



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI PENGARUH BESAR DEFORMASI BOLAK-BALIK
MELALUI PROSES CANAI HANGAT TERHADAP
MORFOLOGI BUTIR *FERRITE*, KEKERASAN, DAN
KETAHANAN KOROSI BAJA KARBON SS400**

SKRIPSI

**BINTANG SURYO HERDIANSYAH
0606074666**

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
JUNI 2010**



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI PENGARUH BESAR DEFORMASI BOLAK-BALIK
MELALUI PROSES CANAI HANGAT TERHADAP
MORFOLOGI BUTIR *FERRITE*, KEKERASAN, DAN
KETAHANAN KOROSI BAJA KARBON SS400**

SKRIPSI

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Teknik (ST)**

**BINTANG SURYO HERDIANSYAH
0606074666**

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
JUNI 2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Bintang Suryo Herdiansyah

NPM : 0606074666

Tanda Tangan :

Tanggal : 25 Juni 2010

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Bintang Suryo Herdiansyah
NPM : 0606074666
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi : **Studi Pengaruh Besar Deformasi Bolak-Balik Melalui Proses Canai Hangat Terhadap Morfologi Butir Ferrite, Kekerasan Dan Ketahanan Korosi Baja Karbon SS 400**

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

DEWAN PENGUJI

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

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

Penguji II : Dra. Sari Katili, M.Sc ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 25 Juni 2010

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis ucapkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa yang telah melimpahkan berkah, rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Studi Pengaruh Besar Deformasi Bolak-Balik Melalui Proses Canai Hangat Terhadap Morfologi Butir Ferrite, Kekerasan dan Ketahanan Korosi Baja Karbon SS400”** yang merupakan salah satu syarat guna memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Dalam rangka menyelesaikan Tugas Akhir ini, penulis mendapatkan banyak bantuan, bimbingan, dorongan, dan petunjuk dari berbagai pihak. Oleh sebab itu pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan dan terima kasih kepada :

1. Tuhan Yesus Kristus yang telah melimpahkan segala berkatnya sehingga skripsi ini dapat diselesaikan;
2. Kedua orang tua dan keluarga yang telah memberikan semangat dan bantuan baik dukungan moral dan material;
3. Ir. Rini Riastutui M.Sc selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, stamina, dan pikiran untuk mengarahkan penyusunan skripsi ini;
4. Rekan-rekan TA (Ronald, Amri, Nofar, Aldhi) yang saling mendukung dan membantu dalam mengerjakan skripsi ini;
5. Teman-teman Metalurgi angkatan 2006
6. Pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini jauh dari kesempurnaan, untuk itu kritik dan saran yang membangun dari semua pihak sangat penulis harapkan untuk perbaikan dimasa yang akan datang. Semoga tulisan ini dapat bermanfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 25 Juni 2010

Penulis

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

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

Nama : Bintang Suryo Herdiansyah
NPM : 0606074666
Program Studi : Sarjana
Departemen : Teknik Metalurgi dan Material
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

demikian 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 PENGARUH BESAR DEFORMASI BOLAK-BALIK MELALUI
CANAI HANGAT TERHADAP MORFOLOGI BUTIR *FERRITE*,
KEKERASAN, DAN KETAHANAN KOROSI BAJA KARBON SS400**

berserta 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 mempublikasikan 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 : 25 Juni 2010

Yang menyatakan

(Bintang Suryo Herdiansyah)

ABSTRAK

Nama : Bintang Suryo Herdiansyah
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul : **Studi Pengaruh Besar Deformasi Bolak-Balik Melalui Proses Canai Hangat Terhadap Morfologi Butir Ferrite, Kekerasan dan Ketahanan Korosi Baja Karbon SS400**

Pada saat ini dunia industri sedang berusaha untuk mendapatkan suatu material yang memiliki sifat mekanik yang baik tapi dengan biaya produksi yang murah. Hal itu mendorong dilakukannya penelitian terhadap baja karbon rendah untuk mendapat sifat-sifat yang lebih baik. Baja karbon rendah biasanya memiliki struktur mikro ferit dan perlit dengan sifat mekanik yang rendah. Dalam penelitian ini akan dipelajari pengaruh deformasi yang dilakukan terhadap sifat-sifat mekanis dan ketahanan korosi baja karbon rendah dengan TMCP dan Canai Hangat. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa baja karbon rendah memiliki sifat-sifat mekanik dan ketahanan korosi yang baik melalui proses tersebut. Besar deformasi memberikan pengaruh terhadap sifat-sifat tersebut.

Kata Kunci : Baja Karbon Rendah, Ferrite, TMCP, Canai Hangat, Korosi

ABSTRACT

Name : Bintang Suryo Herdiansyah
Study Program : Teknik Metalurgi dan Material
Title : **Study The Effect of Reversible Deformation in Warm Working upon Ferrite Grain Morphology, Hardness and its Corrosion Resistance in Carbon Steel SS400**

Nowadays, industrial world is trying to get materials having the good mechanical properties and corrosion resistance with low cost production. It encourages of doing research on carbon steel to get better properties of carbon steel. Carbon steel usually has microstructure of ferrite and pearlite having low mechanical properties. . Research is done to study the effect of deformation on mechanical properties dan corrosion resistance by involving the TMCP and warm working. The results show that low carbon steels having the good mechanical properties and corrosion resistance by using these processes. Deformation influences those properties

Keyword : Low Carbon Steel, Ferrite, TMCP, Warm Working, Corrosion

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR RUMUS	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Ruang Lingkup Penelitian	3
1.5 Sistematika Penulisan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Metalurgi Baja Karbon	5
2.2 Baja Karbon Rendah.....	7
2.3. Proses Deformasi Plastis	8
2.4 Pengaruh Ukuran Butir Terhadap Kekerasan.....	11
2.5 <i>Recovery</i> , Rekrystalisasi, dan Pertumbuhan Butir	13
2.5.1 <i>Recovery</i>	13
2.5.2 Rekrystalisasi.....	15
2.5.3 Pertumbuhan Butir.....	18
2.6 <i>Thermo-Mechanical Controlled Processing(TMCP)</i>	19
2.7 Canai Hangat	22
2.8 Korosi	23
2.8.1 Korosi Pada Baja Karbon	24
2.8.2 Hubungan antara Mikrostruktur terhadap korosi.....	25
2.8.3 Pengaruh Perlakuan Panas Terhadap Korosi.....	26
2.8.4 Pengaruh Deformasi Pada Laju Korosi	27
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	29
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	29
3.2 Alat dan Bahan	30
3.2.1 Alat	30
3.2.2 Bahan	30
3.3 Prosedur Penelitian.....	30
3.3.1 Pemilihan Material	30

3.3.2 Preparasi Sampel	30
3.3.3 Proses TMCP dan Canai Hangat	31
3.3.4 Uji Metalografi	33
3.3.5 Uji Kekerasan	34
3.3.6 Uji Korosi Polarisasi.....	34

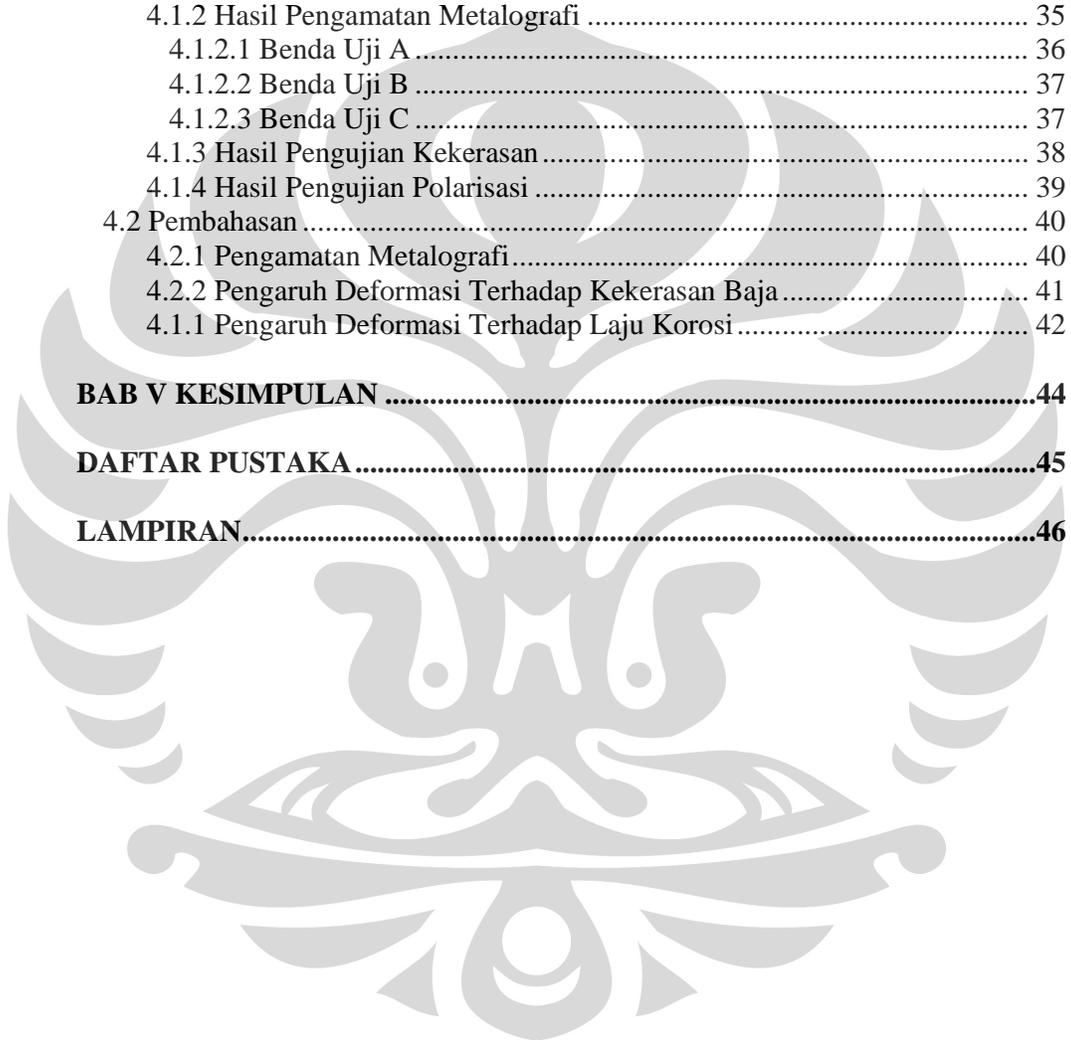
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN35

4.1 Hasil Pengujian.....	35
4.1.1 Hasil Pengukuran Benda Uji	35
4.1.2 Hasil Pengamatan Metalografi	35
4.1.2.1 Benda Uji A	36
4.1.2.2 Benda Uji B	37
4.1.2.3 Benda Uji C	37
4.1.3 Hasil Pengujian Kekerasan	38
4.1.4 Hasil Pengujian Polarisasi	39
4.2 Pembahasan	40
4.2.1 Pengamatan Metalografi.....	40
4.2.2 Pengaruh Deformasi Terhadap Kekerasan Baja	41
4.1.1 Pengaruh Deformasi Terhadap Laju Korosi.....	42

BAB V KESIMPULAN44

DAFTAR PUSTAKA45

LAMPIRAN.....46



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Diagram Fasa Besi-Karbon	5
Gambar 2.2.	Penurunan Kelarutan Karbon pada Ferrite dengan Menurunnya Temperatur	6
Gambar 2.3.	Transformasi Fasa pada Baja Karbon Rendah	7
Gambar 2.4.	Kombinasi Elongasi dan Kekuatan untuk Berbagai Jenis Baja Karbon Rendah.....	8
Gambar 2.5.	Analogi Pergerakan Dislokasi	9
Gambar 2.6.	<i>Slip</i> pada Kristal	10
Gambar 2.7.	<i>Twinning</i> pada Kristal.....	10
Gambar 2.8.	Perbedaan <i>Slip</i> dan <i>Twinning</i>	11
Gambar 2.9.	Skema efek dari variasi penguatan material	12
Gambar 2.10.	Pengaruh Ukuran Butir Ferrite terhadap Kekuatan dan Ketahanan Impak.....	12
Gambar 2.11.	Perubahan Sifat pada Proses <i>Recovery</i> , Rekrystalisasi dan Pertumbuhan Butir.....	13
Gambar 2.12.	Skema Proses <i>Recovery</i> , Rekrystalisasi dan Pertumbuhan	14
Gambar 2.13.	Evolusi Mikrostruktur Selama Deformasi Panas yang Menunjukkan terjadinya <i>Recovery</i>	15
Gambar 2.14.	Proses pada <i>Annealing</i>	16
Gambar 2.15.	Evolusi Mikrostruktur selama Rekrystalisasi Dinamis	17
Gambar 2.16.	Perbandingan Antara Rekrystalisasi Dinamik dan Statik.....	18
Gambar 2.17.	Skema Pertumbuhan Butir melalui Difusi Atom.....	19
Gambar 2.18.	Perbedaan struktur mikro antara proses konvensional dan proses TMCP	21
Gambar 2.19.	Mekanisme Korosi pada Logam.....	24
Gambar 2.20.	Butir Ferrite dan Batas butirnya di etsa dengan Nital 2% dan Perbesaran 300X.....	26
Gambar 2.21.	Bagian Permukaan <i>Rolling</i> (R), Longitudinal (L), Transverse (T) Baja Karbon Rendah dengan Proses Canai Dingin 65%	27
Gambar 3.1.	Diagram Alir Proses Penelitian	29
Gambar 3.2.	Ilustrasi Benda Uji dan Pemasangan Termokopel.....	31
Gambar 3.3.	Diagram Proses A.....	31
Gambar 3.4.	Diagram Proses B	32
Gambar 3.5.	Diagram Proses C	33
Gambar 4.1.	Foto Mikrostruktur ferit Benda Uji A tanpa deformasi, etsa Nital 3% dengan perbesaran 200X	36
Gambar 4.2.	Foto Mikrostruktur ferit Benda Uji B deformasi 25%-25%, etsa Nital 3% dengan perbesaran 200X	37
Gambar 4.3.	Foto Mikrostruktur ferit Benda Uji C deformasi 35%-35%, etsa Nital 3% dengan perbesaran 200X	38
Gambar 4.4.	Perbandingan Mikrostruktur dengan Mikroskop Optik Perbesaran Etsa Nital 2-3%	40
Gambar 4.5.	Pengaruh Deformasi terhadap Kekerasan	41
Gambar 4.6.	Pengaruh Deformasi Terhadap Laju Korosi.....	42

Gambar 4.7. Pengaruh Kekerasan terhadap Laju Korosi 43



DAFTAR TABEL

Tabel 1.1. Komposisi Benda Uji SS40.....	8
Tabel 2.1. Data Hasil Pengukuran Benda Uji	15
Tabel 2.2. Hasil Uji Kekerasan	38
Tabel 2.4. Hasil Pengujian Polarisasi.....	39



DAFTAR RUMUS

Persamaan 2.1 Hall Petch.....	11
Persamaan 2.2 Kekuatan Material.....	11
Persamaan 2.3 Kekuatan Material.....	11
Persamaan 2.4 Temperatur Pertumbuhan Butir	15
Persamaan 2.5 Temperatur Rekrystalisasi	15
Persamaan 3.1 Persamaan Kekerasan Vickers.....	34
Persamaan 4.1 Persamaan Deformasi	35



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Benda Uji A.....	46
Lampiran 2	Benda Uji B.....	46
Lampiran 3	Benda Uji C.....	47
Lampiran 4	Hasil Pengujian Komposisi Benda Uji.....	48
Lampiran 5	Kurva Korosi Polarisasi Benda Uji Bulk.....	49
Lampiran 6	Kurva Korosi Polarisasi Benda Uji A.....	50
Lampiran 7	Kurva Korosi Polarisasi Benda Uji B.....	51
Lampiran 8	Kurva Korosi Polarisasi Benda Uji C.....	52



BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi pada dunia industri telah memberikan perubahan yang cukup besar dalam penggunaan dan pemilihan material. Seiring dengan perkembangan tersebut maka akan terjadi peningkatan kebutuhan terhadap material yang memiliki karakteristik dan sifat yang sesuai dengan kondisi untuk diaplikasikan. Pada saat ini perkembangan teknologi bukan hanya sekedar kebutuhan teknis tetapi juga terdapat pertimbangan ekonomis. Penambahan paduan pada suatu material, misalnya baja merupakan salah satu cara untuk dapat memperbaiki sifat-sifat pada material baja tersebut sehingga didapat material dengan kekuatan yang baik. Namun penambahan paduan tersebut biasanya membuat biaya produksi material tersebut menjadi lebih tinggi. Sehingga perlu dicari alternatif suatu material yang murah tapi tetap memiliki sifat-sifat yang memadai untuk berbagai aplikasi di dunia industri. Penggunaan baja karbon rendah dapat menjadi suatu solusi yang memungkinkan untuk digunakan pada berbagai macam aplikasi. Dengan berbagai perlakuan maka akan di dapat material baja karbon yang memiliki kekuatan yang baik.

Baja merupakan material yang paling banyak digunakan pada dunia industri^[1]. Material ini biasa digunakan sebagai *boiler*, pipa, *heat exchanger*, *pressure vessel* serta aplikasi lainnya yang membutuhkan kekuatan dan ketangguhan yang baik. Baja memiliki aplikasi yang sangat luas di dunia industri karena^[2] :

1. Baja merupakan material yang cukup berlimpah di bumi sehingga dari segi biaya masih cukup ekonomis
2. Baja memiliki temperatur lebur yang tinggi
3. Memiliki kekuatan dan keuletan yang baik
4. Baja dapat menghasilkan mikrostruktur yang bervariasi sesuai dengan perlakuan panas yang dilakukan terhadap baja tersebut sehingga dapat menghasilkan baja dengan sifat mekanik yang lebih baik

Meskipun memiliki sifat mekanik yang baik untuk aplikasi yang beragam pada dunia industri, baja karbon ternyata cukup rentan terhadap serangan korosi. Kerugian akibat korosi logam dapat mencapai jutaan dollar tiap tahunnya, karena baja karbon memang merupakan material yang cukup banyak digunakan pada dunia industri sehingga para pelaku industri sepakat untuk melakukan pengembangan kualitas baja yang lebih baik lagi. Hal ini dapat memberikan dampak yang positif bagi dunia industri.

