



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI KETAHANAN KOROSI H₂ PADA BAJA KARBON
RENDAH YANG MENGALAMI CANAI HANGAT 600°C**

SKRIPSI

ASTRINI WULANDARI

0706268322

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL

DEPOK

JUNI 2011



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI KETAHANAN KOROSI H₂ PADA BAJA KARBON
RENDAH YANG MENGALAMI CANAI HANGAT 600°C**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

ASTRINI WULANDARI

0706268322

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL

DEPOK

JUNI 2011

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Astrini Wulandari

NPM : 0706268322

Tanda Tangan :

Tanggal : 13 Juni 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Astrini Wulandari
NPM : 0706268322
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi : Studi Ketahanan Korosi H₂ Pada Baja Karbon Rendah Yang Mengalami Canai Hangat 600°C

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Rini Riastuti, M.Sc ()

Penguji : Dr. Ir. Dedi Priadi, D.E.A ()

Penguji : Dr. Ir. Myrna Ariati Mochtar, M.S ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 27 Juni 2011

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kepada Allah SWT, karena atas berkat dan rahmat-Nya, penulis 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. Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan serta bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan hingga pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

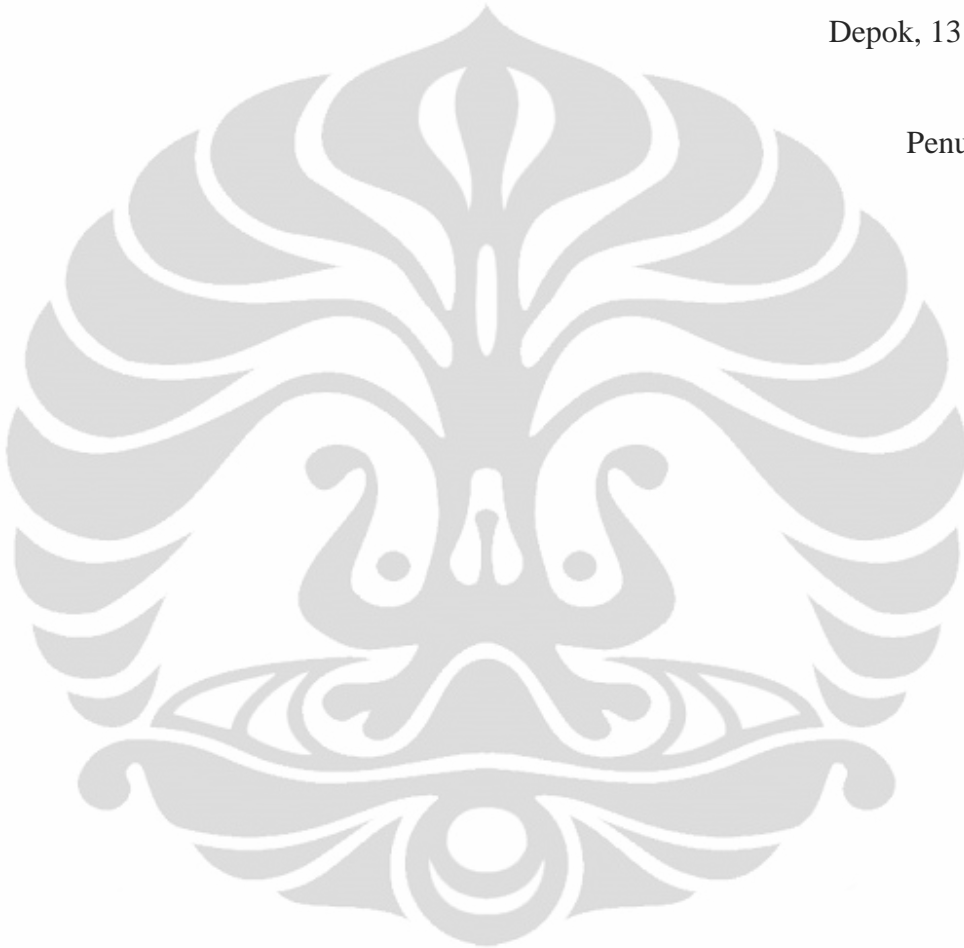
- (1) Ir. Rini Riastuti, M.Sc, selaku pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran untuk mengarahkan penulis dalam penyusunan skripsi ini.
- (2) Seluruh dosen Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI yang telah memberikan pengetahuan dan ilmu yang bermanfaat.
- (3) Seluruh karyawan, staf, serta teknisi Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI. Terimakasih atas bantuannya selama penelitian.
- (4) Kedua orang tua dan Mbak Ira yang senantiasa mencurahkan kasih sayang serta tulus mendoakan penulis, memberikan bantuan baik moril maupun materil.
- (5) Aulia Sutowijoyo yang telah memberikan banyak bantuan selama proses pengerjaan skripsi, serta dukungan moral dan kasih sayangnya yang menjadi salah satu sumber semangat.
- (6) Bastian Megantoro dan Lendi Trigondo, selaku rekan kerja yang luar biasa sabar dan selalu setia membantu penulis dalam kegiatan penelitian di skripsi ini. Terimakasih banyak atas kerjasamanya.
- (7) Andika Amanatillah dan Dito Iandiano, para asisten Laboratorium Korosi yang sangat membantu penulis dalam melakukan pengujian *hydrogen charging*.
- (8) Bapak Budi Darsono dari Sumber Makmur Mandiri, yang telah membantu memfasilitasi peralatan untuk skripsi ini.
- (9) Sahabat dan teman-teman yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.

(10) Semua pihak yang telah membantu penyelesaian skripsi ini yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

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, 13 Juni 2011

Penulis



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

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

Nama : Astrini Wulandari
NPM : 0706268322
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 Korosi H₂ Pada Baja Karbon Rendah Yang Mengalami Canai
Hangat 600°C

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 13 Juni 2011
Yang menyatakan

(Astrini Wulandari)

ABSTRAK

Nama : Astrini Wulandari
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul : Studi Ketahanan Korosi H₂ Pada Baja Karbon Rendah
Yang Mengalami Canai Hangat 600°C

Berbagai penelitian telah dilakukan terhadap proses canai untuk mendapatkan material dengan sifat mekanis yang baik namun nilai ekonomisnya tetap tinggi. Penghalusan ukuran butir ferit melalui kontrol proses termomekanikal merupakan salah satu metode yang digunakan untuk peningkatan sifat mekanik baja karbon rendah. Pada penelitian ini *slab* baja karbon rendah dideformasi dengan metode *warm rolling*, kemudian diuji kekerasan dan ketahanan korosi-nya melalui *hydrogen charging test*. Salah satu penguatan material terhadap serangan difusi hidrogen adalah dengan penghalusan butir ferit melalui proses deformasi. Sehingga dapat dibuat suatu hubungan antara deformasi dengan perubahan struktur mikro *ferritic* dan ketahanan korosi baja karbon rendah.

Ukuran butir yang diperoleh dalam penelitian ini diukur dengan metode garis *intercept*. Hasilnya berupa ukuran diameter butir baja karbon rendah yang lebih kecil dibanding dengan diameter butir baja karbon rendah yang tidak dideformasi. Sementara ketahanan korosi baja karbon rendah terhadap pengaruh proses difusi hidrogen untuk benda uji yang ukuran butirnya lebih kecil cenderung meningkat. Peningkatan kekuatannya diamati melalui pengujian kekerasan setelah sebelumnya benda uji diaplikasi ke dalam larutan 0,5M H₂SO₄ + 100 mg/L Thiourea CS(NH₂)₂ selama 10 menit.

Kata Kunci: *warm rolling*, penghalusan butir, ukuran butir, kekerasan, ketahanan korosi.

ABSTRACT

Name : Astrini Wulandari
Study Program : Metallurgy and Materials Engineering
Title : Study of Hydrogen Induced Cracking Resistance on Warm-Rolled (600°C) Low Carbon Steel

Various studies have been carried out on rolling process to achieve materials with good mechanical properties but its economic value remains high. Grain refinement through thermo-mechanical process control is one of many methods used to improve low carbon steel mechanical properties. On this paper, low carbon steel is deformed with warm rolling method, then the deformed material is applied to hardness test and corrosion resistance test against hydrogen charging. Hydrogen introduction into material may occur in many ways and one of physical properties of material against this introduction is through microstructure refinement of ferrite grain size by deformation process. So there is a connection between the deformation with the change in ferritic microstructure and corrosion resistance of low carbon steel.

The grain size was measured by intercept line method. The result is grain size of the deformed steel is smaller than the undeformed one. In addition, there is an improvement of corrosion resistance of low carbon steel with smaller grain size against hydrogen diffusion. The improvement can be seen from the result of hardness test. Before the hardness test began, the deformed specimen are introduced to 0,5M H₂SO₄ + 100 mg/L Thiourea CS(NH₂)₂ solution for 10 minutes.

Keywords: Warm rolling, grain refinement, grain size, hardness, corrosion resistance.

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
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Penelitian	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Ruang Lingkup.....	3
1.4.1 Material	3
1.4.2 Parameter Penelitian.....	4
1.4.3 Tempat Penelitian.....	4
1.5 Sistematika Penulisan	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Baja Karbon	6
2.1.1 Baja Karbon Rendah	7
2.2 Pengaruh Deformasi Plastis	9
2.2.1 Proses Canai.....	11
2.2.1.1 Proses Canai Panas (<i>Hot Rolling</i>)	12
2.2.1.2 Proses Canai Dingin (<i>Cold Rolling</i>).....	12
2.2.2 <i>Thermo-Mechanical Controlled Process</i>	13
2.2.3 <i>Warm Rolling</i>	14
2.2.3.1 <i>Strain Rate</i>	15

2.3 Pengaruh Ukuran Butir Terhadap Sifat Mekanis Baja.....	16
2.4 Rekoveri dan Rekrystalisasi.....	19
2.4.1 Rekoveri.....	20
2.4.2 Rekrystalisasi.....	20
2.4.2.1 Rekrystalisasi Dinamis.....	21
2.4.2.2 Rekrystalisasi Statis.....	22
2.4.3 <i>Subgrain</i>	22
2.5 Korosi.....	23
2.5.1 Faktor Lingkungan yang Menyebabkan Korosi.....	26
2.5.2 Pengaruh Hidrogen Pada Material.....	26
2.5.2.1 Cacat Dalam.....	27
2.5.3 <i>Hydrogen Embrittlement</i>	29
2.5.3.1 Mekanisme Difusi Atom Hidrogen.....	30
2.5.3.2 HIC pada Baja Karbon Rendah.....	32
2.5.4 Pengaruh <i>Heat Treatment</i> terhadap Korosi.....	33
2.5.5 Pengaruh Deformasi terhadap Korosi.....	33
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....	36
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	36
3.2 Alat dan Bahan.....	37
3.2.1 Alat.....	37
3.2.2 Bahan.....	37
3.3 Prosedur Penelitian.....	38
3.3.1 Pemilihan Material.....	38
3.3.2 Preparasi Benda Uji.....	39
3.3.3 Proses TMCP dan <i>Warm Rolling</i>	40
3.3.4 Preparasi, Pengujian Metalografi dan Pengamatan Mikrostruktur.....	42
3.3.5 Pengukuran Besar Butir <i>Equiaxed</i>	43
3.3.6 Pengukuran Besar Butir <i>Non-Equiaxed</i>	45
3.3.7 Pengujian Kekerasan.....	46
3.3.8 Pengujian <i>Hydrogen Charging Test</i>	47
3.3.7 Pengamatan <i>Scanning Electron Microscope</i>	49

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	51
4.1 Pengukuran Dimensi Benda Uji.....	51
4.2 Ukuran Butir Ferit.....	52
4.2.1 Pengukuran Diameter Butir Ferit.....	52
4.3 Hasil Pengamatan Metalografi.....	54
4.4 Pengujian Kekerasan.....	57
4.5 Pengaruh Ukuran Butir Terhadap Kekuatan.....	60
4.6 Hasil Pengujian <i>Hydrogen Charging Test</i>	61
4.6.1 Pengaruh Ukuran Butir Terhadap Kekerasan Setelah <i>Hydrogen Charging</i>	62
4.6.2 Pengaruh Ukuran Butir Terhadap Kekuatan Setelah <i>Hydrogen Charging</i>	65
4.6.3 Hasil Pengamatan SEM Setelah Pengujian <i>Hydrogen Charging</i>	68
BAB 5 KESIMPULAN.....	71
REFERENSI.....	73

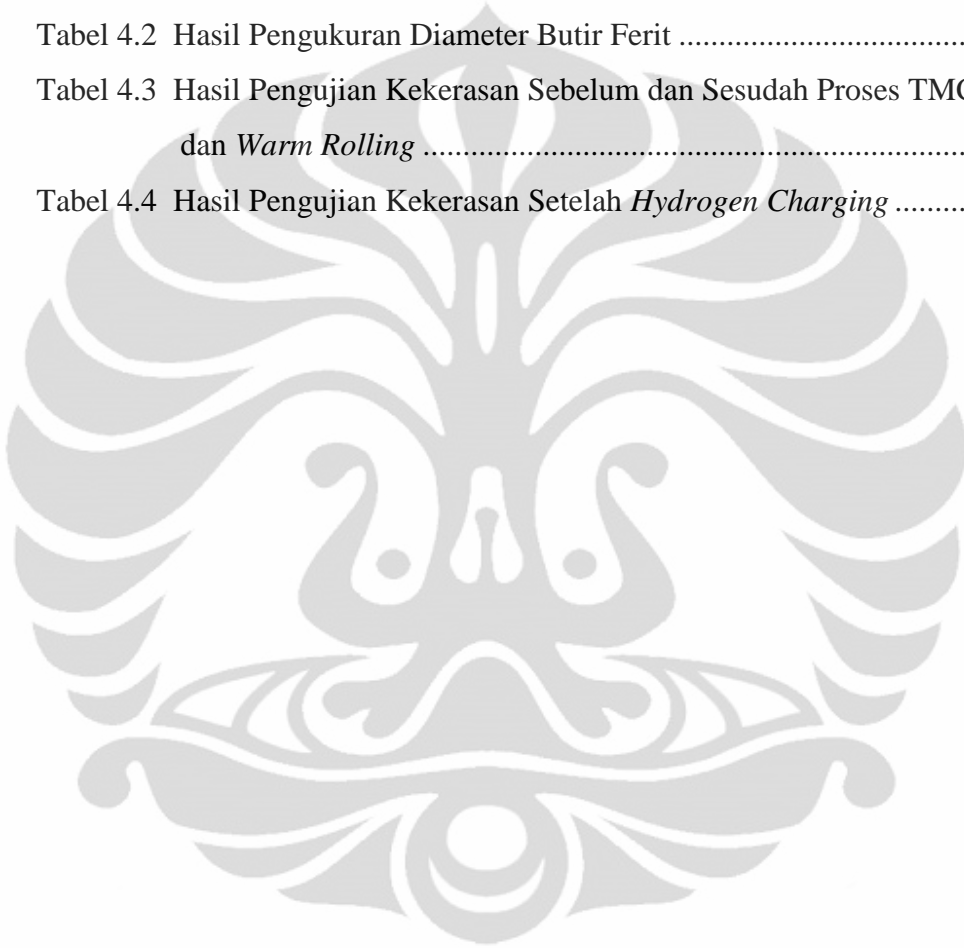
DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Diagram Fe-Fe ₃ C.....	6
Gambar 2.2 Transformasi Fasa Pada Baja Karbon Rendah.....	8
Gambar 2.3 Kombinasi Elongasi dan Kekuatan untuk Berbagai Jenis Baja Karbon Rendah	9
Gambar 2.4 Analogi Pergerakan Dislokasi.....	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 Kurva <i>stress-strain</i> pada pengerolan suhu 750 ⁰ C	16
Gambar 2.9 Ilustrasi batas butir dan pergerakan dislokasi	17
Gambar 2.10 Pengaruh Besar Butir terhadap Nilai Kekuatan	18
Gambar 2.11 Skematik Proses Anil	19
Gambar 2.12 Skematik Perubahan Morfologi Butir yang Terdeformasi.....	21
Gambar 2.13 Diagram kesetimbangan E-pH untuk besi dan baja	25
Gambar 2.14 Skema Mekanisme <i>Hydrogen Blistering</i>	28
Gambar 2.15 Mekanisme <i>Hydrogen Blistering</i>	28
Gambar 2.16 Kasus sel galvanis yang disebabkan deformasi mekanis.....	34
Gambar 2.17 Sel Galvanis Mikro.....	35
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	36
Gambar 3.2 Skematik <i>Optical Emission Spectroscopy</i>	38
Gambar 3.3 Ilustrasi Benda Uji dan Pemasangan Termokopel	39
Gambar 3.4 Ilustrasi Benda Uji Sebelum Dipreparasi.....	40
Gambar 3.5 Skematik Pengujian Benda Uji B	41
Gambar 3.6 Skematik Pengujian Benda Uji C.....	41
Gambar 3.7 <i>Furnace</i> Carbolite	42
Gambar 3.8 Mesin Onoroll dan Rangkaian Alat.....	42
Gambar 3.9 Mikroskop Optik	43
Gambar 3.10 Lingkaran yang Digunakan Untuk Penghitungan Besar Butir Dengan Metode Intercept Heyn.....	44

Gambar 3.11 Metode Garis Intersept	46
Gambar 3.12 Prinsip Pengujian Kekerasan Dengan Metode <i>Rockwell B</i>	47
Gambar 3.13 Benda uji A, B, dan C Yang Digunakan Dalam Pengujian <i>Hydrogen Charging</i>	48
Gambar 3.14 Grafit Yang Digunakan Dalam <i>Hydrogen Charging</i>	48
Gambar 3.15 <i>Rectifier</i> Yang Digunakan Dalam <i>Hydrogen Charging</i>	48
Gambar 3.16 Rangkaian proses <i>Hydrogen Charging</i>	49
Gambar 3.17 Susunan Alat dan Bahan dalam <i>Hydrogen Charging</i>	49
Gambar 3.18 <i>Scanning Electron Microscope</i>	50
Gambar 4.1 Benda Uji Yang Telah Dideformasi.....	51
Gambar 4.2 Grafik Pengaruh Temperatur <i>Reheating</i> dan Deformasi.....	53
Gambar 4.3 Foto Mikrostruktur Sampel A	55
Gambar 4.4 Foto Mikrostruktur Sampel B	55
Gambar 4.5 Foto Mikrostruktur Sampel C	56
Gambar 4.6 Grafik Nilai Kekerasan Benda Uji	58
Gambar 4.7 Grafik Nilai Kekuatan Tarik Benda Uji	60
Gambar 4.8 Grafik Nilai Kekerasan Benda Uji setelah <i>Charging</i>	62
Gambar 4.9 Grafik Nilai Kekuatan Tarik Benda Uji setelah <i>Charging</i>	65
Gambar 4.10 Penampang Melintang dari Benda Uji A (tanpa perlakuan)	68
Gambar 4.11 Penampang Melintang dari Benda Uji B (<i>Reheating</i> 600°C)	68
Gambar 4.12 Penampang Melintang dari Benda Uji C.....	69

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Komposisi Sampel Benda Uji	39
Tabel 3.2	Simbol dan Penandaan pengujian <i>Rockwell B</i>	47
Tabel 4.1	Hasil Pengukuran Dimensi Benda Uji Sebelum dan Sesudah Proses TMCP dan <i>Warm Rolling</i>	52
Tabel 4.2	Hasil Pengukuran Diameter Butir Ferit	53
Tabel 4.3	Hasil Pengujian Kekerasan Sebelum dan Sesudah Proses TMCP dan <i>Warm Rolling</i>	58
Tabel 4.4	Hasil Pengujian Kekerasan Setelah <i>Hydrogen Charging</i>	61

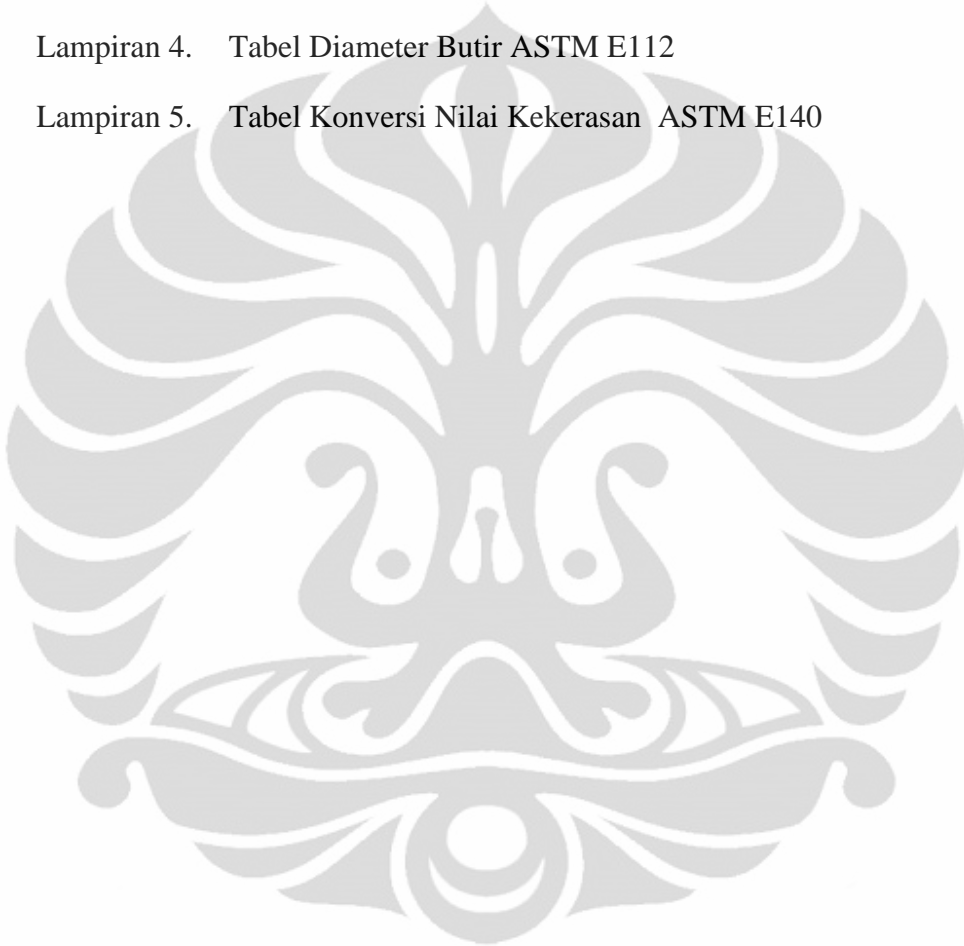


DAFTAR RUMUS

Persamaan 2.1 Zener-Hollomon Equation	15
Persamaan 2.2 Rumus <i>Strain Rate</i>	16
Persamaan 2.3 Hall-Petch <i>Equation</i>	18
Persamaan 2.4 Reaksi Anodik Proses Korosi Logam.....	23
Persamaan 2.5 Reaksi Oksidasi Logam	23
Persamaan 2.6 Reaksi Pelepasan Gas Hidrogen	24
Persamaan 2.7 Reaksi Reduksi Oksigen	24
Persamaan 2.8 Reaksi Reduksi Oksigen	24
Persamaan 2.9 Reaksi Reduksi Ion Logam.....	24
Persamaan 2.10 Reaksi Pengendapan Logam	24
Persamaan 2.11 Reaksi Evolusi Hidrogen	30
Persamaan 2.12 Reaksi Evolusi Hidrogen	30
Persamaan 3.1 Rumus Jumlah Titik Potong Persatuan Panjang	44
Persamaan 3.2 Rumus Panjang Garis Perpotongan	44
Persamaan 3.3 Rumus Ukuran Butir.....	45
Persamaan 3.4 Rumus Metode Garis <i>Intercept</i>	45
Persamaan 4.1 Rumus Derajat Deformasi yang Diberikan Pada Benda Uji....	51
Persamaan 4.2 Rumus Perhitungan Kekuatan (<i>Tensile Strength</i>).....	60

DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1. Hasil Pengujian Komposisi *Slab* Baja Karbon Rendah
- Lampiran 2. Pehitungan Ukuran Butir
- Lampiran 3. Perhitungan Kekerasan
- Lampiran 4. Tabel Diameter Butir ASTM E112
- Lampiran 5. Tabel Konversi Nilai Kekerasan ASTM E140



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Baja merupakan bahan dasar yang utama untuk industri, seperti industri minyak dan gas, dan manufaktur. Kemajuan dalam sektor industri akan mempengaruhi perkembangan material. Berkembangnya teknologi pada dunia industri menyebabkan perubahan yang sangat besar dalam penggunaan atau pemilihan material, khususnya material baja. Aspek ekonomi menjadi salah satu aspek yang menjadi perhatian khusus selain aspek enjiniring tentunya. Penggunaan baja karbon rendah (%wtC < 0,3 %) masih mendominasi dunia industri karena memiliki nilai ekonomis yang tinggi dibanding baja lainnya. Sifat mekanik dari suatu baja dipengaruhi oleh mikrostrukturnya. Ferrite-pearlite merupakan struktur yang sering muncul pada baja karbon rendah. Sifat mekanik dari struktur ferrite-pearlite ini dipengaruhi oleh besar butir ferit. Terdapat beberapa metode yang dapat digunakan untuk memperhalus butir ferit-pearlit, antara lain: modifikasi komposisi kimia, normalisasi, deformasi plastis melalui pengerolan terkendali, pendinginan cepat, dan *Thermomechanical Control Processing* (TMCP).

