



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH VARIASI MEDIA PENDINGINAN
TERHADAP PEMBENTUKAN BUTIR FERIT,
KEKUATAN, DAN KETAHANAN KOROSI BAJA
KARBON RENDAH SS 400 SETELAH DEFORMASI
CANAI HANGAT**

SKRIPSI

ALDHI MAHARDHIKA

0606074520

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL

DEPOK

JUNI 2010



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH VARIASI MEDIA PENDINGINAN
TERHADAP PEMBENTUKAN BUTIR FERIT,
KEKUATAN, DAN KETAHANAN KOROSI BAJA
KARBON RENDAH SS 400 SETELAH DEFORMASI
CANAI HANGAT**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

ALDHI MAHARDHIKA

0606074520

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
JUNI 2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Aldhi Mahardhika

NPM : 0606074520

Tanda Tangan :

Tanggal : 12 Juli 2010

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Aldhi Mahardhika
NPM : 0606074520
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi : Pengaruh Variasi Media Pendinginan Terhadap Pembentukan Butir Ferit, Kekuatan, dan Ketahanan Korosi Baja Karbon Rendah SS 400 Setelah Deformasi Canai hangat

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 : Dra. Sari Katili, M.S ()

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

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 13 Juli 2010

KATA PENGANTAR

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

- (1) Ir. Rini Riastuti, M.Sc, selaku pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini.
- (2) Seluruh dosen dan staf pengajar Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI yang telah memberikan pengetahuan dan ilmu yang bermanfaat.
- (3) Bapak Dimas Patriangga dan Bapak Rusma Patriansyah dari PT. Bakrie Pipe Industries yang telah membantu memfasilitasi material untuk skripsi ini.
- (4) Orang tua dan keluarga saya yang senantiasa mendoakan saya, memberikan bantuan baik moril maupun materil.
- (5) Amri Kiswara, Bintang Suryo, Nofardiansyah Rizky, Ronald Hasian, dan Mohammad Pribadi selaku rekan kerja yang telah banyak membantu saya dalam penelitian ini.
- (6) Seluruh karyawan, staf, serta teknisi Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI
- (7) Raden Bagus, Gilang Prabowo, Syarif Husein, Zackyudin, Ari Azhari serta para asisten laboratorium korosi dan metalografi yang telah membantu pengujian yang dibutuhkan dalam skripsi ini
- (8) Sahabat dan teman-teman yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini.
- (9) 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 Juli 2010

Penulis



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

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

Nama : Aldhi Mahardhika
NPM : 0606074520
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:

Pengaruh Variasi Media Pendinginan Terhadap Pembentukan Butir Ferit,
Kekuatan, dan Ketahanan Korosi Baja Karbon Rendah SS 400 Setelah Deformasi
Canai Hangat

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 13 Juli 2010

Yang menyatakan

(Aldhi Mahardhika)

ABSTRAK

Nama : Aldhi Mahardhika
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul : Pengaruh Variasi Media Pendinginan Terhadap Pembentukan Butir Ferit, Kekuatan, dan Ketahanan Korosi Baja Karbon Rendah SS 400 Setelah Deformasi Canai hangat

Penelitian terhadap proses penghalusan butir harus dilakukan pada saat ini untuk mendapatkan material dengan sifat mekanis yang baik yang diharapkan dapat bermanfaat untuk masa depan industri. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi media pendinginan terhadap pembentukan butir ferit, kekuatan, dan ketahanan korosi baja karbon rendah SS 400 setelah proses deformasi canai hangat. Sampel dideformasi pada temperatur 650°C dengan waktu tahan 5 menit dan derajat deformasi 70 %. Kemudian, sampel dipanaskan kembali hingga temperatur 500°C dengan waktu tahan 60 menit dan kemudian di-*quench* dengan media air dan es. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin cepat kecepatan pendinginan suatu media pendinginan, maka butir yang dihasilkan semakin halus dan kekuatan material yang dihasilkan juga semakin tinggi. Media pendinginan yang memiliki kecepatan pendinginan paling tinggi adalah es. Hasil yang didapatkan dari media pendinginan es adalah ukuran butir 7,68 μm dengan nilai kekuatan 549,23 MPa

Kata kunci: Pencanaan hangat, media pendinginan, penghalusan butir, kekuatan

ABSTRACT

Name : Aldhi Mahardhika
Study Program : Metallurgy and Materials Engineering
Title : Effect of Cooling Medium Variation on Ferritic Grain Structure, Strength, and Corrosion Resistance of Warm Rolled SS 400 Low Carbon Steel

Nowadays, the research of grain refinement process must be done to get a material with good mechanical properties that expected will be a benefit for industry in the future. The object of the present work is to investigate the effect of cooling medium on ferritic grain structure, strength, and corrosion resistance of warm rolled SS 400 Low Carbon Steel. The samples were heated and deformed at 650°C for 5 minutes with 70% deformation degree. Then, the samples were reheated at 500°C for 60 minutes and quenched by water and ice. Experimental results have shown that increasing cooling rate of cooling medium increases significantly the grain refinement and strength. Ice is cooling medium that has the fastest cooling rate, its grain size is 7,68 μm with 549,23 MPa of strength

Keywords: Warm rolling, cooling medium, grain refinement, strength

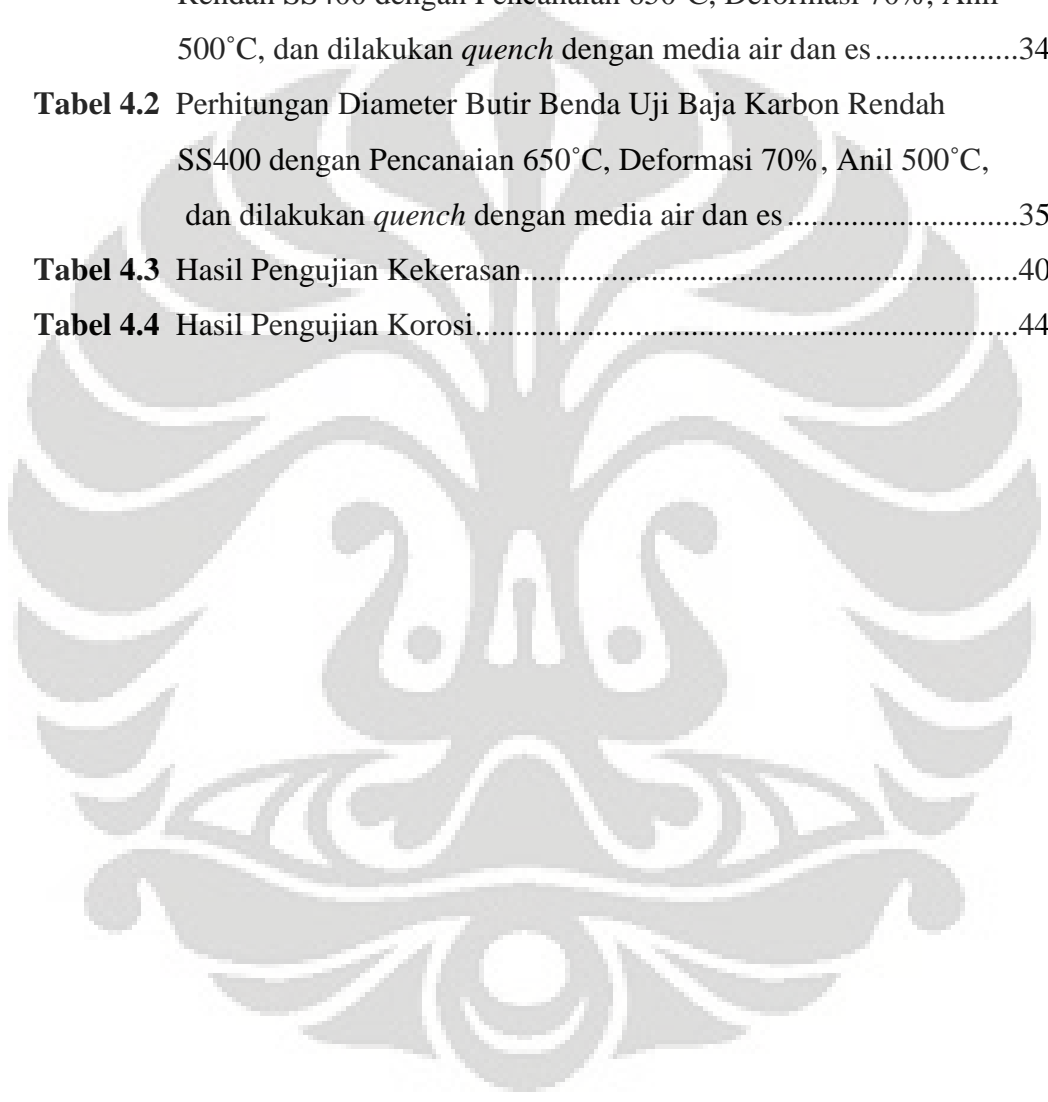
DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR RUMUS	xiv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Penelitian	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Ruang Lingkup.....	3
1.4.1 Material	3
1.4.2 Parameter Penelitian.....	3
1.4.3 Tempat Penelitian.....	3
1.5 Sistematika Penulisan	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Baja Karbon Rendah	5
2.2 Pengaruh Deformasi Plastis Terhadap Struktur Mikro	6
2.3 Pengaruh Besar Butir Terhadap Sifat Struktural Baja	7
2.4 Mekanisme Penguatan Dengan Penghalusan Butir.....	8
2.5 Rekoveri, Rekristalisasi, dan Pertumbuhan Butir	10
2.5.1 Rekoveri	11
2.5.2 Rekristalisasi	12

2.5.3 Pertumbuhan Butir	15
2.6 Struktur Mikro Ferit	15
2.7 Thermo-Mechanical Controlled Process (TMCP)	16
2.8 Warm Working.....	18
2.9 Quenching	19
2.10 Korosi Elektrokimia	20
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....	23
3.1 Diagram Alir Penelitian	23
3.2 Alat dan Bahan.....	24
3.2.1 Alat.....	24
3.2.2 Bahan	24
3.3 Prosedur Penelitian.....	25
3.3.1 Pemilihan Material.....	25
3.3.2 Preparasi Sampel.....	25
3.3.3 Proses Pemanasan	26
3.3.4 Proses Canai Hangat	28
3.3.5 Proses Pendinginan	28
3.3.6 Preparasi, Pengujian Metalografi dan Pengamatan Mikrostruktur	28
3.3.7 Perhitungan Ukuran Butir	30
3.3.8 Uji Kekerasan.....	31
3.3.9 Uji Ketahanan Korosi.....	33
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	34
4.1 Hasil Pengukuran Ketebalan Benda Uji.....	34
4.2 Hasil Perhitungan Butir.....	35
4.3 Hasil Pengamatan Metalografi.....	37
4.4 Hasil Pengujian Kekerasan	40
4.4.1 Pengaruh Media Pendinginan terhadap Kekerasan.....	40
4.4.2 Pengaruh Ukuran Butir Terhadap Kekuatan	42
4.5 Hasil Pengujian Korosi	43
BAB 5 KESIMPULAN.....	46
REFERENSI	47

DAFTAR TABEL

Tabel 2	Pengaruh media <i>quench</i>	20
Tabel 3	Komposisi Sampel Baja Karbon Rendah SS400.....	25
Tabel 4.1	Pengukuran Dimensi Awal dan Akhir Benda Uji Baja Karbon Rendah SS400 dengan Pencanaan 650°C, Deformasi 70%, Anil 500°C, dan dilakukan <i>quench</i> dengan media air dan es.....	34
Tabel 4.2	Perhitungan Diameter Butir Benda Uji Baja Karbon Rendah SS400 dengan Pencanaan 650°C, Deformasi 70%, Anil 500°C, dan dilakukan <i>quench</i> dengan media air dan es.....	35
Tabel 4.3	Hasil Pengujian Kekerasan.....	40
Tabel 4.4	Hasil Pengujian Korosi.....	44



DAFTAR GAMBAR

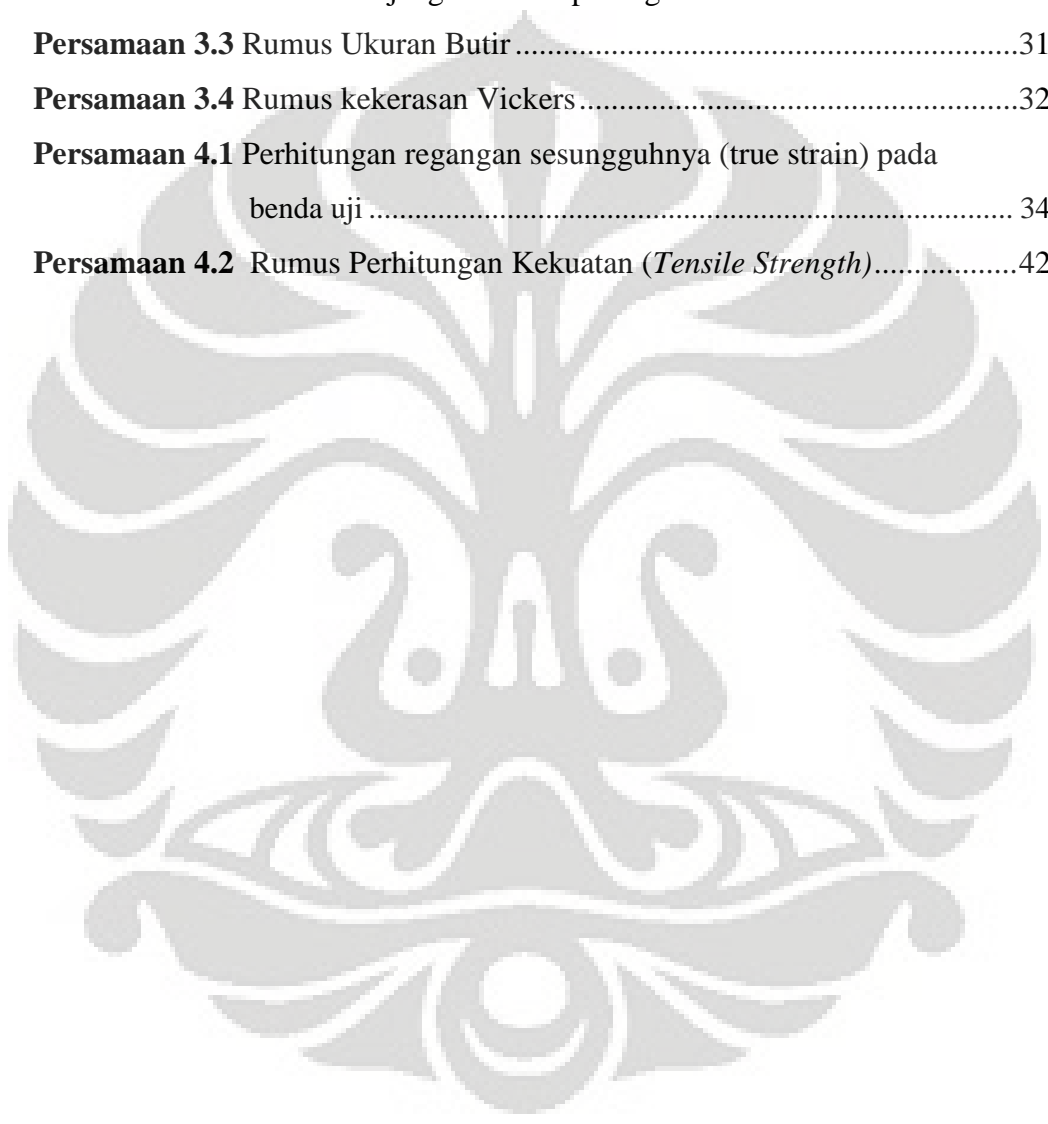
Gambar 2.1 Transformasi Fasa Pada Baja Karbon	6
Gambar 2.2 Ilustrasi Batas Butir dan Pergerakan Dislokasi	8
Gambar 2.3 Pengaruh besar butir terhadap nilai kekuatan.....	10
Gambar 2.4 Skematis Proses Rekoveri, Rekristalisasi dan Pertumbuhan Butir.....	11
Gambar 2.5 Pembentukan Sub-butir	12
Gambar 2.6 Perbandingan Antara Rekristalisasi Dinamik dan Statik.....	14
Gambar 2.7 Struktur Mikro Ferit dan Pearlit (Gelap) Berbentuk <i>Equiaxed</i>	16
Gambar 2.8 Perbandingan Besar Butir antara pengerolan Konvensional (kiri) dan TMCP (kanan).....	17
Gambar 2.9 Perbandingan Antara Jalur Proses Konvensional dan TMCP	18
Gambar 2.10 Diagram Evans.....	21
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	23
Gambar 3.2 Ilustrasi Benda Uji dan Pemasangan Termokopel.....	25
Gambar 3.3 Grafik Pengujian Baja Karbon Rendah SS 400 dengan Pencapaian 650°C, Deformasi 70%.....	26
Gambar 3.4 Dapur <i>Carbolite</i>	27
Gambar 3.5 Mesin Canai.....	28
Gambar 3.5 Mesin Amplas.....	29
Gambar 3.7 Mesin Poles.....	30
Gambar 3.8 Metode <i>Intercept</i> , dengan menggunakan garis berbentuk lingkaran dengan total panjang garis 500 mm, dengan foto perbesaran 100X.....	30
Gambar 3.9 Ilustrasi Jejak yang dihasilkan Selama Penjejakan.....	32
Gambar 3.10 Mesin Uji Kekerasan Vickers.....	33
Gambar 4.1 Grafik Hubungan antara Media Pendinginan dengan Diameter Butir.....	36
Gambar 4.2 Foto Struktur Mikro Ferit Baja Karbon Rendah SS 400,	

Etsa Nital 3% dengan Perlakuan Pencanaian 650°C, Deformasi 70%	38
Gambar 4.4 Grafik Hubungan antara Media Pendinginan dengan Kekerasan	41
Gambar 4.5 Grafik Hubungan Antara Ukuran Butir dengan Kekuatan	43
Gambar 4.6 Grafik Hubungan antara Media Pendinginan dengan Laju Korosi	44



DAFTAR RUMUS

Persamaan Hall-Petch.....	9
Persamaan 3.1 Rumus Jumlah Titik Per Satuan Panjang	31
Persamaan 3.2 Rumus Panjang Garis Perpotongan	31
Persamaan 3.3 Rumus Ukuran Butir	31
Persamaan 3.4 Rumus kekerasan Vickers	32
Persamaan 4.1 Perhitungan regangan sesungguhnya (true strain) pada benda uji	34
Persamaan 4.2 Rumus Perhitungan Kekuatan (<i>Tensile Strength</i>).....	42