Pada saat ini dunia industri sedang berusaha untuk mendapatkan suatu material yang memiliki sifat mekanik yang baik tapi dengan biaya produksi yang murah. Hal itu mendorong dilakukannya penelitian terhadap baja karbon rendah untuk mendapat sifat-sifat yang lebih baik. Baja karbon digunakan karena harganya yang relatif lebih murah tetapi memiliki sifat-sifat yang baik untuk berbagai aplikasi di dunia industri. Sifat mekanik dari baja ini tergantung dari mikrostrukturnya. Pada baja karbon rendah, struktur ferrite-pearlite sering dijumpai dimana kekuatan ataupun sifat mekaniknya dipengaruhi oleh besar butir ferit. Pengontrolan mikrostruktur yang baik adalah cara yang efektif agar didapat baja karbon yang sifat mekanis yang baik dengan butir ferit yang halus. Untuk mencapai hal itu, butir austenit yang kecil harus terbentuk pada saat pemanasan awal sehingga dilakukan suatu proses yang dikenal dengan Thermomechanical Control Process (TMCP).

Metode yang mulai dikembangkan dan menarik untuk mendapatkan baja dengan kekuatan yang baik adalah dengan proses *Warm Rolling* yang memiliki potensi untuk menambah jumlah produksi dan mengurangi biaya produksi dari baja karena pengerjaannya dilakukan pada suhu yang lebih rendah sehingga energi yang dibutuhkan pun akan lebih kecil^[3]. Pengerjaan hangat merupakan salah satu alternatif untuk menghasilkan mikrostruktur dengan butir lebih halus yang dilakukan pada suhu 500°C - 800°C ^[3].

1.2. Tujuan

1. Mengamati evolusi mikrostruktur pada baja karbon rendah pada proses TMCP

2. Mendapatkan baja dengan kekuatan yang baik dengan metode canai hangat
3. Mempelajari pengaruh besar deformasi bolak-balik terhadap sifat-sifat mekanik dan ketahanan korosi baja karbon rendah pada proses TMCP dengan Pengerjaan Hangat (500°C - 800°C)^[3]

1.3 Ruang Lingkup

1.3.1 Material

Material yang digunakan pada penelitian ini material baja SS 400

Tabel 1.1 Komposisi Benda Uji SS400

Komposisi	Fe (%)	C (%)	Cu (%)	Nb (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)
	98.913	0.120	0.018	< 0.002	0.008	< 0.003	< 0.003
	Mn (%)	Si (%)	Ni (%)	Ti (%)	V (%)	Al (%)	Mo (%)
	0.636	0.198	< 0.005	< 0.002	0.016	0.037	< 0.005

1.3.2 Parameter Penelitian

1. Temperatur Austenisasi

Temperatur Austenisasi yang digunakan adalah 1100°C

2. Temperatur Akhir Canai

Temperatur Akhir Canai dilakukan 600°C

3. Waktu Tahan

Waktu tahan yang digunakan pada penelitian ini adalah selama 5 jam setelah penurunan dari suhu 1100°C menjadi 650°C dan selama 30 menit setelah defromasi pada suhu 390°C

4. Besar deformasi

Deformasi dilakukan dengan metode bolak-balik pada deformasi 25 % dan 35 %

1.4. Tempat Penelitian

Penelitian terhadap proses TMCP dan pengerjaan hangat dilakukan di Laboratorium Metalurgi Mekanik Departemen Metalurgi dan Material. Sedangkan

preparasi benda uji untuk pengamatan struktur mikro dilakukan di Laboratorium Metalografi dan HST Departemen Metalurgi dan Material.

1.5 Sistematika Penulisan

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 dijelaskan mengenai latar belakang penelitian, perumusan masalah, tujuan penelitian, ruang lingkup penelitian, dan sistematika penulisan.

Bab 2 Tinjauan Pustaka

Pada bab ini akan dijelaskan tentang studi literatur yang berkaitan dengan penelitian skripsi ini.

Bab 3 Metodologi Penelitian

Bab ini berisi mengenai langkah kerja, prosedur penelitian, prinsip pengujian, daftar alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian, serta preparasi Benda Uji hingga diagram alir proses dan pengujian mikrostruktur.

Bab 4 Hasil dan Pembahasan

Pada bab ini akan dibahas mengenai pengolahan data yang didapat dari hasil pengujian yang telah dilakukan berupa gambar dan pengukuran diameter butir ferit. Dan juga berisi data-data hasil penelitian dan analisa dari hasil penelitian tersebut dibandingkan dengan hasil studi literatur.

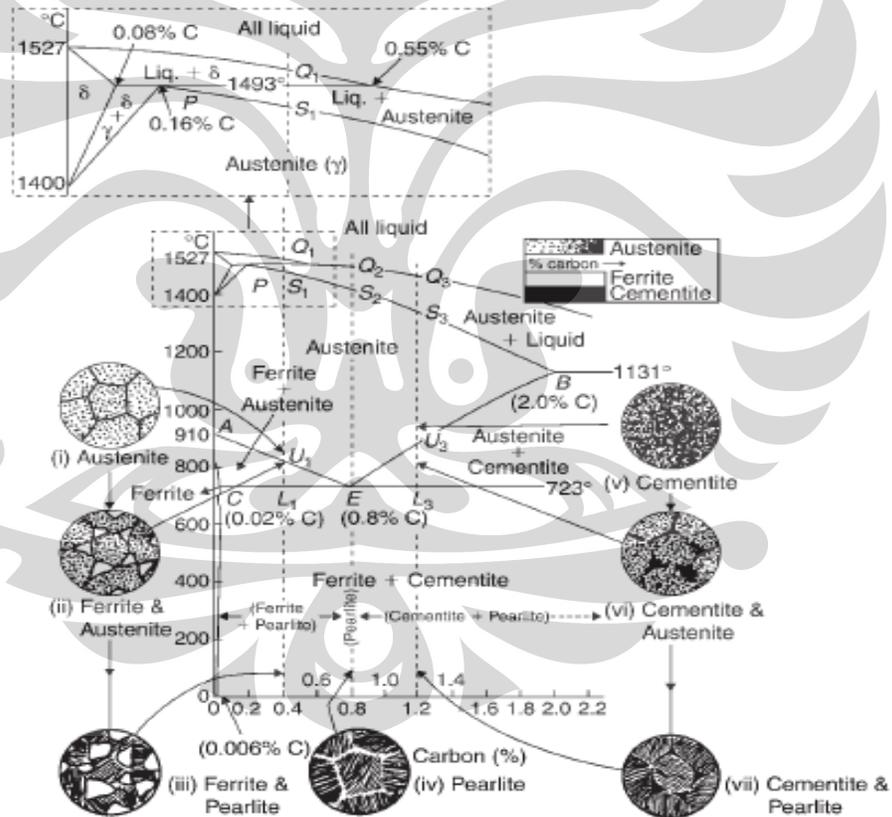
Bab 5 Kesimpulan

Bab ini berisikan kesimpulan akhir berdasarkan hasil dan pembahasan penelitian ini.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Metalurgi Baja Karbon

Baja karbon merupakan baja dengan paduan utamanya adalah karbon^[4]. Penggunaan istilah baja karbon dapat juga digunakan sebagai referensi suatu baja yang bukan merupakan *stainless steel*, tapi penggunaan istilah ini termasuk untuk baja paduan. Komposisi pada baja karbon biasanya mengandung tidak lebih dari 1.0% karbon (C) serta sejumlah paduan seperti mangan (Mn) dengan kadar maksimal 1,65%, silikon (Si) dengan kadar maksimal 0,6% dan tembaga (Cu) dengan kadar maksimal 0,6%.

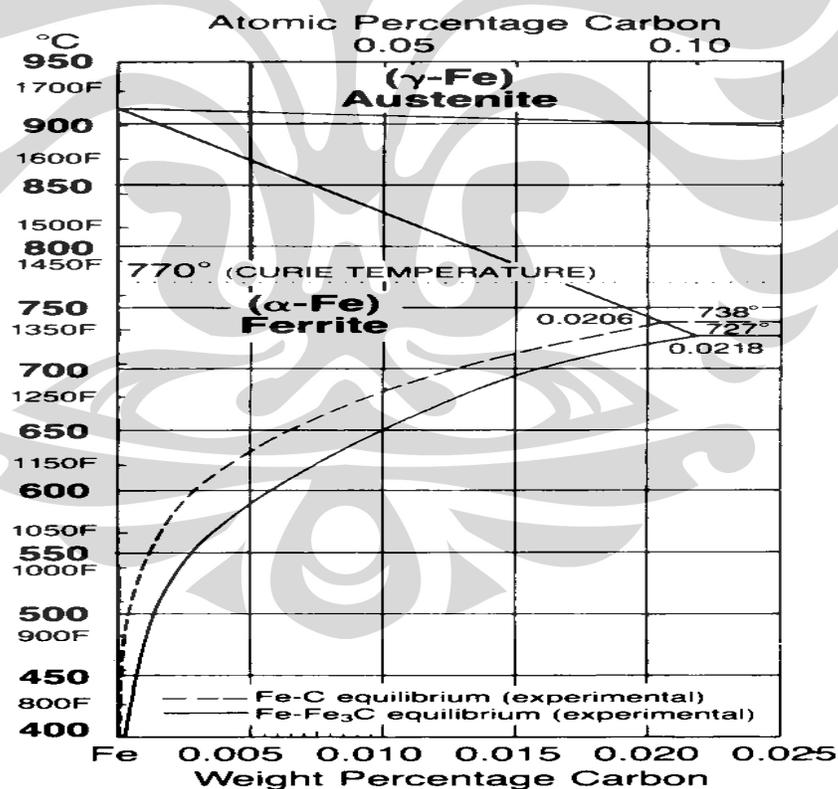


Gambar 2.1 Diagram Fasa Besi-Karbon^[5]

Karbon berfungsi sebagai unsur penguat dengan mencegah dislokasi bergeser pada kisi kristal (*crystal lattice*) atom besi. Karbon merupakan suatu

elemen yang menstabilkan austenite dan meningkatkan range pembentukan austenite pada baja. Melalui variasi kandungan karbon dan unsur paduan lainnya, berbagai jenis sifat-sifat baja bisa didapatkan. Baja dengan kadar karbon yang rendah memiliki sifat-sifat yang mirip dengan besi. Secara umum, semakin tinggi kandungan karbon akan menurunkan titik lebur ketahanannya terhadap temperatur

Penambahan kandungan karbon pada baja dapat meningkatkan kekerasan dan kekuatan tariknya, namun baja akan menjadi getas (*brittle*) dan menurunkan keuletannya (*ductility*) serta sulit untuk di las, selain itu penambahan karbon juga menghasilkan beberapa perubahan penting terhadap fasa. Struktur kristal dari *ferrite* BCC dan Austenite FCC dimodifikasi dengan memasukkan atom karbon pada celah atau intertisi antara atom besi. Ketika batas kelarutan untuk karbon pada austenite terlewati maka karbida besi atau sementit akan terbentuk pada baja.

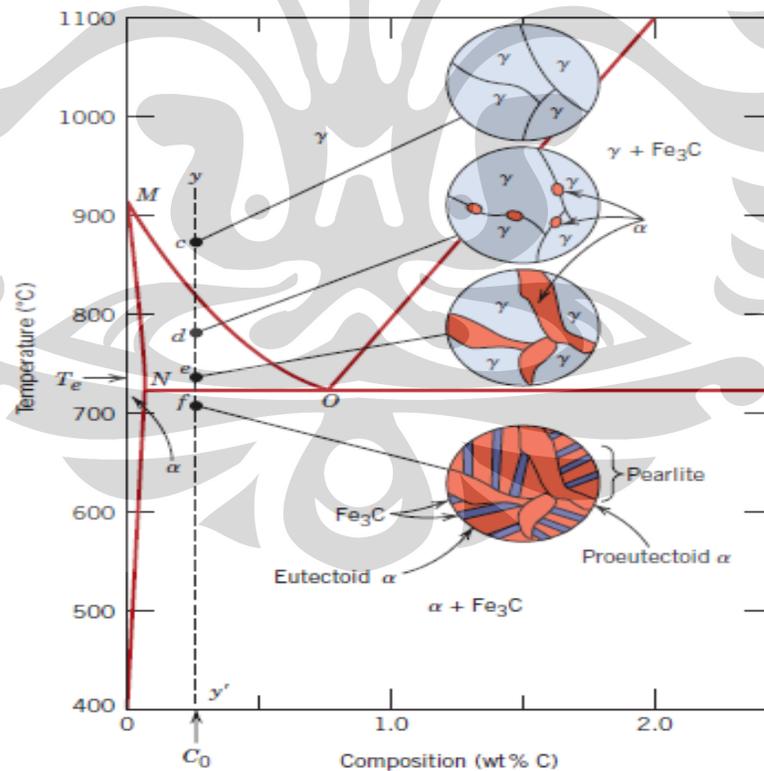


Gambar 2.2 Penurunan Kelarutan Karbon pada *Ferrite* dengan Menurunnya Temperatur^[6]

Baja karbon dapat dibagi menjadi tiga jenis berdasarkan kadar karbon yang dimiliki yaitu baja karbon rendah dengan kadar karbon kurang dari 0,25 %, baja karbon sedang mengandung 0,25 % - 0,6 % karbon, dan baja karbon tinggi mengandung 0,6 % - 1,4 % karbon^[7].

2.2 Baja Karbon Rendah

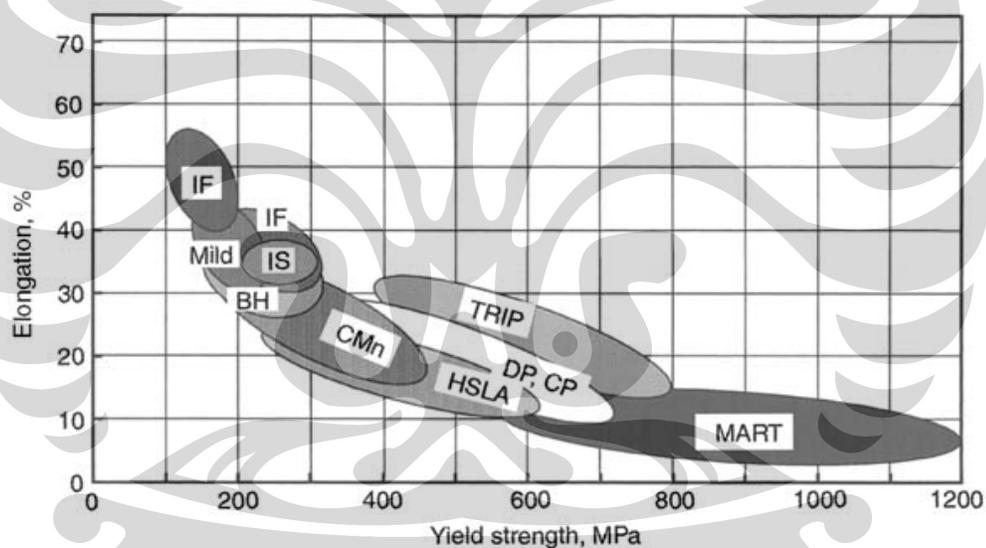
Baja karbon rendah merupakan baja dengan kandungan karbon yang kurang dari 0.25% dan diproduksi cukup banyak dibanding produk baja lainnya setiap tahun. Komponen mikrostruktur utama dari baja karbon rendah adalah *ferrite equiaxed* atau poligon tetapi perkembangan saat ini telah menambahkan komponen mikrostruktur lainnya. Mikrostruktur yang mengandung *ferrite* biasanya memiliki kekuatan yang rendah, namun dengan penambahan paduan ataupun beberapa proses tambahan dapat meningkatkan kekuatan baja karbon rendah.



Gambar 2.3 Transformasi Fasa pada Baja Karbon Rendah^[7]

Aplikasi penggunaan material ini biasanya digunakan sebagai pelat untuk pipa, industri otomotif dan baja struktural pada pembuatan jembatan atau bangunan yang membutuhkan mampu bentuk dan mampu las yang baik serta kombinasi yang baik antara kekuatan dan ketangguhan. Kadar karbon untuk baja yang baik kemampubentukannya (highformability) sangatlah rendah, kurang dari 0.10% C, dengan kadar manganese maksimal hingga 0.4% Mn sedangkan untuk produk baja struktural, kadar karbon ditingkatkan hingga kira-kira 0.30%, dengan kadar manganese yang lebih besar hingga 1.5%

Beberapa jenis baja karbon rendah yang telah dikembnagkan adalah *hot-rolled low-carbon steels*, *cold-rolled and annealed low-carbon steels*, *interstitial-free* atau *ultra-low carbon steels*, *controlledrolled-microalloyed steels (high-strength low-alloy steels)*, *dual-phase steels*, dan baja TRIP^[8].



Gambar 2.4 Kombinasi Elongasi dan Kekuatan untuk Berbagai Jenis Baja Karbon Rendah^[8]

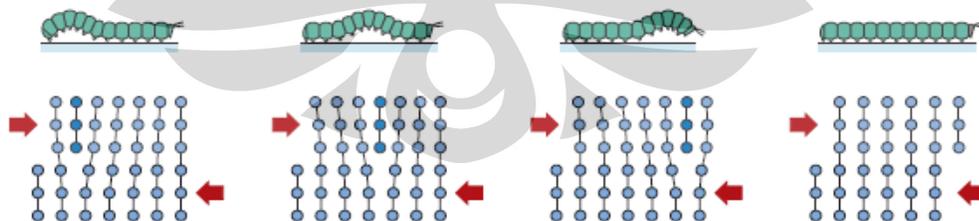
2.3 Proses Deformasi Plastis

Deformasi adalah perubahan dimensi atau bentuk akibat suatu beban. Deformasi disebabkan oleh aksi mekanik dari beban eksternal atau berbagai macam proses secara fisik. Proses deformasi terdiri dari beberapa tahap yang

behubungan yaitu deformasi elastis, deformasi plastis dan perpatahan. Deformasi elastis suatu material merupakan kemampuan untuk dapat kembali pada posisi atau bentuk awal setelah deformasi ketika tekanan atau beban dihilangkan, sedangkan deformasi plastis berarti material tersebut mengalami tingkat deformasi yang permanen tanpa mengalami perpatahan pada saat diberi beban tertentu deformasi plastis terjadi setelah batas elastis terlampaui

Deformasi plastis merupakan hal yang sangat penting untuk proses forming, shaping, extruding dan berbagai macam proses canai hangat maupun canai dingin sehingga berbagai macam logam dapat dibuat dalam produk lain sesuai dengan ukuran dan bentuk yang diinginkan yang dipengaruhi oleh aplikasi tekanan, panas ataupun keduanya^[9]. Deformasi plastis juga dapat diklasifikasikan sebagai suatu perlakuan yang dilakukan pada proses canai panas atau canai dingin terhadap logam. Pada canai panas terjadi proses rekristalisasi yang berlangsung secara bersamaan dengan proses deformasi, sedangkan pada canai dingin tidak terjadi proses rekristalisasi. Deformasi plastis dapat terjadi melalui *slip* ataupun *twinning*.