Proses termomekanikal ini merupakan proses perubahan bentuk material yang melibatkan proses deformasi dengan disertai proses kontrol ataupun rekayasa proses perlakuan panas dan mikrostruktur untuk menghasilkan produk dengan sifat-sifat mekanis yang lebih baik^[1]. TMCP juga berguna untuk meningkatkan kekuatan, ketangguhan, keuletan, serta kemampuan pada baja. Proses TMCP sangat identik dengan proses canai (*rolling*) yakni perubahan geometri dan ukuran dari material. Proses TMCP telah semakin berkembang dengan adanya proses yang menggunakan pengerjaan hangat (*warm working*)^[1]. *Warm Working* atau pengerjaan hangat adalah sebuah metode perlakuan material logam dimana pada proses akhirnya dihasilkan material dengan butir yang lebih halus pada kisaran temperatur kerja 500°C- 800°C^[2]. Proses *Warm working*

memiliki potensi untuk menambah jumlah produksi dan mengurangi biaya produksi dari baja karena pengerjaannya dilakukan pada suhu yang lebih rendah daripada *hot working*, sehingga jumlah energi panas yang dibutuhkan pun akan lebih kecil. Salah satu proses yang termasuk kedalam *warm working* adalah *warm rolling* (canai hangat).

Selain itu, salah satu sifat mekanis dari baja karbon rendah adalah ketahanan terhadap korosinya yang rendah. Baja karbon rendah merupakan salah satu baja yang paling sering digunakan sebagai material pipa dikarenakan kemudahannya untuk di las dan dibentuk, namun dengan semakin rendahnya kadar karbon maka ketahanannya terhadap korosi juga semakin rendah, salah satunya terhadap penggetasan hidrogen. Dalam aplikasinya sebagai pipa yang banyak digunakan sebagai *transport* minyak maupun gas, pipa dengan bahan baja karbon rendah ini sangat mungkin berinteraksi dengan lingkungan yang mengandung H_2S yang merupakan pemicu masuknya hidrogen kedalam logam^[3]. Fenomena penggetasan hidrogen telah menjadi permasalahan yang besar di dunia industri karena adanya kontak material dengan lingkungan hidrogen dapat menurunkan ketangguhan sifat mekanik komponen yang menyebabkan kerusakan dan kegagalan pada komponen sehingga berdampak pada terhambatnya laju produksi maupun peningkatan biaya perawatan^[3].

Salah satu cara pengembangan material baja karbon yang ditujukan untuk meningkatkan ketahanan korosi yaitu penambahan elemen-elemen paduan seperti nikel, kromium, dan molibdenum^[4]. Namun teknik peningkatan ketahanan korosi lain yang relatif lebih murah adalah dengan teknik pengerjaan hangat. Metode ini berhasil diterapkan pada baja Si-Al yang mengalami penghalusan butir melalui proses *warm rolling* dan menghasilkan kekuatan, ketangguhan dan ketahanan korosi yang lebih baik^[5]. Pada penelitian lain ditemukan peningkatan ketahanan korosi serangan hidrogen pada baja karbon rendah melalui pengerjaan dingin dengan deformasi 50% - 80%^[6], sementara pengerjaan hangat pada baja dengan kandungan 1,2% C terjadi sedikit perubahan *tensile strength* saat dipapar dengan hidrogen^[7].

Dengan penghalusan struktur mikro pada baja diharapkan fenomena difusi atom hidrogen pada kisi-kisi butir semakin sulit dan dengan demikian meningkatkan ketahanan baja terhadap ancaman retak akibat adanya difusi hidrogen (*hydrogen induced cracking*)^[4].

1.2 Perumusan Masalah

Konsep dari penelitian ini adalah memperoleh sifat baja karbon rendah yang lebih baik, khususnya ketahanan korosi terhadap lingkungan dengan kandungan hidrogen, melalui metode yang lebih efisien yakni metode *warm rolling* sehingga terjadi penghematan energi karena rentang temperatur yang digunakan lebih rendah dibandingkan dengan metode *hot rolling*^[5].

Masalah yang akan dikaji dalam penelitian ini adalah mempelajari pengaruh deformasi *multi-pass* dengan besar deformasi setiap *pass* sebesar 20% pada temperatur canai 600°C dalam rangkaian proses *warm rolling* terhadap perubahan struktur mikro serta ketahanan korosi akan adanya hidrogen pada baja karbon rendah hasil canai hangat.

1.3 Tujuan Penelitian

- a. Memahami pengaruh proses *warm rolling* pada temperatur 600°C terhadap peningkatan sifat mekanis pada baja karbon rendah.
- b. Studi ketahanan korosi pada baja karbon rendah hasil *warm rolling* pada 600°C yang diikuti pendinginan air terhadap pengaruh adanya gas hidrogen pada lingkungan.
- c. Mengetahui mekanisme difusi atom hidrogen pada baja karbon rendah yang telah mengalami *warm rolling*.

1.4 Ruang Lingkup

Ruang Lingkup dari penelitian ini adalah :

1.4.1 Material

Penelitian menggunakan *slab* yang tergolong baja karbon rendah dengan komposisi terdapat pada Tabel 3.1.

1.4.2 Parameter Penelitian

a. Temperatur Canai

Temperatur canai dilakukan pada 600°C.

b. Besaran Deformasi

Deformasi dilakukan sebesar 20% setiap *pass*.

c. Metode Deformasi

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

d. Media Pendinginan

Media pendingin yang digunakan adalah air.

e. *Delayed Time*

Delayed time ketika proses canai adalah selama 5 menit setiap *pass*.

1.4.3 Tempat Penelitian

Proses penelitian dilakukan di beberapa tempat, yaitu :

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

1.5 Sistematika Penulisan

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

Bab 1 : Pendahuluan

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

Bab 2 : Dasar Teori

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

Bab 3 : Metodologi Penelitian

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

Bab 4 : Hasil dan Pembahasan

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

Bab 5 : Kesimpulan

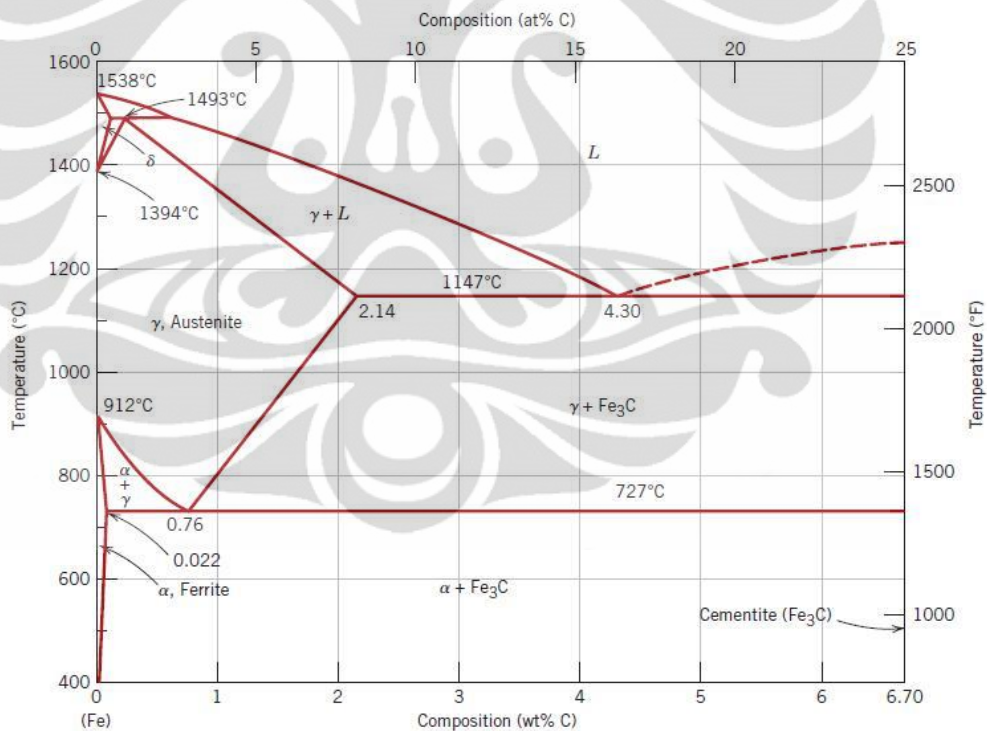
Membahas mengenai kesimpulan akhir berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Baja Karbon

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



Gambar 2.1. Diagram Fasa Fe-Fe₃C^[9].

Karbon (C) berfungsi sebagai unsur pengeras pada logam paduan dengan mencegah dan menghalangi dislokasi bergeser pada kisi kristal (*crystal lattice*). Karbon merupakan suatu elemen yang menstabilkan austenit (*austenite stabilizer*) dan meningkatkan rentang pembentukan austenit pada baja. Kandungan karbon

dan unsur paduan lainnya akan mempengaruhi sifat-sifat baja yang didapatkan. Dengan penambahan kandungan karbon pada baja dapat meningkatkan kekerasan dan kekuatan tariknya, namun baja akan menjadi getas (*brittle*) dan sulit untuk dilas. Penambahan karbon juga menghasilkan beberapa perubahan penting terhadap fasa. Struktur kristal dari ferit yang mempunyai struktur kristal BCC (*Body Centered Cubic*) dan austenit yang mempunyai struktur kristal FCC (*Face Centered Cubic*) dimodifikasi dengan memasukkan atom karbon pada celah atau intertisi antara atom besi. Ketika batas kelarutan untuk karbon pada austenit terlewati maka karbida besi atau sementit akan terbentuk pada baja.

Baja karbon dapat diklasifikasikan menurut kandungan karbonnya menjadi tiga jenis yaitu^[9]:

1. Baja karbon rendah

Baja karbon rendah memiliki kandungan karbon $< 0.25\%C$, relatif lunak, ulet dan tangguh. Selain itu baja ini memiliki mampu mesin dan mampu las yang baik, serta harganya yang murah.

2. Baja karbon medium

Baja karbon medium memiliki kandungan karbon antara $0.25\%C - 0.6\%C$, banyak dipakai dalam kondisi hasil *tempering* sehingga mikrostrukturnya berupa martensit. Baja ini lebih kuat dan lebih keras dari baja karbon rendah.

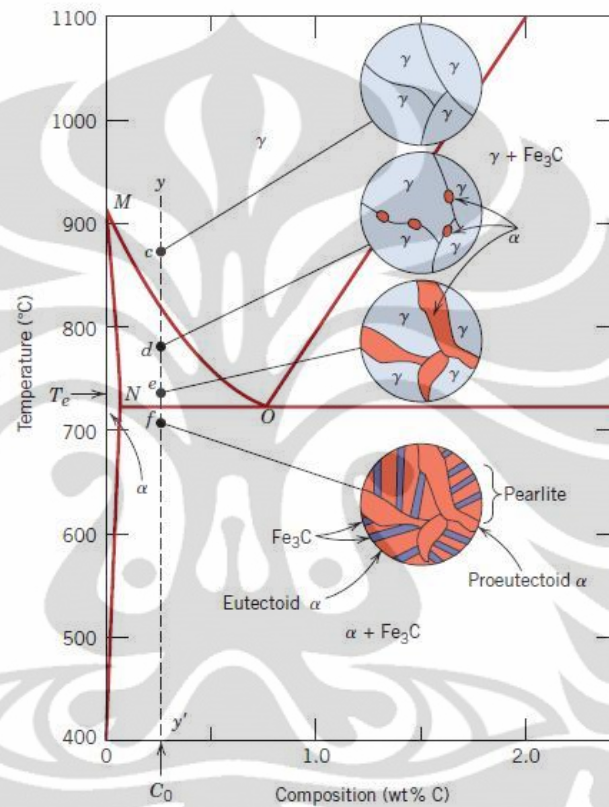
3. Baja karbon tinggi

Baja karbon tinggi memiliki kandungan karbon antara $0.6 < \% C \leq 1.7$. Baja ini memiliki sifat paling keras, paling kuat, paling getas di antara baja karbon lainnya, dan tahan aus.

2.1.1 Baja Karbon Rendah

Baja jenis ini mengandung kadar karbon (% berat) hingga 0.25%. Baja karbon rendah diproduksi biasanya dalam bentuk lembaran atau gulungan baja yang dibuat dengan proses canai dingin (*cold work*) dan *anneal*. Struktur mikro nya terdiri dari fasa ferit dan perlit yang membuat baja karbon rendah ini lunak dan kekuatannya lemah, tetapi memiliki keuletan dan ketangguhan yang sangat baik sehingga sifat mampu mesin dan mampu lasnya menjadi baik. Baja karbon rendah memiliki ketahanan korosi yang rendah, karena dengan semakin

rendahnya kadar karbon maka ketahanan terhadap korosi juga semakin rendah. Baja karbon rendah kurang responsif terhadap perlakuan panas untuk mendapatkan mikrostruktur martensit, sehingga untuk meningkatkan kekuatan dari baja karbon rendah dapat dilakukan dengan proses canai dingin.

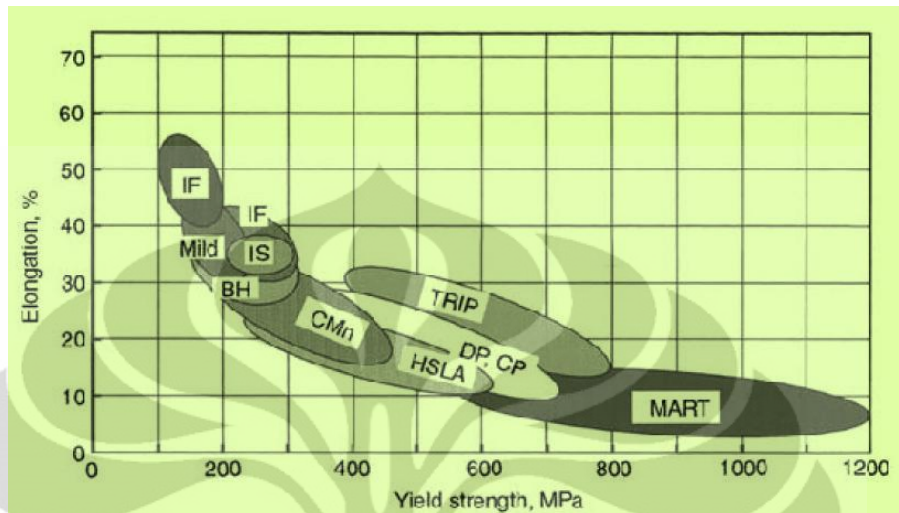


Gambar 2.2. Transformasi Fasa pada Baja Karbon Rendah^[9].

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

Beberapa jenis baja karbon rendah yang telah dikembangkan adalah *hot-rolled low-carbon steels*, *cold-rolled and annealed low-carbon steels*,

interstitialfree atau *ultra-low carbon steels*, *controlledrolled-microalloyed steels* (*highstrength low-alloy steels*), *dual-phase steels*, dan baja TRIP^[9].



Gambar 2.3. Kombinasi Elongasi dan Kekuatan untuk Berbagai Jenis Baja Karbon Rendah^[9].

2.2 Pengaruh Deformasi Plastis

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

Karakteristik pengerjaan dingin :

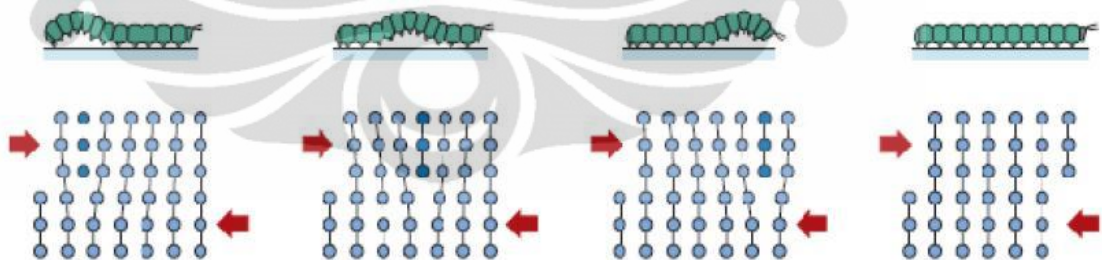
- o Memiliki kekerasan dan kekuatan yang tinggi
- o Memiliki ketangguhan dan keuletan yang rendah
- o Struktur butir yang terdiri dari butir yang berdeformasi meregang
- o Untuk baja karbon rendah, memperlihatkan titik regang yang kontinyu

Karakteristik pengerjaan panas :

- o Secara umum lebih halus dan memiliki kekuatan yang rendah

- o Ketangguhan yang rendah dan keuletan yang tinggi
- o Struktur butirnya terdiri dari butir yang terekristalisasi *equiaxed*
- o Untuk baja karbon rendah, memperlihatkan titik regang yang kontinyu

Deformasi plastis berhubungan dengan pergerakan sejumlah dislokasi^[9]. Berdasarkan proses yang dilakukan, deformasi plastis yang terjadi merupakan hasil dari pergerakan dari salah satu kristal yang disebut dislokasi (ASM 1973). Proses terjadinya deformasi plastis melalui pergerakan dislokasi merupakan mekanisme *slip*. Slip merupakan mekanisme terjadinya deformasi yang paling sering dijumpai. Slip menggambarkan pergerakan yang besar pada bagian kristal yang relatif terhadap yang lain sepanjang bidang kristalografi dan dalam arah kristalografi. Slip terjadi bila sebagian dari kristal tergeser relatif terhadap bagian kristal yang lain sepanjang bidang kristalografi tertentu. Bidang tempat terjadinya slip disebut bidang slip (*slip plane*) dan arah pergeserannya pada umumnya pada bidang slip disebut arah slip (*slip direction*). Slip terjadi pada bidang slip dan arah slip yang paling padat atom, karena untuk menggeser atom pada posisi ini memerlukan energi paling kecil. Pergerakan dislokasi dapat disamakan dengan cara bergerak yang dilakukan oleh ulat bulu seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4.

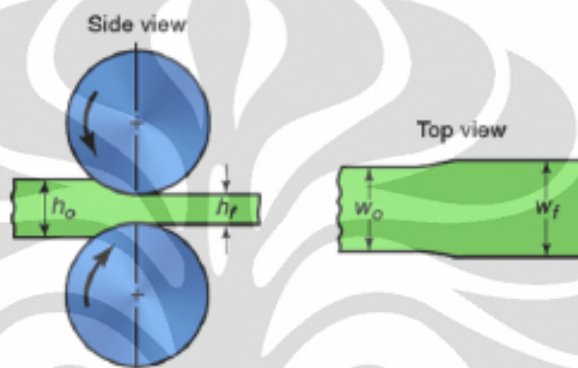


Gambar 2.4. Analogi Pergerakan Dislokasi^[9]

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

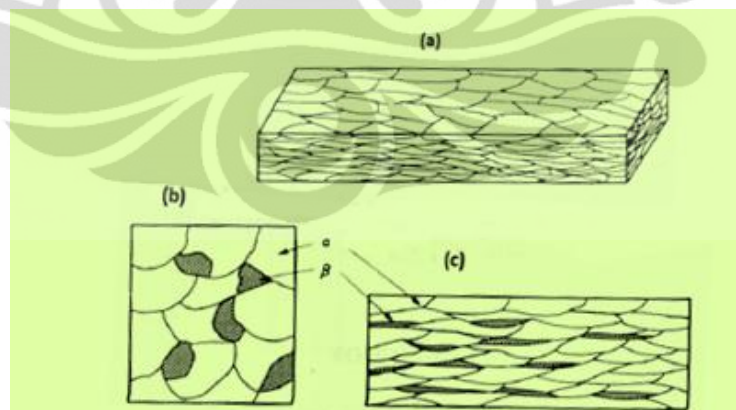
2.2.1 Proses Canai

Proses Canai (*rolling*) didefinisikan sebagai reduksi luas area penampang dari logam atau pembentukan umum dari produk logam menggunakan canai yang berputar (*rotating roll*)^[10]. Selama proses canai terjadi proses perubahan bentuk pada benda uji dimana pada saat proses tersebut adanya gaya tekan (*compressive load*) terjadi pengurangan ketebalan dan penambahan panjang akan tetapi massa tetap konstan tidak mengalami perubahan.