DAFTAR LAMPIRAN

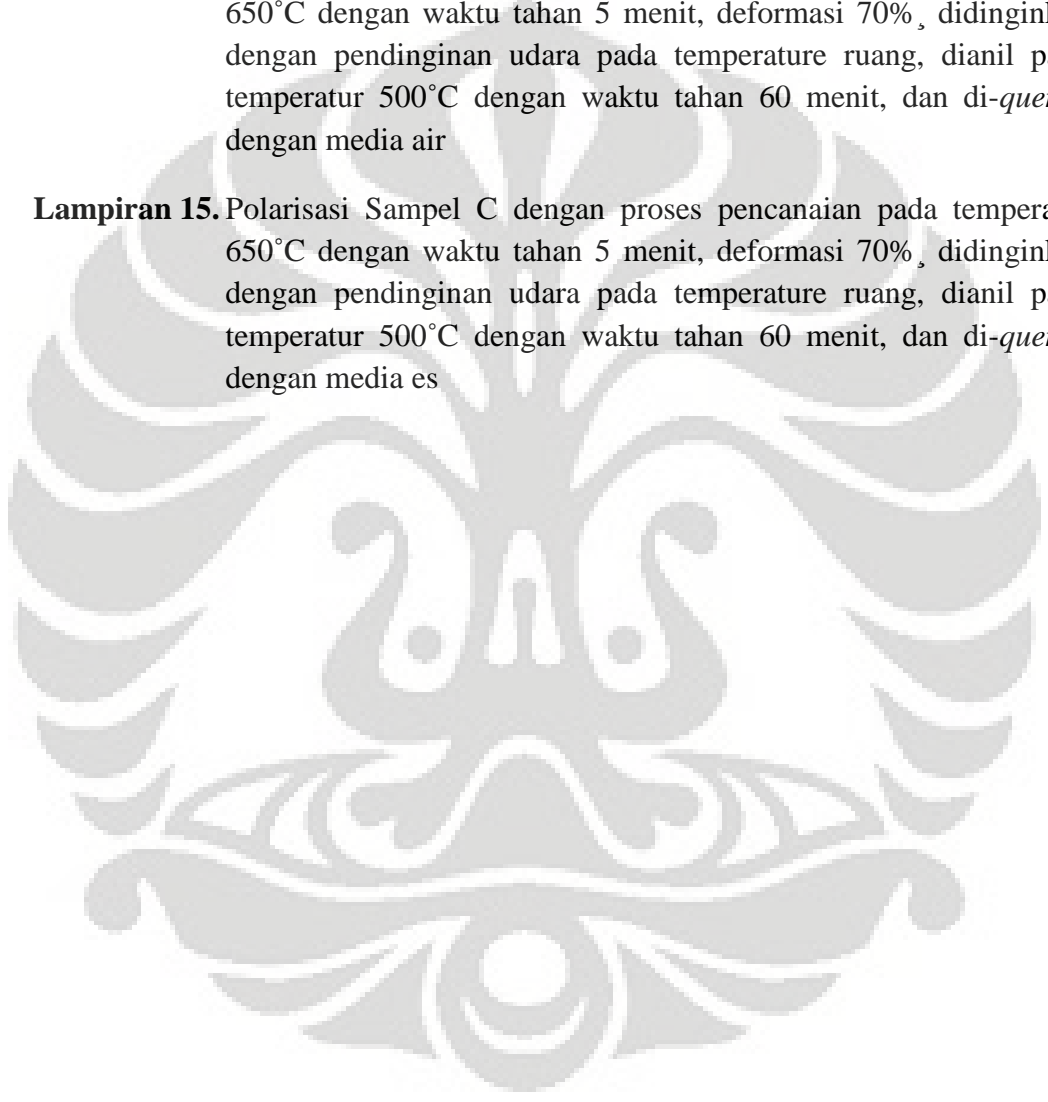
- Lampiran 1.** Hasil Pengujian Komposisi Baja Karbon Rendah SS 400
- Lampiran 2.** Pehitungan Ukuran Butir
- Lampiran 3.** Perhitungan Kekerasan
- Lampiran 4.** Tabel Diameter Butir ASTM E112
- Lampiran 5.** Tabel Konversi Nilai Kekerasan ASTM E140
- Lampiran 6.** Grafik Akuisisi Temperatur Proses A dengan proses pemanasan pada temperatur 650°C dengan waktu tahan 5 menit, deformasi 70% , didinginkan dengan pendinginan udara pada temperature ruang, tanpa anil dan *quench*
- Lampiran 7.** Grafik Akuisisi Temperatur Proses B dengan proses pemanasan pada temperatur 650°C dengan waktu tahan 5 menit, deformasi 70% , didinginkan dengan pendinginan udara pada temperature ruang, dianil pada temperatur 500°C dengan waktu tahan 60 menit, dan di-*quench* dengan media air
- Lampiran 8.** Grafik Akuisisi Temperatur Proses B dengan proses pemanasan pada temperatur 650°C dengan waktu tahan 5 menit, deformasi 70% , didinginkan dengan pendinginan udara pada temperature ruang, dianil pada temperatur 500°C dengan waktu tahan 60 menit, dan di-*quench* dengan media es
- Lampiran 9.** Foto Struktur Mikro Sampel *Bulk*
- Lampiran 10.** Foto Struktur Mikro Sampel A dengan proses pemanasan pada temperatur 650°C dengan waktu tahan 5 menit, deformasi 70% , didinginkan dengan pendinginan udara pada temperature ruang, tanpa anil dan *quench*
- Lampiran 11.** Foto Struktur Mikro Sampel B dengan proses pemanasan pada temperatur 650°C dengan waktu tahan 5 menit, deformasi 70% , didinginkan dengan pendinginan udara pada temperature ruang, dianil pada temperatur 500°C dengan waktu tahan 60 menit, dan di-*quench* dengan media air
- Lampiran 12.** Foto Struktur Mikro Sampel C dengan proses pemanasan pada temperatur 650°C dengan waktu tahan 5 menit, deformasi 70% , didinginkan dengan pendinginan udara pada temperature ruang,

dianil pada temperatur 500°C dengan waktu tahan 60 menit, dan di-*quench* dengan media es

Lampiran 13. Polarisasi Sampel A dengan proses pencanaan pada temperatur 650°C dengan waktu tahan 5 menit, deformasi 70% , didinginkan dengan pendinginan udara pada temperature ruang, tanpa anil dan *quench*

Lampiran 14. Polarisasi Sampel B dengan proses pencanaan pada temperatur 650°C dengan waktu tahan 5 menit, deformasi 70% , didinginkan dengan pendinginan udara pada temperature ruang, dianil pada temperatur 500°C dengan waktu tahan 60 menit, dan di-*quench* dengan media air

Lampiran 15. Polarisasi Sampel C dengan proses pencanaan pada temperatur 650°C dengan waktu tahan 5 menit, deformasi 70% , didinginkan dengan pendinginan udara pada temperature ruang, dianil pada temperatur 500°C dengan waktu tahan 60 menit, dan di-*quench* dengan media es



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Penelitian

Baja merupakan bahan dasar vital untuk industri. Baik itu industri minyak dan gas maupun manufaktur. Perkembangan dunia industri secara tidak langsung berpengaruh pada perkembangan material. Hal ini melatarbelakangi dilakukannya riset untuk memperoleh material baru maupun modifikasi dari jenis material yang sudah ada untuk menyesuaikan dengan kebutuhan industri. Perkembangan teknologi terhadap dunia industri kini telah membawa perubahan yang sangat besar dalam penggunaan atau pemilihan material, khususnya material baja. Aspek ekonomi juga menjadi salah satu aspek yang sangat penting selain aspek enjiniring tentunya. Permasalahan utama dari penggunaan baja berkaitan erat dengan sifat mekanis dan ketahanan korosi baja tersebut. Mengingat dengan keadaan industri manufaktur baja Indonesia, yang saat ini masih menggunakan teknologi lama dan ketersediaan bahan baku yang masih minim, perlu dilakukan perkembangan dalam penelitian agar dengan menggunakan alat yang ada dan bahan baku yang tersedia dapat diproduksi baja yang sesuai dengan permintaan saat ini.

Penggunaan Baja Karbon Rendah (%wtC < 0,3 %) masih mendominasi pada dunia industri terutama industri pipa. Karena memiliki nilai ekonomis yang tinggi dibanding baja lainnya. Biasanya penggunaan baja ini dalam bentuk hasil pengerolan, teranilisasi atau kondisi normalisasi. Perkembangan teknologi perlakuan panas membuat kita dapat memakai teknik pendinginan cepat (rapid cooling) dengan hasil mikrostruktur yang baik dan distorsi yang minimal. Berdasarkan hal tersebut dapat dilakukan pengembangan terhadap baja karbon rendah yang pada aplikasi fabrikasi industri akan relatif lebih mudah dan murah. Sifat mekanik dari baja ini bergantung pada mikrostrukturnya. Struktur ferrite-pearlite merupakan struktur yang sering dijumpai pada baja karbon rendah. Kekuatan atau sifat mekanik dari struktur ferrite-pearlite ini dipengaruhi besar butir ferit^[1]. Beberapa metode yang digunakan industri untuk memperhalus struktur butir ferit-pearlit ini, yaitu: modifikasi komposisi kimia,

normalizing, deformasi plastis melalui pengerolan terkendali, pendinginan cepat, dan pengerjaan hangat / warm working.

Kemampuan untuk mengontrol mikrostruktur baik ukuran dan bentuk butir selama proses memungkinkan peningkatan yang signifikan terhadap sifat akhir baja dan efisien dari segi biaya[2]. Karena mikrostruktur juga memberikan kontribusi terhadap sifat baja termasuk sifat mekanisnya. Kemampuan tersebut dapat diperoleh melalui proses *Thermomechanical Control Process* (TMCP) atau dengan metode *Warm Working* pada temperatur hangat / *warm* yang memiliki jangkauan temperatur antara 500oC-850oC.

1.2 Perumusan Masalah

Masalah utama yang akan dikaji dalam penelitian ini adalah pengaruh dari media pendinginan terhadap karakteristik butir ferit, sifat mekanis, dan ketahanan korosi baja karbon rendah SS400. Melalui pengujian mikrostruktur, pengujian kekerasan, dan pengujian korosi, maka akan didapat hubungan antara pengaruh variasi media pendinginan terhadap karakteristik ukuran butir, struktur mikro, kekerasan, ketahanan korosi, dan kekuatan baja karbon rendah SS400.

1.3 Tujuan

Penelitian ini dilakukan dengan maksud:

1. Mengetahui pengaruh jenis media pendinginan setelah deformasi canai hangat dan pendinginan cepat dan hubungannya terhadap pembentukan butir ferit
2. Mengetahui kekerasan baja karbon rendah SS400 setelah proses deformasi canai hangat
3. Mengetahui ketahanan korosi baja karbon rendah setelah mengalami proses deformasi canai hangat dan pendinginan cepat dengan metode polarisasi
4. Mengetahui hubungan ukuran butir ferit terhadap sifat mekanis

1.4 Ruang Lingkup

Ruang lingkup penelitian ini melingkupi:

1.4.1 Material

Baja karbon rendah SS400 dengan komposisi C 0.12 %, Mn 0.636 %, Si 0.198 %, Al 0.037 %, P 0.008 %, dan Cu 0.018 %.

1.4.2 Parameter Penelitian

Media pendinginan dari proses pencanaan 650°C, deformasi searah 70 %, *reheating* 500°C, dan *quench* dengan variasi media udara, air, dan es.

1.4.3 Tempat Penelitian

Proses penelitian dilakukan di beberapa tempat, yaitu

1. Penelitian terhadap proses pengerjaan hangat dilakukan di Laboratorium Teknologi Perubahan Bentuk Departemen Metalurgi dan Material FTUI.
2. Pengujian komposisi dilakukan di *Central Material Processing and Failure Analysis*, Departemen Metalurgi dan Material FTUI.
3. Preparasi sampel dan pengamatan struktur mikro dilakukan di Laboratorium Metalografi dan HST Departemen Metalurgi dan Material FTUI.
4. Pengujian kekerasan dilakukan di Laboratorium Metalurgi Mekanik Departemen Metalurgi dan Material FTUI.
5. Pengujian korosi dilakukan di Laboratorium Korosi dan Perlindungan Material 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 literature 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.

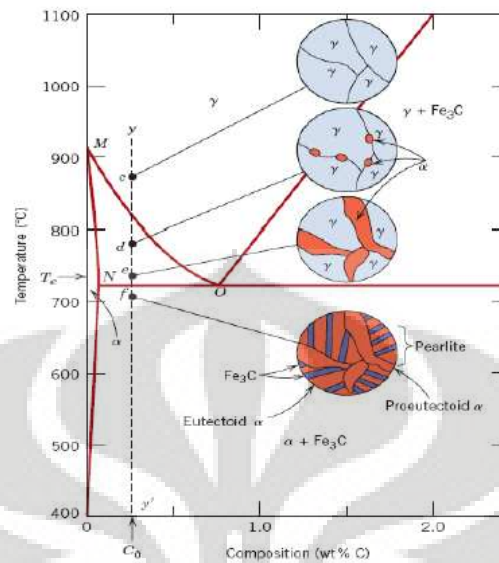
BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Baja Karbon Rendah

Baja jenis ini mengandung kadar karbon (C) hingga 0.30%. Kategori terbesar pada baja jenis ini adalah produk pengerolan/canai, misal sheet atau strip, biasanya hasil dari kondisi pengerolan canai dingin (*cooled-rolled*) dan proses anil. Kandungan karbonnya yang rendah dan mikrostrukturnya yang terdiri dari fasa ferrit dan pearlit menjadikan baja karbon rendah bersifat lunak dan kekuatannya lemah namun keuletan dan ketangguhannya sangat baik. Baja karbon rendah kurang responsif terhadap perlakuan panas untuk mendapatkan mikrostruktur martensit maka dari itu untuk meningkatkan kekuatan dari baja karbon rendah dapat dilakukan dengan proses canai dingin maupun karburisasi^[2].

Kadar karbon untuk baja yang baik kemampubentukannya (*highformability*) sangatlah rendah, kurang dari 0.10% C, dengan kadar manganese max. hingga 0.4% Mn. Penggunaannya digunakan pada *automobile body panels*, *tin plate*, dan produk kawat/ *wire*. Untuk produk baja struktural, kadar karbon ditingkatkan hingga kira-kira 0.30%, dengan kadar manganese yang lebih besar hingga 1.5%. Material ini dapat digunakan untuk *stampings*, *forgings*, *seamless tubes*, dan *boiler plate*.



Gambar 2.1 Transformasi Fasa Pada Baja Karbon

William D Callister, Jr., Material Science and Engineering an Introduction 7th Ed., p.295, New York, John Wiley & Son, 2007

2.2 Pengaruh Deformasi Plastis Terhadap Struktur Mikro

Deformasi plastis sering diklasifikasikan sebagai perlakuan yang selalu dilakukan pada pengerjaan panas atau pengerjaan dingin terhadap logam.

Karakter pengerjaan dingin :

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

Karakter pengerjaan panas :

- Secara umum lebih halus dan memiliki kekuatan yang rendah
- Ketangguhan yang rendah dan keuletan yang tinggi
- Struktur butirnya terdiri dari butir yang terekristalisasi equiaxed
- Untuk baja karbon rendah, memperlihatkan titik regang yang kontinyu

Yang membedakan diantara keduanya adalah pada pengerjaan dingin proses deformasi plastis tidak diikuti proses rekristalisasi. Sedangkan pada pengerjaan panas terjadi proses rekristalisasi yang berlangsung secara bersamaan dengan proses

deformasi. Deformasi plastis merupakan hasil dari pergerakan dari salah satu Kristal yang disebut dislokasi. Pada logam yang dideformasi plastis terdapat sejumlah dislokasi yang terjadi pada kristal-kristalnya. Kepadatan dislokasi dapat seragam atau memiliki nilai yang jauh berbeda dari satu titik ke titik yang lain. Kevariasian dislokasi memberikan peningkatan terhadap kevariasian *large-scale deformations*, termasuk *slip* dan *twinning*. Bidang kristalografi dimana garis dislokasi melintang dikenal dengan bidang *slip*. Garis-garis slip nampak seperti jejak pada bidang *slip*, yang mana dapat dilihat pada permukaan baja. Garis *slip* menandakan terjadi transfer material pada sisi-sisi yang berlawanan terhadap bidang *slip*. *Planer slip* menunjukkan garis *slip* berbentuk lurus (*straight*), sedangkan *wavy slip* menunjukkan garis slip berbentuk seacak tak beraturan. Garis *wavy slip* mengindikasikan rangkaian pemutusan mikroskopik pada dua atau lebih bidang *intersecting slip* seperti yang disebabkan oleh penyimpangan *cross slip* pada *screw dislocation*. Deformasi dan slip pada material polikristalin (suatu susunan yang tersusun lebih dari satu single kristal seperti baja) terlihat sedikit kompleks. Untuk orientasi kristalografi yang acak pada sejumlah butir, arah dari *slip* akan berbeda dari butir yang satu dengan butir yang lain. Karena masing - masing, pergerakan dislokasi yang terjadi pada *slip system* memiliki orientasi masing-masing. Menurut Callister (1997), deformasi plastis sebaiknya terjadi pada produksi bidang slip dan pemanjangan butir sepanjang arah dimana spesimen mengalami pemanjangan ^[2].

2.3 Pengaruh Besar Butir Terhadap Sifat Struktural Baja

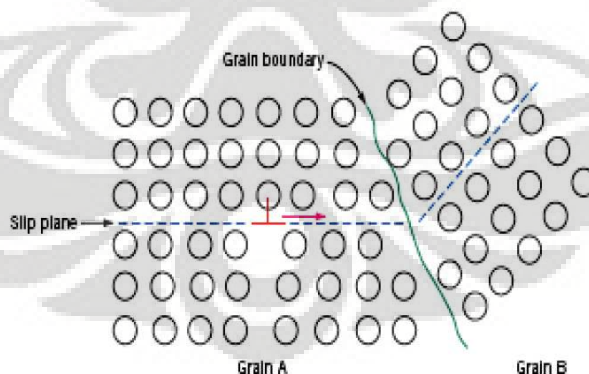
Pengaruh ukuran butiran struktur mikro terhadap sifat struktural dan ketangguhan perpatahan baja adalah sebagai berikut:

1. Secara umum, pada baja ukuran butir kasar (besar) tidak diinginkan seperti ukuran butir halus (kecil) karena mempengaruhi terhadap nilai kekuatan yang lebih rendah dan dapat menurunkan nilai elastisitasnya. Kecenderungan untuk terjadi perpatahan juga cenderung terjadi peningkatan pada ukuran struktur butir yang kasar (Smith 1993).

2. Baja dengan butir halus memiliki lebih banyak batas-batas butiran yang berfungsi sebagai hambatan untuk dislokasi. Karena itu, kepadatan yang lebih tinggi dari batas butir akan menghasilkan *yield* dan *tensile stresses* yang lebih tinggi (Smith 1993). Bidang regangan *fracture toughness* biasanya meningkat dengan pengurangan ukuran butiran ketika komposisi dan variabel mikrostruktur lainnya dijaga konstan (Callister 1997). Pengurangan ukuran butiran menurunkan temperatur transisi secara signifikan, yang merupakan temperatur yang mengubah dari elastis menjadi getas (Totten Howes dan 1997). Oleh karena itu, penurunan ukuran butiran biasanya akan meningkatkan kekuatan dan ketangguhan baja.