Deformasi plastis berhubungan dengan pergerakan sejumlah dislokasi^[7]. 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 *slip*. Pergerakan dislokasi dapat disamakan dengan cara bergerak yang dilakukan oleh ulat bulu seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.5



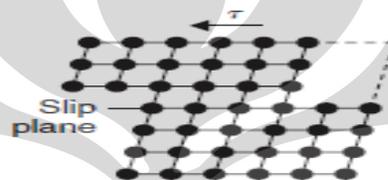
Gambar 2.5 Analogi Pergerakan Dislokasi^[7]

Semua logam dan paduannya memiliki sejumlah dislokasi yang didapat selama proses solidifikasi, deformasi plastis dan pengaruh *thermal stress* akibat

Universitas Indonesia

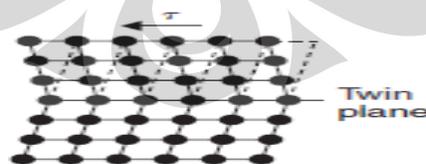
dari pendinginan cepat. Jumlah dislokasi atau kepadatan dislokasi pada suatu material merupakan total panjang dislokasi per satuan volume atau sama dengan jumlah dislokasi yang memotong luas area tertentu dari daerah acak. Satuannya mm dislokasi per mm^3 atau hanya mm^{-2} . Untuk material yang terdeformasi cukup besar kepadatan dislokasinya bisa mencapai 10^9 - 10^{10} mm^{-2} [7].

Pada saat terjadinya proses *slip* (gambar 2.6), setengah bagian atas kristal bergerak di atas setengah bagian atas sepanjang bidang kristalografi yang disebut bidang *slip*. Melalui cara tersebut atom bergerak terus dengan sejumlah vektor kisinya sehingga kontinuitas dari kisi tetap terjaga.



Gambar 2.6 *Slip* pada Kristal^[10]

Deformasi plastis pada beberapa material metalik dapat terjadi oleh pembentukan dari *mechanical twins* atau *twinning*. Tegangan yang dibutuhkan untuk terjadinya deformasi *twinning* umumnya cukup besar dibandingkan pada deformasi *slip*. Selama proses *twinning*(gambar 2.7), pergerakan atom tidak seluruhnya merupakan vektor kisi dan kisi dihasilkan pada daerah terdeformasi walaupun sama dengan kisi induk yang berorientasi pada hubungan yang kembar. Twinning terjadi pada logam dengan struktur kristal BCC dan HCP pada temperatur yang rendah dan laju pembebanan yang tinggi^[7].

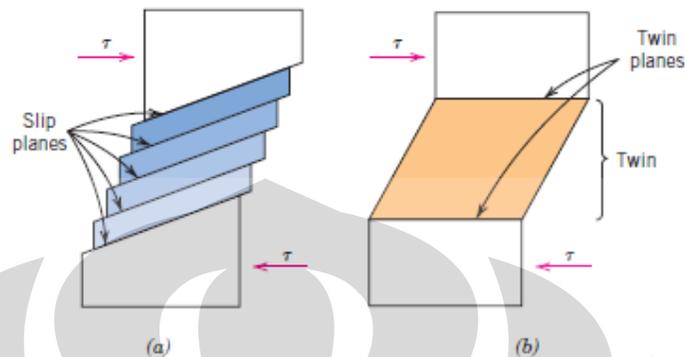


Gambar 2.7 *Twinning* pada Kristal^[10]

Perbedaan antara deformasi slip dan twinning pada gambar 2.8 dengan dilakukan shear stress. Pada *slip*, orientasi kristalografi bagian bawah dan atas

Universitas Indonesia

bidang slip tetap sama saat sebelum maupun sesudah deformasi, sedangkan pada *twinning* akan ada reorientasi tepat pada bidang *twin*.



Gambarr 2.8 Perbedaan Slip dan Twinning^[7]

2.4 Pengaruh Ukuran Butir Terhadap Kekerasan

Ukuran butir atau rata-rata diameter butir pada logam polikristalin akan mempengaruhi sifat-sifat mekanik logam tersebut^[7]. Butir yang lebih halus lebih keras dan kuat dibandingkan butir yang lebih kasar karena butir yang lebih halus memiliki total batas butir yang lebih banyak untuk menghalangi pergerakan dislokasi. Pengaruh ukuran butir terhadap kekuatan suatu material berdasarkan persamaan Hall-Petch adalah sebagai berikut^[7] :

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

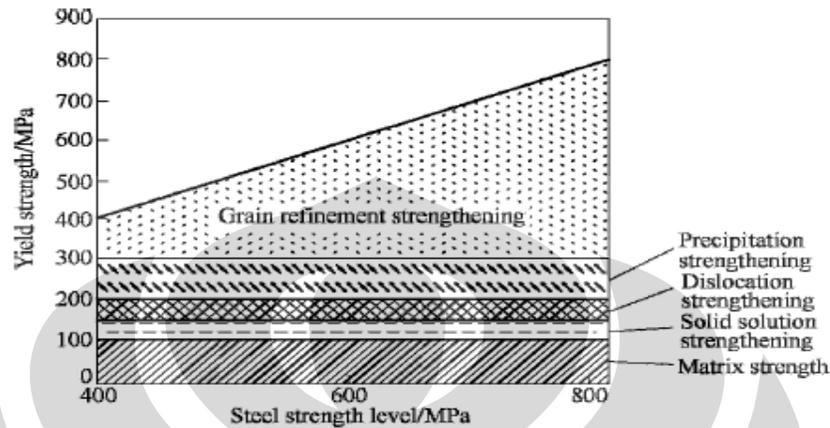
Pada persamaan Hall-Petch di atas, σ_y adalah tegangan luluh baja, d adalah diameter butir rata rata, serta σ_0 dan k_y adalah konstanta untuk material tertentu. Persamaan di atas tidak berlaku untuk material polikristal dengan butir yang sangat besar dan dengan butir yang amat sangat halus. Kekuatan material sebanding dengan kekerasannya sesuai dengan persamaan^[7] :

$$TS \text{ (Mpa) } = 3.45 \times HB \quad (2.2)$$

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

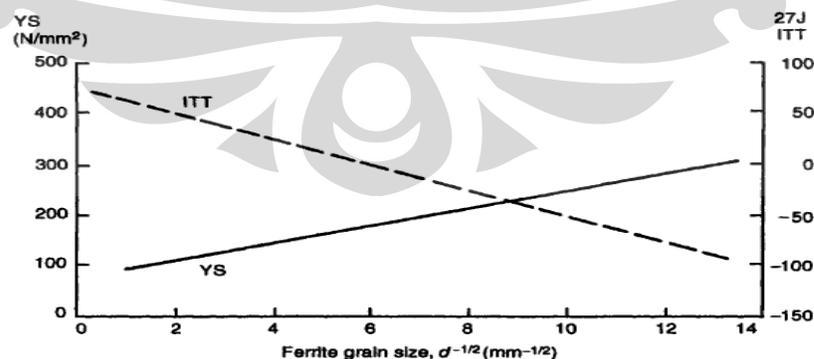
Pada gambar 2.9 dapat dilihat bahwa kekuatan baja meningkat lebih baik dengan melakukan penghalusan butir. Semakin meningkatnya kekuatan maka kekerasan pun akan meningkat. Proses penghalusan butir sangat berbeda bila

dibandingkan dengan metode penguatan lainnya dimana pada proses penguatan dengan metode tersebut tidak hanya meningkatkan kekuatan tetapi juga tetap mempertahankan agar ketangguhan tidak menurun^[11].



Gambar 2.9 Skema efek dari variasi penguatan material^[11]

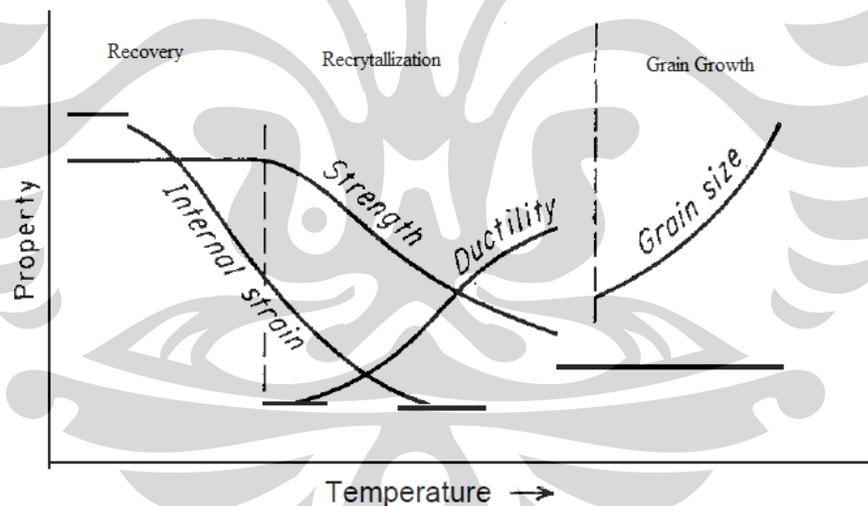
Penguatan baja dengan dislokasi, presipitat dan kandungan pearlite dari mikrostruktur *ferrite* memang dapat meningkatkan kekuatan tetapi juga akan meningkatkan temperatur transisi sehingga menurunkan keuletan baja. Namun dengan butir yang lebih halus akan meningkatkan tekanan perpatahan ulet dan menurunkan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



Gambar 2.10 Pengaruh Ukuran Butir *Ferrite* terhadap Kekuatan dan Ketahanan Impak^[12]

2.5 Recovery, Rekristalisasi, dan Pertumbuhan Butir

Deformasi plastis yang dilakukan terhadap suatu material polikristalin pada temperatur yang relatif rendah ataupun hingga temperatur yang tinggi menghasilkan perubahan mikrostruktur dan sifat-sifat yang melibatkan perubahan bentuk butir, pengerasan regangan (*strain hardening*) dan peningkatan pada kepadatan dislokasi (Callister 1997). Beberapa sisa energi internal tersimpan dalam material sebagai energi regangan (*strain energy*) yang berhubungan dengan area tegangan (*tensile*), tekan (*compressive*), dan geser (*shear*) di sekitar dislokasi yang baru terbentuk. Kecenderungan sifat penyimpanan energi internal tersebut dapat dihilangkan setelah tahap canai dingin dengan perlakuan panas seperti proses *annealing*. Penghilangan energi tersebut dilakukan dengan dua proses berbeda yang terjadi pada temperatur tertentu yang merupakan proses rekoveri dan rekristalisasi kemudian diikuti oleh pertumbuhan butir. Perubahan sifat selama untuk masing-masing proses dapat dilihat pada gambar 2.11.

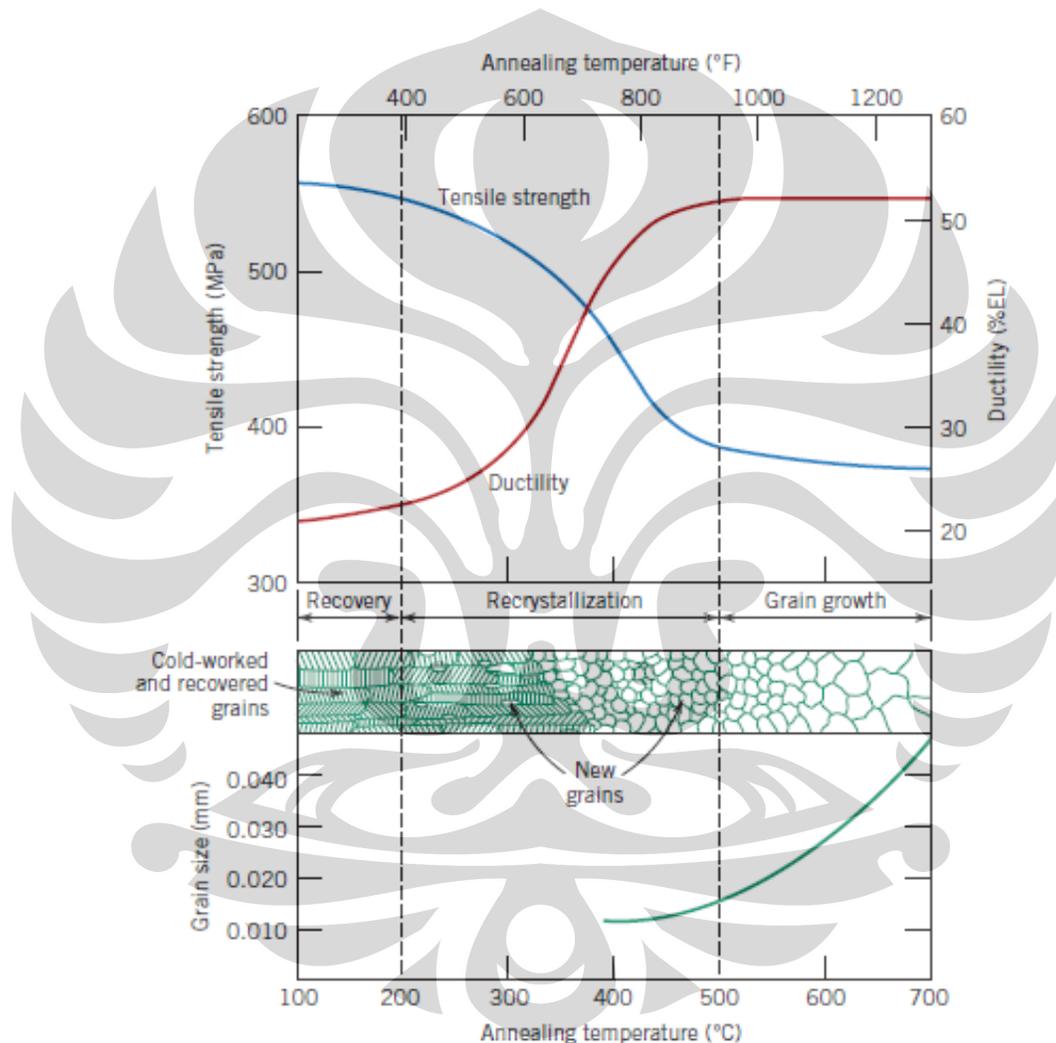


Gambar 2.11 Perubahan Sifat pada Proses *Recovery*, Rekristalisasi dan Pertumbuhan Butir^[13]

2.5.1 Recovery

Recovery merupakan proses penghilangan beberapa energi regangan internal yang berasal dari proses canai dingin melalui proses perlakuan panas^[7].

Proses recovery biasanya terjadi pada temperatur yang rendah tanpa menyebabkan perubahan berarti pada mikrostruktur dan hanya menghasilkan pengurangan kekuatan pada material. Perubahan yang selama proses ini terjadi yaitu pada ketahanan listrik dan koefisien temperatur material yang dilakukan canai dingin tersebut. Gambar 2.12 menunjukkan perbandingan antara proses recovery, rekristalisasi dan pertumbuhan butir



Gambar 2.12 Skema Proses *Recovery*, Rekristalisasi dan Pertumbuhan Butir^[7]

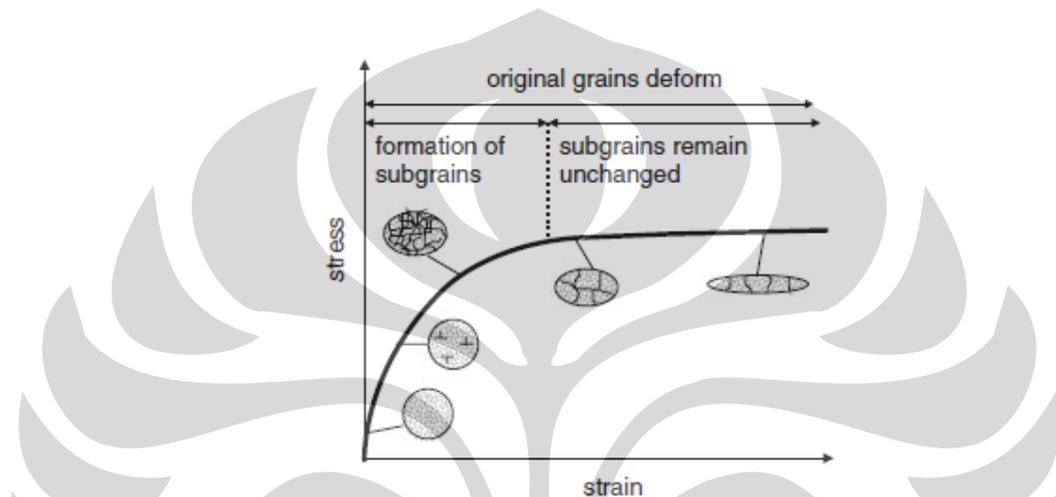
Ketika mengalami perlakuan panas, mikrostruktur suatu material akan mengalami perubahan, skema perubahan mikrostruktur tersebut dapat dilihat pada gambar 2.13. Energi aktivasi yang dibutuhkan untuk terjadi recovery

Universitas Indonesia

tergantung pada derajat canai dingin material. Semakin besar deformasi maka akan semakin kecil energi aktivasi yang dibutuhkan. Temperatur recovery (T_{GR}) berhubungan dengan temperatur rekristalisasi (T_R) pada material tertentu berdasarkan persamaan^[2] :

$$T_{GR} = T_R - 300 \text{ } ^\circ\text{C} \quad 2.4$$

$$T_R = 0.4 T_M \quad 2.5$$



Gambar 2.13 Evolusi Mikrostruktur Selama Deformasi Panas yang Menunjukkan terjadinya *Recovery*

2.5.2 Rekristalisasi

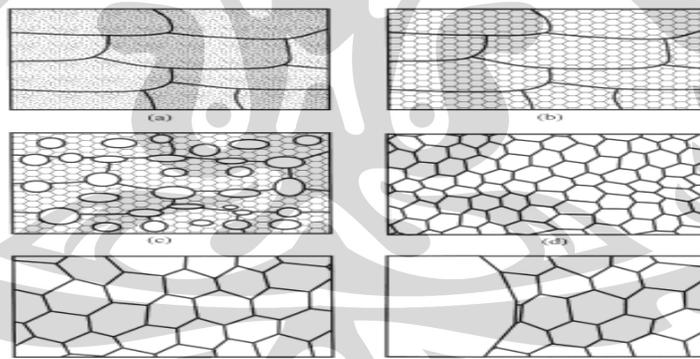
Rekristalisasi adalah proses pembentukan butir baru yang bebas tegangan dan *equiaxed*. Ketika tahap rekovery akan berakhir, pembentukan inti dari butir baru akan mulai terjadi. Proses rekristalisasi mengarah pada pembentukan formasi butir yang bebas energi internal dalam material yang telah mengalami proses canai dingin (Callister 1997). Ketika semua butir terdahulu yang telah digantikan oleh butir baru yang bebas regangan, maka dapat dikatakan material tersebut telah terekristalisasi dengan sempurna (*fully recrystallized*).

