukan dengan menggunakan temperatur ruang atau temperatur di bawah temperatur rekristalisasi material. Proses canai dingin menghasilkan tegangan sisa (*residual stress*) dari energi dalam (*internal energy*) yang disebabkan dari meningkatnya jumlah dislokasi yang saling berinteraksi^[10]. Selain itu pada deformasi material dalam pengerjaan dingin akan menyebabkan deformasi yang tidak homogen. Hal ini terjadi karena adanya perbedaan friksi antara benda kerja dengan alat pembentuk (*forming tools*). Pada proses canai dingin dengan prosentase reduksi area yang lebih rendah, deformasi akan terpusat pada permukaan material dimana friksi antara canai dan benda kerja terjadi. Lapisan dalam material akan mencegah pengembangan lapisan di atasnya. Lapisan permukaan material benda kerja akan berusaha mengembang. Dengan demikian permukaan benda kerja akan mengalami tegangan tekan (*compressive stress*) sedangkan lapisan dalam akan mengalami tegangan tarik (*tension stress*).

Untuk meningkatkan sifat material maka perlu dilakukan pengurangan atau penghilangan tegangan sisa yang dihasilkan dari proses pengerjaan dingin. Hal tersebut dapat dilakukan dengan cara perlakuan panas dan perlakuan mekanis. Perlakuan mekanis yaitu dengan memberikan tegangan yang berlawanan atau melakukan deformasi plastis lanjut yang bertujuan untuk memberikan kesempatan lepasnya tegangan yang tidak seragam. Perlakuan panas dilakukan dalam temperatur tertentu pada material, atau sering disebut *stress-relieving treatment*^[11].

2.4.2 Proses Canai Panas

Proses canai panas adalah suatu proses deformasi yang diikuti dengan proses perlakuan panas sehingga tegangan sisa tidak terjadi. Pada proses ini yang terjadi ialah proses pergerakan dislokasi, *recovery*, rekristalisasi, dan pertumbuhan butir (*grain growth*) sehingga material akan memiliki sifat dan kinerja yang lebih baik. Pada proses canai, temperatur akhir proses merupakan hal yang penting karena proses ini harus berakhir pada temperatur tepat di atas temperatur rekristalisasi untuk memperoleh ukuran butir yang kecil dan halus. Jika temperatur akhir jauh di atas temperatur rekristalisasi, pertumbuhan butir akan terjadi. Apabila temperatur akhir dibawah temperatur rekristalisasi, maka akan terjadi pengerasan regangan (*strain hardening*). Pada temperatur di atas temperatur rekristalisasi, material akan menjadi lebih lunak dan lebih ulet dibandingkan dengan temperatur ruang, sehingga tidak dibutuhkan tenaga yang besar untuk deformasi. Karena tidak ada pengerasan regangan, maka reduksi ukuran material yang tebal bisa dilakukan.

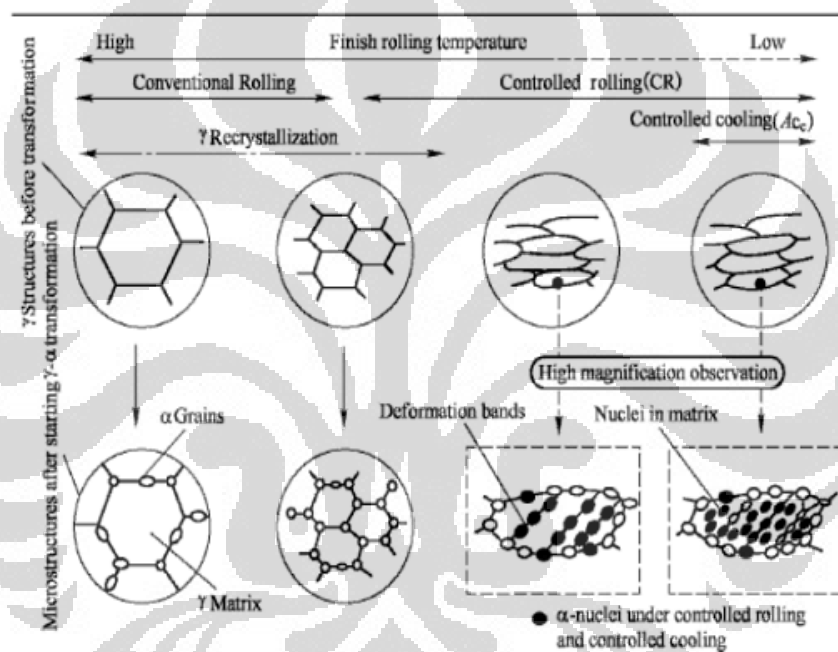
2.5 Thermo-Mechanical Controlled Process (TMCP)

Thermomechanical processing merupakan suatu proses untuk mengontrol struktur mikro suatu material selama pembuatannya untuk menghasilkan sifat mekanis yang lebih baik. Peningkatan kekuatan dan ketangguhan dalam TMCP didapatkan dari adanya mekanisme pengecilan butir dengan proses deformasi

Universitas Indonesia

panas yang terkontrol (*controlled rolling*) dan pendinginan yang terkontrol (*controlled cooling*)^[12].

Pada baja TMCP, sifat mekanis (*mechanical properties*) ditentukan melalui kombinasi dari perlakuan mekanik (*mechanical working*), proses *recovery* (*recovery processes*), rekristalisasi (*recrystallisation*), dan pertumbuhan butir (*grain growth*)^[13]. Perbedaan struktur mikro yang dihasilkan oleh pengerolan konvensional dan proses TMCP dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.7 Perbedaan Struktur Mikro antara Proses Canai Konvensional dan Proses TMCP^[12]

2.5.1 Canai Hangat (*Warm Rolling*)

Proses canai hangat adalah metode terbaru dalam rekayasa peningkatan kekuatan material. Metode ini merupakan salah satu teknik dari proses *Severe Plastic Deformation* (SPD) dan *Thermomechanical Controlled Process* (TMCP) yang mampu menghasilkan perubahan ukuran butir struktur mikro baja.[Andrew Belyakov et al,1998].

J.Zrnik, V.Dobatkin, I Mamuzik, dalam penelitiannya menyatakan bahwa SPD, Severe Plastic Deformation digunakan untuk mengubah butir logam dan paduan yang kasar menjadi material yang berukuran butir sangat halus (UFG, Ultra Fine Grain) . Material dengan UFG yang didapat memiliki sifat fisika dan mekanik yang meningkat yang menjadikan material ini digunakan untuk aplikasi yang luas. Dari beberapa peneliti sebelumnya, teknik proses SPD yang digunakan untuk mendapatkan butir halus antara lain ECAP, ARB, HTP, *Wire drawing* Panas dll. Untuk penelitian ini menggunakan SPD dengan teknik canai konvensional pada temperatur hangat, merujuk pada teknik SPD yang telah dilakukan peneliti lain adalah pada temperatur panas di atas 800°C. Alasan digunakannya proses pada temperatur hangat ini juga mengacu pada penelitian terdahulu, bahwa Humphrey et.al dalam bukunya menggambarkan pada *flow curve* yang dihasilkan oleh beberapa uji deformasi panas temperatur 1050°C sampai 900°C ternyata nilai σ material lebih tinggi dengan semakin rendahnya temperatur. Hal tersebut terjadi pada baja karbon rendah ataupun baja tahan karat SS 304.

Beberapa studi pendahuluan telah dilakukan peneliti seperti pada Rini Riastuti dkk, 2010 dan Rini Riastuti dkk 2011, bahwa baja karbon rendah dengan 0.11% C yang diperlakukan SPD dengan teknik canai hangat (bervariasi temperature hangat dari 400°C – 750°C telah menghasilkan ukuran butir paling kecil yang diperoleh adalah 5.7 μm , dan telah dibuktikan bahwa nilai kekerasan hasil canai hangat pun meningkat 2 sampai 3 kali dari sebelum dilakukan canai hangat. Dari analisa hasil penelitian ini, dan merujuk pada beberapa penelitian yang menghasilkan ukuran butir sampai nanometer, terasa bahwa perlu adanya studi lanjutan untuk mendapatkan ukuran butir nano melalui teknik canai hangat konvensional ini, dengan demikian perlu adanya kajian lebih banyak lagi untuk material awal yang digunakan sebagai studi. Pemilihan material untuk penelitian ini tentunya adalah material yang dapat membentuk struktur ferrite, karena tujuan dilakukan pada temperature hangat ini adalah mengupayakan material dalam fasa feritik.

2.5.2 Strain Rate

Berikut ini adalah rumus yang digunakan untuk mengetahui laju regangan material saat mengalami proses canai^[14]. Dengan mengetahui nilai laju regangan suatu material, kita bisa menghubungkannya dengan kekerasan material.

$$\dot{\epsilon} = \frac{V}{R \times r} \times \ln \frac{1}{1-r} \times \sqrt{\frac{R}{h_0}} \quad (2.4)$$

Keterangan :

$\dot{\epsilon}$: Laju regangan (s⁻¹)

V: Kecepatan *rolling* (mm/s)

R : Jari-jari *roll* (mm)

r : besar deformasi

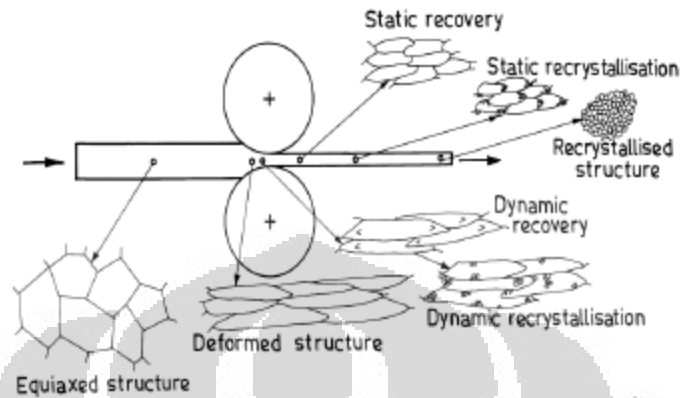
h_0 : ketebalan awal (mm)

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.

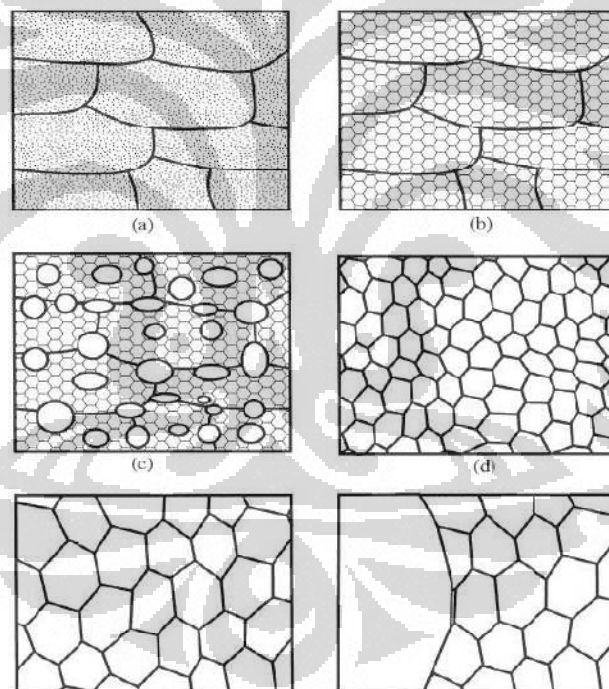
2.6 Recovery, Rekristalisasi, dan Pertumbuhan Butir

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

yang dinaikkan yang kemudian diidentifikasi sebagai proses *recovery* dan rekristalisasi, yang juga dimungkinkan untuk pertumbuhan butir.



Gambar 2.8 Skematik Perubahan Morfologi Butir yang Terdeformasi^[18].



Gambar 2.9. Skematik Proses Anil a) Butir yang Terdeformasi. b) *Recovery* c) Rekristalisasi Sebagian d) Rekristalisasi Penuh e) Pertumbuhan Butir f) *Abnormal Grain Growth*^[15].