2.4 Mekanisme Penguatan Dengan Penghalusan Butir

Sifat mekanis dari suatu material sangat dipengaruhi oleh ukuran dari butir atau diameter butir rata rata dalam logam polikristal. Pada umumnya butir yang bersebelahan biasanya memiliki orientasi (kisi dan lattice) yang berbeda. Hal ini berarti oleh karena perbedaan orientasi tersebut maka akan timbul adanya batas butir. Saat deformasi plastis, slip atau pergerakan dislokasi berada dalam butir, misalnya dari butir A ke butir B dalam Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Ilustrasi Batas Butir dan Pergerakan Dislokasi

William D Callister, Jr., Material Science and Engineering an Introduction 7th Ed., p.188, New York, John Wiley & Son, 2007

Batas butir bertindak sebagai penghalang pergerakan dislokasi karena dua alasan:

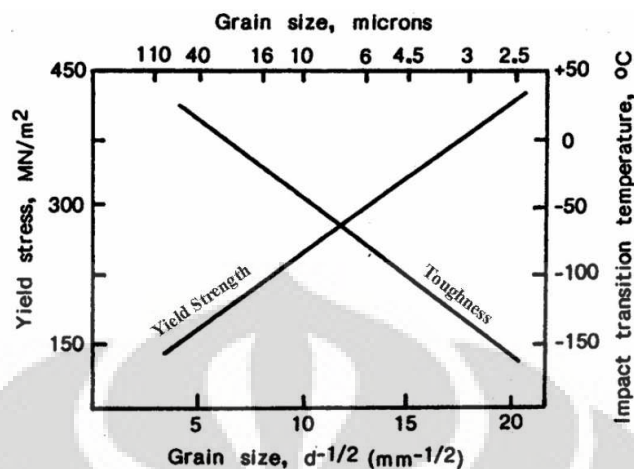
1. Ketidaksamaan *arrangement* atom dalam area batas butir akan menghasilkan berubahnya slip plane dari butir satu ke butir lainnya.
2. Karena dua butir tersebut memiliki orientasi yang berbeda, dislokasi yang menuju butir B harus merubah arah pergerakannya (karena perbedaan orientasi tersebut mengakibatkan tingkat energi yang berbeda pula). Hal ini semakin sulit ketika misorientasi kristalografinya meningkat

Untuk mengetahui pengaruh ukuran butir dari teori diatas kita buktikan dengan *Hall petch Equation*. dengan d adalah diameter butir rata rata, dan 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.

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

Persamaan 2. Hall-Petch ^[2]

Material dengan butir yang halus (yang memiliki butir kecil) lebih keras dan kuat dibandingkan material dengan butir kasar, karena butir halus memiliki area batas butir total yang lebih luas untuk menghalangi pergerakan dislokasi. Untuk sebagian besar material, kekuatan tarik σ_y bervariasi dengan ukuran butir.



Gambar 2.3 Pengaruh besar butir terhadap nilai kekuatan

Pickering, F. B., Physical Metallurgy and the design of the steels, Applied Science Publishers, London, 1978, pp. 1-88.

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

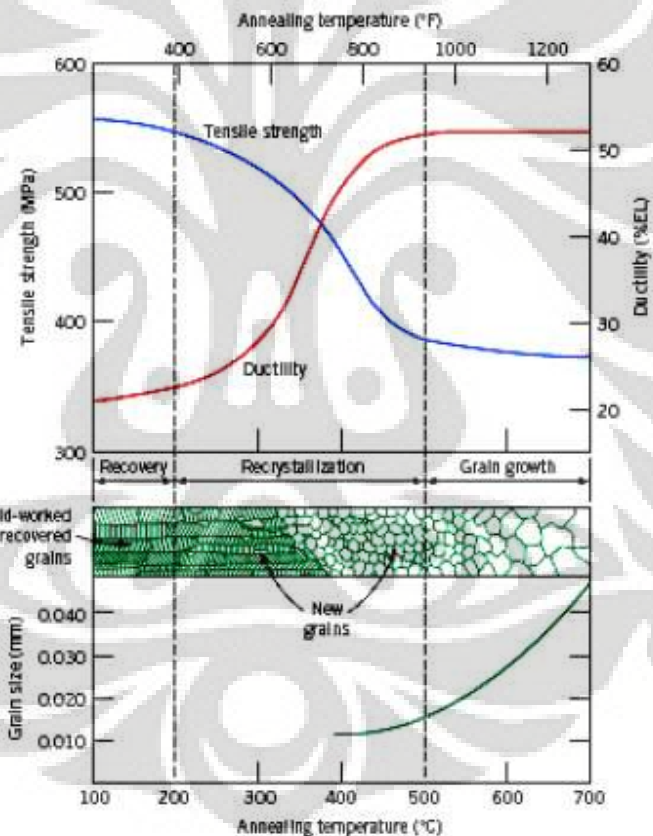
2.5 Rekoveri, Rekristalisasi, dan Pertumbuhan Butir

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

2.5.1 Rekoveri

Rekoveri adalah proses penghilangan energi internal (*internal strain energy*) yang tersimpan yang diperoleh selama proses pengerjaan dingin melalui perlakuan panas (*heat treatment*). Selama proses ini, sifat fisik dan mekanik dari baja pengerjaan dingin akan kembali seperti sebelum dilakukan pengerjaan dingin^[3].

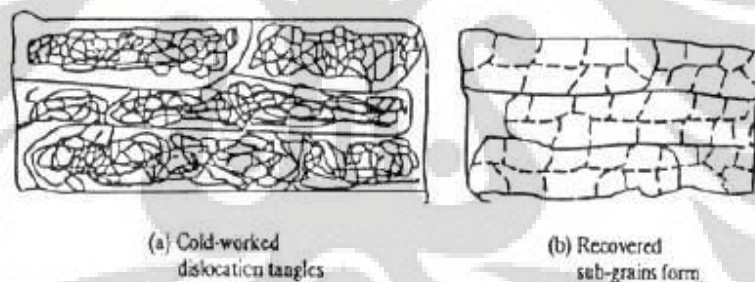
Proses rekoveri adalah proses pertama yang terjadi setelah deformasi. Pada tahapan ini tidak ada perubahan yang cukup berarti pada sifat mekanis dari material seperti yang terlihat pada Gambar 2.4



Gambar 2.4 . Skematis Proses Rekoveri, Rekrystalisasi dan Pertumbuhan Butir

William D Callister, Jr., Material Science and Engineering an Introduction 7th Edition, p.197, New York, John Wiley & Son, 2007

Perubahan mikrostruktur dari material selama tahapan rekoveri ini tidak melibatkan pergerakan batas butir dengan sudut yang besar. Untuk benda kerja yang butirnya memipih setelah canai dingin, tidak terlihat perubahan pada butir tersebut. Namun pada tingkatan submikroskopis, terjadi perubahan pada titik cacat dan klusternya, penghilangan dan pengaturan ulang dislokasi, serta pembentukan sub-butir dan pertumbuhannya. Perubahan mikrostruktural ini akan melepas sebagian besar tegangan dalam dan tahapan rekoveri ini dipergunakan untuk proses stress-relieving. Hilangnya beberapa dislokasi mengakibatkan berkurangnya kekuatan dari material, tetapi hilangnya dislokasi ini diimbangi dengan pembentukan sub-butir, yaitu butir dengan batas butir bersudut kecil. Dari kedua efek yang dijelaskan tersebut didapat kekuatan material yang sama setelah dilakukan pengerjaan dingin. Laju rekoveri adalah proses yang dipengaruhi yang teraktifasi melalui panas yang mana akan menurun dengan penambahan waktu dan penurunan temperatur^[4].



Gambar 2.5 Pembentukan Sub-butir

2.5.2 Rekristalisasi

Ketika tahap rekoveri akan berakhir, pembentukan inti dari butir baru akan mulai terjadi. Rekristalisasi adalah proses transformasi nukleasi dan pertumbuhan butir. Inti dari butir baru terjadi dari bergabungnya sub-butir dan permukaan untuk nukleasi heterogen adalah cacat mikrostruktur seperti permukaan baats 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^[3]. Ketika semua butir terdahulu yang 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 pengerjaan dinginya tinggi, semakin kecil energi termal yang digunakan, berarti semakin rendah temperatur dari rekristalisasi.

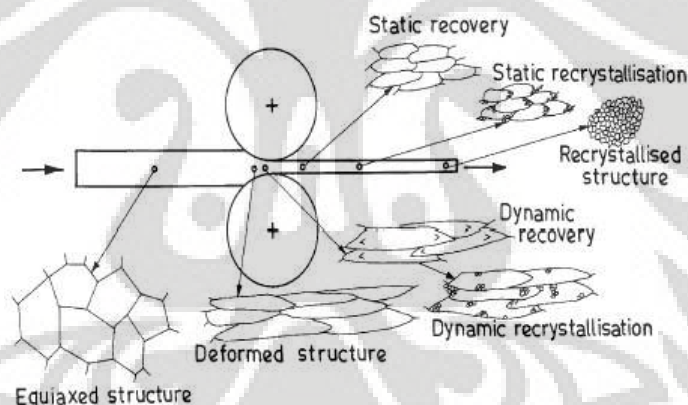
Pada rekristalisasi primer, pembentukan dan pertumbuhan terjadi pada matrik terdeformasi dari butir baru, yang mana bebas distorsi dan secara cukup lebih sempurna dibandingkan matriks setelah terpoligonisasi (Gorelik 1981). Proses perlakuan panas seperti proses anil diperlukan agar rekristalisasi dapat terjadi. Selama rekristalisasi, proses perbaikan sifat mekanik dan fisik telah selesai, kemudian terdapat perubahan pada *preferred orientation* sebelum pertumbuhan butir. Perubahan orientasi ini terjadi penurunan yang signifikan pada kekuatan tarik dan kekerasan dan peningkatan keuletan yang tinggi pada baja.

Faktor yang paling penting yang mempengaruhi proses rekristalisasi pada logam dan paduannya adalah; (1) besaran deformasi / *amount of prior deformation*, (2) temperatur, (3) waktu, (4) besar butir awalan / *initial grain size*, dan (5) komposisi logam atau alloy (Smith 2004). Volume terekristalisasi pada material meningkat selama proses anil (annealing) oleh karena dua proses: laju nukleasi dan pertumbuhan nuklei dimana laju tersebut diuraikan menjadi dua parameter yang dikenal: laju nukleasi (*rate of nucleation*), N , dan laju pertumbuhan (*rate of growth*), G . Keduanya bergantung pada sejumlah deformasi pada deformasi dingin (*cold deformation*). Pada deformasi panas (*hot deformation*), keduanya bergantung pada jumlah dan laju deformasi (Gorelik 1981).

Proses rekristalisasi ini 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^[5]:

1. Pengerjaan dingin kritis yang minimum diperlukan sebelum terjadi rekristalisasi
2. Semakin kecil persentase pengerjaan dingin, semakin tinggi temperatur yang digunakan untuk menghasilkan rekristalisasi
3. Larutan dan dispersi yang halus akan menghambat rekristalisasi

Dalam pengerjaan 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. Ilustrasi dari penjelasan tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 . Perbandingan Antara Rekristalisasi Dinamik dan Statik

B K Panigrahi, Processing Of Low Carbon Steel Plate And Hot Strip An Overview R&D Centre For Iron And Steel, Steel Authority Of India Ltd., Ranchi 834 002, India

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.

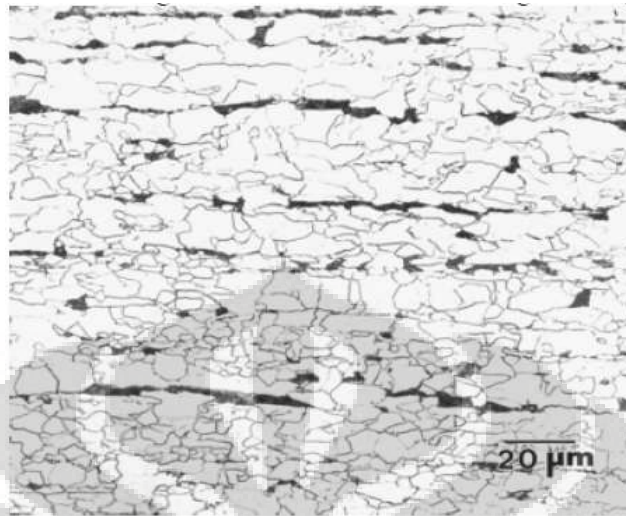
Sama seperti proses rekristalisasi dinamis, pada proses rekristalisasi statis juga terbentuk nuklei, hanya saja pembentukan tersebut terjadi setelah deformasi. Dengan adanya temperatur yang tinggi (diatas temperatur rekristalisasi dari material), maka proses munculnya nuklei pada batas butir dapat terjadi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

2.5.3 Pertumbuhan Butir

Setelah proses rekristalisasi selesai, butir dengan bebas regangan selanjutnya akan tumbuh jika spesimen baja dibiarkan pada temperatur yang tinggi. Pertumbuhan butir ditunjukkan sebagai peningkatan besar butir rata-rata pada material polikristalin. Pertumbuhan butir biasanya merupakan lanjutan setelah proses rekoveri dan proses rekristalisasi. Hal ini terjadi disebabkan adanya migrasi pada batas butir. Tidak semua butir dapat membesar. Oleh karena itu, butir yang lebih besar akan tumbuh yang kemudia menghabiskan butir yang lebih kecil (Callister 1997). 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^[3].

2.6 Struktur Mikro Ferit

Struktur ferit dengan segala pengecualiannya merupakan konstituen utama pada baja karbon rendah. Ferit merupakan baja murni dan memiliki kandungan karbon yang kurang dari 0.005 % C pada temperatur ruang. Ferit juga bisa mengandung unsure paduan seperti mangan dan silikon. Sebuah contoh pada Gambar 2.7 Pada baja karbon rendah pada umumnya, ferit memiliki morfologi *equiaxed* (memiliki dimensi yang sama ke semua arah), bentuk ini juga disebut ferit polygonal. Ferit juga bisa memiliki morfologi *elongated* pada baja yang telah dilakukan pengerjaan dingin^[3].

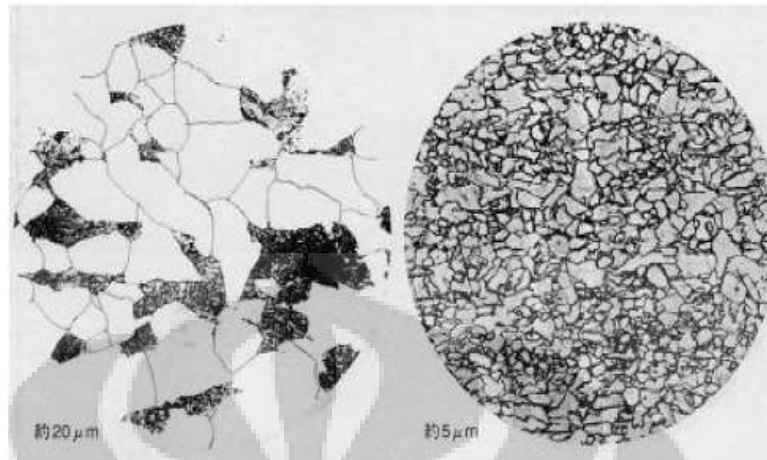


Gambar 2.7 Struktur Mikro Ferit dan Pearlit (Gelap) Berbentuk *Equiaxed* (Polygonal) Pada Baja Karbon Rendah. Perbesaran 500x^[3]

2.7 Thermo-Mechanical Controlled Process (TMCP)

Thermomechanical Controlled Process (TMCP) dapat dikarakteristikan sebagai proses yang melibatkan panas / heat dan deformasi. TMCP adalah sebuah 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 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^[6]. Pada baja TMCP, sifat mekanis terutama ditentukan melalui kombinasi dari perlakuan mekanis, proses rekoveri, rekristalisasi, dan pertumbuhan butir (*grain growth*)^[7].

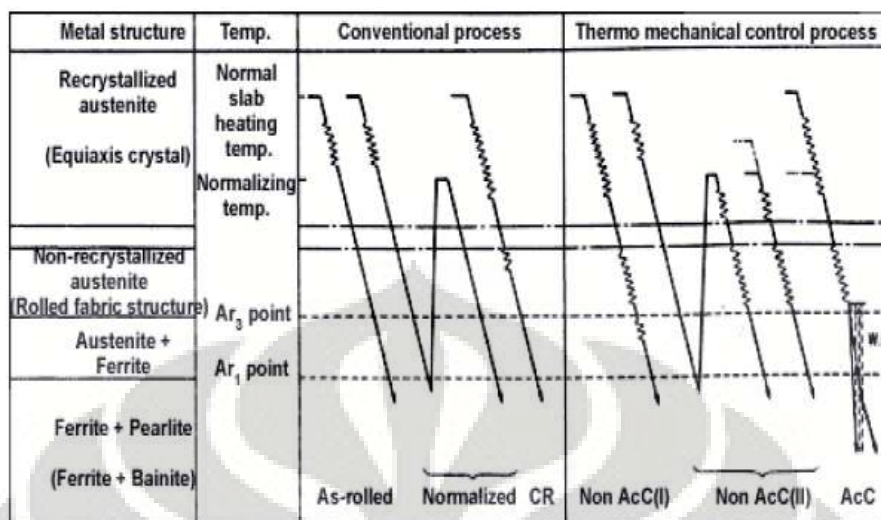


Gambar 2.8 Perbandingan Besar Butir antara pengerolan konvensional (kiri) dan TMCP (kanan)

Yokota, Tomoyuki. Ferrite grain size refinement through transformation . NKK Corp. (JFE group)

Mekanisme penghalusan butir dalam pengerolan terkendali (*controlled rolling*) adalah 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 dihasilkan pertumbuhan butir yang nyata sehingga mekanisme penghalusan butir menjadi terbatas.

Untuk lebih lengkapnya mengetahui perbandingan antara jalur proses konvensional dan TMCP, dapat dilihat pada gambar Gambar 2.8.



Gambar 2.9 Perbandingan Antara Jalur Proses Konvensional dan TMCP. Bagian garis 'Zig-zag' mengindikasikan proses canai.

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

2.8 Warm Working

Warm Working merupakan salah satu metode perlakuan terhadap material logam yang menghasilkan struktur mikro yang sangat halus, pada material logam dan paduannya dengan temperatur kerja di antara pengerjaan panas (*hot working*) dan pengerjaan dingin (*cold working*). Selain menghasilkan struktur mikro yang halus, proses tersebut juga akan mengalami pembentukan *subgrain* berukuran *micrometer* dan *sub-micrometer* pada butir yang berukuran lebih besar / kasar. Sebagai hasil pembentukan sub-butir ini, sifat mekanis dari material akan meningkat. Deformasi plastis yang terjadi memberikan kontribusi pada pembentukan *grain sub-division* dan *local dynamic recovery* dan pengerjaan hangat akan terjadi proses rekristalisasi berkontribusi pada proses penghalusan butir.

