



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI PENGARUH VARIASI TEMPERATUR DEFORMASI PADA  
CANAI HANGAT TERHADAP MORFOLOGI BUTIR FERIT DAN  
KETAHANANNYA TERHADAP LAJU KOROSI PADA BAJA KARBON  
RENDAH SS 400**

**SKRIPSI**

**AMRI KISWARA**

**0606074552**

**FAKULTAS TEKNIK**

**DEPARTEMEN METALURGI DAN MATERIAL**

**DEPOK**

**JUNI 2010**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI PENGARUH VARIASI TEMPERATUR DEFORMASI PADA  
CANAI HANGAT TERHADAP MORFOLOGI BUTIR FERIT DAN  
KETAHANANNYA TERHADAP LAJU KOROSI PADA BAJA KARBON  
RENDAH SS 400**

**SKRIPSI**

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di  
Fakultas Teknik Universitas Indonesia

**AMRI KISWARA**

**0606074552**

**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 dengan benar**

**Nama : Amri Kiswara**

**NPM : 0606074552**

**Tanda Tangan : .....**

**Tanggal : 25 Juni 2010**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : AMRI KISWARA  
NPM : 0606074552  
Program Studi : TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL  
Judul Skripsi : STUDI PENGARUH VARIASI TEMPERATUR  
DEFORMASI PADA CANAI HANGAT TERHADAP  
MORFOLOGI BUTIR FERIT DAN KETAHANANNYA  
TERHADAP LAJU KOROSI PADA BAJA KARBON  
RENDAH SS 400

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

### DEWAN PENGUJI

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

Penguji 1 : Dr. Ir. Dedi Priadi, DEA (.....)

Penguji 2 : Dra. Sari Katili, MS (.....)

Ditetapkan di : Depok  
Tanggal : Juni 2010

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur saya panjatkan atas kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya yang tak terhingga sehingga penulisan skripsi ini dapat diselesaikan. Adapun tujuan dari penulisan skripsi ini adalah untuk memenuhi persyaratan dalam mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Skripsi ini saya persembahkan untuk kedua orang tuaku tercinta, almarhum ayahku Sardjani Nawin atas nasihat, perhatian dan kasih sayangnya ketika hidupnya, dan ibuku Kisrowiyah untuk semua doa, semangat dan kasih sayangnya beserta semua hal terbaik yang selalu diberikan kepadaku yang merupakan sumber semangat dalam penyusunan skripsi ini.

Saya menyadari bahwa skripsi ini tidak akan dapat diselesaikan dengan baik tanpa adanya bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, saya ingin mengucapkan terima kasih setulus-tulusnya kepada :

1. Ir. Rini Riastuti M.Sc selaku dosen 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. Rekan-rekan "*warm roll team*" yaitu Ronald, BinSur, Aldhi, Nofar, Dudiet, selaku rekan-rekan kerja dalam penulisan skripsi ini. Terima kasih atas kerjasama dan bantuannya selama penelitian.
4. Seluruh karyawan, staf, serta teknisi Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI, khususnya Pak Suyoto, Pak Zaenal, dan Bang Udin, Bang Edi. Terimakasih atas bantuannya selama penelitian.
5. Kakak-kakakku; Bang Benu, Mbak Henry, Ka' Ani, Bang Rohadi, Mpok Sophie yang telah memberikan doa dan dukungannya.

6. Penghuni El-Khotib Residence : Lionk, Mochie, Hadi, dan Apit terima kasih banyak Bro atas keramah tamahan dan juga tumpangan buat nginep.
7. Seluruh teman-teman mahasiswa Teknik Metalurgi dan Material FTUI Angkatan 2006. Terima kasih untuk persahabatan yang mengesankan selama ini.
8. Semua pihak yang telah membantu penyelesaian skripsi ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Saya telah berusaha sebaik-baiknya dalam penulisan skripsi ini, namun tidak tertutup kemungkinan adanya kesalahan dan kekurangan. Oleh karena itu, saya sangat mengharapkan segala kritik dan saran yang berkenan untuk perbaikan dan sempurnanya laporan ini. Besar harapan saya bahwa dengan adanya skripsi ini dapat memberi manfaat bagi semua pihak yang memerlukannya sebagai sumber bahan kajian dan referensi.

Depok, Juni 2010

Amri Kiswara

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

---

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

Nama : AMRI KISWARA  
NPM : 0606074602  
Program Studi : TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL  
Departemen : METALURGI DAN MATERIAL  
Fakultas : TEKNIK  
Jenis Karya : Skripsi

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

**STUDI PENGARUH VARIASI TEMPERATUR DEFORMASI PADA  
CANAI HANGAT TERHADAP MORFOLOGI BUTIR FERIT DAN  
KETAHANANNYA TERHADAP LAJU KOROSI PADA BAJA KARBON  
RENDAH SS 400**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan 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 : 26 Juni 2009

Yang menyatakan,

(AMRI KISWARA)

## ABSTRAK

Nama : Amri Kiswara

Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material

Judul : Studi Pengaruh Variasi temperatur deformasi pada canai hangat terhadap Morfologi Butir Ferit dan Ketahanannya Terhadap Laju Korosi Pada Baja Karbon Rendah SS 400

Studi terhadap penghalusan butir terus dikembangkan untuk mendapatkan sifat mekanis yang lebih baik pada baja karbon rendah. Ferit merupakan salah satu fasa yang sering ditemui dalam struktur mikro baja karbon rendah. Tujuan dari penelitian ini ialah untuk mengetahui proses perubahan morfologi butir ferit dengan variasi temperatur canai hangat yaitu berkisar antara 500°C-700°C dan sifat mekanis yang dihasilkan dengan melihat struktur mikro, nilai kekerasannya, juga ketahanannya terhadap laju korosi polarisasi. Proses yang diterapkan ialah proses canai hangat (*warm working*) yang berbasis pada proses *Thermomechanical Treatment* dimana terjadi modifikasi terhadap temperatur pemanasan ulang dan temperatur akhir deformasi canai, dengan waktu tahan 120 menit dan deformasi searah tunggal sebesar 70% dengan menggunakan mesin rol berkapasitas 20 ton dan didinginkan dengan pendinginan udara. Baja karbon rendah yang digunakan mengandung 0.12%C. Untuk melihat fasa ferit digunakan nital 3% dan perhitungan butir ferit dengan menggunakan metode *Heyn Intercept* sesuai ASTM E112. Untuk mengetahui ketahanan korosi digunakan uji polarisasi di larutan garam NaCl 3.5% yang sesuai dengan ASTM G102. Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa ukuran butir ferit tereduksi sesudah dilakukan pemanasan ulang dan deformasi dengan diameter terkecil yang didapat sekitar  $6.54 \pm 0.34 \mu\text{m}$ , dan nilai kekerasannya yang menurun serta laju korosi yang semakin menurun seiring dengan menurunnya nilai kekerasan yaitu ketika nilai kekerasannya 162.966 HVN dan laju korosinya polarisasinya yaitu 2.063 mpy.

Kata Kunci : Penghalusan butir, baja karbon rendah , canai hangat, ukuran butir ferit, sifat mekanis, laju korosi.

## ABSTRACT

Name : Amri Kiswara  
Study Program : Metallurgy and Material Engineering  
Title : Study of the Effect of warm rolling deformation temperature variation to ferrite grain morphology and its resistance to corrosion rate on low carbon steel SS400

Studies of grain refinement have continued to be developed to obtain better mechanical properties in low carbon steel. Ferrite is one of the most common phases in the microstructure of low carbon steel. The purpose of this study was to determine the process that changes the morphology of ferrite grains with warm rolling temperature variation ranging from 500°C - 700°C and mechanical properties generated by looking at the microstructure, hardness values, as well as the corrosion resistance to polarization test. The process applied is the warm working process based on the modification process of thermomechanical treatment on the reheating temperature and the final rolling deformation temperature, with holding time applied is 120 minutes and a single unidirectional deformation of 70% by using roller machine capacity with 20 tons and then cooled with air cooling. Low carbon steel that used contains 0.12%wt carbon. Nital 3% was used to view the ferrite phase and ferrite grain calculation used Heyn Intercept method according to ASTM E112. Polarization test was used for determining corrosion resistance in 3.5% NaCl saline solution in accordance with ASTM G102. The test results showed that the ferrite grain size is reduced after reheating and deformation applied with the smallest diameter of ferrite grain size is obtained around  $6.54 \pm 0.34 \mu\text{m}$ , and value of its hardness and corrosion rate decreases with decreasing the hardness value when the value of hardness reached 162.966 HVN and corrosion rate of polarization test is 2.063 mpy.

Keywords: Grain Refinement, low-carbon steel, warm roll, ferrite grain size, mechanical properties, corrosion rate.

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH .....	vi
ABSTRAK .....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xii
DAFTAR TABEL.....	xiv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xv
<b>BAB 1 PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Ruang Lingkup Penelitian .....	3
1.4.1 Material.....	3
1.4.2 Parameter Penelitian .....	3
1.4.3 Tempat Penelitian .....	3
1.5 Sistematika Penulisan.....	4
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>5</b>
2.1 Baja Karbon.....	5
2.2.1 Baja Karbon Rendah.....	6
2.2 Mekanisme Penguatan Dengan Penghalusan Butir .....	7
2.2.1 Penghalusan Butir Ferit .....	9
2.3 Proses Canai .....	10
2.3.1 Proses Canai Dingin .....	11
2.3.2 Proses Canai Panas .....	12
2.4 Proses Anil Rekristalisasi .....	13
2.4.1 Recovery .....	14
2.4.2 Rekristalisasi.....	15
2.4.3 Grain Growth .....	18
2.5 Proses Termomekanikal (TMCP).....	18

2.6	Proses Canai Hangat/Warm Working.....	20
2.7	Pengertian Umum Korosi .....	21
2.7.1	Korosi Pada Baja Karbon Rendah .....	22
2.7.2	Kinetika Korosi.....	23
2.7.3	Penghitungan Laju Korosi Polarisasi .....	25
2.8	Penghitungan Butir .....	28
<b>BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....</b>		<b>31</b>
3.1	Diagram Alir Penelitian.....	31
3.2	Alat dan Bahan .....	32
3.3	Prosedur Penelitian .....	32
3.3.1	Pemilihan Material .....	32
3.3.2	Preparasi Sampel .....	33
3.3.3	Proses Termomekanikal dan Warm Working.....	34
3.3.4	Pengujian Struktur Mikro .....	37
3.3.5	Pengujian Besar Butir.....	38
3.3.6	Pengujian Kekerasan .....	39
3.3.7	Pengujian Ketahanan Korosi .....	40
<b>BAB 4 HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN.....</b>		<b>43</b>
4.1	Hasil Pengujian.....	43
4.2	Hasil Pengukuran Ketebalan Sampel .....	43
4.3	Hasil Penghitungan Butir.....	44
4.3.1	Hubungan Antara Temperatur Reheating Dengan Diameter Butir Ferit.....	46
4.3.2	Hubungan Antara Temperatur Deformasi Dengan Morfologi Butir Ferit.....	47
4.4	Pengamatan Metalografi.....	48
4.4.1	Pengaruh Temperatur Reheating Terhadap Struktur Mikro .....	49
4.4.2	Pengaruh Waktu Tahan Terhadap Diameter Akhir Butir .....	51
4.4.3	Pengaruh Temperatur Deformasi Terhadap Struktur Mikro .....	52
4.5	Hasil Pengujian Kekerasan.....	54
4.5.1	Hubungan Kekerasan Terhadap Temperatur Akhir Deformasi.....	55
4.5.2	Hubungan Kekerasan Terhadap Temperatur Reheating.....	57
4.6	Hasil Pengujian Korosi Polarisasi .....	58
4.6.1	Hubungan Laju Korosi Dengan Kekerasan.....	58

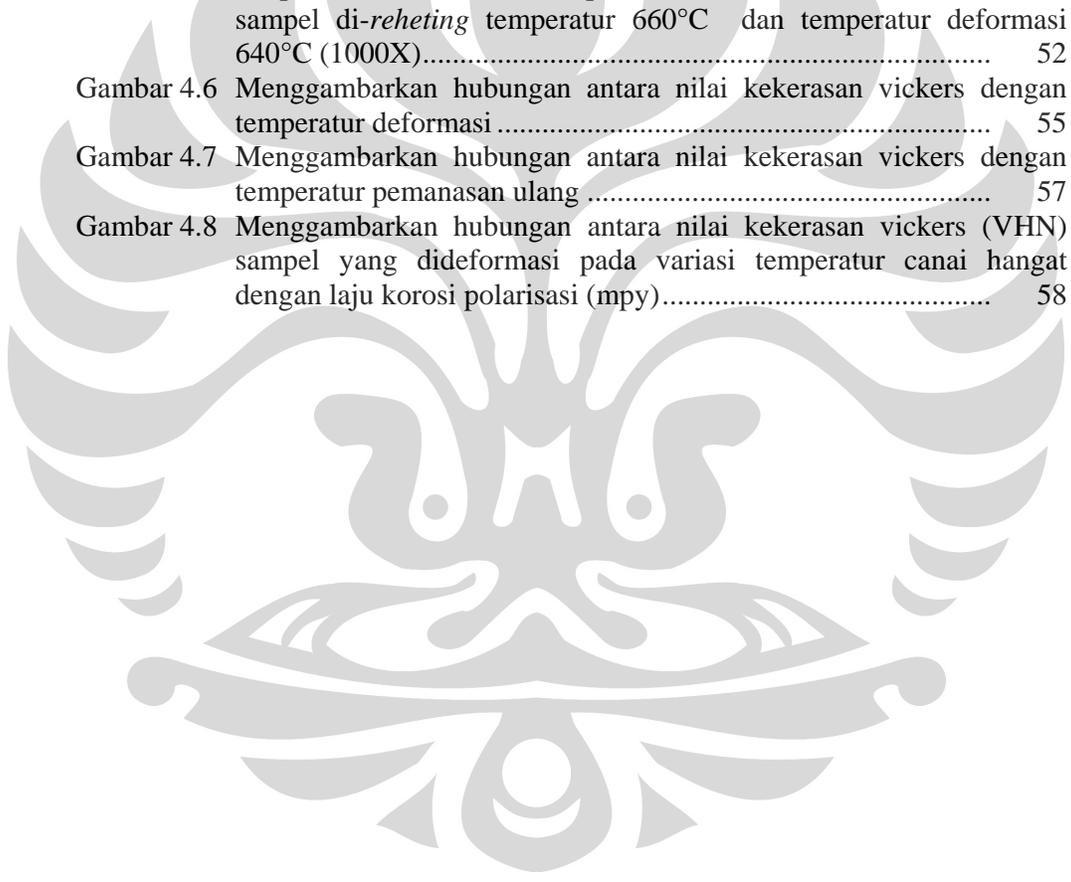
<b>BAB 5 KESIMPULAN .....</b>	<b>60</b>
5.1 Kesimpulan .....	60
DAFTAR PUSTAKA .....	61
LAMPIRAN.....	64



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Mengilustrasikan Batas Butir dan Pergerakan Dislokasi.....	8
Gambar 2.2	Menggambarkan pengaruh besar butir terhadap nilai kekuatan .	9
Gambar 2.3	Menggambarkan struktur mikro dari (a)butir elongated, (b) sebelum dideformasi, (c) setelah dideformasi.....	10
Gambar 2.4	Mengilustrasikan perubahan ketebalan dan lebar logam dalam proses canai .....	11
Gambar 2.5	Mengilustrasikan skema proses <i>recovery</i> , rekristalisasi, pertumbuhan butir dan daerah sifat yang dicapai oleh setiap proses.....	13
Gambar 2.6	Mengilustrasikan skematis proses <i>recovery</i> , rekristalisasi dan pertumbuhan butir.....	14
Gambar 2.7	Mengilustrasikan proses perbandingan antara rekristalisasi dinamik dan statik.....	17
Gambar 2.8	Menggambarkan perubahan mikrostruktur yang terjadi selama TMCP.....	20
Gambar 2.9	Mengilustrasikan kesetimbangan E-pH untuk besi dan baja.....	22
Gambar 2.10	Mengilustrasikan diagram polarisasi logam .....	25
Gambar 2.11	Kurva ekstrapolasi tafel yang menunjukkan proses korosi.....	26
Gambar 2.12	Lingkaran yang digunakan untuk penghitungan butir dengan metode <i>Intercept Heyn</i> .....	28
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian.....	31
Gambar 3.2	Mengilustrasikan sampel dan pemasangan termokopel ke komputer untuk melihat data temperatur actual dari sampel .....	33
Gambar 3.3	Menggambarkan bentuk sampel sebelum proses <i>reheating</i> dan canai .....	33
Gambar 3.4	Dapur <i>Carbolite</i> .....	34
Gambar 3.5	Mesin canai <i>OnoRoll</i> .....	34
Gambar 3.6	Menggambarkan alur perlakuan proses pada sampel B.....	35
Gambar 3.7	Menggambarkan alur perlakuan proses pada sampel C.....	36
Gambar 3.8	Menggambarkan alur perlakuan proses pada sampel D .....	36
Gambar 3.9	Menggambarkan Arah pemotongan sampel untuk melihat struktur mikro semua sampel baja karbon SS400 .....	37
Gambar 3.10	Lingkaran yang digunakan untuk penghitungan butir dengan metode <i>Intercept Heyn</i> .....	38
Gambar 3.11	Mengilustrasikan jejak yang dihasilkan selama penjejakan.....	40
Gambar 3.12	Kurva ekstrapolasi tafel yang menunjukkan proses korosi .....	41
Gambar 4.1	Menggambarkan hubungan antara temperatur pemanasan ulang dengan diameter butir ferit baja karbon rendah SS400 ( $\mu\text{m}$ ).....	46
Gambar 4.2	Menggambarkan hubungan antara temperatur deformasi canai hangat dengan diameter butir ferit baja karbon rendah SS400 ( $\mu\text{m}$ ) .....	48
Gambar 4.3	Menggambarkan struktur mikro sampel awal baja karbon rendah SS400 dengan waktu tahan dan di etsa dengan nital 3% (a) sampel yang tidak mengalami pemanasan ulang dan tanpa deformasi (500X), (b) sampel yang mengalami pemanasan ulang sebesar	

	520°C tanpa deformasi (1000X), (c) sampel yang mengalami pemanasan ulang sebesar 660°C tanpa deformasi (1000X).....	49
Gambar 4.5	Menggambarkan perbandingan waktu tahan terhadap morfologi butir ferit baja karbon rendah SS400 yang dietsa dengan nital 3%, (a) sampel yang dilakukan pemanasan ulang pada temperatur 660°C dengan waktu tahan 120 menit dan dideformasi pada temperatur 640°C(1000X), (b) sampel yang dilakukan penahanan pada temperatur 650°C selama 300 menit dan dideformasi pada 600°C(200X).....	51
Gambar 4.5	Menggambarkan struktur mikro sampel awal baja karbon rendah SS400 dengan deformasi 70% dan waktu tahan 120 menit dietsa dengan nital 3% (a) sampel di- <i>reheating</i> temperatur 520°C dan temperatur deformasi 500°C (1000X), (b) sampel di- <i>reheating</i> temperatur 660°C dan temperatur deformasi 570°C (1000X), (c) sampel di- <i>reheating</i> temperatur 660°C dan temperatur deformasi 640°C (1000X).....	52
Gambar 4.6	Menggambarkan hubungan antara nilai kekerasan vickers dengan temperatur deformasi .....	55
Gambar 4.7	Menggambarkan hubungan antara nilai kekerasan vickers dengan temperatur pemanasan ulang .....	57
Gambar 4.8	Menggambarkan hubungan antara nilai kekerasan vickers (VHN) sampel yang dideformasi pada variasi temperatur canai hangat dengan laju korosi polarisasi (mpy).....	58

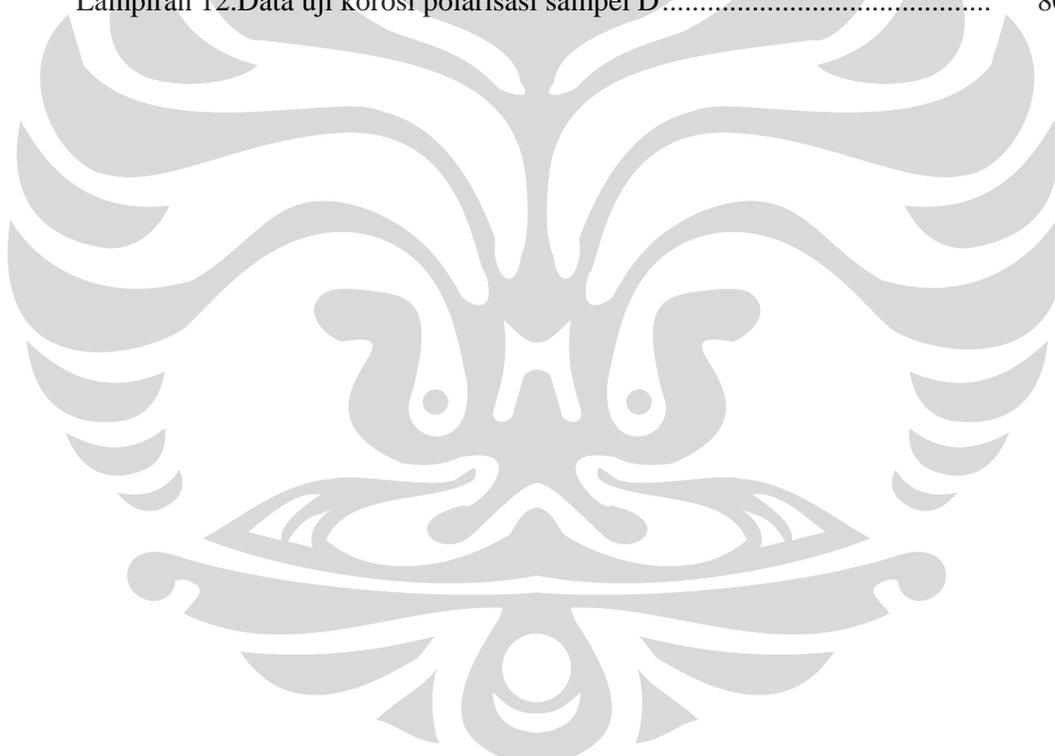


## DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	Komposisi kimia baja SS400 .....	3
Tabel 2.1	Komposisi beberapa baja karbon rendah .....	6
Tabel 2.2	Karakteristik mekanis dan aplikasi dari beberapa baja karbon rendah .....	7
Tabel 2.3	Klasifikasi sifat ketahanan korosi material .....	28
Tabel 3.1	Komposisi kimia sampel .....	33
Tabel 4.1	Hasil pengukuran dimensi awal sebelum deformasi dan akhir setelah deformasi pada sampel Baja SS400 dengan waktu tahan 120 menit .....	44
Tabel 4.2	Hasil Pengukuran diameter butir pada sampel baja SS400 yang tidak mengalami Pemanasan ulang dan deformasi .....	45
Tabel 4.3	Hasil pengukuran diameter butir ferit baja karbon rendah SS400 tanpa deformasi dengan waktu tahan 120 menit.....	45
Tabel 4.4	Hasil pengukuran diameter butir ferit dengan deformasi 70% pada variasi temperatur canai hangat dengan waktu tahan 120 menit...	46
Tabel 4.3	Hasil Uji Kekerasan Vickers.....	54
Tabel 4.4	Hasil pengujian laju korosi polarisasi terhadap ketiga sampel yang mengalami deformasi pada temperatur canai.....	58

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Pengujian Komposisi Kimia Baja SS400.....	65
Lampiran 2. Perhitungan Kekerasan Vickers.....	66
Lampiran 3. Data kurva pengujian canai hangat proses B.....	67
Lampiran 4. Data kurva pengujian canai hangat proses C.....	68
Lampiran 5. Data kurva pengujian canai hangat proses D.....	69
Lampiran 6. Perhitungan Diameter Butir.....	70
Lampiran 7. Tabel Diameter Butir ASTM E112.....	72
Lampiran 8. Data penghitungan dimensi awal dan sesudah deformasi dan reheating.....	73
Lampiran 9 Perhitungan diameter butir metode intercept heyn (ASTM E112)	74
Lampiran 10 Data uji korosi polarisasi sampel B.....	78
Lampiran 11. Data uji korosi polarisasi sampel C.....	79
Lampiran 12. Data uji korosi polarisasi sampel D.....	80



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Permasalahan yang terjadi pada baja dengan timbulnya kerusakan-kerusakan pada saat aplikasi dikarenakan sifat mekanis yang dimiliki material baja tersebut tidaklah memadai. Perkembangan teknologi industri baja yang sangat pesat membawa perubahan yang besar terhadap proses pemilihan untuk penggunaan yang tepat pada material baja. Seiring dengan perkembangan yang terjadi, maka terjadi peningkatan karakteristik dan sifat yang sesuai pada baja untuk aplikasi yang dibutuhkan. Perkembangan teknologi kini bukan hanya sekedar kebutuhan teknis saja tetapi juga ekonomis dan efisiensi penggunaan energi.