Agar dapat lebih memahami proses rekristalisasi, maka dibuat suatu perumusan yang disebut sebagai Hukum Rekristalisasi. Kumpulan pernyataan kualitatif ini berdasarkan sejumlah besar penelitian, prediksi efek dari mikrostruktur awal (ukuran butir) dan parameter proses (besar deformasi dan

temperatur anil) terhadap waktu rekristalisasi serta ukuran butir setelah deformasi dilakukan. Hukum Rekrstalisasi yang dimaksud adalah sebagai berikut^[15] :

- 1) Deformasi minimum dibutuhkan untuk memulai rekristalisasi
- 2) Temperatur rekristalisasi menurun seiring dengan waktu anil yang meningkat
- 3) Temperatur rekristalisasi menurun seiring dengan peningkatan tegangan
- 4) Ukuran butir yang terekristalisasi tergantung pada besarnya deformasi. Ukuran butir akan semakin kecil pada deformasi yang tinggi
- 5) Untuk besar deformasi tertentu, temperatur rekristalisasi akan meningkat :
 - a) Apabila ukuran butir awal lebih besar
 - b) Temperatur deformasi yang lebih tinggi

Pada proses recovery biasanya hanya melibatkan perbaikan sebagian pada sifat karena struktur dislokasi tidak hilang sepenuhnya tapi hanya mencapai keadaan *metastable* seperti pada gambar 2.15.b. Proses perbaikan lebih lanjut terjadi pada proses rekristalisasi dengan terbentuknya butir yang bebas regangan atau struktur yang telah mengalami recovery seperti pada gambar 2.15.c.

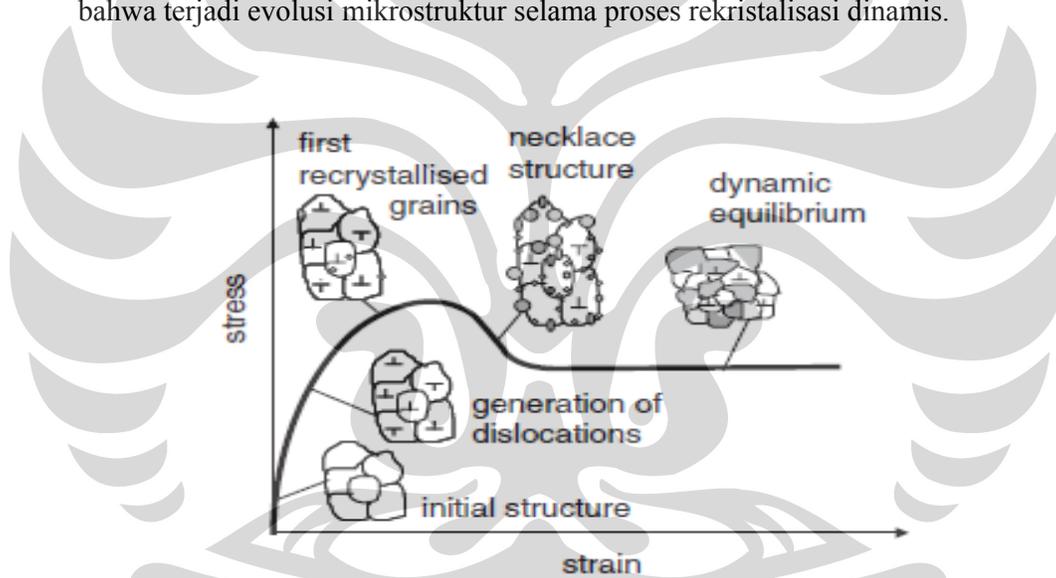


Gambar 2.14 Proses pada Annealling (a) Deformed state, (b) Recovered, (c) Partially recrystallized, (d) Fully recrystallized, (e) Grain growth, (f) Abnormal Grain Growth^[15]

Pada gambar 2.15.d terlihat bahwa butir bertumbuh dan memakan butir lama sehingga menghasilkan struktur butir yang baru dengan kepadatan dislokasi yang rendah. Meskipun rekristalisasi menghilangkan dislokasi, material masih

mengandung batas butir sehingga masih tidak stabil secara termodinamik. Proses selanjutnya terjadi pertumbuhan butir dimana butir yang lebih kecil akan tereliminasi, butir yang lebih besar akan tumbuh dan batas butir menerima konfigurasi energi yang lebih rendah seperti pada gambar 2.15.e.

Pada canai panas, proses rekristalisasi yang terjadi dapat dibagi menjadi dua, yaitu rekristalisasi dinamis dan rekristalisasi statis. Seperti telah dijelaskan bahwa canai panas adalah proses deformasi dan rekristalisasi pada saat yang hampir bersamaan. . Proses rekristalisasi yang terjadi saat material sedang dideformasi disebut rekristalisasi dinamis, sedangkan rekristalisasi statis terjadi sesaat setelah material mengalami deformasi. Pada gambar 2.15 kita dapat lihat bahwa terjadi evolusi mikrostruktur selama proses rekristalisasi dinamis.

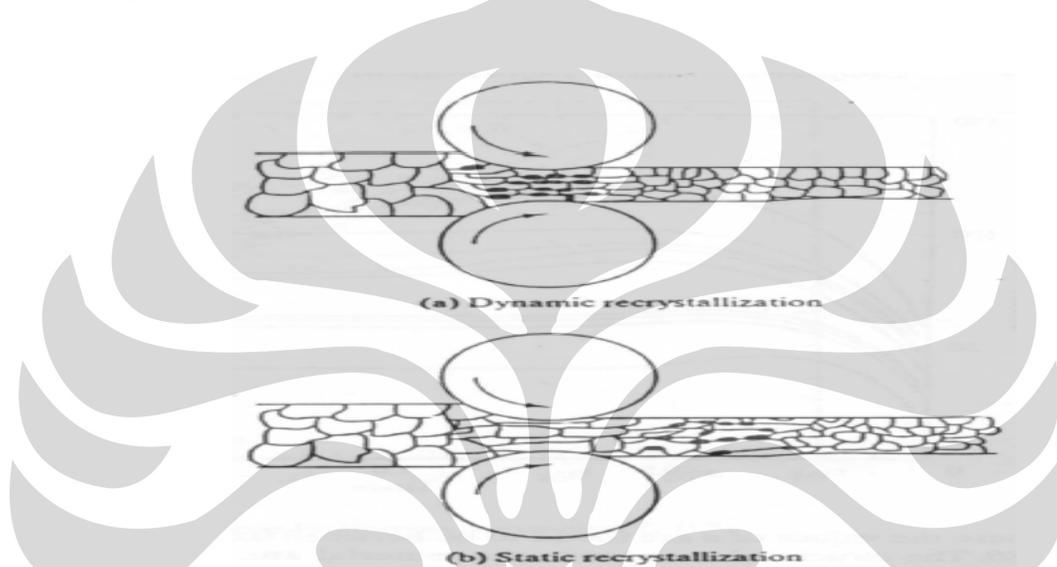


Gambar 2.15 Evolusi Mikrostruktur selama Rekristalisasi Dinamis^[14]

Perbedaan antara proses rekristalisasi dinamis dan rekristalisasi statis diilustrasikan pada gambar 2.16. Pada rekristalisasi dinamis, saat material mengalami deformasi, terjadi regangan di dalam material, dan apabila regangan tersebut adalah regangan kritis 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. Sama seperti proses rekristalisasi dinamis, pada

Universitas Indonesia

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. Untuk baja karbon rendah, deformasi dan rekristalisasi dari austenite memiliki dua karakteristik, yaitu rekristalisasi yang berjalan sangat cepat dan non rekristalisasi austenite yang ada pada range temperatur yang sempit^[16].



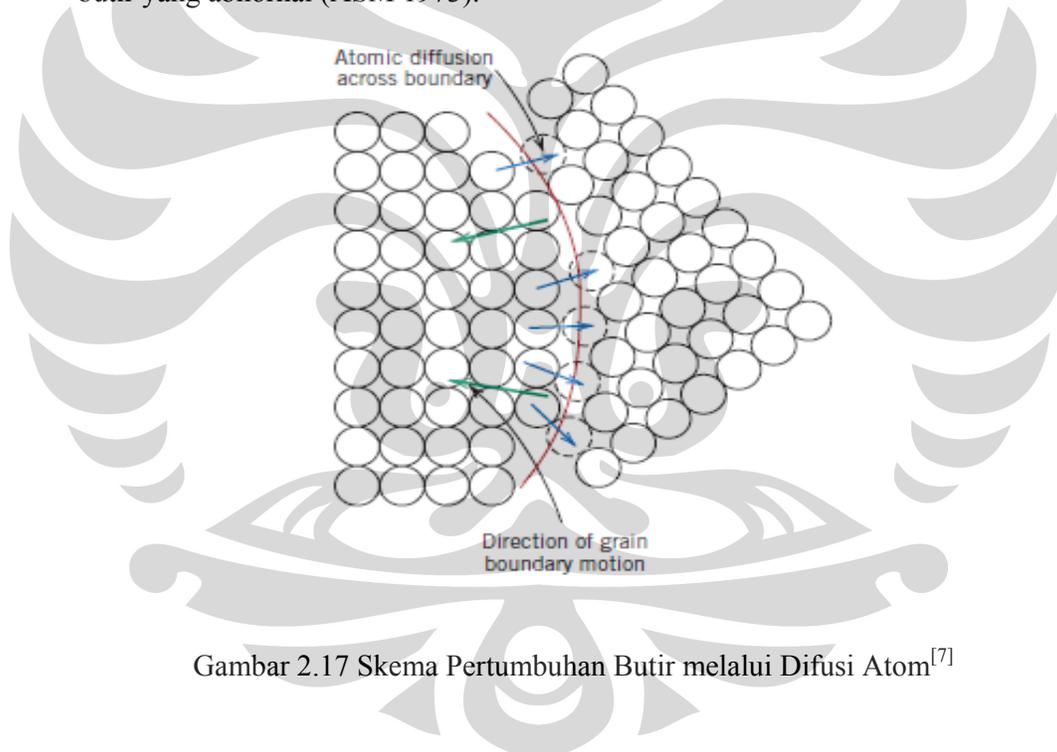
Gambar 2.16 Perbandingan Antara Rekristalisasi Dinamik dan Statik^[25]

2.5.3 Pertumbuhan Butir

Proses pertumbuhan butir dimulai ketika proses rekristalisasi telah selesai dimana butir yang bebas regangan selanjutnya akan tumbuh jika spesimen baja dibiarkan pada temperatur yang tinggi. Pertumbuhan butir biasanya merupakan lanjutan setelah proses rekoveri (recovery) dan proses rekristalisasi (recrystallization). Hal tersebut ditandai dengan pengurangan secara bertahap dari kekuatan material sebagai akibat dari membesarnya ukuran butir. Temperatur tinggi akan menyebabkan meningkatnya energi getaran termal, sehingga mempercepat atom berdifusi melalui batas butir dari butir yang kecil menuju yang lebih besar. Oleh karena itu didapat ukuran besar butir yang relatif besar setelah

proses pertumbuhan butir ini selesai. Karena ukuran butir yang membesar, maka akan terjadi menurunnya sifat mekanis seperti kekerasan dan tegangan luluh. Setelah proses rekristalisasi selesai, butir dengan bebas regangan selanjutnya akan tumbuh jika spesimen baja dibiarkan pada temperatur yang tinggi.

Pertumbuhan butir terjadi oleh migrasi dari batas butir. Pada dasarnya tidak semua butir dapat tumbuh, tetapi butir yang lebih besar akan menghabiskan butir lebih kecil yang menyusut^[7]. Arah pergerakan batas butir dan atom saling berlawanan hal tersebut dapat dilihat pada gambar 2.17. Penambahan proses anil (extended annealing) pada temperature tinggi dapat menyebabkan beberapa butir tumbuh menjadi butir dengan ukuran yang sangat besar, yang mana dikenal sebagai rekristalisasi sekunder (secondary recrystallization) atau pertumbuhan butir yang abnormal (ASM 1973).



Gambar 2.17 Skema Pertumbuhan Butir melalui Difusi Atom^[7]

2.6 Thermo-Mechanical Controlled Processing(TMCP)

Pada awalnya, pengerolan pada canai panas hanya digunakan untuk mendapatkan dimensi nominal dari material baja seperti ketebalan, lebar dan panjang. Namun, persyaratan kualitas yang tinggi sangat dibutuhkan untuk aplikasi penggunaan material baja, sehingga perlakuan panas seperti *normalizing*

atau *Quench and Tempering* perlu dilakukan sebagai proses lanjutannya. Pada saat ini, dengan persyaratan kualitas yang lebih tinggi lagi, proses baru untuk menghasilkan produk baja dengan kekuatan dan ketangguhan yang baik, yaitu proses TMCP^[19]. TMCP merupakan kombinasi dari proses rolling dan pendinginan yang terkontrol^[11]. Tujuan utama dari perlakuan TMCP adalah untuk menghaluskan butir *ferrite* yang akan memberikan peningkatan terhadap kekuatan dan ketangguhan dari baja^[18].

Thermomechanical Controlled Process (TMCP) dapat dikarakteristikan sebagai proses yang melibatkan panas / heat dan deformasi. TMCP merupakan teknik perlakuan logam yang didesain untuk meningkatkan kekuatan sekaligus ketangguhan. Peningkatan kekuatan dan ketangguhan dalam TMCP didapat dari adanya mekanisme pengecilan butir dengan proses deformasi panas yang terkontrol (*controlled rolling*).

TMCP juga merupakan istilah kolektif pada beberapa proses yang berbeda untuk menghasilkan baja dengan butir halus yang memiliki nilai kekuatan tinggi, ketangguhan yang baik dan kemampulan yang sempurna^[20]. Pada baja TMCP, sifat mekanis (*mechanical properties*) terutama ditentukan melalui kombinasi dari perlakuan mekanis (*mechanical working*), proses rekoveri (*recovery processes*), rekristalisasi (*recrystallisation*), dan pertumbuhan butir (*grain growth*)^[21].

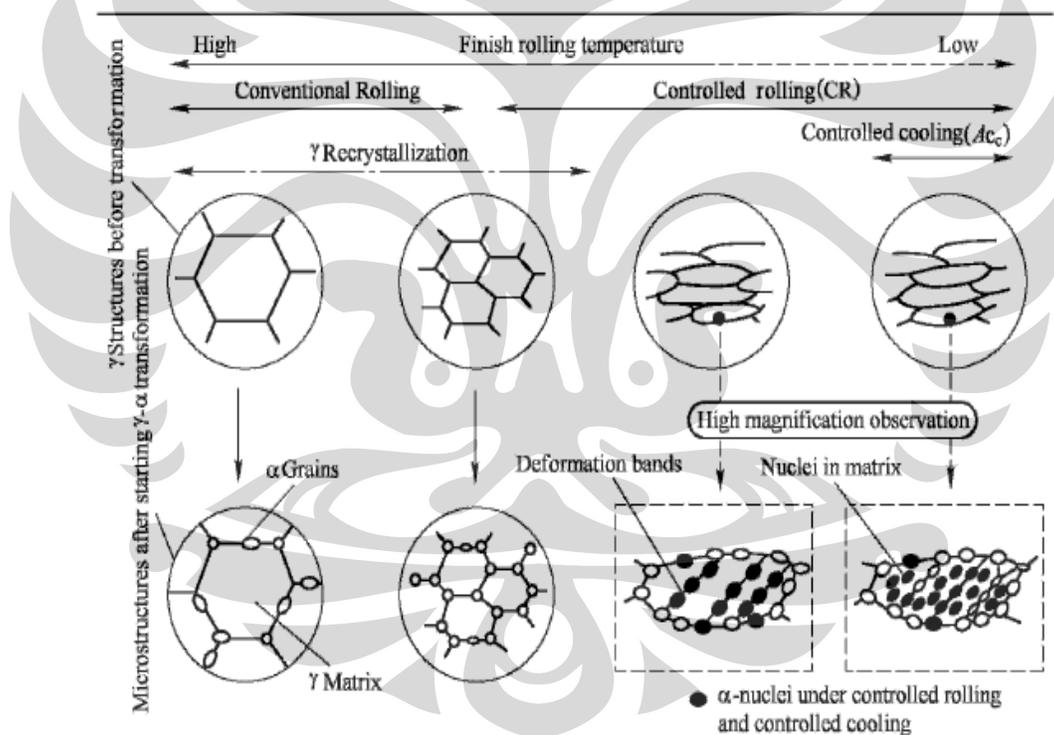
Thermo-mechanical Controlled Processing (TMCP) berkontribusi terhadap perkembangan butir yang halus pada baja yang merupakan salah satu metode untuk menghasilkan material baja dengan kekuatan dan ketangguhan yang baik^[11]. Penghalusan mikrostruktur pada TMCP didapat melalui^[17]:

- 1) Reduksi pada ukuran austenite yang terekristalisasi
- 2) Meningkatkan daerah nukleasi untuk transformasi $\gamma \rightarrow \alpha$ dengan pengerjaan akumulatif dibawah temperatur rekristalisasi
- 3) Meningkatkan *driving force* transformasi $\gamma \rightarrow \alpha$ dengan pendinginan yang dipercepat

Mekanisme penghalusan butir pada pengerolan terkendali (*controlled rolling*) merupakan rekristalisasi pada austenit selama deformasi panas. Proses ini

dipengaruhi oleh komposisi paduan, temperatur pengerolan, dan derajat deformasi yang berlangsung selama pengerolan. Bila austenit tidak memiliki partikel fasa kedua maka akan menyebabkan mekanisme penghalusan butir menjadi terbatas.