Warm Working, proses pengerjaannya berada pada range temperature 550°C - 850°C sehingga dapat dijelaskan bahwa metode ini sangatlah menghemat energi. Selain efisiensi energi, metode ini banyak diminati karena memiliki beberapa keuntungan lainnya. Sebagai contoh, jika dibandingkan dengan pengerjaan 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^[9]. Kemudian jika dibandingkan dengan pengerjaan 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^[10]. Juga terdapat studi yang menyatakan bahwa proses *warm working* berhubungan dengan range temperature berada diantara *hot working* dan *cold working*, setelah terjadi deformasi plastis, material sebagian mengalami pengerasan tegangan / *strain hardened* dan sebagian mengalami rekristalisasi^[11].

2.9 Quenching

Quenching adalah proses pendinginan cepat suatu komponen logam dari temperatur austenisasi ke temperatur dimana fasa yang kita inginkan dapat terbentuk, pada baja umumnya adalah struktur mikro martensit. *Quenching* dikatakan berhasil jika kita telah mampu mendapatkan struktur mikro, kekerasan, kekuatan maupun ketangguhan yang kita inginkan dengan tetap meminimalisasi tegangan sisa, distorsi dan kemungkinan terjadinya retak/*cracking*.^[12]

Pemilihan media quench yang tepat tergantung pada kemampukerasan/*hardenability* material, ketebalan dan geometri benda, serta kecepatan pendinginan untuk mendapatkan struktur mikro yang diinginkan. Media quench atau *quenchant* yang biasa digunakan antara lain:

- Air
- Oli
- Lelehan garam
- Lelehan logam
- Larutan polimer

Kemampukerasan adalah kemampuan material untuk mengalami pengerasan dengan membentuk martensit. Baja karbon rendah memiliki kemampukerasan yang

rendah karena kelarutan karbonnya yang rendah. Sebaliknya pada baja karbon menengah dan tinggi akan mudah membentuk martensit karena kelarutan karbonnya cukup tinggi untuk memudahkan terbentuknya martensit.

Selama proses *quenching*, bentuk maupun ketebalan akan mempengaruhi kecepatan pendinginan dari benda. Hal ini terjadi karena energi panas di dalam komponen akan terlebih dahulu mengalir ke permukaan benda sebelum nantinya dibuang ke media quench. Inilah yang menyebabkan kecepatan pendinginan antara di dalam dan di permukaan benda berbeda tergantung dari ketebalan dan geometri bentuknya^[12].

Penggunaan media quench yang tepat juga ikut berpengaruh pada kecepatan pendinginan. Semakin tinggi kecepatan pendinginan maka semakin dalam juga efek dari pengerasan/pembentukan martensit. Pengaruh media quench dengan dapat diketahui menggunakan *grossman quench severity factor*, H, pada Tabel 2.1 di bawah. Semakin tinggi nilai H, maka semakin tinggi pula kecepatan pendinginan pada komponen.

Tabel 2. Pengaruh media *quench*^[12]

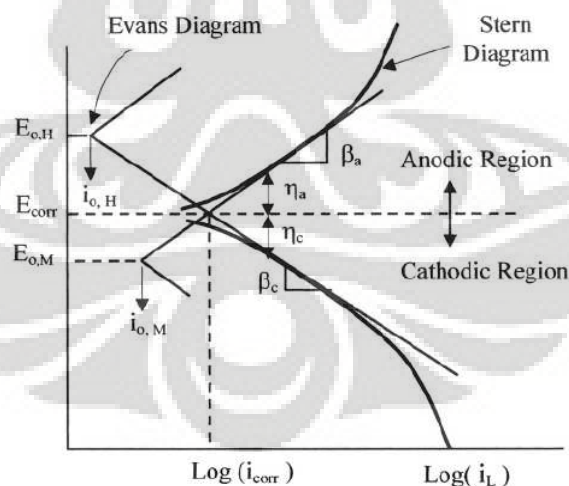
Circulation or Agitation	Grossman Quench Severity Factor, H			
	Brine Water	Water	Oil and Salt	Air
None	2	0,9-1,0	0,25-0,30	0,02
Mild	2-2,2	1,0-1,1	0,30-0,35	...
Moderate	...	...2-1,3	0,35-0,40	.
Good	...	...4-1,5	0,4-0,5	.
Strong	...	...6-2,0	0,5-0,8	.
Violent	5	4	0,8-...1	.

2.10 Korosi Elektrokimia

Korosi secara umum didefinisikan sebagai bereaksinya suatu material dengan lingkungannya. Sebagai akibat maka material tersebut bisa mengalami 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.

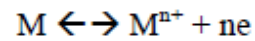
Korosi logam secara sederhana dapat dibagi menjadi dua jenis yaitu: Korosi basah (*aqueous corrosion*) dan korosi kering/korosi temperatur tinggi (*oxidation corrosion*). Pada korosi basah, akan ditimbulkan arus listrik sehingga jenis korosi ini disebut sebagai korosi elektrokimia. Hal ini mudah terjadi pada logam karena logam merupakan penghantar listrik yang baik, akibatnya logam akan bereaksi secara elektrokimia membentuk senyawa yang sejenis dengan bentuknya semula di alam.

Untuk mendapatkan gambaran yang lebih jelas mengenai sistem korosi, seperti besarnya laju korosi, diperlukan pengetahuan mengenai kinetika dari reaksi korosi. Kinetika korosi adalah suatu 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 *overpotential*. Anoda merupakan tempat terjadinya oksidasi 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. Penyimpangan potensial ini disebut dengan polarisasi. Gambar 2.9 dibawah ini menunjukkan kesetimbangan kinetika reaksi anoda dan katoda dari suatu logam.



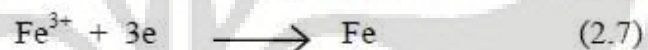
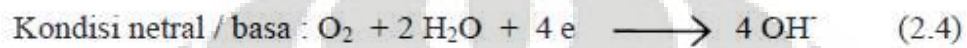
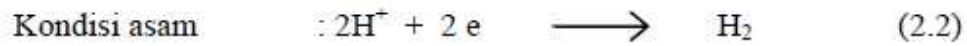
Gambar 2.10 Diagram Evans ^[12]

Secara teori reaksi pelarutan logam pada suatu larutan bisa disebut sebagai reaksi bolak balik (reversible), dengan notasi reaksi sebagai berikut :



Secara umum reaksi-reaksi korosi dapat dituliskan sebagai berikut:

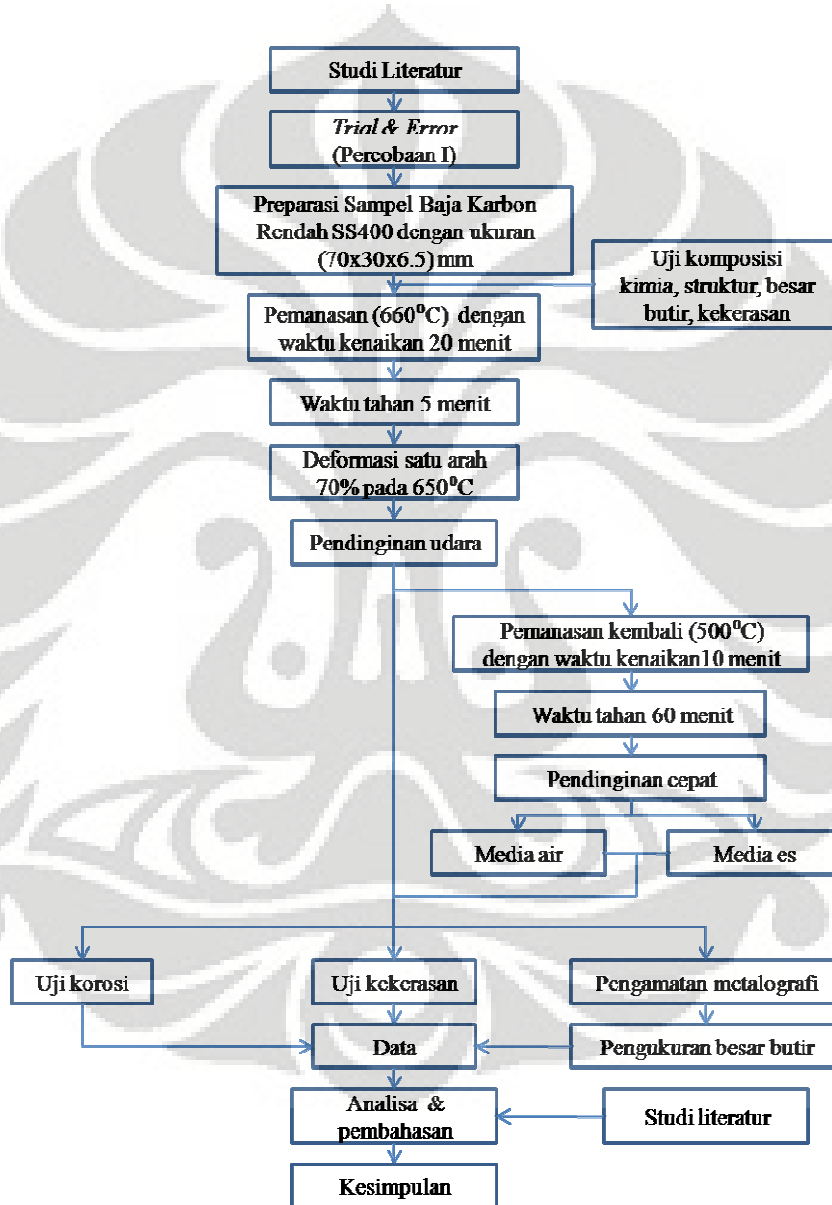
(1). Pada daerah katoda dapat terjadi reaksi-reaksi reduksi :



BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Proses pengujian dapat dilihat pada diagram alir berikut ini:



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat

1. Mesin rol dengan kapasitas 20 ton
2. Mesin pemanas / *oven carbolite*
3. Mesin bor
4. Mesin *Work Bench for PC*
5. Termokopel
6. Mesin Komputer Pengukur Temperatur
7. Jangka sorong
8. Mesin amplas
9. Mesin poles
10. Mikroskop optic
11. *Beaker Glass*
12. *Multi tester*
13. Pipet
14. Mesin CMS
15. Mesin uji kekerasan Vickers
16. Ember
17. Air dan Es
18. Printer

3.2.2 Bahan

1. Baja Karbon Rendah SS400 dengan dimensi 70 x 30 x 6 (mm).
2. Resin
3. *Hardener*
4. Kertas amplas *grid* #80, #120, #240, #400, #600, #800, #1000, #1200, #1500
5. Alumina (Al_2O_3)
6. Kain poles / beludru
7. Zat etsa kimia Nital 3 %, alkohol 96 %

3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Pemilihan Material

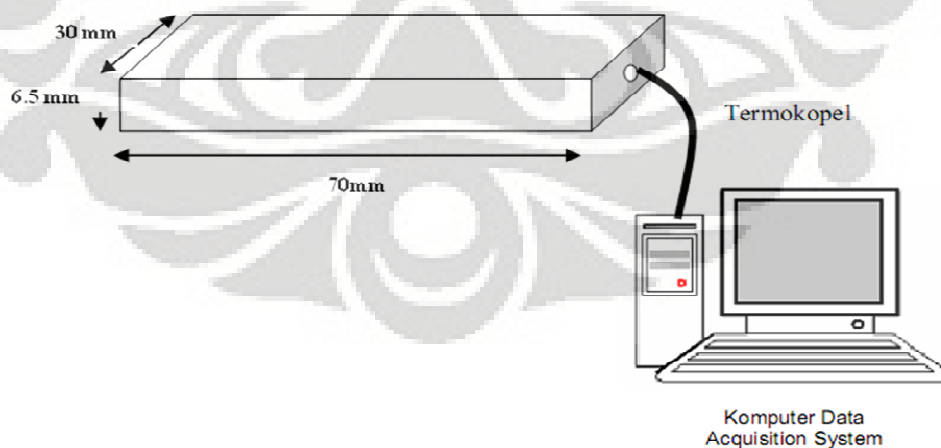
Pada tahap ini ditentukan area mana yang akan diambil sebagai sampel uji. Material baja yang menjadi sampel uji adalah SS 400 yang mana merupakan jenis baja karbon rendah. Dengan komposisi seperti pada table 3.1, yaitu :

Tabel 3. Komposisi Sampel Baja Karbon Rendah SS400

Komposisi	C	Mn	Si	Al	P	Cu
(Wt %)	0.12	0.636	0.198	0.037	0.008	0.018

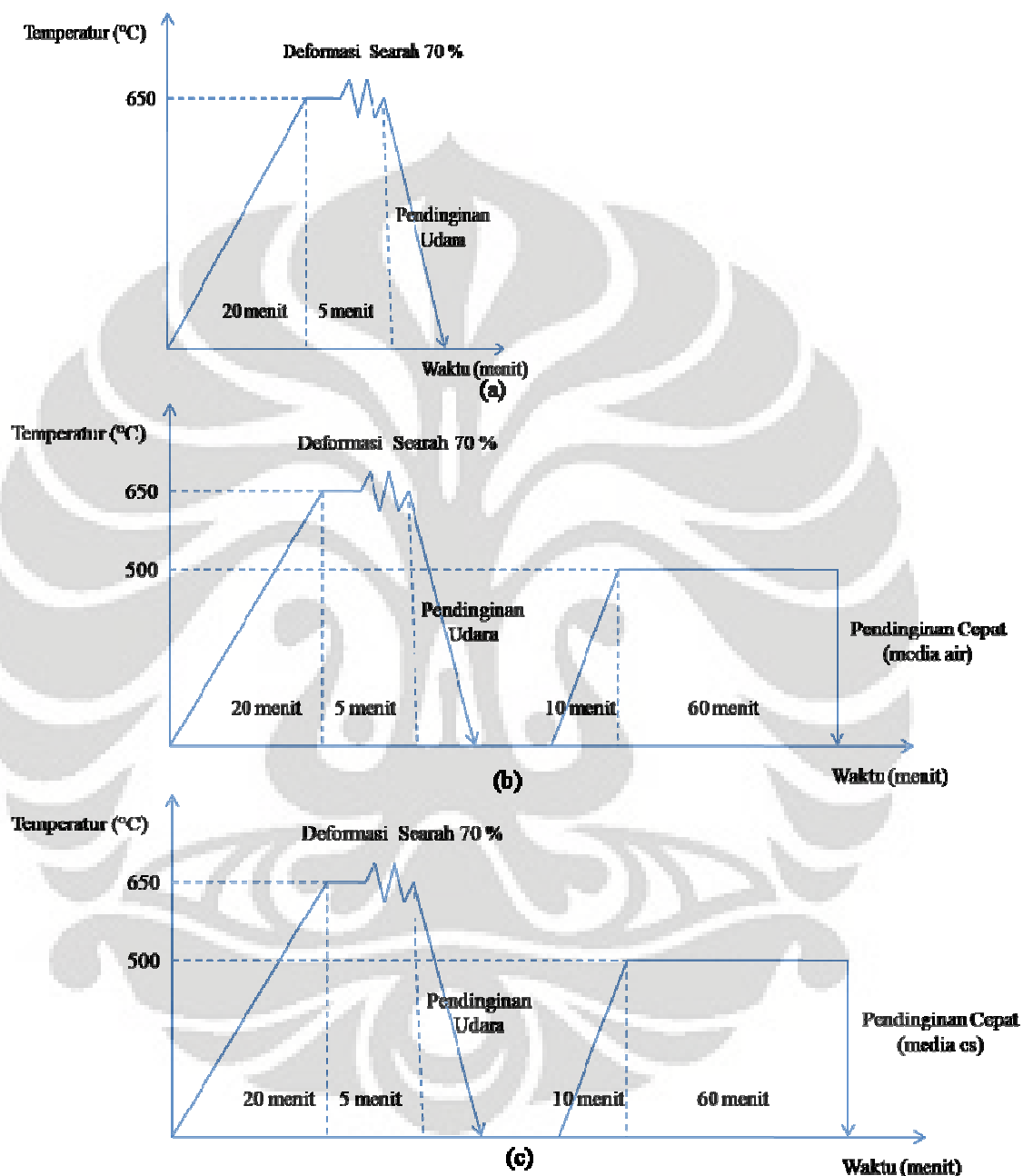
3.3.2 Preparasi Sampel

Sampel baja karbon rendah SS400 yang digunakan pada penelitian ini hasil preparasi slab yang dipotong sehingga berbentuk balok dengan dimensi 70 x 30 x 6.5 (mm). Kemudian diberikan lubang untuk meletakkan kawat termokopel tipe K sebagai alat untuk mengukur temperatur benda uji. Pengukuran temperatur menggunakan data *acquisition system* yang dihubungkan dengan mesin *Work Bench for PC* yang disambungkan ke computer. Adapun kedalaman lubang adalah 5 mm dengan diameter 2,5 mm sesuai diameter termokopel.



Gambar 3.2 Ilustrasi Benda Uji dan Pemasangan Termokopel

3.3.3 Proses Pemanasan



Gambar 3.3 Grafik Pengujian Baja Karbon Rendah SS 400 dengan Pencanaan 650°C, Deformasi 70%. (a) Tanpa Proses Anil 500°C dan *Quench*, (b) Dengan Proses Anil 500°C dan *Water Quench*, (c) Dengan Proses Anil 500°C dan *Ice Quench*

Penelitian ini terbagi atas beberapa variasi proses seperti terlihat pada Gambar 3.2, yaitu :

1. Sampel Tanpa Perlakuan (*Bulk*)

Benda uji tidak diberi perlakuan sama sekali. Karena benda uji tersebut akan menjadi tolak ukur bagi proses selanjutnya.

2. Proses Pencanaan dengan Media Pendinginan Udara (Proses A)

Proses pemanasan dilakukan dengan memasukkan sampel ke dalam dapur *carbolite*, temperturnya dinaikkan hingga 650°C selama 20 menit, kemudian ditahan selama 5 menit ketika sudah mencapai temperatur 650°C. setelah proses pemanasan, sampel dideformasi sebesar 70 % dengan metode, kemudian sampel didinginkan pada temperatur ruang melalui pendinginan udara, seperti terlihat pada Gambar 3.2.a. Sampel diberikan label A.

3. Proses Pencanaan dengan Media Pendinginan Air dan Es (Proses B dan C)

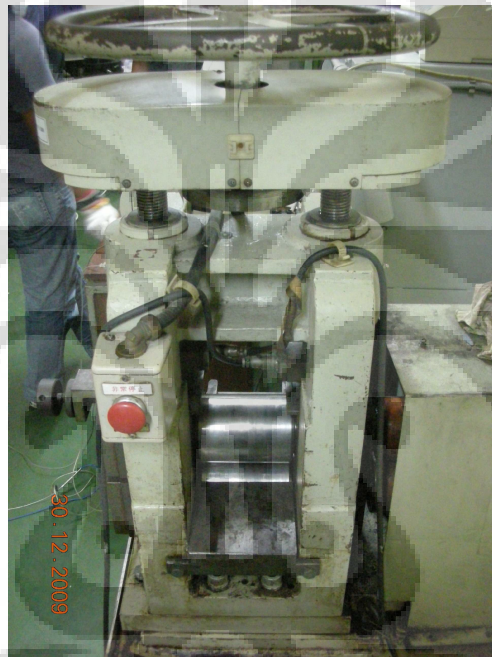
Proses ini merupakan perlakuan lanjutan dari proses A. Sampel dimasukkan lagi ke dalam dapur *carbolite*, temperatur dinaikkan hingga 500°C selama 10 menit, kemudian ditahan selama 60 menit. Setelah itu sampel di-*quench* dengan media air (Gambar 3.2.b) dan es (Gambar 3.2.c). Sampel dengan media pendinginan cepat air diberi label B dan sampel dengan media pendinginan cepat es diberi label C.