Untuk menghasilkan baja yang memiliki sifat mekanis dan juga ketahanan korosi yang baik dikembangkan suatu proses yaitu proses termomekanikal (*Thermo-Mechanical Control Process / TMCP*). Proses termomekanikal ini merupakan proses perubahan bentuk material yang melibatkan proses deformasi dengan disertai proses kontrol ataupun rekayasa proses perlakuan panas dan mikrostruktur untuk menghasilkan produk dengan sifat-sifat mekanis yang lebih baik<sup>[1]</sup>. Dengan menggunakan proses canai (*rolling*) untuk melakukan proses deformasi dengan membentuk geometri dan ukuran tertentu dari material. Proses TMCP ini telah berkembang dengan adanya proses dengan menggunakan pengerjaan hangat (*warm working*) dengan rentang temperatur antara 450-700°C<sup>[1]</sup>.

Baja karbon rendah merupakan salah satu jenis baja yang dipakai secara meluas sebagai konstruksi gedung, jembatan, struktur pipa hingga komponen pada industri otomotif. Biasanya penggunaan baja ini dalam bentuk hasil pengerolan, teraniliasi. Baja karbon rendah sifatnya dipengaruhi oleh kandungan karbonnya dan juga mikrostrukturnya. Struktur *ferrite-pearlite* merupakan struktur yang sering dijumpai pada baja karbon rendah. Dengan proses rekayasa pada

temperatur hangat maka diharapkan terjadi reduksi ukuran butir ferit. Sehingga dengan perpaduan antara proses pengerjaan hangat dan juga penggunaan baja karbon rendah diharapkan mendapatkan peningkatan yang signifikan terhadap sifat akhir baja dan efisiensi dari segi biaya dengan adanya pengontrolan terhadap mikrostruktur baik ukuran dan bentuk butir.

Penelitian ini dilakukan untuk mempelajari mengamati perubahan ukuran butir ferit pada baja karbon rendah dan ketahannya terhadap laju korosi setelah dilakukan deformasi dengan variasi temperatur canai hangat.

### **1.2 Perumusan Masalah**

Masalah yang dikaji pada penelitian kali ini yaitu untuk melihat pengaruh variasi temperatur hangat pada proses canai hangat antara rentang 450°C hingga 700°C terhadap ukuran butir ferit yang dihasilkan pada proses TMCP dan *warm working* pada spesimen baja karbon rendah. Pada penelitian spesimen akan diuji dengan variasi temperatur hangat yaitu 480°C, 540°C, dan 600°C dengan deformasi searah sebesar 70% dengan pemanasan ulang pada temperatur 520°C dan 660°C yang sebelumnya telah diteliti oleh para peneliti terdahulu, kemudian dibandingkan untuk mendapatkan material dengan sifat mekanis dan ketahanan korosi yang lebih baik.

### **1.3 Tujuan Penelitian**

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. mengamati perubahan mikrostruktur ferit pada baja karbon rendah dengan deformasi tunggal searah sebesar 70%.
2. mengamati pengaruh variasi temperatur pemanasan ulang (*reheating*) canai hangat terhadap morfologi mikrostruktur dan ukuran butir ferit setelah canai hangat.

3. mengamati pengaruh proses TMCP dan canai hangat dengan variasi temperatur akhir canai hangat terhadap ketahanan korosi baja karbon rendah dengan menggunakan metode polarisasi.

## 1.4 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

### 1.4.1 Material

Penelitian ini menggunakan material baja karbon rendah SS400 dengan komposisi sebagai berikut:

**Tabel 1.1 Komposisi kimia Baja SS400**

Komposisi	Fe	C	Cu	Nb	P	S	Cr	Mn	Si
% Berat	98.913	0.120	0.019	< 0.002	0.008	< 0.003	0.003	0.636	0.198

### 1.4.2 Parameter Penelitian

#### a. Pemanasan Ulang

Pemanasan ulang dilakukan pada temperatur masing-masing 520°C, dan 660°C kemudian ditahan selama 120 menit.

#### b. Finishing Temperatur

Temperatur akhir canai dilakukan pada masing-masing temperatur 500°C, 570°C, dan 600°C dan dideformasi dengan derajat deformasi sebesar 70%.

### 1.4.3 Tempat Penelitian

Penelitian terhadap proses TMCP dan pengerjaan hangat dilakukan di Laboratorium Metalurgi Mekanik, Laboratorium Metalografi dan HST, Laboratorium Korosi Departemen Metalurgi dan Material. Sedangkan pengujian komposisi sampel dilakukan di Laboratorium SEM 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 sampel 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 Baja Karbon

Baja merupakan material yang dipakai banyak pada penggunaan sehari-hari dan biasanya mengandung karbon tidak lebih dari 2%. Baja Karbon dilihat dari komposisinya merupakan perpaduan antara karbon besi dan kandungan-kandungan lainnya dimana karbon merupakan kandungan terpenting. Baja karbon umumnya memiliki kandungan dengan kisaran antara lain kandungan maksimal karbon tidak melebihi 1%, mangan dengan kandungan maksimal 1.65%, silikon dengan kandungan maksimal 0.60%, tembaga dengan kandungan maksimal 0.60%, dan sebagian kecil kandungan sulfur dan fosfor[2].

Karbon merupakan unsur ‘pengeras utama’ pada baja. Jika kadar karbon ditingkatkan maka akan meningkatkan kekuatannya akan tetapi nilai impact baja tersebut akan menurun. Baja karbon dapat diklasifikasikan menurut kandungan karbonnya menjadi tiga jenis yang telah dikenal yaitu[3]:

1. Baja karbon rendah

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

2. Baja karbon medium

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

### 3. Baja karbon tinggi

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

#### 2.1.1 Baja Karbon Rendah

Baja karbon rendah umumnya memiliki kandungan tidak lebih dari 0.25%C dan kandungan mangan berada antara 0.40% dan 1.5%, dan baja karbon rendah tidak responsif terhadap perlakuan panas yang cenderung untuk membentuk fasa martensit. Baja karbon rendah merupakan salah satu dari beberapa jenis baja yang digunakan untuk penggunaan umum karena harganya yang murah dibandingkan baja jenis lainnya. Baja karbon rendah diproduksi biasanya dalam bentuk lembaran atau gulungan baja yang dibuat dengan proses *cold work* atau canai dingin dan *anneal*. Mikrostrukturnya terdiri dari fasa ferit dan perlit yang membuat baja karbon rendah ini lunak dan kekuatannya lemah, tetapi memiliki keuletan dan ketangguhan yang sangat baik sehingga sifatnya mampu mesin dan mampu lasnya menjadi baik. Penggunaan baja karbon rendah ini dapat ditemukan pada bagian badan mobil, bentuk struktural, pipa, bangunan, dan juga jembatan[4].

Tabel 2.1 Komposisi beberapa baja karbon rendah[4]

Jenis Material		Komposisi (wt %)*		
AISI/SAE or ASTM number	UNS number	C	Mn	Lainnya
1010	G10100	0.10	0.45	
1020	G10200	0.20	0.45	
A36	K02600	0.29	1.00	0.2 Cu
A516	grade 70 K02700	0.31	1.00	0.25 Si.

**Tabel 2.2 Karakteristik mekanis dan aplikasi dari beberapa baja karbon rendah[4]**

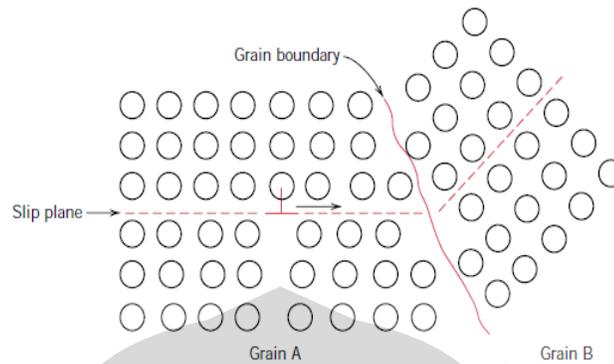
AISI/SAE or ASTM number	Tensile strength [Mpa (ksi)]	Yield strength [Mpa (ksi)]	Ductility [%EL in 50mm (2inc)]	Tipikal Aplikasi
1010	325 (47)	180 (26)	28	Panel automobil, paku dan kawat
1020	380 (55)	205 (30)	25	Pipa, konstruksi dan baja lembaran
A36	400 (58)	220 (32)	23	Konstruksi (bangunan dan jembatan)
A516 Grade70	485 (70)	260 (38)	21	Bejana tekan temperatur rendah

\* Juga mengandung maksimal 0.04 wt% P, 0.05 wt% S, dan 0.30 wt% Si.

Tabel 2.1 dan tabel 2.2 di atas memperlihatkan komposisi dan sifat mekanis dari beberapa jenis baja karbon rendah dengan kekuatan luluh (*yield strength*) sebesar 275 Mpa (40.000 psi), kekuatan tarik (*tensile strength*) antara 415 dan 550 Mpa (60.000 dan 80.000 psi), dan keuletan sebesar 25% EL.

## 2.2 Mekanisme Penguatan dengan penghalusan butir

Sifat mekanis dari suatu material sangat dipengaruhi oleh ukuran butir atau diameter butir rata-rata dalam logam polikristal. Pada umumnya, butir yang bersebelahan biasanya memiliki orientasi 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 yang dilustrasikan pada gambar 2.1.



**Gambar 2.1 Mengilustrasikan Batas Butir dan Pergerakan Dislokasi[4]**

Batas butir bertindak sebagai penghalang pergerakan dislokasi karena dua alasan[4] :

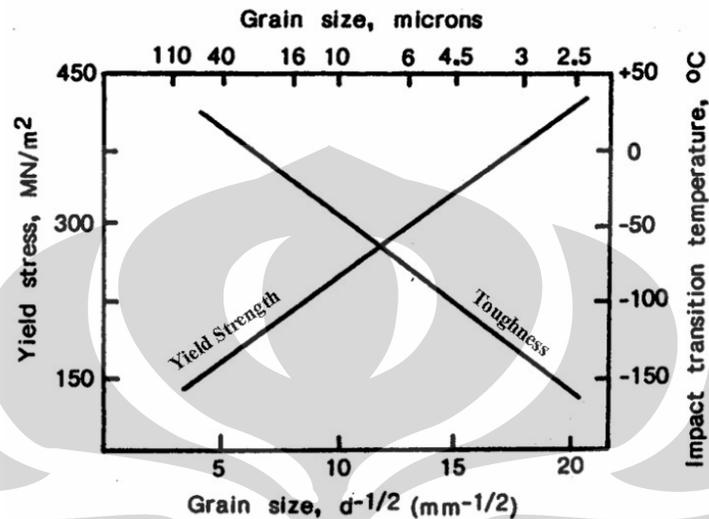
1. Ketidaksamaan susunan atom dalam area batas butir akan menghasilkan berubahnya *slip plane* dari butir satu ke butir lainnya.
2. Butir memiliki orientasi yang berbeda-beda sehingga dislokasi yang menuju butir sebelahny harus mengubah arah pergerakannya. Perbedaan orientasi tersebut juga mengakibatkan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

Untuk mengetahui pengaruh ukuran butir dari teori diatas dapat dibuktikan dengan Persamaan *Hall-Petch*[4] di bawah ini :

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

$d$  adalah diameter butir rata-rata,  $\sigma_0$  dan  $k_y$  adalah konstanta untuk material. Namun persamaan diatas tidak berlaku untuk material polikristal dengan butir yang sangat besar (kasar) dan butir yang sangat halus. Material dengan ukuran butir yang halus atau butir-butir kecil memiliki sifat yang lebih keras dan kuat dibandingkan material dengan butir kasar atau butir yang lebih besar, karena butir halus memiliki area batas butir total yang lebih luas untuk menghalangi

pergerakan dislokasi. Untuk sebagian besar material, kekuatan tarik y bervariasi dengan ukuran butir. Hal ini ditunjukkan oleh gambar 2.2.



Gambar 2.2 Menggambarkan pengaruh besar butir terhadap nilai kekuatan[5]

### 2.2.1 Penghalusan Butir Ferit

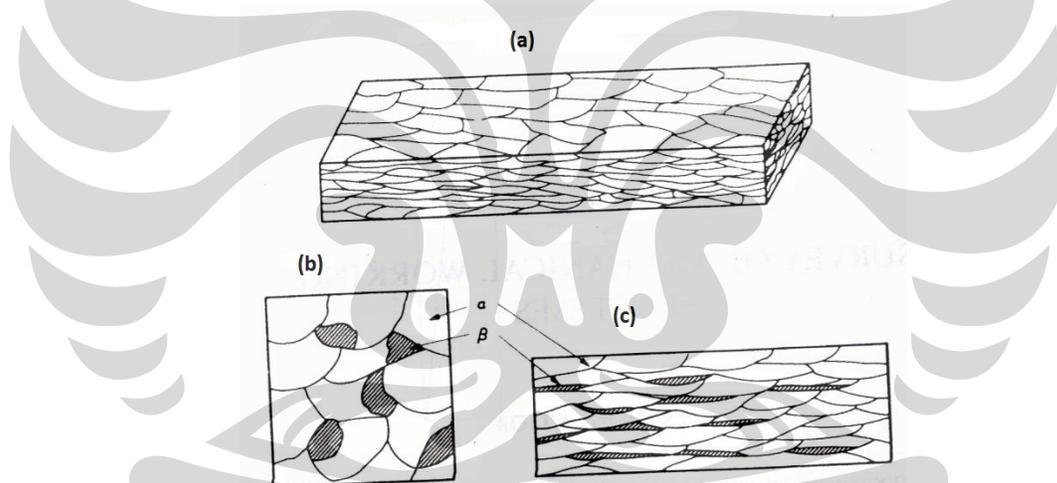
Pada proses pemanasan ulang, fasa ferit terbentuk pada selama proses pendinginan lanjut (*continous cooling*) dengan menggunakan pendinginan udara. Selain itu pembentukan fasa ferit tergantung pada kandungan karbon, kandungan paduan, laju pendinginan. Pada proses pengerjaan panas biasanya baja dalam keadaan fasa austenit dan ditransformasi menjadi struktur ferit dan perlit. Pengaturan terhadap mikrostruktur dan sifat selama pengerjaan panas disebut sebagai canai terkendali. Pada proses ini biasanya butir austenit diubah menjadi butir ferit yang halus melalui pendinginan terkendali. Deformasi pada proses ini biasanya terjadi diatas temperatur rekristalisasi.

Selain itu untuk mendapatkan butir yang halus bisa dengan proses anil yang didahului oleh pengerjaan dingin. Pada proses anil temperatur rendah (480°C) selama satu jam, terjadi pengurangan densitas dislokasi dalam butir sehingga menghasilkan butir yang lebih halus yang tidak mengalami rekristalisasi,

pada temperatur sedang ( $540^{\circ}\text{C}$ ) terbentuk butir yang lebih besar, sedangkan pada anil temperatur tinggi ( $600^{\circ}\text{C}$ ) dihasilkan butir dengan ukuran yang lebih besar[6].

### 2.3 Proses Canai

Selama proses canai terjadi proses perubahan pada bentuk pada sampel dimana pada saat proses tersebut adanya gaya tekan (*compressive load*) terjadi pengurangan ketebalan dan penambahan panjang akan tetapi massa tetap konstan tidak mengalami perubahan. Pada saat proses pengerjaan canai, butir pada baja akan terdeformasi menjadi panjang (*elongated grain*) dimana pada butir tersebut terdapat dua fasa berbeda yang terdiri dari butir  $\alpha$  dan  $\beta$  yang bereaksi terhadap proses deformasi seperti terlihat pada gambar 2.3.



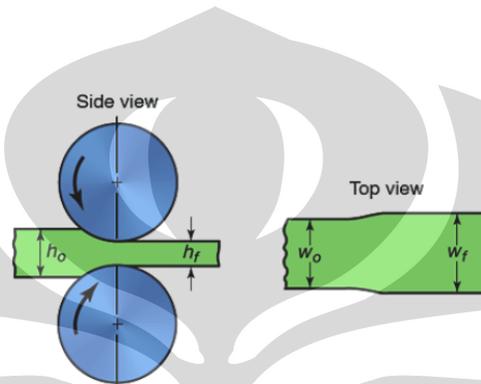
Gambar 2.3 Menggambarkan struktur mikro dari (a)butir elongated, (b) sebelum dideformasi, (c) setelah dideformasi[7]

Ada dua jenis proses canai yang berdasarkan temperatur yang digunakan, yaitu:

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

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

Pada proses canai akan dihasilkan perubahan ketebalan dan perubahan lebar dari logam yang di canai. Hal tersebut dapat diilustrasikan pada Gambar 2.4 di bawah ini.



**Gambar 2.4** Mengilustrasikan perubahan ketebalan dan lebar logam dalam proses canai [8]

Deformasi yang terjadi pada sampel dapat dihitung dengan persentase reduksi melalui persamaan berikut:

$$\% \text{ Deformasi} = \ln \frac{H_o}{H_f} \dots \dots \dots (2.2)$$

Dimana:      % Deformation = Besar prosentase perubahan ketebalan  
 $H_o$             = Ketebalan Awal(mm)  
 $H_f$             = Ketebalan Akhir(mm)

### 2.3.1 Proses Canai Dingin

Canai dingin (*cold rolling*) yaitu proses canai yang dilakukan dengan menggunakan temperatur ruang atau temperatur di bawah temperatur rekristalisasi material. Pada proses canai dingin dihasilkan tegangan sisa (*residual stress*) dari energi dalam (*internal energy*) yang dihasilkan dari meningkatnya jumlah dislokasi yang saling berinteraksi[9]. Selain itu karena pada deformasi material dalam pengerjaan dingin akan terjadi deformasi tidak homogen. Hal ini terjadi

**Universitas Indonesia**

karena adanya perbedaan friksi antara benda kerja dengan alat pembentuk (*forming tools*). pada proses canai dingin, dengan persen reduksi area yang lebih rendah, deformasi akan terpusat pada permukaan material dimana friksi antara canai dan benda kerja terjadi. Lapisan dalam material akan mencegah pengembangan lapisan di atasnya. Lapisan permukaan material benda kerja akan berusaha mengembang. Dengan demikian permukaan benda kerja akan mengalami tegangan tekan (*compressive stress*) sedangkan lapisan dalam akan mengalami tegangan tarik (*tension stress*).

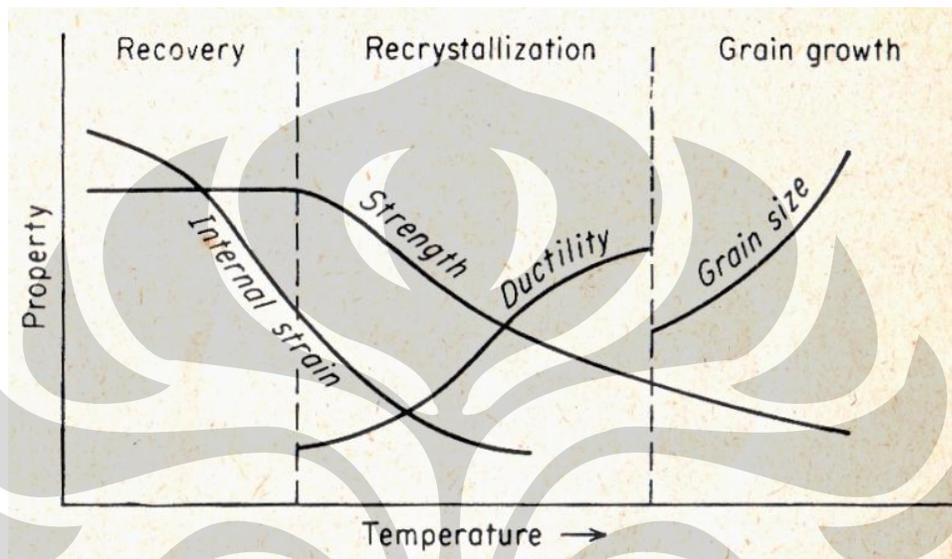
Untuk meningkatkan sifat material maka perlu dilakukan pengurangan atau penghilangan tegangan sisa yang dihasilkan pada proses pengerjaan dingin. Hal tersebut dapat dilakukan dengan cara perlakuan panas dan perlakuan mekanis. Perlakuan mekanis yaitu dengan memberikan tegangan yang berlawanan atau melakukan deformasi plastis lanjut yang bertujuan memberikan kesempatan lepasnya tegangan yang tidak seragam. Perlakuan panas dilakukan pada temperatur tertentu pada material, atau sering disebut *stress-relieving treatment*[10].

### **2.3.2 Proses Canai Panas**

Proses canai panas adalah suatu proses deformasi yang diikuti dengan proses perlakuan panas sehingga tegangan sisa tidak terjadi. Pada proses ini yang terjadi ialah proses pergerakan dislokasi, *recovery*, rekristalisasi, dan pertumbuhan butir (*grain growth*) sehingga material akan memiliki sifat dan kinerja yang lebih baik.

Pada proses canai, temperatur akhir proses merupakan hal yang penting karena proses ini harus berakhir pada temperatur tepat di atas temperatur rekristalisasi untuk memperoleh ukuran butir yang kecil dan halus. Jika temperatur akhir jauh di atas temperatur rekristalisasi, pertumbuhan butir akan terjadi. Apabila temperatur akhir di bawah temperatur rekristalisasi, maka akan terjadi pengerasan regangan (*strain hardening*). Pada temperatur di atas temperatur rekristalisasi, material akan menjadi lebih lunak dan lebih ulet dibandingkan pada temperatur ruang, sehingga tidak dibutuhkan tenaga yang besar untuk deformasi. Karena tidak ada pengerasan regangan, maka reduksi ukuran

material yang tebal bisa dilakukan. Tetapi keakuratan dari ukuran hasil proses canai kurang baik[11]. Gambar 2.5 menunjukkan ilustrasi dari sifat material dengan temperatur perlakuan.

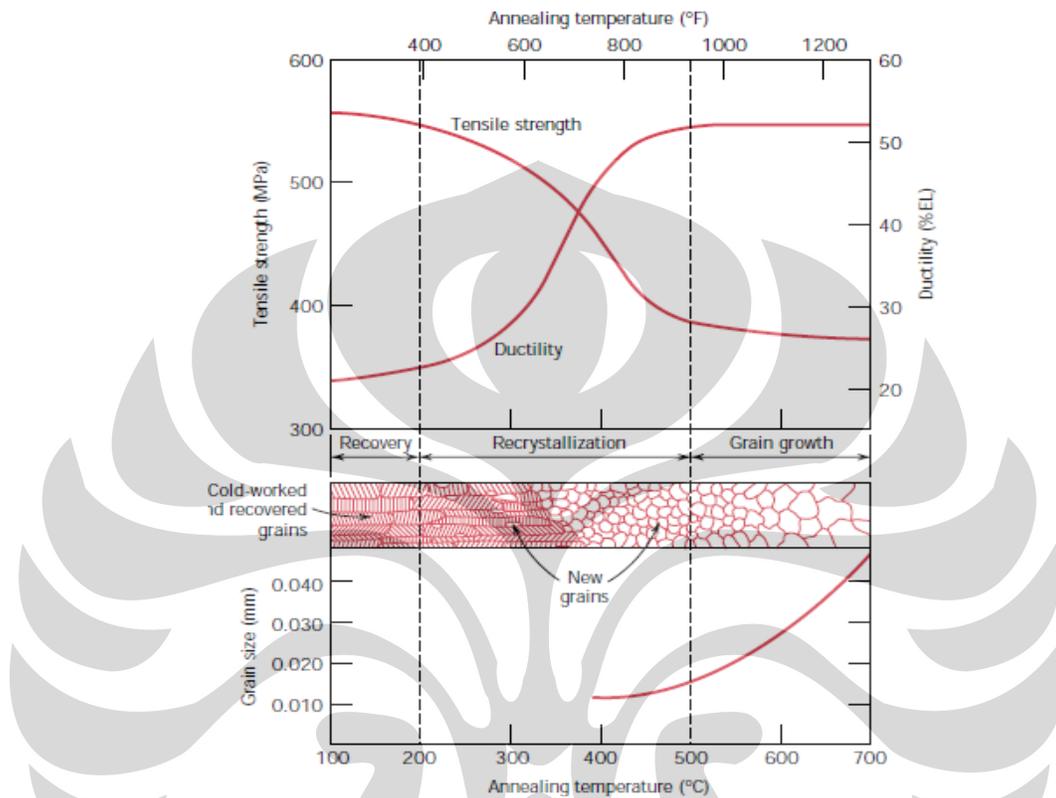


Gambar 2.5 Mengilustrasikan skema proses *recovery*, rekristalisasi, pertumbuhan butir dan daerah sifat yang dicapai oleh setiap proses[9].

#### 2.4 Proses Anil Rekristalisasi

Pada bentuk deformasi pengerjaan dingin (*cold-worked*) merupakan keadaan dimana energi dalam yang tinggi dibandingkan pada logam yang tidak terdeformasi. Walaupun struktur sel dislokasi pada pengerjaan dingin secara mekanis stabil tetapi tidaklah stabil secara termodinamik. Seiring dengan meningkatnya temperatur bentuk deformasi pengerjaan dingin menjadi lebih tidak stabil, walaupun logam menjadi lunak dan kembali menjadi keadaan *strain-free*. Sehingga dibutuhkan proses anil (*annealing*) yang bertujuan untuk mengembalikan sifat keuletan logam yang telah mengalami pengerasan regangan. Proses anil terbagi menjadi tiga proses bagian yaitu rekoveri (*recovery*), rekristalisasi (*recrystallization*), dan pertumbuhan butir (*grain growth*)[9]. Proses

*Recovery*, Rekristalisasi dan Pertumbuhan Butir beserta pengaruhnya terhadap sifat mekanisnya.



