



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI PENGARUH DEFORMASI SEARAH PROSES CANAI  
HANGAT TERHADAP MORFOLOGI BUTIR FERIT DAN  
KETAHANAN KOROSI PADA BAJA KARBON SS 400**

**SKRIPSI**

**RONALD HASIAN MANURUNG  
0606075252**

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



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI PENGARUH DEFORMASI SEARAH PROSES CANAI  
HANGAT TERHADAP MORFOLOGI BUTIR FERIT DAN  
KETAHANAN KOROSI PADA BAJA KARBON SS 400**

**SKRIPSI**

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

**RONALD HASIAN MANURUNG**

**0606075252**

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

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

**Nama : Ronald Hasian Manurung**

**NPM : 0606075252**

**Tanda Tangan :**

**Tanggal : 25 Juni 2010**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Ronald Hasian Manurung  
NPM : 0606075252  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul Skripsi : Studi Pengaruh Deformasi Searah Proses  
Canai Hangat Terhadap Morfologi Butir Ferit  
Dan Ketahanan Korosi Pada Baja Karbon SS  
400

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

### DEWAN PENGUJI

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

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

Penguji : Dra. Sari Katili, M.S ( )

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 25 Juni 2010

## KATA PENGANTAR

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

1. Ir. Rini Riastuti, M.Sc selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
2. Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral;
3. Rekan-rekan Tim Warm Rolling 2006 (Aldhi Mahardhika, Amri Kiswara, Bintang Suryo H, Nofardiansyah R) yang membantu saya dalam mengerjakan penelitian ini;
4. Keluarga besar DMM yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini;
5. Pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Saya menyadari bahwa Tugas Akhir ini jauh dari kesempurnaan, untuk itu kritik dan saran yang membangun dari semua pihak sangat saya harapkan untuk perbaikan dimasa yang akan datang. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 25 Juni 2010

Penulis

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

---

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

Nama : Ronald Hasian Manurung

NPM : 0606075252

Program Studi : Sarjana

Departemen : Metalurgi dan Material

Fakultas : Teknik

Jenis Karya : Skripsi

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

**STUDI PENGARUH DEFORMASI SEARAH PROSES CANAI HANGAT  
TERHADAP MORFOLOGI BUTIR FERIT DAN KETAHANAN KOROSI  
PADA BAJA KARBON 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 : 25 Juni 2010

Yang menyatakan

(Ronald Hasian Manurung)

## ABSTRAK

Name : Ronald Hasian Manurung  
Study Program : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul : **Studi Pengaruh Deformasi Searah Proses Canai Hangat Terhadap Morfologi Ferit Dan Ketahanan Korosi Pada Baja Karbon SS 400**

Baja karbon rendah banyak digunakan di industri pipa, dimana dipersyaratkan memiliki sifat mekanik yang baik. Sifat mekanik bergantung pada struktur mikro logamnya. Baja karbon rendah dipasaran memiliki struktur mikro ferit dengan sifat mekanik rendah. Penelitian ini bertujuan mendapatkan struktur mikro ferit dengan butir lebih halus, diharapkan akan meningkatkan kekuatan dan ketangguhan baja ini. Penelitian dilakukan pada baja karbon rendah 0,12 % C dengan pemanasan temperatur 1100 °C ditahan selama 20 menit, diturunkan pada 650 °C dan ditahan selama 5 jam. Kemudian dilakukan proses pencanaian pada 600 °C dengan derajat deformasi 0 % untuk spesimen A, 50 % untuk spesimen B dan 70 % untuk spesimen C. Kemudian dilakukan pengujian metalografi, kekerasan, pengujian korosi. Hasil penelitian menunjukkan struktur mikronya ferit dan semakin kecil butir maka kekerasan dan ketahanan korosinya semakin baik. Butir terkecil pada spesimen C sebesar 12,77 µm memiliki kekerasan 167,755 VHN dan laju korosi 5,055 mpy.

Kata kunci:  
baja karbon rendah, ukuran butir ferit, canai hangat, kekerasan, laju korosi.