Gambar 3.4 Dapur *Carbolite*

3.3.4 Proses Canai Hangat

Canai hangat dilakukan dengan deformasi searah 70 %. Pencanaian dilakukan dengan menggunakan mesin canai merk ONO dengan kapasitas beban maksimum 20 tonF yang berada di Laboratorium Metalurgi Mekanik Departemen Metalurgi dan Material FTUI.



Gambar 3.5 Mesin Canai

3.3.5 Proses Pendinginan

Sampel A didinginkan dengan udara pada temperatur ruang, sampel B didinginkan dengan media air, dan sampel C didinginkan dengan media es.

3.3.6 Preparasi, Pengujian Metalografi dan Pengamatan Mikrostruktur

Tujuan dari proses ini adalah untuk mendapatkan pencitraan struktur mikro dari material yang telah dilakukan proses pengerjan hangat. Sampel dilakukan proses pemotongan untuk pengujian metalografi agar mudah dalam pengamatan. Lalu sampel dilakukan proses *mounting* agar mudah dalam proses pengamplasan dan

pemolesan. Proses pengamplasan dilakukan untuk meratakan bagian samping benda uji khususnya pada bagian yang posisinya dekat dengan lubang termokopel. Pengamplasan dilakukan dengan menggunakan kertas amplas yang dimulai dari amplas kasar hingga amplas halus untuk mendapatkan permukaan benda uji yang halus dan merata di seluruh permukaan. Ukuran kekasaran dari kertas amplas yang digunakan yaitu: #80, #120, #240, #400, #600, #800, #1000, #1200, #1500 (dalam *mesh*). Proses pengamplasan dilakukan dengan mengubah arah pengamplasan setiap pergantian tingkat kekasaran kertas amplas, sehingga bisa dipastikan sisa pengamplasan sebelumnya telah hilang dan didapat permukaan yang halus dari benda uji. Setelah itu sampel dipoles untuk mendapatkan permukaan yang lebih halus dan mengkilap serta menghilangkan bekas goresan akibat pengamplasan. Proses pemolesan dilakukan dengan menggunakan kain poles dan bahan poles berupa *Titanium Oxide*.



Gambar 3.6 Mesin Amplas

Proses selanjutnya yaitu etsa yang bertujuan untuk memunculkan jejak batas butir dalam struktur akhir dari sampel. Kemudian benda uji dietsa dengan Nital 3 % untuk memunculkan jejak batas butir struktur akhir dari sampel sehingga dapat diamati morfologi butir ferrit. Setelah itu dilakukan pengamatan dengan mikroskop optik. Keseluruhan proses dilakukan di Laboratorium Metalografi dan

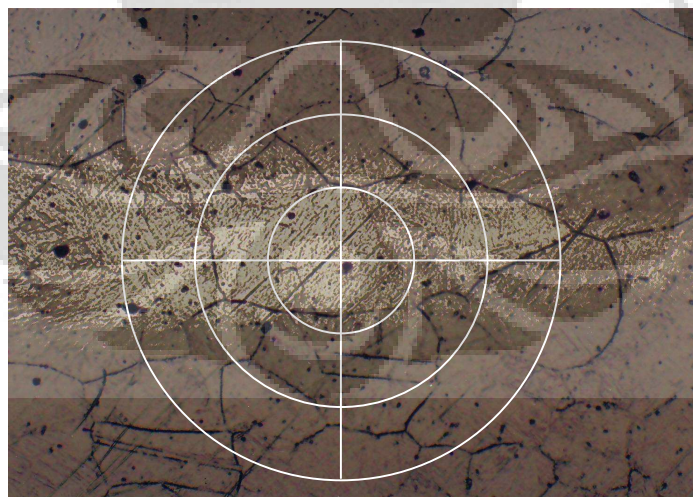
Keseluruhan proses dilakukan di Laboratorium Metalografi dan HST di Departemen Metalurgi dan Material FTUI.



Gambar 3.7 Mesin Poles

3.3.7 Perhitungan Ukuran Butir^[14]

Pengujian dan perhitungan besar butir dilakukan dengan menggunakan standar ASTM E112. Terdapat berbagai metode perhitungan besar butir yang ada dalam ASTM E112, namun yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah metode *Intercept Heyn* sesuai dengan standar perhitungan metalografi kuantitatif ASTM E112. Teknik penghitungan dilakukan sebagai berikut:



Gambar 3.7 Metode *Intercept*, dengan menggunakan garis berbentuk lingkaran dengan total panjang garis 500 mm, dengan foto perbesaran 100X

Dari gambar 3.7 di atas, dihitung jumlah titik potong antara total panjang garis yang ditarik sepanjang 500mm dengan batas butir pada foto struktur mikro dengan perbesaran 100 kali. Jumlah titik potong persatuan panjang (P_L) dihitung dengan rumus:

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

Persamaan 3.1 Rumus Jumlah Titik Per Satuan Panjang

, dan panjang garis perpotongan (L_3) adalah:

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

Persamaan 3.2 Rumus Panjang Garis Perpotongan

dimana :

P = Jml 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 rumus $G = [-6,6439 \log (L_3) - 3,2877]$

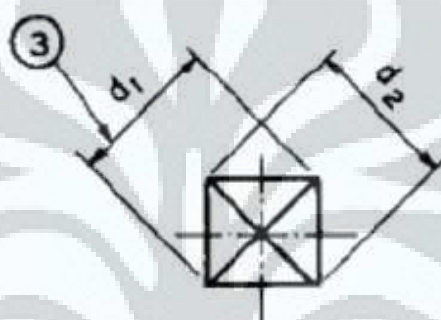
$$G = [-6,6439 \log(L_3) - 3,2877] \dots\dots\dots(3.3)$$

Persamaan 3.3 Rumus Ukuran Butir

3.3.8 Uji Kekerasan^[15]

Pengujian nilai kekerasan menggunakan standar ASTM E92 yaitu metode pengujiankekerasan Vickers. Prinsip pengujiannya yaitu dengan melakukan penjejakan atau indentasi pada sampel dengan indenter intan berbentuk piramida dengan kemiringan sekitar 136°. Jejak indentasi yang terdapat pada sampel akan

berbentuk segi empat atau belah ketupat yang dapat dihitung panjang diagonal-diagonalnya (lihat Gambar 3.8). Panjang diagonal jejak yang dihasilkan selama proses penjejakan dapat dihitung dengan menggunakan skala penghitung yang terdapat pada mikroskop mesin uji kekerasan Vickers. Gambar 3.14. merupakan gambar mesin uji kekerasan Vickers yang digunakan selama penelitian. Setelah panjang diagonal-diagonalnya diketahui maka nilai kekerasan dari sampel dapat diketahui dengan menggunakan rumus kekerasan Vickers.



Gambar 3.9 Ilustrasi Jejak yang dihasilkan Selama Penjejakan

$$VHN = \frac{2P \sin(\alpha/2)}{d^2} = \frac{1,854P}{d^2} \dots\dots\dots(3.4)$$

Persamaan 3.4 Rumus kekerasan Vickers

- VHN = Satuan Kekerasan Vickers
- P = Beban (kgf)
- α = Sudut Piramida (136°)
- d = Panjang Diagonal Penjejakan



Gambar 3.10 Mesin Uji Kekerasan Vickers

3.3.9 Uji Ketahanan Korosi ⁽¹⁶⁾

Metoda pengukuran laju korosi material yang digunakan pada penelitian ini adalah metoda polarisasi. Prinsip pengujian polarisasi adalah dengan penentuan hubungan potensial dan arus material dalam kurva polarisasi sesuai dengan standar ASTM G102.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengukuran Ketebalan Benda Uji

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

$$\% \text{ Deformation} = \ln \frac{H_0}{H_f} \dots\dots\dots (4.1)$$

Persamaan 4.1 Perhitungan regangan sesungguhnya (true strain) pada benda uji

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

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

Tabel 4.1 Pengukuran Dimensi Awal dan Akhir Benda Uji Baja Karbon Rendah SS400 dengan Pencanaan 650°C, Deformasi 70%, Anil 500°C, dan dilakukan *quench* dengan media air dan es

No	Sampel	Ukuran Awal (mm)			Derajat Deformasi (%)	Ukuran Akhir (mm)			Real Deformasi (%)	ε
		P _o	L _o	t _o		P ₁	L ₁	t ₁		
1	<i>Bulk</i>	70	30	6.5		70	30	6.5		0
2	A	70	30	6.5	70	87	31.3	4.8	26.15	24.29
3	B	70	30	6.5	70	90.3	30.4	5.15	20.77	28.93
4	C	70	30	6.5	70	98.8	31.4	4.7	27.69	41.07

4.2 Hasil Perhitungan Butir

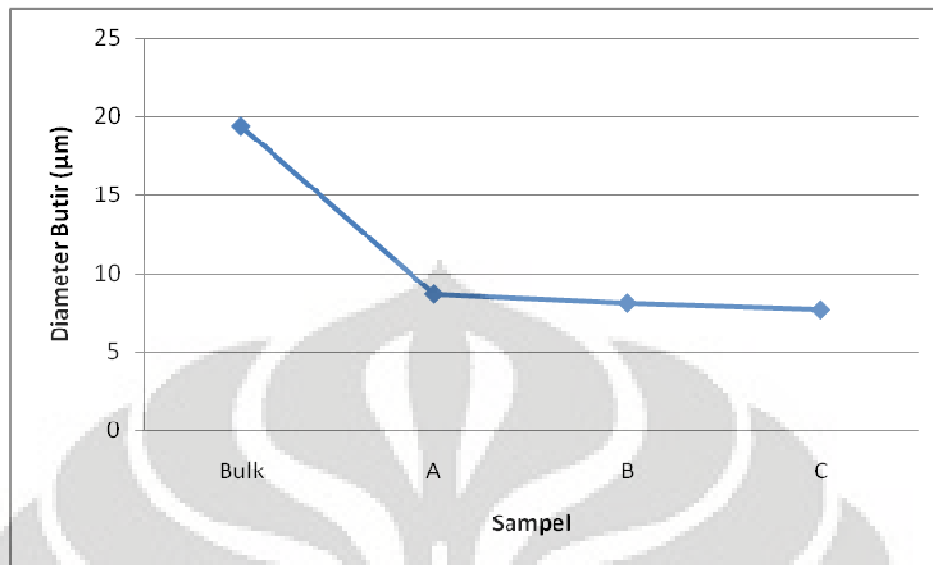
Perhitungan butir dilakukan sebanyak 3 kali perhitungan. Setelah dilakukan 3 kali perhitungan maka dapat diperolehlah diameter butir. Perhitungan diameter butir ferit dilakukan menggunakan metode *Intercept Heyn* sesuai dengan standar ASTM E112.

Hasil perhitungan diameter ferit dari baja karbon rendah SS 400 terlihat pada tabel 4.2 berikut:

Tabel 4.2 Perhitungan Diameter Butir Benda Uji Baja Karbon Rendah SS400 dengan Pencanaan 650°C, Deformasi 70%, Anil 500°C, dan dilakukan *quench* dengan media air dan es

No	Sampel	Diameter	Standar Deviasi	Diameter rata-rata (µm)	ASTM Grain Size Number	Keterangan
0	Bulk	18.78	1.33	19.39 ± 1.33	8.43	Tanpa Perlakuan
		18.48				
		20.92				
1	A	8.8	0.22	8.67 ± 0.22	10.75	650°C-def 70%-air cooling
		8.8				
		8.41				
2	B	9.13	1.24	8.1 ± 1.24	10.96	650°C-def 70%-air cooling-anil 500°C-water quench
		8.47				
		6.72				
3	C	7.61	0.25	7.68 ± 0.25	11.09	650°C-def 70%-air cooling-anil 500°C-ice quench
		7.47				
		7.96				

Hubungan antara media pendinginan dengan diameter butir ferit baja karbon rendah SS 400 dapat digambarkan pada gambar 4.1 di bawah ini.



Gambar 4.1. Grafik Hubungan antara Media Pendinginan dengan Diameter Butir

Berdasarkan Gambar 4.1, diameter butir yang didapat dari perhitungan pada sampel menunjukkan hasil sebagai berikut; sampel *bulk* tanpa perlakuan memiliki butir dengan diameter $19.39 \pm 1.33 \mu\text{m}$, sampel A (Gambar 3.2.a) dengan proses pencanaan pada temperatur 650°C dengan waktu tahan 5 menit, deformasi 70%, dan didinginkan dengan pendinginan udara pada temperatur ruang memiliki butir dengan diameter $8.67 \pm 0.22 \mu\text{m}$, sampel B (Gambar 3.2.b) dengan proses pencanaan pada temperatur 650°C dengan waktu tahan 5 menit, deformasi 70%, didinginkan dengan pendinginan udara pada temperatur ruang, dianil pada temperatur 500°C dengan waktu tahan 60 menit, dan di-*quench* dengan media air memiliki butir dengan diameter $8.1 \pm 1.24 \mu\text{m}$, dan sampel C (Gambar 3.2.c) dengan proses pencanaan pada temperatur 650°C dengan waktu tahan 5 menit, deformasi 70%, didinginkan dengan pendinginan udara pada temperatur ruang, dianil pada temperatur 500°C dengan waktu tahan 60 menit, dan di-*quench* dengan media es memiliki diameter butir $7.68 \pm 0.25 \mu\text{m}$.

Temperatur media *quench* yang lebih tinggi menghasilkan kecepatan pendinginan yang lebih lambat^[12]. Ketika baja didinginkan pada *range* temperatur intermediate hingga ruang, atom – atom bisa berdifusi terlalu jauh. Namun ketika

didinginkan pada rasio kecepatan yang lebih tinggi, atom – atom hanya bisa berdifusi pada jarak yang pendek sehingga bisa mendapatkan butir yang lebih halus^[18].

Selain *quench*, proses anil juga mempengaruhi hasil. Pada sampel B dan C, sebelum di-*quench*, dilakukan proses anil pada temperatur 500°C dengan waktu tahan 60 menit . Pada proses tersebut terjadi penghalusan ukuran butir ferit, hal ini disebabkan karena terjadinya proses rekristalisasi butir ferit pada temperatur pemanasan yang rendah yaitu 500°C sehingga terjadi reduksi ukuran butir ferit. Dengan waktu tahan 60 menit juga membuat butir pada proses B dan C mengalami rekristalisasi yang lebih baik. Untuk mendapatkan butir-butir yang terekristalisasi dengan temperatur rendah (500°C) maka dibutuhkan waktu tahan yang lebih lama sehingga semua butir-butir akan mengalami rekristalisasi yang lebih baik. Sampel A mengalami proses anil pada temperatur 650°C dengan waktu tahan 5 menit sebelum dideformasi, tetapi tidak mengalami proses anil pada temperatur 500°C dengan waktu tahan 60 menit. Dengan proses seperti itu, sampel A memiliki butir yang lebih besar karena sampel A sempat mengalami rekristalisasi statis pada saat didinginkan pada temperatur udara setelah deformasi yang menyebabkan ukuran butir semakin besar. Hal tersebut disebabkan karena adanya pertumbuhan butir yang terjadi dengan 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^[2].

Dapat disimpulkan bahwa semakin rendah temperatur media *quench*, semakin cepat kecepatan pendinginan, semakin kecil ukuran butir sampel^[17].

4.3 Hasil Pengamatan Metalografi

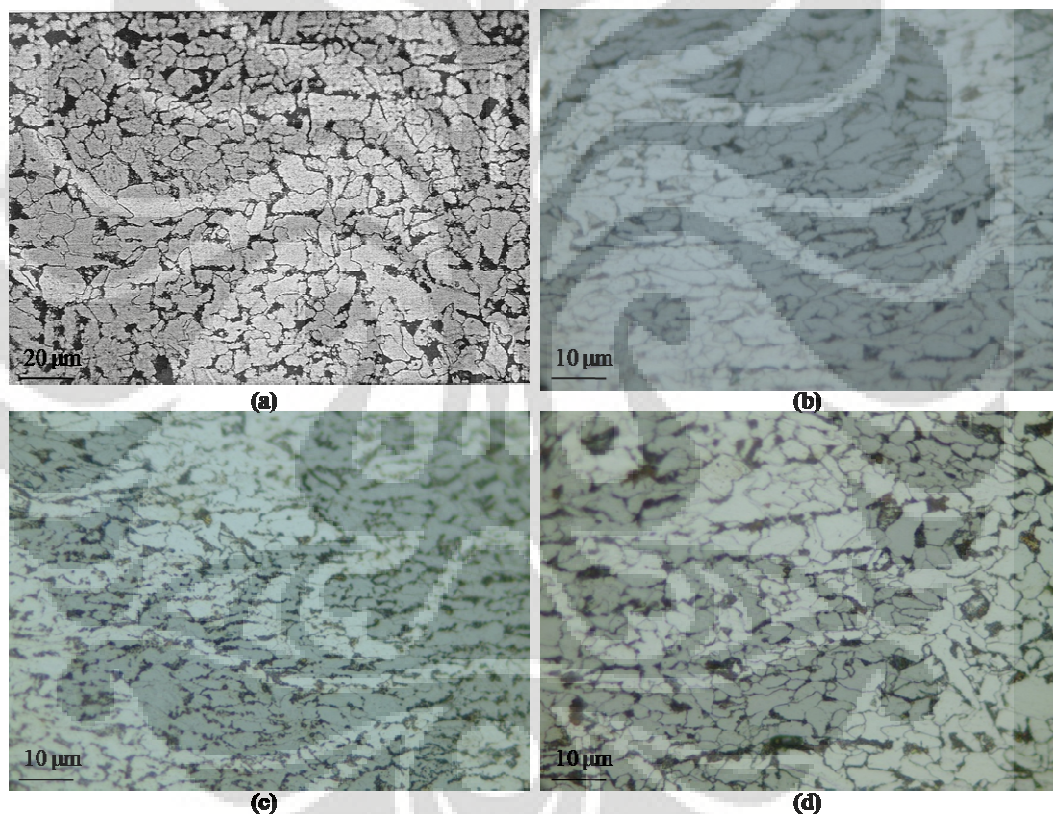
Ada 3 jenis metode pengujian yang dilakukan pada penelitian ini seperti diilustrasikan pada Gambar 3.2.

Metoda pengujian yang pertama pada sampel A (Gambar 3.2.a), yaitu dilakukan pemanasan hingga temperatur 650°C selama 20 menit dan ditahan selama 5

Universitas Indonesia

menit, kemudian dideformasi 70% lalu didinginkan dengan pendinginan udara pada temperatur ruang. Metode pendinginan yang kedua dan ketiga merupakan perlakuan lanjutan dari proses A yang diujikan pada sampel B dan C, yaitu sampel dianil hingga temperatur 500°C selama 10 menit dan ditahan selama 60 menit, kemudian sampel di-*quench* dengan media air (untuk sampel B, gambar 3.2.b) dan es (untuk sampel C, gambar 3.2.c).