**Gambar 2.6** Mengilustrasikan skematis proses *recovery*, rekristalisasi dan pertumbuhan butir[4]

#### 2.4.1 *Recovery*

*Recovery* merupakan tahap awal proses anil yang terjadi pada temperatur rendah dan juga terjadi proses penghilangan energi internal yang ada pada saat proses pengerjaan dingin. Pada saat rekoveri terjadi proses pengembalian sifat fisik dari logam tanpa adanya perubahan yang diamati pada struktur mikronya[George E.Dieter 1983]. Untuk logam yang mengalami pengerjaan dingin dan butirnya memipih tidak terlihat perubahan pada butir tersebut. Namun untuk tingkatan submikroskopis, terjadi perubahan pada titik cacat dan klusternta, sehingga terjadi penghilangan dan pengaturan ulang dislokasi, serat pembentukan

sub-butir (*sub-grain*) dan pertumbuhannya. Perubahan pada mikrostruktural ini akan melepas sebagian besar tegangan dalam dan *recovery* ini juga digunakan untuk proses *stress-relieving*. Dengan hilangnya beberapa dislokasi maka kekuatan material akan berkurang. Namun, hilangnya dislokasi ini diimbangi dengan pembentukan sub-butir yaitu butir yang memiliki batas butir dengan sudut kecil.

#### 2.4.2 Rekristalisasi

Rekristalisasi merupakan proses transformasi nukleasi dan pertumbuhan butir. Rekristalisasi ini merupakan penggantian struktur pengerjaan panas dengan butir-butir yang bebas regangan. Rekristalisasi mempengaruhi sifat mekanis dari logam yaitu mengurangi kekerasan atau kekuatan dan meningkatkan keuletan. Densitas dari dislokasi sangat menurun pada rekristalisasi dan semua pengaruh pengerasan regangan hilang. Energi yang terjadi pada saat pengerjaan dingin digunakan untuk proses *recovery* dan rekristalisasi. Apabila butir-butir yang bebas regangan dipanaskan diatas temperatur rekristalisasi maka akan terjadi pertumbuhan butir secara terus-menerus.

Proses rekristalisasi terdiri dari nukleasi daerah bebas regangan yang batasnya dapat memindahkan matriks yang memiliki regangan menjadi material bebas regangan. Setidaknya ada dua mekanisme nukleasi yang terdapat pada proses rekristalisasi. Pertama disebut *strain-induced boundary migration*, dimana nuklea bebas regangan terbentuk ketika salah satu batas butir yang ada bergerak kesebelahnya yang memiliki densitas dislokasi yang lebih tinggi. Mekanisme nukleasi kedua yaitu batas butir baru terbentuk pada daerah bagian kisi runcing melalui pertumbuhan sub-butir. Ketika semua butir terdahulu yang telah digantikan oleh butir baru yang bebas regangan, maka dapat dikatakan material tersebut telah terekristalisasi dengan sempurna (*fully recrystallized*).

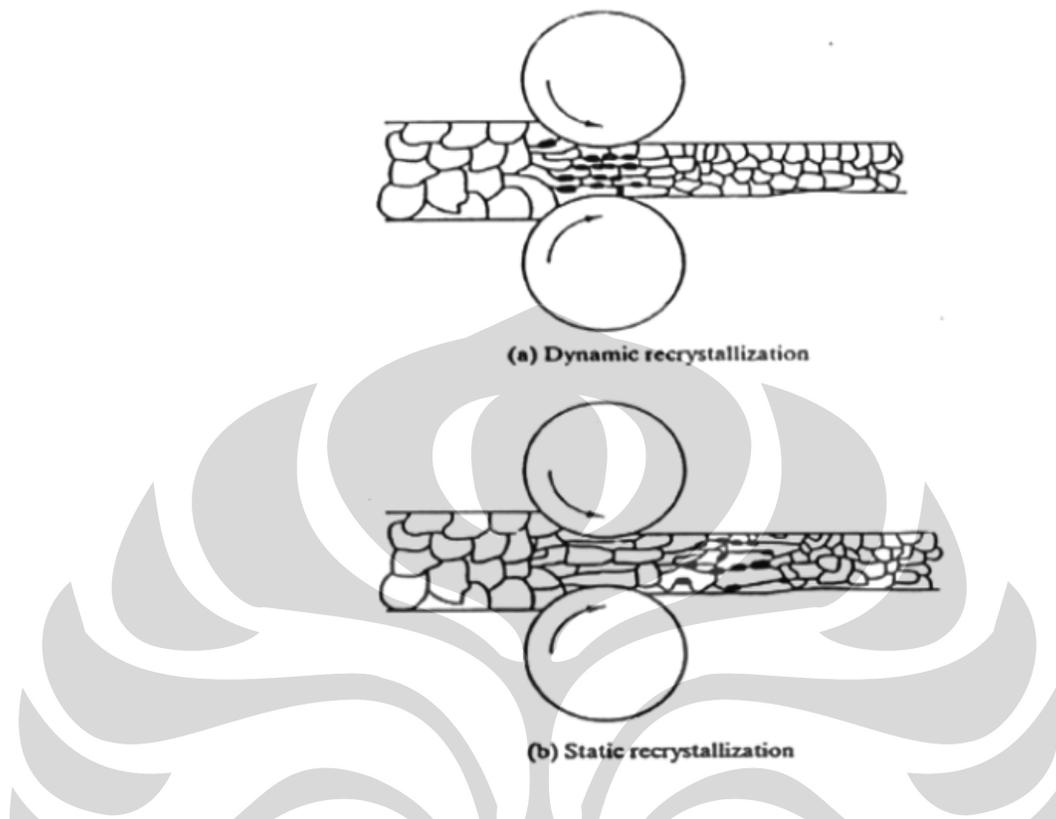
Butir yang baru merupakan butir yang bebas regang sehingga efek pengerasan dari pengerjaan dingin akan menghilang. Hal tersebut akan menyebabkan material memiliki kekuatan dan kekerasan yang sama sebelum dilakukan pengerjaan dingin. Namun perubahan kekuatan dan kekerasan setelah rekristalisasi sangat kecil dan bertahap. Ada enam variabel yang mempengaruhi

**Universitas Indonesia**

proses rekristalisasi yaitu (1) jumlah deformasi sebelumnya, (2) temperatur, (3) waktu, (4) ukuran awal butir, (5) komposisi, dan (6) jumlah rekoveri atau poligonisasi awal pada saat awal proses rekristalisasi. Hubungan antar variabel-variabel tersebut terhadap proses rekristalisasi dapat disimpulkan sebagai berikut[12]:

1. Jumlah deformasi minimum atau Pengerjaan dingin kritis yang minimum dibutuhkan sebelum terjadi rekristalisasi.
2. Semakin kecil persentase deformasi maka semakin tinggi temperatur yang dibutuhkan untuk menghasilkan rekristalisasi.
3. Meningkatnya waktu anil akan menurunkan temperatur untuk rekristalisasi.
4. Ukuran besar butir akhir tergantung pada persentase deformasi, dan sedikit penambahan temperatur anil. Semakin besar persentase deformasi dan semakin rendah temperatur anil maka semakin kecil ukuran butir.
5. Semakin besar ukuran butir anil yang asli maka semakin besar persentase pengerjaan dingin yang dibutuhkan untuk menghasilkan temperatur dan waktu rekristalisasi yang sama.
6. Temperatur rekristalisasi menurun dengan meningkatnya kemurnian dari logam
7. Jumlah deformasi yang dibutuhkan untuk menghasilkan rekristalisasi yang ekuivalen akan meningkat dengan meningkatnya temperatur pengerjaan.

Temperatur rekristalisasi pada logam baja sekitar 600°C hingga 750°C atau antara  $1/3$  hingga  $1/2$  dari temperatur lebur ( $0,3-0,5T_m$ )[13].



**Gambar 2.7 Mengilustrasikan proses perbandingan antara rekristalisasi dinamik dan statik[6]**

Dalam pengerjaan panas, proses rekristalisasi yang terjadi dapat dibagi menjadi dua, yaitu rekristalisasi dinamis dan rekristalisasi statis (gambar 2.7). Pada proses canai panas proses deformasi dan rekristalisasi pada saat yang hampir bersamaan. Rekristalisasi dinamis merupakan proses rekristalisasi yang terjadi saat material sedang dideformasi, sedangkan rekristalisasi statis terjadi sesaat setelah material mengalami deformasi.

Pada rekristalisasi dinamis, ketika material mengalami deformasi, maka terjadi regangan di dalam material, dan apabila regangan tersebut adalah regangan kritis ( $\epsilon_0$ ) 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[9]. Sama seperti proses rekristalisasi dinamis, pada proses rekristalisasi statis juga terbentuk nuklei, hanya saja pembentukan tersebut terjadi setelah

**Universitas Indonesia**

deformasi. Dengan adanya temperatur yang tinggi (diatas temperatur rekristalisasi dari material), maka proses munculnya nuklei pada batas butir dapat terjadi dan proses rekristalisasi dapat berlangsung.

### 2.4.3 Grain Growth

*Grain growth* atau proses pertumbuhan butir merupakan lanjutan setelah proses *recovery* dan proses rekristalisasi (*recrystallization*). Proses ini ditandai dengan pengurangan secara bertahap dari kekuatan material sebagai akibat dari membesarnya ukuran butir. Pertumbuhan butir ditunjukkan sebagai peningkatan besar butir rata-rata pada material polikristalin Dengan bertambahnya temperatur akan menyebabkan bertambahnya energi yang diberikan pada butir. Temperatur yang tinggi akan menyebabkan meningkatnya energi getaran termal, sehingga mempercepat atom berdifusi melalui batas butir dari butir yang kecil menuju yang lebih besar. Hal ini terjadi disebabkan adanya migrasi pada batas butir. Tidak semua butir dapat membesar. Oleh karena itu, butir yang lebih besar akan tumbuh yang kemudian menghabiskan butir yang lebih kecil[4]. Penambahan proses anil (*extended annealing*) pada temperatur tinggi dapat menyebabkan beberapa butir tumbuh menjadi butir dengan ukuran yang sangat besar, yang mana dikenal sebagai rekristalisasi sekunder (*secondary recrystallization*) atau pertumbuhan butir yang abnormal. Dengan ukuran butir yang besar, maka akan terjadi menurunnya sifat mekanis seperti kekerasan dan tegangan luluh[14].

## 2.5 Proses Termomekanikal (TMCP)

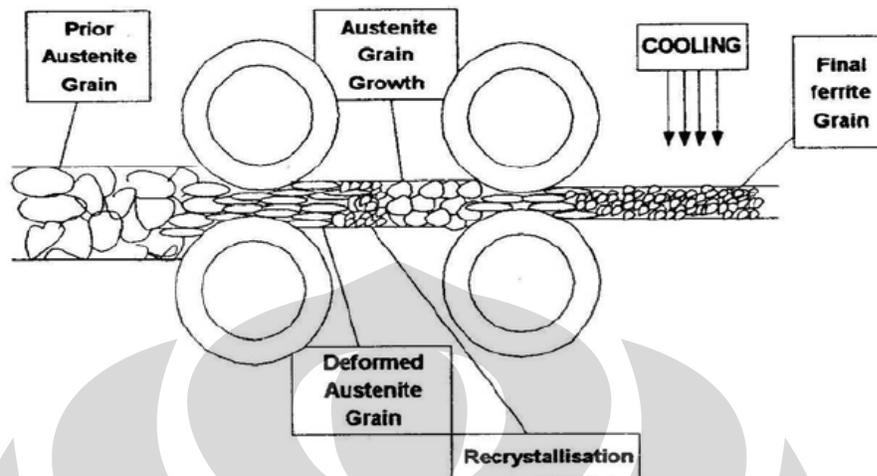
Dahulu proses canai hangat hanya digunakan untuk mendapatkan dimensi dari slab atau benda uji seperti ketebelan, lebar dan panjang. Seiring berkembangnya perkembangan teknologi, maka tuntutan peningkatan kualitas yang tinggi dari baja terus dilakukan. Sehingga proses perlakuan panas seperti *normalizing* atau *quench* dan *tempering* terus dilakukan proses lanjutan yang dikenal dengan *Thermomechanical processing* (TMCP).

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

**Universitas Indonesia**

didapat dari adanya mekanisme pengecilan butir dengan proses deformasi panas yang terkontrol (*controlled rolling*). Secara umum, proses TMCP terdiri dari proses pemanasan awal (*reheating*), canai panas (*hot rolling*), dan pendinginan (*cooling*). Proses pemanasan ini sangat penting dalam menghasilkan sifat mekanis benda jadi sebab dengan pemanasan awal dapat diprediksi struktur mikro akhir yang terbentuk. Untuk menghasilkan butir ferit dengan ukuran yang halus di akhir proses, maka butir austenit juga harus dibuat menjadi halus. Pengontrolan butir austenit ini terjadi pada saat proses pemanasan awal. Hal lain yang juga bisa mempengaruhi pertumbuhan besar butir austenit yaitu temperatur *reheating* dan waktu tahan. Seiring dengan kenaikan temperatur pemanasan maka ukuran butir menjadi semakin besar. Begitu juga halnya waktu tahan, makin lama waktu tahan, maka besar butir austenit menjadi semakin besar. Hal ini terjadi karena adanya difusi butir ke butir lainnya yang dipengaruhi oleh besaran temperatur pemanasan dan waktu tahan.

Pada proses TMCP, pemanasan *slab* yang diikuti oleh proses deformasi plastis pada temperatur yang lebih rendah yang mendekati temperature rekristalisasi akan menghasilkan ukuran butir yang halus (*fine grain sizes*). Selanjutnya pada proses pendinginan terjadi transformasi austenit ke ferrit yang menghasilkan butir ferrit halus (*fine ferrite grains*). Pada sebagian baja 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 sama seperti, atau sebagai ganti, formasi ferrit.



Gambar 2.8 Menggambarkan perubahan mikrostruktur yang terjadi selama TMCP[15].

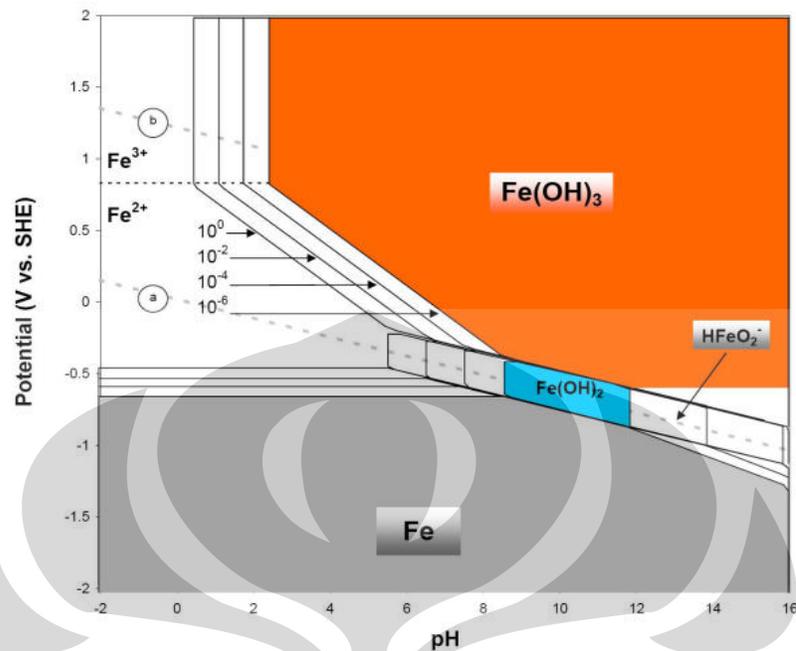
## 2.6 Proses Canai Hangat/Warm Working

*Warm Working* atau pengerjaan hangat adalah sebuah metode perlakuan pada material logam dimana pada prosesnya akhirnya dihasilkan material dengan butir yang lebih halus. Kisaran temperatur pengerjaan hangat berada pada 500°C-800°C[16] dimana pada kisaran temperatur tersebut berada antara pengerjaan hangat (*hot working*) dan pengerjaan dingin (*cold working*) sehingga proses ini dapat menghemat energi dan juga setelah terjadi deformasi pada pengerjaan hangat ini material akan mengalami pengerasan regangan (*strain hardened*) dan sebagian mengalami rekristalisasi[17]. Pada proses ini tidak lagi dibutuhkan perlakuan panas lainnya. Selain menghasilkan butir yang lebih halus, proses ini akan mengalami pembentukan sub-butir (*subgrain*) yang berukuran *micrometer* maupun *sub-micrometer* pada butir yang berukuran lebih besar atau kasar. Sebagai hasil pembentukan sub-butir ini, sifat mekanis dari material akan meningkat. 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[18].

Jika dibandingkan dengan pengerjaan panas yang membutuhkan energi panas yang besar dan mahal, proses pengerjaan hangat ini dapat menghasilkan material yang mendekati dimensi akhir yang diinginkan[16]. Selain itu, metode ini dapat menghasilkan sifat mekanis yang lebih baik dan mikrostruktur yang lebih halus. Sedangkan jika dibandingkan dengan proses pengerjaan dingin yang membutuhkan *deformation forces* dan *die-pressure* yang lebih besar dari pengerjaan hangat yang membutuhkan kedua jenis gaya tersebut lebih rendah, juga dapat diaplikasikan pada baja dengan kisaran yang lebih luas dan menghasilkan mikrostruktur dengan tegangan sisa yang lebih rendah dan proses ini menghasilkan deformasi yang lebih seragam terhadap daerah transversal.

## 2.7 Pengertian Umum Korosi

Korosi merupakan suatu proses degradasi mutu atau penurunan kualitas material sebagai akibat bereaksinya logam dengan lingkungan sekitar pada saat aplikasinya[18]. Lingkungan tersebut dapat berupa udara, uap, air, industrial atmosfir ( *steam*, *gas chlor*, amoniak, nitrat), air laut, dan lain-lain. Korosi sebagai suatu reaksi elektrokimia yang memberikan kontribusi kerusakan fisik suatu material secara signifikan sehingga perlu perhatian untuk mencegah dan meminimalisasi kerugian yang timbul akibat efek korosi. Salah satu dari reaksi yang terjadi akan menghasilkan perubahan dari suatu logam ataupun salah satu unsur yang ada dari keadaan *metallic* menjadi ke keadaan *non-metallic*. Hal itu dapat diekspresikan dalam *pourbaix diagram* yaitu diagram yang dapat menunjukkan suatu reaksi korosi dapat terjadi secara termodinamika adalah diagram kesetimbangan E-pH. Diagram ini disusun berdasarkan kesetimbangan termodinamika antara logam dengan air dan dapat menunjukkan kestabilan dari beberapa fasa secara termodinamika. Diagram ini sangat berguna untuk memprediksi suatu reaksi korosi secara termodinamika tetapi tidak dapat menyajikan informasi untuk laju korosi.



Gambar 2.9 Mengilustrasikan kesetimbangan E-pH untuk besi dan baja[19].

### 2.7.1 Korosi pada baja karbon rendah

Baja karbon merupakan material ferrous yang paling banyak digunakan untuk material keteknikan, diperkirakan digunakan hampir 85% dari produksi baja dunia setiap harinya. Walaupun terdapat keterbatasan terhadap ketahanan korosi baja karbon banyak digunakan untuk aplikasi kelautan, tenaga nuklir, transportasi, proses kimia, industri penyulingan minyak, pipa saluran, pertambangan, konstruksi dan peralatan pemrosesan logam[20].

Baja karbon secara alami memiliki keterbatasan terhadap kandungannya, umumnya kurang dari 2% dari total penambahan. Sayangnya penambahan tersebut secara umum tidak menghasilkan perubahan yang besar terhadap ketahanan korosi. Salah satu kemungkinan pengecualian pada hal tersebut yaitu *weathering steel*, dengan penambahan sedikit tembaga, krom, nikel, dan fosfor dapat mereduksi laju korosi pada lingkungan tertentu[20]. Pada baja karbon khususnya *low carbon steel* semakin meningkatnya kandungan karbon, maka kekerasan dan kekuatan akan meningkat sehingga *low carbon steel* digunakan karena memiliki sifat mekanis yang baik, mudah dibentuk atau

difabrikasi dan harga yang relatif murah. Namun baja terdiri dari beberapa fasa dan terdapat ketidakhomogenan pada permukaan sehingga dapat menyebabkan aktivitas sel elektrokimia terlokalisir pada bagian tertentu. Hal tersebut menyebabkan rendahnya ketahanan korosi dari baja karena reaksi katodik mudah terjadi sehingga menyebabkan *porous* sebagai produk korosi dan tidak terbentuk produk sampingan seperti lapisan pasif.

Reaksi dari baja karbon terhadap korosi tanah tergantung pada sifat utama tanah dan faktor lingkungan, seperti kelembaban dan oksigen. Faktor tersebut dapat mempengaruhi laju korosi. Tanah dengan kadar air tinggi, konduktivitas elektrik tinggi, tingkat keasaman tinggi, larutan garam tinggi akan menjadi lingkungan yang sangat korosif.

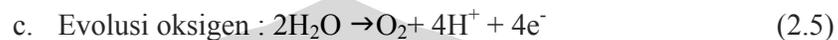
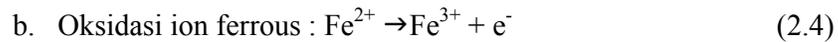
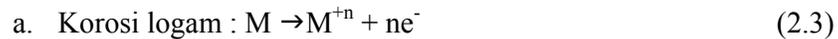
### 2.7.2 Kinetika Korosi

Pada proses korosi untuk mengetahui laju dari reaksi korosi maka perlu diperhatikan mengenai kinetika reaksi korosi. Kinetika korosi merupakan suatu yang berhubungan dengan laju korosi yang merupakan proses korosi dari suatu material. Sehingga kinetika korosi berhubungan dengan istilah anoda, katoda, polarisasi, dan *overpotensial*.

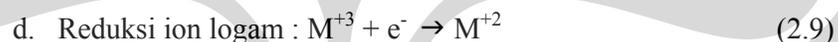
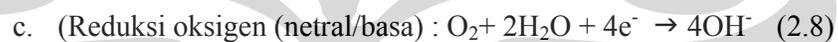
Pada mekanisme korosi tidak bisa lepas dari reaksi elektrokimia yang melibatkan proses perpindahan elektro-elektron. Perpindahan elektron merupakan hasil reaksi redoks (reduksi-oksidasi). Pada anoda terjadi reaksi oksidasi, sedangkan katoda terjadi reaksi reduksi. Mekanisme korosi melalui reaksi elektrokimia melibatkan reaksi anodik di daerah anodik. Reaksi oksidasi ditandai dengan peningkatan valensi atau produk elektron-elektron. Proses korosi dari logam M merupakan proses oksidasi logam menjadi satu ion ( $n^+$ ) dalam pelepasan  $n$  elektron. Reaksi katodik berlangsung dalam proses korosi. Reaksi katodik diindikasikan melalui penurunan nilai valensi atau konsumsi elektron-elektron yang dihasilkan dari reaksi anodik[21].

Berikut reaksi-reaksi yang terjadi pada katoda maupun anoda[22] :

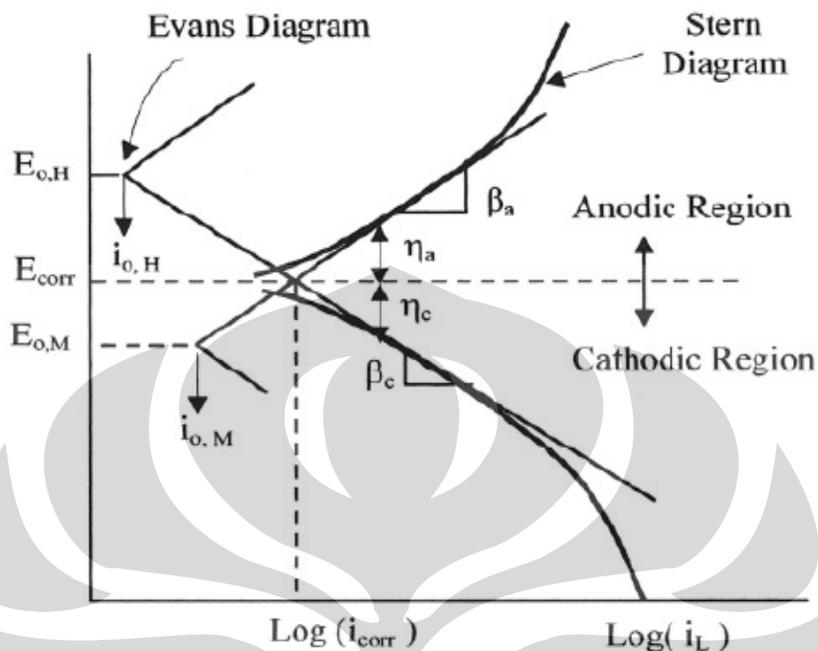
1) Reaksi anodik pada proses korosi :



2) Reaksi Katodik pada proses korosi :



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 2.10 dibawah ini menunjukkan kesetimbangan kinetika reaksi anoda dan katoda dari suatu logam.