## ABSTRACT

Name : Ronald Hasian Manurung  
Study Program : Metallurgy and Materials Engineering  
Title : **Effect of Single Pass Deformation in Warm Rolling Process Toward Ferrite Morphology and Corrosion Resistance of Low Carbon Steel SS 400**

Low carbon steel mainly used in pipe industries, which have good mechanical requirement. It, which is in market, has ferrite microstructure with poor mechanical properties. This experiment purposes to get fine grain of ferrite microstructure, so that will increase strength and toughness of steel. It uses low carbon steel 0.12 % C with austenized at 1100 °C for 20 min, then cooled to and maintained at 650 °C for 5 hr. After cooling at 600 °C, specimens were rolled in range 0 %, 50 %, and 70 %. The testing used Vickers hardness test, corrosion test. The microstructure of specimens is ferrite. The results showed that the finest grain in specimen C has diameter 12,77 µm, get maximum hardness 167,755 VHN and corrosion rate 5,055 *mpy*.

Keywords : low carbon steel, grain size of ferrite, warm rolling.

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	<b>i</b>
<b>HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS</b> .....	<b>ii</b>
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	<b>iii</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>iv</b>
<b>HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI</b> .....	<b>v</b>
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>vi</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>vii</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>viii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>x</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xii</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	<b>xiii</b>
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Ruang Lingkup Penelitian.....	4
1.5 Sistematika Penulisan .....	4
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>6</b>
2.1 Metalurgi Baja Karbon .....	6
2.1.1 Baja Karbon Rendah .....	6
2.2 Pengaruh Deformasi Plastis Terhadap Struktur Mikro.....	7
2.3 Deformasi Dengan Slip.....	8
2.4 Pengaruh Besar Butir Terhadap Sifat Struktural Baja.....	9
2.5 Mekanisme Penguatan Dengan Penghalusan Butir.....	10
2.6 <i>Recovery</i> , Rekristalisasi, dan Pertumbuhan Butir .....	11
2.6.1 <i>Recovery</i> .....	12
2.6.2 Rekristalisasi.....	14
2.6.3 Pertumbuhan Butir .....	17
2.7 Pengaruh Waktu Tahan Terhadap Besar Butir Ferit .....	17
2.8 <i>Thermo-Mechanical Controlled Process (TMCP)</i> .....	18
2.9 <i>Warm Working</i> .....	21
2.10 Metode Perhitungan Besar Butir Ferit.....	22
2.10 Korosi .....	24
2.10 Pengertian Korosi.....	24
2.10 Korosi Air laut .....	25
2.10 Pengaruh <i>Heat Treatment</i> Pada Korosi.....	26
2.10 Pengaruh Derajat Deformasi Pada Laju Korosi.....	26
2.10 Pengaruh Deformasi Pada Laju Korosi .....	27
2.10 Korosi Polarisasi .....	28
<b>BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	<b>29</b>
3.1 Diagram Alir Penelitian .....	29

3.2 Alat dan Bahan .....	30
3.2.1 Alat.....	30
3.2.2 Bahan .....	30
3.3 Prosedur Penelitian.....	31
3.3.1 Pemilihan Material .....	31
3.3.2 Preparasi Sampel.....	31
3.3.3 Proses Termomekanikal (TMCP) dan <i>Warm Working</i> .....	31
3.3.4 Uji Metalografi .....	35
3.3.5 Uji Kekerasan .....	36
3.3.6 Uji Korosi .....	37
<b>BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>38</b>
4.1 Hasil Pengujian .....	38
4.1.1 Hasil Pengukuran Dimensi Spesimen .....	38
4.1.2 Hasil Perhitungan Besar Butir Spesimen .....	38
4.1.3 Hasil Pengujian Korosi Polarisasi.....	39
4.2 Hasil Pengamatan Metalografi.....	39
4.2.1 Spesimen Awal .....	39
4.2.2 Spesimen A.....	40
4.2.3 Spesimen B .....	41
4.2.4 Spesimen C .....	42
4.3 Pembahasan.....	43
4.3.1 Pengamatan Struktur Mikro Setelah TMCP.....	43
4.3.2 Hubungan Besar Butir Terhadap Kekerasan .....	45
4.3.3 Hubungan Deformasi Terhadap Kekerasan.....	46
4.3.4 Hubungan Derajat Deformasi Terhadap Kekerasan .....	47
<b>BAB 5 KESIMPULAN .....</b>	<b>49</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>50</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>52</b>