Dari pengujian tersebut dihasilkan struktur mikro seperti gambar 4.2 di bawah ini.



Gambar 4. 2 Foto Struktur Mikro Ferit Baja Karbon Rendah SS 400, Etsa Nital 3% dengan Perlakuan Pencanaan 650°C, Deformasi 70% (a) Tanpa Perlakuan, Perbesaran 500x, (b) Didinginkan di Udara tanpa Proses Anil 500°C dan *Quench*, Perbesaran 1000x, (c) Dengan Proses Anil 500°C dan *Water Quench*, Perbesaran 1000x, (d) Dengan Proses Anil 500°C dan *Ice Quench* , Perbesaran 1000x

Sampel A (Gambar 4.2.b) mengalami tahapan rekristalisasi, hal tersebut ditandai dengan munculnya butir-butir baru yang poligon dan pada beberapa tempat butir telah membesar atau mengalami pertumbuhan. Butir – butir pada sampel A telah mengalami tahapan rekristalisasi namun belum sempurna. Hal tersebut ditandai dengan munculnya butir-butir baru yang bulat dan kecil-kecil hanya pada beberapa tempat, sedangkan pada tempat lain masih terdapat butir-butir pipih dan panjang akibat adanya proses deformasi canai. Munculnya butir - butir baru itu juga terjadi karena sampel didinginkan dengan pendinginan udara pada temperatur ruang setelah deformasi yang menyebabkan terjadinya rekristalisasi statis, Pada proses ini juga mulai terjadi pertumbuhan butir pada beberapa bagian, terlihat dari adanya butir – butir yang kecil dan bulat.

Pada sampel B (Gambar 4.2.c) dan C (Gambar 4.2.d), butir yang dihasilkan lebih *equiaxed*. Hal ini menunjukkan bahwa butir – butir pada proses B dan C telah terekristalisasi dengan lebih baik. Setelah deformasi canai, sampel dianil pada temperatur 500°C dengan waktu tahan 60 menit kemudian di *quench*. Butir-butir dalam kondisi ini merupakan butir-butir baru yang muncul dan tumbuh dari proses pengintian pada batas butir. Proses pengintian yang muncul pada batas butir selanjutnya akan mengalami pertumbuhan butir baru yang kecil. Dalam kondisi ini energi yang diberikan cukup dan sempurna sehingga semua butir mengalami rekristalisasi. Sampel ini juga mengalami pertumbuhan butir (*grain growth*), terlihat dari adanya butir – butir yang bulat dan kecil. Waktu tahan yang lama, yaitu selama 60 menit, memberikan atom – atom lebih banyak waktu untuk berdifusi sehingga butir akan terekristalisasi dan mengalami *grain growth* ^[2].

Morfologi butir pada sampel A lebih kasar dan tidak seragam dibanding pada sampel B dan C. Hal ini disebabkan oleh waktu tahan proses A yang hanya 5 menit dan tidak mengalami proses anil setelah deformasi sehingga tidak mengalami proses rekristalisasi yang baik, sedangkan sampel B dan C mengalami proses anil setelah deformasi. Waktu tahan anil selama 60 menit pada sampel B dan C merupakan waktu tahan terbaik karena selain memiliki butir yang halus, kedua proses ini juga memiliki

Universitas Indonesia

butir yang seragam^[19]. Sampel C, yaitu pendinginan dengan media *quench* es memiliki butir yang lebih halus dan seragam dibanding sampel B. Karena temperatur media *quench* yang lebih tinggi menghasilkan kecepatan pendinginan yang lebih lambat^[12]. Proses *quench* menghambatnya terjadinya difusi atom, oleh sebab itu semakin tinggi kecepatan pendinginan suatu media *quench*, semakin terhambat difusi atom – atom, semakin halus dan seragam pula butir yang dihasilkan. Semakin cepat kecepatan pendinginan, semakin halus butir yang dihasilkan^[17].

4.4 Hasil Pengujian Kekerasan

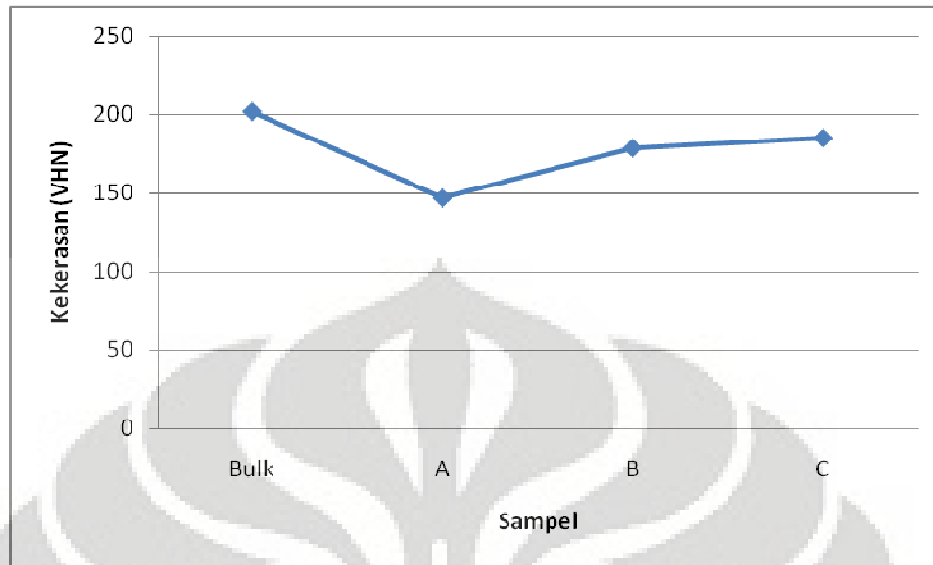
Pengujian kekerasan dilakukan dengan metode vickers dengan standar ASTM E92. Nilai kekerasan vickers tersebut kemudian dikonversi ke dalam satuan metode brinell dengan menggunakan tabel perbandingan yang terdapat pada standar ASTM E140. Hasil nilai kekerasan secara lengkap dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Hasil Pengujian Kekerasan

Sampel	T _{awal} (°C)	Def (%)	T _{reheat} (°C)	Media Pendingin	HVN	BHN	σ (MPa)	Diameter Butir (μm)
<i>Bulk</i>					202	174	600.3	19.39 ± 1.33
A	650	70		Udara	146.96	128.48	443.256	8.67 ± 0.22
B	650	70	500	Air	178.806	154.806	534.081	8.1 ± 1.24
C	650	70	500	Es	185.197	159.197	549.23	7.68 ± 0.25

4.4.1 Pengaruh Media Pendinginan terhadap Kekerasan

Hubungan antara media pendinginan dengan kekerasan sampel baja karbon rendah SS 400 dapat digambarkan pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Grafik Hubungan antara Media Pendinginan dengan Kekerasan

Berdasarkan Gambar 4.3, nilai kekerasan yang didapat dari pengujian pada sampel baja karbon rendah SS 400 menunjukkan hasil sebagai berikut; sampel *bulk* tanpa perlakuan menghasilkan kekerasan 202 VHN, sampel A (Gambar 3.2.a) dengan proses pencanaan pada temperatur 650°C dengan waktu tahan 5 menit, deformasi 70%, dan didinginkan dengan pendinginan udara pada temperatur ruang menghasilkan kekerasan 146.96 VHN, sampel B (Gambar 3.2.b) dengan proses pencanaan pada temperatur 650°C dengan waktu tahan 5 menit, deformasi 70%, didinginkan dengan pendinginan udara pada temperature ruang, dianil pada temperatur 500°C dengan waktu tahan 60 menit, dan di-*quench* dengan media air menghasilkan kekerasan 178.806 VHN, dan sampel C (Gambar 3.2.c) dengan proses pencanaan pada temperatur 650°C dengan waktu tahan 5 menit, deformasi 70%, didinginkan dengan pendinginan udara pada temperatur ruang, dianil pada temperatur 500°C dengan waktu tahan 60 menit, dan di-*quench* dengan media es menghasilkan kekerasan 185.197 VHN. Hasil ini menunjukkan bahwa media *quench* es menghasilkan kekerasan yang lebih tinggi dibanding air.

Ukuran butir yang besar akan mengurangi nilai kekerasan dari suatu material. Hal ini disebabkan material dengan butir yang relatif besar memiliki batas butir yang

lebih sedikit dibandingkan dengan material yang memiliki butir kecil. Batas butir ini merupakan penghalang yang akan menghambat pergerakan dislokasi. Jika batas butirnya sedikit maka dislokasi akan semakin mudah bergerak sehingga material semakin mudah dideformasi dan memiliki nilai kekerasan lebih rendah dibandingkan dengan material yang memiliki butir kecil. Material dengan butir yang kecil akan memiliki batas butir yang banyak sehingga pergerakan dislokasi akan semakin mudah terhambat. Pergerakan dislokasi yang terhambat ini akan menyebabkan material sulit untuk dideformasi sehingga sifat mekanis material seperti kekerasan dan kekuatan akan semakin tinggi^[20].

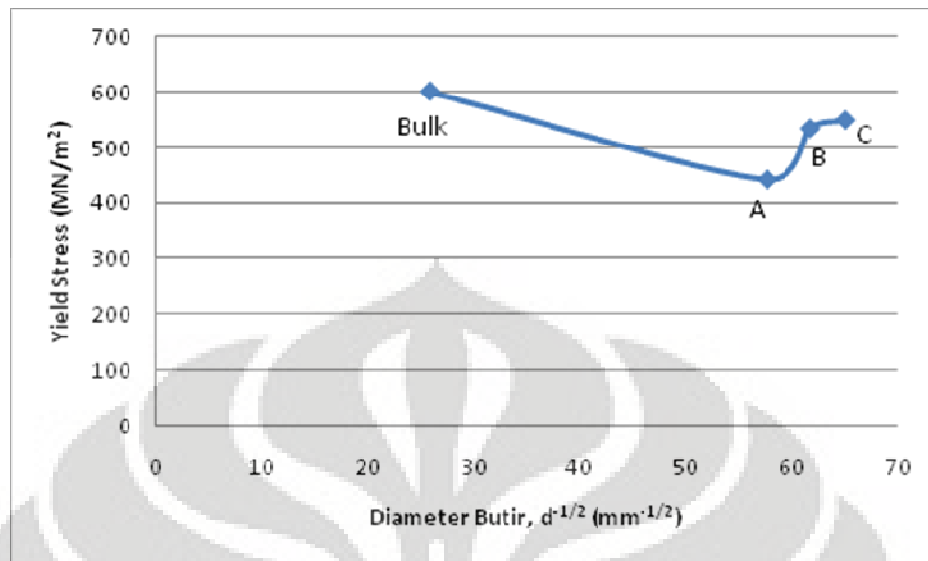
Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa semakin rendah temperatur media *quench*, semakin cepat kecepatan pendinginan, semakin kecil butir yang dihasilkan, semakin tinggi kekerasan sampel.

4.4.2 Pengaruh Ukuran Butir Terhadap Kekuatan

Setelah didapatkan nilai kekerasan vickers, nilai tersebut dikonversi ke nilai kekerasan brinell dan kemudian dihitung nilai kekuatan dari sampel baja karbon rendah SS 400 dengan persamaan 4.1 berikut.

$$TS (MPa) = 3.45 \times HB \dots\dots\dots(4.2)$$

Persamaan 4.2 Rumus Perhitungan Kekuatan (*Tensile Strength*)^[21]



Gambar 4.4 Grafik Hubungan Antara Ukuran Butir dengan Kekuatan

Terlihat dari Gambar 4.4, hasil yang didapatkan dari penelitian ini menunjukkan semakin halus butir (Sampel A dengan proses pencanaan pada temperatur 650°C dengan waktu tahan 5 menit, deformasi 70%, dan didinginkan dengan pendinginan udara pada temperatur ruang memiliki diameter butir $8.67 \pm 0.22 \mu\text{m}$, sedangkan sampel C dengan proses pencanaan pada temperatur 650°C dengan waktu tahan 5 menit, deformasi 70%, didinginkan dengan pendinginan udara pada temperatur ruang, dianil pada temperatur 500°C dengan waktu tahan 60 menit, dan di-*quench* dengan media es memiliki diameter butir $7.68 \pm 0.25 \mu\text{m}$) maka didapatkan sifat baja karbon rendah SS 400 yang lebih keras dan kuat. 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 (yang memiliki butir kecil) lebih keras dan kuat dibandingkan material dengan butir kasar^[2].

4.5 Hasil Pengujian Korosi

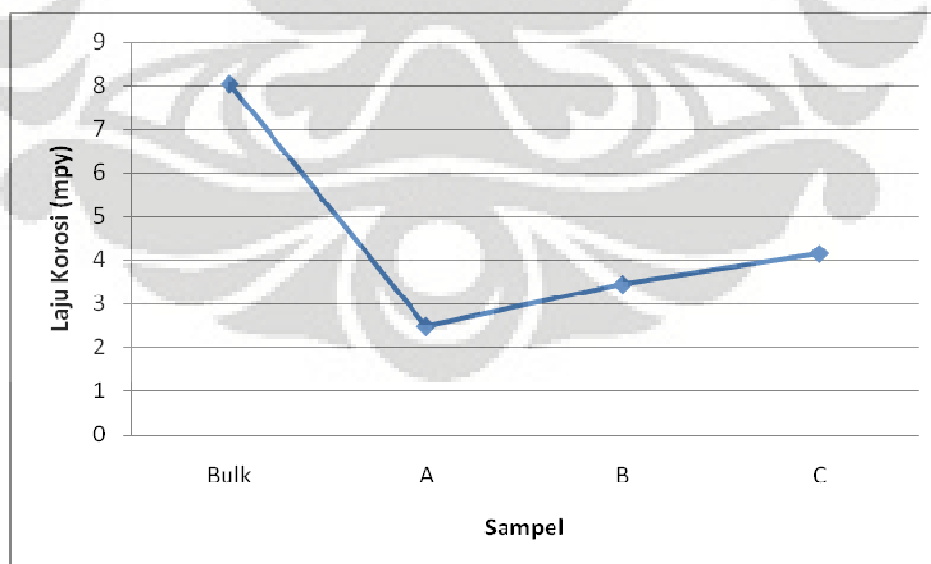
Metoda yang digunakan untuk mengukur laju korosi pada penelitian ini adalah metoda polarisasi. Laju korosi didapatkan dengan menentukan hubungan

potensial dan arus material dalam kurva polarisasi. Standar yang digunakan pada pengujian laju korosi ini adalah ASTM G102. Hasil nilai laju korosi secara lengkap dapat dilihat pada Tabel

Tabel 4.4. Hasil Pengujian Korosi

Sampel	T _{awal} (°C)	Def (%)	T _{reheat} (°C)	Media Pendingin	E corr (mV)	I corr (A/cm ²)	Laju Korosi (mpy)	HVN	Diameter Butir (μm)
<i>Bulk</i>					-671.3	1.761x10 ⁻⁵	8.046	202	19.39 ± 1.33
A	650	70		Udara	-640.2	5.438x10 ⁻⁶	2.485	146.96	8.67 ± 0.22
B	650	70	500	Air	-678.1	7.548x10 ⁻⁶	3.449	178.806	8.1 ± 1.24
C	650	70	500	Es	-634	9.086x10 ⁻⁶	4.152	185.197	7.68 ± 0.25

Hubungan antara media pendinginan dengan laju korosi sampel baja karbon rendah SS 400 dapat digambarkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Grafik Hubungan antara Media Pendinginan dengan Laju Korosi

Universitas Indonesia

Berdasarkan Gambar 4.5, nilai laju korosi yang didapat dari pengujian pada sampel baja karbon rendah SS 400 menunjukkan hasil sebagai berikut; sampel *bulk* tanpa perlakuan menghasilkan laju korosi 8.046 mpy, sampel A (Gambar 3.2.a) dengan proses pencanaian pada temperatur 650°C dengan waktu tahan 5 menit, deformasi 70% , dan didinginkan dengan pendinginan udara pada temperatur ruang menghasilkan laju korosi 2.485 mpy, sampel B (Gambar 3.2.b) dengan proses pencanaian pada temperatur 650°C dengan waktu tahan 5 menit, deformasi 70% , didinginkan dengan pendinginan udara pada temperature ruang, dianil pada temperatur 500°C dengan waktu tahan 60 menit, dan di-*quench* dengan media air menghasilkan laju korosi 3.449 mpy, dan sampel C (Gambar 3.2.c) dengan proses pencanaian pada temperatur 650°C dengan waktu tahan 5 menit, deformasi 70% , didinginkan dengan pendinginan udara pada temperatur ruang, dianil pada temperatur 500°C dengan waktu tahan 60 menit , dan di-*quench* dengan media es menghasilkan laju korosi 4.152 mpy. .

Pengujian korosi ini menunjukkan hasil yang sesuai dengan literatur, yaitu semakin keras sampel, maka semakin tinggi laju korosinya. Sampel A dengan proses pencanaian pada temperatur 650°C dengan waktu tahan 5 menit, deformasi 70% , dan didinginkan dengan pendinginan udara pada temperatur ruang memiliki laju korosi 2.485 mpy dan memiliki kekerasan yang paling rendah, yaitu 146,96 HVN. Sedangkan sampel C dengan proses pencanaian pada temperatur 650°C dengan waktu tahan 5 menit, deformasi 70% , didinginkan dengan pendinginan udara pada temperatur ruang, dianil pada temperatur 500°C dengan waktu tahan 60 menit, dan di-*quench* dengan media es menghasilkan laju korosi 4.152 mpy dan memiliki kekerasan yang paling tinggi, yaitu 185,197 HVN.

Namun, metoda polarisasi yang digunakan untuk pengujian korosi sampel baja karbon rendah SS 400 tidak memiliki hubungan dengan kehalusan butir karena metoda polarisasi menggunakan prinsip reaksi yang hanya terkonsentrasi pada permukaan sampel sehingga karakteristik butir yang berada di dalam sampel tidak teruji.