Pada proses TMCP, slab baja dipanaskan hingga temperatur yang digunakan pada canai panas yaitu sekitar 1200°C. Kemudian diikuti proses deformasi panas yang dilakukan pada temperatur yang lebih rendah. Deformasi plastis pada temperatur lebih rendah menghasilkan ukuran butir yang halus (*fine grain sizes*) dan menghambat terjadinya presipitasi. Selanjutnya masuk ke dalam proses pendinginan. Pendinginan tersebut yang mengarahkan baja pada kisaran temperatur transisi sehingga hasil transformasi austenit ke ferrit menghasilkan butir ferrit halus (*fine ferrite grains*) dan penyebaran presipitat yang baik.



Gambar 2.18 Perbedaan struktur mikro antara proses konvensional dan proses TMCP^[11]

Untuk beberapa baja TMCP, tahap akhir pendinginan, selama transformasi telah terjadi sepenuhnya, dipercepat dengan pendinginan air untuk menghasilkan

ukuran butir yang lebih halus. Pendinginan yang dipercepat (accelerated cooling) terkadang dapat menghasilkan formasi bainit sebagai pengganti formasi ferrit.

Berbagai macam proses perlakuan TMCP dapat dibagi menjadi tiga kategori besar, yaitu ^[22]:

- 1) Pengerolan terkendali dibawah temperatur *normalising*, yang merupakan fasa austenitic sepenuhnya (diatas temperatur Ar 3) kemudian diikuti dengan pendinginan cepat dengan kecepatan pendinginan sekitar 10°C/sec. Tujuan dari proses ini adalah untuk memperhalus ukuran butir dengan pengerolan terkendali (*controlled rolling*) dan untuk meningkatkan kekuatan dengan menekan formasi ferrit dan pearlit untuk menghasilkan bainit yang kuat dan tangguh.
- 2) Pengerolan terkendali dilakukan pada temperatur diatas Ar 3 dan dibawah temperatur *normalising*, pada daerah austenit ferrit tercampur. Sebagai tambahan pada penghalusan butir austenit, butir terekristalisasi menjadi pipih dan penukleasian *ferrite* halus didapatkan melalui deformasi. Pada temperatur diatas Ar 1, pengerolan terkendali dihentikan dan diikuti pendinginan cepat menuju temperatur ruang atau temperatur intermediate.
- 3) Pengerolan terkendali dilakukan sebagai bagian proses awal (preliminary), diikuti pendinginan dan pemanasan kembali hingga diatas temperatur Ar₃ dan kemudian pendinginan cepat hingga dibawah temperatur Ar₁. Tujuan dari teknik ini adalah untuk membentuk ukuran butir paling halus pada equiaxed austenite (*finest equiaxed austenite grain size*) sebelum pengerolan terkendali dimulai.

2.7 Canai Hangat

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 working) dan temperatur canai dingin (cold working). Berdasarkan range temperatur operasi canai hangat, setelah terjadi deformasi plastis, material mengalami *strain hardened* dan rekristalisasi secara parsial[jurnal]. Melalui

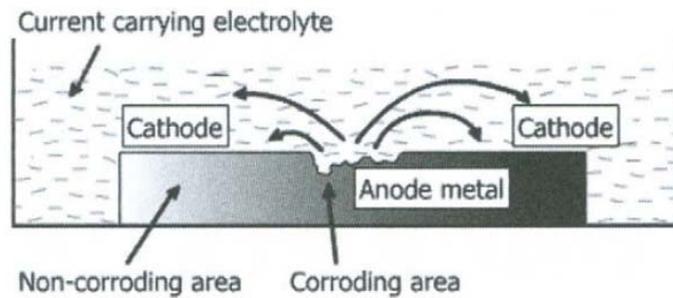
proses canai hangat ini akan dihasilkan struktur mikro yang halus serta akan mengalami pembentukan *subgrain* berukuran *micrometer* dan *sub-micrometer* pada butir yang berukuran lebih besar / kasar. Sifat mekanis dari material akan meningkat dengan adanya pembentukan *sub-grain*. Deformasi plastis yang terjadi memberikan kontribusi pada pembentukan *grain sub-division* dan *local dynamic recovery*. Proses rekristalisasi akan terjadi pada canai hangat sehingga berkontribusi terhadap proses penghalusan butir.

Proses canai hangat berada pada range temperatur $500^{\circ}\text{C} - 800^{\circ}\text{C}$ [3] dan merupakan metode yang sangat menarik untuk dilakukan karena menawarkan berbagai keuntungan. Jika dibandingkan dengan canai dingin / *cold working*, metode ini membutuhkan *deformation forces* yang lebih rendah, dapat diaplikasikan pada baja dengan range yang luas, memberikan rasio deformasi yang lebih besar, menghasilkan deformasi yang lebih seragam terhadap daerah transversal dan menghasilkan mikrostruktur dengan tegangan sisa yang lebih rendah [23]. Lalu jika dibandingkan dengan canai panas / *hot working*, 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 [24].

2.8. Korosi

Korosi merupakan kerusakan pada logam yang disebabkan oleh reaksi logam tersebut dengan lingkungannya [26]. Kerusakan tersebut dapat berupa perubahan sifat, baik sifat fisik maupun sifat mekaniknya. Korosi pada logam terjadi karena adanya reaksi elektrokimia dengan lingkungannya dan mengakibatkan degradasi dari sifat-sifat logam tersebut.

Adapun lingkungan yang dimaksud dapat berupa larutan asam, air dan uap yang masing-masing mempunyai daya hantar listrik yang berbeda-beda. Ilustrasi suatu reaksi elektrokimia saat terjadinya korosi logam ditunjukkan pada gambar 2.19. Reaksi elektrokimia yang terjadi melibatkan perpindahan electron-elektron. Perpindahan elektron merupakan hasil reaksi redoks (reduksi-oksidasi).



Gambar 2.19 Mekanisme Korosi pada Logam^[27]

Mekanisme korosi melalui reaksi elektrokimia melibatkan reaksi anodik dan reaksi katodik. Anoda merupakan logam yang akan mengalami korosi. Pada reaksi anoda, logam terkorosi dan berubah menjadi ion. Reaksi anodik yang terjadi pada proses korosi logam yaitu :



Proses korosi dari logam M merupakan proses oksidasi logam menjadi ion (n^{-}) dalam pelepasan n electron. Harga dari n bergantung dari logam yang terkorosi dan menunjukkan jumlah elektron yang hilang dari logam.

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

- $2H^{+} + 2e^{-} \rightarrow H_2$ (Suasana Asam)
- $O_2 + 4H^{+} + 4e^{-} \rightarrow 2H_2O$ (Suasana Asam)
- $2H_2O + O_2 + 4e^{-} \rightarrow 4OH^{-}$ (Suasana Asam dan Basa)
- $Fe^{3+} + e^{-} \rightarrow Fe^{2+}$ (Reduksi Ion Logam pada Suasana Garam Besi)
- $M^{2+} + 2e^{-} \rightarrow M$ (Deposisi Logam)

2.8.1 Korosi Pada Baja Karbon

Baja karbon mengandung karbon sekitar 1% dan paduan yang kembang dari 2%, meskipun memiliki ketahanan korosi yang terbatas tetapi banyak digunakan pada aplikasi di laut, pertambangan, nuklir, transportasi proses kimia, konstruksi

Universitas Indonesia

dan perlengkapan proses logam^[28]. Pemakaian baja karbon pada lingkungan-lingkungan tersebut memiliki masalah-masalah korosi yang unik.

Baja karbon rendah merupakan baja karbon yang mengandung 0.08% C hingga 0.28% C berdasarkan pertimbangan terhadap ketahanan korosi dan biasanya lebih tahan korosi dibandingkan dengan baja karbon sedang (0.28% - 0.55% C) maupun baja karbon tinggi (0.5% C – 1.0% C). Hal yang lebih penting pada baja karbon rendah ini adalah kemampulan dan mampu bentuk yang baik. Baja karbon cukup rentan terhadap serangan zat kimia agresif karena serangan yang terjadi sangat cepat. Namun, baja karbon telah sukses digunakan pada lingkungan yang korosif dan air.

Dua syarat yang dibutuhkan sebagai inisiasi terjadinya baja karbon rendah adalah air dan oksigen, setelah itu maka sejumlah variable lain dapat mempengaruhi proses korosi. Sebagai contohnya, suatu baja karbon rendah yang seluruhnya tercelup akan terkorosi lebih cepat pada air mengalir dibandingkan air yang diam tanpa adanya inhibitor tapi korosi akan melambat apabila digunakan inhibitor. Baja karbon sangat baik bila digunakan pada lingkungan yang kering dan udara di pedesaan tetapi laju korosi akan meningkat pada lingkungan dengan humiditas gara yang tinggi atau udara pada daerah industri. Masa pakai suatu baja karbon untuk boiler bisa hingga 25 tahun dengan lingkungan yang terkontrol^[28].

2.8.2. Hubungan antara Mikrostruktur terhadap korosi

Paduan merupakan campuran unsur-unsur yang sengaja ditambahkan untuk mendapatkan sifat-sifat yang diinginkan pada suatu material. Banyak paduan merupakan material yang tidak homogen dan bukan material murni tetapi merupakan campuran beberapa fasa. Mikrostruktur sebuah paduan dapat memiliki beberapa fasa dan distribusi serta jumlah fasa kedua diatur untuk mengembangkan sifat-sifat yang diinginkan. Setiap fasa memiliki karakteristik kristalografi dan komposisi kimia masing. Ketika struktur tersebut terekspose pada lingkungan yang korosif, maka setiap fasa memperlihatkan perilaku korosi yang berbeda.

Ukuran butir juga akan berpengaruh terhadap korosi suatu material. Butir suatu logam merupakan kristal yang seharusnya berukuran kecil agar diperoleh

ketangguhan yang baik, tetapi hal tersebut mengakibatkan bertambahnya jumlah batas butir (Gambar 2.20). Atom pada batas butir akan sangat mudah terkorosi karena tidak terikat secara kuat seperti ikatan atom yang terjadi di dalam butir.



Gambar 2.20 Butir *Ferrite* dan Batas butirnya di tsa dengan Nital 2% dan Perbesaran 300X ^[28]

Batas butir dapat bertindak sebagai tempat berkumpulnya atom pengotor yang tidak pas di dalam kristal. Difusi terjadi lebih cepat pada sepanjang batas butir dibandingkan di dalam butir pada tempertur sedang, sehingga atom terkumpul lebih cepat pada batas butir dan terbentuklah presipitat. Ketakseragaman yang ada inilah yang dapat memicu terjadinya korosi.[hvac]

Pada batas butir ini pula biasanya dislokasi terakumulasi, secara termodinamika korosi keadaan ini membuat energi pada batas butir menjadi lebih tinggi sehingga akan meningkatkan reaksi korosi.

2.8.3 Pengaruh Perlakuan Panas Terhadap Korosi

Banyak sifat mekanis material ditingkatkan dengan berbagai macam perlakuan panas. Tetapi sifat-sifat seperti kekerasan dan kekuatan sering dicapai dengan mengorbankan ketahanan korosinya. Sebagai contoh, kekerasan dan kekuatan baja martensitic berbanding terbalik dengan ketahanan korosi yang lebih rendah dibanding baja feritic ataupun austenitic. Kekuatan tinggi yang dicapai untuk baja penguatan endapan adalah melalui pembentukan endapan kedua selama pemanasan larutan dan proses *aging*. Endapan dengan sifat elektrokimia yang berbeda dari matriksnya memiliki efek yang jelek terhadap korosi^[28].

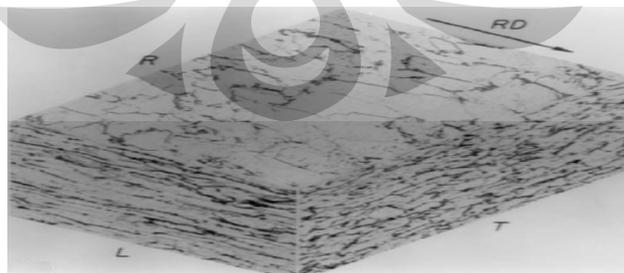
Canai dingin dapat mengakibatkan tegangan sisa yang membuat material rentan terhadap *stress corrosion cracking*. Peningkatan ketahanan korosi dapat

dicapai dengan melakukan proses annealing pada temperatur rekristalisasi sehingga terjadi stress relief tanpa memberikan efek berarti pada kekuatan material

2.8.4 Pengaruh Deformasi Pada Laju Korosi

Proses deformasi, seperti canai dingin maupun canai hangat merupakan cara yang dapat dilakukan untuk memodifikasi sifat suatu material. Perlakuan ini juga dapat merubah bentuk dan jenis mikrostruktur yang dibentuk. Proses canai dingin memang dapat meningkatkan kekuatan material, namun *vacancy* dan kepadatan dislokasi juga akan meningkat. Hal tersebut akan menyebabkan *impurities* terkonsentrasi pada dislokasi untuk menghasilkan sel korosi terlokalisasi yang akan memicu terjadinya korosi *pitting*. Proses canai dingin juga akan menghasilkan tegangan sisa yang membuat material menjadi semakin rentan terhadap *stress corrosion cracking*.

Proses deformasi pada logam akan mengubah bentuk dari material, misalnya pada proses *rolling* akan meratakan butir dan memanjangkan butir tersebut searah dengan arah *rolling* (gambar 2.21). Garis potong (transverse) yang memotong bagian logam yang sama menunjukkan bahwa butir telah diratakan pada arah vertikal, tetapi batas butir tidak searah dengan arah tersebut atau berada pada arah longitudinal. Garis potong (transverse) melalui pada logam canai dingin ini mengekspose lebih banyak batas butir dibandingkan arah yang longitudinal sehingga serangan korosi pada garis potong (transverse) akan lebih besar.



Gambar 2.21 Bagian Permukaan *Rolling*(R), Longitudinal (L), Transverse (T)
Baja Karbon Rendah dengan Proses Canai Dingin 65%^[26]

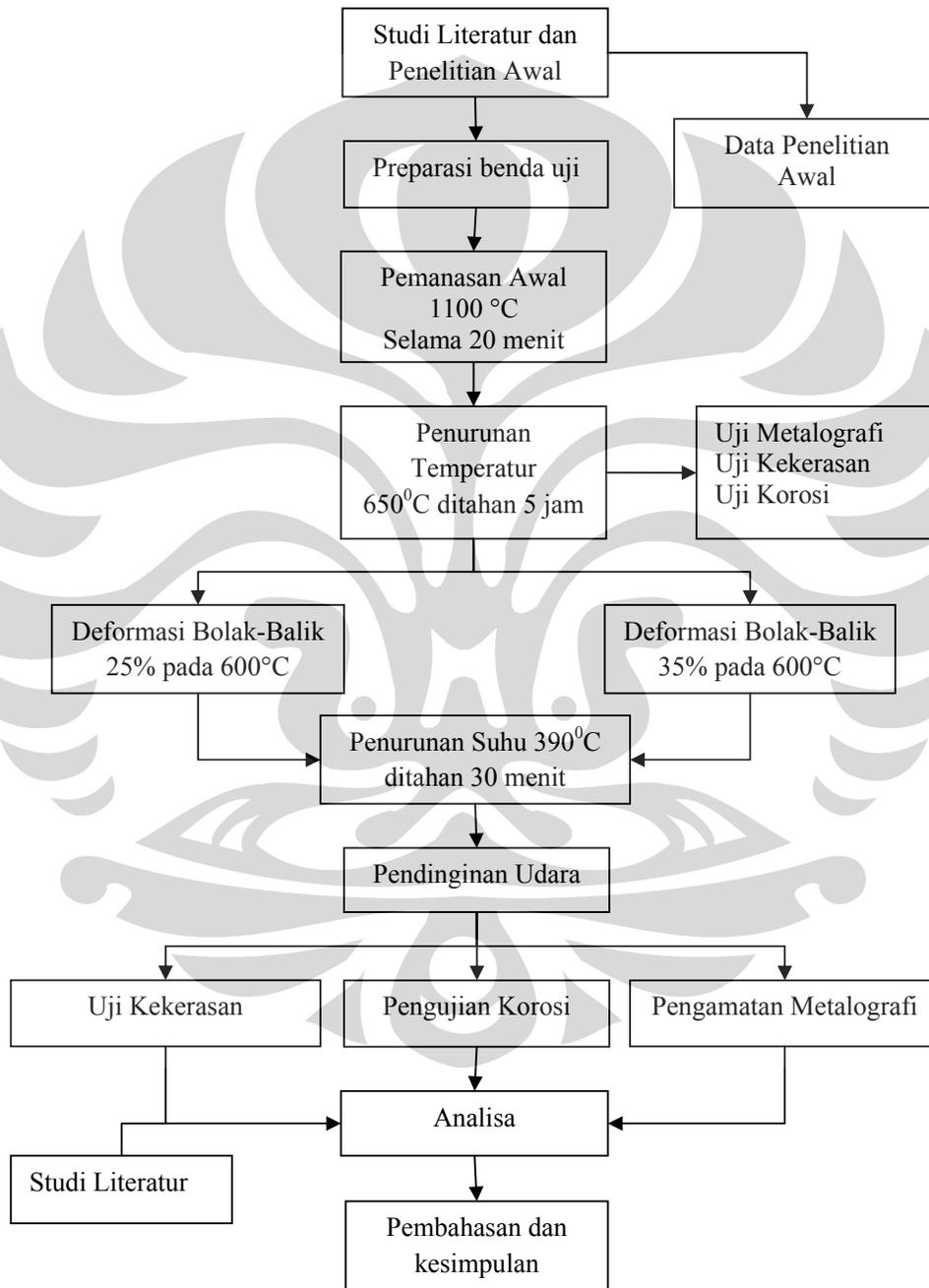
Pemberian deformasi menyebabkan meningkatnya besar tegangan yang dimiliki karena semakin rapatnya dislokasi yang merupakan cacat kristal. Peningkatan regangan akan berakibat pada sifat korosinya, dimana daerah pada suatu material yang memiliki tegangan yang lebih tinggi bersifat akan lebih anodic, sedangkan bagian yang kurang tergangannya akan bersifat katodik, karena adanya perbedaan ini korosi yang terjadi cenderung korosi galvanis.



BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Tahapan-tahapan proses penelitian dilihat pada diagram alir di bawah ini :



Gambar 3.1 Diagram Alir Proses Penelitian

3.2. Alat dan Bahan

3.2.1. Alat Dan Bahan

3.2.1.1. Alat

1. Mesin Roll
2. Mesin Pemanas / Oven Carbolite
3. Termokopel
4. Mesin Komputer Pengukur Temperatur
5. Alat uji keras Vickers
6. Jangka sorong
7. Mesin Amplas
8. Mesin Poles
9. Mikroskop Optik

3.2.2.1.2. Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah material Baja Karbon Rendah SS 400. Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah Baja Karbon Rendah yang disiapkan untuk dilakukan perlakuan panas kemudian dilakukan proses rolling pada temperatur hangat dengan variasi besar deformasi rolling. Setelah itu dilakukan uji kekerasan dan uji ketahanan korosi

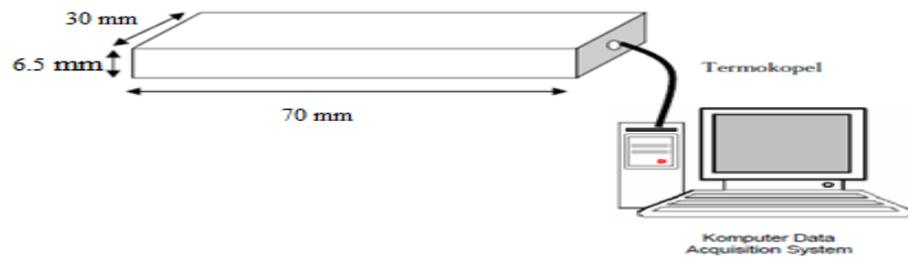
3.3. Prosedur Penelitian

3.3.1. Pemilihan Material

Berdasarkan relevansi antara studi literatur maka material yang akan digunakan sebagai spesimen uji adalah SS 400 yang merupakan baja karbon rendah.

3.3.2. Preparasi Sampel

Sampel yang digunakan pada penelitian ini dipotong sehingga berbentuk. Spesimen lubang 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 termokopel.

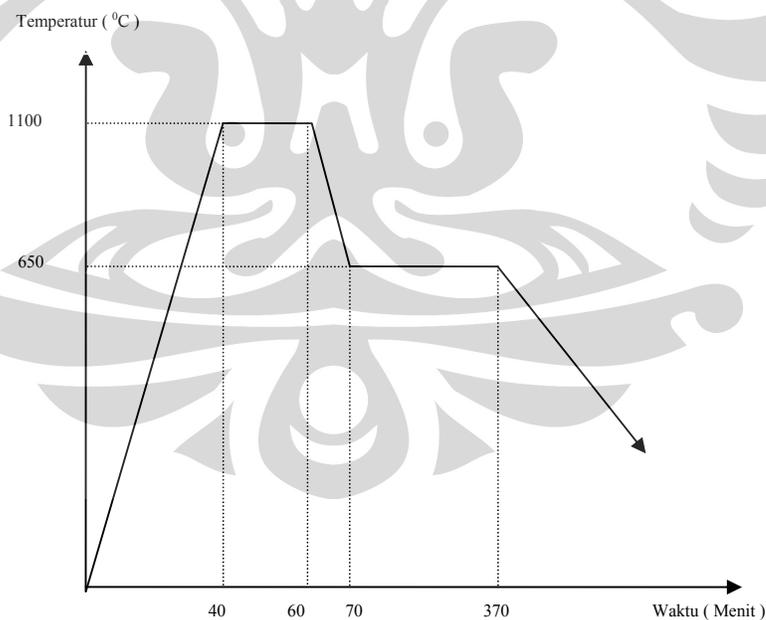


Gambar 3.2 Ilustrasi Benda Uji dan Pemasangan Termokopel

3.3.3. Proses Termomekanikal (TMCP) dan Canai Hangat

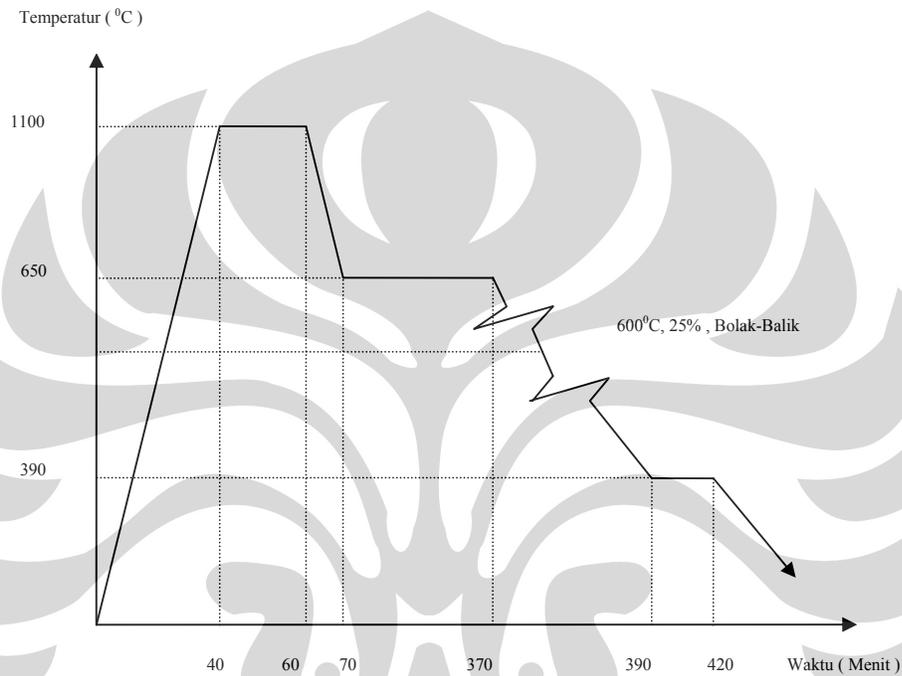
Seluruh spesimen yang akan diukur disiapkan untuk berbagai tes, kemudian masing-masing dimasukkan ke dalam *furnace* atau dapur perapian dengan untuk dipanaskan hingga suhu 1100°C . Kemudian dilanjutkan dengan melakukan canai dengan besaran deformasi 25% dan 35% bolak-balik pada temperatur pengerjaan hangat. Penelitian ini juga terbagi atas beberapa variasi proses, yaitu :

1. Spesimen A dipanaskan hingga suhu 1100°C lalu ditahan selama 30 menit, kemudian suhu dibiarkan turun hingga 650°C dan ditahan selama 5 jam. Spesimen ini tidak dilakukan proses deformasi.



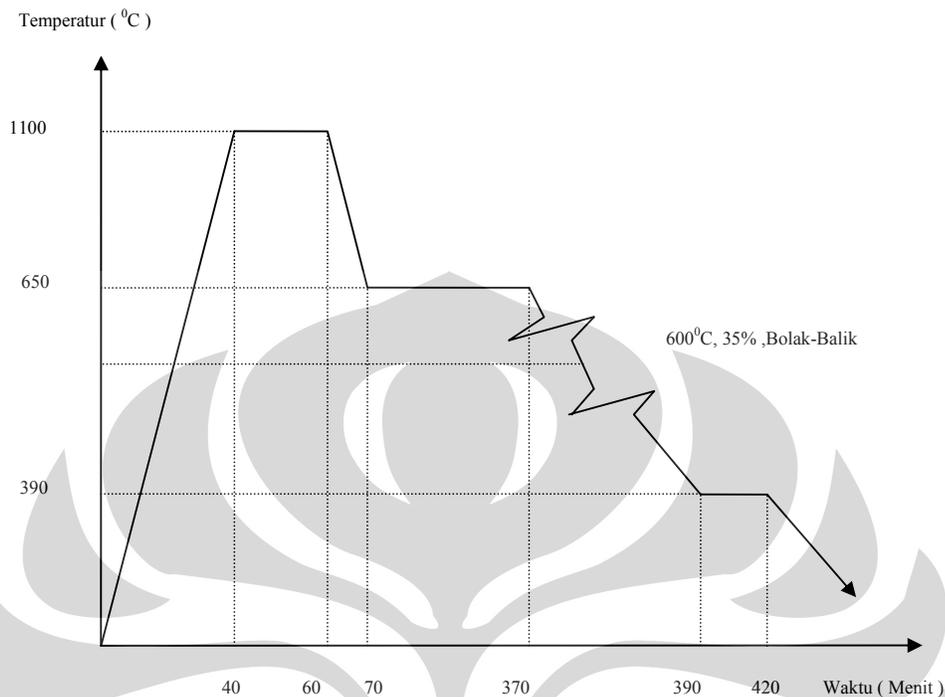
Gambar 3.3 Diagram Proses A

2. Spesimen B dipanaskan hingga suhu 1100°C lalu ditahan selama 30 menit, kemudian suhu dibiarkan turun hingga 650°C dan ditahan selama 5 jam. Pada suhu 600°C material di rolling bolak-balik dengan deformasi 25 % kemudian didinginkan hingga suhu 390°C dan ditahan selama 30 menit. Setelah itu material didinginkan udara



Gambar 3.4
Diagram Proses Spesimen B

3. Spesimen C dipanaskan hingga suhu 1100°C lalu ditahan selama 30 menit, kemudian suhu dibiarkan turun hingga 650°C dan ditahan selama 5 jam. Pada suhu 600°C material di rolling bolak-balik dengan deformasi 35 % kemudian didinginkan hingga suhu 390°C dan ditahan selama 30 menit. Setelah itu material didinginkan udara



Gambar 3.5
Diagram Proses Spesimen C

3.3.4. Uji Metalografi

Untuk dapat diamati mikrostrukturnya, maka dilakukan pengujian metalografi. Untuk spesimen yang berukuran kecil biasanya dilakukan proses mounting terlebih dahulu untuk mempermudah penanganan sampel metalografi. Setelah itu dilakukan proses pengamplasan untuk meratakan bagian sampel yang akan di uji mikrostrukturnya. Pengamplasan dilakukan dengan menggunakan kertas amplas yang dimulai dari amplas kasar hingga amplas halus agar didapat permukaan benda uji yang halus dan rata di seluruh permukaan. Ukuran kekasaran dari kertas amplas yang digunakan yaitu: #80, #120, #240, #400, #600, #800, #1000, #1200, #1500(dalam mesh). Setelah selesai melakukan pengamplasan, maka sampel dipoles agar mendapatkan permukaan yang lebih halus dan mengkilap serta menghilangkan bekas goresan akibat pengamplasan. Setelah

dilakukan proses poles, benda uji di etsa dengan Nital 2 % untuk untuk memunculkan jejak batas butir struktur akhir dari benda uji sehingga dapat diamati morfologi butir ferrite. Setelah itu dilakukan pengamatan dengan mikroskop optik.

3.3.5. Uji Kekerasan

Metode pengujian kekerasan yang dipakai yaitu metode kekerasan Vickers yang menggunakan standar ASTM E92. Prinsip pengujiannya yaitu dengan melakukan penjejakan atau indentasi pada sampel dengan indentor intan berbentuk piramida dengan kemiringan sekitar 136° . Berikut merupakan persamaan untuk mencari kekerasan Vickers(ASTM E 92)^[10] :

$$HV = 2P \sin(\alpha/2)/d^2 = 1.8544/d^2 \dots \dots \dots (3.1)$$

Dimana :

P = beban (kgf)

d = rata-rata diagonal jejak (mm)

α = sudut kemiringan intan = 136°

3.3.6 Uji Korosi

Pengujian korosi dilakukan dengan metode Polarisasi. Polarisasi Salah satu metoda dalam pengukuran laju korosi material adalah dengan penentuan hubungan Potensial dan arus material dalam kurva polarisasi.

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian

4.1.1 Hasil Pengukuran Benda uji

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

$$\% \text{ Deformasi} = \ln \frac{H_0}{H_f} \quad (4.1)$$

Keterangan :

% Deformation = Besar prosentase perubahan ketebalan

H_0 = Ketebalan Awal

H_f = Ketebalan Akhir

Setelah setiap proses deformasi pada temperatur hangat, pengukuran terhadap ketebalan masing-masing benda uji dilakukan. Pengukuran ketebalan menggunakan jangka sorong.

Tabel 4.1 Data Hasil Pengukuran Benda Uji

No	Benda Uji	Tebal Awal	Tebal Akhir Teoritis	Deformasi Bolak-Bali	Deformasi Kumulatif	Tebal Akhir Aktual	Real Deformasi Kumulatif
1	A	6,5					
2	B	6,5	3,942	25%-25%	50%	5,087	25%
3	C	6,5	3,228	35%-35%	70%	4,624	34%

4.1.2 Hasil Pengamatan Metalografi

Pengujian metalografi dilakukan terhadap benda uji sesudah dilakukan proses pemanasan maupun deformasi. Dalam penelitian ini dilakukan pengamatan terhadap butir ferit dengan menggunakan etsa nital 2%. Pada gambar 4.1 merupakan gambar mikrostruktur dengan perbesaran 100X dan 200X benda uji A dengan pemanasan hingga temperatur 1100⁰C dan ditahan selama 20 menit, kemudian diturunkan hingg 650⁰C dan ditahan selama 5 jam, lalu dilakukan

pendinginan udara. Diagram proses perlakuan benda uji A dapat dilihat pada gambar 3.3.

Pada gambar 4.2 dan 4.3 merupakan gambar mikrostruktur dengan perbesaran 100X dan 200X dari benda uji B maupun C dengan proses pemanasan hingga temperatur 1100°C dan ditahan selama 20 menit, kemudian diturunkan hingga 650°C dan ditahan selama 5 jam, benda uji dideformasi sebesar 25%-25% (B) dan 35%-35% (C) pada suhu 600°C lalu benda uji didinginkan di dalam dapur karbolit hingga suhu 390°C dan ditahan selama 30 menit lalu didinginkan udara. Mikrostruktur yang terlihat berdasarkan gambar yaitu *ferrite* (terang) dan terdapat pearlite (gelap). *Ferrite* yang tampak berbentuk pipih untuk benda uji yang telah mengalami deformasi. Diagram proses perlakuan benda uji B dapat dilihat pada gambar 3.4 dan benda uji C pada gambar 3.5.

4.1.2.1 Benda Uji A

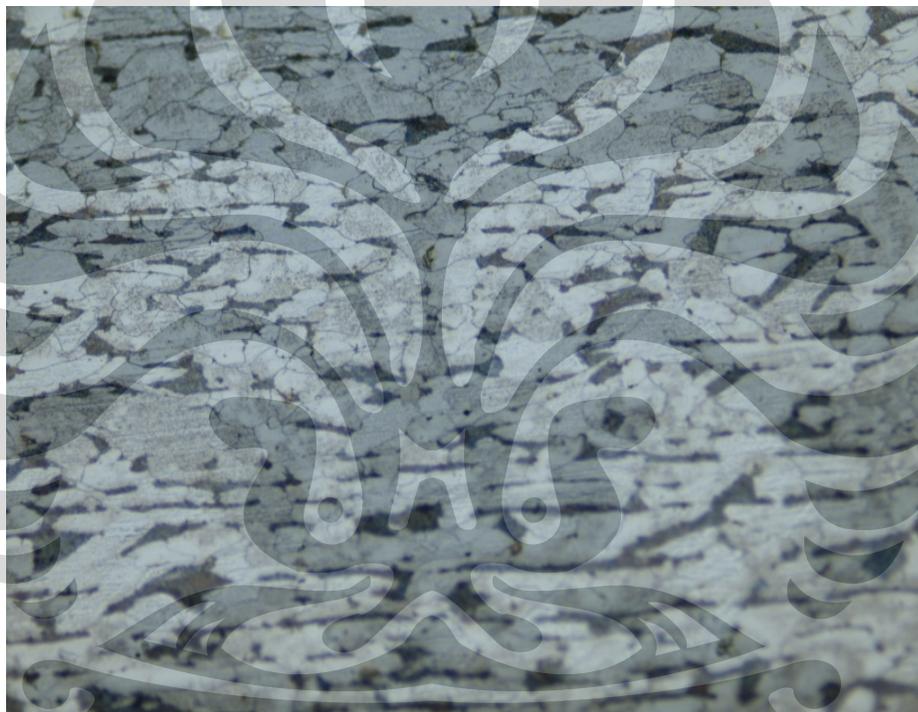
Pada benda uji A yang mengalami pemanasan hingga temperatur 1100°C dan ditahan selama 20 menit, kemudian diturunkan hingga 650°C dan ditahan selama 5 jam, lalu dilakukan pendinginan udara tampak butir *ferrite* (terang) dan butir pearlite (gelap) yang merupakan hasil proses pada gambar 3.3. Pada benda uji A memiliki ukuran butir $54,208\ \mu\text{m}$.