## DAFTAR GAMBAR

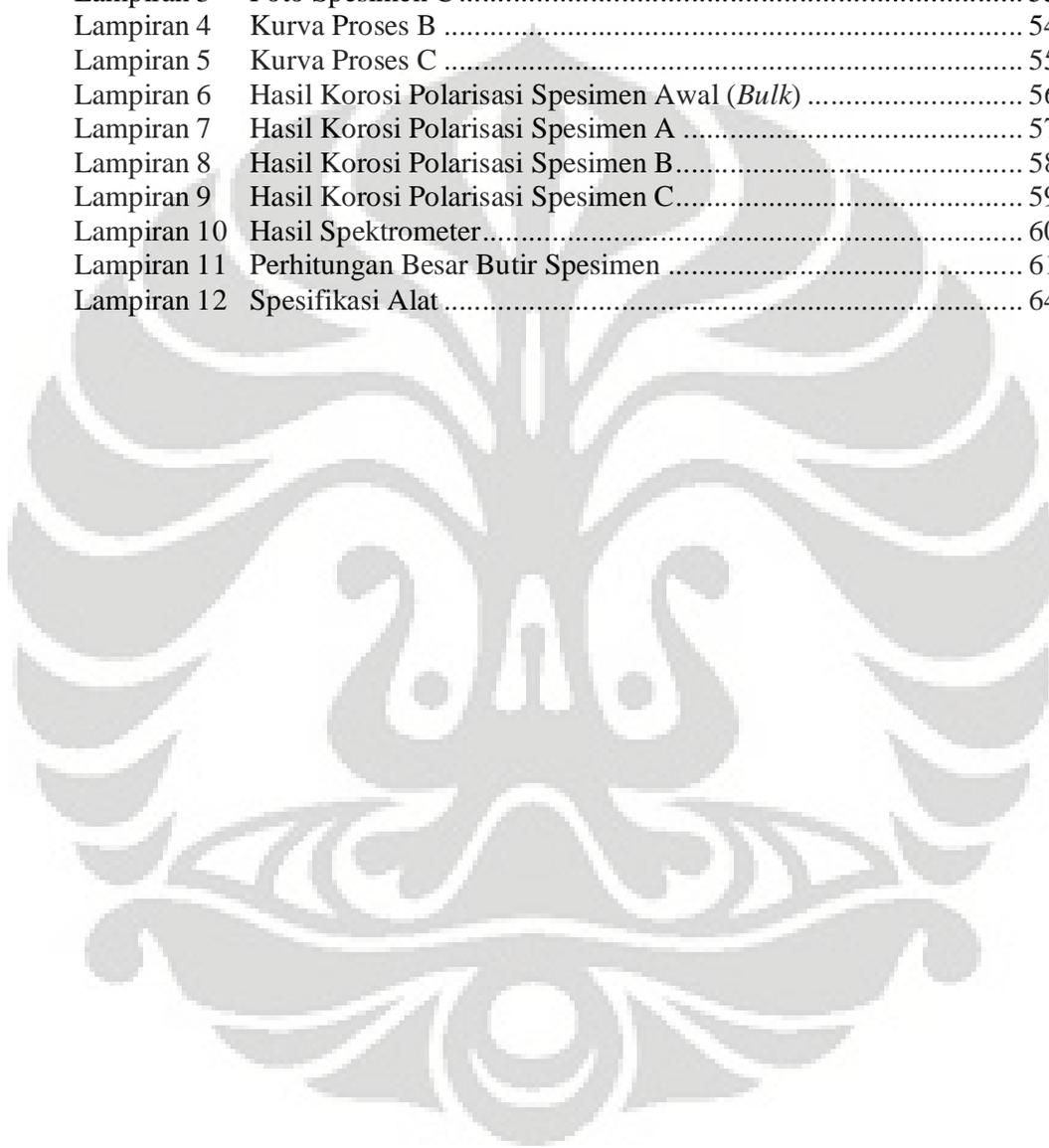
Gambar 2.1	Transformasi Fasa pada Baja Karbon .....	7
Gambar 2.2.	Ilustrasi Batas Butir dan Pergerakan Dislokasi.....	10
Gambar 2.3.	Pengaruh Besar Butir terhadap Nilai Kekuatan.....	11
Gambar 2.4.	Skematis Proses <i>Recovery</i> , Rekristalisasi dan Pertumbuhan Butir	13
Gambar 2.5.	Pembentukan Sub-butir .....	14
Gambar 2.6.	Perbandingan Antara Rekristalisasi Dinamik dan Statik .....	16
Gambar 2.7.	Perbandingan Besar Butir Antara Pengerolan Konvensional (Kiri) dan TMCP (Kanan) .....	18
Gambar 2.8.	Perbandingan Antara Jalur Proses Konvensional dan TMCP. Bagian Garis 'Zig-Zag' mengindikasikan Proses <i>Rolling</i> .....	19
Gambar 2.9.	Evolusi Struktur Mikro Selama Proses TMCP .....	20
Gambar 2.10.	Perbedaan Struktur Mikro Antara Proses Konvensional dan Proses TMCP .....	21
Gambar 2.11.	Metode <i>Intercept</i> , dengan Menggunakan Garis Berbentuk Lingkaran dengan Total Panjang Garis 500 Mm, dengan Perbesaran 100x .....	23
Gambar 3.1.	Diagram Alir Proses Penelitian.....	29
Gambar 3.2.	Ilustrasi Benda Uji Dan Pemasangan Termokopel .....	31
Gambar 3.3.	Siklus Proses Spesimen A .....	32
Gambar 3.4.	Siklus Proses Spesimen B .....	32
Gambar 3.5.	Siklus Proses Spesimen C .....	33
Gambar 3.6.	Dapur <i>Eurotherm</i> yang Digunakan untuk Proses Pemanasan Ulang .....	34