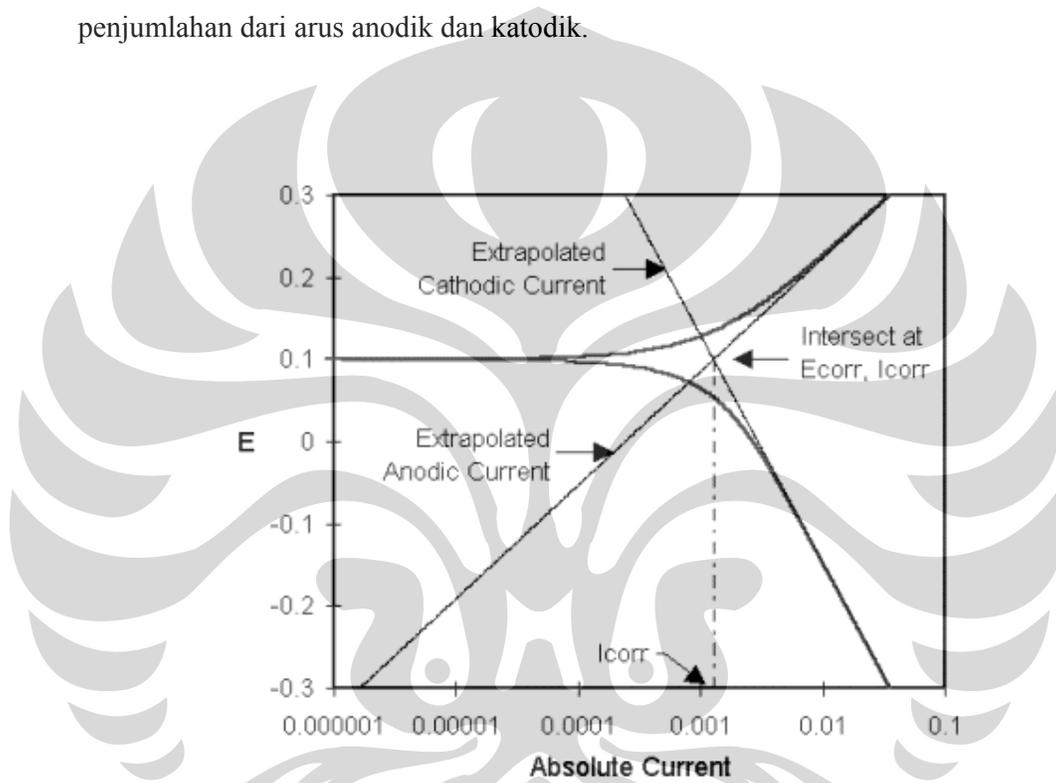
Gambar 2.10 Mengilustrasikan diagram polarisasi logam[22].

### 2.7.3 Penghitungan Laju Korosi Polarisasi

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengukur laju korosi adalah uji polarisasi. Metode polarisasi yang biasa digunakan untuk menghitung laju korosi adalah ekstrapolasi *Tafel* dan polarisasi tahanan. Laju korosi biasanya ditentukan dengan kesetimbangan antara reaksi elektrokimia yang berlawanan. Metode ini menggunakan data yang diperoleh dari pengukuran polarisasi anodik atau katodik. Reaksi anodik merupakan peristiwa logam teroksidasi dan melepaskan elektron dan reaksi katodik merupakan peristiwa dimana larutan mengalami reduksi, memindahkan elektron dari logam. Ketika kedua reaksi ini berada dalam kesetimbangan, aliran elektron dari setiap reaksi akan seimbang dan tidak ada aliran elektron terukur. Sistem kerjanya adalah sampel dijadikan elektroda kerja dan arus katodik berasal dari katoda pembantu yang terdiri dari bahan inert. Arus dinaikkan dengan menurunkan tahanan R dan diukur dengan ammeter. Potensial elektroda kerja diukur dengan membandingkan dengan

elektroda acuan yang dihubungkan dengan *potentiometer-electrometer circuit*. Prinsip dari ekstrapolasi tafel adalah memberikan simpangan potensial dengan cara menurunkan atau menaikkan tegangan dari potensial kesetimbangannya.

Pada gambar 2.11, sumbu vertikal adalah potensial dan sumbu horizontal adalah logaritma dari arus yang terbentuk. Teori mengenai arus anodik-katodik dijelaskan dengan garis lurus. Kurva garis merupakan total arus yaitu penjumlahan dari arus anodik dan katodik.



Gambar 2.11 Kurva ekstrapolasi tafel yang menunjukkan proses korosi[23].

Pada keadaan setimbang, proses reduksi dan oksidasi terjadi dengan laju yang sama sehingga jumlah arus anodik dan katodik juga sama. Pada keadaan ini rapat arus pengukuran akan sama dengan nol, dimana  $i_{\text{pengukuran}} = i_{\text{katodik}} - i_{\text{anodik}} = 0$ . potensial yang didapat pada keadaan kesetimbangan ini dinamakan potensial korosi,  $E_{\text{korosi}}$ .

Berikut merupakan persamaan tafel yang digunakan pada percobaan *polarization resistance*[24] :

$$I_{corr} = (1/R_p) \beta_a \beta_c / (2.303 (\beta_a + \beta_c)) \dots\dots\dots(2.11)$$

Dimana :  $I_{corr}$  = arus korosi (A)  
 $R_p$  = *polarization resistance*  
 $\beta_a$  = *anodic Beta Tafel Constant in volts/decade*  
 $\beta_c$  = *cathodic Beta Tafel Constant in volts/decade*

Dari rumus diatas, kemudian data dihitung kembali menggunakan persamaan dibawah ini untuk mengetahui laju korosi[23]:

$$CR = I_{corr} K EW / D A \dots\dots\dots(2.12)$$

Dimana :  $CR$  = laju korosi (mpy)  
 $K$  = konstanta, menjelaskan unit laju korosi  
 $EW$  = berat ekivalen (gram/equivalent)  
 $D$  = berat jenis (gram/cm<sup>3</sup>)  
 $A$  = luas permukaan (cm<sup>2</sup>)

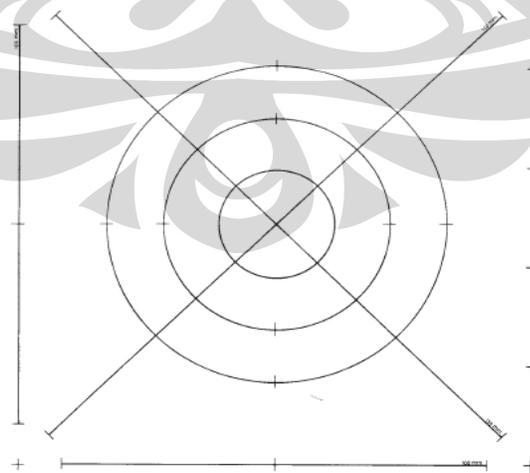
Hasil perhitungan laju korosi dapat dibandingkan dengan tabel 2 untuk mengetahui sifat ketahanan korosi dari meterial.

Tabel 2.3 Klasifikasi sifat ketahanan korosi material [22].

Ketahanan Korosi Relatif	Mpy
<i>Outstanding</i>	< 1
<i>Excellent</i>	1-5
<i>Good</i>	5-20
<i>Fair</i>	20-50
Poor	50-200
Unacceptable	200+

### 2.8 Penghitungan Butir

Pengujian dan perhitungan besar butir dilakukan dengan menggunakan standar ASTM E112[31]. Terdapat berbagai metode perhitungan besar butir yang ada dalam ASTM E112, namun yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah metode Heyn. Prinsip perhitungan besar butir metode Heyn yaitu dengan membuat 3 lingkaran masing-masing memiliki diameter sebesar 79.58 mm, 53.05 mm, 26,53 mm dimana ketiga lingkaran tersebut digabung menjadi satu dengan panjang total ketiga garis lingkaran tersebut 500 mm. Kemudian perpotongan garis ketiga lingkaran dengan batas butir antara satu butir dijumlahkan dengan mengabaikan butir *twins*.



Gambar 2.12 Lingkaran yang digunakan untuk penghitungan butir dengan metode *Intercept Heyn* [31]

Universitas Indonesia

Setelah metode etsa dapat menampilkan batas butir Austenit, maka besar butir dihitung dengan menggunakan metode *intercept*, sesuai dengan standar perhitungan metalografi kuantitatif ASTM E112. Jumlah titik potong persatuan panjang ( $P_L$ ) dihitung dengan  $P_L = P / L_T/M$ , dan panjang garis perpotongan ( $L_3$ ) adalah  $L_3 = 1/P_L$ .

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

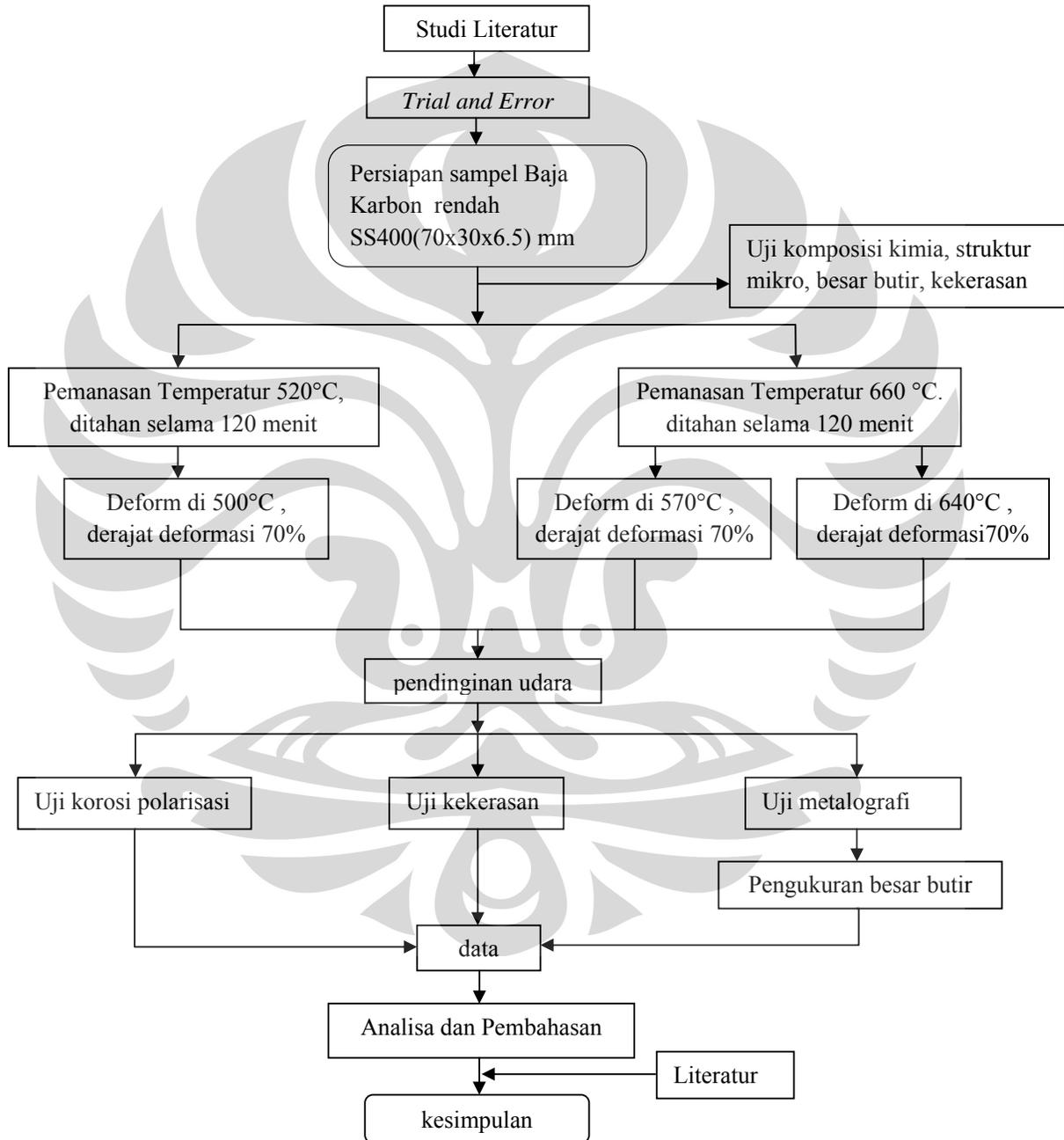
Dari  $P_L$  atau  $L_3$ , dapat dilihat di tabel besar butir ASTM E 112, atau dimasukkan ke dalam rumus  $G = [-6,6439 \log (L_3) - 3,2877]$ .

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



**BAB 3**  
**METODOLOGI PENELITIAN**

**3.1 Diagram Alir Penelitian**



**Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian**

## 3.2 Alat dan Bahan

### 3.2.1 Alat

1. Mesin Roll dengan kapasitas beban 20 ton
2. Dapur Pemanas *Carbolite*
3. Termokopel
4. Thermowire
5. Mesin Komputer Pengukur Temperatur
6. Jangka Sorong
7. Mesin Ampelas
8. Mesin Poles
9. Mikroskop Optik
10. Lain-lain : Gergaji, Kantong Plastik, label, spidol, tang penjepit, palu, penggaris, sarung tangan

### 3.2.2 Bahan

1. Baja Karbon Rendah SS400
2. Resin dan Hardener
3. Kertas Ampelas Grid #80, #120, #240, #400, #600, #800, #1000, #1200, dan #1500
4. Titanium Dioksida ( $\text{TiO}_2$ )
5. Kain Beludru
6. Zat Etsa Kimia : Larutan Alkohol 96% dan larutan  $\text{HNO}_3$
- 7.

## 3.3 Prosedur Penelitian

### 3.3.1 Pemilihan Material

Material yang digunakan sebagai sampel ialah material baja karbon rendah SS400 yang didapat dari PT. Bakrie Pipe, dimana komposisi materialnya JIS G 3101 SS 400 yang merupakan jenis baja karbon rendah. Dengan komposisi pada tabel 3.1:

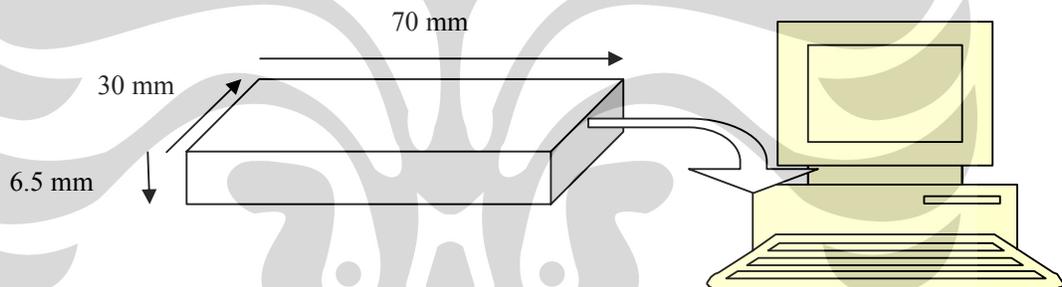
Universitas Indonesia

Tabel 3.1 Komposisi kimia sampel

Komposisi	Fe	C	Cu	Nb	P	S	Cr	Mn	Si
% Berat	98.913	0.120	0.019	< 0.002	0.008	< 0.003	0.003	0.636	0.198

### 3.3.2 Preparasi Sampel

Sampel yang digunakan dalam penelitian ini ialah hasil preparasi baja slab yang dipotong-potong menjadi balok dengan ukuran 70 x 30 x 6.5 (mm). Sampel yang telah dipotong kemudian dilubangi pada salah satu bagiannya untuk meletakkan kawat termokopel yang berguna untuk menunjukkan temperatur pada sampel. Ukuran kedalaman lubang dan diameter lubang yang dibuat ialah 5 mm dan 2.5 mm. Pengukuran temperatur menggunakan data *acquisition system* yang dihubungkan dengan komputer.



Gambar 3.2 Mengilustrasikan sampel dan pemasangan termokopel ke komputer untuk melihat data temperatur actual dari sampel



Gambar 3.3 Menggambarkan bentuk sampel sebelum proses *reheating* dan canai

### 3.3.3 Proses Termomekanikal dan *Warm Working*

Penelitian ini dilakukan mengikuti langkah prosedur penelitian secara berurutan. Sampel dilakukan pemanasan ulang kemudian dideformasi sesuai temperatur masing-masing pengujian dimana waktu tahan sekitar 120 menit dan derajat deformasi sebesar 70% dimana arah canai searah tunggal, kemudian didinginkan hingga temperatur ruang dengan pendinginan udara. Untuk proses pemanasan dilakukan menggunakan dapur *Carbolite* adapun siklus pemanasan yang dialami oleh sampel adalah sebagai berikut:



Gambar 3.4 Dapur *Carbolite*

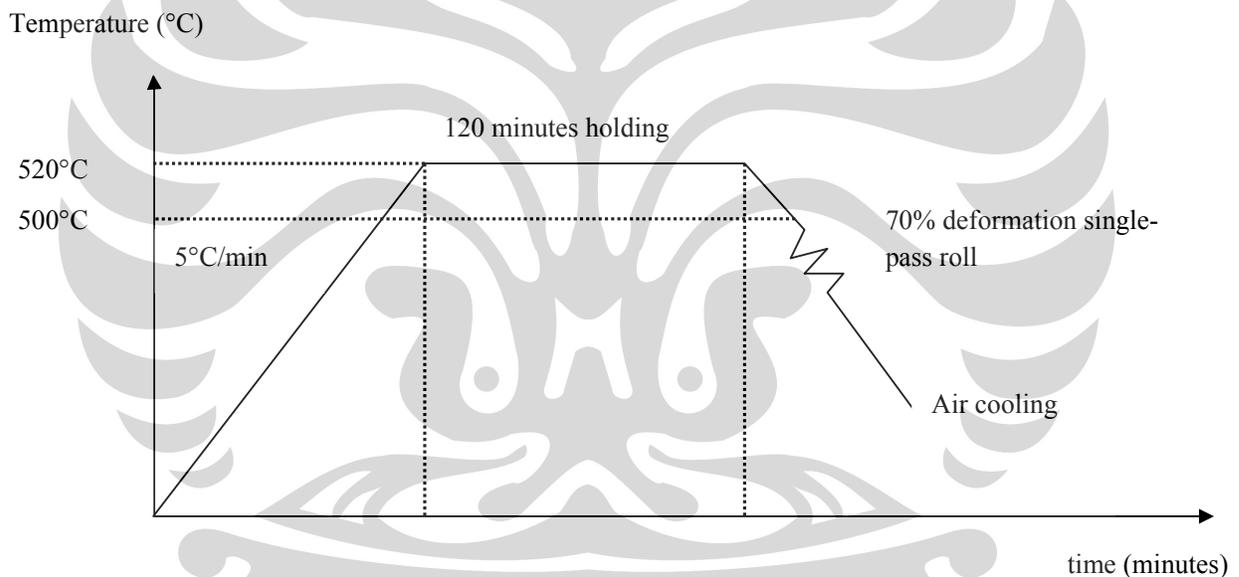
Untuk sampel yang melalui proses canai panas, sampel kemudian akan di deformasi dengan menggunakan mesin *OnoRoll* berkapasitas 20 ton.



Gambar 3.5 Mesin canai *OnoRoll*

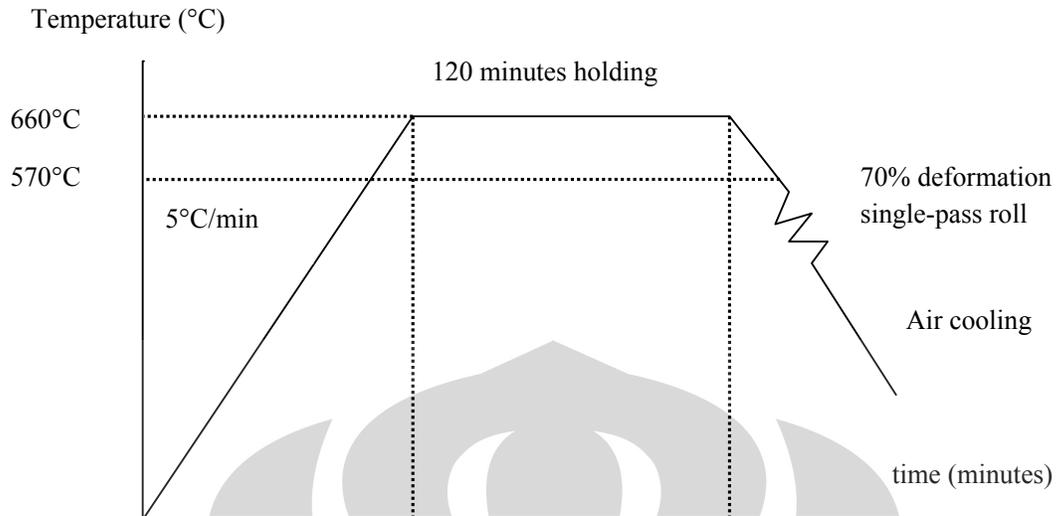
Berikut beberapa variasi proses dalam penelitian ini:

1. Sampel A adalah sampel awal yang tidak mengalami perlakuan panas, yang diidentifikasi struktur mikronya, kekerasannya, dan ketahanan korosinya sebagai pembanding untuk sampel-sampel berikutnya yaitu sampel A<sub>0</sub> untuk kondisi temperatur 25°C, Sampel A<sub>1</sub> untuk kondisi pemanasan ulang 520°C, dan sampel A<sub>2</sub> untuk kondisi pemanasan 660°C.
2. Sampel B dipanaskan dengan temperatur *reheating* 5°C/menit hingga temperatur 520°C kemudian ditahan selama 120 menit kemudian pada temperatur 480°C sampel dicanai dengan derajat deformasi sebesar 70%, kemudian sampel didinginkan sampai temperatur ruang.



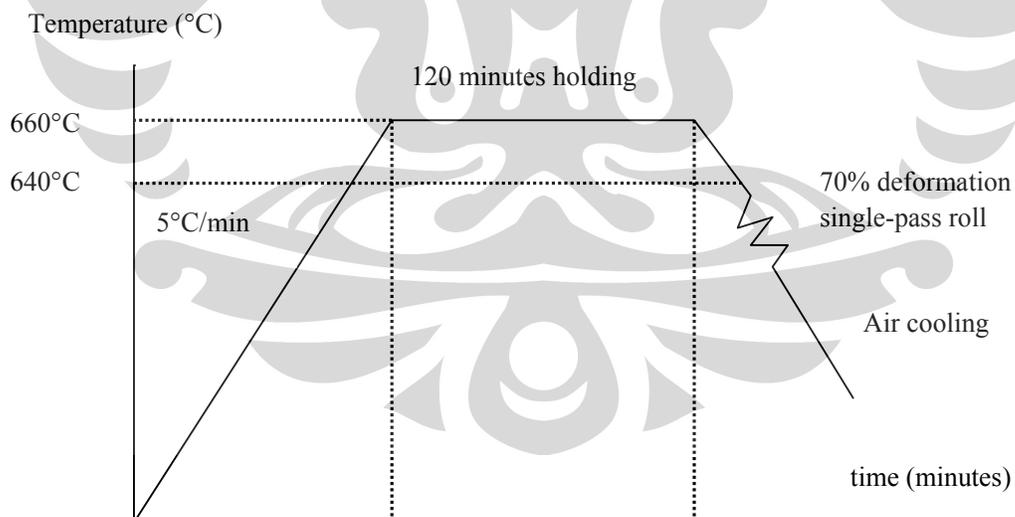
**Gambar 3.6** Menggambarkan alur perlakuan proses pada sampel B

3. Sampel C dipanaskan dengan laju temperatur *reheating* sebesar 5°C/menit hingga temperatur 660°C kemudian ditahan selama 120 menit kemudian pada temperatur 570°C sampel dicanai searah tunggal (*single-pass roll*) dengan derajat deformasi sebesar 70%.



**Gambar 3.7** Menggambarkan alur perlakuan proses pada sampel C

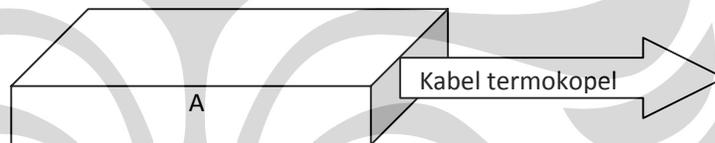
4. Sampel D dipanaskan dengan laju temperatur *reheating* 5°C/menit hingga temperatur 660°C kemudian ditahan selama 120 menit kemudian pada temperatur 640°C sampel dicanai searah tunggal (*single-pass roll*) dengan derajat deformasi sebesar 70%.



**Gambar 3.8** Menggambarkan alur perlakuan proses pada sampel D

### 3.3.4 Pengujian Struktur Mikro

Tahapan awal yang dilakukan untuk melakukan pengujian struktur mikro adalah preparasi metalografi. Preparasi metalografi yang dilakukan menggunakan standar ASTM E3 meliputi tahapan pemotongan sampel, *mounting*, pengamplasan, pemolesan, etsa, hingga pengambilan foto mikro menggunakan mikroskop optik. Untuk mempermudah pencitraan maka benda uji dipotong bagian sampingnya yang dekat dengan bagian termokopel menjadi bagian kecil lalu di *mounting* dengan *resin* dan *hardener* agar mempermudah pada saat pengampelasan dan proses poles. Bagian yang ingin dilihat ada pada arah menyamping dari benda uji seperti terlihat pada gambar 3.9 dimana arah A yang akan dilihat mikrostruktur butirnya.