2.6.1 *Recovery*

Proses *recovery* merupakan proses yang pertama terjadi ketika material yang terdeformasi dipanaskan ke temperatur tinggi. *Recovery* adalah proses penghilangan energi internal (*internal strain energy*) yang tersimpan yang diperoleh selama proses pengerjaan dingin melalui perlakuan panas (*heat treatment*). Mekanisme penghilangan energi internal yang tersimpan dari material adalah dengan penghilangan dan penyusunan kembali dislokasi^[15]. Selama proses *recovery*, sifat fisik dan mekanik dari baja pengerjaan dingin akan kembali seperti sebelum dilakukan pengerjaan dingin^[16]. Perubahan struktur mikro selama *recovery* relatif homogen dan biasanya tidak mempengaruhi batas butir material yang terdeformasi. Perubahan struktur mikro dari material selama tahapan *recovery* ini tidak melibatkan pergerakan batas butir dengan sudut yang besar.

2.6.2 Rekrystalisasi

Pada saat *recovery* tidak semua dislokasi menghilang dan ketika tahap *recovery* akan berakhir, pembentukan inti dari butir baru akan mulai terjadi dengan memanfaatkan energi internal yang masih tersimpan setelah tahap *recovery*. Proses ini disebut dengan rekrystalisasi. Rekrystalisasi merupakan proses transformasi nukleasi dan pertumbuhan butir. Rekrystalisasi dalam proses perlakuan panas merupakan proses aktivasi termal pada perubahan mikrostruktur dengan jalan pembentukan butir baru bebas regang yang terjadi karena adanya penggabungan sub butir. Inti dari butir baru terjadi karena bergabungnya sub-butir dan permukaan untuk nukleasi heterogen adalah cacat struktur mikro seperti permukaan batas butir dan inklusi. Butir yang baru tumbuh merupakan butir yang bebas regangan (*strain-free*) dan terikat dengan batas butir bersudut besar yang memiliki mobilitas sangat tinggi yang akan menyapu semua jejak dari butir yang terdahulu. Sehingga proses rekrystalisasi mengarah kepada pembentukan formasi butir yang bebas energi internal dalam material yang telah mengalami proses pengerjaan dingin^[16].

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

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

Proses rekristalisasi memungkinkan untuk mengontrol ukuran besar butir dan sifat mekanis dari material. Ukuran besar butir dari material yang terekristalisasi akan tergantung pada besarnya pengerjaan dingin, temperatur *annealing*, waktu tahan dan komposisi dari material. Ini didasarkan pada hukum rekrsitalisasi^[17].

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

2.6.2.1 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 pembentukan nuklei pada

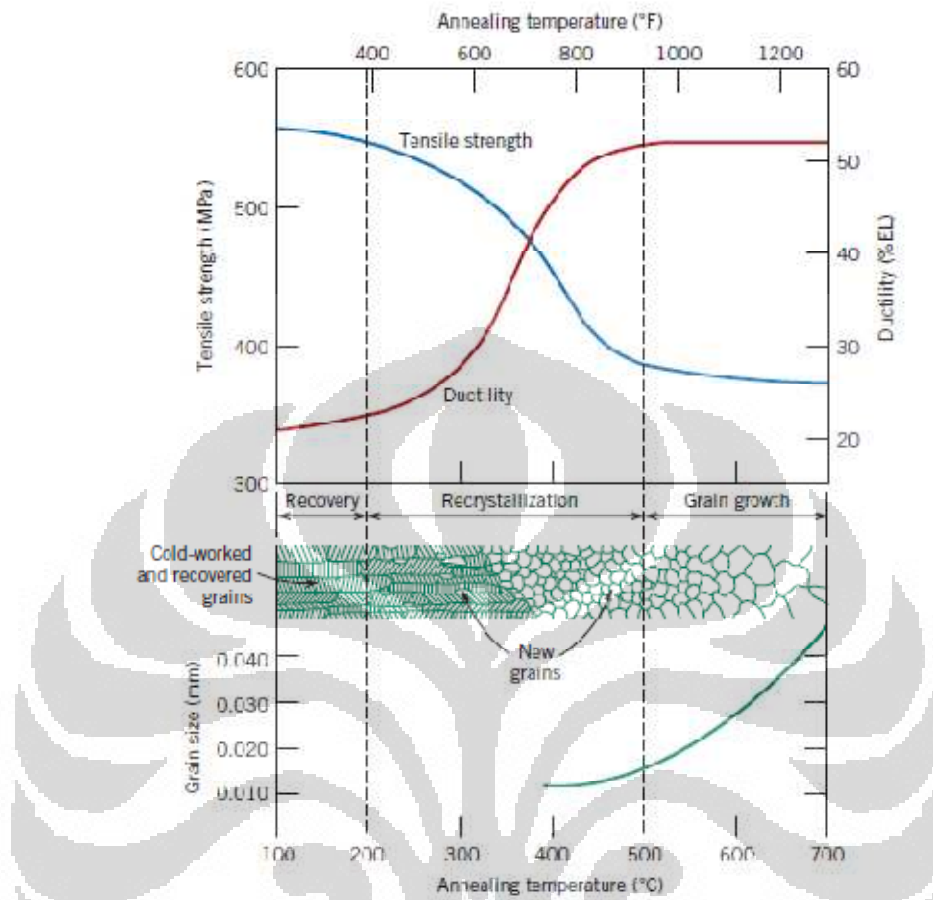
batas butir yang terdeformasi. Proses ini dipengaruhi oleh faktor-faktor antara lain regangan, kecepatan regangan dan temperatur.

2.6.2.2 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 (di atas temperatur rekristalisasi dari material), maka proses munculnya nuklei pada batas butir dapat terjadi dan proses rekristalisasi dapat berlangsung.

2.6.3 Pertumbuhan Butir

Setelah proses rekristalisasi selesai, butir dengan bebas regangan selanjutnya akan tumbuh jika spesimen baja dibiarkan pada temperatur yang tinggi. Pertumbuhan butir ditunjukkan sebagai peningkatan besar butir rata-rata pada material polikristalin. Pertumbuhan butir biasanya merupakan lanjutan setelah proses *recovery* dan proses rekristalisasi. Hal ini terjadi karena adanya migrasi pada batas butir. Tidak semua butir dapat membesar, butir yang lebih besar akan tumbuh dan menghabiskan butir yang lebih kecil atau yang dikenal dengan *grain cannibalism*^[1]. Penambahan proses anil (*extended annealing*) pada temperatur tinggi dapat menyebabkan beberapa butir tumbuh menjadi butir dengan ukuran yang sangat besar, yang mana dikenal sebagai rekristalisasi sekunder (*secondary recrystallization*) atau pertumbuhan butir yang abnormal^[7].



Gambar 2.10 Skematis Proses Recovery, Rekristalisasi dan Pertumbuhan Butir^[1].

2.6.4 Subgrain

Pembahasan mengenai *subgrain* erat kaitannya dengan proses laku panas. Salah satu proses laku panas tersebut adalah proses rekristalisasi yaitu proses aktivasi termal dimana terjadi perubahan struktur mikro 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^[19].

Untuk benda kerja yang butirnya memipih setelah canai dingin, setelah proses *recovery* 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 struktur mikroal ini akan melepas sebagian besar tegangan dalam dan tahapan *recovery* ini dipergunakan untuk proses *stress relieving*.

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

2.7 Hydrogen Induced Cracking

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.

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

1. *Loss in Tensile Ductility and Other Mechanical Properties*^[21]

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

2. *Hydrogen Stress Cracking*^[21]

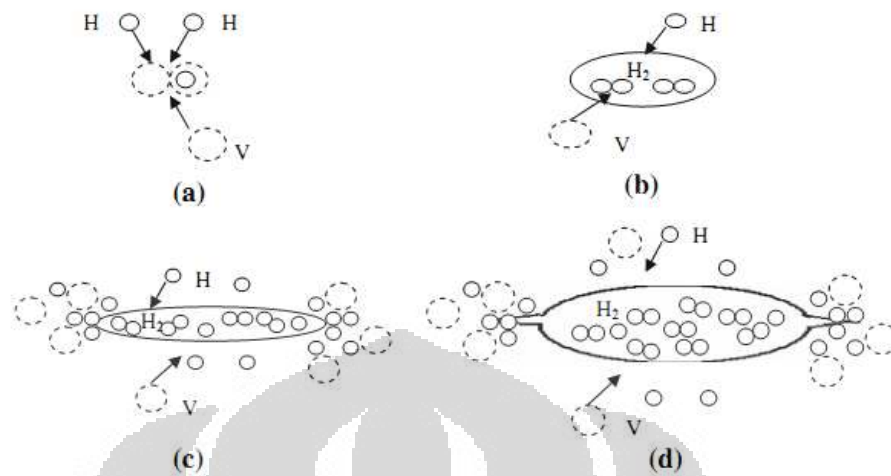
Atom hidrogen (H^+) yang berdifusi ke dalam logam dan berkombinasi menjadi molekul hidrogen (H_2) akan menghasilkan tekanan yang tinggi. Tekanan ini akan menginisiasi fenomena pelepuhan (*blistering*). Dengan kombinasi adanya atom hidrogen dan pemberian pembebanan atau adanya tegangan sisa akan mengakibatkan cacat *blistering* yang saling terhubung. Cacat ini akan berkembang seiring dengan pemberian tegangan sampai terjadi kerusakan pada logam.

3. *Hydrogen Environmental Embrittlement*^[21]

Terjadi keretakan pada logam di dalam larutan secara elektrokimia akibat kombinasi hidrogen secara absorpsi katodik.

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

Atom hidrogen membentuk gas hidrogen yang menimbulkan tegangan cukup tinggi untuk memulai terjadinya penjalaran retak. Salah satu penyebab terjadinya HIC pada lingkungan sour gas adalah karena terbentuknya mikro void pada batas antarmuka inklusi-matriks. Gyu Tae Park, et.al, 2008, menjelaskan adanya pengaruh struktur mikro pada penyerapan atom hidrogen sehingga hidrogen yang terperangkap ini memicu perpatahan baja.



Gambar 2.11. Skema atom hidrogen yang masuk ke dalam logam dan menyebabkan crack ^[6]

HIC, Hydrogen Induced Cracking, adalah fenomena perpatahan logam yang sering terjadi pada industri yang lingkungannya mengandung banyak gas hidrogen. Gas hidrogen ini selain ada di lingkungan aplikasi seringkali bisa dihasilkan dari hasil reaksi reduksi pada aplikasi proteksi katodik yang selama ini dipakai sebagai perlindungan material dari serangan lingkungan yang korosif. Gyu Tae Park, et.al, 2008, menjelaskan adanya pengaruh struktur mikro pada penyerapan atom hidrogen sehingga hidrogen yang terperangkap ini memicu perpatahan baja. Dari review jurnal ini memberikan rujukan bahwa hasil SPD yang akan dilakukan akan mengubah ukuran butir material dengan demikian akan dijadikan studi apakah baja tahan karat feritik masih memberikan pengaruh ukuran butirnya terhadap difusi atom hidrogen yang ada.