Gambar 3.7.	Mesin <i>Roll</i> yang Digunakan untuk Proses Canai Hangat.....	34
Gambar 3.8.	Data <i>Acquisition</i> yang Digunakan Selama Proses Canai Panas ....	35
Gambar 3.9.	Tampilan pada Layar Komputer pada Saat Proses Canai Hangat .	35
Gambar 3.10.	Uji kekerasan metode Vickers .....	36
Gambar 4.1.	Foto struktur mikro ferit (terang) dan perlit (gelap) pada spesimen awal ( <i>bulk</i> ), etsa Nital 2% perbesaran 500x .....	39
Gambar 4.2.	Foto struktur mikro ferit (terang) dan perlit (gelap) pada spesimen dengan proses pemanasan pada 1100 °C , lalu turun pada 650 °C dan ditahan selama 5 jam tanpa deformasi, etsa Nital 3%. (a) Perbesaran 200x ; (b) Perbesaran 100x .....	40
Gambar 4.3.	Foto struktur mikro ferit (terang) dan perlit (gelap) pada spesimen dengan proses pemanasan pada 1100 °C, turun pada 650 °C dan ditahan selama 5 jam, suhu turun pada 600 °C dilakukan deformasi 50 %, etsa Nital 3%. (a) Perbesaran 200x ; (b) Perbesaran 100x. .	41
Gambar 4.4.	Foto struktur mikro ferit (terang) dan perlit (gelap) pada spesimen dengan proses pemanasan pada 1100 °C, turun pada 650 °C dan ditahan selama 5 jam, suhu turun pada 600 °C dilakukan deformasi 70 %, etsa Nital 3%. (a) Perbesaran 200x ; (b) Perbesaran 100x.....	42
Gambar 4.5.	Grafik Hubungan Besar Butir dengan Kekerasan.....	45