Gambar 2.5. Skematik Proses Canai^[10].

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*)^[11].

Secara umum, berdasarkan temperatur pengerjaan proses canai terbagi dua :

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

2. Canai panas (*hot rolling*) yaitu proses canai yang dilakukan dengan menggunakan temperatur di atas temperatur rekristalisasi dari material.

2.2.1.1 Proses Canai Panas (*Hot Rolling*)

Proses canai panas (*hot rolling*) 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. Umumnya, struktur yang terekristalisasi menjadi lebih banyak dengan temperatur deformasi yang lebih rendah dan laju pendinginan yang lebih cepat serta material dengan sifat superior diperoleh dengan pengontrolan temperatur akhir. Batas atas canai panas (*hot rolling*) ditentukan oleh temperatur dimana peleburan atau oksidasi berlebih terjadi. Secara umum, temperatur kerja maksimum terbatas pada 50°C dibawah temperatur lebur. Hal tersebut memberikan kemungkinan daerah-daerah tersegregasi pada material yang titik leburnya lebih rendah^[12].

Pada proses canai, temperatur akhir proses merupakan hal yang penting karena proses ini harus berakhir pada temperatur tepat diatas temperatur rekristalisasi untuk memperoleh ukuran butir yang kecil dan halus. Jika temperatur akhir jauh diatas temperatur rekristalisasi, pertumbuhan butir akan terjadi. Apabila temperatur akhir dibawah temperatur rekristalisasi, maka akan terjadi pengerasan regangan (*strain hardening*). Pada temperatur diatas temperatur rekristalisasi, material akan menjadi lebih lunak dan lebih ulet dibandingkan pada temperatur ruang, sehingga tidak dibutuhkan tenaga yang besar untuk deformasi. Karena tidak ada pengerasan regangan, maka reduksi ukuran material yang tebal bisa dilakukan. Tetapi keakuratan dari ukuran hasil proses *rolling* kurang baik^[11].

2.2.1.2 Proses Canai Dingin (*Cold Rolling*)

Canai dingin adalah proses canai yang dilakukan dengan menggunakan temperatur tuang atau temperatur dibawah temperatur rekristalisasi material (0.3 Tm). Temperatur kerja canai dingin umumnya temperatur ruang, namun dapat

juga mencapai 100-200°C^[11]. Pada proses canai dingin dihasilkan tegangan sisa (*residual stress*) dari energi dalam (*internal energy*) yang dihasilkan dari meningkatnya jumlah dislokasi yang saling berinteraksi^[12]. Selain itu karena pada deformasi material dalam pengerjaan dingin akan terjadi deformasi tidak homogen. Hal ini terjadi karena adanya perbedaan friksi antara benda kerja dengan alat pembentuk (*forming tools*).

Pada material yang mengalami canai dingin (*cold rolling*) terjadi *strain hardening*. Kerapatan dislokasi (*dislocation density*) meningkat dan ketika pengujian tarik dilakukan pada material yang mengalami *strain hardening*, *stress* yang lebih besar dibutuhkan untuk memulai deformasi plastis sehingga *yield stress* meningkat. Walaupun begitu, keuletan material tersebut (ditunjukkan oleh *total elongation* dan *reduction area*) menurun dikarenakan kerapatan dislokasi awal yang lebih tinggi^[10]. Pada proses canai dingin, dengan persen 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 sedangkan lapisan dalam akan mengalami tegangan tarik.

Untuk meningkatkan sifat material maka perlu dilakukan pengurangan atau penghilangan tegangan sisa yang dihasilkan pada 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 memberikan kesempatan lepasnya tegangan yang tidak seragam. Perlakuan panas dilakukan pada temperatur tertentu pada material, atau sering disebut *stress-relieving treatment* [12].

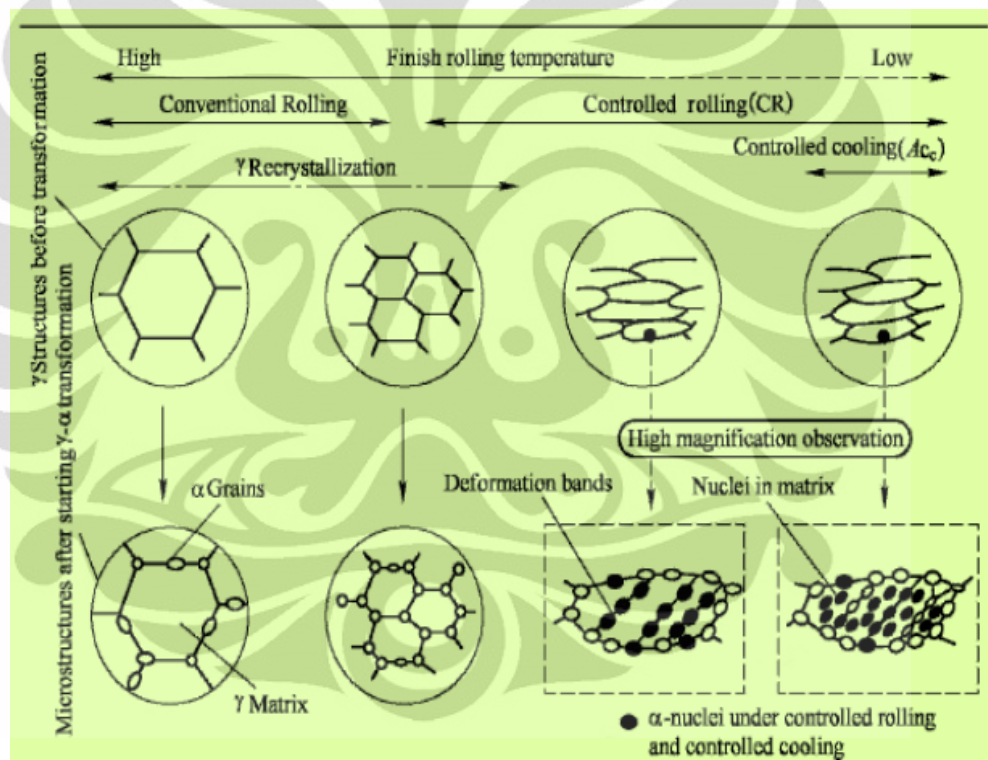
2.2.2 Thermo-Mechanical Controlled Process (TMCP)

Thermomechanical processing merupakan suatu proses untuk mengontrol struktur mikro suatu material selama proses berlangsung agar menghasilkan sifat mekanis yang lebih baik. Peningkatan kekuatan dan ketangguhan dalam TMCP

didapat dari adanya mekanisme penghalusan butir dengan proses deformasi panas yang terkontrol (*controlled rolling*) dan pendinginan yang terkontrol (*controlled cooling*)^[13].

Pada baja TMCP, sifat mekanis (*mechanical properties*) terutama ditentukan melalui kombinasi dari perlakuan mekanis (*mechanical working*), proses *recovery* (*recovery processes*), rekristalisasi (*recrystallisation*), dan pertumbuhan butir (*grain growth*)^[13].

Perbedaan mikrostruktur yang dihasilkan oleh pengerolan konvensional dan proses TMCP dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7. Perbedaan Mikrostruktur Antara Proses Canai Konvensional dan Proses TMCP^[13]

2.2.3. Canai Hangat (*Warm Rolling*)

Proses TMCP telah berkembang dengan adanya proses dengan menggunakan pengerjaan hangat (*warm working*)^[1]. Canai hangat adalah salah satu metode perlakuan terhadap material logam untuk menghasilkan struktur mikro yang halus pada material logam dan paduannya dengan temperatur kerja berada di antara temperatur canai panas (*hot rolling*) dan temperatur canai dingin (*cold rolling*). Kisaran temperatur pengerjaan hangat berada pada 500°C-

800°C^[2], berdasarkan *range* temperatur operasi canai hangat, setelah terjadi deformasi plastis, material sebagian mengalami pengerasan regangan/ *strain hardened* dan sebagian mengalami rekristalisasi^[14].

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

Jika dibandingkan dengan canai panas yang membutuhkan energi panas yang besar dan mahal, proses canai hangat ini dapat menghasilkan material yang mendekati dimensi akhir yang diinginkan^[15]. Selain itu metode ini menghasilkan mikrostruktur yang lebih halus dengan sifat mekanis yang tinggi, kualitas permukaan dan pengendalian dimensional yang lebih baik, material yang dibuang akibat proses dekarburisasi atau oksidasi yang lebih rendah^[15]. Sedangkan jika dibandingkan dengan proses canai dingin, metode canai hangat membutuhkan beban deformasi yang lebih rendah, dapat diaplikasikan pada baja dengan *range* yang luas, memberikan rasio deformasi yang lebih besar, menghasilkan deformasi yang lebih seragam terhadap daerah transversal dan menghasilkan struktur mikro dengan tegangan sisa yang lebih rendah^[16]. Selama canai hangat pada baja, berbagai macam perubahan mikrostruktur dapat terjadi sehingga merubah sifat-sifat mekanik pada baja^[16].

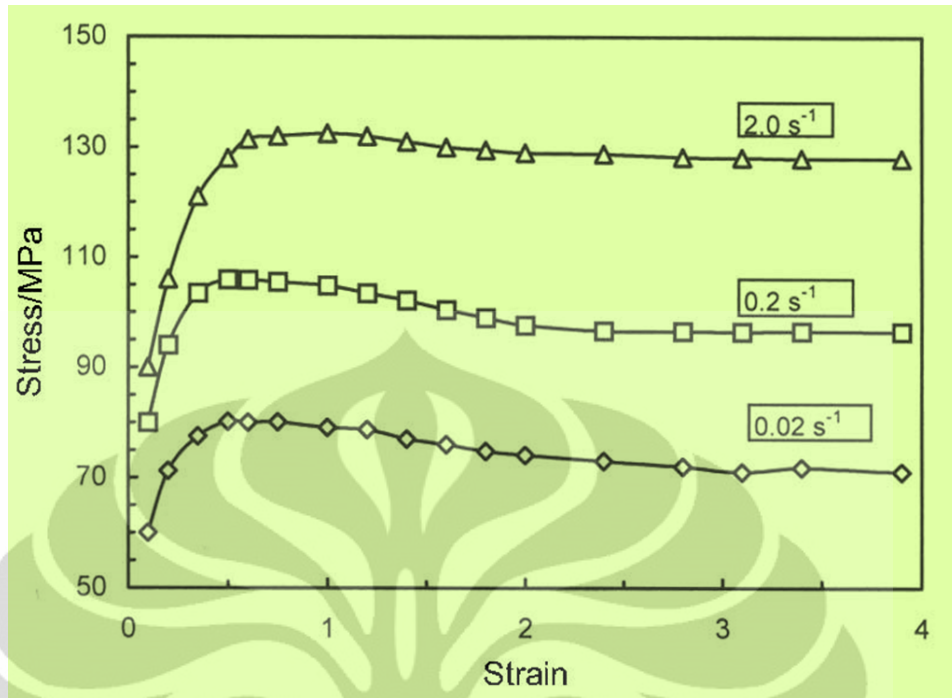
2.2.3.1 Strain Rate

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

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT) \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana :

- $\dot{\epsilon}$: Laju regangan (s^{-1})
- Q : Energi aktivasi deformasi (J/mol)
- R : Konstanta gas (8.31 J.K /mol)
- T : Temperatur Absolut (K)



Gambar 2.8 kurva *stress-strain* dengan berbagai *strain rate* pada pengerolan suhu 750⁰C^[17]

Pada gambar di atas bisa dijelaskan, bahwa semakin tinggi laju regangan pada pengerolan hangat (750⁰C) maka kekuatan dari material yang didapat akan lebih baik.

Berdasarkan pada persamaan:

$$\dot{\epsilon} = F \sqrt{\frac{2}{D\Delta h}} \ln \frac{h_0}{h_f} \dots \dots \dots (2.2)$$

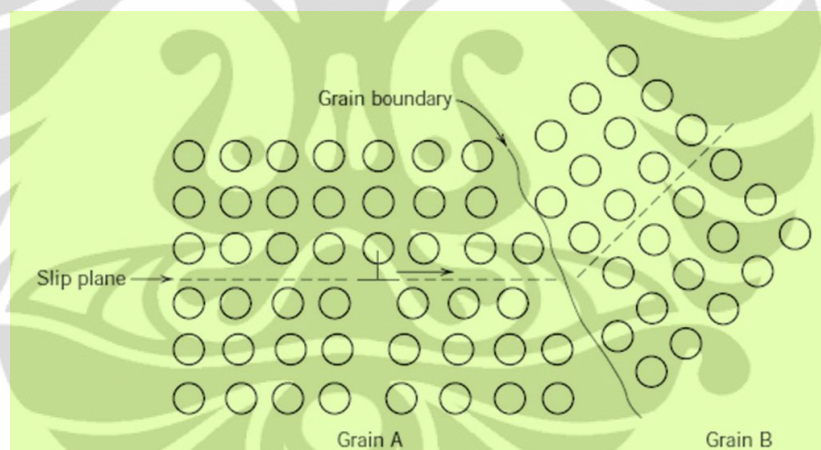
Maka semakin besar deformasi (dengan meningkatnya Δh) maka laju regangan semakin meningkat, yang artinya semakin tinggi deformasi berarti semakin banyak penumpukan dislokasi (semakin meningkatnya *strain hardening*), maka kekerasan akan semakin meningkat.

2.3 Pengaruh Ukuran Butir Terhadap Sifat Mekanis Baja Karbon Rendah

Sifat mekanis dari suatu material sangat dipengaruhi oleh ukuran butir atau diameter butir rata-rata dalam logam polikristal^[9]. 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 didalam butir menuju batas butir pada arah dan orientasi terpadat dalam suatu kisi kristal. Ilustrasi pergerakan dislokasi dapat dilihat pada Gambar 2.9 :



Gambar 2.9. Ilustrasi batas butir dan pergerakan dislokasi^[9].

Batas butir bertindak sebagai penghalang pergerakan dislokasi karena dua alasan^[9] :

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 dibuktikan 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.

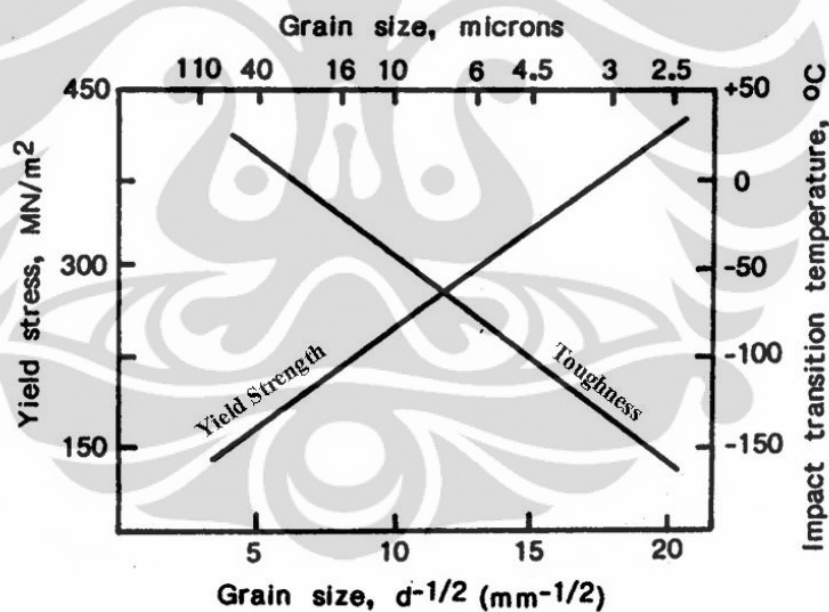
$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2} \quad \dots\dots\dots(2.3)^{[9]}$$

σ_y = Kekuatan luluh akhir (MPa)

σ_0 = Konstanta material untuk kekuatan luluh awal (MPa)

k_y = *Strengthening coefficient* (Mpa $m^{1/2}$)

d = Diameter butir rata-rata (μm)

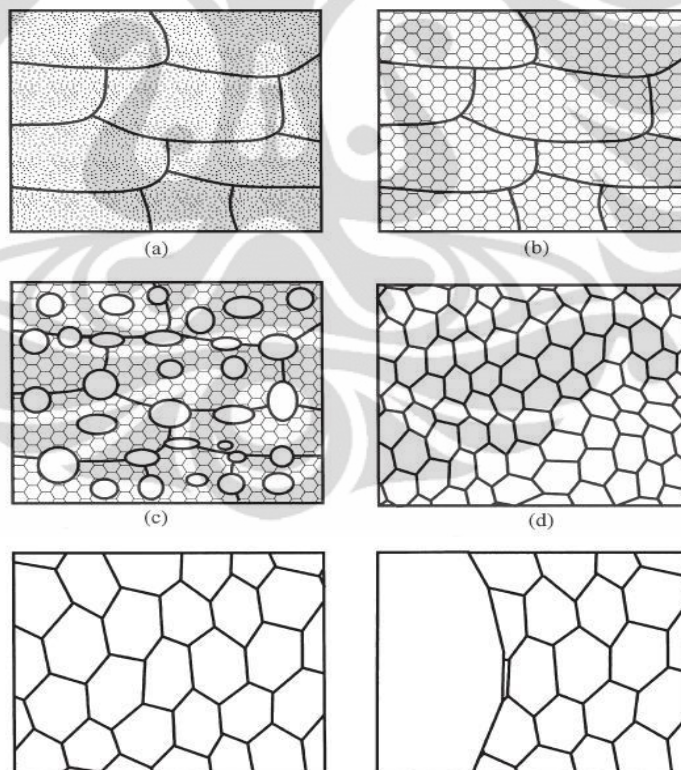


Gambar 2.10. Pengaruh Besar Butir terhadap Nilai Kekuatan^[9].

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

2.4 Recovery dan Rekristalisasi

Material polikristalin yang mengalami deformasi plastis menunjukkan terjadinya perubahan pada bentuk butir, pengerasan regangan (*strain hardening*) dan peningkatan pada kepadatan dislokasi^[9]. Beberapa sisa energi internal disimpan dalam material sebagai energi regangan (*strain energy*), yang mana berhubungan dengan area tegangan (*tensile*), tekan (*compressive*), dan geser (*shear*) disekeliling dislokasi yang baru terbentuk. Kecenderungan sifat penyimpanan energi internal tersebut dapat dihilangkan setelah tahap pengerjaan dingin dengan perlakuan panas seperti proses anil (*annealing*). Penghilangan energi tersebut dilakukan dengan dua proses berbeda yang terjadi pada temperatur yang dinaikkan yang kemudian diidentifikasi sebagai proses *recovery* dan rekristalisasi, yang juga dimungkinkan untuk pertumbuhan butir.



Gambar 2.11. Skematik Proses Anil a) Butir yang Terdeformasi. b) *Recovery* c) Rekristalisasi Sebagian d) Rekristalisasi Penuh e) Pertumbuhan Butir f) *Abnormal Grain Growth*^[18].

2.4.1 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^[18]. 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.

2.4.2 Rekristalisasi

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 rekristalisasi. Rekristalisasi merupakan proses transformasi nukleasi dan pertumbuhan butir. Rekristalisasi dalam proses laku panas merupakan proses aktivasi termal dalam perubahan struktur mikro dengan jalan pembentukan butir baru bebas regang yang terjadi karena adanya penggabungan sub butir. Inti dari butir baru terjadi dari bergabungnya sub-butir dan permukaan untuk nukleasi heterogen adalah cacat 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 rekristalisasi 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.

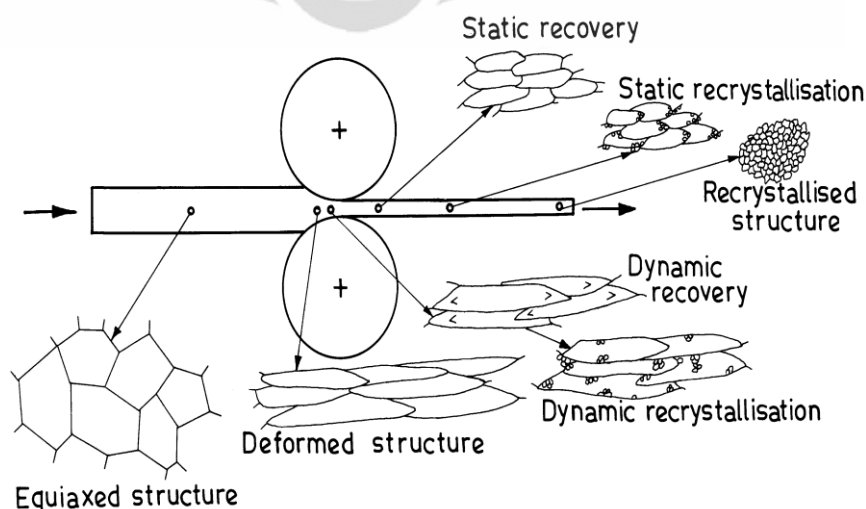
Faktor yang paling penting yang mempengaruhi proses rekristalisasi pada logam dan paduannya adalah ; (1) besaran deformasi awal / *amount of prior deformation*, (2) temperatur, (3) waktu, (4) besar butir awalan / *initial grain size*, dan (5) komposisi logam atau paduan^[18].

Proses rekristalisasi memungkinkan untuk mengontrol ukuran besar butir dan sifat mekanis dari material. Ukuran besar butir dari material yang terekristalisasi akan tergantung pada besarnya pengerjaan dingin, temperatur *annealing*, waktu tahan dan komposisi dari material. Ini didasarkan pada hukum rekristalisasi^[12].