Gambar 4.1 Foto Mikrostruktur ferit Benda Uji A tanpa deformasi, etsa Nital 3% dengan perbesaran perbesaran 200X

4.1.2.2 Benda uji B

Pada benda uji B yang dilakukan proses pemanasan hingga temperatur 1100°C dan ditahan selama 20 menit, kemudian diturunkan hingga 650°C dan ditahan selama 5 jam, benda uji dideformasi sebesar 25%-25% pada suhu 600°C lalu benda uji didinginkan di dalam dapur karbolit hingga suhu 390°C dan ditahan selama 30 menit lalu didinginkan udara tampak butir *ferrite* (terang) yang pipih dan butir *pearlite* (gelap) yang merupakan hasil proses pada gambar 3.3. Pada benda uji B, butir yang didapat terlihat lebih pipih dengan adanya deformasi yang diberikan pada benda uji B dibandingkan dengan benda uji A yang tanpa deformasi. Benda uji B memiliki ukuran butir $31,94\ \mu\text{m}$



Gambar 4.2 Foto Mikrostruktur ferit Benda Uji B deformasi 25%-25%, etsa Nital 3% dengan perbesaran 200X

4.1.2.3 Benda uji C

Pada benda uji C yang dilakukan proses pemanasan hingga temperatur 1100°C dan ditahan selama 20 menit, kemudian diturunkan hingga 650°C dan ditahan selama 5 jam, benda uji dideformasi sebesar 35%-35% pada suhu 600°C lalu benda uji didinginkan di dalam dapur karbolit hingga suhu 390°C dan ditahan selama 30 menit lalu didinginkan udara juga tampak butir *ferrite* (terang) yang pipih dan butir *pearlite* (tampak) yang merupakan hasil proses pada gambar 3.5. Pada benda uji C, butir yang didapat terlihat lebih pipih dengan adanya deformasi

35%-35% dibandingkan dengan benda uji B dengan deformasi 25%-25% dan benda uji A yang tanpa deformasi. Benda uji C yang memiliki deformasi paling besar memiliki butir yang paling pipih dibandingkan benda uji lainnya. Benda uji C memiliki ukuran butir 23,9 μm .



Gambar 4.3 Foto Mikrostruktur ferit Benda Uji C deformasi 35%-35%, etsa Nital 3% dengan perbesaran 200X

4.1.3 Hasil Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan metode Vickers dengan mengambil lima titik pada benda uji untuk dilakukan penjejakan. Perhitungan nilai kekerasan dilakukan dengan menggunakan persamaan 3.1 sehingga akan didapat nilai hasil kekerasan sebagai berikut :

Tabel 4.2 Hasil Uji Kekerasan

No.	Benda uji	Deformasi	VHN
1	Bulk	0	202.21
2	A	0	105.25
3	B	25%-25%	136.89
4	C	35%-35%	182.33

4.1.4 Hasil Uji Korosi Polarisasi

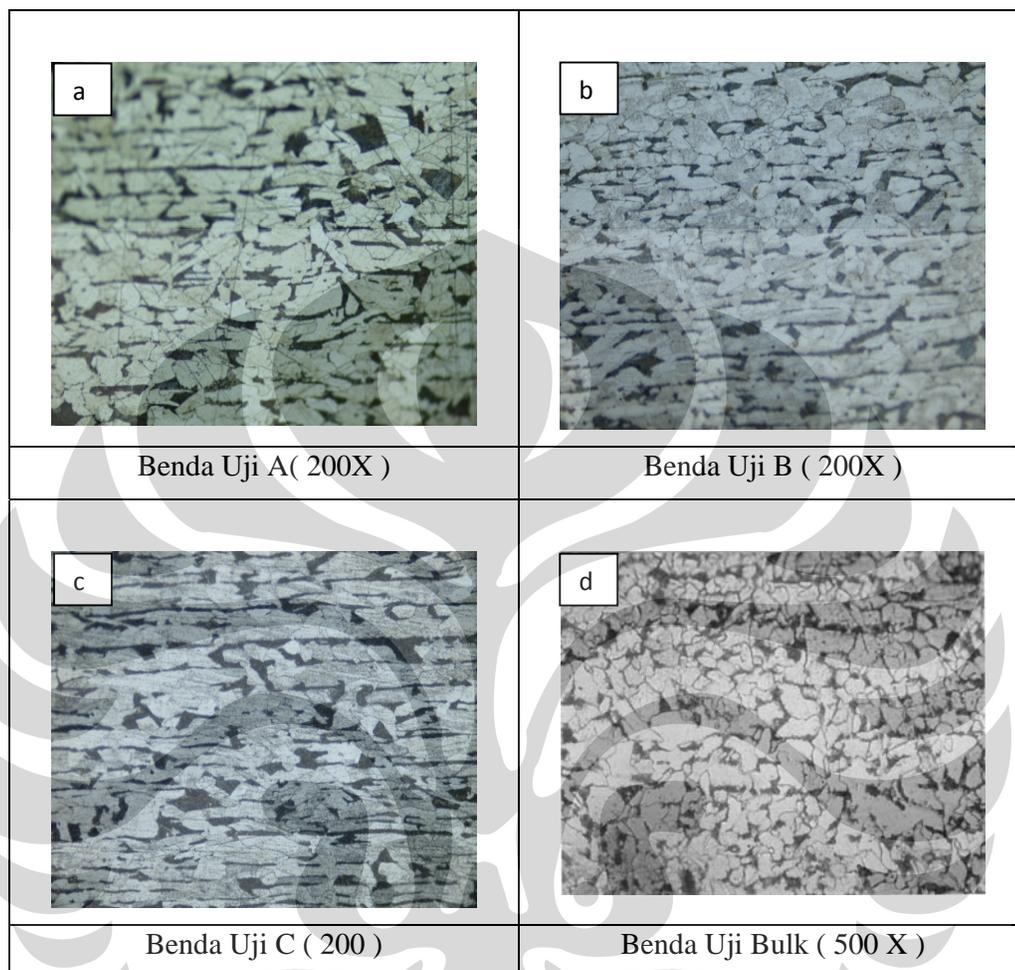
Metoda : Potensiometrik (NaCl 3,5%)
 Range : $\pm 0,25$ mV vs EoC (SCE)
 Scan Rate : 4mV/s
 T : $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$

Tabel 4.3 Hasil Pengujian Polarisasi

No	Benda uji	Luas Permukaan cm^2	Deformasi	CR(mpy)
1	Bulk	0,785		8.046
2	A	0,85		3.385
3	B	0,819	25%-25%	5.689
4	C	0,922	35%-35%	5.95

4.2 Pembahasan

4.2.1 Pengamatan Metalografi



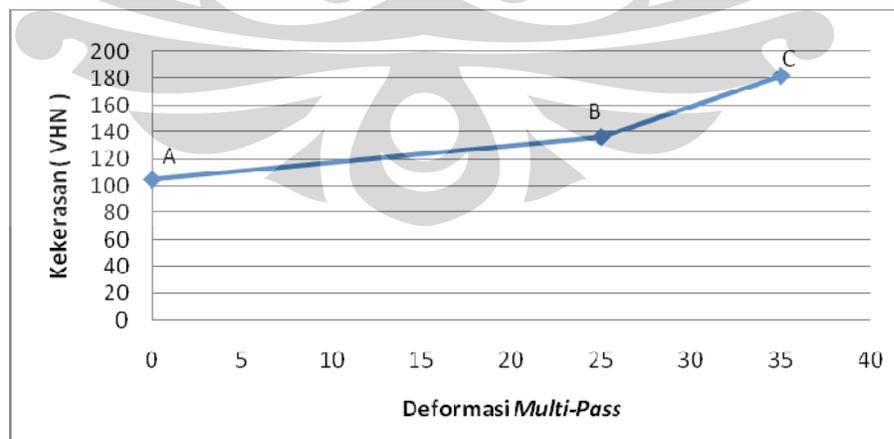
Gambar 4.4 Perbandingan Mikrostruktur dengan Mikroskop Optik Perbesaran Etsa Nital 2-3%

Berdasarkan perbandingan keempat gambar di atas maka dapat dilihat bahwa terjadi pemipihan pada butir dengan adanya deformasi *rolling* pada material di atas. Gambar 4.4.a merupakan benda uji yang mengalami proses pemanasan tanpa mengalami deformasi dan tampak butir *ferrite*. Gambar 4.4.b merupakan benda uji yang mengalami proses pemanasan dan deformasi *rolling* multi-pass 25%-25% yang menunjukkan tampaknya butir *ferrite*, namun butir terlihat lebih pipih dibandingkan gambar 4.4.a. Pemipihan juga terlihat pada butir di gambar 4.4.c yang mengalami deformasi multi-pass 35%-35%. Butir pada gambar 4.4.c merupakan butir yang paling pipih dengan derajat deformasi yang

paling besar. Pemipihan yang terjadi pada benda uji B dan C yang mengalami proses Canai Hangat karena adanya proses *recovery* dan rekristalisasi. Ketika rekristalisasi terjadi, material juga mengalami deformasi sehingga butir menjadi lebih pipih. Pada gambar 4.4.d merupakan benda uji bulk yang tidak mengalami proses apapun dan tampak butir *ferrite* yang poligonal.

4.2.2 Pengaruh Deformasi terhadap Kekerasan Baja SS400

Berdasarkan hasil pengujian kekerasan dengan metode Vickers, didapat bahwa kekerasan akan semakin meningkat dengan meningkatnya deformasi yang diberikan pada benda uji yang dilakukan pengujian. Pada gambar 4.5 dapat dilihat bahwa benda uji A yang tanpa mengalami deformasi memiliki kekerasan yang lebih rendah dibandingkan benda uji B dengan deformasi 25%-25% dan benda uji C dengan deformasi 35%-35%. Kekerasan yang paling tinggi dimiliki oleh benda uji C dengan nilai deformasi yang paling tinggi. Melalui proses deformasi, beberapa sifat material dapat diubah. Sifat-sifat seperti kekuatan luluh, kekuatan tarik dan kekerasan memang meningkat, namun umumnya akan membuat material sulit untuk dibentuk. Terjadinya deformasi akan menyebabkan dislokasi sulit untuk bergerak, dengan meningkatnya regangan maka dislokasi semakin sulit bergerak sehingga beberapa dislokasi menjadi tertahan di dalam kristal dan bertindak sebagai sumber tegangan dalam yang berlawanan dengan pergerakan dislokasi lainnya.

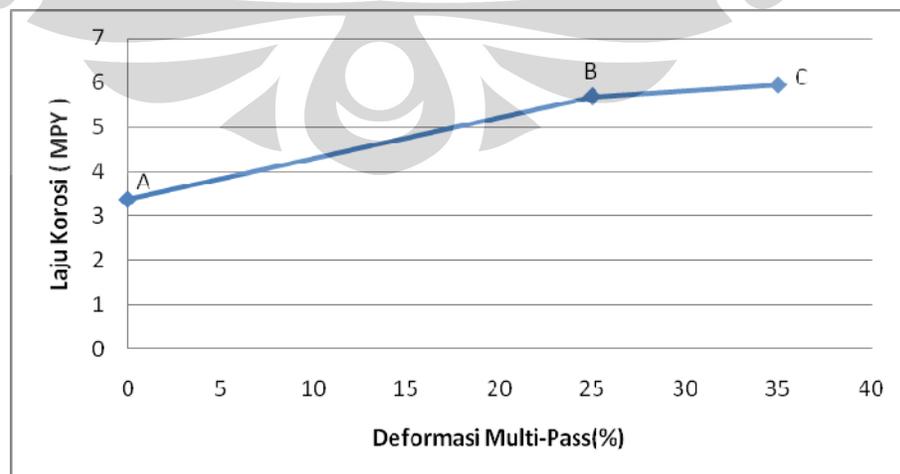


Gambar 4.5 Pengaruh Deformasi terhadap Kekerasan

Berdasarkan gambar mikrostruktur yang ada, dapat kita lihat bahwa terjadi reduksi ukuran butir dari gambar 4.4.a dengan ukuran butir $54,21 \mu\text{m}$ yang tanpa deformasi, gambar 4.4.b dengan deformasi 25%-25% yang memiliki ukuran butir $31,94 \mu\text{m}$ hingga gambar 4.4.c dengan deformasi 35%-35% yang memiliki ukuran butir $23,9 \mu\text{m}$. Deformasi yang semakin besar akan membuat butir semakin kecil dan kekerasan material semakin besar. Hall dan Petch mengembangkan suatu persamaan 2.1 untuk menjelaskan efek dari ukuran butir terhadap kekuatan material dimana semakin kecil ukuran butir maka akan meningkatkan kekuatan material. Kekuatan material sebanding dengan kekerasannya sesuai dengan persamaan 2.2 dan persamaan 2.3 sehingga dengan meningkatnya kekuatan maka kekerasan pun akan meningkatkan. Hal tersebut sesuai dengan persamaan Hall-Petch(persamaan 2.1). Ukuran butir yang lebih kecil memiliki total area batas butir yang banyak untuk menghalangi pergerakan dislokasi.

4.2.3 Pengaruh Deformasi terhadap Laju Korosi Baja SS400

Laju korosi suatu material akan menentukan ketahanan korosi material tersebut. Berdasarkan gambar 4.6, kita dapat lihat bahwa laju korosi semakin besar dengan peningkatan deformasi. Semakin besar deformasi maka material akan semakin keras. Benda uji A yang tanpa deformasi memiliki kelajuan korosi paling rendah dibandingkan benda uji B dengan deformasi 25%-25% dan benda uji C dengan deformasi 35%-35%.

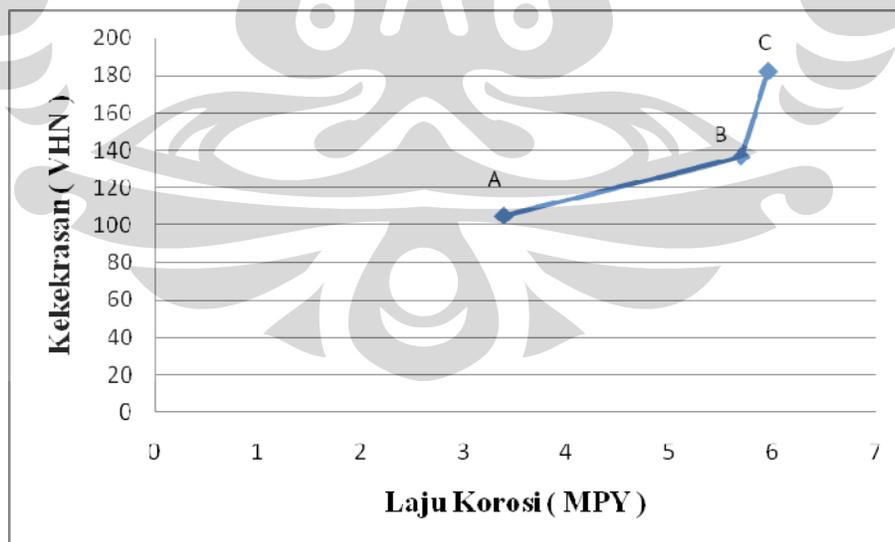


Gambar 4.6 Pengaruh Deformasi Terhadap Laju Korosi

Hal ini menunjukkan bahwa besarnya deformasi memberikan pengaruh terhadap laju korosi pada benda uji. Laju korosi paling besar terdapat pada benda uji C dengan deformasi 35%-35% dan merupakan benda uji yang memiliki kekerasan terbaik. Hal tersebut juga menunjukkan semakin keras material akan menyebabkan material tersebut memiliki laju korosi yang semakin besar seperti yang ditunjukkan pada gambar Gambar 4.7.

Suatu sel elektrokimia dapat terjadi secara lokal ketika logam mengalami tekanan sehingga material yang mengalami tegangan akan bersifat lebih anodic. Akibat pengerjaan hangat, maka benda uji akan mengalami deformasi, dimana akan timbul stress cell. Stress cell terjadi karena ada bagian yang mengalami tegangan yang berbeda dengan bagian yang lainnya. Bagian yang mengalami tegangan lebih besar akan menjadi anode dan akan lebih terkorosi.

Deformasi plastis pada material dapat meningkatkan kepadatan dislokasi sehingga meninggalkan tegangan sisa pada logam. Serangan korosi terjadi pada permukaan yang terdeformasi meskipun potensial korosi mungkin tidak mengalami perubahan secara signifikan karena proses anodik dan katodik terstimulasi.