**Gambar 3.9** Menggambarkan Arah pemotongan sampel untuk melihat struktur mikro semua sampel baja karbon SS400

Pengampelasan dilakukan dengan menggunakan grit ampelas mulai dari yang kasar hingga halus yaitu dari grit #80, #120, #240, #400, #600, #800, #1000, #1200, #1500 (dalam mesh). Proses pengamplasan dilakukan dengan merubah arah pengamplasan setiap pergantian tingkat kekasaran kertas ampelas, sehingga bisa dipastikan sisa pengamplasan sebelumnya telah hilang dan didapat permukaan yang halus dari benda uji, proses penekanan juga berpengaruh dalam proses pengampelasan agar tidak timbul bidang pada benda uji.

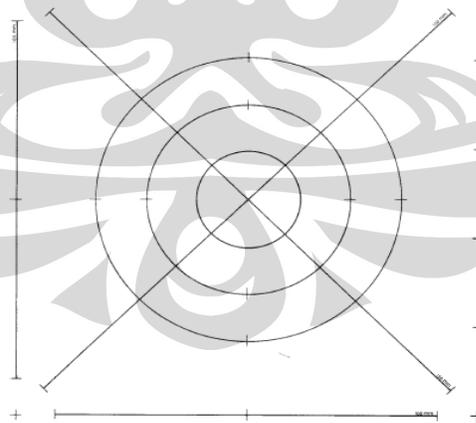
Setelah selesai sampel dipoles agar mendapatkan permukaan yang lebih halus dan mengkilap serta menghilangkan bekas goresan akibat pengamplasan. Sampel dipoles dengan menggunakan kain beludru dan zat polesnya menggunakan titanium dioksida ( $\text{TiO}_2$ ) yang dicairkan dengan aquades. Sehingga menghasilkan permukaan sampel yang rata, tanpa goresan dan mengkilap.

kemudian sampel dilakukan pencucian dengan air dan sabun, lalu dikeringkan dengan *dryer*.

Tahapan selanjutnya yaitu proses etsa. Proses etsa ini bertujuan untuk memperlihatkan butir ataupun batas butir dimana proses ini yaitu proses korosi terkendali yang akan menyerang batas butir sehingga akan dihasilkan foto yang tampak jelas batas butirnya. Dalam penelitian ini digunakan proses etsa kimia dengan nital 3%. Selanjutnya dikeringkan dan difoto melalui mikroskop *digital*.

### 3.3.5 Pengujian Besar Butir

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



Gambar 3.10 Lingkaran yang digunakan untuk penghitungan butir dengan metode *Intercept Heyn* [31]

Setelah metode etsa dapat menampilkan batas butir Austenit, maka besar butir dihitung dengan menggunakan metode *intercept*, sesuai dengan standar perhitungan metalografi kuantitatif ASTM E112. Jumlah titik potong persatuan panjang ( $P_L$ ) dihitung dengan  $P_L = P / L_T/M$ , dan panjang garis perpotongan ( $L_3$ ) adalah  $L_3 = 1/P_L$ .

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

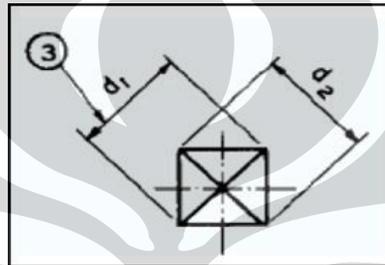
Dari  $P_L$  atau  $L_3$ , dapat dilihat di tabel besar butir ASTM E 112, atau dimasukkan ke dalam rumus  $G = [-6,6439 \log(L_3) - 3,2877]$ .

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

### 3.3.6 Pengujian Kekerasan

Kekerasan didefinisikan sebagai kemampuan suatu material untuk menahan beban indentasi atau penetrasi (penekanan). Umumnya pengujian kekerasan menggunakan tiga macam metode pengujian kekerasan, yakni: (a) Brinell (HB/BHN); (b) Rockwell (HR/RHN); (c) Vickers (HV/VHN). 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 indenter intan berbentuk piramida dengan kemiringan sekitar  $136^\circ$ . Jejak indentasi yang terdapat pada sampel akan berbentuk segi empat atau belah ketupat yang dapat dihitung panjang diagonal-

diagonalnya (lihat Gambar 3.11). Panjang diagonal jejak yang dihasilkan selama proses penjejakan dapat dihitung dengan menggunakan skala penghitung yang terdapat pada mikroskop mesin uji kekerasan Vickers. Setelah panjang diagonal-diagonalnya diketahui maka nilai kekerasan dari sampel dapat diketahui dengan menggunakan rumus kekerasan Vickers. Hasil kekerasan Vickers yang didapat kemudian dikonversikan ke nilai kekerasan Brinell dengan menggunakan tabel konversi pada ASTM E140.



Gambar 3.11 Mengilustrasikan jejak yang dihasilkan selama penjejakan[32]

Rumus kekerasan Vickers[32]:

$$VHN = \frac{2P \sin(\alpha/2)}{d^2} = \frac{1.854P}{d^2} \dots\dots\dots [3.1]$$

VHN = satuan kekerasan Vickers      $\alpha$  = sudut piramida (136°)

P = beban (kgf)     d = panjang diagonal penjejakan (mm)

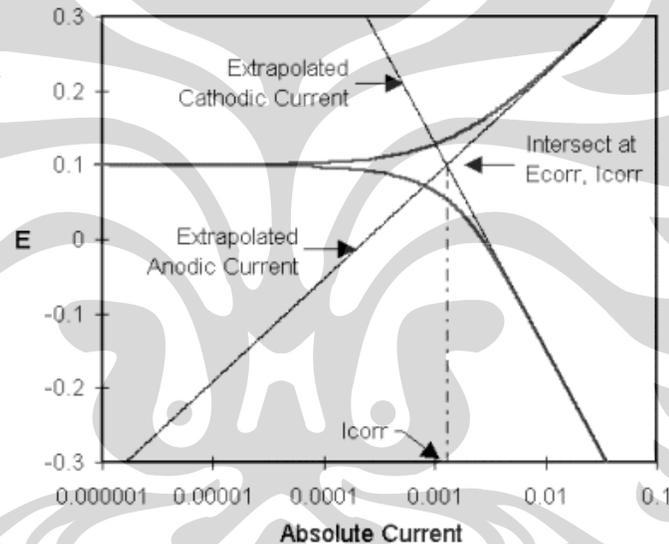
### 3.3.7 Pengujian Ketahanan Korosi Polarisasi

Pada lingkungan laut dengan kadar garam hingga 3,5% atau lingkungan dengan mempunyai kadar ion klorida yang cukup tinggi, baja karbon rendah mengalami kegagalan material akibat korosi yang menyeluruh ke seluruh permukaan logam tergantung dari konsentrasi elektrolit di lingkungan. Salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengukur laju korosi adalah uji polarisasi.

Universitas Indonesia

Metode polarisasi yang biasa digunakan untuk menghitung laju korosi adalah ekstrapolasi tafel dan polarisasi tahanan. Laju korosi biasanya ditentukan dengan kesetimbangan antara reaksi elektrokimia yang berlawanan.

Prinsip dari ekstrapolasi tafel adalah memberikan simpangan potensial dengan cara menurunkan atau menaikkan tegangan dari potensial kesetimbangannya. Pada gambar 3.12, sumbu vertikal adalah potensial dan sumbu horizontal adalah logaritma dari arus yang terbentuk. Teori mengenai arus anodik-katodik dijelaskan dengan garis lurus. Kurva garis merupakan total arus yaitu penjumlahan dari arus anodik dan katodik.



**Gambar 3.12 Kurva ekstrapolasi tafel yang menunjukkan proses korosi[23].**

Pada keadaan setimbang, proses reduksi dan oksidasi terjadi dengan laju yang sama sehingga jumlah arus anodik dan katodik juga sama. Pada keadaan ini rapat arus pengukuran akan sama dengan nol, dimana  $i_{\text{pengukuran}} = i_{\text{katodik}} - i_{\text{anodik}} = 0$ . potensial yang didapat pada keadaan kesetimbangan ini dinamakan potensial korosi,  $E_{\text{korosi}}$ .

Berikut merupakan persamaan tafel yang digunakan pada percobaan *polarization resistance*[24] :

$$I_{corr} = (1/R_p) \beta_a \beta_c / (2.303 (\beta_a + \beta_c)) \dots\dots\dots(3.2)$$

Dimana :  $I_{corr}$  = arus korosi (A)  
 $R_p$  = polarization resistance  
 $\beta_a$  = anodic Beta Tafel Constant in volts/decade  
 $\beta_c$  = cathodic Beta Tafel Constant in volts/decade

Dari rumus diatas, kemudian data dihitung kembali menggunakan persamaan dibawah ini untuk mengetahui laju korosi[23]:

$$CR = I_{corr} K EW / D A \dots\dots\dots(3.3)$$

Dimana :  $CR$  = laju korosi (corrosion rate)  
 $K$  = konstanta, menjelaskan unit laju korosi  
 $EW$  = berat ekivalen (gram/equivalent)  
 $D$  = berat jenis (gram/cm<sup>3</sup>)  
 $A$  = luas permukaan (cm<sup>2</sup>)

## BAB 4

### HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Hasil Pengujian

Pada penelitian kali ini baja karbon rendah SS400 digunakan sebagai sampel. Sampel dilakukan pemanasan ulang dengan temperatur yang berbeda dengan waktu tahan selama 120 menit dan deformasi searah tunggal sebesar 70%. Kemudian setelah itu benda uji dilakukan pengujian korosi. Hasil penelitian yang diperoleh berupa struktur mikro dan ukuran butir ferit yang dinyatakan dalam diameter butir tersebut. Selain itu juga dihasilkan data hasil laju korosi dalam mpy.

#### 4.2 Hasil Pengukuran Ketebalan Sampel

Deformasi yang akan terjadi pada sampel terlebih dahulu dihitung melalui persamaan sebagai berikut :

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

Dimana: % Deformation = Besar prosentase perubahan ketebalan  
 $H_0$  = Ketebalan Awal (mm)  
 $H_f$  = Ketebalan Akhir (mm)

Setelah sampel mengalami setiap proses deformasi pada variasi temperatur hangat, pengukuran dilakukan terhadap ketebalan awal dan akhir masing-masing sampel. Pengukuran dimensi menggunakan jangka sorong.

**Tabel 4.1 Hasil pengukuran dimensi awal sebelum deformasi dan akhir setelah deformasi pada sampel Baja SS400 dengan waktu tahan 120 menit.**

No.	Sampel	Temperatur Akhir Canai	Deformasi Teoritis	Tebal awal (mm)	Tebal akhir (mm)	Deformasi aktual
1	B	500°C	70%	6.25	4.3	30.32%
				6.3	4.45	
				6.25	4.35	
2	C	570°C	70%	6.25	4.35	29.86%
				6.25	4.5	
				6.25	4.3	
3	D	640°C	70%	6.25	4.35	29.36%
				6.35	4.45	
				6.3	4.55	

Dari data tabel 4.1 digambarkan bagaimana terjadinya perbedaan antara derajat deformasi secara teori dengan derajat deformasi aktual. Hal tersebut dapat disebabkan karena pada saat terjadi proses deformasi canai, sampel mengalami deformasi yang tidak seragam pada semua sisinya sehingga terjadi deformasi aktual yang cukup jauh dari deformasi yang semula dibuat secara teori berdasarkan persamaan 4.1. Selain itu hal tersebut dapat dipengaruhi oleh waktu tahan yang cukup lama yaitu sekitar 120 menit dan waktu pemanasan yang cukup lama dimana laju pemanasan yang dipakai yaitu sekitar 5°C/menit.

#### 4.3 Hasil Penghitungan Diameter Butir

Ukuran diameter butir ferit akan berubah setelah dilakukan pemanasan. Hal ini ditunjukkan oleh hasil perhitungan butir ferit dengan metoda *Intercept Heyn* sesuai dengan ASTM E-112[31] dan contoh perhitungannya dapat dilihat pada lampiran. Perhitungan butir dilakukan sebanyak 3 kali perhitungan. Untuk setiap sampel setelah dilakukan 3 kali perhitungan maka dapat diperoleh diameter butir rata-rata. Berikut besar butir sampel awal yang tidak dipanaskan ataupun dideformasi pada tabel 4.2.

**Tabel 4.2 Hasil Pengukuran diameter butir pada sampel baja SS400 yang tidak mengalami Pemanasan ulang dan deformasi.**

No	Sampel	G No. (ASTM E112)	Perbesaran (kali)	Diameter butir ( $\mu\text{m}$ )	Standar Deviasi	Diameter butir rata-rata ( $\mu\text{m}$ )
A <sub>0</sub>	Bulk 0°C non-deform	8.52	500	18.78	1.33	19.39 ± 1.33
		8.57	500	18.48		
		8.22	500	20.92		

Selanjutnya dua sampel baja SS400 yang mengalami pemanasan ulang hingga 520°C dan 660°C. Setelah mengalami pemanasan ulang ukuran butir ferit sampel baja SS400 menunjukkan reduksi ukuran butirnya. Berikut ukuran butir ferit pada sampel yang mengalami pemanasan ulang (*reheat*) dan didinginkan dengan udara tanpa mengalami proses deformasi dapat dilihat pada tabel 4.3 berikut ini.

**Tabel 4.3 Hasil pengukuran diameter butir ferit baja karbon rendah SS400 tanpa deformasi dengan waktu tahan 120 menit.**

No.	Kondisi Proses		Ukuran Butir Ferit			
	Temperatur <i>Reheating</i> (°C)	Temperatur Deformasi (°C)	G No. (ASTM E112)	Diameter Butir ( $\mu\text{m}$ )	Standar Deviasi	Diameter Rata-rata Butir ( $\mu\text{m}$ )
A1	520	-	10.58	9.16	0.39	8.59 ± 0.39
			10.79	8.5		
			10.57	9.19		
A2	660	-	10.27	10.23	0.27	10.16 ± 0.27
			10.22	10.41		
			10.37	9.87		

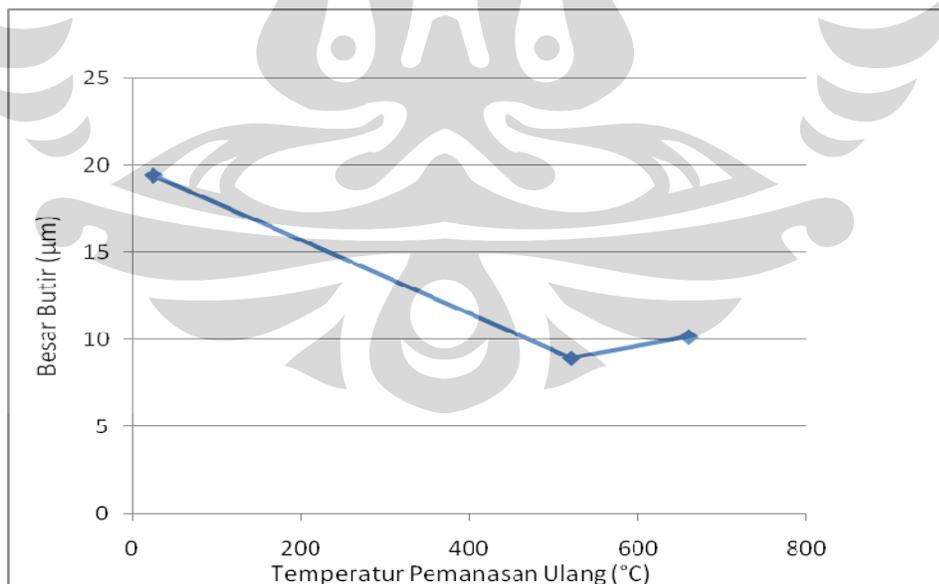
Sedangkan hasil perhitungan butir ferit untuk sampel yang mengalami pemanasan ulang (*reheat*) dan dideformasi kemudian didinginkan dengan udara. Setelah sampel mengalami deformasi menunjukkan adanya perubahan ukuran butir ferit dimana terjadi reduksi ukuran butir ferit yang diperlihatkan pada tabel 4.4 berikut.

**Tabel 4.4 Hasil pengukuran diameter butir ferit dengan deformasi 70% pada variasi temperatur canai hangat dengan waktu tahan 120 menit.**

No.	Kondisi Proses		Ukuran Butir Ferit			
	Temperatur Reheating (°C)	Temperatur Deformasi (°C)	G No. (ASTM E112)	Diameter Butir ( $\mu\text{m}$ )	Standar Deviasi	Diameter Rata-rata Butir ( $\mu\text{m}$ )
B	520	500	11.59	6.50	0.34	6.54 $\pm$ 0.34
			11.72	6.22		
			11.42	6.89		
C	660	570	11.13	7.59	0.32	7.29 $\pm$ 0.32
			11.39	6.96		
			11.24	7.32		
D	660	640	11.13	7.58	0.82	8.13 $\pm$ 0.82
			11.09	7.73		
			10.61	9.07		

Dari hasil penelitian diatas dapat dibuat suatu hubungan antara ukuran butir ferit sebelum dan sesudah mengalami deformasi yang digambarkan oleh sebuah grafik yang dapat dilihat pada gambar 4.1 dan gambar 4.2 berikut.

#### 4.3.1 Hubungan antara temperatur *reheating* dengan diameter butir ferit



**Gambar 4.1 Menggambarkan hubungan antara temperatur pemanasan ulang dengan diameter butir ferit baja karbon rendah SS400 ( $\mu\text{m}$ ).**

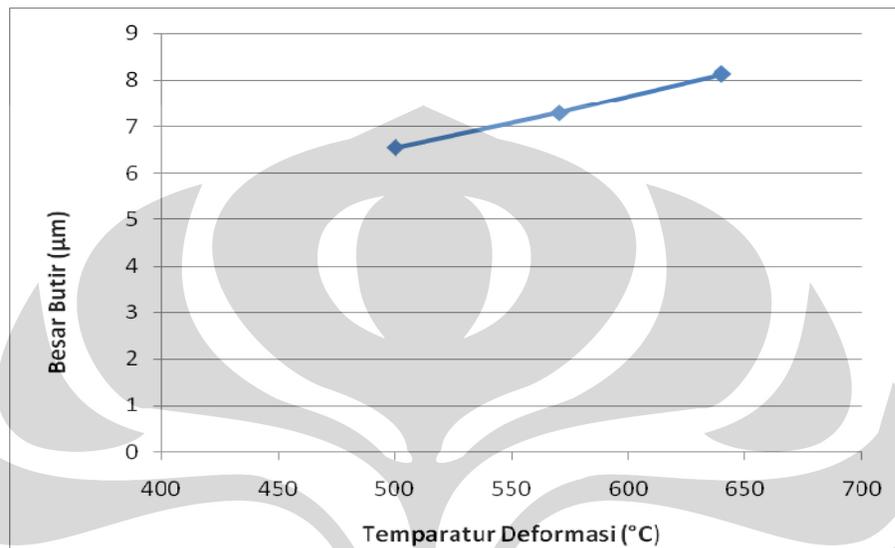
Pada proses pemanasan ulang dengan waktu tahan sekitar 120 menit dan laju kenaikan temperatur pemanasan ulang sebesar  $5^{\circ}\text{C}/\text{detik}$  akan membuat setiap morfologi struktur mikro ferit dari setiap temperatur akan berbeda. Pada penelitian ini dibuat tiga perbandingan antara setiap perlakuan dimana dua perlakuan memiliki temperatur pemanasan ulang yang berbeda dan satu sampel tidak mengalami pemanasan ulang. Sampel yang tidak mengalami deformasi dan pemanasan ulang memiliki besar butir  $19.39 \pm 1.33 \mu\text{m}$ , namun setelah dilakukan pemanasan ulang terhadap dua sampel berikutnya terjadi perubahan morfologi butir ferit dimana butir ferit menjadi halus. Pada pemanasan ulang temperatur  $520^{\circ}\text{C}$  didapatkan butir ferit dengan ukuran  $8.95 \pm 0.39 \mu\text{m}$  dan pada temperatur  $660^{\circ}\text{C}$  butir ferit yang didapatkan sekitar  $10.16 \pm 0.27 \mu\text{m}$ .

Dari perbandingan antara sampel yang berada pada temperatur ruang dan temperatur  $520^{\circ}\text{C}$  terjadi penghalusan ukuran butir ferit, hal ini disebabkan karena terjadinya proses rekristalisasi butir ferit pada temperatur yang lebih rendah yaitu  $520^{\circ}\text{C}$  sehingga terjadi reduksi ukuran butir ferit[25]. Dari pemanasan ulang temperatur  $520^{\circ}\text{C}$  didapatkan butir ferit yang lebih kecil dibandingkan pada temperatur  $660^{\circ}\text{C}$  butir karena dengan adanya peningkatan temperatur pemanasan maka ukuran butir akan semakin besar[26]. 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[4].

#### **4.3.2 Hubungan antara temperatur deformasi dengan diameter butir ferit**

Dari pengujian besar butir ferit yang dilakukan pada ketiga sampel yang telah mengalami deformasi dengan temperatur yang berbeda. Hasil yang ditunjukkan adalah sebagai berikut; temperatur deformasi  $500^{\circ}\text{C}$  dengan temperatur *reheating*  $520^{\circ}\text{C}$  menghasilkan ukuran butir ferit dengan ukuran  $6.54 \pm 0.34 \mu\text{m}$ , temperatur deformasi  $570^{\circ}\text{C}$  dengan temperatur *reheating*  $660^{\circ}\text{C}$  menghasilkan ukuran butir ferit dengan ukuran  $7.29 \pm 0.32 \mu\text{m}$ , temperatur

deformasi 640°C dengan temperatur *reheating* 660°C menghasilkan ukuran butir ferit dengan ukuran  $8.13 \pm 0.82 \mu\text{m}$ .



**Gambar 4.2** Menggambarkan hubungan antara temperatur deformasi canai hangat dengan diameter butir ferit baja karbon rendah SS400 ( $\mu\text{m}$ ).

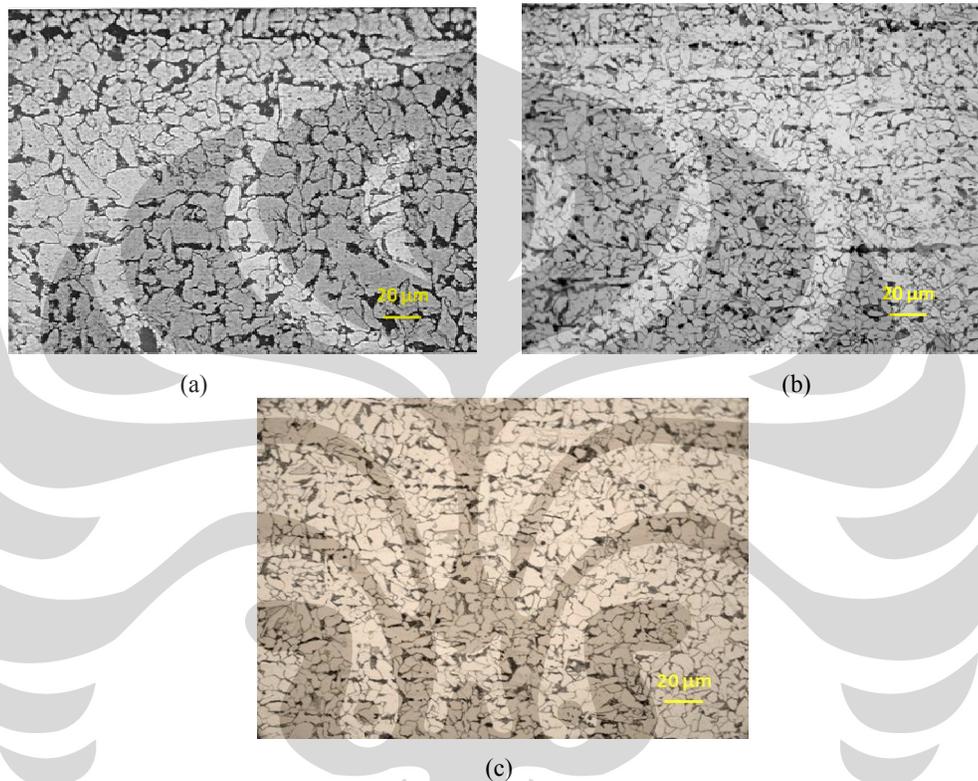
Dari ketiga sampel tersebut didapatkan bahwa seiring meningkatnya temperatur dan waktu akan membuat butir semakin besar karena mengalami proses rekristalisasi dan pertumbuhan butir[4]. Semakin tinggi temperatur pemanasan ulang dan waktu tahan akan menyebabkan butir semakin besar karena adanya waktu untuk butir mengalami rekristalisasi dan tumbuh, mikrostrukturnya akan lebih homogen dan penghalusan butir hampir dapat dipertahankan walaupun ukuran butir ferit semakin membesar, sebaliknya waktu yang sedikit menyebabkan nukleasi dan pertumbuhan butir tidak akan terjadi[27].

#### 4.4 Pengamatan Metalografi

Pengujian metalografi dilakukan terhadap sampel baik sebelum dan sesudah deformasi. Dalam penelitian ini akan diamati butir ferit dan

memunculkan fasa ferit dengan menggunakan etsa nital 3% dimana sampel dicelupkan selama 3-5 detik, kemudian dibersihkan dengan air dan alkohol.