2.7.1 Mekanisme Difusi Atom Hidrogen ke dalam Logam

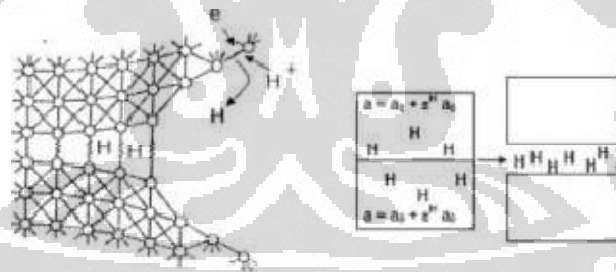
Penggetasan hidrogen merupakan masuknya atom hidrogen kedalam permukaan logam dan menyebabkan berkurangnya ketangguhan dan menurunkan kekuatan tarik suatu material. Terdapat beberapa mekanisme penggetasan hidrogen yang berbeda. Dalam perkembangannya beberapa peneliti berpendapat mengenai model penggetasan akibat hidrogen. Model ini antara lain dibahas sebagai berikut^[22] :

1. Model Tekanan

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

2. Model Dekohesi

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



Gambar 2.12 Model Dekohesi ^[21]

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

kisi logam akan membuat gaya kohesi logam menjadi lebih lemah dan akan menyebabkan material patah getas

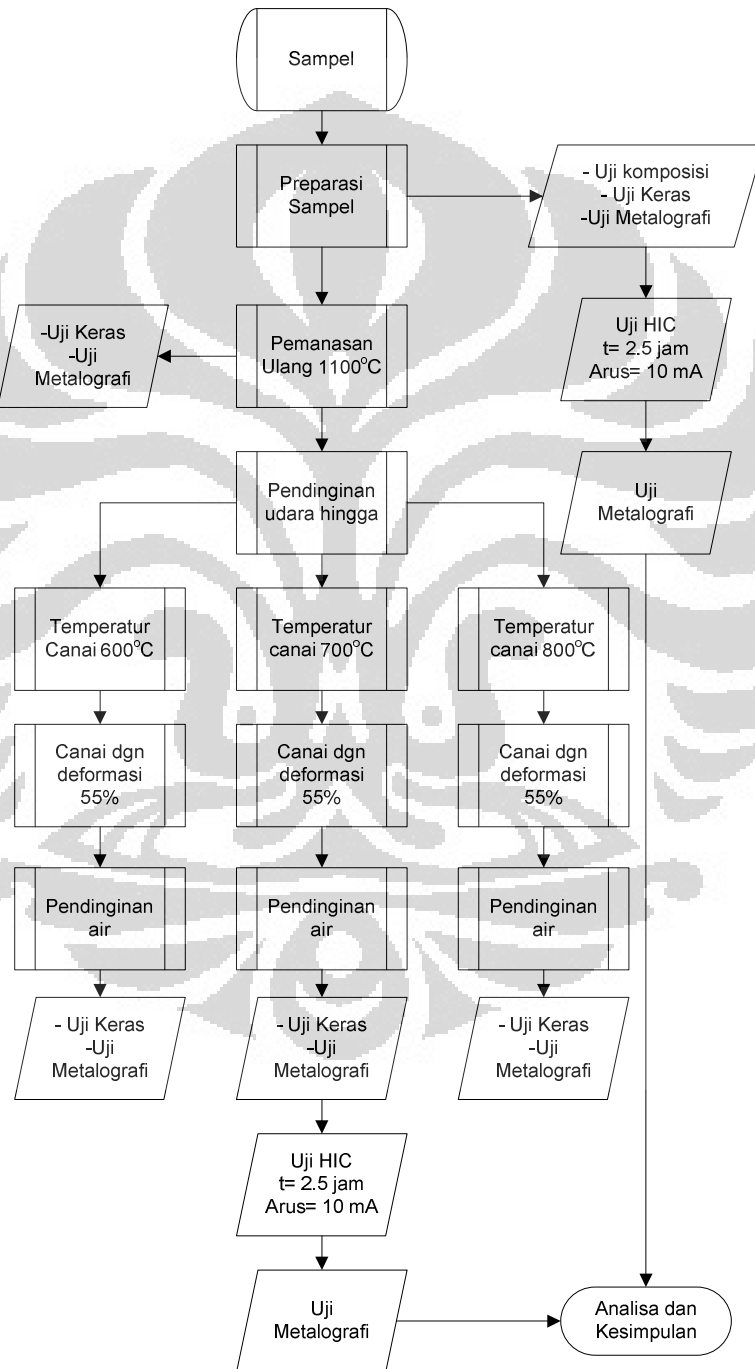
3. Model Plastis

Model penggetasan ini pertama kali dikemukakan oleh Beachem. Mekanismenya didasarkan pada observasi hidrogen di dalam 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*.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Proses pengujian dapat dilihat pada diagram alir berikut ini:



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat

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

3.2.2 Bahan

1. Pelat (Stainless Steel AISI 430)
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

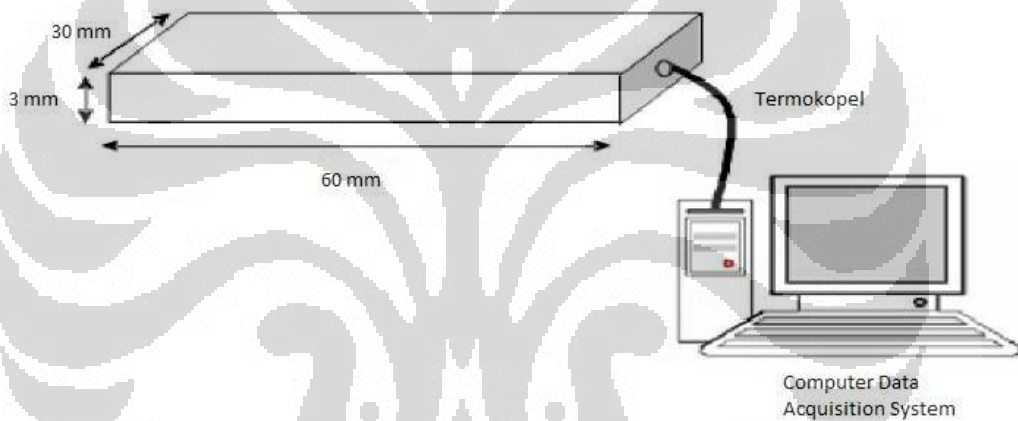
Penelitian diawali dengan pemilihan material sampel uji berdasarkan relevansi antara studi literatur. Material baja yang menjadi sampel uji adalah pelat yang merupakan stainless steel AISI 430. Pada tahap awal dilakukan uji komposisi material dengan menggunakan *Optical Emission Spectroscopy* (OES). OES merupakan suatu metode karakterisasi material dengan cara mengeksitasi atom dengan menggunakan perbedaan potensial antara sampel dan elektroda. Akibat dari energi tersebut, elektron pada sampel akan memancarkan sinar yang akan ditangkap oleh detektor. Perbedaan intensitas yang terjadi kemudian dikarakterisasi oleh *analyzer* sehingga didapatkan komposisi penyusun dari material yang dikarakterisasi. Secara umum pengujian OES terhadap sampel yang digunakan adalah sebagai berikut:



Gambar 3.2 *Optical Emission Spectroscopy* di CMPFA DTMM UI

3.3.2 Preparasi Benda Uji

Pada pengujian ini, sampel yang digunakan adalah baja tahan karat tipe AISI 430. Geometri benda uji berbentuk *sheet* dengan ukuran 60 x 30 x 3 mm. Spesimen yang digunakan pada penelitian ini dipotong sehingga berbentuk seperti pada gambar 3.4. Spesimen diberi lubang untuk meletakkan kawat termokopel sebagai alat pengukur temperatur spesimen. Pengukuran temperatur menggunakan data *acquisition system* yang dihubungkan dengan komputer. Kedalaman lubang adalah 6 mm dengan diameter 2 mm yang disesuaikan diameter termokopel.



Gambar 3.3 Skema Penyambungan Benda Uji dengan Termokopel

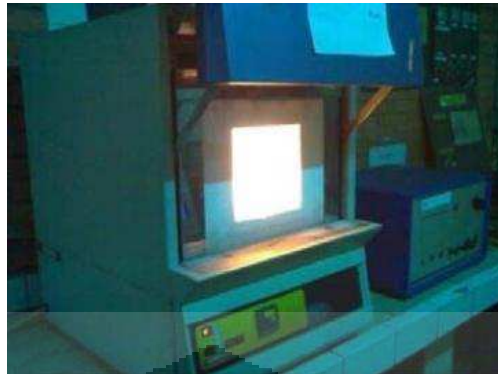


Gambar 3.4 Benda Uji setelah Dipreparasi

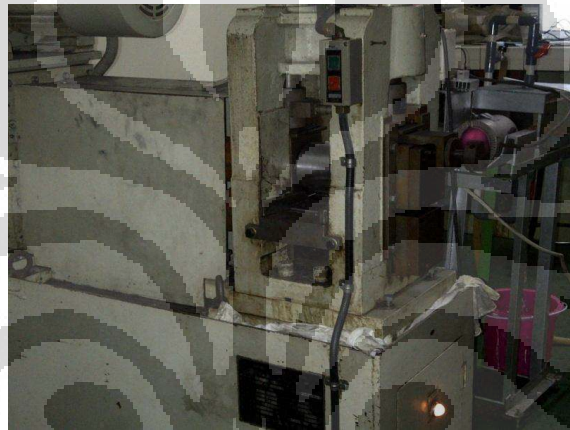
3.3.3 Proses TMCP dan *Warm Rolling*

Seluruh spesimen yang telah diukur disiapkan untuk berbagi tes, kemudian masing-masing dimasukkan ke dalam *furnace* atau dapur perapian untuk dipanaskan atau *reheating* hingga suhu 1100°C selama 1 jam, kemudian ditahan selama 5 menit. Didinginkan hingga mencapai suhu yang telah ditentukan, sampel A pada suhu 600°C, sampel B pada suhu 700°C, dan sampel C pada suhu 800°C melalui pendinginan udara. Kemudian dengan melakukan canai searah dengan besaran deformasi 55%, dilanjutkan dengan pendinginan air. Proses canai dilakukan dengan menggunakan mesin *OnoRoll* berkapasitas 20 ton. Penelitian ini terbagi atas beberapa variasi proses. Tiap variasi memiliki parameter tersendiri pada hasil akhir. Variasi-variasi proses yang dilakukan yaitu :

1. Benda Uji Awal (*Bulk*) adalah benda uji awal yang tidak mengalami perlakuan panas, yang diidentifikasi struktur mikro, dan kekerasannya sebagai pembanding untuk benda uji berikutnya.
2. Benda Uji Pemanasan Ulang (*reheating*) adalah benda uji awal yang dipanaskan hingga suhu 1100°C, yang diidentifikasi struktur mikro, dan kekerasannya sebagai pembanding untuk benda uji berikutnya.
3. Benda Uji Canai Hangat 600°C dipanaskan hingga suhu 1100°C selama satu jam, ditahan selama lima menit, lalu didinginkan dengan media udara hingga mencapai suhu 600°C kemudian dideformasi sebesar 55% dengan menggunakan mesin canai dan mengalami pendinginan air.
4. Benda Uji Canai Hangat 700°C dipanaskan hingga suhu 1100°C selama satu jam, ditahan selama lima menit, lalu didinginkan dengan media udara hingga mencapai suhu 700°C kemudian dideformasi sebesar 55% dengan menggunakan mesin canai dan mengalami pendinginan air.
5. Benda Uji Canai Hangat 800°C dipanaskan hingga suhu 1100°C selama satu jam, ditahan selama lima menit, lalu didinginkan dengan media udara hingga mencapai suhu 800°C kemudian dideformasi sebesar 55% dengan menggunakan mesin canai dan mengalami pendinginan air.



Gambar 3.5. *Furnace Carbolite* di lab TPB DTMM UI



Gambar 3.6. Mesin Onoroll dan Rangkaian Alat di lab TPB DTMM UI

3.3.4 Pengamatan Metalografi

Pengamatan metalografi bertujuan untuk mengamati struktur mikro dari benda uji.

3.3.4.1 Preparasi

Preparasi benda uji dilakukan berdasarkan *ASTM E 3 – 01 “Standard Guide for Preparation for Metallographic Specimens”* ^[23]. Untuk benda uji yang berukuran kecil dilakukan proses *mounting* terlebih dahulu untuk mempermudah penanganan benda uji metalografi. Setelah itu dilakukan proses pengamplasan untuk meratakan bagian benda uji yang akan diamati struktur mikronya. Pengamplasan dilakukan dengan menggunakan kertas amplas yang dimulai dari amplas kasar hingga amplas halus agar

Universitas Indonesia

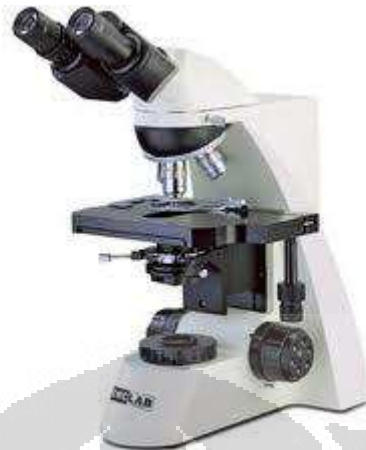
mendapatkan permukaan benda uji yang halus dan rata di seluruh permukaan. Ukuran kekasaran dari kertas amplas yang digunakan yaitu: #120, #240, #400, #600, #800, #1000, #1200, #1500 (dalam *mesh*). Dalam melakukan pengamplasan, arah pengamplasan diubah setiap mengganti tingkat kekasaran kertas amplas, hal ini bertujuan untuk menghilangkan sisa pengamplasan sebelumnya sehingga didapat permukaan yang halus pada benda uji. 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 TiO_2 .

3.3.4.2 Etsa

Setelah dilakukan proses poles, Benda Uji Awal (*Bulk*), Pemanasan Ulang (*Reheating*), Canai Hangat 600°C , dan Canai Hangat 700°C dielektroetsa dengan *Nitric Acid* 60% (60 mL *Nitric Acid* + 40 mL aquades) selama satu detik dan tegangan 1 V untuk memunculkan jejak batas butir struktur akhir dari benda uji sehingga dapat diamati morfologi butir ferrit. Untuk benda uji Canai Hangat 800°C dan benda uji yang sudah mengalami *hydrogen charging* dietsa dengan menggunakan 30 % *picric acid* + HCl 2 tetes selama 5 detik.