Rekristalisasi secara kinetiknya dapat dibagi menjadi dua yaitu rekristalisasi dinamik dan statik.

2.4.2.1 Rekristalisasi Dinamis

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



Gambar 2.12. Skematik Perubahan Morfologi Butir yang Terdeformasi^[19].

Pada rekristalisasi dinamis, saat material mengalami deformasi, terjadi regangan di dalam material, dan apabila regangan tersebut adalah regangan kritis (ϵ_0) maka akan tersedia cukup energi untuk terbentuk nuklei pada batas butir yang terdeformasi. Proses ini dipengaruhi faktor – faktor antara lain regangan, kecepatan regangan dan temperatur, seperti yang telah diteliti oleh Zener-Hollomon.

2.4.2.2 Rekristalisasi Statis

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

2.4.3 *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.

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 mikrostruktural ini akan melepas sebagian besar tegangan dalam dan tahapan *recovery* ini dipergunakan untuk proses *stress-relieving*.

Hilangnya beberapa dislokasi mengakibatkan berkurangnya kekuatan dari material, tetapi hilangnya dislokasi ini diimbangi dengan pembentukan 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.

Proses *recovery* yang disertai dengan pembentukan *subgrain* ini juga dikenal dengan poligonisasi^[19]. Proses utama yang terjadi saat poligonisasi adalah distribusi ulang dislokasi yang disertai dengan terbentuknya dinding dislokasi (*dislocation walls*). Dinding dislokasi ini memisahkan batas *subgrain* yang satu dan yang lainnya.

2.5 Korosi

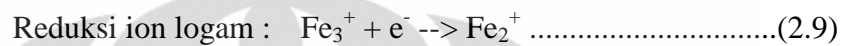
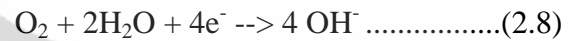
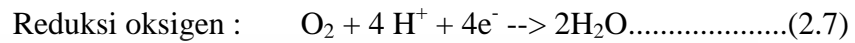
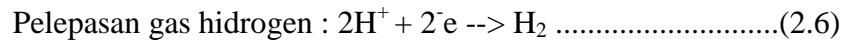
Korosi atau secara awam lebih dikenal dengan istilah pengkaratan merupakan fenomena kimia pada bahan-bahan logam di berbagai macam kondisi lingkungan. Penyelidikan tentang sistim elektrokimia telah banyak membantu menjelaskan mengenai korosi ini, yaitu reaksi kimia antara logam dengan zat-zat yang ada di sekitarnya atau dengan partikel-partikel lain yang ada di dalam matrik logam itu sendiri dan mengakibatkan degradasi dari sifat-sifat logam tersebut. Korosi terjadi secara alami, dimana suatu logam hasil proses ekstraksi akan kembali pada bentuk yang lebih stabil, yaitu dalam bentuk oksidanya. Kebanyakan proses korosi merupakan elektrokimia yang larutan berfungsi sebagai elektrolit sedangkan anoda dan katoda terbentuk karena adanya inhomogenitas pada permukaan logam atau antara 2 material logam yang saling berhubungan. Reaksi elektrokimia melibatkan perpindahan elektron-elektron. Perpindahan elektron merupakan hasil reaksi redoks (reduksi-oksidasi). Mekanisme korosi melalui reaksi elektrokimia melibatkan reaksi anodik di daerah anodik. Reaksi anodik (oksidasi) diindikasikan melalui peningkatan valensi atau produk elektron-elektron^[20]. Reaksi anodik yang terjadi pada proses korosi logam yaitu :



Proses korosi dari logam M adalah proses oksidasi logam menjadi satu ion (n^+) dalam pelepasan n elektron. Harga dari n bergantung dari sifat logam sebagai contoh besi :

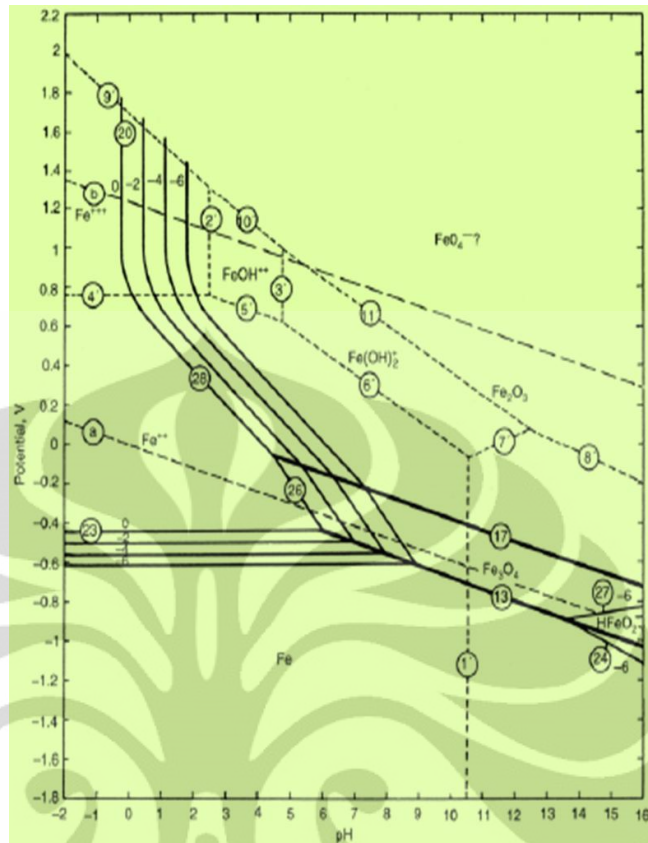


Reaksi katodik juga berlangsung di proses korosi. Reaksi katodik diindikasikan melalui penurunan nilai valensi atau konsumsi elektron-elektron yang dihasilkan dari reaksi anodik. Reaksi katodik terletak di daerah katoda. Beberapa jenis reaksi katodik yang terjadi selama proses korosi logam yaitu :



Dalam suatu sistem korosi, termodinamika dapat dipakai untuk mengetahui apakah logam dapat bereaksi secara spontan dengan lingkungannya^[21]. Dan apabila logam tersebut bereaksi, maka dapat diketahui bagaimana reaksi yang terjadi, kemana arah reaksi tersebut serta berapa besar gaya dorongnya. Korosi yang terjadi pada logam ataupun paduannya hampir seluruhnya merupakan reaksi elektrokimia yang berlangsung pada permukaan logam.

Salah satu dari reaksi yang terjadi menghasilkan perubahan dari suatu logam ataupun salah satu unsur yang ada dari keadaan *metallic* menjadi ke keadaan *non metallic*. Diagram yang dapat menunjukkan suatu reaksi korosi dapat terjadi secara termodinamika adalah diagram kesetimbangan E-pH atau biasa dikenal dengan *pourbaix diagram*. Diagram ini disusun berdasarkan kesetimbangan termodinamika antara logam dengan air dan dapat menunjukkan kestabilan dari beberapa fasa secara termodinamika. Diagram ini sangat berguna untuk memprediksi suatu reaksi korosi secara termodinamika tetapi tidak dapat menyajikan informasi untuk laju korosi^[21].



Gambar 2.13. Diagram kesetimbangan E-pH untuk besi dan baja^[21]

Mekanisme korosi dalam elektrokimia dapat ditinjau dari potensial standar (reduksi), dimana suatu logam memiliki potensial reduksi lebih rendah dibandingkan potensial reduksi sistem maka logam tersebut memiliki kecenderungan spontan untuk beroksidasi^[21]. Kinetika korosi adalah suatu hal yang berhubungan langsung dengan laju korosi, yaitu kecepatan proses korosi dari suatu material. Dalam mempelajari hal ini perlu dipahami mengenai pengertian yang berhubungan dengan kinetika korosi seperti anoda, katoda, polarisasi dan *overpotensial*.

Anoda merupakan tempat terjadinya oksidasi dan katoda merupakan tempat terjadinya reduksi. Bila elektroda dihubungkan maka akan terjadi proses oksidasi dan reduksi pada permukaan elektroda sehingga potensial elektroda tidak berada pada potensial kesetimbangannya^[21]. Penyimpangan potensial ini disebut dengan polarisasi.

2.5.1 Faktor Lingkungan yang Menyebabkan Korosi

Kecepatan dan mekanisme korosi sangat dipengaruhi oleh lingkungan. Fluida yang mengandung air sangat berpengaruh terhadap proses korosi. Konduktivitas elektrolit air akan meningkat jika garam anorganik yang terlarut meningkat. Air merupakan pelarut yang baik bagi senyawa yang dapat menyebabkan korosi, seperti CO_2 , H_2S dan Cl^- ^[20]. Fluida bergerak yang memiliki kandungan air cukup besar akan memiliki konduktivitas elektrolit yang tinggi. Semakin banyak kandungan air dalam fluida maka kecepatan korosi akan semakin besar. Selanjutnya lingkungan yang mempengaruhi korosi adalah gas-gas yang ada dalam lingkungan tersebut.

Korosi karena gas H_2S juga umum terjadi dalam dunia industri minyak dan gas. Gas H_2S dapat meningkatkan kecenderungan terjadi korosi karena dapat menurunkan pH larutan, oleh karena itu kehadiran gas H_2S dapat diidentifikasi dengan menurunnya pH larutan/sistem^[21]. Selain itu faktor lingkungan lainnya adalah pH seperti yang sudah dijelaskan dalam diagram pourbaix diatas.

2.5.2 Pengaruh Hidrogen Pada Material

Kehadiran hidrogen mengakibatkan beragam efek negatif pada logam. Induksi hidrogen pada logam yang terekspos ke lingkungan kaya hidrogen mengakibatkan degradasi pada logam dan menurunkan performa mekanikalnya. Kerusakan yang ditimbulkan dapat meliputi penurunan ketangguhan, keuletan, kekuatan tarik dan terutama sifat mekanik logam. Kerusakan dan levelnya tergantung pada beberapa faktor yang meliputi^[22] :

- a. Sumber hidrogen, eksternal (misalnya gas) ataupun internal (hidrogen terlarut)
- b. Waktu paparan
- c. Tekanan dan temperatur
- d. Adanya pelarut atau larutan yang dapat bereaksi dengan logam (misalnya larutan asam)
- e. Bentuk logam atau paduan itu sendiri dan metode produksinya
- f. Perlakuan akhir permukaan logam

- g. Metode perlakuan panas
- h. Level tegangan sisa dan tegangan yang diaplikasi

Secara umum model kerusakannya meliputi :

- a. Penggetasan Hidrogen (*Hydrogen Embrittlement*)
- b. Penyerangan Hidrogen (*Hydrogen Attack*)
- c. *Sulfide Stress Cracking* (SCC)
- d. Pelepuhan Hidrogen (*Hydrogen Blistering*)

Akibat dari masuknya hidrogen pada permukaan logam, maka akan terjadi berbagai kerusakan yang meliputi pengurangan ketangguhan, keuletan, kekuatan tarik dan terutama sifat mekanik logam.

Kerusakan ini biasanya disebabkan oleh beberapa faktor yang meliputi^[23] :

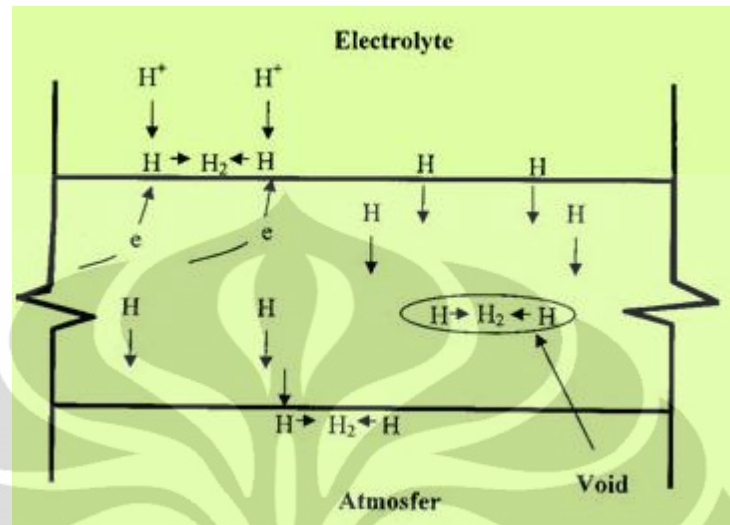
- a. Bentuk dari hidrogen yang dapat menimbulkan kerusakan pada logam seperti atom hidrogen, gas hidrogen (H_2), dan jenis gas lainnya.
- b. Sumber hidrogen yang berasal dari proses elektrokimia (proteksi katodik ataupun elektroplating), gas hidrogen pada atmosfer, H_2S dan jenis-jenis zat kimia lainnya.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

2.5.2.1 Cacat Dalam (*Creation of Internal Defect*)^[23]

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

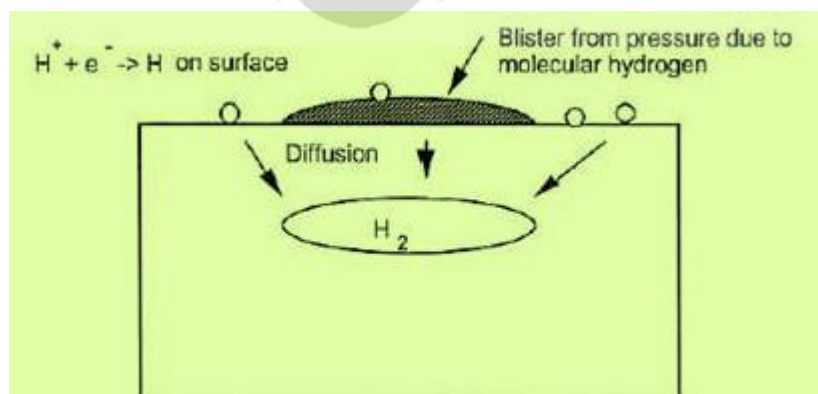
- a. *Blistering*, merupakan formasi atau gabungan molekul hidrogen pada bagian cacat dalam logam seperti batas butir ataupun inklusi yang menyebabkan kerusakan akibat tekanan tinggi yang terbentuk dari kombinasi hidrogen didalam

logam. Mekanisme *hydrogen blistering* dapat digambarkan secara skematik pada gambar berikut ini :



Gambar 2.14. Skema Mekanisme *Hydrogen Blistering*^[20]

Pada skema diatas dapat dilihat suatu penampang yang terekspos larutan elektrolit pada bagian dalamnya dan pada bagian luar terekspos atmosfer. Masuknya hidrogen dari bagian dalam sebagai hasil dari proses proteksi katodik ataupun korosi menyebabkan ketersediaan hidrogen di permukaan logam. Difusi atom hidrogen ke dalam permukaan logam dan berekombinasi kembali membentuk molekul hidrogen menuju suatu *void* yang dapat menghasilkan tekanan yang sangat besar. Tekanan yang dihasilkan bisa mencapai ribuan atmosfer dan dapat menyebabkan kegagalan material.



Gambar 2.15. Mekanisme *Hydrogen Blistering*^[22]

b. *Hydrogen Attack*

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

c. Porositas

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

2.5.3 *Hydrogen Embrittlement*

Penggetasan hidrogen merupakan bentuk penurunan kualitas yang dapat dikaitkan dengan korosi. Reaksinya mencakup masuknya hidrogen ke dalam komponen, tahapan yang dapat menyebabkan penurunan keuletan dan kapasitas menahan beban yang kemudian mengakibatkan retakan dan kegagalan getas yang fatal pada aplikasi tegangan dibawah tegangan luluh material^[4]. Penggetasan hidrogen terjadi dengan beberapa cara namun yang paling umum adalah melalui aplikasi tegangan tarik dan kelarutan hidrogen di dalam material.

Hydrogen Induced Cracking (HIC) merupakan salah satu bentuk *hydrogen embrittlement* yang terjadi akibat adanya hidrogen yang berdifusi. Bentuk perpatahan dari HIC dapat transgranular dan intergranular dan biasanya memiliki ujung perpatahan yang tajam dengan sedikit percabangan dan memiliki morfologi patah *cleavage* pada permukaannya^[21].

a. *Loss in Tensile Ductility and Other Mechanical Properties*^[24]

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.

b. Hydrogen Stress Cracking^[24]

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

c. Hydrogen Environmental Embrittlement^[24]

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

- a. Pada katoda akan terjadi reaksi evolusi hidrogen :



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

2.5.3.1 Mekanisme Difusi Atom Hidrogen kedalam Logam

Penggetasan hidrogen disebabkan 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^[3] :

a. Model Tekanan

Model ini berhubungan dengan difusi atom hidrogen kedalam logam dan terakumulasi pada cacat atau *void* didalam material. Akibat akumulasi atom hidrogen pada suatu cacat ataupun *void* maka atom hidrogen ini akan kembali membentuk molekul hidrogen yang menghasilkan tekanan yang besar. Tekanan yang dihasilkan dapat meningkatkan tegangan kerja dan juga menurunkan tegangan patahnya. Selain itu tekanan yang dihasilkan sebagai akibat rekombinasi atom hidrogen menjadi molekul dapat menginisiasikan terjadinya *crack* atau retakan. Model ini sesuai dengan pembentukan *blistering*^[23].

b. Model Dekohesi

Model ini didasarkan pada pendapat Troiano dan Oriani^[22]. Atom 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.

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

c. Model Plastis^[23]

Mekanismenya didasarkan pada observasi hidrogen didalam larutan padat akan meningkatkan mobilitas dari dislokasi dan akan menginisiasikan terjadinya deformasi yang tinggi pada daerah tertentu. Peningkatan mobilitas dislokasi ini disebabkan karena adanya penurunan interaksi antara dislokasi dengan dislokasi, dislokasi dengan penghalang seperti batas butir, atom karbon dan lain-lain.

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

Kerusakan akibat hidrogen dapat dicegah melalui modifikasi terhadap lingkungan dan pemilihan material yang sesuai yang lebih tahan terhadap *embrittlement*^[20]. Pengurangan kadar sulfida mencapai dibawah 50 ppm mempunyai pengaruh signifikan dan meningkatkan ketahanan pada sebagian besar baja karbon dan *low alloy steel*. HIC yang dipengaruhi sulfida dapat dikurangi dengan mengatur kadar pH menjadi diatas 8. Selain itu pengurangan kelembaban dari aliran gas H₂S dapat mengurangi proses penggetasan. Penggunaan inhibitor juga dapat mengurangi generasi hidrogen pada permukaan logam dan dapat menghambat mitigasi kerusakan akibat hidrogen^[21].

2.5.3.2 Hydrogen Induced Cracking pada Baja Karbon Rendah

Baja karbon rendah memiliki ketahanan korosi yang rendah, termasuk ketahanan korosi terhadap adanya hidrogen. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Samerjit^[25], atom hidrogen lebih dominan berdifusi pada lokasi yang tingkat energi bebas nya rendah seperti inklusi (dimana *interface* antara matriks dan cacat berikatan secara lemah), kemudian membentuk gas hidrogen yang menghasilkan tekanan dan menginisiasi *microcracks* pada permukaan serta bagian dalam spesimen. Inisiasi *microcracks* paling banyak ditemukan pada pearlite/ferrite *interface*.

Samerjit^[25] juga menyatakan bahwa waktu jenuh serta besar konsentrasi hidrogen pada baja bergantung kepada prosedur *hydrogen charging* dan material itu sendiri. Dengan densitas arus, lamanya proses *charging*, serta konsentrasi

larutan yang lebih besar, akan semakin besar pula konsentrasi hidrogen yang terdifusi. Inisiasi serta propagasi *microcracks* pada penelitian Samerjit ditentukan berdasarkan mekanisme penggetasan hidrogen, yakni teori dekohesi dan tekanan hidrogen. Selain itu, hidrogen memiliki pengaruh yang signifikan terhadap *ductility* baja. *Ductility* dari baja akan menurun karena adanya hidrogen^[25]. Dengan ataupun tanpa adanya tegangan eksternal, hidrogen dapat menginduksikan terjadinya *crack* ataupun *microcrack* kemudian berlanjut kepada perambatan *crack* yang cepat. *Microcracks* hidrogen juga dapat menurunkan nilai modulus elastis baja^[25].

2.5.4 Pengaruh *Heat Treatment* terhadap Korosi

Banyak sifat mekanis material yang dapat ditingkatkan dengan berbagai macam perlakuan panas. Tetapi, beberapa sifat seperti kekerasan dan kekuatan sering dicapai dengan ‘mengorbankan’ ketahanan korosinya. Sebagai contoh, kekerasan dan kekuatan baja martensitik berbanding terbalik dengan ketahanan korosinya yang lebih rendah dibandingkan dengan baja feritik ataupun austenitik^[21].

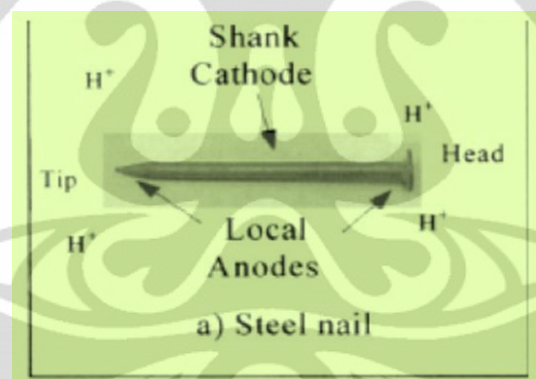
Pada proses seperti pengerjaan dingin, dimana material secara plastis berubah menjadi bentuk yang diinginkan, akan mengarah kepada pembentukan butir yang memanjang dan cenderung pipih, yang berakibat terhadap penurunan ketahanan korosinya. Pengerjaan dingin juga dapat menghasilkan tegangan sisa yang dapat membuat material rentan terhadap *stress corrosion cracking*^[21]. Dalam hal ini, untuk meningkatkan ketahanan korosi dapat dicapai dengan melakukan *annealing* pada temperatur dimana rekristalisasi butir terjadi. *Anneal* sebagian dapat menyebabkan terjadinya *stress relief* tanpa efek besar pada keseluruhan kekuatan material.

2.5.5 Pengaruh Deformasi terhadap Korosi

Perlakuan canai panas merupakan salah satu cara untuk memodifikasi sifat suatu material. Perlakuan ini selain dapat memodifikasi material secara bentuk

fisik juga dapat mengubah dalam hal struktur mikro. Terkait dengan adanya perubahan morfologi struktur mikro, tentunya juga akan mempengaruhi beberapa sifat dasar dari material tersebut, salah satunya adalah perubahan terhadap ketahanan korosi. Perubahan struktur mikro ini mengakibatkan terjadinya perubahan kerapatan dislokasi dan perubahan distorsi dalam atom. Pemberian deformasi ini akan meningkatkan besar tegangan yang dimiliki karena semakin rapatnya dislokasi yang merupakan cacat kristal^[21].