BAB 5

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Sampel A dengan proses pencanaian pada temperatur 650°C dengan waktu tahan 5 menit, deformasi 70%, dan didinginkan dengan pendinginan udara pada temperatur ruang memiliki ukuran butir $8,67 \pm 0,22 \mu\text{m}$, kekerasan 146,96 VHN, kekuatan 443.256 MPa, dan laju korosi 2.485 mpy
2. Sampel B dengan proses pencanaian pada temperatur 650°C dengan waktu tahan 5 menit, deformasi 70%, didinginkan dengan pendinginan udara pada temperatur ruang, dianil pada temperatur 500°C dengan waktu tahan 60 menit, dan di-*quench* dengan media air memiliki ukuran butir $8.1 \pm 1.24 \mu\text{m}$, kekerasan 178.806 VHN, kekuatan 534.081 MPa, dan laju korosi 3.449 mpy
3. Sampel C dengan proses pencanaian pada temperatur 650°C dengan waktu tahan 5 menit, deformasi 70%, didinginkan dengan pendinginan udara pada temperatur ruang, dianil pada temperatur 500°C dengan waktu tahan 60 menit, dan di-*quench* dengan media es memiliki ukuran butir $7.68 \pm 0.25 \mu\text{m}$, kekerasan 185.197 VHN, kekuatan 549.23 MPa, dan laju korosi 4.152 mpy
4. Semakin rendah temperatur media pendinginan, semakin tinggi kecepatan pendinginannya, semakin halus butir material baja karbon rendah SS 400
5. Semakin kecil ukuran butir, maka semakin tinggi kekerasan dan kekuatan material baja karbon rendah SS 400
6. Semakin tinggi kekerasan dan kekuatan material, semakin tinggi laju korosinya.
7. Ukuran butir tidak berpengaruh terhadap pengujian korosi dengan metoda polarisasi karena metoda tersebut hanya mengukur laju korosi pada permukaan sampel, bukan butir.

REFERENSI

- [1] ASM Specialty Handbook. 1996. *Carbon and Alloy Steel*, (ASM International)
- [2] William D. Callister. 2007. Jr., *Materials Science and Engineering An Introduction 7th Edition (USA)*
- [3] ASM Handbook. 2004. Vol. 09, *Metallography and Microstructures*, (ASM International)
- [4] Fanina NW. 2003. "*Pengaruh Deformasi Canai Panas Terhadap Nilai Kekerasan & Pertumbuhan Butir Alpha pada Bahan Kuningan C26000 (Cartridge Brass)*". Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok,
- [5] P.L. Mangonon 1999. *The Principles of Material Selection for Engineering Design*, (Prentice Hall, Inc)
- [6] Dryden, John. *Controlled Rolled XLERPLATE® - Strong, Tough and Weldable* Diakses dari www.bluescopesteel.com.au/go/news/controlled-rolled-xlerplate-strongtough-and-weldable
- [7] Nicholas, Joanne. *What are TMCP (Thermo-Mechanically Controlled Processed) steels?* Copyright © 2000, TWI Ltd. <http://www.twi.co.uk/content/faqjmn002.html>
- [8] Yokota, Tomoyuki. *Ferrite grain size refinement through transformation* . NKK Corp. (JFE group)
- [9] 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
- [10] I.Kozasu:1997. *Materials Science and Technology, vol.7 Constitution and Properties of Steels* Ed. By F.B.Pickering, VCH,,184.
- [11] H. K. D. H. BHADSHIA. 2001. *Bainite In Steels: Transformations, Microstructure And Properties*. Second Edition. (IOM Communications Ltd.)
- [12] ASM Handbook.1991. Vol. 04, *Heat Treating*, (ASM International)
- [13] Shreir,L.L, R.A.Jarman & G.T. Burstein. 2003 *Corrosion: Metal/Environment Reactions*,3rd ed, Butterworth Heinemann

- [14] ASTM E112. 2003. *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*.
- [15] ASTM E92. 2003. *Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials*.
- [16] ASTM G102. 1999. *Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements*
- [17] Zhiliang Ning, P. Cao, H. Wang, Jianfei Sun, Diankun Liu. 2007. *Effect of Cooling Conditions on Grain Size of AZ91 Alloy*. J. Mater. Sci, Technol, Vol. 23 No. 5
- [18] Adnan Calik. 2009 *Effect of Cooling Rate on Hardness and Microstructure of AISI 1020, AISI 1040, and AISI 1060 Steels*. International Journal of Physical Sciences, Vol 4.
- [19] R.K. Brzuszek, P.C.M. Rodrigues, L.S. Motta, D.B. Santos. 2002. *Microstructural Evolution of Ultra Fine Grain C-Mn Steel Warm Rolling and Inter-critical Annealed*. Materials Research
- [20] Smallman R.E, R.J Bishop. 1995. *Modern Physical Metallurgy and Materials Engineering : Science, Process and Applications*. Butterworth-Heinemann Limited : Oxford.



Lampiran 1. Hasil Pengujian Komposisi Baja Karbon Rendah SS 400



CENTER FOR MATERIALS PROCESSING AND FAILURE ANALYSIS
DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI & MATERIAL-UNIVERSITAS INDONESIA
LABORATORIUM UJI MATERIAL
 Kampus Baru UI - Depok 16424 - Indonesia
 Phone : 021 - 786 49045, 786 3510 Fax : 021 - 7888 111, 7872 350 Email : cmpta@metal.ui.ac.id, cmpta_ui@gmail.com

LAPORAN PENGUJIAN KOMPOSISI KIMIA
COMPOSITION TEST REPORT
 Page 1 of 1

No Laporan <i>Report No</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>Receipt Date</i>	April 27 th , 2010
No Kontrak <i>Contract No.</i>	0513/PT.02/FT04/PQ2010	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 (%)	Cu (%)
01	0.120	0.198	< 0.003	0.008	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 ; pulitikasi serta penggunaan rekaman ini atau sebagian dari padanya harus dengan ijin dari Laboratorium Uji Material

Lampiran 2. Pehitungan Ukuran Butir

No	Sampel	Number Intercept	PL	L Mean	G (ASTM) Grain Size No.	Perbesaran n x(kali)	G rata-rata	Standar Deviasi	Besar butir rata-rata (μm)	Besar Butir (μm)	NI 1	NI 2	NI 3
	Bulk 25 C non- Oreheat dan non-deform	60	60	0.01667	8.51959321	500	8.48032	1.33061	19.39333333	18.78	25	18	17
64		64	0.01563	8.705872107	500			18.48	27	20	17		
54		54	0.01852	8.215488928	500			20.92	25	15	14		
1	650°C - def 70% - air cooling	64	128	0.00781	10.70651746	1000	10.7506	0.22517	8.67	8.8	31.5	20	12.5
		64	128	0.00781	10.70651746	1000			8.8	30	20.5	13.5	
		67	134	0.00746	10.83873849	1000			8.41	33.5	21	12.5	
2	650°C - def 70% - air cooling - 500°C - water quench	61.5	123	0.00813	10.59150937	1000	10.9667	1.2454	8.10666667	9.13	25.5	25.5	10.5
		66.5	133	0.00752	10.81711801	1000			8.47	24	25.5	17	
		84	168	0.00595	11.49140549	1000			6.72	38.5	30.5	15	
3	650°C - def 70% - air cooling - 500°C - ice quench	74	148	0.00676	11.12555936	1000	11.0983	0.25239	7.68	7.61	31.5	31.5	11
		75.5	151	0.00662	11.18348079	1000			7.47	32.5	25.5	17.5	
		70.5	141	0.00709	10.98571022	1000			7.96	31.5	21.5	17.5	

Lampiran 3. Perhitungan Kekerasan

NO	DIA		AVG	HV	HV-26	VHN rata-rata	BHN
	I	II					
A	56	55.5	55.75	178.993	152.993	146.9601615	159.197
	53	57	55	183.907	157.907		
	57	58	57.5	168.263	142.263		
	58	58	58	165.375	139.375		
	57	58	57.5	168.263	142.263		
NO	DIA		AVG	HV	HV-26	VHN rata-rata	BHN
	I	II					
B	50	52	51	213.887	187.887	185.197416	154.806
	51	55	53	198.049	172.049		
	50	50.5	50.25	220.319	194.319		
	50.5	51	50.75	215.999	189.999		
	50.5	53	51.75	207.732	181.732		
NO	DIA		AVG	HV	HV-26	VHN rata-rata	BHN
	I	II					
C	53.5	55	54.25	189.028	163.028	178.8059495	128.48
	51	52.5	51.75	207.732	181.732		
	49.5	53	51.25	211.805	185.805		
	50.5	53	51.75	207.732	181.732		
	50	53.5	51.75	207.732	181.732		

Lampiran 4. Tabel Diameter Butir ASTM E112

Grain Size No. G	\bar{N}_A Grains/Unit Area		\bar{A} Average Grain Area		\bar{D} Average Diameter		\bar{L} 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	0.0456	45620	0.2136	213.6	0.1903	190.3	5.26
2.0	2.00	31.00	0.0323	32258	0.1796	179.6	0.1600	160.0	6.25
2.5	2.83	43.84	0.0228	22810	0.1510	151.0	0.1345	134.5	7.43
3.0	4.00	62.00	0.0161	16129	0.1270	127.0	0.1131	113.1	8.84
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	246.00	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	366	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	128976.3	0.000008	7.9	0.0028	2.8	0.0025	2.5	400.0

Lampiran 5. Tabel Konversi Nilai Kekerasan ASTM E140

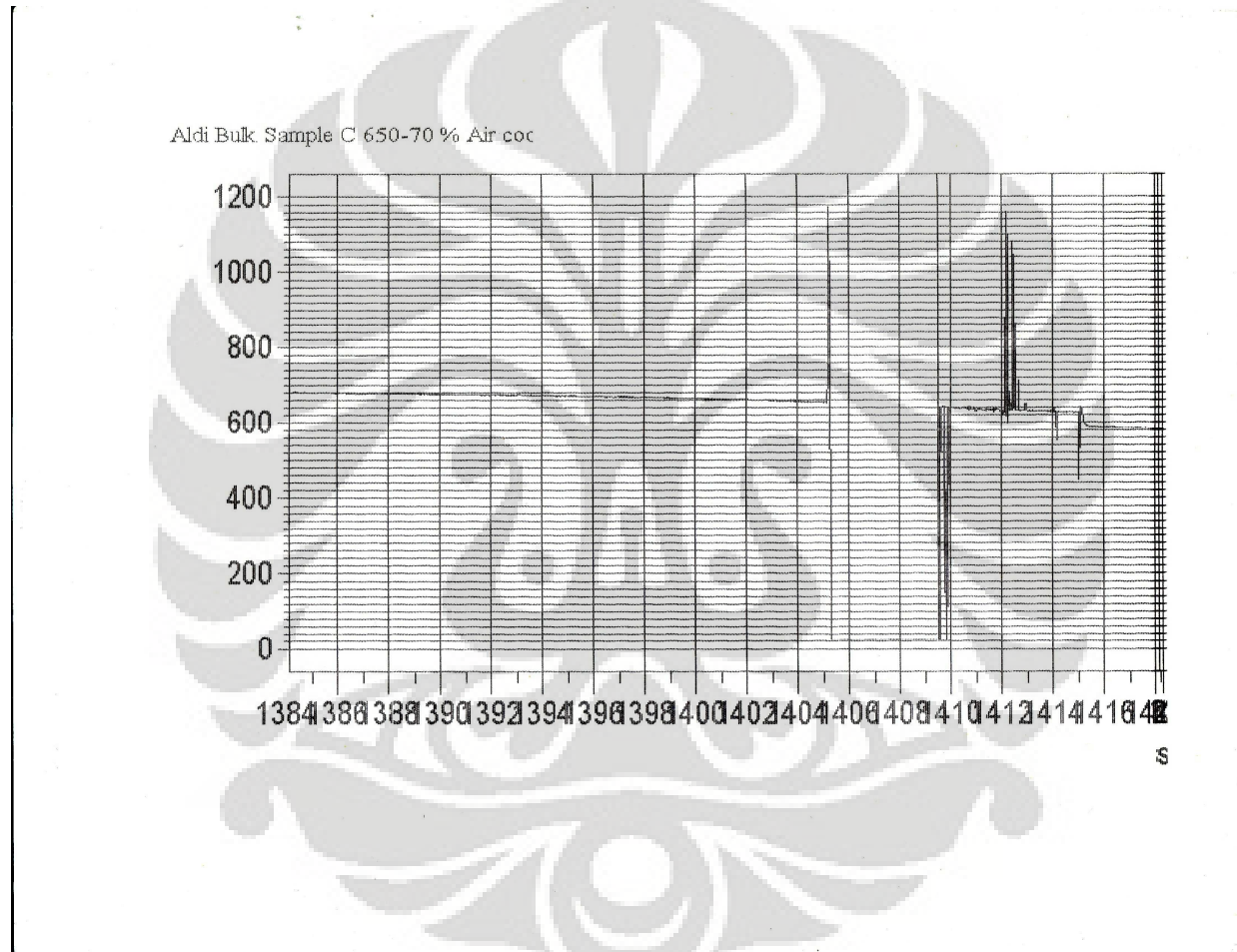
Vickers Hardness Number (HV)	Rockwell Hardness Number		Rockwell Superficial Hardness Number			Brinell Hardness Number
	B Scale, 100-kgf, 1/16-in. (1.588-mm) Ball (HRB)	F Scale, 60-kgf 1/16-in. (1.588-mm) Ball (HRF)	15-T Scale, 15-kgf, 1/16-in. (1.588-mm) Ball (HR 15-T)	30-T Scale, 30-kgf, 1/16-in. (1.588-mm) Ball (HR 30-T)	45-T Scale, 45-kgf, 1/16-in. (1.588-mm) Ball (HR 45-T)	
196	93.5	110.0	90.0	77.5	66.0	169
194	...	109.5	...	...	65.5	167
192	93.0	...	...	77.0	65.0	166
190	92.5	109.0	...	76.5	64.5	164
188	92.0	...	89.5	...	64.0	162
186	91.5	108.5	...	76.0	63.5	161
184	91.0	...	...	75.5	63.0	159
182	90.5	108.0	80.0	...	62.5	157
180	90.0	107.5	...	75.0	62.0	156
178	89.0	...	...	74.5	61.5	154
176	88.5	107.0	...	...	61.0	152
174	88.0	...	88.5	74.0	60.5	150
172	87.5	106.5	...	73.5	60.0	149
170	87.0	...	...	...	59.5	147
168	86.0	106.0	88.0	73.0	59.0	146
166	85.5	...	...	72.5	58.5	144
164	85.0	105.5	...	72.0	58.0	142
162	84.0	105.0	87.5	...	57.5	141
160	83.5	...	...	71.5	56.5	139
158	83.0	104.5	...	71.0	56.0	138
156	82.0	104.0	87.0	70.5	55.5	136
154	81.5	103.5	...	70.0	54.5	135
152	80.5	103.0	...	...	54.0	133
150	80.0	...	86.5	69.5	53.5	131
148	79.0	102.5	...	69.0	53.0	129
146	78.0	102.0	...	68.5	52.5	128
144	77.5	101.5	86.0	68.0	51.5	126
142	77.0	101.0	...	67.5	51.0	124
140	76.0	100.5	85.5	67.0	50.0	122
138	75.0	100.0	...	66.5	49.0	121
136	74.5	99.5	85.0	66.0	48.0	120

(Lanjutan)

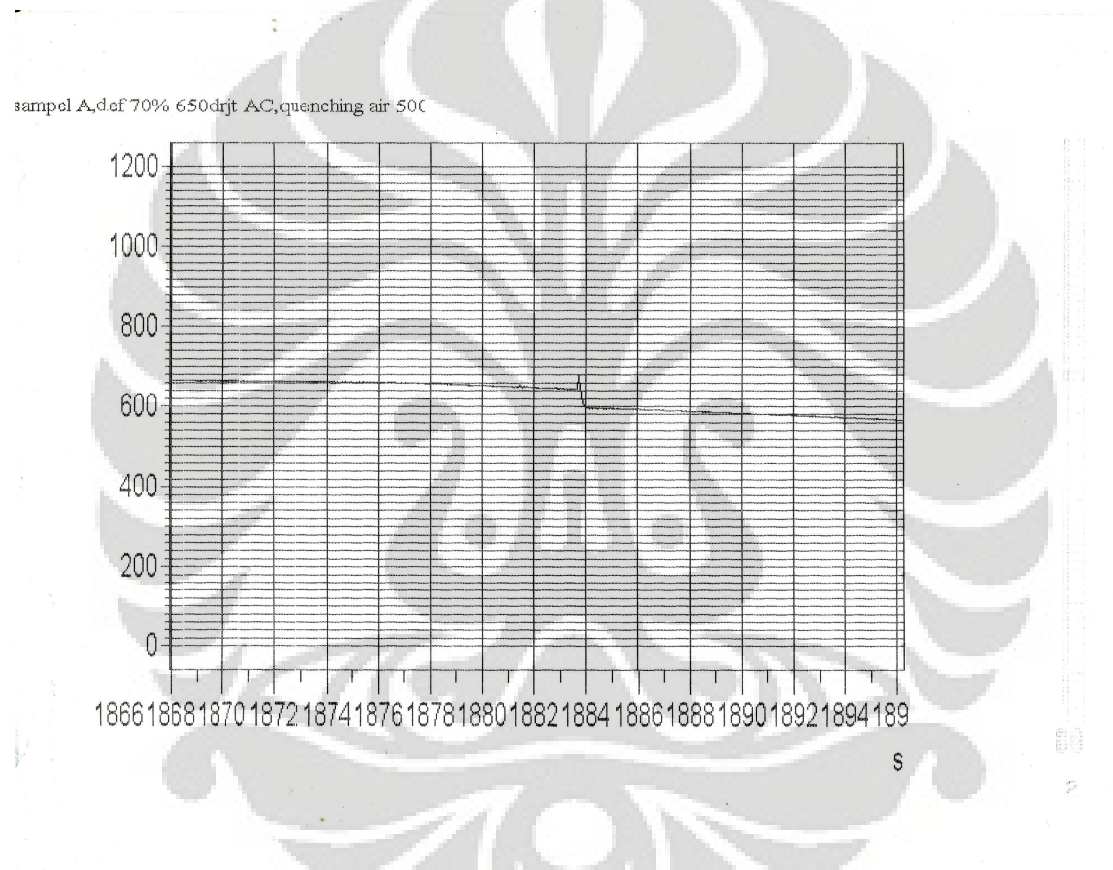


136	74.5	96.5	85.0	66.0	48.0	120
134	73.5	96.0	-	65.5	47.5	118
132	73.0	95.5	84.5	65.0	46.5	116
130	72.0	96.0	84.0	64.5	45.5	114
128	71.0	97.5	-	63.5	45.0	113
126	70.0	97.0	83.5	63.0	44.0	112
124	69.0	96.5	-	62.5	43.0	110
122	68.0	96.0	83.0	62.0	42.0	108
120	67.0	95.5	-	61.0	41.0	106
118	66.0	95.0	82.5	60.5	40.0	105
116	65.0	94.5	82.0	60.0	39.0	103
114	64.0	94.0	81.5	59.5	38.0	101
112	63.0	93.0	81.0	59.0	37.0	99
110	62.0	92.6	80.5	58.0	36.5	97
108	61.0	92.0	-	57.0	34.5	95
106	59.5	91.2	80.0	56.0	33.0	94
104	58.0	90.5	79.5	55.0	32.0	92
102	57.0	89.8	79.0	54.5	30.5	90
100	56.0	89.0	78.5	53.5	29.5	88
98	54.0	88.0	78.0	52.5	28.0	86
96	53.0	87.2	77.5	51.5	26.5	85
94	51.0	86.3	77.0	50.5	24.5	83
92	49.5	85.4	76.5	49.0	23.0	82
90	47.5	84.4	75.5	48.0	21.0	80
88	46.0	83.5	75.0	47.0	19.0	79
86	44.0	82.3	74.5	45.5	17.0	77
84	42.0	81.2	73.5	44.0	14.5	76
82	40.0	80.0	73.0	43.0	12.5	74
80	37.5	78.6	72.0	41.0	10.0	72
78	35.0	77.4	71.5	39.5	7.5	70
76	32.5	76.0	70.5	38.0	4.5	68
74	30.0	74.8	70.0	36.0	1.0	66
72	27.5	73.2	69.0	34.0	...	64
70	24.5	71.6	68.0	32.0	...	63
68	21.5	70.0	67.0	30.0	...	62
66	18.5	68.5	66.0	28.0	...	61
64	15.5	66.8	65.0	25.5	...	59
62	12.5	65.0	63.5	23.0	...	57