Gambar 4.7 Pengaruh Kekerasan terhadap Laju Korosi

BAB 5

KESIMPULAN

1. Proses pemanasan awal pada sampel dan waktu tahan akan memberikan pengaruh terhadap ukuran butir ferrite yang telah terdeformasi menjadi lebih besar
2. Kekerasan baja karbon rendah dengan proses Thermomechanical Control Processing semakin meningkat dengan meningkatnya deformasi yang diberikan. Nilai kekerasan yang didapat yaitu sebesar 105.25 VHN untuk benda uji A, 136.89 VHN untuk benda uji B dan 182.33 VHN untuk benda uji C
3. Semakin besar deformasi akan meningkatkan laju korosi. Nilai laju korosi untuk benda uji A sebesar 3.38 MPY, 5.69 untuk benda uji B dan 5.95 untuk benda uji C
4. Proses deformasi multypass tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap mikrostruktur, sifat mekanik dan ketahanan korosi baja karbon rendah SS400

Daftar Pustaka

1. D. Gandy. *Carbon Steel Handbook*. Electric Power Research Institute. Final Report March 2007 Hal 1-1
2. George E. Totten, PhD., FASM. *Steel Heat Treatment : Metallurgy and Technologies (2nd edition)* , 2006 by Taylor & Francis Group, LLC : USA
3. Akbari, G.H., Sellars, C.M. and Whiteman. Microstructural Development During Warm Rolling of An IF Steel. *Acta Mater.* Vol. 45, No. 12. 1997 : 5047-5058.
4. Ashby, Michael F. and David R. H. Jones. *Engineering Materials 2* (with corrections ed.). Oxford: Pergamon Press. 1992
5. Higgins, R.A.. *Material for Engineers and Technicians (4th Edition)*. Eisevier : Oxford. 2006
6. *Metallography, Structures and Phase Diagrams, Vol 8, 8th ed., Metals Handbook*, American Society for Metals. 1973
7. Callister, William D., Jr. *Materials Science and Engineering : An Introduction (7th Edition)*. John Wiley & Sons, Inc.: USA, 2007.
8. Krauss, George. *Steels: Processing, Structure, and Performance*. ASM International : USA, 2005
9. Singh, U.K. and Manish Dwivedi. *Manufacturing Processes(2nd Edition)*. New Age International : New Delhi, 2009
10. Smallman, R. E and A. H.W. Ngan. *Physical Metallurgy and Advanced Materials (7th edition)*. Elsevier Ltd. : Oxford, 2007.
11. Weng, Yuqing. *Ultra-Fine Grained Steels*. Metallurgical Industry Press, 2009. Trans. Chaoxing Gang--Gang de Zuzhi Xihua Lilun yu Kongzhi Jishu, 2003.
12. D.T. Llewelyn and R.C. Hudd. *Steels: Metallurgy and Applications (3rd Edition)*. Reed Educational and Professional Publishing Ltd. 1998
13. G.E. Dieter, *Mechanical Metallurgy*, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, 1976
14. Bert Verlinden, et al., ed. *Thermo-Mechanical Processing of Metallic Materials*. Elsevier : Oxford. 2007
15. Humphreys, F.J. and M. Hatherly. *Recrystallization and Related Annealing Phenomena (2nd Edition)*. Elsevier : UK, 2004
16. Lin-xiu, D.U., et al., ed. " Austenite Recrystallization and Controlled Rolling of Low Carbon Steels". *Journal of Iron and Steel Research, International*. 13(3)(2006) : 31-35. 50

17. Niikura, M., et al., ed. “ New Concept for Ultra Grain Refinement of Grain Size in Super Metal Project .“ *Journal of Materials Processing Technology* 117 (2001) : 341-346.
18. Adachi, Yoshitaka, et al., ed. “The Formation of Ultrafine Ferrite Through Static Transformation in Low Carbon Steels.” *Acta Materialia* 55 (2007) : 4925–4934
19. Imai, Shiro. Proceedings of The Twelfth (2002) International Offshore and Polar Engineering Conference Kitakyushu, Japan, May 26 31, 2002. General Properties of TMCP Steels . Plate Technical Dept., Nippon Steel Corporation. Tokyo Japan. *ISBN 1-880653-58-3 (Set); ISSN 1098-6189 (Set)*
20. Dryden, John. Controlled Rolled XLERPLATE® - Strong, Tough and Weldable : www.bluescopesteels.com.au/go/news/controlled-rolled-xlerplate-strongtough-and-weldable
21. Nicholas, Joanne. What are TMCP (Thermo-Mechanically Controlled Processed) steels? Copyright © 2000, TWI Ltd.
<http://www.twi.co.uk/content/faqjmn002.html>
22. Yokota, Tomoyuki. *Ferrite grain size refinement through transformation $\gamma \rightarrow \alpha$* . NKK Corp. (JFE group)
23. 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 (1987).
24. I.Kozasu. Constitution and Properties of Steels Ed. By F.B.Pickering, . *Materials Science and Technology*, vol.7 VCH (1993)
25. J.N., Harris, *Mechanical Working of Metal*, (UK: Pergamon Press, 1983).
26. Bradford, Samuel A. Corrosion control (2nd Edition). CASTI Publishing : Kanada, 2001
27. Ahmad, Zaki. Principle of Corrosion Engineering and Corrosion Control. Elsevier Science & Technology Books, 2006
28. Davis, J.R.. Corrosion: Understanding the Basics. ASM International : Ohio, 2000

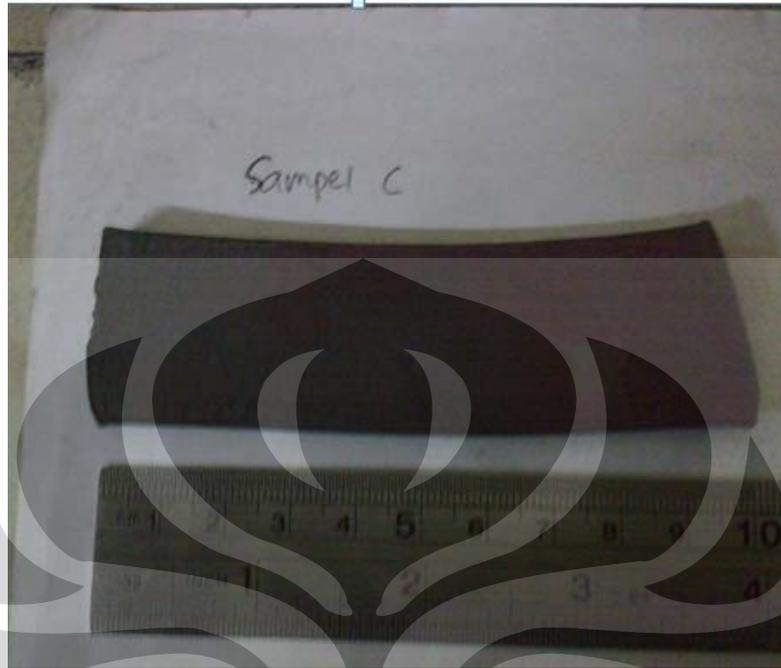
Lampiran 1. Benda Uji A



Lampiran 2. Benda Uji B



Lampiran 3. Benda Uji C



Lampiran 4. Hasil Pengujian Komposisi Benda Uji



CENTER FOR MATERIALS PROCESSING AND FAILURE ANALYSIS
DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI & MATERIAL-UNIVERSITAS INDONESIA
LABORATORIUM UJI MATERIAL

Kampus Baru UI - Depok 16424 - Indonesia
Phone : 021 - 788 49045, 786 3510 Fax : 021 - 78888 111, 7872 350 E-mail : cmpfa@metal.ui.ac.id, cmpfa.ui@gmail.com

LAPORAN PENGUJIAN KOMPOSISI KIMIA
COMPOSITION TEST REPORT

Page 1 of 1

No Laporan <i>Report Nr</i>	0275	Bahan <i>Material</i>	Steel
Pemakai Jasa <i>Customer</i>	Ronald	Identitas Bahan <i>Material Identity</i>	Plate
Alamat <i>Address</i>	DTMM FTUI	Tanggal Terima <i>Receiving Date</i>	April 27 th , 2010
No Kontrak <i>Contract Nr</i>	0513/PT.02/FT04/P/2010	Standar <i>Standard</i>	ASTM A751
Tanggal Uji <i>Date of Test</i>	April 27 th , 2010	Mesin Uji <i>Testing machine</i>	Optical Emission Spectrometer

Kode Sampel <i>Sample Code</i>	C (%)	Si (%)	S (%)	P (%)	Mn (%)	Ni (%)	Cr (%)
#1	0.120	0.198	< 0.003	0.038	0.636	< 0.005	< 0.003
	Mo (%)	Ti (%)	Cu (%)	Nb (%)	V (%)	Al (%)	Fe (%)
	< 0.005	< 0.002	0.018	< 0.002	0.016	0.037	98.913

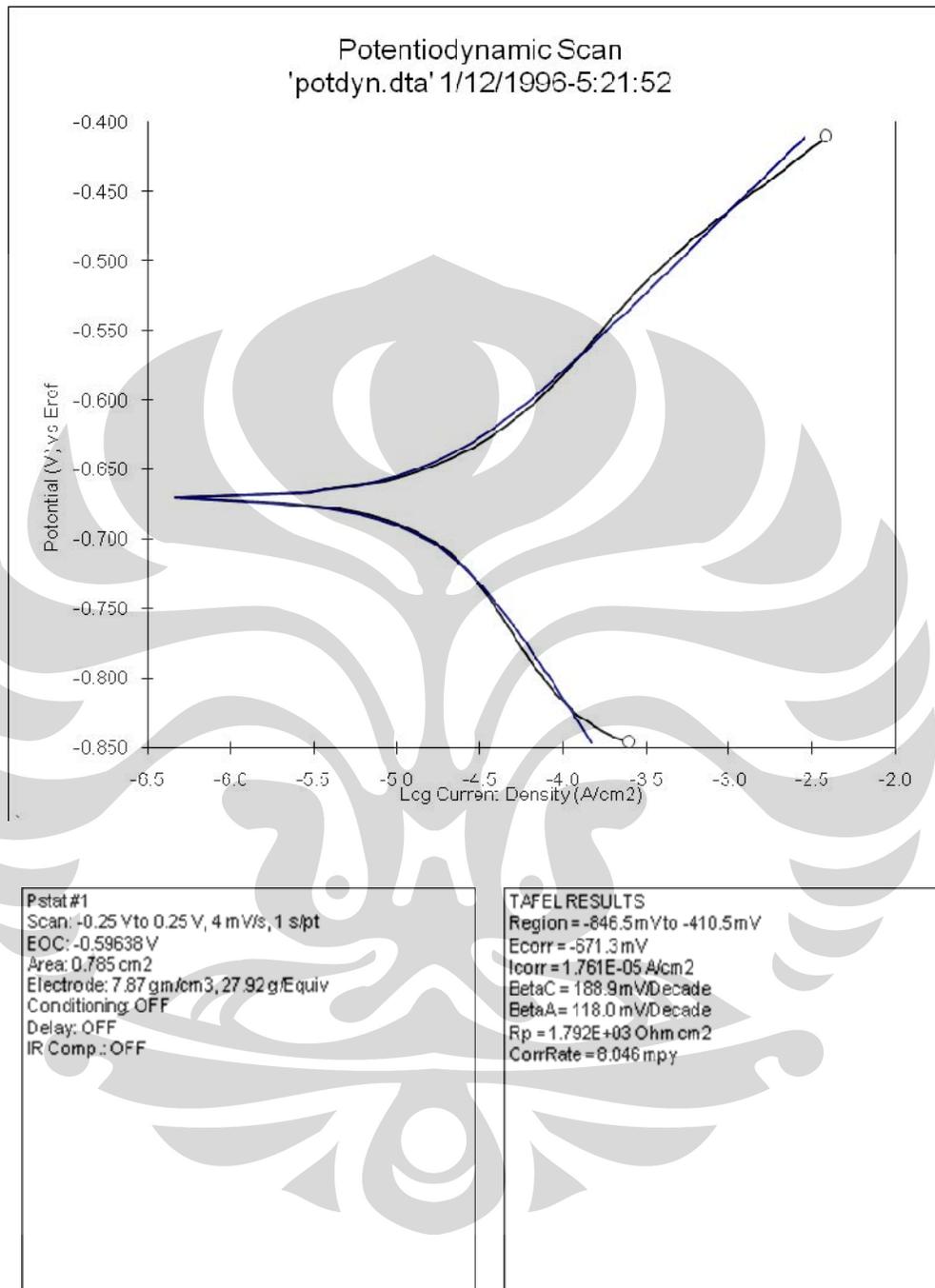
Depok, April 27th, 2010
LABORATORIUM UJI MATERIAL
Technical Manager,

(Ahmad Ivan Karayan, ST, M.Eng)

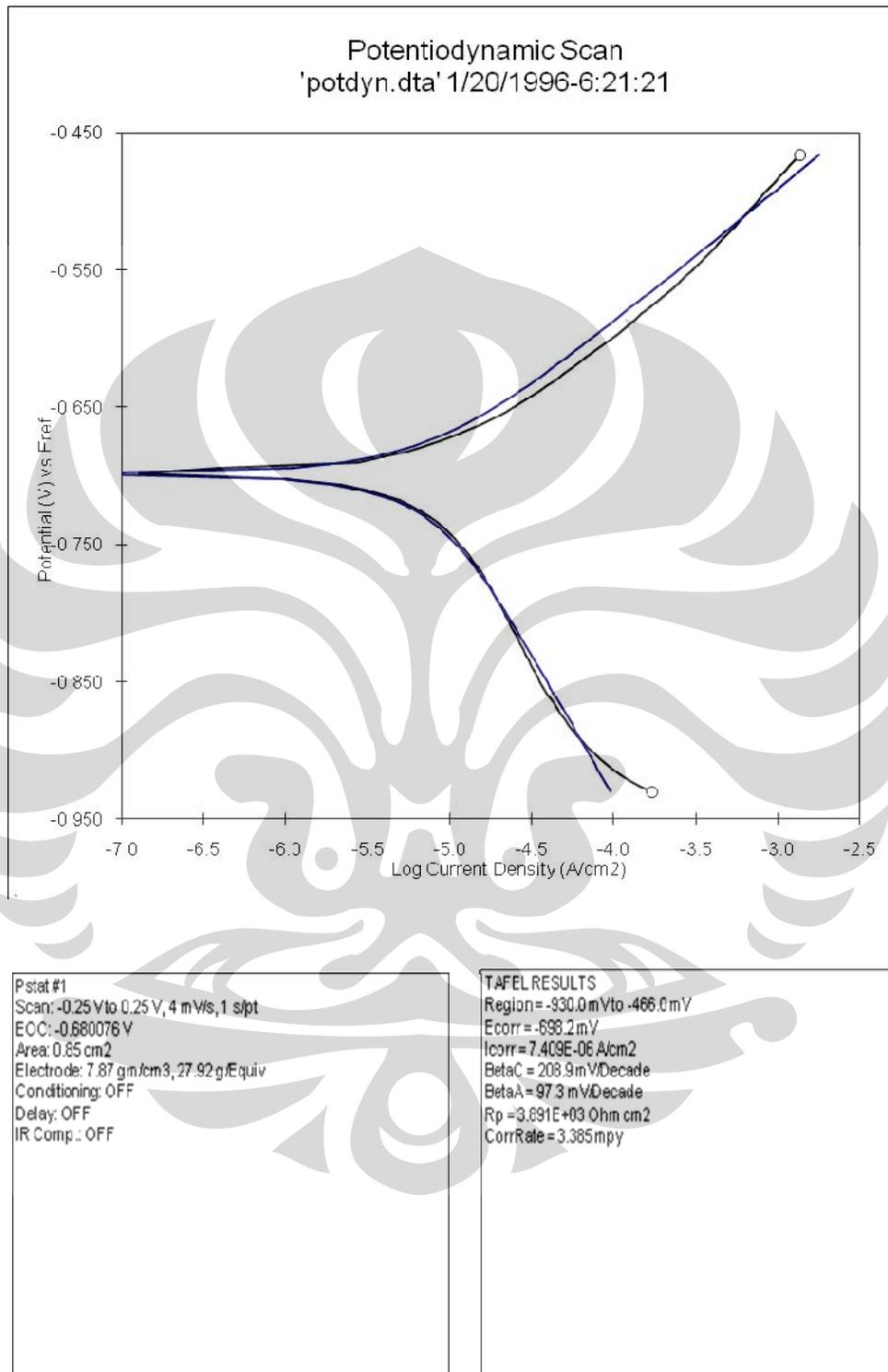
FF-26/Met-UI Rev 0

Laporan hasil pengujian ini hanya berlaku untuk sampel yang diuji di Laboratorium Uji Material : publikasi serta penggunaan dokumen ini atau sebagian dari padanya harus dengan izin dari Laboratorium Uji Material

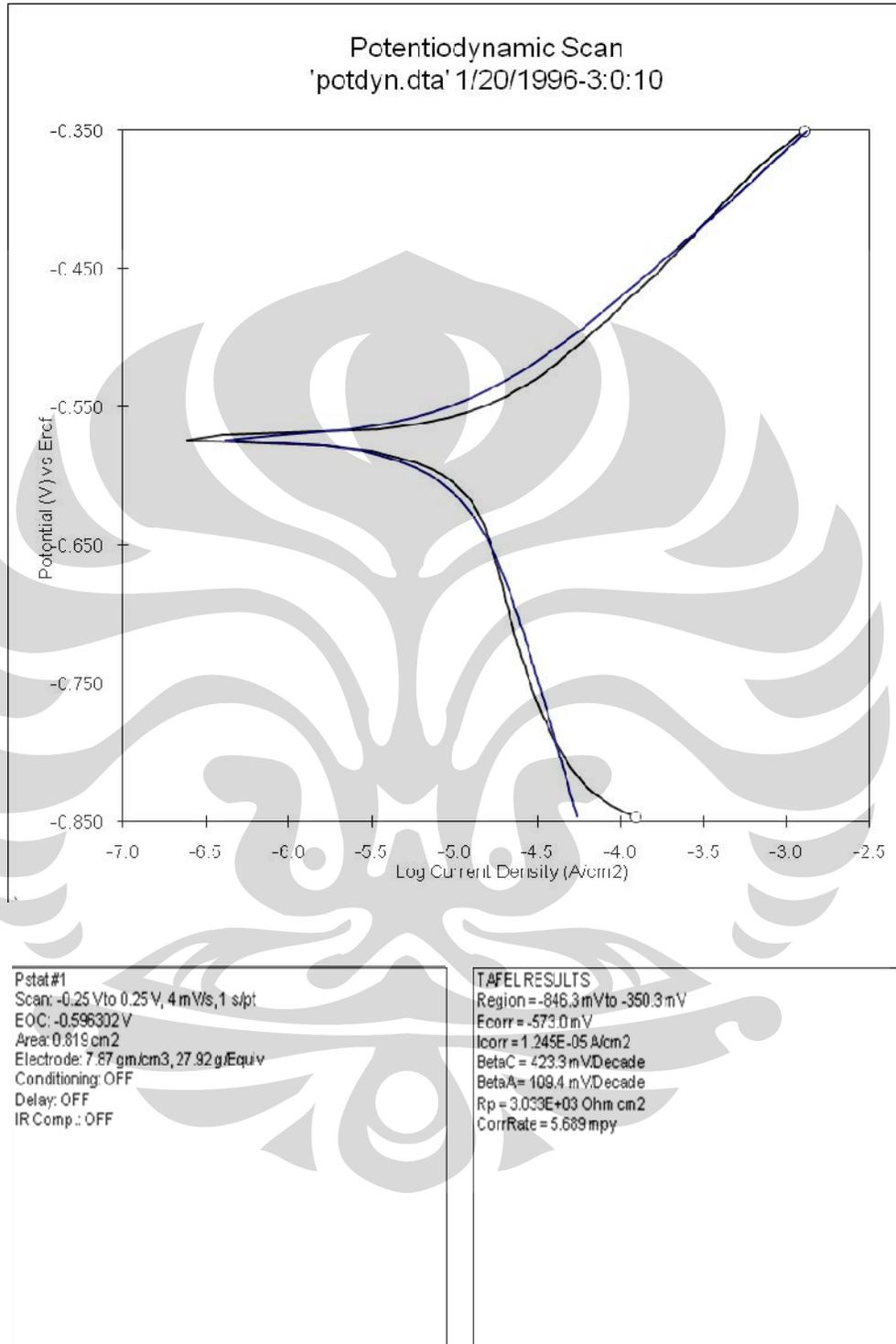
Lampiran 5. Kurva Korosi Polarisasi Benda Uji Bulk



Lampiran 6. Kurva Korosi Polarisasi Benda Uji A



Lampiran 7. Kurva Korosi Polarisasi Benda Uji B



Lampiran 8. Kurva Korosi Polarisasi Benda Uji C