#### 4.4.1 Pengaruh temperatur *Reheating* terhadap struktur mikro



**Gambar 4.3** Menggambarkan struktur mikro sampel awal baja karbon rendah SS400 dengan waktu tahanan dan di etsa dengan nital 3% (a) sampel yang tidak mengalami pemanasan ulang dan tanpa deformasi (500X), (b) sampel yang mengalami pemanasan ulang sebesar 520°C tanpa deformasi (500X), (c) sampel yang mengalami pemanasan ulang sebesar 660°C tanpa deformasi (500X).

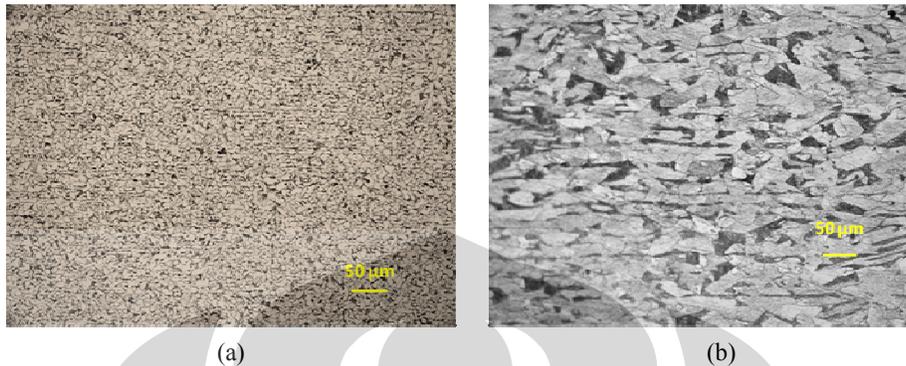
Struktur mikro suatu material sangat mempengaruhi sifat material tersebut. Dalam suatu struktur mikro material ada fasa yang terbentuk. Pada baja karbon rendah fasa yang biasanya terbentuk yaitu fasa ferit ( $\alpha$ ) dan fasa perlit. Selain itu bentuk dan ukuran butir juga mempengaruhi sifat mekanis dari material. Perubahan bentuk dan ukuran butir dapat dilakukan dengan berbagai cara, salah

satunya adalah melalui proses perlakuan pengerjaan panas (*warm-working*). Hasil penelitian dari pengujian struktur mikro yang meliputi perubahan bentuk dan ukuran butir setelah proses anil rekristalisasi dapat dilihat secara lengkap pada pembahasan berikut.

Pada gambar 4.3(a) mengilustrasikan struktur mikro dari baja karbon rendah yang tidak mengalami pemanasan ulang (*reheating*) dan deformasi, terlihat bentuk butir yang cukup besar dan bulat karena menggunakan perbesaran 500X pada mikroskop optik. Dari gambar tersebut butir yang besar memiliki kekuatan yang lebih rendah dibandingkan dengan butir yang lebih kecil.

Struktur mikro dari sampel yang mengalami perlakuan menunjukkan perbedaan ukuran butir yang dapat dilihat pada gambar 4.3(b) dan gambar 4.3(c) karena perbesaran yang digunakan pada mikroskop optik sebesar 500X. Pada gambar 4.3(b) menunjukkan sampel baja karbon rendah yang dipanasi ulang pada temperatur 520°C dimana struktur mikro fasa ferit memiliki ukuran yang kecil dan bentuk bulat cukup seragam walaupun ada sebagian bentuk butirnya yang besar. Hal tersebut dikarenakan setelah proses rekristalisasi ada beberapa butir yang mengalami pertumbuhan butir dikarenakan waktu tahan yang cukup lama selama proses pendinginan udara[26]. Pada gambar 4.3(c) menunjukkan sampel yang mengalami perlakuan pemanasan ulang hingga temperatur 660°C dimana struktur mikro fasa ferit memiliki ukuran yang lebih besar dibandingkan dengan sampel pada gambar 4.3(b) walaupun tidaklah terlalu signifikan perubahan ukuran yang terjadi. Pada gambar 4.3(c) terlihat struktur mikro fasa ferit yang memiliki bentuk bulat dan besar yang hampir seluruhnya seragam walaupun ada sedikit butir yang berukuran kecil. Hal ini disebabkan karena waktu tahan yang lama sehingga terjadi proses pertumbuhan butir-butir baru yang kecil pada butirnya dan butir-butir baru tersebut menjadi besar seiring waktu tahan yang lama dan temperatur yang tinggi dibandingkan perlakuan pada gambar 4.3(b). Hal ini dikarenakan energi yang semakin besar dan waktu yang cukup lama yang menyebabkan pertumbuhan butir pada butir-butir kecil yang baru muncul pada batas butir akibat proses pengintian[28].

#### 4.4.2 Pengaruh waktu tahan terhadap diameter akhir butir



Gambar 4.5 Menggambarkan perbandingan waktu tahan terhadap morfologi butir ferit baja karbon rendah SS400 yang di-tsa dengan nital 3%, (a) sampel yang dilakukan pemanasan ulang pada temperatur 660°C dengan waktu tahan 120 menit dan dideformasi pada temperatur 640°C(200X), (b) sampel yang dilakukan penahanan pada temperatur 650°C selama 300 menit dan dideformasi pada 600°C(200X).

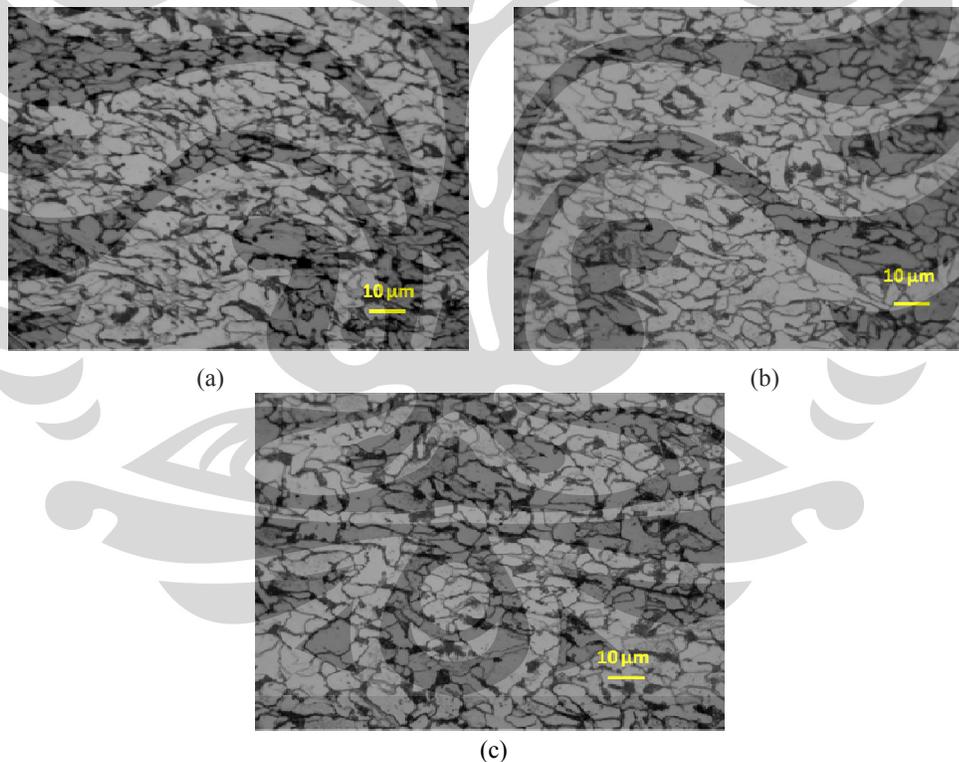
Dari gambar 4.5 didapatkan perbandingan struktur mikro butir ferit dengan waktu penahanannya antara waktu penahanan 120 menit (Gambar 4.5a) dan 300 menit (Gambar 4.5b) yang dilakukan oleh Ronald Hasian[33] dihasilkan morfologi butir ferit yang berbeda.

Pada sampel baja karbon rendah SS400 yang dilakukan penahanan selama 2 jam dengan waktu pemanasan 5°C/detik dihasilkan ukuran butir ferit yang lebih kecil dibandingkan dengan sampel yang ditahan selama 300 menit. Pada gambar 4.5a terdapat butir ferit yang dengan warna putih yang mendominasi struktur mikro pada gambar tersebut, tetapi terdapat pula fasa pearlit yang ditandai dengan warna hitam. Pada gambar 4.5a terlihat garis-garis deformasi pada sebagian daerah pada gambar tersebut dan terlihat juga butir dengan ukuran kecil dan bulat dan juga ada sebagian pipih. Hal tersebut disebabkan karena proses rekristalisasi yang belum sempurna yang ditandai dengan adanya butir pipih dan panjang pada sebagian tempat yang disebabkan karena deformasi aktual yang tidak seragam pada semua daerah. Derajat deformasi dan energi yang diberikan pada derajat deformasi aktual tidaklah sempurna sehingga mempengaruhi proses pengintian butir-butir baru pada butirnya. Semakin tinggi energi yang diterima oleh material dan waktu yang lama dalam pemberian energi juga akan menyebabkan

pertumbuhan butir semakin tinggi sehingga butir-butir baru pada batas butir semakin membesar[28].

Pada gambar 4.5b terlihat ukuran butir yang pipih dan memanjang serta garis-garis deformasi yang terlihat. Fasa ferit terlihat dengan warna putih dan fasa perlit berwarna hitam. Pada gambar 4.5b, ukuran butir ferit semakin besar dan pipih yang disebabkan oleh waktu tahan yang lama. Dengan waktu tahan yang lama sekitar 300 menit, butir pada sampel ini telah mengalami proses rekristalisasi dan mengalami pertumbuhan butir, sehingga butir yang terekristalisasi semakin membesar ukurannya. Sehingga waktu tahan memberikan pengaruh terhadap ukuran butir yang terekristalisasi[28].

#### 4.4.3 Pengaruh temperatur deformasi terhadap struktur mikro



**Gambar 4.5** Menggambarkan struktur mikro sampel awal baja karbon rendah SS400 dengan deformasi 70% dan waktu tahan 120 menit di atas dengan nital 3% (a) sampel di-*reheating* temperatur 520°C dan temperatur deformasi 500°C (1000X), (b) sampel di-*reheating* temperatur 660°C dan temperatur deformasi 570°C (1000X), (c) sampel di-*reheating* temperatur 660°C dan temperatur deformasi 640°C (1000X).

Hasil pengamatan dari sampel yang mengalami proses deformasi dengan temperatur yang berbeda. Gambar 4.5(a)-(c) menerangkan hasil dari sampel yang mengalami setelah dilakukan panas ulang pada temperatur 520°C dan 660°C dengan waktu tahan selama 120 menit dan perbesaran pada foto mikro yang dipakai pada mikroskop optik yaitu sebesar 1000X. Pada gambar 4.5(a) menggambarkan struktur mikro sampel yang dideformasi pada temperatur sekitar 500°C dimana bentuk struktur mikro dari fasa ferit halus dan pipih. Bentuk pipih dan halus tersebut disebabkan karena proses deformasi canai yang diberikan pada sampel. Bentuk halus dan pipih ini disebabkan karena temperatur rekristalisasi yang rendah pada saat proses deformasi canai yang besar. Bentuk butir pipih atau memanjang sebagai hasil dari proses perubahan bentuk (misalkan proses canai) memiliki nilai kekuatan lebih tinggi dibandingkan dengan material dengan bentuk butir bulat. Mikrostruktur yang mengalami perkembangan secara cepat setelah deformasi selama pendinginan dimana rekristalisasi ferit telah terjadi pada tahap awal dan berperan lebih lanjut dalam mereduksi ukuran butir[25]. Material dengan ukuran butir yang kecil juga memiliki nilai kekuatan lebih tinggi dibandingkan dengan material dengan ukuran butir yang besar. Hal tersebut dikarenakan butir merupakan tempat Bergeraknya dislokasi sehingga jika butir kecil maka dislokasi akan mudah terhambat oleh batas butir. Terhambatnya dislokasi akan menyebabkan material menjadi lebih kuat.

Pada gambar 4.5(b) menggambarkan struktur mikro dari sampel yang dideformasi pada temperatur 570°C yang menghasilkan bentuk fasa ferit yang lebih kasar dan pipih dibandingkan pada gambar 4.5(a). Hal ini disebabkan pada saat pemanasan, butir telah mengalami pertumbuhan akibat temperatur pemanasan ulang yang lebih tinggi dan lama yang kemudian diberikan beban deformasi sehingga fasa feritnya menjadi pipih dan selama proses pendinginan, proses rekristalisasi dan pertumbuhan butir terjadi pada ferit yang mengalami deformasi sehingga menjadikannya bentuk yang pipih. Gambar 4.5(c) menunjukkan terjadinya perubahan butir-butir berukuran besar pada beberapa bagian dan masih pipih. Pada gambar 4.5(c) telah mengalami tahapan rekristalisasi dan beberapa butir mengalami pertumbuhan (*grain growth*). Seiring dengan pertumbuhan butir

maka akan dihasilkan butir-butir yang besar yang dapat menyebabkan pergerakan dislokasi tidak terhambat sehingga kekerasan dan kekuatan akan menurun pada material [4].

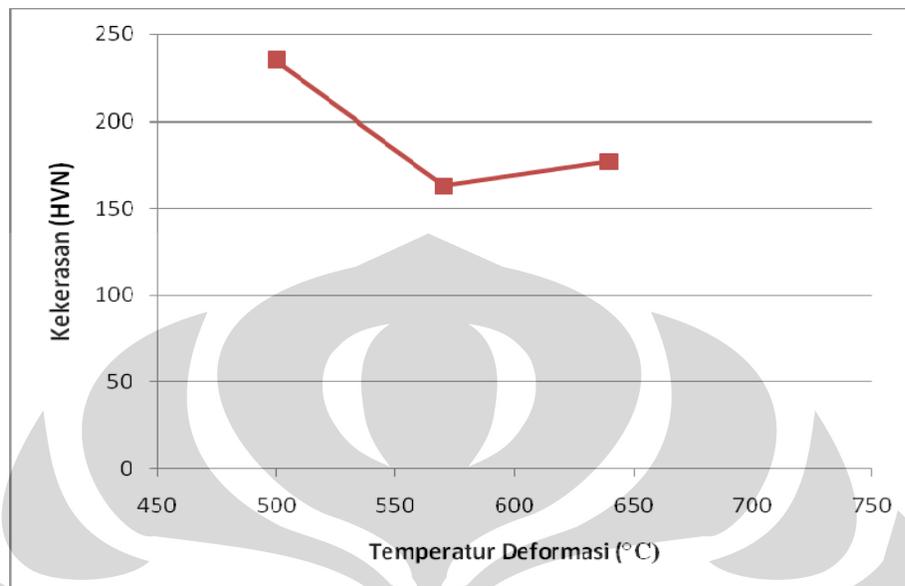
#### 4.5 Hasil Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan yang dilakukan pada sampel baja karbon rendah yang merupakan hasil proses sebelum dan sesudah deformasi. Metode pengujian nilai kekerasan yang digunakan yaitu metode Vickers[32]. Berikut hasil pengujian nilai kekerasan yang dapat dilihat pada Tabel 4.3.

**Tabel 4.3 Hasil Uji Kekerasan Vickers.**

No.	Kondisi Proses				Nilai Kekerasan (VHN)
	Temperatur Reheating (°C)	Temperatur Deformasi (°C)	Deformasi Teoritis(%)	Deformasi Aktual(%)	
A0	-	-	-	-	202
A1	520	-	-	-	132
A2	660	-	-	-	128
B	520	500	70	30.32	235
C	660	570	70	29.86	163
D	660	640	70	29.36	177

#### 4.5.1 Hubungan kekerasan terhadap temperatur akhir deformasi



**Gambar 4.6** Menggambarkan hubungan antara nilai kekerasan vickers dengan temperatur deformasi.

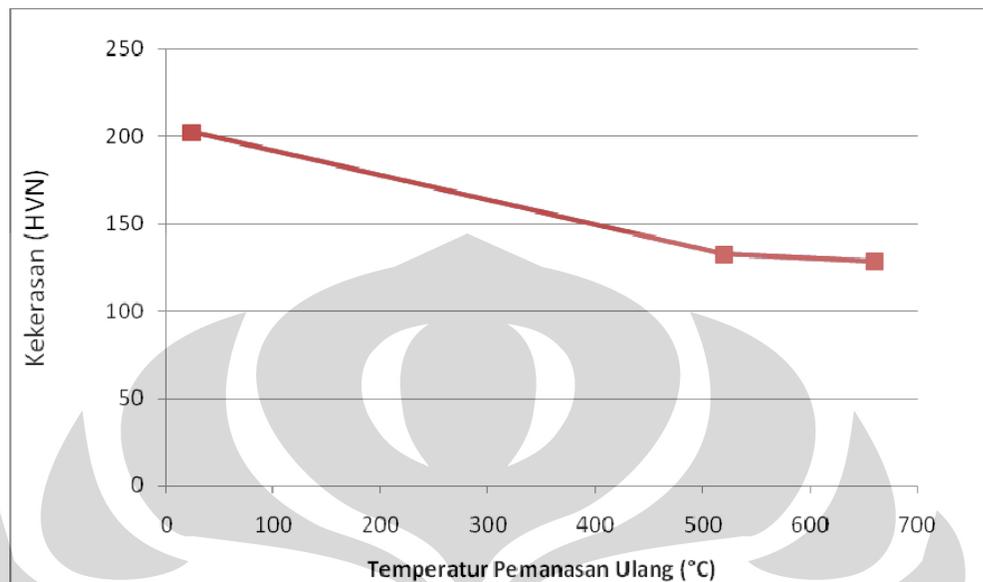
Nilai kekerasan yang didapat dari pengujian pada sampel baja karbon rendah yang telah mengalami deformasi pada temperatur canai hangat. Hasil dari pengujian kekerasan menunjukkan hasil sebagai berikut (Gambar 4.6); deformasi pada temperatur 500°C menghasilkan nilai kekerasan 235 HVN, deformasi pada temperatur 570°C menghasilkan nilai kekerasan 163 HVN, deformasi pada temperatur 640°C menghasilkan nilai kekerasan 177 HVN. Dari ketiga data tersebut didapatkan penurunan nilai kekerasan seiring dengan meningkatnya temperatur deformasi. Hal ini sesuai dengan literatur yang menyatakan bahwa semakin meningkatnya temperatur anil akan menyebabkan nilai kekerasan dari sebuah material akan menurun [14].

Pada sampel yang dideformasi dengan temperatur 570°C memiliki nilai kekerasan yang paling rendah dari kedua sampel lainnya yang dideformasi. Hal ini dapat disebabkan karena adanya selang waktu dari dapur ke mesin roll yang

cukup lama dibandingkan kedua sampel lainnya. Dengan adanya selang waktu yang lama akan menyebabkan sampel mengalami pertumbuhan ukuran butir sebelum dilakukan deformasi dimana semakin besar butir akan mengurangi nilai kekerasannya. Beda halnya dengan sampel yang dideformasi pada temperatur  $640^{\circ}\text{C}$  yang memiliki selang waktu yang sedikit sehingga belum terjadi rekristalisasi selama proses pendinginan.

Ukuran butir yang besar akan mengurangi nilai kekekerasan dari suatu material karena batas butir yang dimiliki lebih sedikit dibandingkan dengan material yang memiliki butir kecil. Jika batas butirnya sedikit maka material semakin mudah dideformasi karena memudahkan dislokasi untuk bergerak, sedangkan apabila batas butirnya semakin banyak yang ditandai dengan butir yang semakin halus, maka dislokasi semakin sulit untuk bergerak. Pergerakan dislokasi yang terhambat ini akan menyebabkan material sulit untuk dideformasi sehingga sifat mekanis material seperti kekerasan dan kekuatan semakin tinggi[14]. Pada sampel yang dideformasi dengan temperatur  $500^{\circ}\text{C}$  memiliki nilai kekerasan yang tinggi hal ini dapat disebabkan oleh deformasi yang diberikan selama proses canai hangat.

#### 4.5.2 Hubungan kekerasan terhadap temperatur *Reheating*



**Gambar 4.7** Menggambarkan hubungan antara nilai kekerasan vickers dengan temperatur pemanasan ulang.

Berdasarkan pengujian nilai kekerasan pada sampel baja karbon rendah sebelum dan sesudah dilakukan pemanasan ulang (Gambar 4.7) dimana pada pemanasan ulang dilakukan penahanan selama 120 menit menunjukkan hasil sebagai berikut; sampel tanpa dilakukan pemanasan ulang dan deformasi menghasilkan nilai kekerasan 202 HVN, sampel yang dilakukan pemanasan ulang hingga temperatur 520°C menghasilkan nilai kekerasan 132 HVN, sampel yang dilakukan pemanasan ulang hingga temperatur 660°C menghasilkan nilai kekerasan 128 HVN. Dari data-data tersebut didapatkan bahwa waktu tahan mempengaruhi nilai kekerasan dimana nilai kekerasannya menurun. Selain itu, temperatur pemanasan ulang juga mempengaruhi dimana butir mengalami rekristalisasi sehingga terjadi pertumbuhan butir yang menurunkan sifat mekanis seperti kekerasan dan kekuatan[14]. Namun demikian dari data butir dan kekerasan terjadi suatu perbedaan bila mengacu pada literatur[R.E. Smallman dan R.J Bishop] yang seharusnya butir semakin besar maka kekerasan semakin menurun.

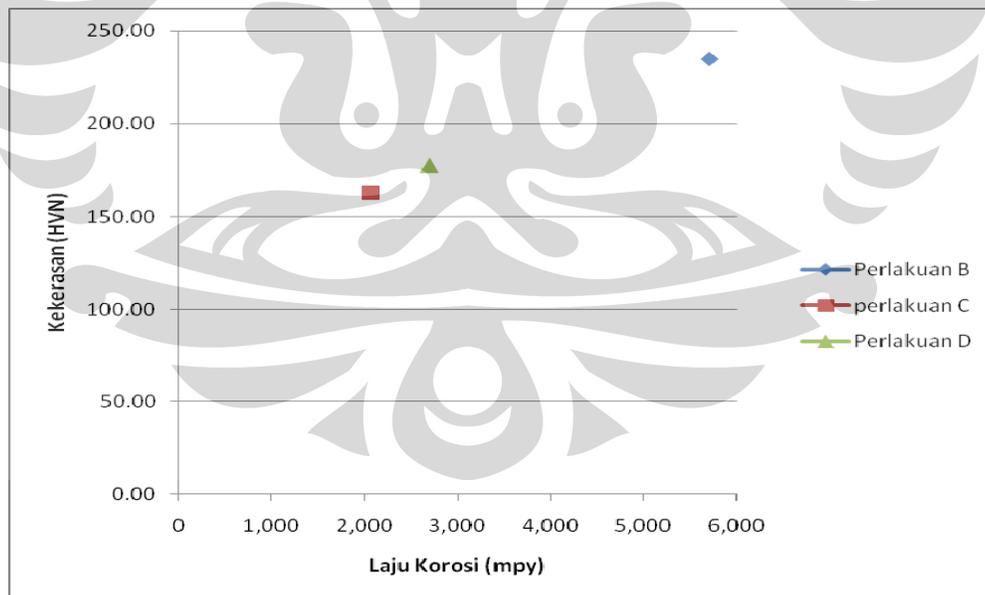
#### 4.6 Hasil Pengujian Korosi Polarisisasi

Berikut ini data hasil pengujian laju korosi polarisisasi pada lautan garam NaCl 3.5%.

**Tabel 4.4 Hasil pengujian laju korosi polarisisasi terhadap ketiga sampel yang mengalami deformasi pada temperatur canai.**

No.	Kondisi Proses			Pengukuran Polarisisasi		
	Temperatur Reheating (°C)	Temperatur Deformasi (°C)	Derajat Deformasi (%)	Ecorr (mV)	Icorr (A/cm <sup>2</sup> )	Laju Korosi (mpy)
B	520	500	70	-0.613711919	1.24957E-05	5.710
C	660	570	70	-0.695429659	4.51524E-06	2.063
D	660	640	70	-0.642244235	5.89749E-06	2.695

##### 4.6.1 Hubungan laju korosi dengan kekerasan



**Gambar 4.8** Menggambarkan hubungan antara nilai kekerasan vickers (VHN) sampel yang dideformasi pada variasi temperatur canai hangat dengan laju korosi polarisisasi (mpy).

Ketahanan korosi suatu material ditentukan oleh besar laju korosinya. Berdasarkan gambar 4.8 yang menggambarkan tiga sampel baja karbon rendah yang dilakukan deformasi pada tiga keadaan temperatur canai hangat terlihat bahwa laju korosi sampel B yang dengan nilai kekerasan paling besar memiliki laju korosi lebih cepat yaitu sebesar 5.710 mpy dibandingkan dengan sampel yang memiliki nilai kekerasan paling rendah yaitu 2.063 mpy. Deformasi dan penurunan temperatur membuat nilai kekerasan meningkat. Meningkatnya kekerasan disebabkan karena ukuran butir yang semakin kecil sehingga menyebabkan dislokasi sulit untuk bergerak. Sedangkan ukuran butir besar yang diakibatkan proses pertumbuhan butir setelah proses rekristalisasi membuat nilai kekerasannya menurun[14]. Material yang memiliki nilai kekerasan dan kekuatan yang tinggi umumnya menurunkan ketahanan korosi dari material tersebut[29]. Hal ini memiliki kecenderungan yang sama dengan penelitian yang dilakukan oleh Dwi Sapdiyanto[30] dimana ketahanan korosi dari baja karbon rendah akan meningkat setelah dilakukan proses perlakuan panas dimana baja karbon rendah dengan ukuran butir yang lebih besar mengakibatkan batas butir menjadi berkurang sehingga laju korosi pun menjadi turun, butir besar tersebut dapat ditandai dengan menurunnya nilai kekerasan maupun kekuatannya. Dengan demikian sampel dengan nilai kekerasan besar cenderung lebih mudah terkorosi dibandingkan dengan sampel yang memiliki kekerasan lebih kecil.