Sebagaimana diketahui bahwa dengan terjadinya peningkatan tegangan, akan berakibat pada sifat korosinya, dimana daerah pada suatu material yang memiliki tegangan yang lebih tinggi akan cenderung bersifat lebih anodik, sedangkan bagian yang lebih rendah tegangannya akan bersifat katodik. Dikarenakan adanya perbedaan ini, korosi yang cenderung terjadi adalah korosi galvanis^[4].



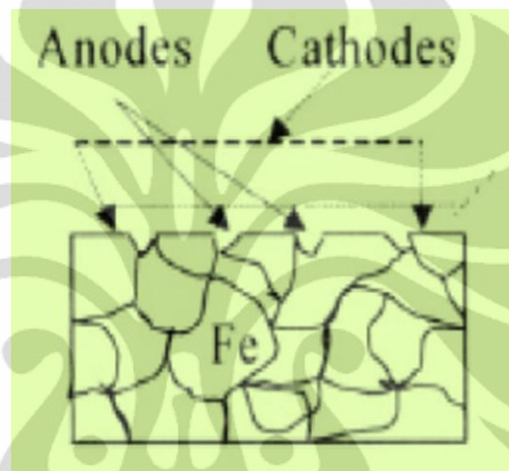
Gambar 2.16. Contoh kasus sel galvanis yang disebabkan deformasi mekanis^[22]

Bagian ujung paku bertindak sebagai anoda dimana reaksi oksidasi terjadi. Daerah ini menjadi anodik dikarenakan memiliki nilai tegangan yang lebih tinggi. Kasus ini merupakan contoh dari material yang mengalami pengerasan regangan yang menyebabkan material ini rentan terhadap korosi galvanik.

Dalam struktur suatu material korosi galvanis juga dapat terjadi antara butir dan batas butir. Perbedaan antara daerah butir dan batas butir terjadi karena adanya perbedaan energi bebas pada kedua daerah tersebut. Energi bebas pada batas butir memiliki nilai yang lebih tinggi ketimbang yang ada pada butir, sehingga apabila batas butir meningkat akibat perlakuan deformasi, semakin tinggi pula energi bebas dan potensial akan menjadi negatif, sehingga laju korosi

material tersebut akan meningkat^[21].

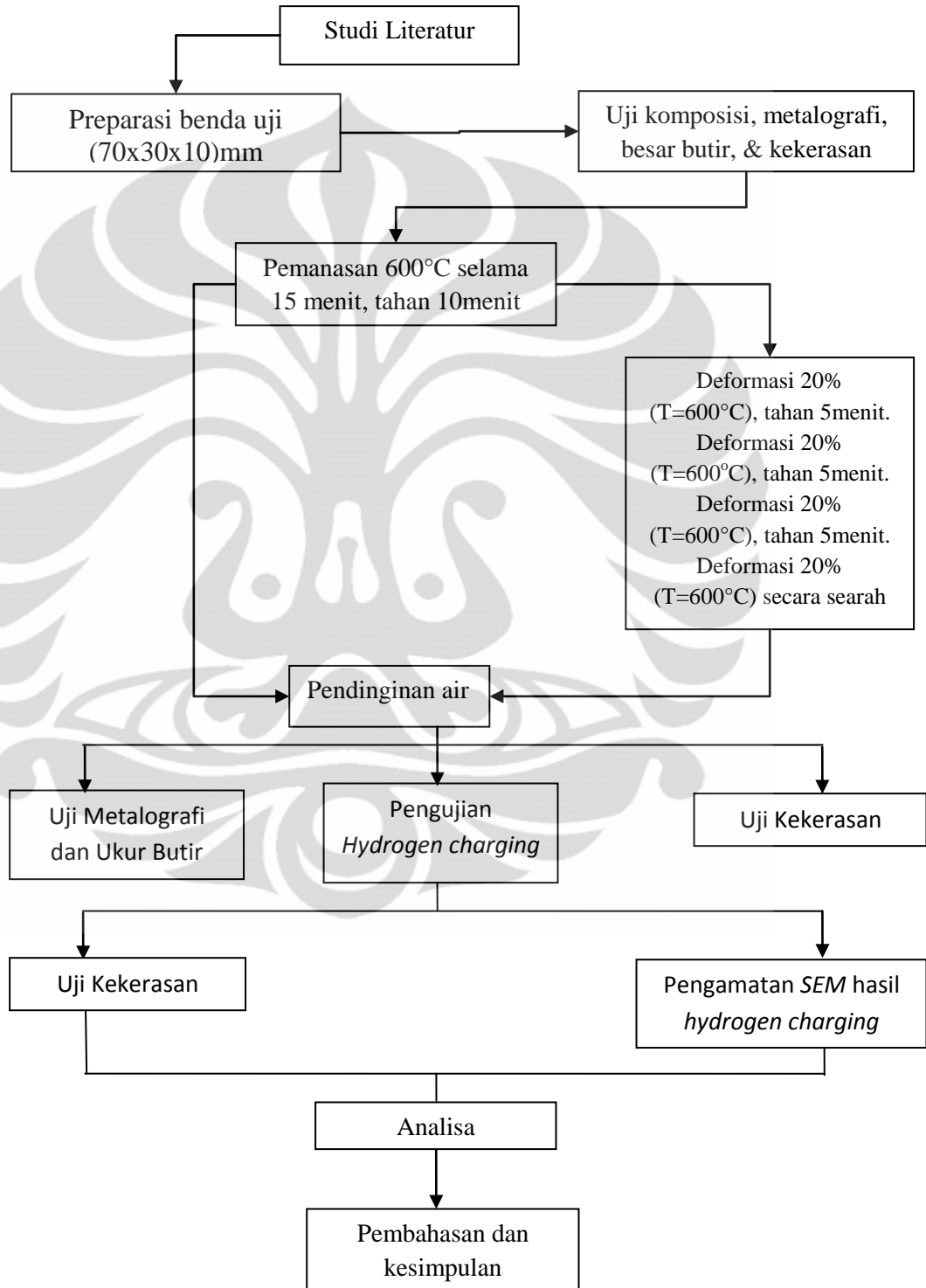
Korosi galvanis dapat terjadi pada paduan polikristalin, contohnya baja perlitik. Perbedaan struktur mikro dapat menyebabkan sel galvanis mikro. Pada fasa perlit misalnya, sel galvanis dapat terjadi antara ferit dan cementit karena masing- masing fasa memiliki energi bebas dan potensial yang berbeda^[4]. Perbedaan inilah yang menyebabkan terbentuknya anoda dan katoda yang dapat mengakibatkan korosi. Gambar 2.17 menunjukkan fenomena korosi galvanis di dalam struktur mikro.



Gambar 2.17. Sel Galvanis Mikro^[22]

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat

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

3.2.2 Bahan

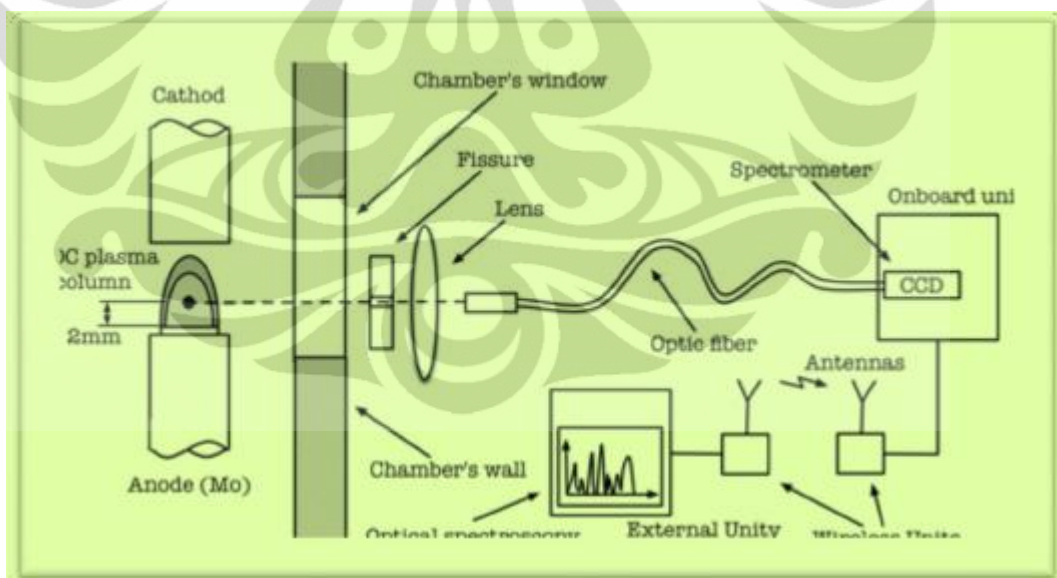
1. *Slab* (Baja Karbon Rendah)
2. Resin dan *hardener*
3. Kertas Ampelas Grid #80, #120, #240, #400, #600, #800, #1000, #1200, dan #1500
4. Titanium Dioksida (TiO_2)
5. Kain Beludru
6. Zat Etsa Kimia : Larutan Alkohol 96% dan larutan HNO_3
7. Larutan H_2SO_4
8. Thiourea $\text{CS}[\text{NH}_2]_2$

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 *slab* yang merupakan baja karbon rendah. Pada tahap awal dilakukan uji komposisi material dengan menggunakan *Optical Emission Spectroscopy* (OES).

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



Gambar 3.2 Skematik *Optical Emission Spectroscopy*^[3]

Komposisi dari benda uji terdapat pada Tabel 3.1, yaitu:

Tabel 3.1 Komposisi Kimia Spesimen Uji

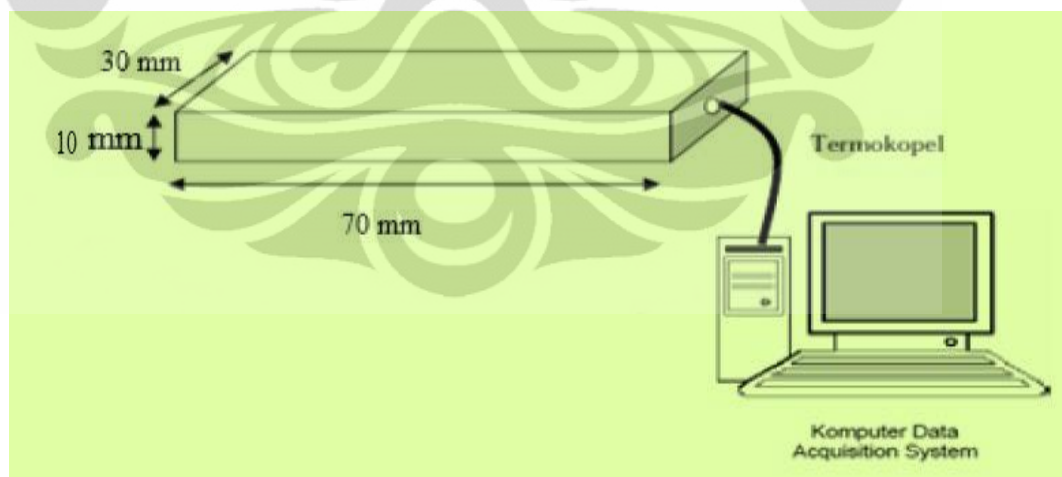
Komposisi	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Zr
% Berat	99.6	0.114	0.005	0.0236	0.005	0.005	0.005	0.0133	0.0497	0.003

(lanjutan)

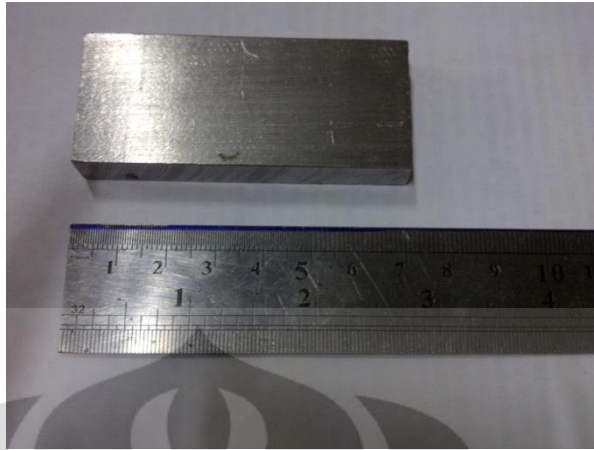
Komposisi	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	Sn	B
% Berat	0.002	0.009	0.061	0.003	0.004	0.002	0.025	0.01	0.017	0.003

3.3.2 Preparasi Benda Uji

Benda uji yang digunakan pada penelitian ini dipotong sehingga berbentuk balok dengan dimensi 70x30x10(mm). Spesimen diberi lubang untuk meletakkan kawat termokopel sebagai alat pengukur temperatur benda uji. Pengukuran temperatur menggunakan *data acquisition system* yang dihubungkan dengan komputer. Kedalaman lubang adalah ± 5 mm dengan diameter 2,5 mm yang disesuaikan diameter kawat termokopel.



Gambar 3.3 Ilustrasi Benda Uji dan Pemasangan Termokopel



Gambar 3.4 Ilustrasi Benda Uji Sebelum Dipreparasi

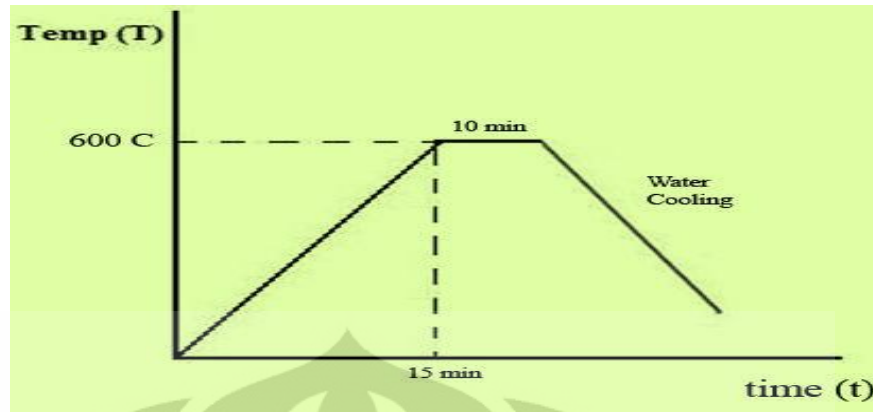
3.3.3 Proses TMCP dan *Warm Rolling*

Seluruh spesimen yang telah diukur disiapkan untuk berbagi tes, kemudian masing-masing dimasukkan ke dalam *furnace* atau dapur perapian untuk dipanaskan hingga suhu 600°C selama 15menit, kemudian ditahan selama 10 menit. Dilanjutkan dengan melakukan canai *multipass* searah dengan besaran deformasi 20% setiap *pass* pada temperatur pengerjaan hangat dilanjutkan dengan pendinginan air. Proses canai dilakukan menggunakan mesin *OnoRoll* dengan spesifikasi sebagai berikut :

- Kapasitas : 20 ton
- Maksimum *Roll Gap* : 15 mm
- Dimensi Rol : 104x140 mm
- Kecepatan *Rolling* : 8m / menit

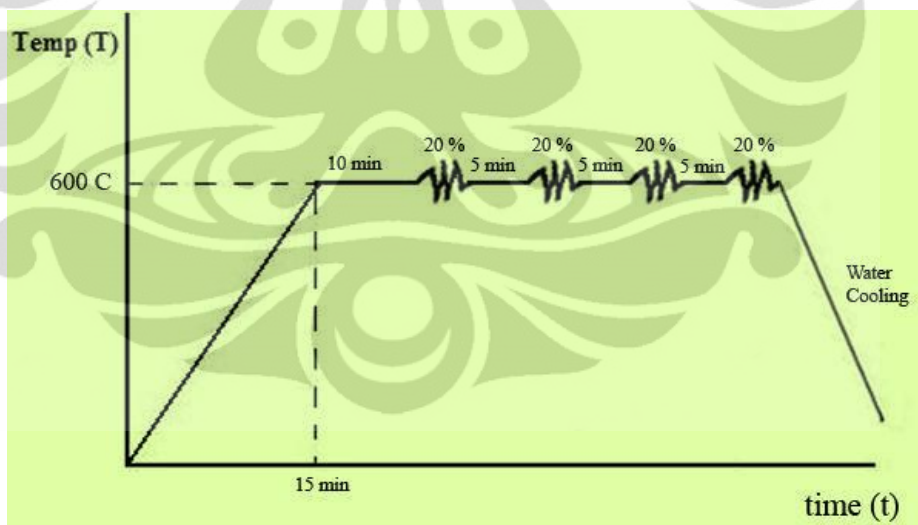
Penelitian ini terbagi atas beberapa variasi proses. Tiap variasi memiliki parameter tersendiri pada hasil akhir. Variasi-variasi proses yang dilakukan yaitu :

1. Benda Uji A adalah benda uji awal yang tidak mengalami perlakuan panas, yang diidentifikasi mikrostruktur, dan kekerasannya sebagai pembanding untuk benda uji berikutnya.
2. Benda Uji B dipanaskan hingga suhu 600°C selama 15 menit, ditahan selama 10 menit, lalu didinginkan dengan media air.

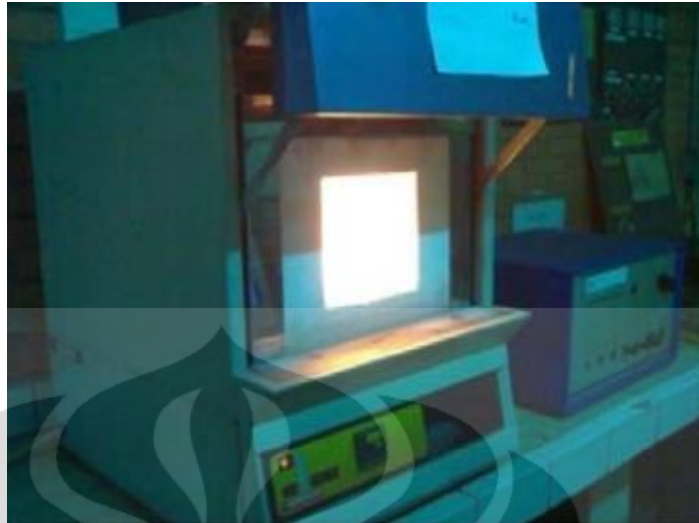


Gambar 3.5 Skematik Pengujian Benda Uji B

3. Benda Uji C dipanaskan hingga suhu 600°C selama 15 menit, ditahan selama 10 menit, lalu di canai dengan deformasi 20%, ditahan selama 5 menit, dilanjutkan dengan deformasi 20%, ditahan selama 5 menit, dilanjutkan dengan deformasi 20%, ditahan selama 5 menit, dilanjutkan dengan deformasi 20% secara searah, kemudian didinginkan dengan media air.



Gambar 3.6 Skematik Pengujian Benda Uji C



Gambar 3.7 *Furnace Carbolite*



Gambar 3.8 Mesin Onoroll dan Rangkaian Alat

3.3.4 Preparasi, Pengujian Metalografi dan Pengamatan Mikrostruktur

Pengujian metalografi bertujuan untuk mengamati mikrostruktur dari benda uji. Preparasi benda uji berdasarkan *ASTM E 3 – 01 “Standard Guide for Preparation for Metallographic Specimens”* [25].

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

Universitas Indonesia

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

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

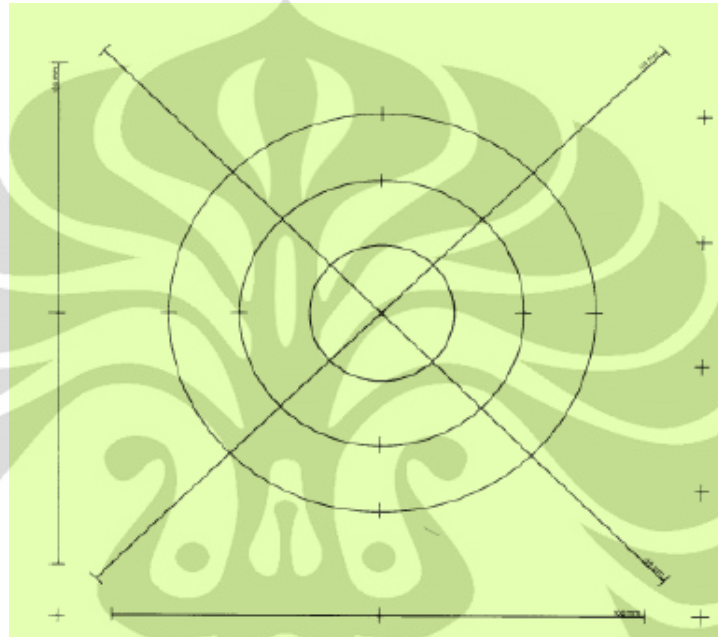


Gambar 3.9 Mikroskop Optik

3.3.5 Pengukuran Besar Butir *Equiaxed*

Pengujian dan perhitungan besar butir *equiaxed* dilakukan dengan menggunakan standar ASTM E112 “*Standard Test Method for Determining Average Grain Size*”^[26]. Terdapat berbagai metode perhitungan besar butir yang ada dalam ASTM E112, namun yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah

Metode Intercept Heyn. Prinsip perhitungan besar butir Metode Heyn yaitu dengan membuat 3 lingkaran masing-masing memiliki diameter sebesar 79.58 mm, 53.05 mm, 26,53 mm dimana ketiga lingkaran tersebut digabung menjadi satu dengan panjang total ketiga garis lingkaran tersebut 500 mm. Kemudian perpotongan garis ketiga lingkaran dengan batas butir antara satu butir dijumlahkan dengan mengabaikan butir *twins*.



Gambar 3.10 Lingkaran yang Digunakan Untuk Penghitungan Besar Butir Dengan Metode Intercept Heyn^[26].

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

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

dan panjang garis perpotongan (L_3) adalah:

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

dimana :

L_3 = Panjang garis perpotongan (mm)

P_L = Jumlah titik potong persatuan panjang

P = Jumlah titik potong batas butir dengan total panjang garis yang dalam hal ini berbentuk lingkaran.