3.3.4.2 Pengamatan di bawah mikroskop

Setelah itu dilakukan pengamatan dengan menggunakan mikroskop optik pada perbesaran 500x.



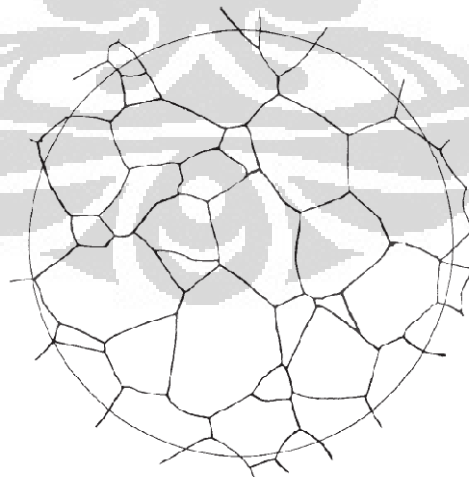
Gambar 3.7. Mikroskop Optik

3.3.5 Perhitungan Besar Butir

Pengujian dan perhitungan besar butir dilakukan dengan menggunakan standar ASTM E112^[24].

3.3.5.1 Perhitungan Besar Butir *Equiaxed*

Terdapat berbagai metode perhitungan besar butir yang ada dalam ASTM E112, namun yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah metode *Planimetric*.



Gambar 3.8. Lingkaran yang digunakan untuk penghitungan butir dengan metode *Planimetric*^[24]

Setelah metode etsa dapat menampilkan batas butir Ferritic, maka besar butir dihitung dengan menggunakan metode *planimetri*, sesuai dengan standar perhitungan metalografi kuantitatif ASTM E112.

$$N_A = (f) (n_1 + n_2 / 2) \quad (3.1)$$

Keterangan:

f = bilangan jefferies = $M^2/5000$

M = magnification

5000 = luas lingkaran (mm^2)

n_1 = butir dalam lingkaran

n_2 = butir yang terpotong lingkaran

Diameter lingkaran 79,8 mm

Luas area 5000 mm^2

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

$$G = [3,322 \log (N_A) - 2,95] \quad (3.2)$$

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

3.3.5.2 Perhitungan Besar Butir Non-Equiaxed

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

harus menghasilkan jumlah butir terpotong antara 50-150 butir oleh garis pada perbesaran yang dipilih.

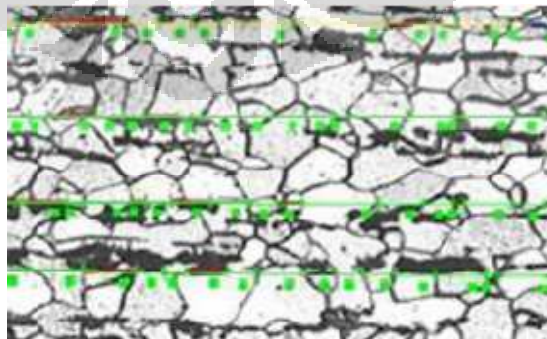
Ketentuan perhitungan jumlah butir yang terpotong adalah: jika garis memotong penuh satu butir maka dihitung satu. Jika ujung garis tepat berakhir pada pertengahan butir, maka dihitung setengah. Pertemuan antara 3 butir dihitung satu setengah dan jika garis menyinggung batas butir, maka dihitung setengah.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

$$L = \frac{V_v \times L_t}{N_a \times M} \quad (3.3)$$

Keterangan

- L : Besar butir rata-rata (μm)
- V_v : Fraksi volume fasa tertentu
- L_t : Panjang garis total (μm)
- N_a : Jumlah butir terpotong garis
- M : Perbesaran

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

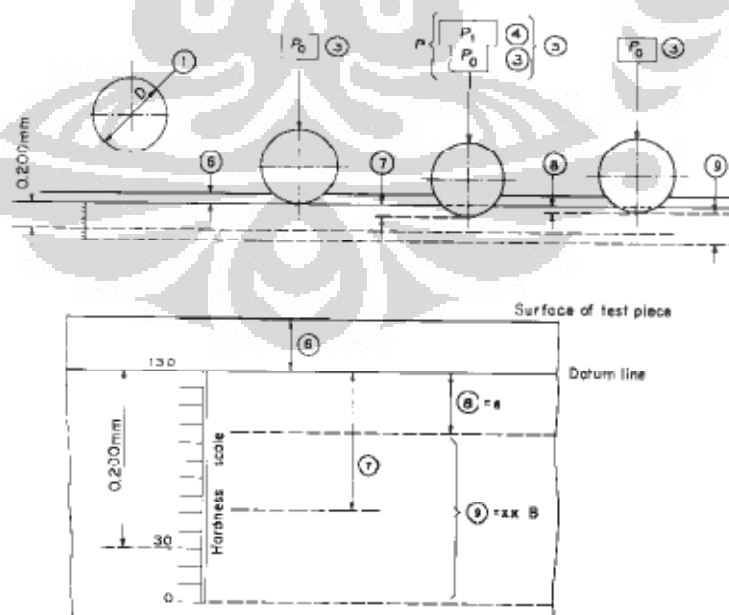


Gambar 3.9. Metode *Straight Line Test*

3.3.6 Pengujian Kekerasan

3.3.6.1 Metode Kekerasan Rockwell B

Metode pengujian kekerasan yang dipakai yaitu metode kekerasan Rockwell (ASTM E 18) “*Standard Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials*”^[25]. Indentor yang digunakan kerucut intan dengan sudut yang dibentuk muka intan 120°. Pembebanan dilakukan dengan dua tahap; tahap pertama adalah pembebanan minor kemudian pembebanan mayor. Nilai kekerasan ditentukan dengan perbandingan kedalaman kedua tahap pembebanan. Berbeda dengan metode Brinell dan Vickers dimana kekerasan suatu bahan dinilai dari diameter atau diagonal jejak yang dihasilkan, maka metode Rockwell merupakan uji kekerasan dengan pembacaan langsung (*direct reading*). Metode ini banyak dipakai dalam industri karena pertimbangan praktis. Variasi dalam beban dan indentor yang digunakan membuat metode ini memiliki banyak macamnya. Metode Rockwell yang digunakan pada penelitian ini adalah Rockwell B (dengan indentor bola baja berdiameter 1/6 inci dan beban 100 kg). Waktu yang digunakan untuk indentasi yaitu 5 detik.



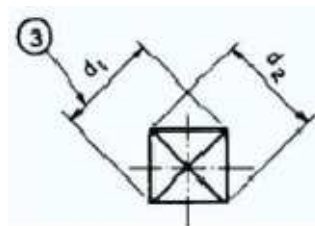
Gambar 3.10. Prinsip pengujian kekerasan dengan metode *Rockwell B* menggunakan indentor 1/6 bola baja^[25]

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

Tabel 3.1. Simbol dan Penandan yang berhubungan dengan pengujian *Rockwell B* ^[25].

3.3.6.2 Metode Kekerasan Vickers

Pengujian nilai kekerasan menggunakan standar ASTM E92 yaitu metode pengujian kekerasan Vickers. Prinsip pengujiannya yaitu dengan melakukan penjejakan atau indentasi pada sampel dengan indenter intan berbentuk piramida dengan kemiringan sekitar 136° . Jejak indentasi yang terdapat pada sampel akan berbentuk segi empat atau belah ketupat yang dapat dihitung panjang diagonal-diagonalnya (lihat Gambar 3.11). Panjang diagonal jejak yang dihasilkan selama proses penjejakan dapat dihitung dengan menggunakan skala penghitung yang terdapat pada mikroskop mesin uji kekerasan Vickers. Gambar 3.12. merupakan gambar mesin uji kekerasan Vickers yang digunakan selama penelitian. Setelah panjang diagonal-diagonalnya diketahui maka nilai kekerasan dari sampel dapat diketahui dengan menggunakan rumus kekerasan Vickers.



Gambar 3.11 Ilustrasi Jejak yang Dihasilkan Selama Penjejakan

$$VHN = \frac{1,854 P}{d^2} \quad (3.4)$$

Keterangan

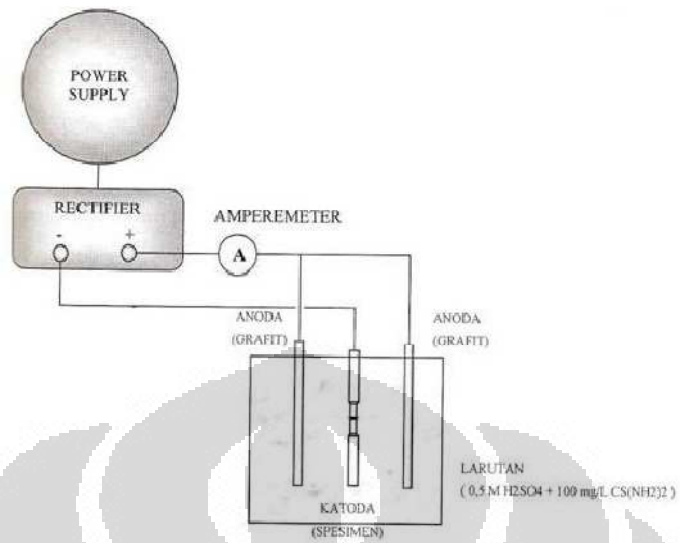
- VHN = Satuan Kekerasan Vickers
 P = Beban (kgf)
 d = Panjang Diagonal Penjejakan



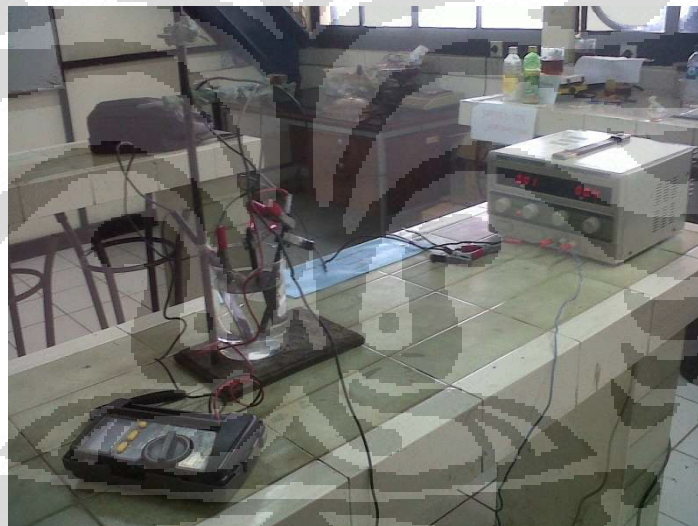
Gambar 3.12 Mesin Uji Kekerasan Vickers

3.3.7 Pengujian *Hydrogen Charging Test*^[26]

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 $CS[NH_2]_2$ 100 mg/l dengan menggunakan rapat arus 10 mA/cm^2 selama 2.5 jam (waktu dan besar arus diambil berdasarkan penelitian sebelumnya yang telah dilakukan oleh R. Bastian dkk). Sel elektrokimia ini terdiri dari grafit sebagai anoda dan spesimen uji sebagai katoda.



Gambar 3.13. Skema proses *Hydrogen Charging*^[26].



Gambar 3.14. Rangkaian Proses *Hydrogen Charging*

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Uji Komposisi

Komposisi dari benda uji dengan menggunakan alat uji komposisi *Optical Emission Spectroscopy* terdapat pada Tabel 4.1, yaitu:

Tabel 4.1 Komposisi Kimia Spesimen Uji AISI 430

Komposisi	C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr
% Berat	0.084	0.542	0.036	<0.003	0.153	0.096	18.7

Komposisi	Mo	Ti	Cu	Nb	V	Al	Fe
% Berat	0.031	0.006	0.037	<0.002	0.023	0.074	Bal.