Gambar 4.6. Grafik Hubungan Derajat Deformasi Terhadap Nilai Kekerasan pada Ketiga Spesimen .....	47
Gambar 4.7. Hubungan Laju Korosi Terhadap Derajat Deformasi pada Ketiga Spesimen.....	48



## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Foto Spesimen A.....	52
Lampiran 2	Foto Spesimen B.....	52
Lampiran 3	Foto Spesimen C.....	53
Lampiran 4	Kurva Proses B.....	54
Lampiran 5	Kurva Proses C.....	55
Lampiran 6	Hasil Korosi Polarisasi Spesimen Awal ( <i>Bulk</i> ).....	56
Lampiran 7	Hasil Korosi Polarisasi Spesimen A.....	57
Lampiran 8	Hasil Korosi Polarisasi Spesimen B.....	58
Lampiran 9	Hasil Korosi Polarisasi Spesimen C.....	59
Lampiran 10	Hasil Spektrometer.....	60
Lampiran 11	Perhitungan Besar Butir Spesimen.....	61
Lampiran 12	Spesifikasi Alat.....	64



## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Komposisi dari baja SS 400 dalam % berat .....	30
Tabel 4.1. Data Hasil Pengukuran Dimensi Spesimen .....	38
Tabel 4.2. Data Perhitungan Besar Butir Spesimen.....	38
Tabel 4.3. Data Pengukuran Laju Korosi Spesimen .....	39
Tabel 4.4. Data Pengukuran Hasil Kekerasan Spesimen .....	39



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar belakang

Baja memegang peranan penting sebagai material rekayasa dalam peradaban kemajuan manusia. Baja karbon, material rekayasa yang paling banyak digunakan, diperkirakan penggunaannya mencapai 85% total produksi tahunan di seluruh dunia<sup>[1]</sup>. Baja sering digunakan karena terbuat dari mineral yang melimpah di bumi dalam bentuk  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  dan energi yang digunakan untuk mengkonversi  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  menjadi Fe relatif kecil sehingga biaya produksinya cukup murah. Selain itu, baja dapat dibuat dalam banyak ragam bentuk mikrostruktur yang akhirnya menghasilkan ragam sifat mekanik yang variatif. Struktur mikro yang terbentuk dalam baja karbon sangat bergantung pada kandungan karbon dan perlakuan panas atau *thermal history* yang diaplikasikan pada material tersebut. Bentuk struktur dan tiang untuk bangunan dan jembatan, pelat untuk jaringan pipa, baut, mur, dan industri otomotif merupakan aplikasi utama untuk baja karbon rendah<sup>[2]</sup>.

Banyak industri menggunakan baja, salah satunya digunakan pada industri minyak dan gas bumi. Baja yang digunakan pada industri minyak dan gas bumi mudah mengalami korosi karena ketahanan korosi terbatas. Jaringan pipa migas di lingkungan air laut sangat rentan terhadap serangan korosi, sementara pipa baja karbon yang digunakan untuk menyalurkan minyak bumi mentah dapat mengalami korosi merata dan atau korosi setempat atau lokal korosi dengan adanya larutan *brine* dengan laju korosi yang bergantung pada konsentrasi ion  $\text{Cl}^-$ , kation logam, dan ion-ion agresif lain yang ada dalam fluida atau di lingkungannya<sup>[3]</sup>.

Permasalahan yang sering terjadi pada baja yang diaplikasikan pada industri tersebut adalah terjadinya kerusakan yang berupa retakan sepanjang pipa karena kurang memadainya sifat mekanik yang dimiliki material tersebut. Bersamaan dengan perkembangan tersebut maka akan terjadi peningkatan kebutuhan terhadap baja yang memiliki karakteristik dan sifat yang sesuai dengan kondisi kerja pada saat diaplikasikan. Selain itu, faktor efisiensi energi pun kini menjadi bagian dari

perkembangan. Karena perkembangan teknologi kini bukan hanya sekedar kebutuhan teknis saja tetapi juga ekonomis. Mengingat keadaan industri manufaktur baja Indonesia yang saat ini masih menggunakan teknologi lama dan ketersediaan bahan baku yang masih minim, perlu dilakukan perkembangan dalam penelitian agar dengan menggunakan alat yang ada dan bahan baku yang tersedia dapat diproduksi baja yang sesuai dengan permintaan saat ini.