Uji polarisasi hanya terbatas pada permukaan dari sampel yang diuji tidak pada morfologinya, sedangkan untuk morfologi butir yang mempengaruhi laju korosi antara butir bulat dan pipih, pada butir bulat yang merupakan butir baru hasil rekristalisasi sehingga bebas dari regangan maupun tegangan sisa sehingga untuk serangan korosi yang dipengaruhi oleh mikrostruktur akan mengurangi laju korosi pada mikrostruktur tersebut, sedangkan pada butir pipih hasil deformasi yang terdapat tegangan sisa akan mempercepat serangan korosi pada mikrostrukturnya karena tegangan sisa yang ada pada butir akan mempengaruhi sifat dari material tersebut[29].

## BAB 5

### KESIMPULAN

#### 5.1 Kesimpulan

1. Proses pemanasan ulang pada temperatur 520°C menghasilkan ukuran butir yang lebih kecil yaitu  $8.95 \pm 0.39 \mu\text{m}$  dibandingkan dengan pemanasan ulang pada temperatur 660°C yaitu  $10.16 \pm 0.27 \mu\text{m}$ .
2. Deformasi pada variasi temperatur canai hangat menghasilkan butir berukuran  $6.54 \pm 0.34 \mu\text{m}$  pada temperatur deformasi 500°C, ukuran butir yang dideformasi pada 570°C yang menghasilkan ukuran butir sekitar  $7.29 \pm 0.32 \mu\text{m}$  dan deformasi pada 640°C yang menghasilkan ukuran butir  $8.13 \pm 0.82 \mu\text{m}$ .
3. Hasil pengujian kekerasan Vickers menghasilkan nilai kekerasan pada temperatur 25°C yaitu 202 HVN, temperatur 520°C yaitu 132 HVN, temperatur 660°C yaitu 128 HVN.
4. Hasil pengujian kekerasan Vickers pada variasi deformasi temperatur canai hangat menunjukkan pada deformasi temperatur 500°C menghasilkan nilai kekerasan sebesar 235 HVN yang merupakan nilai paling besar diantara deformasi di temperatur 570°C sebesar yaitu 163 HVN dan 640°C sebesar 177 HVN.
5. Dari hasil pengujian laju korosi polarisasi, didapatkan hubungan antara nilai kekerasannya dan laju korosi dengan hasil sebagai berikut; sampel B dengan nilai kekerasan 235 HVN memberikan nilai laju korosi polarisasi yang lebih tinggi yaitu 5.710 mpy, sampel C dengan nilai kekerasan 177 HVN memberikan nilai laju korosi polarisasi 2.695 mpy, sampel D dengan nilai kekerasan 163 VHN memberikan nilai laju korosi polarisasi 2.063 mpy.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Yoshitaka Adachi , Masayuki Wakita , Hossein Beladi , Peter Damian Hodgson “The formation of ultrafine ferrite through static transformation in low carbon steels”, *acta materialia elsevier* 55 (2007) 4925-4934
- [2]. Gorge Krauss. *STEEL Processing, Structure, and Performance*, ASM International,USA: 2005.
- [3]. <http://shinqueena.wordpress.com/baja-karbon-carbon-steel/>
- [4]. William D. Callister, Jr. *Fundamental of Materials Science and Engineering* 5<sup>th</sup> edition,USA: 2003.
- [5]. Pickering, F. B., *Physical Metallurgy and the design of the steels*. Applied Science Publishers. London. 1978. pp. 1-88.
- [6]. Kyung-Tae Park, Dong Hyuk Shin. *Annealing behavior of submicrometer grained ferrite in a low carbon steel fabricated by severe plastic deformation*. *ElSevier.Materials Science and Engineering A334* (2002) 79–86.
- [7]. Harris, John Noel. 1983. *Mechanical Working of Metals : Theory and Practice*. Pergamon Press : UK.
- [8]. Kalpakjian, Serope dan S. R. Schmid. 2008. *Manufacturing Processes for Engineering Materials* 5th ed. Pearson Education : UK.
- [9]. Dieter,George E. *Mechanical Metallurgy* second edition. McGraw-Hill International.
- [10]. P.L. Mangonon. *The Principles of Material Selection for Engineering Design*. Prentice Hall, Inc.1999.
- [11]. Brooks. R. Charlie. *Heat Treatment Structure & Properties of Non Ferrous Alloy*. Ohio : American Society for Metals.1998.
- [12]. R. F. Mehl. *Recrystallization*, in "Metal Handbook" pp. 259-268, American Society for Metals, Metals Park, Ohio. 1948.

- [13]. ASM International Handbook Committee. 1991. ASM Metal Handbook Volume 3 : Heat Treating. ASM International : Metals Park, Ohio.
- [14]. R.E Smallman, R.J Bishop. Metals and Material. UK : Butterworth - Heinemann.1995.
- [15]. E.S. Siradj. Peluang penelitian dalam Thermomechanical Treatment Baja High Strength Low Alloy, Seminar sehari Fakultas Teknik Universitas Tarumanegara.2001.
- [16]. G. H. akbari, C. M. Sellars and J. A. Whiteman.microstructural development during warm rolling of an if steel. Pergamon. Acta mater, Acta Metallurgica. Vol. 45, No. 12, PP. 5047-5058, 1997.
- [17]. H. K. D. H. Bhadeshia. 2001. Bainite In Steels: Transformations, Microstructure And Properties. Second Edition. IOM Communications Ltd.
- [18]. Mars. G Fontana. Corrosion Engineering, 3th Edition. New York: McGraw Hill Book Company.1986.
- [19]. <http://www.corrosion-doctors.org/Corrosion-Thermodynamics/Potential-pH-diagram-iron.htm>
- [20]. <http://www.keytometals.com/Articles/Art60.htm>
- [21]. Shreir, L.L. Corrosion Volume 1 Metal/Environment Reaction. 3rd edition. Butterworth Heinemann
- [22]. Jones, Denny A. Principles and Prevention Corrosion. 2nd edition. Prentice Hall International, Inc.Singapore:1999.
- [23]. [http://www.gamry.com/App\\_Notes/DC\\_Corrosion/DC\\_Stu2.gif](http://www.gamry.com/App_Notes/DC_Corrosion/DC_Stu2.gif)
- [24]. Prameswari, Bunga. Studi Efektifitas Lapis Galvanis Terhadap Ketahanan Korosi Pipa Baja ASTM A53 di Dalam Tanah (*underground pipe*). Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Departemen Metalurgi & Material. depok.2008.
- [25]. M, Niikuram, M fujioka, Yoshitaka Adachi, dkk. New concept for ultra refinement of grain size in super metal project. Elsevier. Journal of Material Processing Technology 117 (2001) 341-346.

- [26]. G. Krauss, Heat Treatment and Processing Principles (USA: ASM International, 1995).
- [27]. R.K. Brzuszecka, P.C.M. Rodriguesb, L.S. Mottaa and D.B. Santos. Microstructural Evolution of Ultra Fine Grained C-Mn Steel Warm Rolling and Intercritical Annealed. Material Research, Vol.5, No.3, 343-348, 2002.
- [28]. F. J. Humphreys, M. Hatherly. 2004. Recrystallization and Related Annealing Phenomena. Pergamon Materials Series, Elsevier : UK.
- [29]. ASM Handbook Vol 13 & 13A, Corrosion. ASM International : USA. 1992.
- [30]. Dwi Sapdiyanto, "Pengaruh Perlakuan Panas Pengerasan terhadap Kekerasan dan Ketahanan Korosi Baja Karbon Rendah pada Tabung Gas Elpiji." Skripsi. Program Sarjana Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Depok. 1996.
- [31]. ASTM E112. 2003. Standard Test Methods for Determining Average Grain Size.
- [32]. ASTM E92. 2003. Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials.
- [33]. Hasian M., Ronald, " Studi Pengaruh deformasi searah proses canai hangat terhadap morfologi butir ferit dan ketahanan korosi pada baja karbon SS400". Skripsi. Program Sarjana Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Depok. 2010.



## Lampiran 1. Data Pengujian Komposisi Kimia Baja SS400.



**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

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

<b>Kode Sampel</b> <i>Sample Code</i>	<b>C</b> (%)	<b>Si</b> (%)	<b>S</b> (%)	<b>P</b> (%)	<b>Mn</b> (%)	<b>Ni</b> (%)	<b>Cr</b> (%)
<b>01</b>	0.120	0.198	< 0.003	0.008	0.636	< 0.005	< 0.003
	<b>Mo</b> (%)	<b>Ti</b> (%)	<b>Cu</b> (%)	<b>Nb</b> (%)	<b>V</b> (%)	<b>Al</b> (%)	<b>Fe</b> (%)
	< 0.005	< 0.002	0.018	< 0.002	0.016	0.037	98.913

Depok, April 27<sup>th</sup>, 2010  
**LABORATORIUM UJI MATERIAL**  
Technical Manager,



(Ahmad Ivan Karayan, ST, M.Eng)

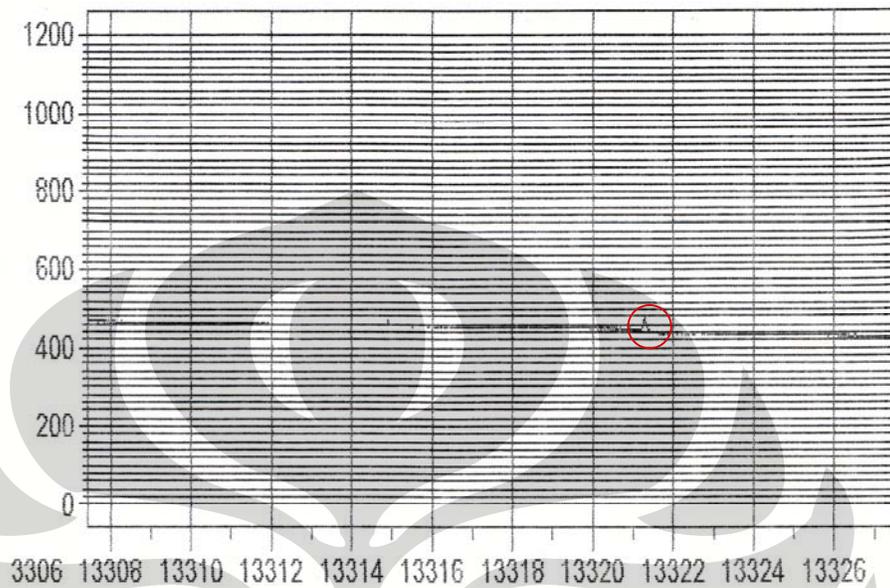
FF-26/Met-UI Rev 0

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

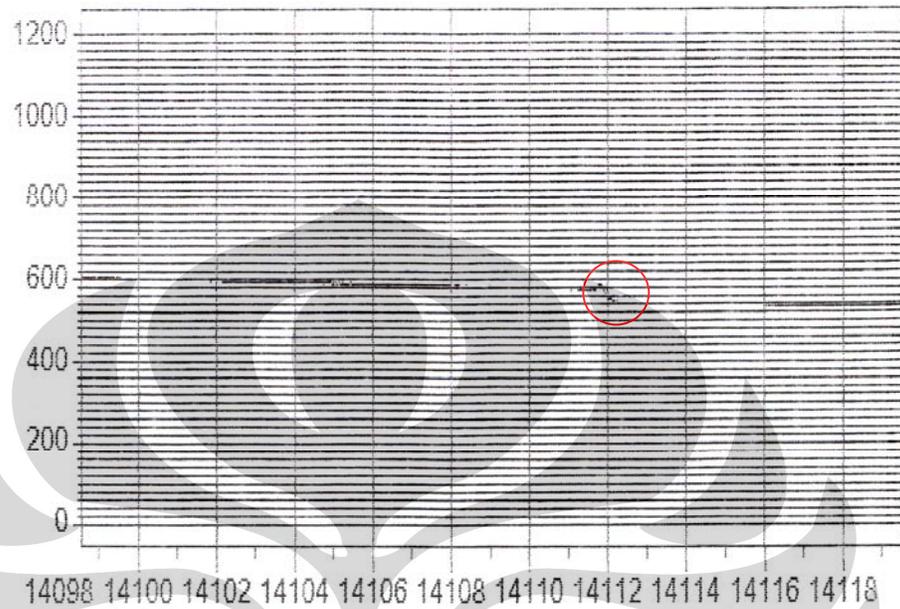
Universitas Indonesia

### Lampiran 2. Perhitungan Kekerasan Vickers

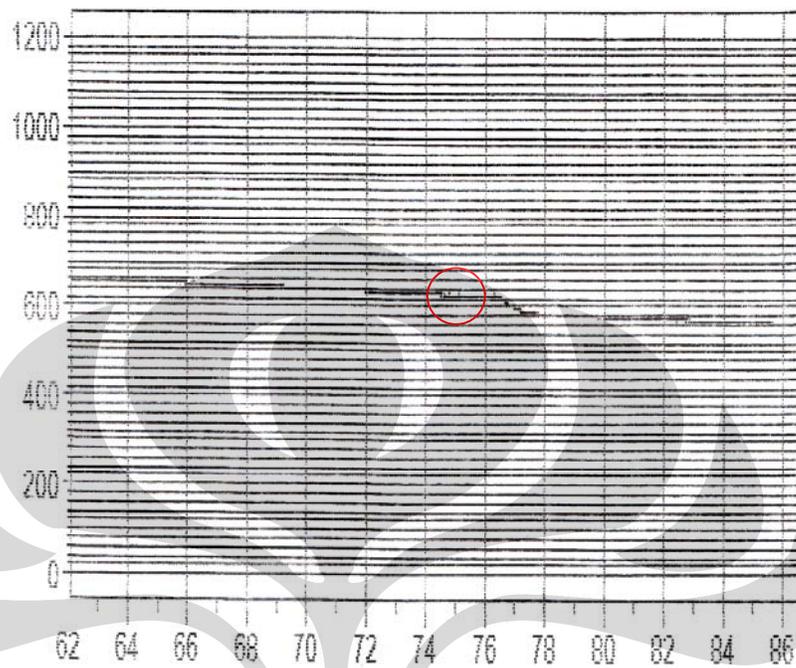
NO	DIA		AVG	HV	HV-26	rata-rata
	I	II				
A1	57	58.5	57.75	166.8095	140.8095	132.3401
	59	58.5	58.75	161.1792	135.1792	
	60	59.5	59.75	155.8292	129.8292	
	61	60.5	60.75	150.7412	124.7412	
	60	59	59.5	157.1414	131.1414	
NO	DIA		AVG	HV	HV-26	rata-rata
	I	II				
A2	60	61.5	60.75	150.7412	124.7412	128.2998
	60	60.5	60.25	153.2536	127.2536	
	59.5	60.5	60	154.5333	128.5333	
	59	60	59.5	157.1414	131.1414	
	59.5	60	59.75	155.8292	129.8292	
NO	DIA		AVG	HV	HV-26	rata-rata
	I	II				
B	44	46.5	45.25	271.6987	245.6987	234.8079
	45	47.5	46.25	260.0766	234.0766	
	45.5	47.5	46.5	257.2875	231.2875	
	46.5	48	47.25	249.1845	223.1845	
	45	46.5	45.75	265.7923	239.7923	
NO	DIA		AVG	HV	HV-26	rata-rata
	I	II				
C	52	53	52.5	201.8395	175.8395	162.966
	53.5	56	54.75	185.5908	159.5908	
	60	55	57.5	168.2631	142.2631	
	52	53	52.5	201.8395	175.8395	
	54	55	54.5	187.2974	161.2974	
NO	DIA		AVG	HV	HV-26	rata-rata
	I	II				
D	50	51.5	50.75	215.9994	189.9994	177.182
	51.5	55.5	53.5	194.3646	168.3646	
	52.5	53	52.75	199.9308	173.9308	
	52	52.5	52.25	203.7756	177.7756	
	50	55	52.5	201.8395	175.8395	

**Lampiran 3.** Data kurva pengujian canai hangat proses B

Tanda **O** menandakan letak terjadinya deformasi canai.

**Lampiran 4.** Data kurva pengujian canai hangat proses C

Tanda **O** menandakan letak terjadinya deformasi canai.

**Lampiran 5.** Data kurva pengujian canai hangat proses D

Tanda **○** menandakan letak terjadinya deformasi canai.

### Lampiran 6. Perhitungan Diameter Butir

no	Temperatur Reheating	Temperatur Deformasi	Number Intercept	PL	L Mean	G No (ASTM E112)	Perbesaran x(kali)	G rata-rata	Standar Deviasi	Diameter butir rata-rata ( $\mu\text{m}$ )	Diameter butir ( $\mu\text{m}$ )	NI 1	NI 2	NI 3	NI 4
0	-	-	60	60	0.016667	8.519593	500	8.4341281	1.3306139	19.39333	18.78	15	14	14	17
			61	61	0.016393	8.567302	500				18.48	17	15	12	17
			54	54	0.018519	8.215489	500				20.92	13	13	12	16
1	520C	-	61	122	0.008197	10.56795	1000	10.643743	0.39	8.95	9.16	16	15	17	13
			66	132	0.007576	10.79533	1000				8.5	18	16	16	16
			61	122	0.008197	10.56795	1000				9.19	13	16	17	15
2	660C	-	55	110	0.009091	10.2691	1000	10.285807	0.2749545	10.17	10.23	13	14	16	12
			54	108	0.009259	10.21613	1000				10.41	15	13	12	14
			57	114	0.008772	10.37219	1000				9.87	12	16	15	14
3	520C	500C	87	174	0.005747	11.59269	1000	11.578992	0.3365016	6.54	6.50	21	21	21	24
			91	182	0.005495	11.72243	1000				6.22	22	23	22	24
			82	164	0.006098	11.42185	1000				6.89	22	18	19	23
4	660C	570C	74	148	0.006757	11.12556	1000	11.250753	0.3160696	7.29	7.59	15	21	20	18
			81	162	0.006173	11.38644	1000				6.96	20	20	21	20
			77	154	0.006494	11.24026	1000				7.32	18	21	19	19

5	660	640	74	148	0.006757	11.12556	1000	10.942243	0.8203861	8.13	7.58	15	21	17	21
			73	146	0.006849	11.08629	1000				7.73	17	18	21	17
			62	124	0.008065	10.61488	1000				9.07	18	17	15	12



Universitas Indonesia

Lampiran 7. Tabel Diameter Butir ASTM E112

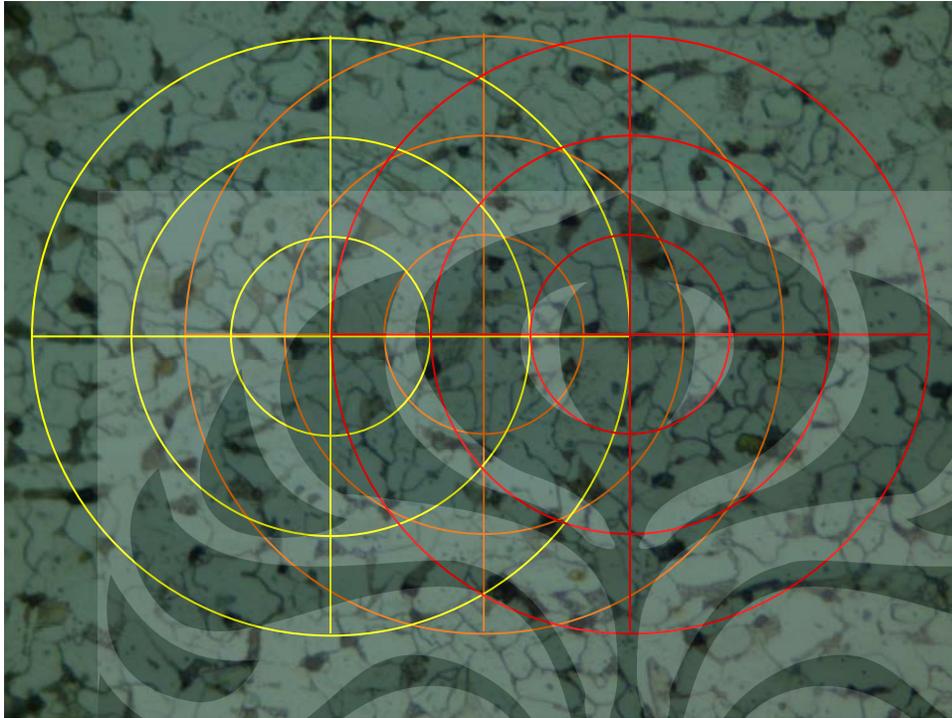
Grain Size No. $G$	$\bar{N}_A$ Grains/Unit Area		$\bar{A}$ Average Grain Area		$\bar{\sigma}$ Average Diameter		$\bar{\tau}$ Mean Intercept		$\bar{N}_L$ No./mm
	No./in. <sup>2</sup> at 100X	No./mm <sup>2</sup> at 1X	mm <sup>2</sup>	μm <sup>2</sup>	mm	μm	mm	μm	
00	0.25	3.88	0.2581	258064	0.5080	508.0	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	2.93	43.84	0.0228	22810	0.1510	151.0	0.1345	134.5	7.43
3.0	4.00	62.00	0.0161	16129	0.1270	127.0	0.1131	113.1	8.84
3.5	5.66	87.68	0.0114	11405	0.1068	106.8	0.0951	95.1	10.51
4.0	8.00	124.00	0.00806	8065	0.0898	89.8	0.0800	80.0	12.50
4.5	11.31	175.36	0.00570	5703	0.0755	75.5	0.0673	67.3	14.87
5.0	16.00	248.00	0.00403	4032	0.0635	63.5	0.0566	56.6	17.68
5.5	22.63	350.73	0.00285	2851	0.0534	53.4	0.0476	47.6	21.02
6.0	32.00	496.00	0.00202	2016	0.0449	44.9	0.0400	40.0	25.00
6.5	45.25	701.45	0.00143	1426	0.0378	37.8	0.0336	33.6	29.73
7.0	64.00	992.00	0.00101	1008	0.0318	31.8	0.0283	28.3	35.36
7.5	90.51	1402.9	0.00071	713	0.0267	26.7	0.0238	23.8	42.04
8.0	128.00	1984.0	0.00050	504	0.0225	22.5	0.0200	20.0	50.00
8.5	181.02	2805.8	0.00036	356	0.0189	18.9	0.0168	16.8	59.46
9.0	256.00	3968.0	0.00025	252	0.0159	15.9	0.0141	14.1	70.71
9.5	362.04	5611.6	0.00018	178	0.0133	13.3	0.0119	11.9	84.09
10.0	512.00	7936.0	0.00013	126	0.0112	11.2	0.0100	10.0	100.0
10.5	724.08	11223.2	0.000089	89.1	0.0094	9.4	0.0084	8.4	118.9
11.0	1024.00	15872.0	0.000063	63.0	0.0079	7.9	0.0071	7.1	141.4
11.5	1448.15	22446.4	0.000045	44.6	0.0067	6.7	0.0060	5.9	168.2
12.0	2048.00	31744.1	0.000032	31.5	0.0056	5.6	0.0050	5.0	200.0
12.5	2896.31	44892.9	0.000022	22.3	0.0047	4.7	0.0042	4.2	237.8
13.0	4096.00	63488.1	0.000016	15.8	0.0040	4.0	0.0035	3.5	282.8
13.5	5792.62	89785.8	0.000011	11.1	0.0033	3.3	0.0030	3.0	336.4
14.0	8192.00	126976.3	0.000008	7.9	0.0028	2.8	0.0025	2.5	400.0