4.2 Hasil Pengukuran Ketebalan Benda Uji

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

$$\%deformasi = \frac{h_0 - h_f}{h_0} \quad (4.1)$$

Dimana,

% Deformasi = Besar Derajat Deformasi

h_0 = Ketebalan Awal (mm)

h_f = Ketebalan Akhir (mm)

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



Gambar 4.1 Benda Uji Yang Telah Dideformasi dan Belum Dideformasi

Tabel 4.2 Hasil Pengukuran Dimensi Benda Uji Sebelum Dan Sesudah Proses Pencanaan 600 °C, 700 °C, dan 800 °C serta Nilai Strain Rate

No	Sampel	h_0 (mm)	h_f teoritis (mm)	h_f aktual (mm)	% Deformation (Teoritis)	% Deformation (Aktual)	$\dot{\epsilon}$ teoritis (s ⁻¹)	$\dot{\epsilon}$ aktual (s ⁻¹)
1	WR 600°C	3	1.35	1.75	55	42	15.5	13.8
2	WR 700°C	3	1.35	1.75	55	42	15.5	13.8
3	WR 800°C	3	1.35	1.75	55	42	15.5	13.8

Dari data tabel 4.1 terlihat perbedaan ketebalan akhir aktual (h_f aktual) dan ketebalan akhir teoritis (h_f teoritis) dari setiap benda uji. Perbedaan yang terjadi pada nilai ketebalan akhir benda uji ini disebabkan karena adanya mekanisme *roll flattening* pada proses canai. Ketika sampel uji masuk ke dalam *roller*, terjadi interaksi antara *roller* dengan material, *roll* melakukan tekanan dan material mengalami reaksi. Jika benda uji memiliki kekerasan yang cukup tinggi, maka reaksi yang terjadi juga meningkat dan mengakibatkan *roller* terdeformasi secara elastis^[9]. Penghitungan *strain rate* menggunakan rumus pada sub bab 2.5.2, dengan $v = 133,33$ mm/s dan $R = 52$ mm.

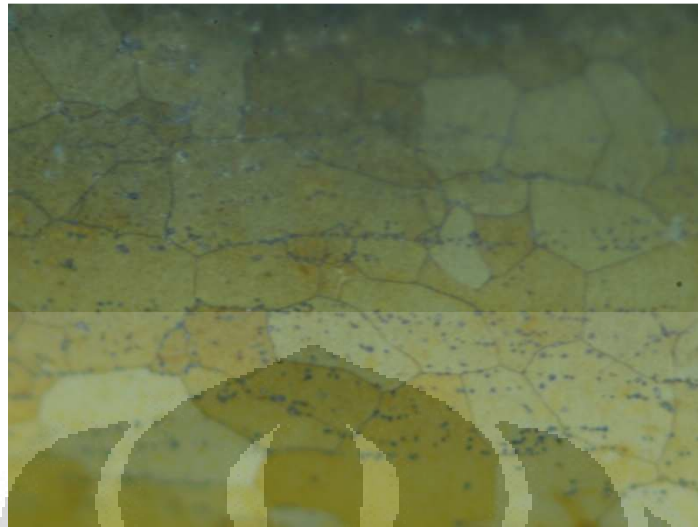
4.3 Hasil Pengamatan Metalografi

Pengamatan metalografi dengan mikroskop optik bertujuan untuk mengamati mikrostruktur hasil proses pencanaian. Pengamatan dilakukan dengan menggunakan elektroetsa *nitric acid* 60% selama satu detik untuk Benda Uji Awal (*Bulk*), Pemanasan Ulang (*Reheating*), Canai Hangat 600°C, dan Canai Hangat 700°C. Untuk Benda Uji Canai Hangat 800°C dan benda uji yang sudah mengalami *hydrogen charging* dietsa dengan menggunakan larutan kalling 1 (CuCl_2 5gr + HCl 35% 40 mL + aquades 30 mL) selama 10 detik.

Pengamatan metalografi meliputi pengamatan morfologi serta ukuran butir sebelum dan sesudah proses.



Gambar 4.3. Mikrostruktur Sampel Awal (*Bulk*) AISI 430 dengan perbesaran 500x. Elektroetsa *Nitric Acid* 60%.



Gambar 4.4. Mikrostruktur Sampel Pemanasan Ulang (*Reheating*) AISI 430 dengan perbesaran 500x. Elektroetsa *Nitric Acid* 60%.

Pada gambar 4.3. dan 4.4. terlihat jelas perbedaan besar butir *ferrite* yang tampak pada pengamatan mikrostruktur. Sampel AISI 430 yang telah melalui proses *reheating* mengalami proses pertumbuhan butir sehingga butir pada gambar 4.4. lebih besar daripada gambar 4.3 (Ukuran butir Benda Uji Awal (*Bulk*) adalah $34.8 \mu\text{m}$ dan ukuran butir Benda Uji Pemanasan Ulang (*Reheating*) adalah $53.4 \mu\text{m}$). Peningkatan besar butir terjadi karena adanya migrasi batas butir akibat difusi atom-atom dari suatu butir ke butir lainnya sehingga terjadi perubahan batas butir. Pertumbuhan butir dapat dibagi menjadi dua mekanisme yaitu *continuous (normal) grain growth*, dimana semua butir tumbuh menjadi lebih besar dengan laju yang sama dan *discontinuous (abnormal) grain growth* dimana beberapa butir tumbuh dengan laju yang lebih besar daripada butir lainnya^[15]. Hasil mikrostruktur sampel reheating menunjukkan pertumbuhan butir terjadi dengan mekanisme *discontinuous (abnormal) grain growth*.



Gambar 4.5 Mikrostruktur Benda Uji Canai Hangat suhu 600°C AISI 430 dengan perbesaran 500x. Elektroetsa *nitric acid* 60%.



Gambar 4.6 Mikrostruktur Benda Uji Canai Hangat suhu 700°C AISI 430 dengan perbesaran 500x. Elektroetsa *nitric acid* 60%.



Gambar 4.7 Mikrostruktur Benda Uji Canai Hangat suhu 800°C AISI 430 dengan perbesaran 500x. Etsa 30% Picral + HCl 2 tetes.

Pada gambar 4.4, 4.5, dan 4.6 mikrostruktur butir sampel yang mengalami proses canai menjadi lebih kecil dan pipih dibandingkan dengan Benda Uji Awal (*Bulk*) atau Benda Uji Pemanasan Ulang (*Reheating*). Hal ini dikarenakan karena adanya deformasi dari pencaian membuat butir yang awalnya berbentuk *equiaxed* menjadi *non-equiaxed*. Selain karena deformasi, faktor pendinginan cepat juga mempengaruhi bentuk butir tetap pipih. Pendinginan air termasuk dalam pendinginan cepat. Pendinginan cepat dapat menghambat terjadinya difusi batas butir sehingga butir tidak terus tumbuh dan butir yang dihasilkan tetap pipih.

Setelah sampel dietsa dan diamati dengan mikroskop optik dengan perbesaran 500x tampak butir ferrite pada semua sampel. Setelah sampel mengalami proses canai, tampak besar butir yang tidak seragam. Terdapat butir yang pipih agak besar dan kumpulan butir yang lebih kecil. Munculnya butir-butir yang lebih kecil dibandingkan butir-butir di sekitarnya mengindikasikan bahwa rekristalisasi dinamis telah terjadi^[27].



Gambar 4.8 Mikrostruktur Benda Uji *Hydrogen Embrittlement Canai Hangat* suhu 700°C dengan perbesaran 500x. Etsa 30% Picral + HCl 2 tetes.

Pada gambar struktur mikro Benda Uji *Hydrogen Embrittlement Canai Hangat* suhu 700°C, tidak ditemukan adanya mikro retak. Hal ini mengindikasikan baja AISI 430 *stainless steel* memiliki ketahanan yang baik dari serangan hidrogen.

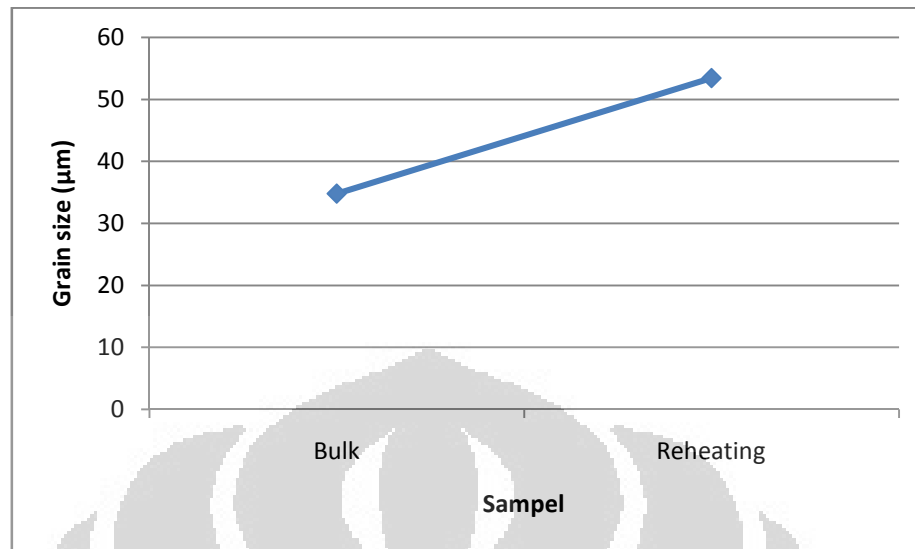
4.4 Hasil Perhitungan Butir

Setelah dilakukan dua kali perhitungan diperoleh rata-rata diameter butir. Perhitungan diameter butir ferit dilakukan menggunakan metode *Planimetri* untuk butir *equiaxed* dan *straight line test* untuk butir *non-equiaxed* sesuai dengan standar ASTM E112.(Subbab 3.3.5). Hasil perhitungan diameter butir ferit dari *stainless steel* AISI 430 terlihat pada tabel 4.3 berikut:

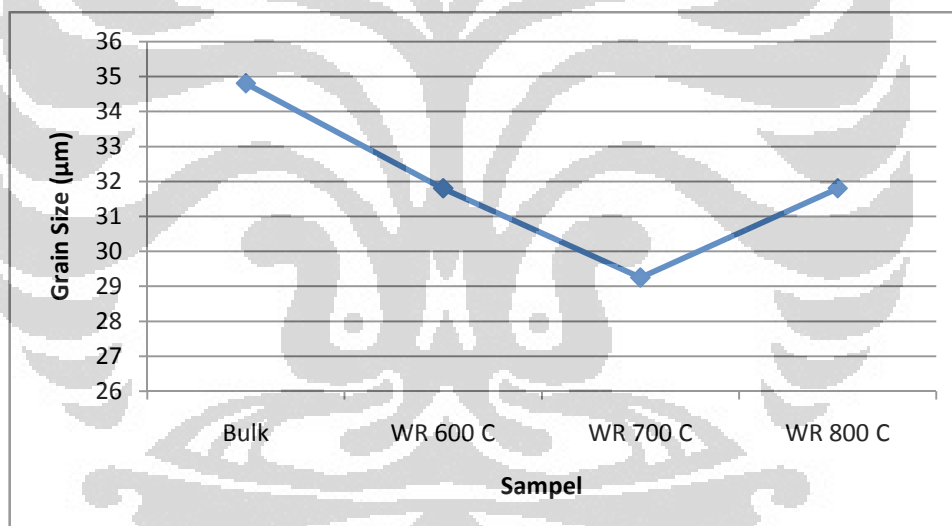
Tabel 4.3 Pengukuran Besar Butir Benda Uji Sebelum Dan Setelah Proses Pencanaian

No	Sampel	Grain Size Number (belum dibulatkan)	Grain Size Number (ASTM E 112)	Grain Size rata-rata (μm)
1	Awal	6.77 dan 6.68	7 dan 6.5	34.8
2	Pemanasan Ulang	5.49 dan 5.27	5.5 dan 5.5	53.4
3	Canai Hangat 600°C	7.2 dan 6.96	7 dan 7	31.8
4	Canai Hangat 700°C	7.69 dan 7.21	7.5 dan 7	29.25
5	Canai Hangat 800°C	7.08 dan 7.12	7 dan 7	31.8

Berdasarkan tabel 4.3, diameter rata-rata yang didapatkan dari perhitungan menunjukkan hasil sebagai berikut; Benda Uji Awal (*Bulk*) memiliki ukuran butir sebesar 34.8 μm . Benda Uji Pemanasan Ulang (*Reheating*) dengan perlakuan pemanasan selama 1 jam hingga mencapai temperatur 1100°C dan ditahan selama 10 menit kemudian dilakukan pendinginan udara menghasilkan ukuran butir yang lebih besar yaitu 53.4 μm . Ukuran butir sampel ini menjadi lebih besar karena butir mengalami *grain growth*. Sampel Canai Hangat 600°C dengan temperatur *rolling* 600°C menghasilkan butir yang lebih halus dengan ukuran butir 31.8 μm . Ukuran butir menjadi lebih kecil karena sampel mengalami deformasi yang menyebabkan pemipihan butir. Sampel Canai Hangat 700°C dengan temperatur *rolling* 700°C dan Canai Hangat 700°C yang sudah mengalami *hydrogen charging* menghasilkan butir dengan ukuran butir 29.25 μm . Sampel WR 800°C dengan temperatur *rolling* 800°C menghasilkan butir dengan ukuran butir 31.8 μm .