Penggunaan Baja Karbon Rendah (%wtC < 0,3 %) masih mendominasi pada dunia industri terutama industri pipa. Karena memiliki nilai ekonomis yang tinggi dibanding baja lainnya. Biasanya penggunaan baja ini dalam bentuk hasil pengerolan, teranilisasi atau kondisi normalisasi. Sifat mekanik seperti kekuatan dan ketangguhan dari baja ini bergantung pada mikrostrukturnya. Struktur ferit merupakan struktur yang sering dijumpai pada baja karbon rendah. Kekuatan atau sifat mekanik dari struktur ferit ini dipengaruhi besar butir ferit<sup>[1]</sup>. Salah satu mekanisme penguatan logam yaitu dengan mereduksi ukuran butir atau penghalusan butir (*grain refinement*). Batas butir berfungsi sebagai pembatas pergerakan dislokasi (Totten dan Howes 1997). Jika ukuran butir mengecil maka jumlah penghalang akan naik sehingga kekuatan juga akan naik. Beberapa metode yang digunakan industri untuk memperhalus struktur butir ferit ini, yaitu: modifikasi komposisi kimia, *normalizing*, deformasi plastis melalui pencanaian terkendali, pendinginan cepat, dan pengerjaan hangat / *warm working*.

## 1.2 Perumusan Masalah

Masalah yang akan dikaji dalam penelitian ini adalah untuk melihat pengaruh deformasi searah 50 % dan 70 % terhadap morfologi butir ferit dalam proses TMCP pada spesimen baja karbon SS 400. Pada penelitian ini spesimen akan diuji dengan variasi deformasi searah yang sebelumnya telah dikembangkan oleh para peneliti terdahulu, kemudian akan dibandingkan untuk mendapatkan material dengan sifat kekuatan, ketangguhan dan ketahanan korosi yang lebih baik.

### 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk :

1. Mengamati morfologi ferit sesudah proses TMCP dan *Warm Working*.
2. Mengamati pengaruh variasi deformasi terhadap evolusi struktur mikro sesudah proses TMCP dan *Warm Working*.
3. Mengamati pengaruh waktu tahan terhadap evolusi struktur mikro sesudah proses TMCP dan *Warm Working*.
4. Mengetahui pengaruh morfologi struktur mikro sesudah proses TMCP terhadap kekerasan dan ketahanan korosi pada spesimen tersebut.

### 1.4 Ruang Lingkup Penelitian

#### 1.4.1 Material

Penelitian menggunakan pelat SS 400 dengan komposisi C 0.12 wt%; Mn 0.636 wt%; Si 0.198 wt%; Al 0.037 wt%; P 0.008 wt% dan S <0.003 wt%.

#### 1.4.2 Parameter Penelitian

Parameter yang divariabelkan:

✓ Temperatur Akhir Canai

Temperatur akhir canai dilakukan pada temperatur 600 °C.

✓ Pemanasan Ulang

Proses pemanasan dilakukan pada temperatur 1100 °C selama 20 menit, kemudian suhu turun hingga 650 °C, lalu dideformasi pada suhu 600 °C secara searah.

✓ Waktu Tahan

Proses pemanasan dilakukan pada temperatur 1100 °C selama 20 menit, kemudian suhu turun hingga 650 °C dan ditahan selama 5 jam, lalu dideformasi pada suhu 600 °C secara searah.

✓ Metode Deformasi

Deformasi dilakukan dengan proses canai metode searah (*single pass rolling*) pada deformasi 50 % dan 70 %.

### 1.4.3 Pengujian yang dilakukan

Setelah proses TMCP, spesimen dilakukan pengujian dengan menggunakan beberapa metode yaitu:

- Ø Uji Metalografi : metoda pengujian ini dilakukan untuk mendapatkan struktur mikro dari spesimen.
- Ø Uji Kekerasan : metoda pengujian kekerasan yang digunakan sesuai dengan ASTM E92.
- Ø Uji Ketahanan Korosi : metoda pengujian ketahanan korosi yang digunakan adalah metode polarisasi (ASTM G102).

## 1.5 Sistematika Penulisan

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

### Bab 1 Pendahuluan

Membahas mengenai latar belakang dari penelitian yang dilakukan, tujuan penelitian, ruang lingkup penelitian, dan sistematika penulisan laporan.

### Bab 2 Dasar Teori

Bab ini akan dijelaskan dasar teori mengenai dasar teori material baja karbon rendah / low carbon steels, pengaruh deformasi plastis, pengaruh besar butir terhadap sifat struktural, mekanisme penguatan dengan penghalusan butir, proses rekoveri, rekristalisasi dan pertumbuhan butir, proses TMCP, pengerjaan hangat / *warm working*, dan proses korosi.