L_T = Panjang garis total (sesuai standar ASTM =500mm)

M = Perbesaran

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

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

3.3.6 Pengukuran Besar Butir *Non-Equiaxed*

Untuk butir yang sangat memanjang (*highly elongated*) metode perhitungan besar butir dengan Metode Intercept Heyn tidak dapat memberikan gambaran secara valid. Pengukuran besar butir *non-equiaxed* dilakukan dengan menggunakan metode garis intersept (*Intercept Method*). Metode ini sangat cocok digunakan untuk menghitung besar butir non-equiaxial. 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 tiga 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:

$$L = V_v \times L_T / N_a \times M \dots \dots \dots (3.4)$$

L : Besar butir rata-rata (μm)

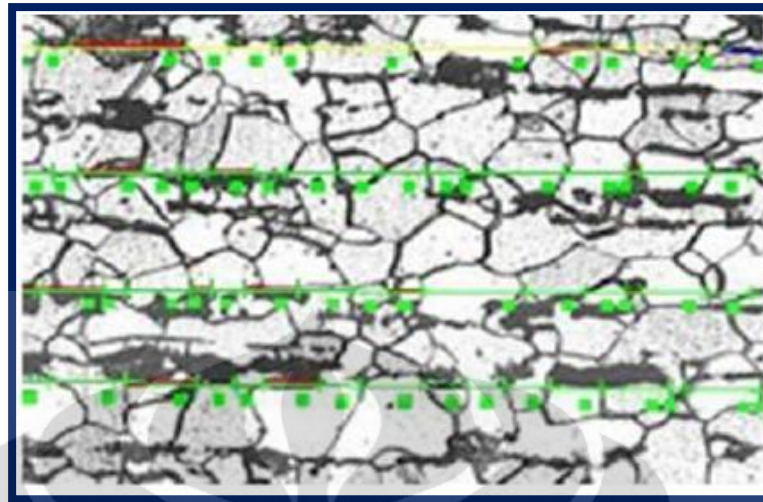
V_v : Fraksi volume fasa tertentu

L_T : Panjang garis total (μm)

N_a : Jumlah butir terpotong garis

M : Perbesaran

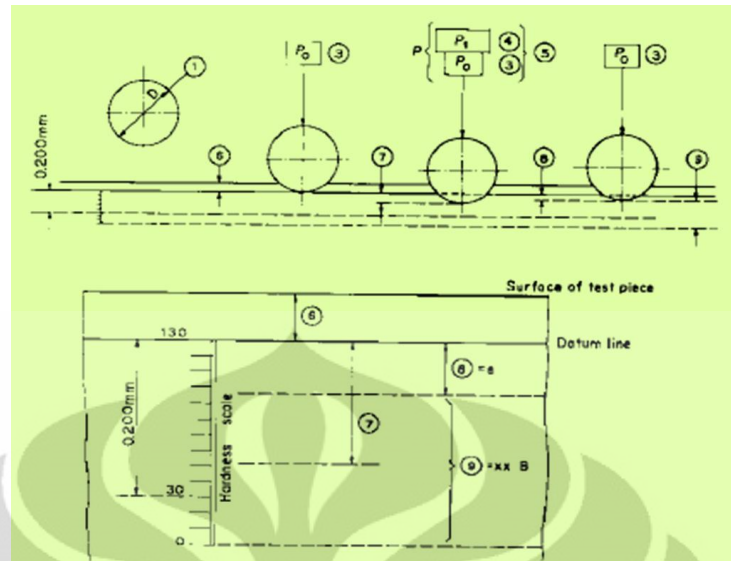
Kemudian dari hasil perhitungan besar butir rata-rata diatas dikonversikan menjadi ukuran butir menurut standar ASTM E 112 mengenai *Grain Size Measurement*.



Gambar 3.11 Metoda pengukuran besar butir dengan menggunakan metode garis intersept^[4]

3.3.7 Pengujian Nilai Kekerasan

Metode pengujian kekerasan yang dipakai yaitu metode kekerasan Rockwell (ASTM E 18) “*Standard Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials*”. 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.



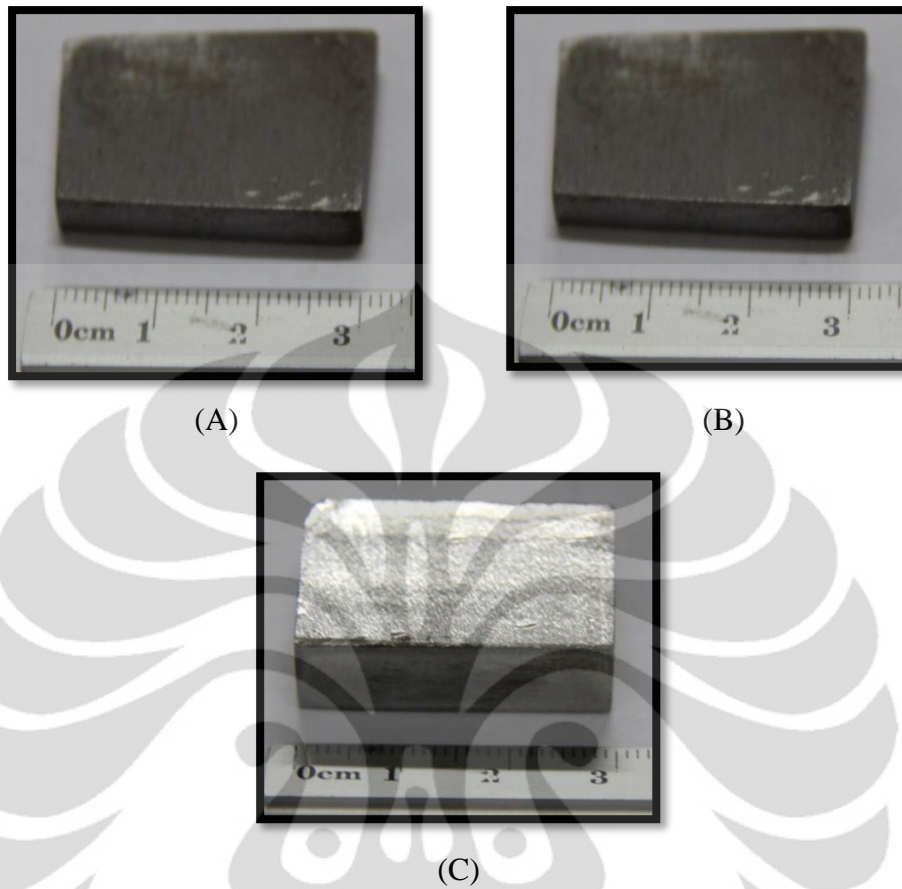
Gambar 3.12 Prinsip pengujian kekerasan dengan metode *Rockwell B* menggunakan indenter 1/6 bola baja

Tabel 3.2 Simbol dan Penandaan yang berhubungan dengan pengujian *Rockwell B*

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

3.3.8 Pengujian *Hydrogen Charging Test*^[21]

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 $1mA/cm^2$ selama 10 menit. Sel elektrokimia ini terdiri dari grafit sebagai anoda dan spesimen uji sebagai katoda.



Gambar 3.13. Benda uji A, B, dan C yang digunakan dalam pengujian *Hydrogen Charging*

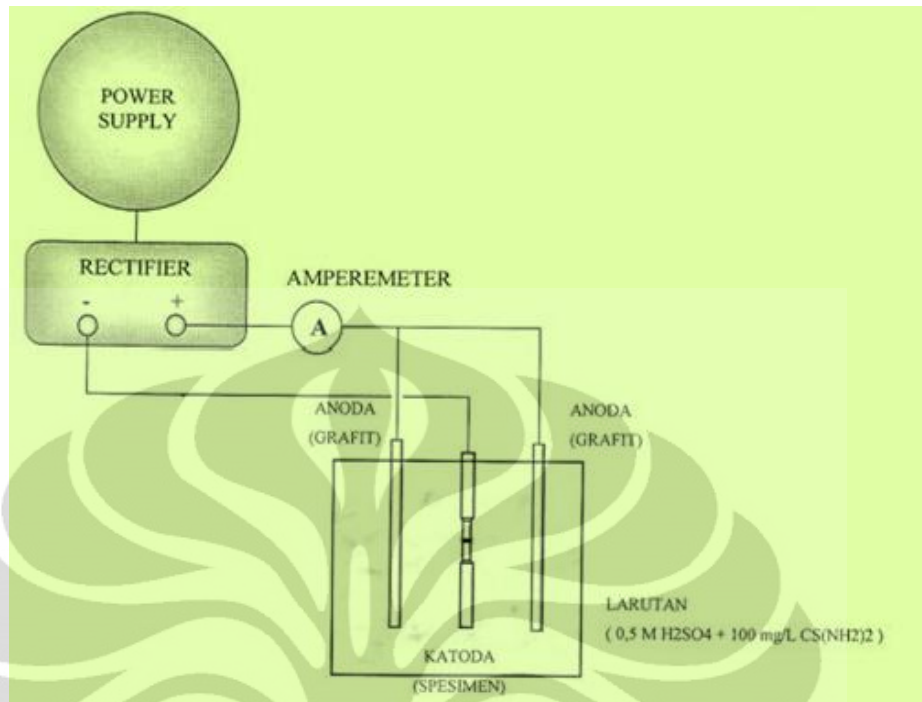


Gambar 3.14. Grafit yang digunakan dalam pengujian *Hydrogen Charging*

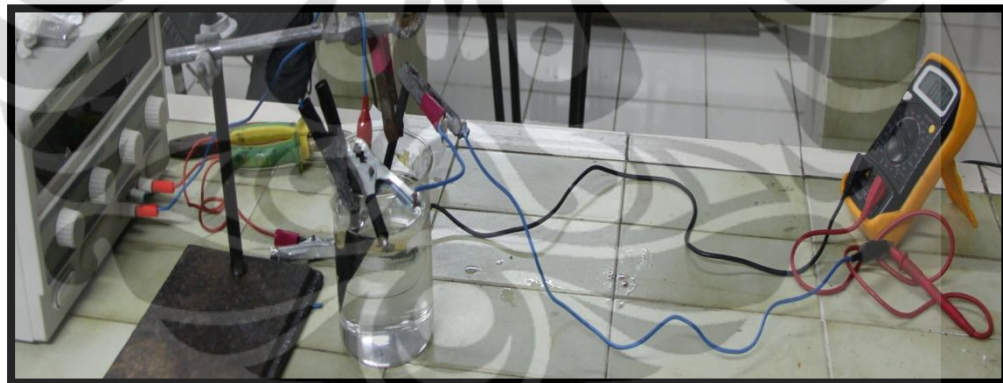


Gambar 3.15. *Rectifier* yang digunakan dalam pengujian *Hydrogen Charging*

Universitas Indonesia



Gambar 3.16. Rangkaian proses *Hydrogen Charging*^[21].



Gambar 3.17. Susunan alat dan bahan dalam pengujian *Hydrogen Charging*

3.3.8 Pengamatan *Scanning Electron Microscope*^[4]

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



Gambar 3.18 *Scanning Electron Microscope* di Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI



BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Pengukuran Dimensi Benda Uji

Deformasi yang diberikan terhadap benda uji dimasukkan kedalam persamaan :

$$\% \text{ Deformasi} = \frac{h_0 - h_f}{h_0} \times 100\% \dots \dots \dots (4.1)$$

Persamaan 4.1 Perhitungan % deformasi pada benda uji

- % Deformasi = Besar derajat deformasi
- h_0 = Ketebalan awal (mm)
- h_f = Ketebalan akhir (mm)

Setiap benda uji diukur ketebalannya menggunakan jangka sorong. Hasil pengukuran ketebalan benda uji dapat dilihat pada Tabel 4.1.



Gambar 4.1. Benda Uji Yang Telah Dideformasi

Tabel 4.1. Hasil Pengukuran Dimensi Benda Uji Sebelum dan Setelah Proses TMCP dan *Warm Rolling*

Sampel	Ukuran Awal (mm)			Derajat Deformasi Teoritis (%)	Ukuran Akhir Aktual (mm)			t_1 Teoritis (mm)	Deformasi Aktual (%)	$\epsilon_{\text{teoritis}}$	ϵ_{aktual}
	P_o	L_o	t_o		P_1	L_1	t_1				
A	70	30	10	-	70	30	10	10	0	0	0
B	70	30	10	-	70	30	10	10	0	0	0
C	70	30	10	20 +20 +20+20	163	32	4.5	4.096	55	0.89	0.80

Dari data tabel 4.1 terlihat perbedaan ketebalan akhir aktual dan ketebalan akhir teoritis dari setiap benda uji. Perbedaan yang terjadi pada nilai ketebalan akhir benda uji ini disebabkan adanya mekanisme *roll flattening*^[11] pada saat proses canai. Ketika benda uji masuk kedalam *roller*, terjadi reaksi antara benda uji dan *roller*, dimana *roll* memberi tekanan dan benda uji mengalami reaksi. Apabila benda uji memiliki kekerasan yang cukup tinggi, reaksi yang terjadi juga meningkat yang mengakibatkan *roller* terdeformasi secara elastis dan mengalami sedikit pengempisan (*roll flattening*).

4.2 Ukuran Butir Ferit

4.2.1 Pengukuran Diameter Butir Ferit

Reheating atau pemanasan akan mengubah ukuran diameter butir ferit. Hal ini ditunjukkan oleh hasil perhitungan butir ferit dengan metode *Intercept Heyn* sesuai dengan ASTM E-112 dan contoh perhitungannya dapat dilihat pada lampiran.

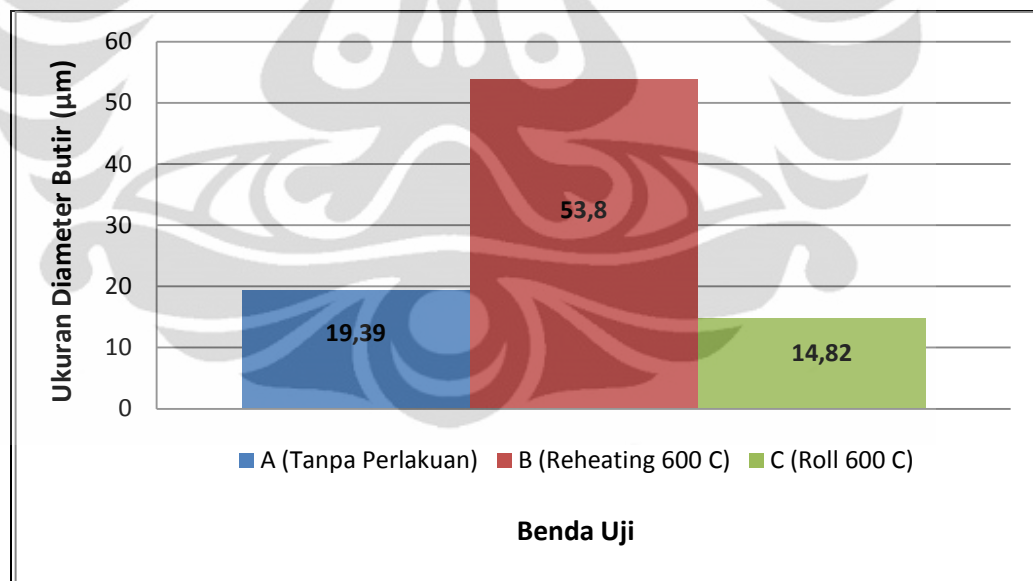
Pengukuran diameter butir dengan metoda *Intercept Heyn* hanya dilakukan terhadap benda uji yang memiliki butir *equiaxed*, sedangkan untuk butir yang memanjang (*highly elongated*) dan pipih menggunakan pengukuran *Straight Line Test* (Subbab 3.3.6)

Hasil pengukuran diameter butir dapat dilihat pada Tabel 4.2 :

Tabel 4.2. Hasil Pengukuran Diameter Butir Ferit.

Sampel	G No. (ASTM E112)	Diameter Butir (μm)	Diameter rata-rata (μm)	Keterangan
A	8.52	18.78	19.39	Tanpa Perlakuan
	8.57	18.48		
	8.22	20.92		
B	5.48	53.68	53.8	Pemanasan 600°C 15 menit, <i>holding</i> 10 menit, pendinginan air.
	5.43	54.75		
	5.52	52.86		
C		14.88	14.82	Pemanasan 600°C 15 menit, <i>holding</i> 10 menit, deformasi 20%+20%+20%+20%- pendinginan air.
		13.96		
		15.32		

Dari Tabel 4.2 dapat digambarkan suatu hubungan antara proses perlakuan panas dan deformasi terhadap ukuran diameter butir ferit yang digambarkan dalam sebuah grafik yang dapat dilihat pada Gambar 4.2.

**Gambar 4.2.** Grafik Pengaruh Temperatur *Reheating* dan Deformasi Terhadap Ukuran Diameter Butir Ferit Untuk Setiap Benda Uji.

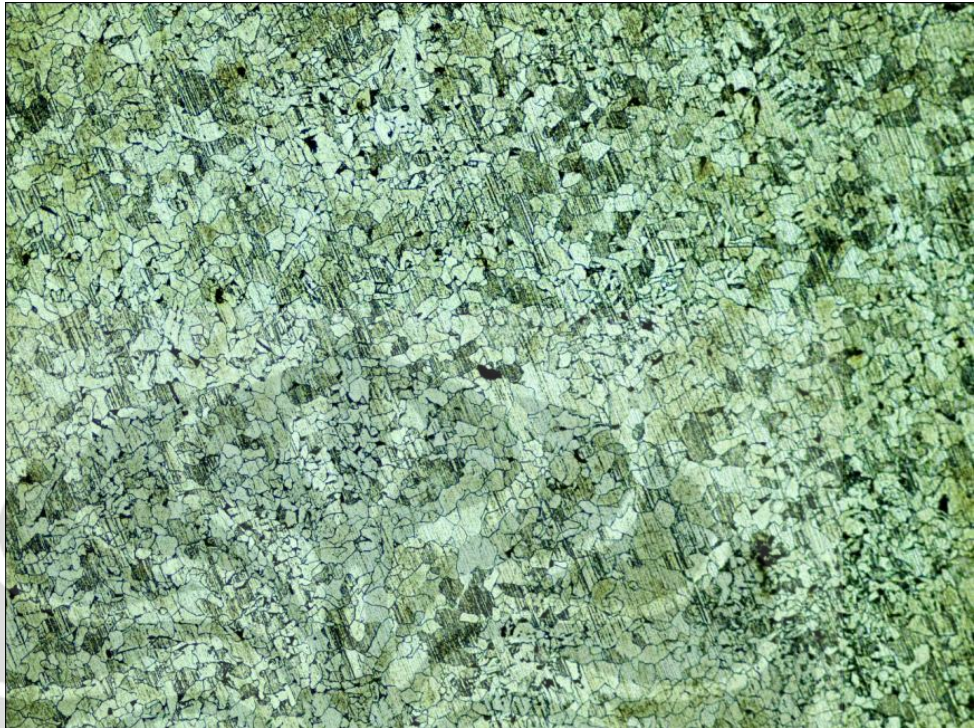
Dari Tabel 4.2 dapat dilihat bahwa Benda Uji A yang tidak dilakukan pemanasan ulang dan deformasi mempunyai ukuran butir $19.39 \mu\text{m}$. Dengan melakukan pemanasan ulang terhadap Benda Uji B, terjadi pertumbuhan butir dimana ukuran diameter ferit menjadi $53.8 \mu\text{m}$. Untuk Benda Uji C yang

dilakukan pemanasan ulang dan deformasi sebesar 20%-20%-20%-20% terjadi penghalusan butir dimana butir memiliki ukuran diameter ferit 14.82 μm .

Dari perbandingan antara Benda Uji A dan B, terjadi pengasaran ukuran butir ferit, hal ini disebabkan karena terjadinya proses pertumbuhan butir (*grain growth*). Proses pertumbuhan butir ini terjadi karena adanya energi panas berlebih dalam waktu lama yang diberikan terhadap benda uji B^[18]. Pertumbuhan butir terjadi karena adanya migrasi batas butir akibat difusi atom-atom dari suatu butir ke butir lainnya sehingga terjadi perubahan batas butir. Peningkatan temperatur akan mempercepat proses difusi tersebut karena bertambahnya energi yang diberikan butir sehingga semakin meningkat temperatur maka akan diperoleh butir yang relatif besar^[18]. Sedangkan untuk Benda uji C, dimana benda uji dilakukan *reheating* dan dideformasi, ukuran diameter butir ferit kembali mengecil. Hal ini disebabkan karena terjadinya proses rekristalisasi. Energi regangan yang berasal dari derajat deformasi yang diberikan berkolaborasi dengan panas yang diberikan (*reheating*) melebihi energi aktivasi untuk terbentuknya butir baru, sehingga proses rekristalisasi terjadi.

4.3 Pengamatan Metalografi

Pengamatan metalografi dengan mikroskop optik bertujuan untuk mengamati mikrostruktur hasil proses pencanaian.. Pengamatan dilakukan dengan menggunakan etsa Nital 2 %, selama 4 - 7 detik. Pengamatan meliputi morfologi dan ukuran butir sebelum dan sesudah proses.



Gambar 4.3 Sampel A (tanpa perlakuan) etsa 2% nital, perbesaran 100X.



Gambar 4.4 Sampel B (*Heating* 600°C) etsa 2% nital, perbesaran 100X



Gambar 4.5 Sampel C (*Heating* dan *roll* 20-20-20-20%) etsa 2% nital, perbesaran 100X

Pada Gambar 4.3, jika dilihat dari panjang dan lebar butir dari benda uji A (tanpa perlakuan), butir yang dimilikinya merupakan butir yang tergolong *equiaxed* dan cukup halus. Terlihat matriks butir terdiri atas ferit (berwarna terang) dan perlit (berwarna gelap).

Gambar 4.4 merupakan mikrostruktur dari benda uji yang telah mengalami pemanasan ulang. Pada gambar terlihat butir yang dihasilkan *equiaxed*. Jika dibandingkan dengan morfologi benda uji A (Gambar 4.3), morfologi butir benda uji B terlihat lebih besar. Hal ini disebabkan karena adanya mekanisme pertumbuhan butir karena perlakuan panas yang diberikan terhadap benda uji B. Faktor yang mempengaruhi pertumbuhan butir adalah temperatur dan waktu tahan. Fenomena pertumbuhan dapat dibagi menjadi dua mekanisme yaitu *continuous (normal) grain growth*, dimana semua butir tumbuh menjadi lebih besar dengan laju yang sama dan *discontinuous (abnormal) grain growth* dimana beberapa butir tumbuh dengan laju yang lebih besar daripada butir lainnya^[18].