Gambar 4.9. Grafik Pengaruh Reheating Terhadap Ukuran Butir



Gambar 4.10. Grafik Pengaruh Deformasi Terhadap Ukuran Butir Dengan Tiga Variasi Temperatur

Berdasarkan grafik di atas terlihat bahwa ukuran butir yang mengalami proses canai hangat mengalami pengecilan ukuran butir. Dari percobaan didapatkan hasil ukuran butir terkecil ada pada pencanaian hangat dengan suhu canai 700°C. Pada suhu tersebut butir mengalami rekristalisasi dinamis yang paling baik dibandingkan dengan suhu canai 600°C dan 800°C.

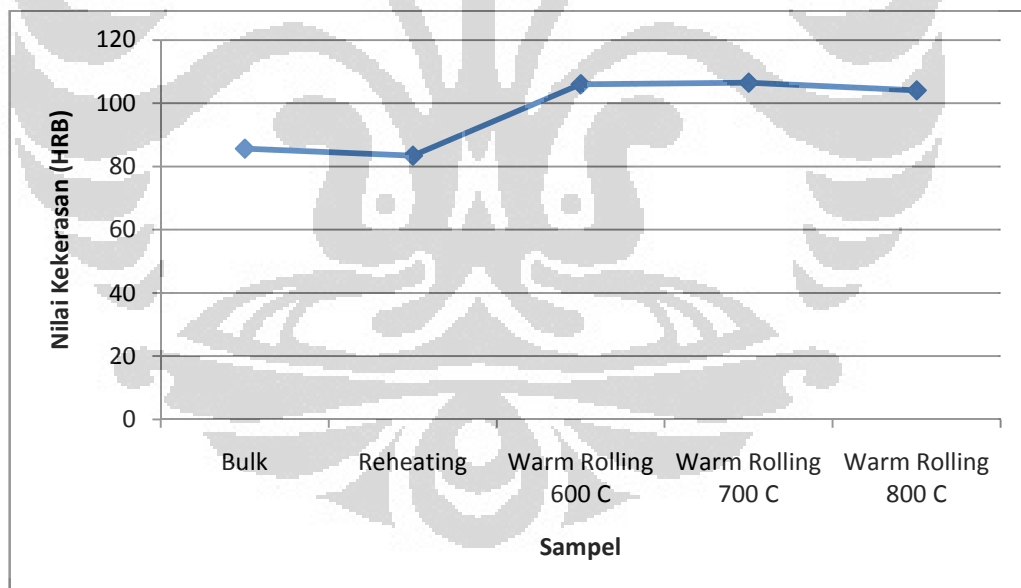
4.5 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan dengan Metode Rockwell B dan vickers. Berikut tabel data hasil pengujian kekerasan pada masing-masing sampel.

Tabel 4.4. Hasil Pengukuran Kekerasan

No	Sample	HRB	HRB rata-rata	HV	Ukuran Butir (μm)
1	Awal (Bulk)	85.7	85.6	167	34.8
2	Awal (Bulk)	85.2			
3	Awal (Bulk)	85.9			
4	Pemanasan Ulang	81.2	83.4	160.5	53.4
5	Pemanasan Ulang	84.4			
6	Pemanasan Ulang	84.5			
7	Canai Hangat 600°C	106.1	106	241.25	31.8
8	Canai Hangat 600°C	106			
9	Canai Hangat 600°C	106			
10	Canai Hangat 700°C	106.4	106.5	260	29.25
11	Canai Hangat 700°C	106.5			
12	Canai Hangat 700°C	106.8			
13	Canai Hangat 800°C	104.6	104.1	236.61	31.8
14	Canai Hangat 800°C	104.4			
15	Canai Hangat 800°C	103.4			
16	Awal (HE)	86.4	86.1	169.5	34.8
17	Awal (HE)	86			
18	Awal (HE)	86.1			
19	Canai Hangat 700°C (HE)	107.1	107.6	265.5	29.25
20	Canai Hangat 700°C (HE)	107.3			
21	Canai Hangat 700°C (HE)	108.4			

Berdasarkan tabel 4.4, nilai kekerasan yang didapat dari pengujian kekerasan dengan menggunakan *Rockwell B* pada sampel menunjukkan hasil sebagai berikut; Benda Uji Awal (*Bulk*) memiliki kekerasan sebesar 85.6 HRB. Benda Uji Pemanasan Ulang (*Reheating*) dengan perlakuan pemanasan selama 1 jam hingga mencapai temperatur 1100°C dan ditahan selama 10 menit kemudian dilakukan pendinginan udara memiliki kekerasan sebesar 83.4 HRB. Benda Uji Canai Hangat 600°C dengan temperatur canai 600°C memiliki kekerasan sebesar 106 HRB. Benda Uji Canai Hangat 700°C dengan temperatur canai 700°C memiliki kekerasan sebesar 106.5 HRB. Benda Uji Canai Hangat 800°C dengan temperatur canai 800°C memiliki kekerasan sebesar 104.1 HRB. Benda Uji Awal (*Bulk*) yang mengalami *hydrogen charging* memiliki kekerasan sebesar 86.1 HRB. Sedangkan sampel canai hangat dengan suhu canai 700°C yang telah mengalami *hydrogen charging* memiliki kekerasan sebesar 107.6 HRB.



Gambar 4.11. Grafik Nilai Kekerasan Sampel

Pada grafik di atas, terjadi penurunan nilai kekerasan pada sampel *reheating* dibandingkan dengan sampel *bulk*. Penurunan nilai kekerasan tersebut berbanding terbalik dengan besar ukuran butir, di mana ukuran butir reheating lebih besar dibandingkan dengan sampel *bulk*. Hal ini sesuai dengan teori *hall petch equation*

yang mana semakin besar ukuran butir maka kekerasan makin menurun^[2]. Ukuran butir mempunyai pengaruh terhadap nilai kekerasan. Ukuran butir yang besar akan mengurangi kekerasan karena butir yang besar mengakibatkan area batas butir antara satu butir dengan butir lainnya menjadi lebih sedikit. Batas butir merupakan tempat dimana dislokasi sulit atau bahkan berhenti bergerak karena batas butir memiliki energi yang tinggi untuk terjadinya pergerakan dislokasi. Dengan demikian jika batas butirnya semakin sedikit, maka dislokasi akan lebih mudah bergerak (energi untuk menggerakkan dislokasi sedikit) sehingga material akan lebih mudah mengalami deformasi (kekerasan rendah).

Untuk sampel yang sudah mengalami canai hangat, terjadi peningkatan kekerasan bila dibandingkan dengan sampel *bulk*. Hal ini terjadi karena adanya pemipihan butir akibat proses deformasi dari canai hangat. Proses deformasi membuat batas butir semakin banyak. Material dengan butir yang semakin halus, maka dislokasi semakin sulit untuk bergerak (energi yang dibutuhkan untuk menggerakkan dislokasi besar). Pergerakan dislokasi yang terhambat ini akan menyebabkan material sulit untuk dideformasi sehingga sifat mekanis material seperti kekerasan dan kekuatan semakin tinggi^[3].

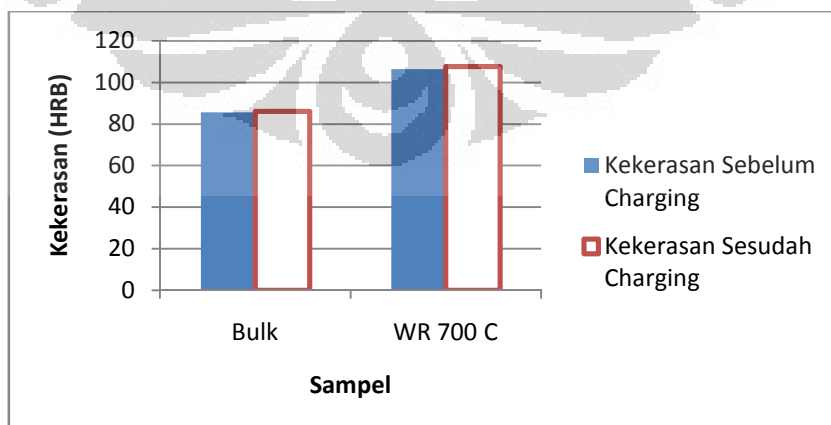
Pada gambar 4.10, semakin tinggi suhu warm rolling, maka kekerasan akan semakin meningkat (sampai dengan suhu 700°C). Dengan meningkatnya temperatur canai memungkinkan terjadinya fenomena rekristalisasi dinamis. Rekristalisasi dinamis adalah peristiwa dimana timbulnya butir-butir baru yang lebih kecil sehingga menyebabkan jumlah batas butir semakin banyak. Bertambahnya jumlah batas butir mengakibatkan dislokasi menjadi lebih sulit bergerak sehingga material menjadi lebih keras^[27]. Sedangkan untuk warm rolling dengan temperatur rolling 800°C, kekerasan menurun dikarenakan ukuran butir yang mulai membesar karena pengaruh suhu canai. Kenaikan besar butir akan menurunkan kekerasan karena dengan butir yang besar mengakibatkan area batas butir antara satu butir dengan butir lainnya menjadi lebih sedikit. Batas butir merupakan tempat dimana dislokasi sulit bahkan berhenti bergerak karena batas butir memiliki energi yang tinggi untuk terjadinya pergerakan dislokasi.

4.6 Pengujian *Hydrogen Embrittlement*

Pengujian *Hydrogen Embrittlement* bertujuan untuk melihat mekanisme ketahanan sampel setelah canai hangat terhadap difusi atom hidrogen. Pengamatan terhadap ketahanan *Hydrogen Embrittlement Test* tersebut dilakukan melalui uji kekerasan terhadap benda uji yang telah di *charging*. Proses pengujian kekerasan pada benda uji dilakukan untuk mengetahui pengaruh masuknya hidrogen (*hydrogen charging*) terhadap kekerasan benda uji. Proses *hydrogen charging* dilakukan dengan menggunakan 0.5 M H₂SO₄ sebagai sumber hidrogen ditambah 100 mg/l larutan Thiourea (CS[NH₂]₂) untuk mengurangi efek rekombinasi pada permukaan logam dan menggunakan arus sebesar 10 mA selama 2.5 jam. Reaksi yang terjadi pada proses ini merupakan reaksi elektrokimia yang mereduksi ion hidrogen menjadi atom hidrogen yang kemudian karena reaktifitas dan ukurannya yang sangat kecil dapat berdifusi hingga ke kisi kristal dalam logam.

Tabel 4.5. Hasil Pengujian *Hydrogen Charging*

No	Sampel	Kekerasan (HRB)	Kekerasan Setelah Charging (HRB)	Grain Size (μm)
1	Awal (<i>Bulk</i>)	85.6	86.1	34.8
2	Canai Hangat 700°C	106.5	107.6	29.25



Gambar 4.12. Grafik Kekerasan Benda Uji Sebelum dan Sesudah *Hydrogen Charging*

Benda Uji Awal (*Bulk*) adalah sampel awal benda uji tanpa mengalami perlakuan apapun. Ukuran butir sebesar $34.8\mu\text{m}$ dan memiliki kekerasan 85.6 HRB, dilakukan *hydrogen charging* dengan diberikan arus sebesar 10 mA menghasilkan kekerasan setelah *charging* sebesar 86.1 HRB. Pada gambar 4.11, terlihat kenaikan nilai kekerasan yang tidak terlalu signifikan antara kekerasan sebelum *charging* dan kekerasan setelah *charging*. Hal ini mengindikasikan material baja AISI 430 memiliki ketahanan yang baik terhadap serangan hidrogen. Nilai kekerasan naik karena hidrogen yang terperangkap pada batas butir. Terperangkapnya hidrogen menyebabkan perubahan dari sifat mekanis suatu material^[44]. Apabila atom hidrogen telah terdifusi ke dalam material dan berkumpul pada cacat yang ada pada material, akan terjadi reaksi kombinasi atom-atom hidrogen yang membentuk molekul H_2 , menghasilkan tekanan yang besar, dan menginisiasi terjadinya retakan pada material. Dengan adanya inisiasi retakan, apabila material diberikan pembebanan, akan terjadi propagasi retakan dari material yang dapat menurunkan sifat mekanik material tersebut serta perpisahannya menjadi getas^[34]. Namun pada sampel yang mengalami *hydrogen charging* tidak terjadi retakan. Hal ini menunjukkan ketahanan baja AISI 430 Stainless Steel terhadap *hydrogen embrittlement* baik.