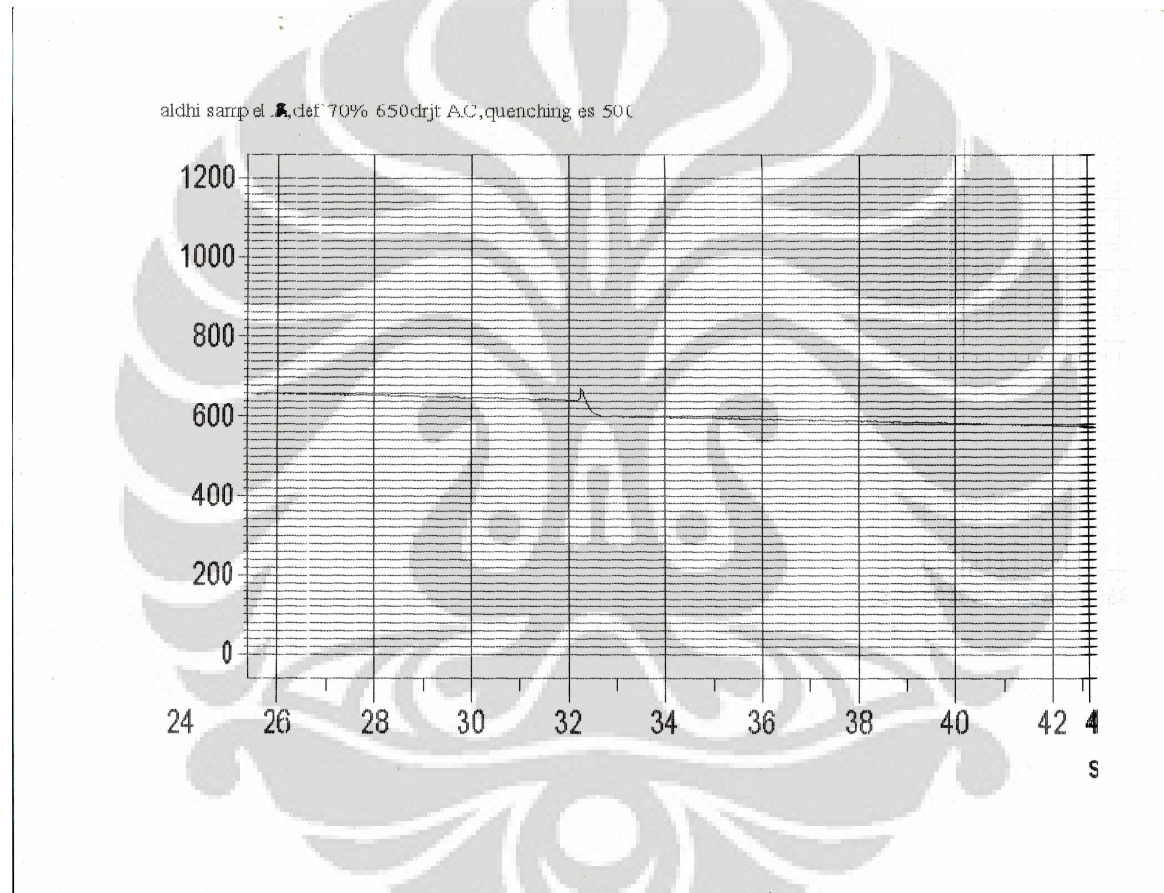
Lampiran 6. Grafik Akuisisi Temperatur Proses A dengan proses pencanaan pada temperatur 650°C dengan waktu tahan 5 menit, deformasi 70% , didinginkan dengan pendinginan udara pada temperature ruang, tanpa anil dan *quench*



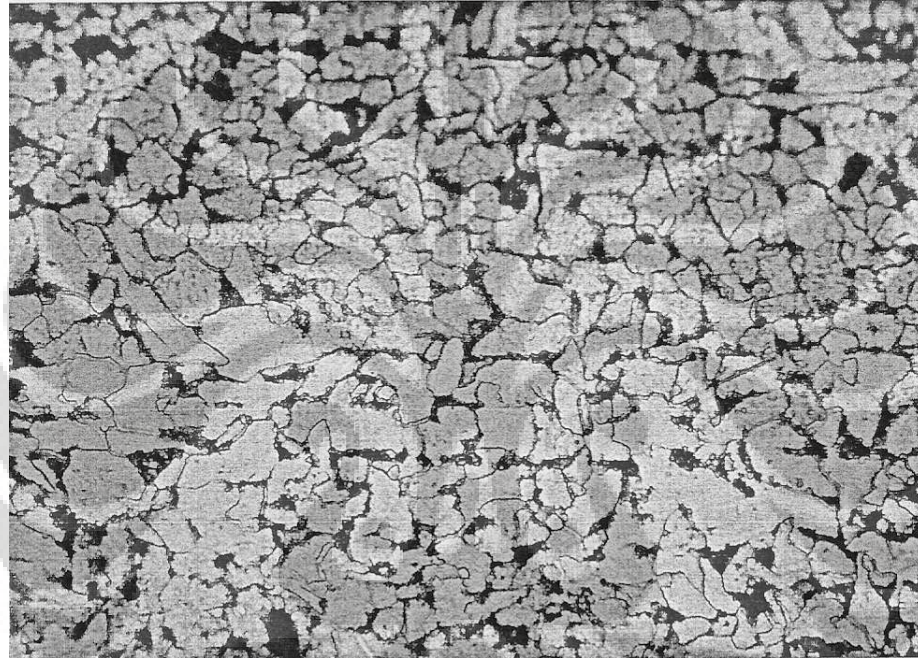
Lampiran 7. Grafik Akuisisi Temperatur Proses B dengan proses pencanaan pada temperatur 650°C dengan waktu tahan 5 menit, deformasi 70% , didinginkan dengan pendinginan udara pada temperature ruang, dianil pada temperatur 500°C dengan waktu tahan 60 menit, dan di-*quench* dengan media air



Lampiran 8. Grafik Akuisisi Temperatur Proses B dengan proses pencanaan pada temperatur 650°C dengan waktu tahan 5 menit, deformasi 70% , didinginkan dengan pendinginan udara pada temperature ruang, dianil pada temperatur 500°C dengan waktu tahan 60 menit, dan di-*quench* dengan media es



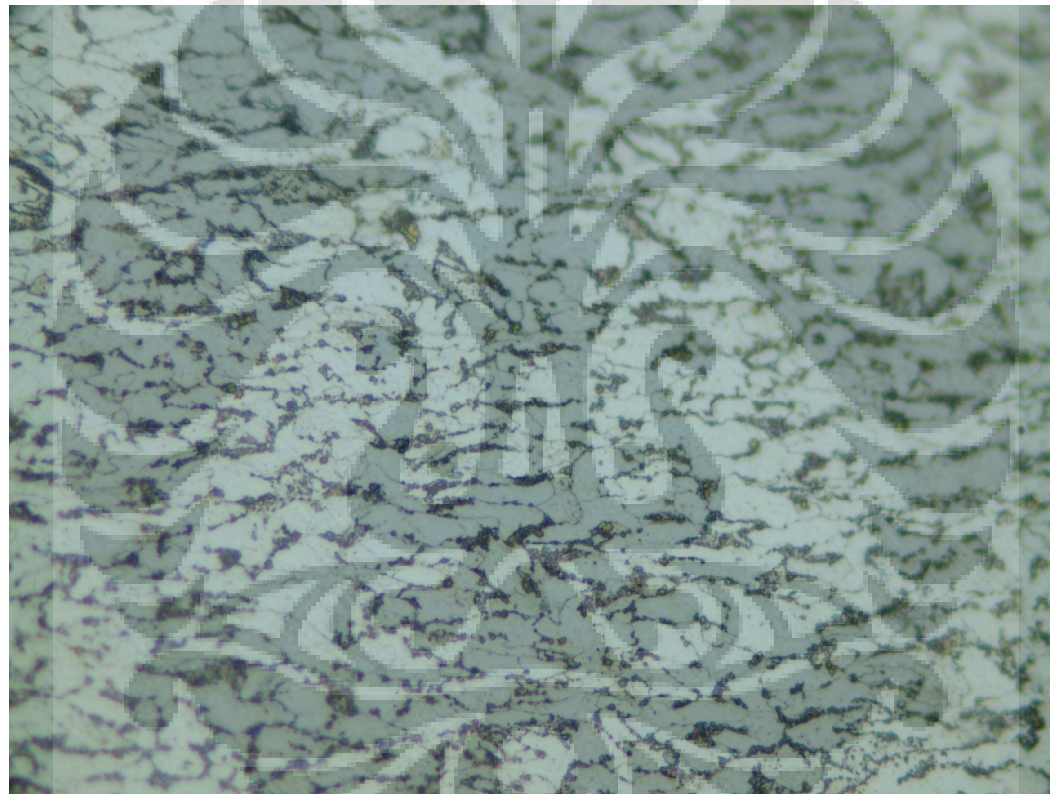
Lampiran 9. Foto Struktur Mikro Sampel *Bulk*



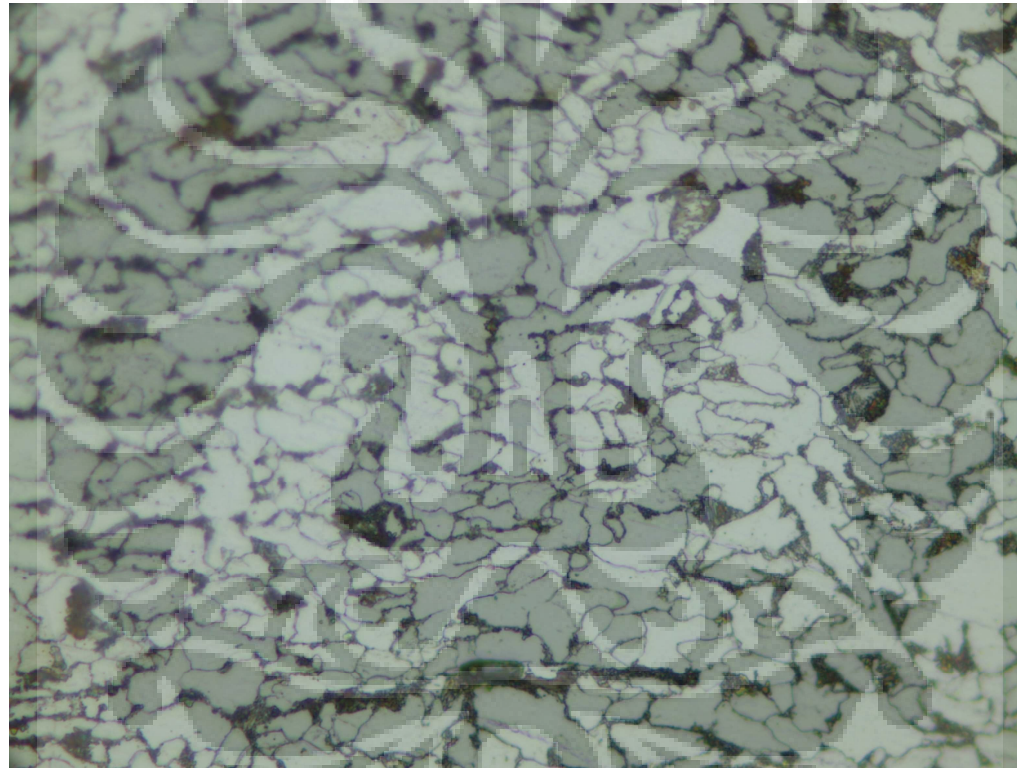
Lampiran 10. Foto Struktur Mikro Sampel A dengan proses pencanaan pada temperatur 650°C dengan waktu tahan 5 menit, deformasi 70% , didinginkan dengan pendinginan udara pada temperature ruang, tanpa anil dan *quench*



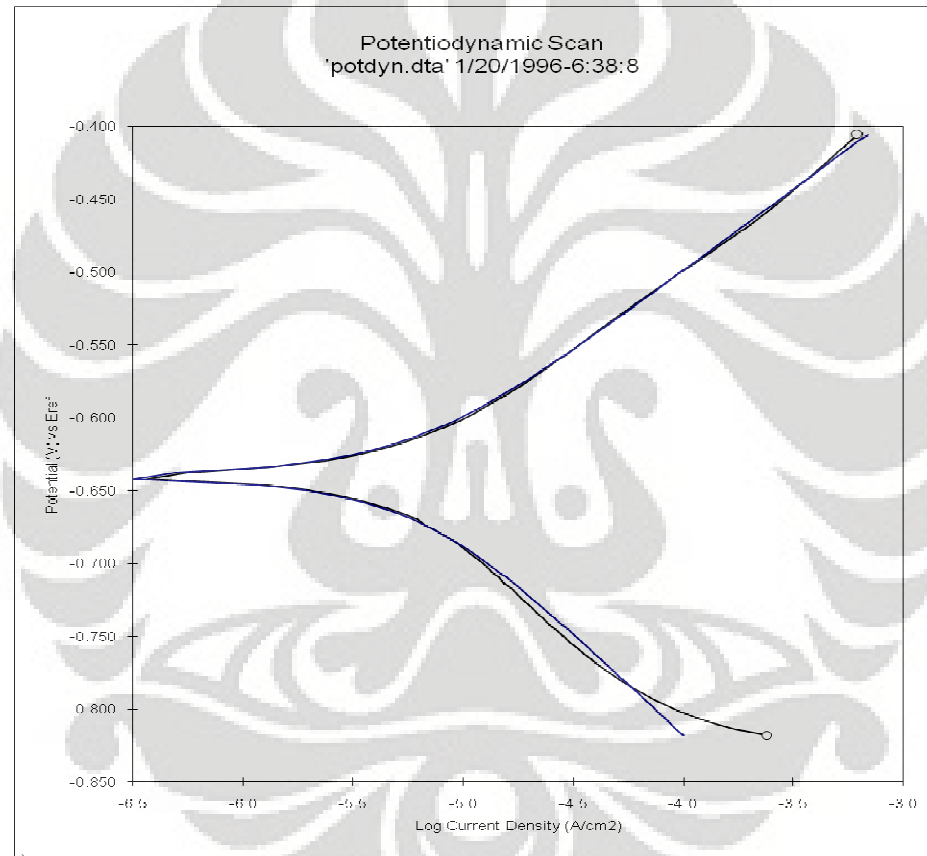
Lampiran 11. Foto Struktur Mikro Sampel B dengan proses pencanaan pada temperatur 650°C dengan waktu tahan 5 menit, deformasi 70% , didinginkan dengan pendinginan udara pada temperature ruang, dianil pada temperatur 500°C dengan waktu tahan 60 menit, dan di-*quench* dengan media air



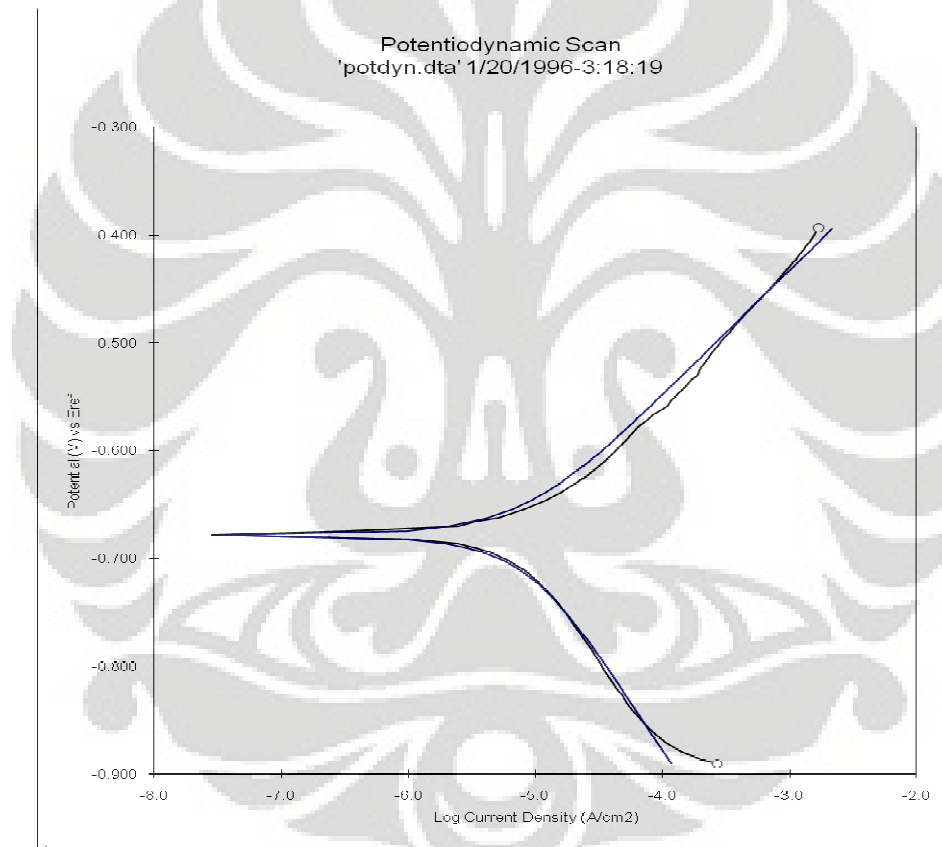
Lampiran 12. Foto Struktur Mikro Sampel C dengan proses pemanasan pada temperatur 650°C dengan waktu tahan 5 menit, deformasi 70% , didinginkan dengan pendinginan udara pada temperature ruang, dianil pada temperatur 500°C dengan waktu tahan 60 menit, dan di-*quench* dengan media es



Lampiran 13. Polarisasi Sampel A dengan proses pencanaan pada temperatur 650°C dengan waktu tahan 5 menit, deformasi 70% , didinginkan dengan pendinginan udara pada temperature ruang, tanpa anil dan *quench*



Lampiran 14. Polarisasi Sampel B dengan proses pencanaan pada temperatur 650°C dengan waktu tahan 5 menit, deformasi 70% , didinginkan dengan pendinginan udara pada temperature ruang, dianil pada temperatur 500°C dengan waktu tahan 60 menit, dan di-*quench* dengan media air



Lampiran 15. Polarisasi Sampel C dengan proses pemanasan pada temperatur 650°C dengan waktu tahan 5 menit, deformasi 70% , didinginkan dengan pendinginan udara pada temperature ruang, dianil pada temperatur 500°C dengan waktu tahan 60 menit, dan di-*quench* dengan media es