Gambar 4.5 merupakan foto struktur mikro benda uji C yang mengalami *reheating* 600⁰C lalu ditahan selama sepuluh menit kemudian dideformasi sebesar 20%-20%-20%-20% pada temperatur 600⁰C dengan waktu *delay* 5 menit dan didinginkan dengan media air. Pada gambar tersebut terlihat bahwa sebagian

besar butir telah terelongasi. Butir yang terelongasi pada benda uji C terjadi karena adanya pengaruh deformasi yang diberikan terhadap benda uji. Dengan temperatur 600⁰C dan deformasi 20%-20%-20%-20% yang diberikan pada benda uji, memicu terjadinya rekristalisasi. Dapat dilihat pada gambar 4.5 bahwa terdapat butir-butir yang sudah mulai berbentuk *equiaxed*.

Dari keseluruhan proses TMCP dan *warm rolling* yang telah dilakukan berdasarkan hasil foto mikro tampak bahwa terjadi evolusi butir yaitu perubahan dari butir awal yang *equiaxed* menjadi *elongated grain*. Secara umum, selama proses perlakuan panas dan deformasi *multipass* yang dilakukan dalam penelitian ini, mekanisme yang terjadi lebih didominasi oleh mekanisme *strain hardening*. Pada proses tersebut material semakin memipih akibat deformasi yang diberikan.

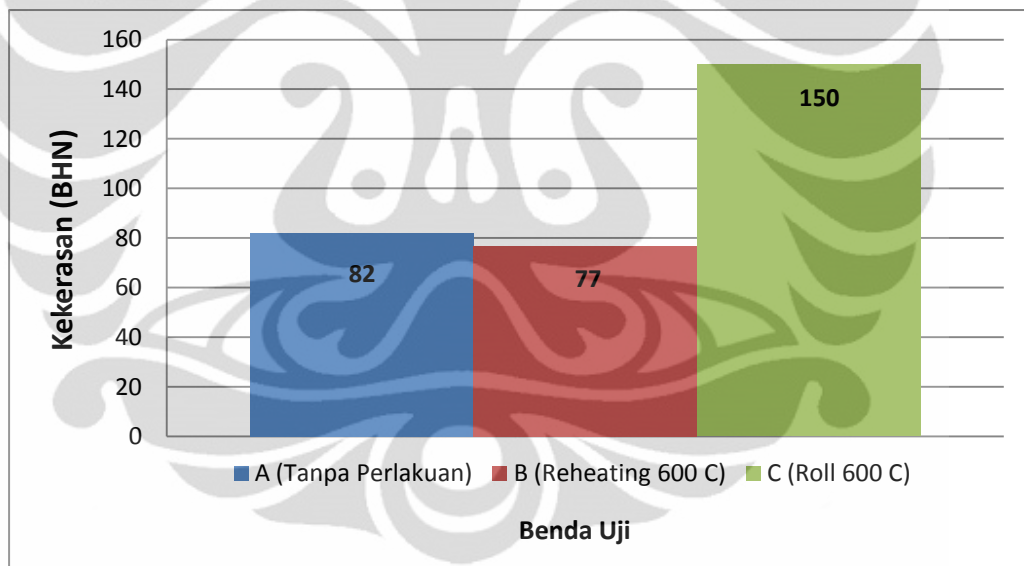
Benda uji C (gambar 4.5) telah mengalami tahapan rekristalisasi, ditandai dengan munculnya beberapa butir baru yang *equiaxed* dan berukuran kecil diantara butir-butir elongasi hasil deformasi. Butir – butir pada benda uji C mengalami tahapan rekristalisasi yang belum sempurna. Hal tersebut ditandai dengan munculnya butir-butir baru yang *equiaxed* dan kecil hanya pada beberapa bagian, sedangkan pada bagian lain masih terdapat butir-butir pipih dan panjang akibat proses deformasi canai.

4.4 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan dengan Metode Rockwell.. Nilai kekerasan Rockwell tersebut kemudian dikonversi ke dalam satuan Metode Brinell dengan menggunakan tabel perbandingan yang terdapat pada standar ASTM E140 “*Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness*”^[28]. Hasil pengukuran dapat dilihat di Tabel 4.3 .

Tabel 4.3. Hasil Pengukuran Kekerasan Sebelum dan Sesudah Proses TMCP dan *Warm Rolling*

Benda Uji	HRB	BHN	σ (Mpa)	Diameter Butir (μm)	Keterangan
A	45.22	82	282.9	19.39	Tanpa Perlakuan
B	39.7	77	265.65	53.8	Pemanasan 600 ⁰ C 15 menit, <i>holding</i> 10 menit, pendinginan air.
C	80.98	150	517.5	14.82	Pemanasan 600 ⁰ C 15 menit, <i>holding</i> 10 menit, deformasi 20%+20%+20%+20% -pendinginan air.

**Gambar 4.6.** Grafik Nilai Kekerasan Benda Uji

Bentuk dan besar butir sangat berkaitan dengan sifat mekanik material terutama kekuatan dan kekerasan bahan. Deformasi yang diberikan pada benda uji yang telah mengalami deformasi *multipass* pada proses *warm rolling* mengubah butir menjadi *elongated grain*. Pada gambar 4.6, nilai kekerasan sampel A (tanpa perlakuan) sebesar 82 BHN. Pada sampel B yang mengalami *reheating* hingga temperatur 600°C kekerasannya menurun menjadi 77 BHN) Hal ini dikarenakan proses *reheating* akan mempengaruhi morfologi butir, dimana pada proses

tersebut butir mengalami pertumbuhan sehingga butir pada benda uji menjadi lebih besar.

Butir yang ukurannya lebih besar tersebut akan menurunkan sifat mekanis seperti kekerasan dan kekuatan material. Ukuran butir yang besar akan mengurangi kekerasan karena dengan butir yang berukuran besar, area batas butir antara satu butir dengan butir lainnya menjadi lebih sedikit. Batas butir merupakan tempat dimana dislokasi menjadi sulit atau bahkan berhenti bergerak karena batas butir memiliki energi yang tinggi untuk terjadinya pergerakan dislokasi. Dengan demikian, apabila batas butirnya sedikit maka dislokasi akan lebih mudah bergerak (energi untuk menggerakkan dislokasi sedikit) sehingga material akan lebih mudah mengalami deformasi. Namun, apabila jumlah batas butir semakin banyak (yaitu material dengan butir yang semakin halus), maka dislokasi akan semakin sulit untuk bergerak (energi yang dibutuhkan untuk menggerakkan dislokasi menjadi lebih besar). Pergerakan dislokasi yang terhambat ini akan menyebabkan material lebih sulit untuk dideformasi sehingga sifat mekanis material seperti kekerasan dan kekuatannya semakin tinggi^[9].

Pada benda uji C, nilai kekerasannya meningkat dibandingkan dengan benda uji A dan B. Peningkatan kekerasan benda uji C dipengaruhi oleh efek dari deformasi yaitu menjadikan butir lebih pipih. Bentuk butir pipih atau memanjang sebagai hasil dari proses perubahan bentuk memiliki nilai *tensile strength* lebih tinggi dibandingkan dengan material yang memiliki bentuk butir bulat^[13]. Ketika lebar dari *elongated grain* menurun, total area batas butir dengan volume yang tetap akan menurun sehingga dislokasi akan sulit bergerak yang akhirnya akan mengakibatkan material lebih kuat dengan mekanisme penghambatan pergerakan dislokasi oleh ukuran *elongated grain* yang lebih pipih.

Penggunaan air sebagai media pendinginan juga berpengaruh dalam hal ini, dimana air menyebabkan laju pendinginan benda uji menjadi lebih cepat sehingga difusi batas butir akan terhambat dan butir yang dihasilkan menjadi lebih halus dan pada akhirnya akan meningkatkan nilai kekerasan material^[12].

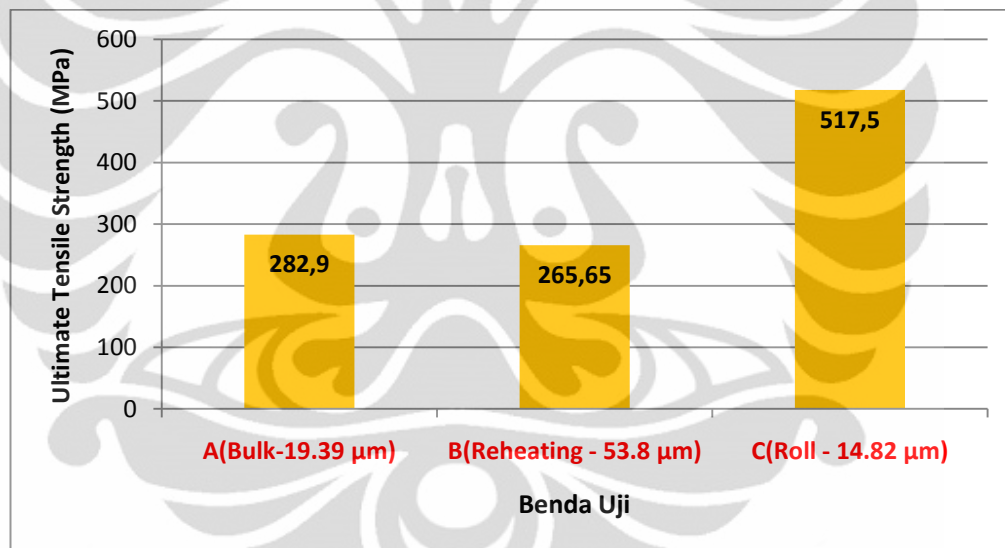
Dari seluruh rangkaian proses TMCP dan *warm rolling* yang dilakukan pada penelitian ini, secara umum nilai kekerasan material dipengaruhi oleh temperatur dan deformasi. Seperti yang telah dijelaskan pada pembahasan struktur

mikro, selama perlakuan panas dan deformasi yang dilakukan terjadi proses *strain hardening*. Mekanisme *strain hardening* menyebabkan material menjadi lebih keras. Akibat *strain hardening* yang terjadi pada material adalah peningkatan densitas dislokasi sehingga dislokasi menjadi sulit untuk bergerak. Apabila dislokasi sulit bergerak, material akan lebih sulit terdeformasi yang akhirnya menjadikan material lebih keras.

4.5 Pengaruh Ukuran Butir Terhadap Kekuatan

Untuk baja, nilai kekerasan dari material dapat dikonversikan menjadi kekuatan tarik (*tensile strength*) melalui Persamaan 4.2 berikut :

$$TS \text{ (MPa)} = 3.45 \times BHN \dots\dots\dots(4.2)$$



Gambar 4.7. Grafik Hubungan Antara Ukuran Butir (μm) dengan Kekuatan (MPa)

Terlihat dari Gambar 4.7, hasil yang didapatkan dari penelitian ini menunjukkan semakin halus butir (Sampel A tanpa perlakuan, memiliki diameter butir 19.33 μm, sampel B *reheating* 600°C dan didinginkan air memiliki diameter butir 53.8 μm, sampel C dideformasi 20%-20%-20%-20% pada temperatur 600°C dengan waktu tahan 5 menit setiap *pass*, didinginkan dengan air memiliki diameter butir 14.82 μm) didapatkan sifat baja karbon rendah yang lebih keras. Hasil ini selaras dengan Teori *Hall-Petch* yang menyatakan bahwa karena butir yang lebih halus memiliki area batas butir total yang lebih luas untuk menghalangi

pergerakan dislokasi, maka material dengan butir yang halus (memiliki butir kecil) memiliki nilai kekerasan dan nilai UTS yang lebih tinggi dibandingkan material dengan butir kasar^[9].

Hubungan antara ukuran butir dengan kekuatan bisa dijelaskan dengan persamaan Hall-Petch, yakni semakin kecil ukuran butir akan semakin tinggi nilai kekuatan material tersebut sesuai dengan persamaan 2.3.

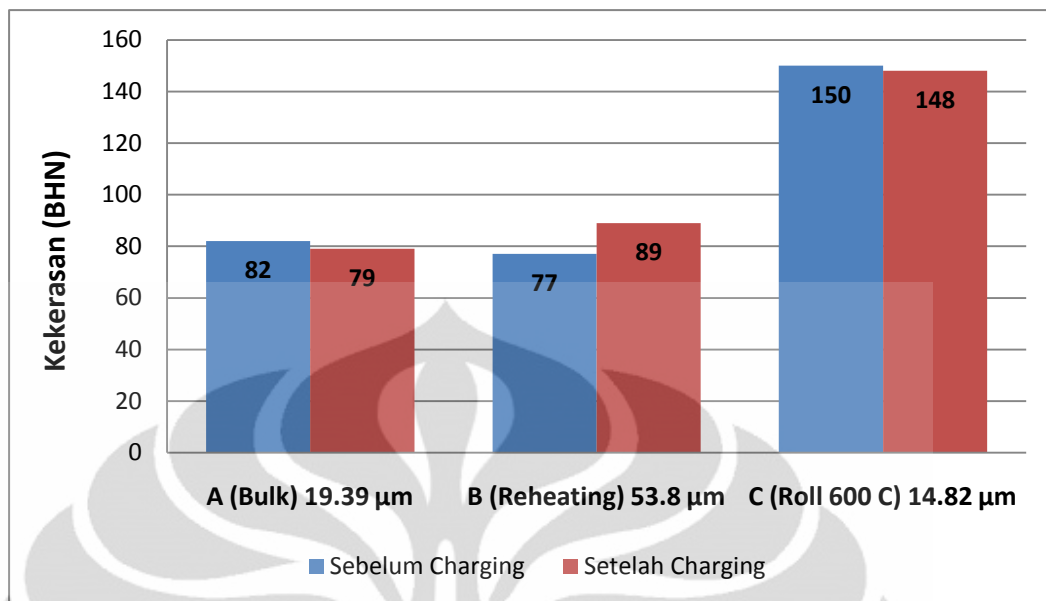
Berdasarkan data yang didapat dari pengujian, maka dapat dibuktikan persamaan Hall-petch ini, dimana semakin kecil ukuran butir maka kekuatan material akan semakin meningkat (gambar 4.7).

4.6. Hasil Pengujian *Hydrogen Charging Test*

Pengujian *Hydrogen Charging Test* bertujuan untuk melihat mekanisme ketahanan sampel setelah canai hangat terhadap difusi atom hidrogen. Pengamatan terhadap ketahanan tersebut dilakukan melalui uji kekerasan terhadap benda uji yang telah di *charging* serta pengamatan difusi hidrogen melalui *Scanning Electron Microscope*.

Tabel 4.4 Hasil Uji Kekerasan setelah *Hydrogen Charging Test*

Benda Uji	BHN Awal	σ Awal (Mpa)	Diameter Butir (μm)	Waktu <i>Charging</i>	BHN H ₂	σ_{H_2} (Mpa)	Keterangan
A	82	282.9	19.39	10 menit	79	272.55	Tanpa Perlakuan
B	77	265.65	53.8	10 menit	89	307.05	Pemanasan 600 ⁰ C 15 menit, <i>holding</i> 10 menit, pendinginan air.
C	150	517.5	14.82	10 menit	148	510.6	Pemanasan 600 ⁰ C 15 menit, <i>holding</i> 10 menit, deformasi 20%+20%+20%+20% -pendinginan air.



Gambar 4.8. Grafik Nilai Kekerasan Benda Uji Sebelum dan Setelah *Hydrogen Charging*

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

Pengujian kekerasan dilakukan pada benda uji awal, benda uji *reheating*, dan benda uji hasil proses canai 600 °C. 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 rapat arus sebesar 1 mA/cm² selama 10 menit. Reaksi yang terjadi pada proses ini merupakan reaksi elektrokimia yang mereduksi ion hidrogen menjadi atom hidrogen yang kemudian karena reaktifitas dan ukurannya yang sangat kecil dapat berdifusi hingga ke kisi kristal dalam logam.

Dari hasil pengujian tersebut, terlihat sedikit sekali penurunan nilai kekerasan untuk benda uji A (benda uji tanpa perlakuan, dengan ukuran butir 19.39 μm), dimana kekerasan awalnya sebesar 82 BHN dan kekerasan setelah proses *hydrogen charging* menjadi 79 BHN. Tidak terjadi penurunan nilai kekerasan yang berarti pada benda uji A (penurunan nilai kekerasan hanya sebesar

3 BHN), hal ini disebabkan oleh durasi pengujian *hydrogen charging* yang berlangsung selama 10 menit tidak cukup untuk memberi efek kepada benda uji A sehingga tidak terjadi perubahan nilai kekerasan yang signifikan. Mengacu kepada penelitian yang dilakukan oleh C.F. Dong^[27], semakin lama durasi pengujian *hydrogen charging* dan semakin besar rapat arus yang diaplikasikan, semakin besar pula konsentrasi hidrogen yang terkandung didalam material, yang dapat diindikasikan dengan adanya peningkatan nilai kekerasan pada material. Perubahan nilai kekerasan benda uji A yang sangat sedikit ini lebih disebabkan oleh deviasi yang dihasilkan dari alat uji kekerasan Rockwell yang digunakan dalam penelitian, dengan batas toleransi deviasi nya sebesar ± 5 HRB.

Untuk benda uji B (Pemanasan 600°C, tahan 10 menit kemudian pendinginan air dan memiliki ukuran butir sebesar 53.8 μm), terlihat adanya peningkatan nilai kekerasan yang cukup berarti, yakni dengan nilai kekerasan awal sebesar 77 BHN dan kekerasan setelah proses *hydrogen charging* menjadi 89 BHN. Terjadi peningkatan nilai kekerasan sebesar 12 BHN. Adanya peningkatan nilai kekerasan pada benda uji B telah sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Siddiqui^[28]. Hasil penelitian yang dilakukan oleh Siddiqui menunjukkan bahwa semakin lama durasi pengujian *hydrogen charging*, semakin tinggi pula nilai kekerasan material tersebut.

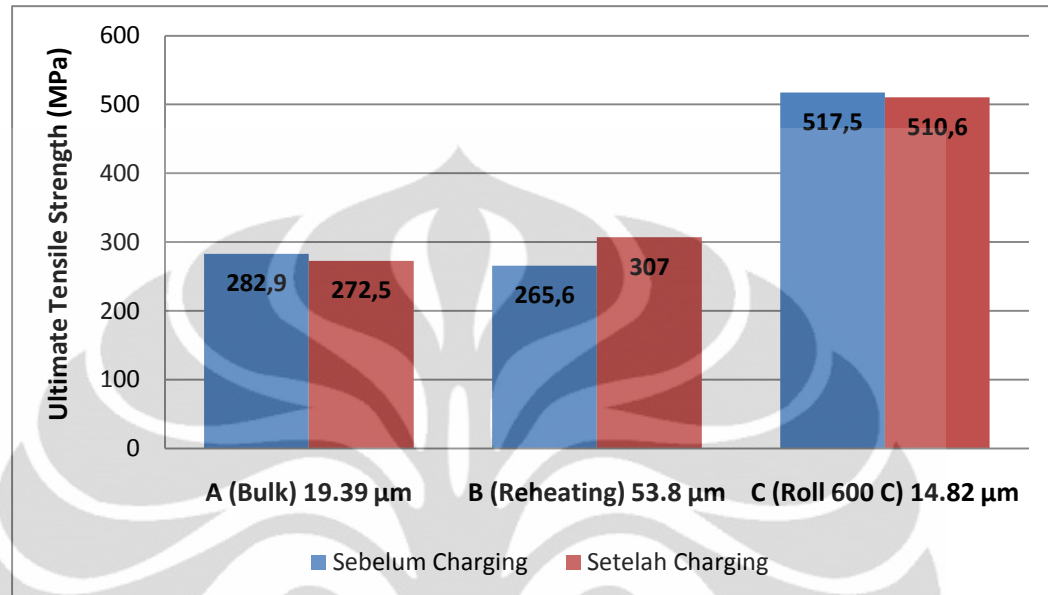
Dapat dikatakan bahwa pengujian *hydrogen charging* yang dilakukan selama 10 menit telah memberikan efek kepada benda uji B, lain halnya dengan benda uji A yang juga mengalami pengujian *hydrogen charging* selama 10 menit namun tidak terdapat perubahan nilai kekerasan. Hal ini disebabkan oleh perbedaan besar butir yang dimiliki benda uji A (19.39 μm) dan benda uji B (53.8 μm). Benda uji B memiliki ukuran butir yang lebih besar dari benda uji A, sehingga lebih rentan terhadap difusi atom hidrogen^[28]. Butir yang lebih besar memiliki jumlah batas butir yang lebih sedikit, sehingga atom hidrogen yang berukuran kecil menjadi lebih mudah untuk berdifusi hingga ke kisi kristal dalam logam. Sementara benda uji A memiliki ukuran butir yang lebih kecil, sehingga memiliki jumlah batas butir yang lebih banyak untuk menghalangi terjadinya difusi atom hidrogen kedalam logam. Oleh karena itu, walaupun benda uji A dan benda uji B mengalami pengujian *hydrogen charging* dalam durasi yang sama,

dapat memberikan efek yang berbeda.

Mekanisme yang terjadi kepada benda uji B adalah, atom hidrogen yang berdifusi ke dalam material akan berdifusi hingga ke kisi kristal, hingga terbentuk interaksi antara atom hidrogen dengan dislokasi. 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^[28]. Dapat dikatakan dislokasi terperangkap oleh adanya atom hidrogen.