Benda Uji Canai Hangat 700°C adalah sampel yang mengalami *reheating* pada temperatur 1100°C kemudian didinginkan dengan pendinginan udara hingga suhu 700°C dan mengalami deformasi rolling pada saat suhu sampel 700°C . Sampel ini menghasilkan ukuran butir paling kecil sebesar $29.25\ \mu\text{m}$ dengan kekerasan 106.5 HRB. Setelah mengalami proses *charging*, dengan diberikan arus sebesar 10 mA, kekerasan meningkat menjadi 107.6 HRB. Hal ini dapat terjadi karena difusi hidrogen pada material akan mengakibatkan interaksi antara hidrogen dengan dislokasi^[44]. Adanya kehadiran atom hidrogen diantara dislokasi membuat mobilitas dislokasi menjadi terhambat, sehingga dislokasi di dalam logam membutuhkan tegangan yang lebih besar untuk berpindah dan perpindahannya tidak akan terlalu jauh karena atom hidrogen yang lain akan kembali memasuki daerah dislokasi, oleh karena itu material akan memiliki nilai

kekerasan yang lebih tinggi. Ketika hidrogen yang terperangkap melebihi batas kritisnya akan menginisiasi terjadinya *crack* atau pertumbuhan dari *crack* itu sendiri. Hal ini yang dapat mengakibatkan fenomena *embrittlement* pada baja dan menyebabkan turunnya sifat mekanis baja^[44]. Benda Uji Canai Hangat 700°C menunjukkan semakin kecil ukuran butir dari *stainless steel* AISI 430 maka akan semakin rentan ketahanannya terhadap serangan hidrogen. Hal ini mengacu dari perubahan nilai kekerasan sebelum mengalami charging dan sesudah mengalami charging yang lebih besar pada sampel Canai Hangat 700°C sebesar 1.1 HRB (ukuran butir 29.25 μm) dibandingkan dengan sampel *bulk* sebesar 0.5 HRB (34.8 μm). Semakin besar perubahan nilai kekerasan setelah charging mengindikasikan hidrogen yang terperangkap makin banyak. Hal ini dapat dijelaskan karena tempat difusi dari atom Hidrogen adalah batas butir. Semakin banyak batas butir, maka makin rentan dari serangan atom Hidrogen. Namun pada sampel yang mengalami *hydrogen charging* tidak terjadi retakan. Masuknya hidrogen ke dalam logam tidak sampai ke tahap *hydrogen induced cracking*.

BAB 5

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan maka dapat diambil beberapa kesimpulan yaitu:

1. Pengaruh *reheating* atau pemanasan ulang memperbesar ukuran butir. Diameter butir ferit sampel *bulk* adalah 34.8 μm dan diameter sampel *reheating* adalah 53.4 μm . Sedangkan untuk sampel yang mengalami canai hangat memiliki kecenderungan pengecilan ukuran butir seiring naiknya temperatur canai hingga temperatur 700°C karena adanya pemipihan butir yang disertai dengan rekristalisasi dinamis. Diameter butir sampel WR 600°C adalah 31.8 μm dan diameter butir sampel WR 700°C adalah 29.25 μm . Sedangkan ukuran butir untuk sampel WR 800°C mengalami kenaikan ukuran butir dengan diameter butir sebesar 31.8 μm .
2. Temperatur canai hangat yang menghasilkan butir terhalus (29.25 μm) dengan kekerasan tertinggi (106.5 HRB) adalah canai hangat dengan temperatur sebesar 700°C. Material dengan butir yang semakin halus atau kecil menyebabkan dislokasi semakin sulit untuk bergerak. Pergerakan dislokasi yang terhambat ini akan menyebabkan material sulit untuk dideformasi sehingga sifat mekanis material seperti kekerasan dan kekuatan semakin tinggi.
3. Ketahanan *Hydrogen Embrittlement* pada stainless steel AISI 430 terbukti baik dilihat dari perbedaan nilai kekerasan yang tidak signifikan pada sampel yang mengalami *hydrogen charging* dengan sampel yang belum mengalami *hydrogen charging*.
4. Sampel *stainless steel* AISI 430 yang mengalami *hydrogen charging* akan mengalami peningkatan nilai kekerasan.
5. Dari perbandingan dua sampel yang mengalami *hydrogen charging*, meningkatnya besar butir akan menurunkan jumlah difusi atom-atom hidrogen ke dalam logam yang dapat menyebabkan *hydrogen embrittlement*.

REFERENSI

1. ASM Specialty Handbook, *Stainless Steel*, (ASM International).
2. William D. Callister, Jr., *Materials Science and Engineering, An Introduction*, 6th ed., John Wiley & Son, Inc., 2003.
3. Samerjit. *Hydrogen Induced Cracking in Low Strength Steels*. Thammasat Int.J.Sc.Tech Vol.9 No.2, 2004.
4. Yoshitaka Adachi , Masayuki Wakita , Hossein Beladi , Peter Damian Hodgson “*The formation of ultrafine ferrite through static transformation.*”
5. J. Zrník, J. Drnek, Z. Nový, S. V. Dobatkin, O. Stejskal. *Structure Evolution During Severe Warm Plastic Deformation of Carbon Steel*, Rev. Adv. Mater. Sci. 10, 2005, hal. 45-53.
6. X.C. Ren, Q.J. Zhou, G.B. Shan, W.Y. Chu, J.X. Li, Y.J. Su, and L.J. Qiao.” A Nucleation Mechanism of Hydrogen Blister in Metals and Alloys.” *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International 2007*.
7. ASM Handbook. 2004. Vol. 09, *Metallography and Microstructures*, (ASM International)
8. Kalpakjian, Serope dan S. R. Schmid. *Manufacturing Processes for Engineering Materials* 5th ed. Pearson Education : UK. 2008
9. Harris, John Noel. *Mechanical Working of Metals : Theory and Practice*. Pergamon Press : UK. 1983.
10. Dieter, George E. *Mechanical Metallurgy* second edition. McGraw-Hill International.
11. P.L. Mangonon. *The Principles of Material Selection for Engineering Design*. Prentice Hall, Inc.1999.
12. Weng, Yuqing. “Ultra-Fine Grained Steels.” *Metallurgical Industry Press*, 2009.
13. Nicholas, Joanne. *What are TMCP (Thermo-Mechanically Controlled Processed) steels*. Copyright © 2000, TWI Ltd.
14. Ginzburg, Vladimir G. *Flat-Rolled Steel Processes : Advanced Technology*. CRC Press : New York. 2009


15. Humphreys, F.J. and M. Hatherly, *Recrystallization and Related Annealing Phenomena*. Pergamon Press. 2004.
16. 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.
17. 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.
18. Yang, Zhongmin and Ruizhen WANG. "Formation of Ultra-fine Grain Structure of Plain Low Carbon Steel through Deformation Induced Ferrite Transformation." *ISIJ International*, Vol. 43. 2003. 761–766.
19. Tootten, Goerge E. *Steel Heat Treatment*. Taylor and Francis Group. 2006.
20. Pribadi, Mohammad. *Studi Pengaruh Deformasi Proses Warm Rolling Terhadap Perubahan Struktur Mikro Ferritic dan Ketahanan Korosi Baja Karbon Rendah*. Tesis Program Magister FTUI. 2010.
21. Elvira. S, Mioara "Hydrogen Embrittlement in Ferrous Materials", Universite Libere de Bruxelles France. 2006.
22. 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.
23. ASTM E3. "Standard Guide for Preparation for Metallographic Specimens". 2003.
24. ASTM E112. "Standard Test Method for Determining Average Grain Size". 2003.
25. ASTM E18. "Standard Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials". 2003.
26. Riyanti, Purnama. *Studi Penghalusan Butir Ferrite Melalui Severe Plastic Deformation dan Evaluasi Ketahanan Korosi Baja Karbon GR X42*. Tesis Program Magister FTUI. 2010.

27. Rini Riastuti, R.Bastian M, Dedi Priadi and Eddy S Siradj. “Grain refinement through warm rolling of wedge-shaped low carbon Steel” *ICMST 2011, Singapore*.






Lampiran 1. Hasil Pengujian Komposisi Stainless Steel AISI 430



FAKULTAS TEKNIK – UNIVERSITAS INDONESIA
LABORATORIUM UJI
DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI & MATERIAL
KAMPUS BARU UI - DEPOK 16424 - INDONESIA
Telp: 021 – 7863510, 78849045 Fax : 021 – 7872350, 78888111
E-mail : lum@metal.ui.ac.id





LAPORAN PENGUJIAN KOMPOSISI KIMIA
COMPOSITION TEST REPORT
Page 1 of 1

No Laporan <i>Report Nr</i>	623	Bahan <i>Material</i>	Stainless Steel
Pemakai Jasa <i>Customer</i>	Terry Atmajaya	Identitas Bahan <i>Material Identity</i>	Code : 1
Alamat <i>Address</i>	DTMM	Tanggal Terima <i>Receiving Date</i>	30 November 2011
No Kontrak <i>Contract Nr.</i>	1278/PT.02/FT04/P/2011	Standar <i>Standard</i>	ASTM A751 ASTM E415
Tanggal Uji <i>Date of Test</i>	1 Desember 2011	Mesin Uji <i>Testing machine</i>	Optical Emission Spectrometer*

Kode Sampel Sample Code	C (%)	Si (%)	S (%)	P (%)	Mn (%)	Ni (%)	Cr (%)
I	0.084	0.542	0.036	<0.003**	0.153	0.096	18.7
	Mo (%)	Ti (%)	Cu (%)	Nb (%)	V (%)	Al (%)	Fe (%)
	0.031	0.006	0.037	<0.002**	0.023	0.074	Bal.

catatan
* ketidakpastian bentangan dengan tingkat kepercayaan 95% dengan factor cakupan K=2
** (<) menunjukkan nilai berada di bawah *quantification limit* dari alat uji

Depok, 1 Desember 2011
Manajer Teknis
Laboratorium Uji
Departemen Teknik Metalurgi Dan Material

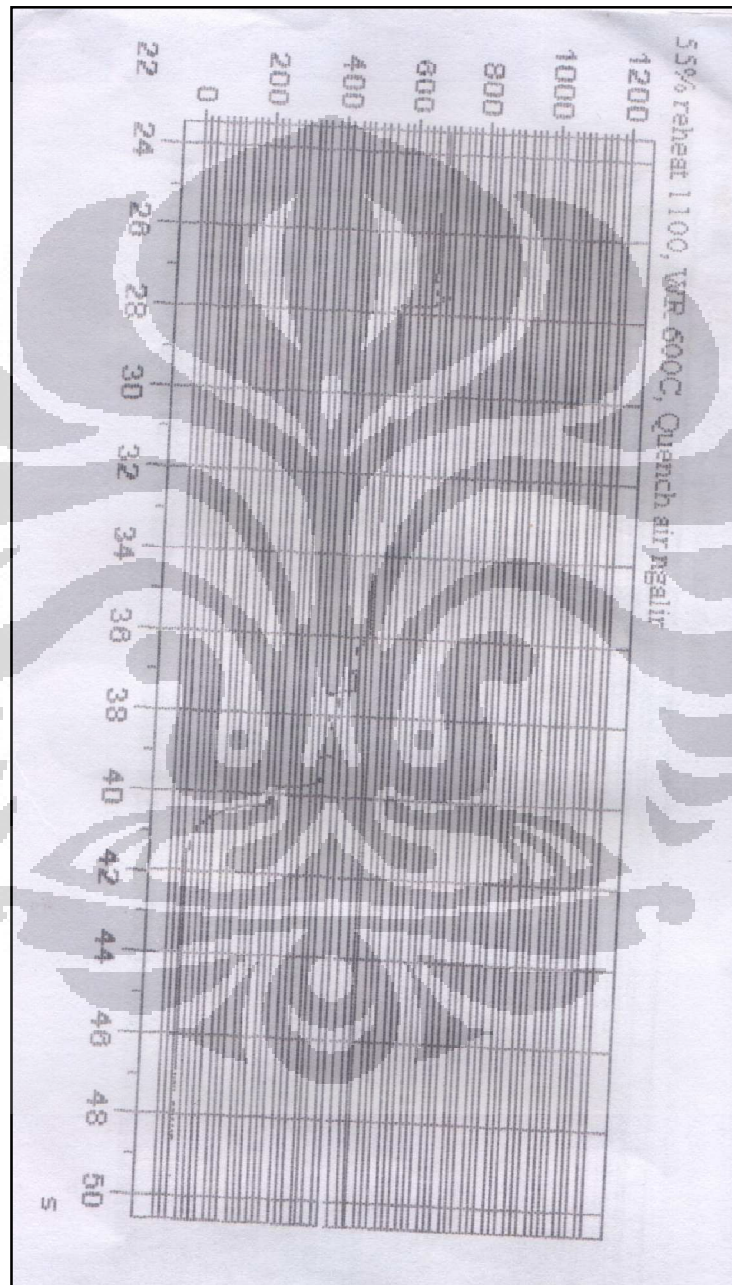



(Ahmad Ivan Karayan, ST.,M.Eng)