**Lampiran 8.** Data penghitungan dimensi awal dan sesudah deformasi dan reheating.

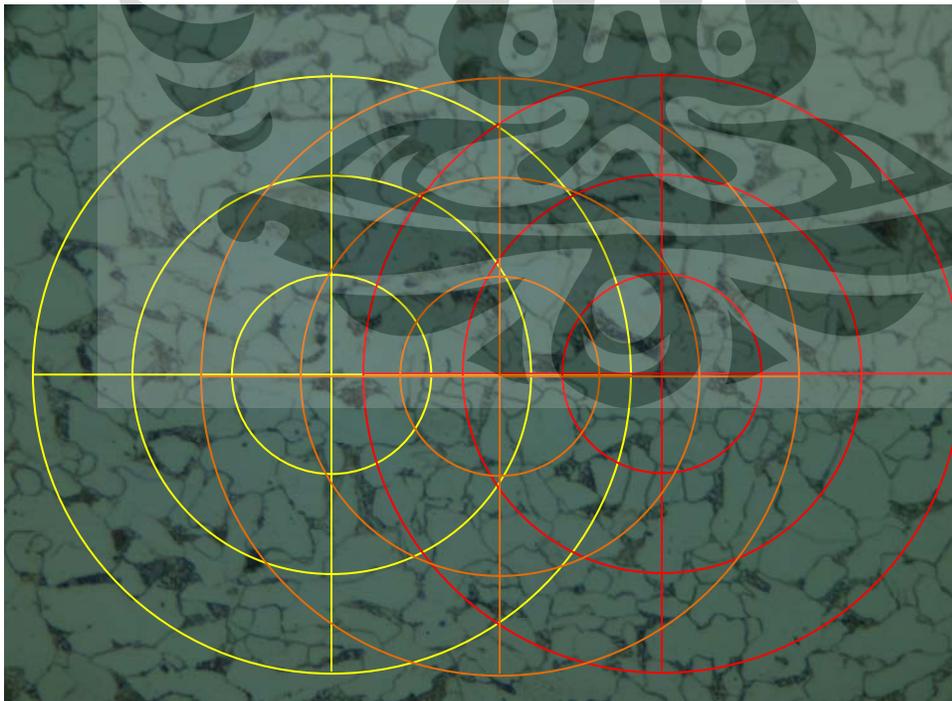
No	Temperatur Reheating (°C)	Temperatur Deformasi (°C)	Derajat Deformasi	Lebar awal (mm)	Tebal awal (mm)	Panjang awal (mm)	Lebar akhir (mm)	Tebal akhir (mm)	Panjang akhir (mm)
1	500	500	70%	29.7	6.25	69.9	31.5	4.3	85.25
				29.55	6.3	69.85	30.6	4.45	86.4
				29.8	6.25	70.00	30.55	4.35	88.6
2	660	570	70%	29.75	6.25	69.7	29.7	4.35	92.4
				29.8	6.25	69.5	29.85	4.5	91.8
				29.7	6.25	69.35	31.35	4.3	93.2
3	660	640	70%	29.55	6.25	69.9	30.5	4.35	86.45
				29.8	6.35	70.00	29.7	4.45	86.1
				29.7	6.3	69.85	29.1	4.55	84.1

## Lampiran 9. Perhitungan Diameter Butir Metode Intercept Heyn dengan foto

Bulk 520°C Reheating Non-Deform 1000X Magnification

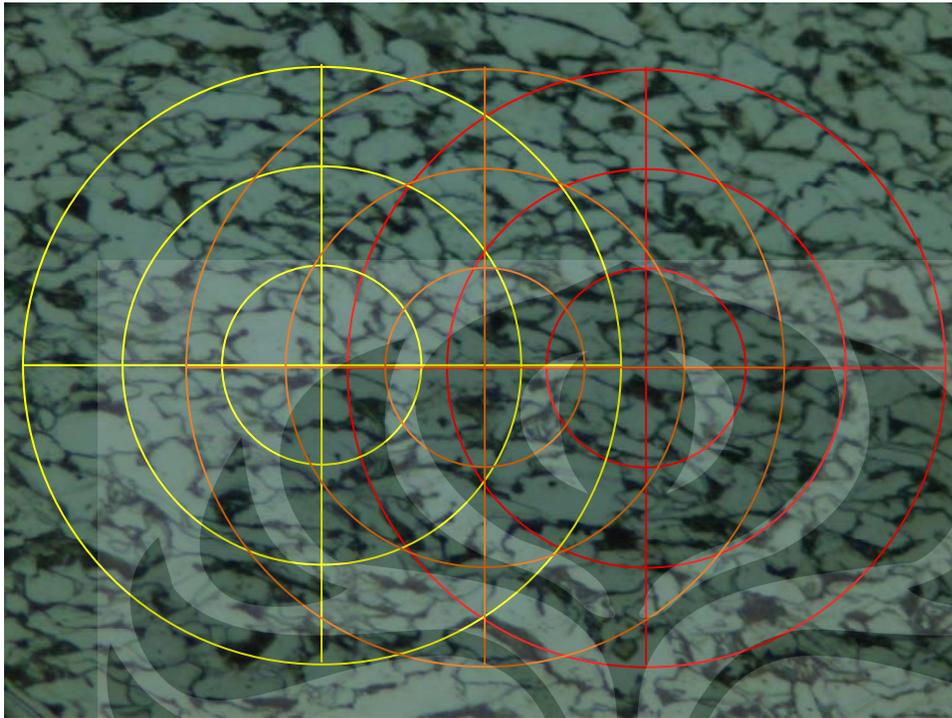


Bulk 660°C Reheating Non-Deform 1000X Magnification

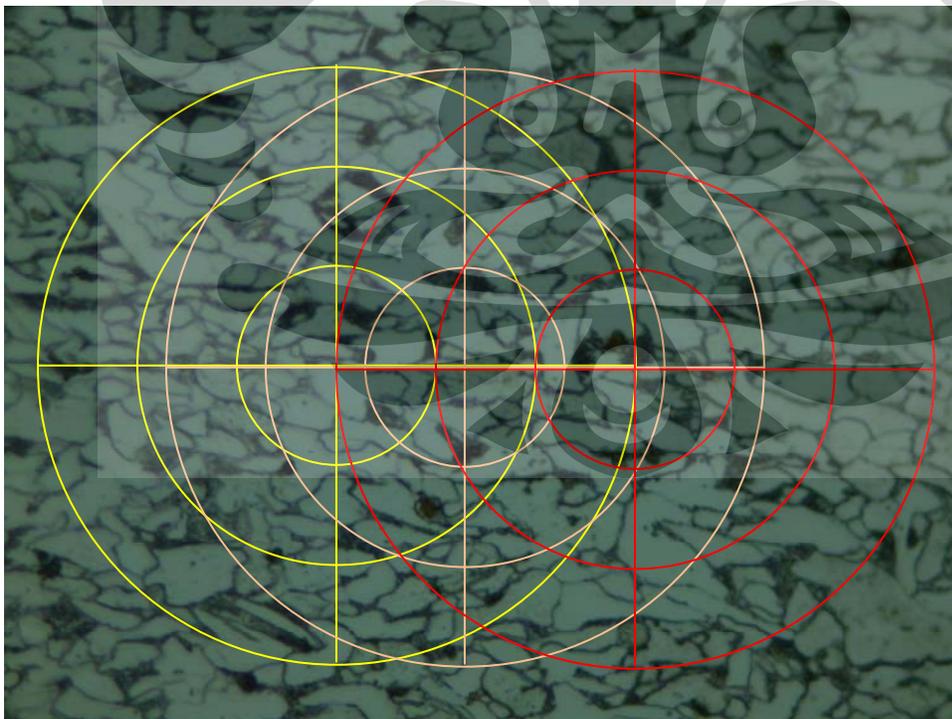


Universitas Indonesia

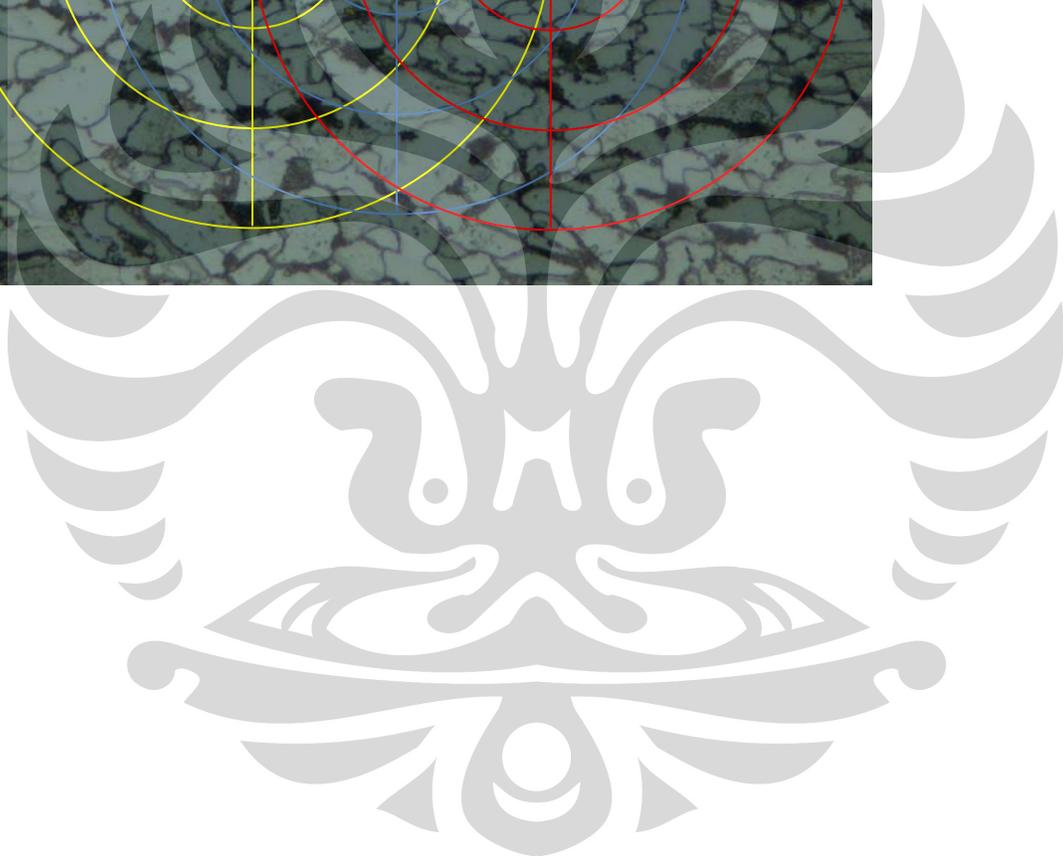
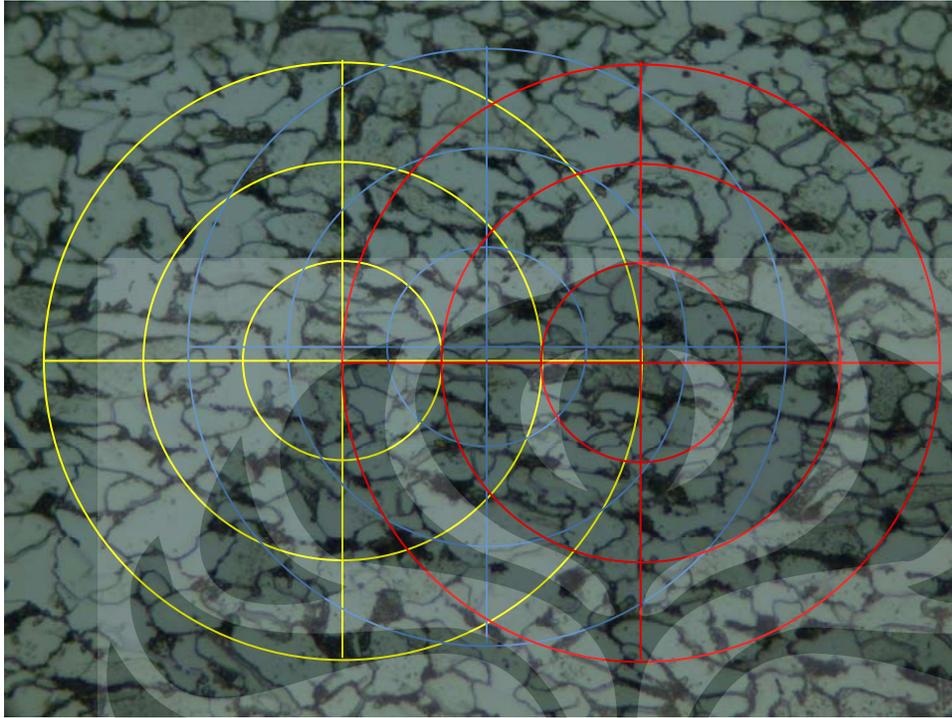
520°C Reheating, 500°C Roll Deform 70%, 1000X Magnification



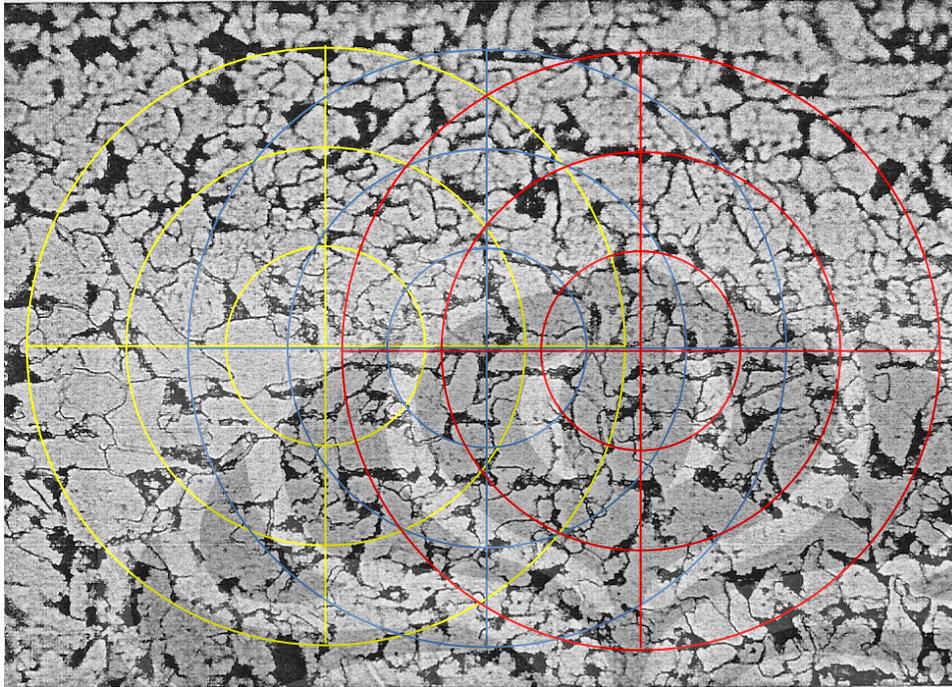
660°C Reheating, 570°C Roll Deform 70%, 1000X Magnification



660°C Reheating, 640°C Roll Deform 70%, 1000X Magnification

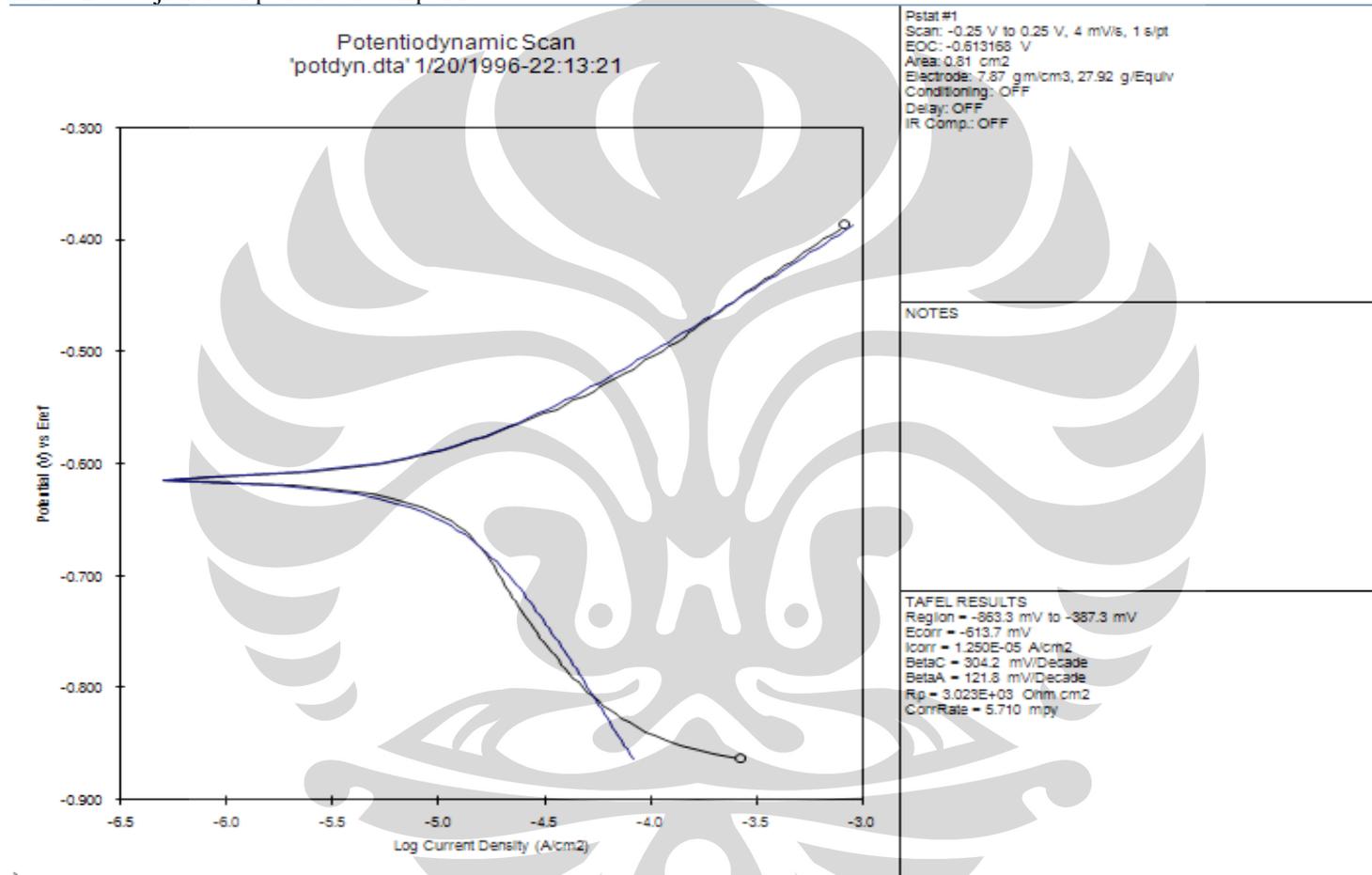


25°C Non-Deform and 500X Magnification



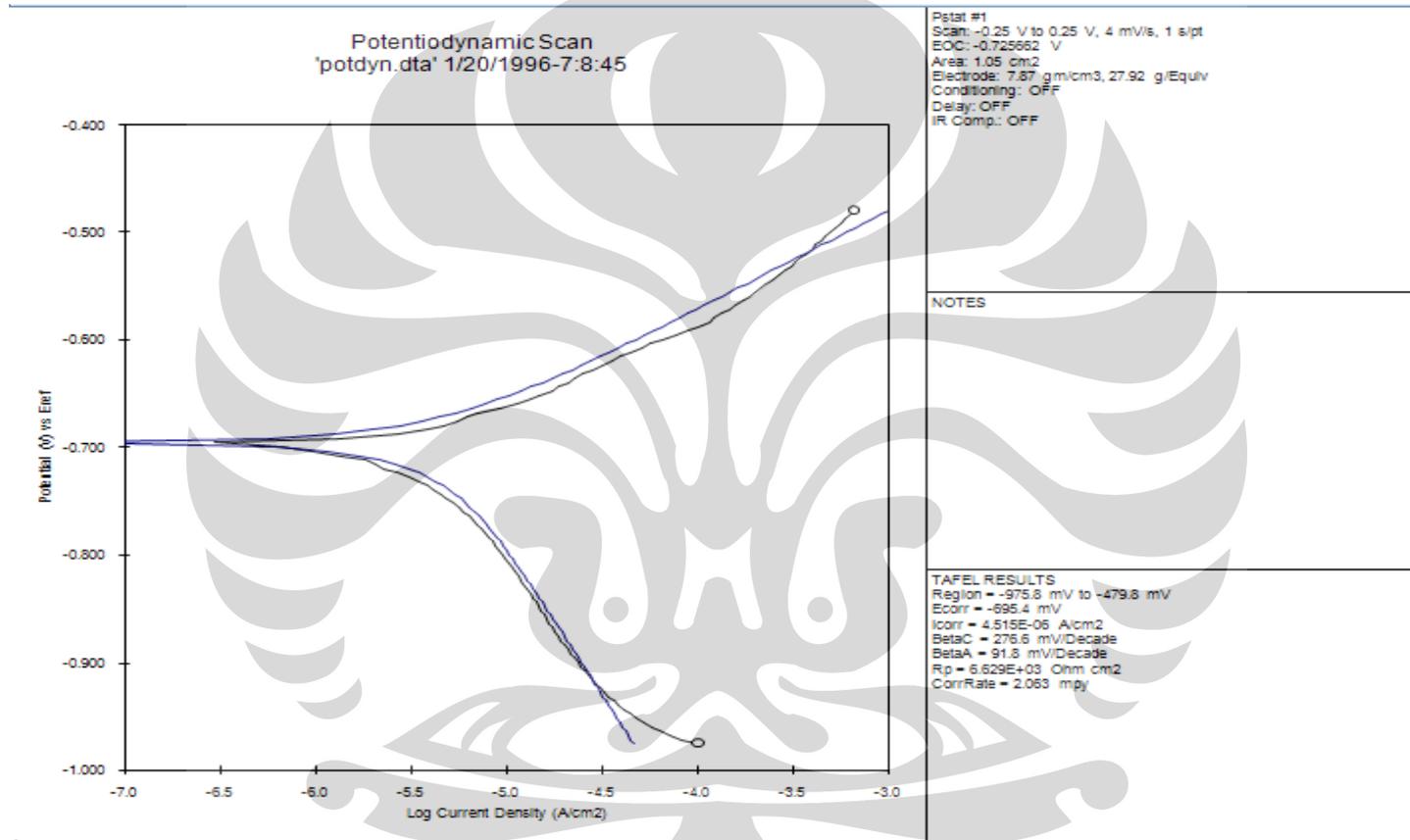
Universitas Indonesia

Lampiran 10. Data uji korosi polarisasi sampel B



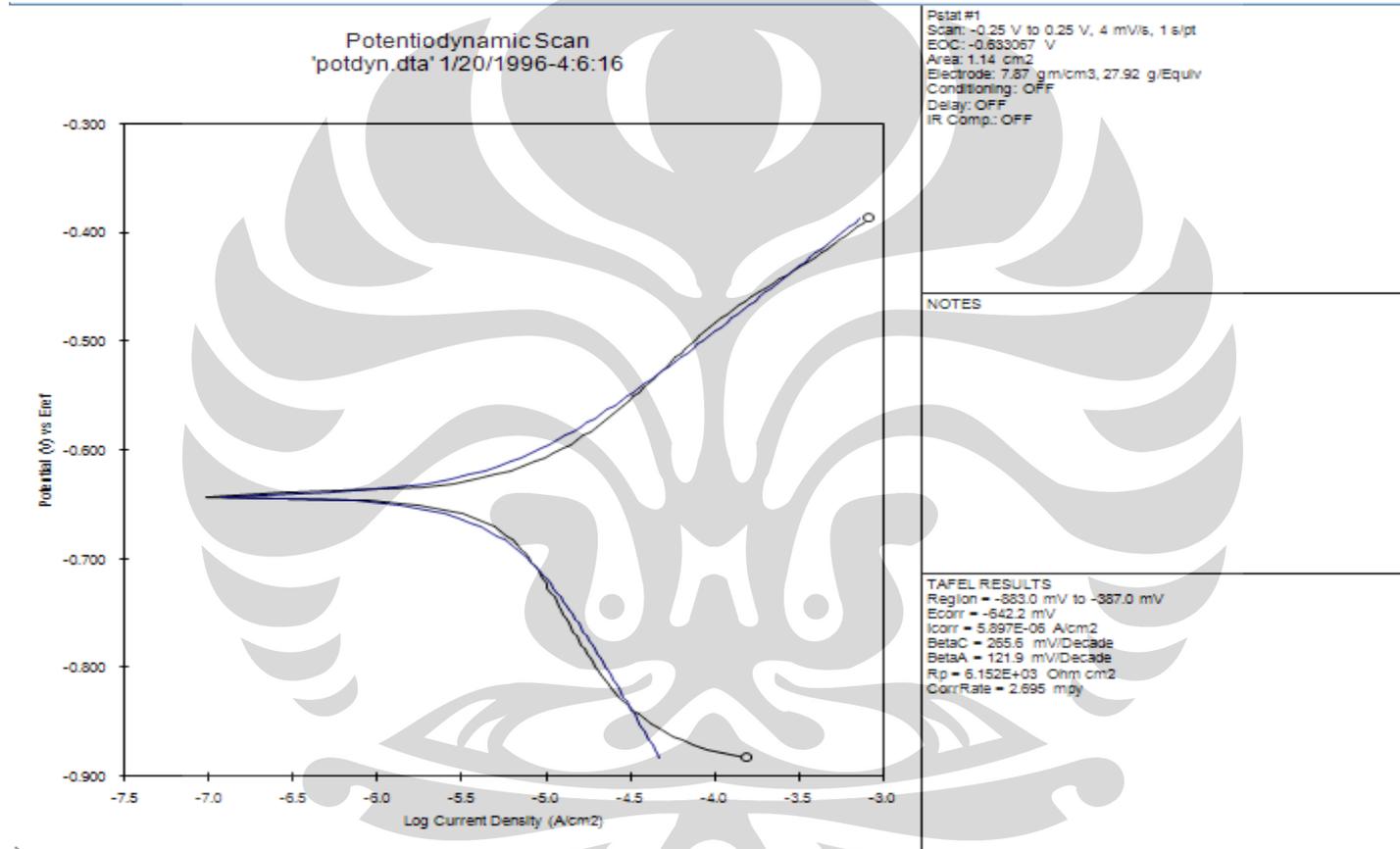
Universitas Indonesia

Lampiran 11. Data uji korosi polarisasi sampel C



Universitas Indonesia

Lampiran 12. Data uji korosi polarisasi sampel D



Universitas Indonesia