Untuk benda uji C (Pemanasan 600°C, roll 20-20-20-20% kemudian pendinginan air dan memiliki ukuran butir sebesar 14.82 μm). terlihat sedikit sekali penurunan nilai kekerasan, dimana kekerasan awalnya sebesar 150 BHN dan kekerasan setelah proses *hydrogen charging* menjadi 148 BHN. Tidak terjadi penurunan nilai kekerasan yang berarti pada benda uji C (penurunan nilai kekerasan hanya sebesar 2 BHN), hal ini disebabkan oleh durasi pengujian *hydrogen charging* yang berlangsung selama 10 menit tidak cukup untuk memberi efek kepada benda uji C sehingga tidak terjadi perubahan nilai kekerasan yang berarti, sama perihalnya dengan yang terjadi kepada benda uji A. Benda uji C (14.82 μm) memiliki ukuran butir yang lebih kecil dari benda uji B (53.2 μm), sehingga lebih tahan terhadap difusi atom hidrogen, artinya proses difusi hidrogen kedalam benda uji C tidak semudah proses difusi hidrogen kedalam benda uji B, sehingga walaupun durasi pengujian *hydrogen charging* pada kedua benda uji sama, dapat menghasilkan efek yang berbeda. Benda uji C memiliki ukuran butir yang lebih kecil daripada benda uji B, sehingga memiliki jumlah batas butir yang lebih banyak untuk menghalangi terjadinya difusi atom hidrogen kedalam logam. Perubahan nilai kekerasan benda uji C yang sangat sedikit ini lebih disebabkan oleh deviasi yang dihasilkan dari alat uji kekerasan Rockwell yang digunakan dalam penelitian, dengan batas toleransi deviasi nya sebesar ± 5 HRB.

4.6.2. Pengaruh Ukuran Butir Terhadap Kekuatan Setelah *Hydrogen Charging*



Gambar 4.9. Grafik Nilai Kekuatan Benda Uji Sebelum dan Setelah *Hydrogen Charging*

Nilai kekuatan tarik pada benda uji ini diperoleh melalui konversi nilai kekerasan benda uji, melalui Persamaan 4.2. Dari hasil pengujian tersebut, terlihat sedikit sekali penurunan nilai kekuatan untuk benda uji A (benda uji tanpa perlakuan, dengan ukuran butir $19.39 \mu\text{m}$), dimana UTS awalnya sebesar 282,9 MPa dan UTS setelah proses *hydrogen charging* menjadi 272,5 BHN. Tidak terjadi penurunan nilai UTS yang berarti pada benda uji A (penurunan nilai UTS hanya sebesar 10,4 MPa), hal ini disebabkan oleh durasi pengujian *hydrogen charging* yang berlangsung selama 10 menit tidak cukup untuk memberi efek kepada benda uji A sehingga tidak terjadi perubahan nilai kekerasan yang signifikan. Mengacu kepada penelitian yang dilakukan oleh Siddiqui^[28], semakin lama durasi pengujian *hydrogen charging*, semakin meningkat pula nilai *tensile strength* dari material. Dengan meningkatnya durasi pengujian *hydrogen charging*, jumlah atom hidrogen yang terdifusi kedalam material akan semakin banyak. Dislokasi merupakan *trapping site* bagi atom hidrogen, sehingga dengan meningkatnya jumlah atom hidrogen yang ada akan semakin menyulitkan

mobilitas dislokasi. Dislokasi yang terhambat membutuhkan tegangan yang lebih besar untuk berpindah, sehingga tegangan dalam kisi pun menjadi meningkat dan mempengaruhi sifat mekanik material seperti peningkatan nilai *tensile strength*^[28].

Untuk benda uji B (Pemanasan 600°C, tahan 10 menit kemudian pendinginan air dan memiliki ukuran butir sebesar 53.8 μm), terlihat adanya peningkatan nilai UTS yang cukup signifikan, yakni dengan nilai UTS awal sebesar 265,6 MPa dan nilai UTS setelah proses *hydrogen charging* menjadi 307 MPa. Terjadi peningkatan nilai UTS sebesar 41,4 MPa. Adanya peningkatan nilai UTS pada benda uji B telah sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Siddiqui^[28].

Dapat dikatakan bahwa pengujian *hydrogen charging* yang dilakukan selama 10 menit telah memberikan efek kepada benda uji B, lain halnya dengan benda uji A yang juga mengalami pengujian *hydrogen charging* selama 10 menit namun tidak terdapat perubahan nilai UTS. Hal ini disebabkan oleh perbedaan besar butir yang dimiliki benda uji A (19.39 μm) dan benda uji B (53.8 μm). Benda uji B memiliki ukuran butir yang lebih besar dari benda uji A, sehingga lebih rentan terhadap difusi atom hidrogen^[28]. Butir yang lebih besar memiliki jumlah batas butir yang lebih sedikit, sehingga atom hidrogen yang berukuran kecil menjadi lebih mudah untuk berdifusi hingga ke kisi kristal dalam logam. Sementara benda uji A memiliki ukuran butir yang lebih kecil, sehingga memiliki jumlah batas butir yang lebih banyak untuk menghalangi terjadinya difusi atom hidrogen ke dalam logam. Oleh karena itu, walaupun benda uji A dan benda uji B mengalami pengujian *hydrogen charging* dalam durasi yang sama, dapat memberikan efek yang berbeda.

Selain dikarenakan adanya interaksi antara atom hidrogen dengan dislokasi dalam material, peningkatan nilai UTS pada benda uji B dapat disebabkan oleh efek adsorpsi atom hidrogen ke dalam logam yang kemudian menginisiasi penggetasan benda uji. Masuknya atom hidrogen ke dalam logam akan mengurangi gaya kohesi antar atom dalam logam tersebut. Pada saat atom hidrogen masuk ke dalam logam maka ia akan menempati kisi dan akan memperlemah gaya kohesi antar atom logam. Konsentrasi atom hidrogen yang masuk ke dalam logam apabila mencapai batas kritisnya maka akan memperlemah

ikatan antar atom logamnya akibat distorsi kisi yang terjadi antar atom logam. Gaya kohesi atau gaya tarik-menarik antar logam akan menurun bila jarak antar atomnya semakin jauh. Masuknya atom hidrogen kedalam kisi antar atom akan memperbesar jarak antar kisi sehingga bila material diberikan beban yang akan memperbesar jarak antar atom pada kisi logam akan membuat gaya kohesi logam menjadi lebih lemah dan akan menyebabkan material menjadi lebih getas^[22].

Material yang lebih getas akan memiliki nilai UTS yang lebih tinggi daripada material yang ulet, namun kemampuan elongasi dari material yang getas lebih rendah dari material yang ulet^[9]. Artinya, apabila material getas dipapar suatu pembebanan semisal beban tarik, ia akan lebih mudah patah daripada material yang ulet (meskipun nilai UTS material getas lebih tinggi), karena elongasi yang dimilikinya rendah dan perpatahan yang dihasilkan pun berupa perpatahan getas.

Untuk benda uji C (Pemanasan 600°C, roll 20-20-20-20% kemudian pendinginan air dan memiliki ukuran butir sebesar 14.82 μm). terlihat sedikit sekali penurunan nilai UTS, dimana nilai UTS awalnya sebesar 517,5 MPa dan nilai UTS setelah proses *hydrogen charging* menjadi 510,6 MPa. Tidak terjadi penurunan nilai UTS yang berarti pada benda uji C (penurunan nilai kekerasan hanya sebesar 6,9 MPa), hal ini disebabkan oleh durasi pengujian *hydrogen charging* yang berlangsung selama 10 menit tidak cukup untuk memberi efek kepada benda uji C sehingga tidak terjadi perubahan nilai UTS yang berarti, sama perihalnya dengan yang terjadi kepada benda uji A. Benda uji C (14.82 μm) memiliki ukuran butir yang lebih kecil dari benda uji B (53.2 μm), sehingga lebih tahan terhadap difusi atom hidrogen, artinya proses difusi hidrogen kedalam benda uji C tidak semudah proses difusi hidrogen kedalam benda uji B, sehingga walaupun durasi pengujian *hydrogen charging* pada kedua benda uji sama, dapat menghasilkan efek yang berbeda. Benda uji C memiliki ukuran butir yang lebih kecil daripada benda uji B, sehingga memiliki jumlah batas butir yang lebih banyak untuk menghalangi terjadinya difusi atom hidrogen kedalam logam.

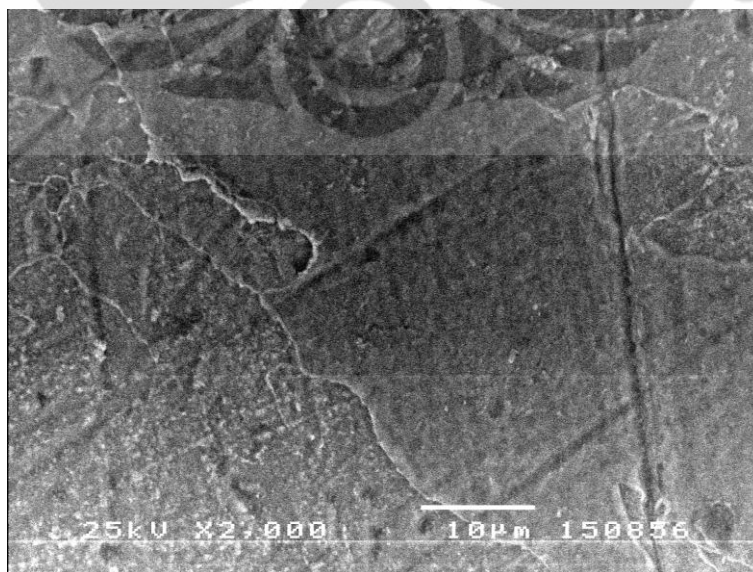
Menurut Namboodhiri^[23], apabila atom hidrogen telah terdifusi kedalam material dan berkumpul pada cacat yang ada pada material, akan terjadi reaksi kombinasi atom-atom hidrogen yang membentuk molekul H_2 yang

menghasilkan tekanan yang sangat besar dan menginisiasi terjadinya retakan pada material. Dengan adanya inisiasi retakan, apabila material diberikan pembebanan, akan terjadi propagasi retakan dari material yang dapat menurunkan sifat mekanik material tersebut serta perpatahannya menjadi getas. Namun dikarenakan durasi pengujian *hydrogen charging* belum cukup untuk memberikan efek kepada benda uji, maka perihal penghasilan tekanan dari terbentuknya molekul H_2 belum dapat dibuktikan pada penelitian ini.

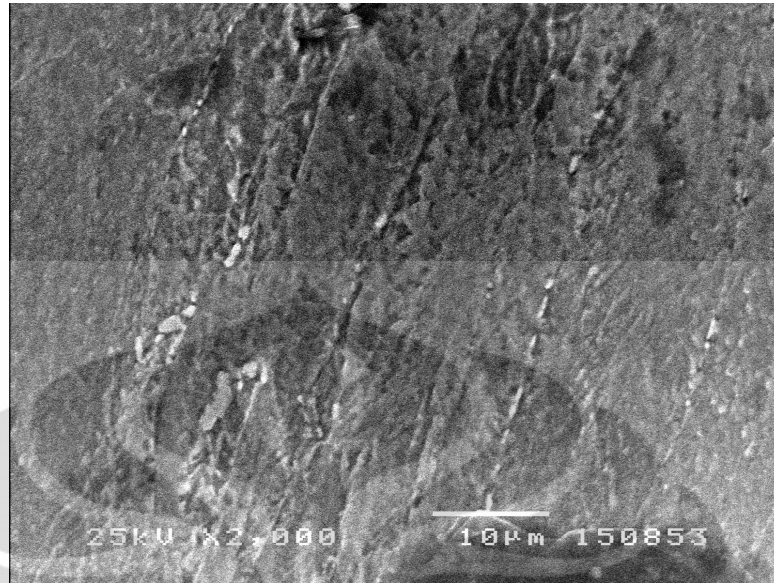
4.6.3. Hasil Pengamatan SEM Setelah Pengujian *Hydrogen Charging*



Gambar 4.10 Penampang Melintang dari Benda Uji A (tanpa perlakuan) perbesaran 2000X



Gambar 4.11 Penampang Melintang dari Benda Uji B (*Reheating* 600°C) perbesaran 2000X



Gambar 4.12 Penampang Melintang dari Benda Uji C (*Reheating* 600°C dan *roll* 20-20-20-20%) perbesaran 2000X

Berdasarkan gambar 4.10, gambar 4.11, dan gambar 4.12, melalui pengamatan *Scanning Electron Microscope*, belum tampak adanya efek pengujian *hydrogen charging* dengan durasi 10 menit terhadap benda uji. Yang terlihat pada gambar 4.10 (foto penampang melintang dari benda uji A setelah pengujian *hydrogen charging*) dan gambar 4.11 (foto penampang melintang dari benda uji B setelah pengujian *hydrogen charging*) hanyalah morfologi butir dari benda uji. Butir pada benda uji B terlihat lebih besar daripada benda uji A, dikarenakan butir pada benda uji B mengalami *grain growth* (seperti yang telah dijelaskan pada sub bab 4.3 mengenai pengamatan metalografi). Sementara pada gambar 4.12 (foto penampang melintang dari benda uji C setelah pengujian *hydrogen charging*), yang terlihat adalah morfologi permukaan penampang melintang dari benda uji serta tampak garis – garis memanjang yang merupakan sisa goresan dari hasil pengamplasan ketika preparasi benda uji untuk pengamatan SEM berlangsung.

Mengacu kepada penelitian yang telah dilakukan oleh Samerjit^[25], apabila benda uji telah terdifusi atom hidrogen, akan tampak *microcracks* berwarna hitam pada beberapa bagian di permukaan benda uji jika diamati menggunakan *Scanning Electron Microscope*. Namun, pada gambar 4.10, gambar 4.11, maupun gambar 4.12, tidak tampak adanya *microcracks* pada permukaan dari penampang

melintang benda uji, sehingga dapat dikatakan bahwa durasi pengujian *hydrogen charging* yang berlangsung selama 10 menit belum memberi efek kepada benda uji. Selain itu, perlu dilakukan pengujian EDAX pada benda uji setelah proses *hydrogen charging*, agar diketahui persentase hidrogen yang terkandung pada benda uji.



BAB 5

KESIMPULAN

Dari hasil pengujian dan analisa yang dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Penghalusan butir ferit dengan metode TMCP akan meningkatkan sifat mekanik baja karbon rendah, dalam hal ini adalah meningkatnya nilai kekerasan dan kekuatannya. Kekerasan awal benda uji (dengan ukuran butir $19.39 \mu\text{m}$) sebesar 82 BHN dan kekerasan benda uji setelah canai hangat (dengan ukuran butir $14.82 \mu\text{m}$) adalah sebesar 150 BHN. Nilai UTS awal benda uji sebesar 282.9 MPa dan nilai UTS benda uji setelah canai hangat sebesar 517.5 MPa. Secara umum, kekuatannya menjadi meningkat dua kali lipat.
2. Pemanasan ulang pada benda uji menyebabkan terjadinya pertumbuhan butir sehingga ukuran butir meningkat. Benda uji tanpa perlakuan panas memiliki ukuran butir sebesar $14.82 \mu\text{m}$, sementara benda uji yang mengalami pemanasan ulang pada $600 \text{ }^\circ\text{C}$ memiliki ukuran butir sebesar $53.8 \mu\text{m}$.
3. Adanya perubahan morfologi butir pada baja karbon rendah setelah mengalami canai hangat dari bentuk *equiaxed grain* menjadi *elongated grain*.
4. Butir kasar lebih rentan terhadap difusi atom hidrogen daripada butir yang halus, sehingga ketahanan korosi baja karbon rendah terhadap hidrogen dapat ditingkatkan melalui penghalusan butir dengan metode TMCP, dalam hal ini adalah proses *warm rolling*.

5. Atom hidrogen berdifusi kedalam kisi kristal logam dan menghalangi mobilitas dislokasi, sehingga kekerasan dan nilai UTS material yang terdifusi atom hidrogen akan meningkat.



DAFTAR PUSTAKA

1. Yoshitaka Adachi , Masayuki Wakita , Hossein Beladi , Peter Damian Hodgson “*The formation of ultrafine ferrite through static transformation in low carbon steels*”, Acta Materialia Elsevier 55. 2007. 4925-4934
2. Yuwei Gao, Tianfu Jing, Guiying Qiao, Jinku Yu, Tiansheng Wang, Qun Li, Xinyu Song, Shuqiang Wang, and Hong Gao. *Microstructural evolution and tensile properties of low-carbon steel with martensitic microstructure during warm deforming and annealing*. (2008)
3. Hadi, Nurul. Pengaruh Ukuran Butir dan Pemberian Tegangan Terhadap Sifat Mekanik Baja Karbon Rendah Akibat *Hydrogen Embrittlement*. Tesis Program Magister Fakultas Teknik Mesin ITB. 2002.
4. Riyanti, Purnama. Studi Penghalusan Butir Ferrite Melalui *Severe Plastic Deformation* dan Evaluasi Ketahanan Korosi Baja Karbon GR X42. Tesis Program Magister FTUI. 2010.
5. Toshiyasu Nishimura, *Corrosion resistance of Si–Al-bearing ultrafine-grained weathering steel*, Sci. Technol. Adv. Mater. 9 (2008).
6. Rafiq A. Siddiqui, *Hydrogen Embrittlement in Low Carbon Steel*, Archives of Materials Science, Vol. 28, N. 1-4, 2007.
7. Hisakichi Sunada, *Hydrogen Embrittlement of Warm Worked High Carbon Steel*, Transactions ISIJ, Vol. 28, 1988, hal 678-682.
8. George Krauss. *STEEL: Processing, Structure, and Performance*, ASM International.USA: 2005.
9. William D. Callister, Jr. *Fundamental of Materials Science and Engineering 5th edition*. USA: 2003.
10. Shey, John A., *Introduction to Manufacturing Processes*, 2nd Edition, McGraw-Hill Book Company, New York. 1987.
11. Harris, John Noel. *Mechanical Working of Metals : Theory and Practice*. Pergamon Press : UK. 1983.
12. Brooks. R. Charlie. *Heat Treatment Structure & Properties of Non Ferrous Alloy*. Ohio : American Society for Metals.1998.

13. Weng, Yuqing. *Ultra-Fine Grained Steels*. Metallurgical Industry Press, 2009. Trans. Chaoxijing Gang--Gang de Zuzhi Xihua Lilun yu Kongzhi Jishu. 2003.
14. S. Dobatkin, J. Zrnik, I. Mamuzic, *Ultrafine-Grained Low Carbon Steels By Severe Plastic Deformation*, METALURGIJA 47. 2008. 181-186
15. G. H Akbari, C. M Sellars and J.A Whiteman. *Microstrutural development During Warm Rolling of an IF Steel*. Pergamon. Acta Mater. Acta Metallurgica. Vol 45, No 12. 1997. PP 5047-5058.
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. A.Najafi. *Effect of Delay Time on Microstructural Evolution during Warm Rolling of Ti-Nb-IF Steel*. J. Mater. Sci. Technol., Vol.20 No.1, 2004.
18. Humphreys, F.J. and M. Hatherly, *Recrystallization and Related Annealing Phenomena*. Pergamon Press. 2004 .
19. 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
20. D.A. Jones, *Principles and Prevention of Corrosion*, 1996.
21. Pribadi, Mohammad. *Studi Pengaruh Deformasi Proses Warm Rolling Terhadap Perubahan Struktur Mikro Ferritic dan Ketahanan Korosi Baja Karbon Rendah*. Tesis Program Magister FTUI. 2010.
22. Thomas J. C. Eun, *Hydrogen Damages in Oil Refinery and Petroleum Plants*, Keyano College Suncor Energy, 2005.
23. Namboodhiri, T.K.G, "*Hydrogen Damage of Metallic Material*". Banaras Hindu University. Varanasi.2008.
24. Elvira. S, Mioara "*Hydrogen Embrittlement in Ferrous Materials*", Universite Libere de Bruxelles France. 2006
25. Samerjit. *Hydrogen Induced Cracking in Low Strength Steels*. Thammasat Int.J.Sc.Tech Vol.9 No.2, 2004.
26. ASTM E112. "*Standard Test Method for Determining Average Grain Size*". 2003
27. C.F. Dong. *Effect of Hydrogen Charging On The Susceptibility of X100 Pipeline Steel to Hydrogen Induced Cracking*. Elsevier, 2009.

28. R.A. Siddiqui, Hussein Abdullah. *Hydrogen Embrittlement in 0.31% Carbon Steel Used For Petrochemical Application*. Elsevier, 2005.





Lampiran 1. Hasil Pengujian Komposisi Slab Baja Karbon Rendah

PMI Master Pro 13M0031 Optiknr. 13M0031							
Sample :1136							
Alloy : FE_U_100 Mode : PA 21.10.2010 15:11:24							
	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr
1	99,7	0,119	< 0,0050	0,0285	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050
2	99,6	0,108	< 0,0050	0,0188	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050
Average	99,6	0,114	< 0,0050	0,0236	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050
	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti
1	0,0047	0,0380	0,0022	0,0082	0,0590	< 0,0030	0,0020
2	0,0219	0,0613	0,0026	0,0115	0,0645	< 0,0030	0,0059
Average	0,0133	0,0497	0,0024	0,0098	0,0617	< 0,0030	0,0039
	V	W	Pb	Sn	B	Zr	
1	< 0,0020	< 0,0250	< 0,0100	0,0153	< 0,0030	< 0,0030	
2	< 0,0020	< 0,0250	< 0,0100	0,0206	< 0,0030	0,0033	
Average	< 0,0020	< 0,0250	< 0,0100	0,0179	< 0,0030	< 0,0030	

Lampiran 2. Perhitungan Ukuran Butir *Equiaxed*

	P_L	L_3 (mm)	G No	G Rata-Rata	Besar Butir Rata-Rata (μm)
<i>Slab Awal</i>	60	0.016	8.5	8.4	19.39
	64	0.015	8.7		
	54	0.018	8.2		
<i>Non-Roll 600 C</i>	25	0.04	5.48	5,47	53.8
	27	0.037	5.43		
	24	0.041	5.52		

Lampiran 3. Perhitungan Kekerasan

Sampel	HRB	HRB Rata-Rata	BHN	UTS (MPa)
A	46.5	45.22	82	282.9
	44.7			
	47.1			
	40			
	41.2			
B	40.3	39.7	77	265.65
	38.7			
	41.1			
	37.2			
	39.1			
C	77.7	80.98	180	517.5
	80.4			
	82.2			
	83.8			
	86.6			

Universitas Indonesia

Lampiran 4. Tabel Diameter Ukuran Butir (ASTM E112)

Grain Size No. G	\bar{N}_A Grains/Unit Area		\bar{A} Average Grain Area		\bar{d} Average Diameter		$\bar{\tau}$ Mean Intercept		\bar{N}_L 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	0.0468	46820	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	8.84
3.5	5.66	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	1448.15	22446.4	0.000045	44.6	0.0067	6.7	0.0060	5.9	168.2
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

Lampiran 5. Tabel Konversi Nilai Kekerasan ASTM E14

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