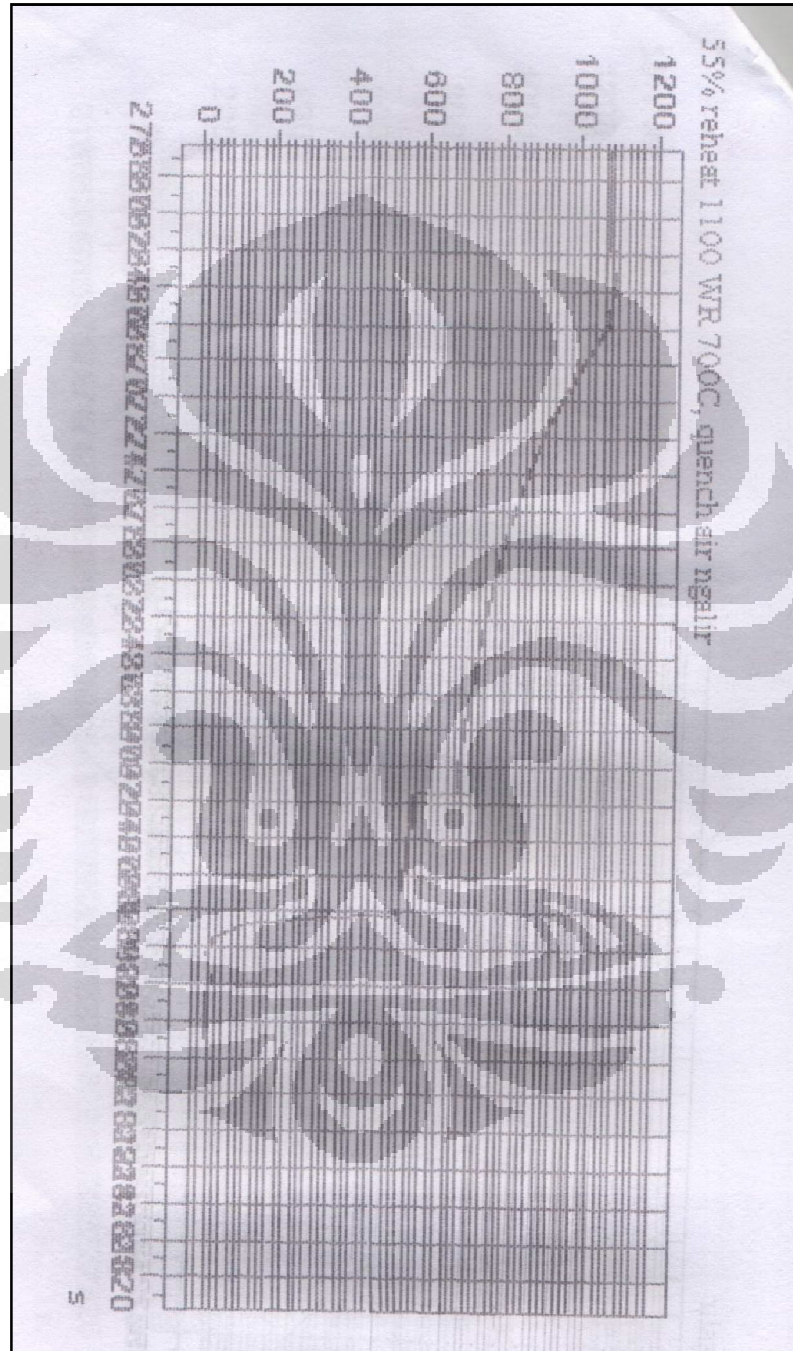
FF-25/ LU-DTMM Rev 2

Laporan hasil pengujian ini hanya berlaku untuk sample yang diuji di Laboratorium Uji-DTMM; publikasi serta penggunaan dokumen ini atau sebagian dari padanya harus dengan izin dari Laboratorium Uji-DTMM

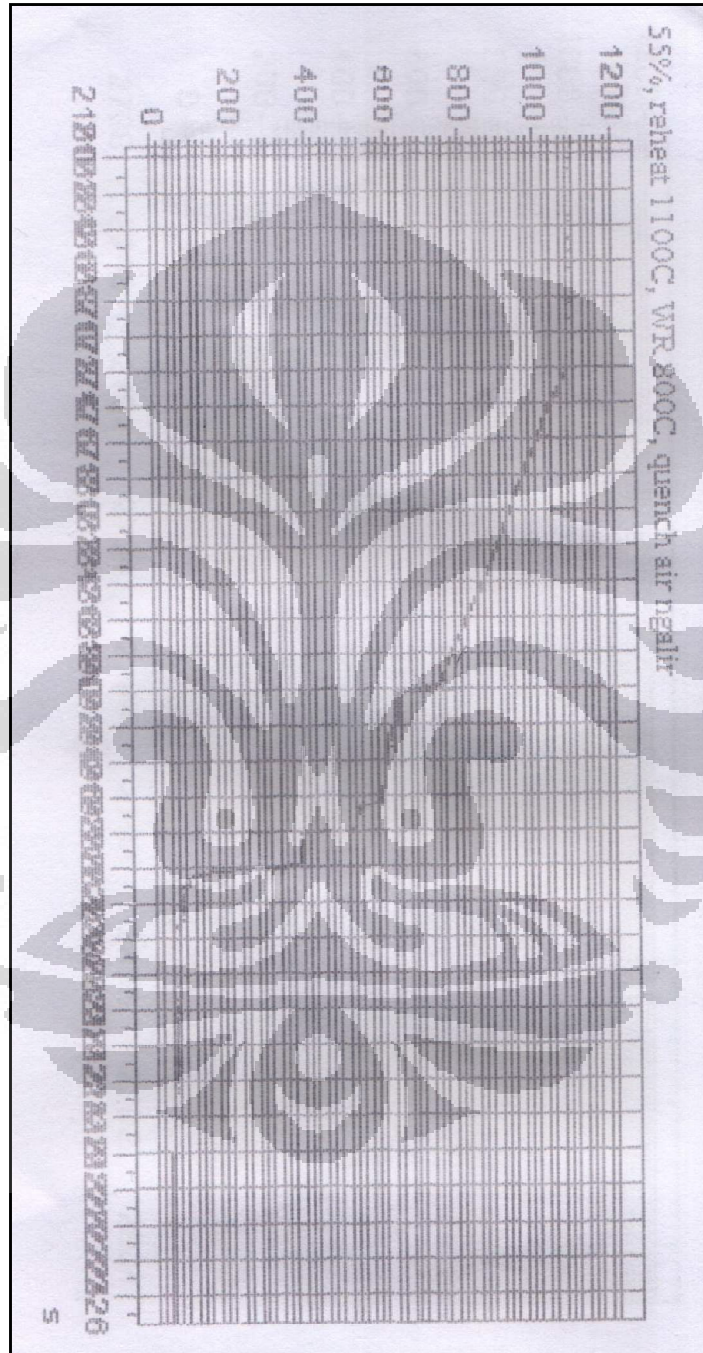
Lampiran 2. Grafik Akuisisi Temperatur Proses Canai Hangat 600°C dengan proses pencanaan pada temperatur 600°C dengan waktu tahan 5 menit, deformasi 55% , didinginkan dengan pendinginan air.



Lampiran 3. Grafik Akuisisi Temperatur Proses Canai Hangat 700°C dengan proses pencanaan pada temperatur 700°C dengan waktu tahan 5 menit, deformasi 55% , didinginkan dengan pendinginan air.



Lampiran 4. Grafik Akuisisi Temperatur Proses Canai Hangat 800°C dengan proses pencanaan pada temperatur 800°C dengan waktu tahan 5 menit, deformasi 55% , didinginkan dengan pendinginan air.



Lampiran 5. Tabel Diameter Butir ASTM E112

Grain Size No. G	N_A Grains/Unit Area		\bar{A} Average Grain Area		\bar{d} Average Diameter		$\bar{\tau}$ Mean Intercept		N_V No./mm
	No./in. ² at 100X	No./mm ² at 1X	mm ²	μm ²	mm	μm	mm	μm	
00	0.25	3.88	0.2581	258064	0.5080	508.0	0.4525	452.5	2.21
0	0.50	7.75	0.1290	129032	0.3592	359.2	0.3200	320.0	3.12
0.5	0.71	10.96	0.0912	91239	0.3021	302.1	0.2691	269.1	3.72
1.0	1.00	15.50	0.0645	64516	0.2540	254.0	0.2263	226.3	4.42
1.5	1.41	21.92	0.0456	45620	0.2136	213.6	0.1903	190.3	5.26
2.0	2.00	31.00	0.0323	32258	0.1796	179.6	0.1600	160.0	6.25
2.5	2.83	43.84	0.0228	22810	0.1510	151.0	0.1345	134.5	7.43
3.0	4.00	62.00	0.0161	16129	0.1270	127.0	0.1131	113.1	8.94
3.5	5.68	87.68	0.0114	11405	0.1068	106.8	0.0951	95.1	10.51
4.0	8.00	124.00	0.00806	8065	0.0898	89.8	0.0800	80.0	12.50
4.5	11.31	175.36	0.00570	5703	0.0755	75.5	0.0673	67.3	14.87
5.0	16.00	248.00	0.00403	4032	0.0635	63.5	0.0566	56.6	17.68
5.5	22.63	350.73	0.00285	2851	0.0534	53.4	0.0476	47.6	21.02
6.0	32.00	496.00	0.00202	2016	0.0449	44.9	0.0400	40.0	25.00
6.5	45.25	701.45	0.00143	1426	0.0378	37.8	0.0336	33.6	29.73
7.0	64.00	992.00	0.00101	1008	0.0318	31.8	0.0283	28.3	35.36
7.5	90.51	1402.9	0.00071	713	0.0267	26.7	0.0238	23.8	42.04
8.0	128.00	1984.0	0.00050	504	0.0225	22.5	0.0200	20.0	50.00
8.5	181.02	2805.8	0.00036	356	0.0189	18.9	0.0168	16.8	59.46
9.0	256.00	3968.0	0.00025	252	0.0159	15.9	0.0141	14.1	70.71
9.5	362.04	5611.6	0.00018	178	0.0133	13.3	0.0119	11.9	84.09
10.0	512.00	7936.0	0.00013	126	0.0112	11.2	0.0100	10.0	100.0
10.5	724.08	11223.2	0.000089	89.1	0.0094	9.4	0.0084	8.4	118.9
11.0	1024.00	15872.0	0.000063	63.0	0.0079	7.9	0.0071	7.1	141.4
11.5	1448.16	22446.4	0.000045	44.6	0.0067	6.7	0.0060	5.9	169.2
12.0	2048.00	31744.1	0.000032	31.5	0.0056	5.6	0.0050	5.0	200.0
12.5	2896.31	44892.9	0.000022	22.3	0.0047	4.7	0.0042	4.2	237.8
13.0	4096.00	63488.1	0.000016	15.8	0.0040	4.0	0.0035	3.5	282.8
13.5	5792.62	89785.8	0.000011	11.1	0.0033	3.3	0.0030	3.0	336.4
14.0	8192.00	126976.3	0.000008	7.9	0.0028	2.8	0.0025	2.5	400.0

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 160o 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