### Bab 3 Metodologi Penelitian

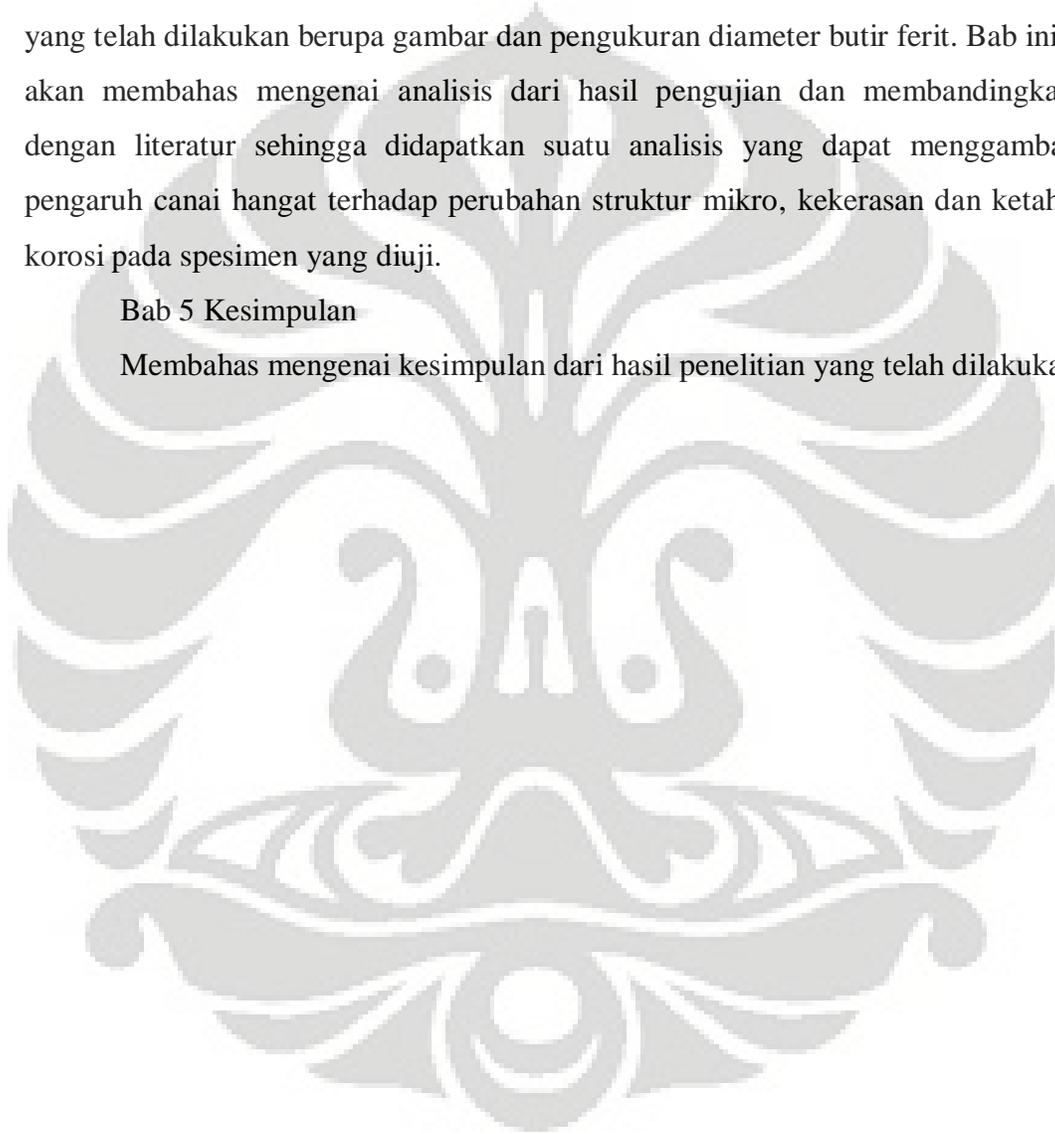
Bab ini memberikan penjelasan tentang hal-hal yang dilakukan selama penelitian dilakukan, menyangkut pengumpulan data dan informasi, preparasi sampel, diagram alir proses hingga pengujian mikrostruktur.

#### Bab 4 Hasil Pengujian dan Pembahasan

Akan dibahas mengenai pengolahan data yang didapat dari hasil pengujian yang telah dilakukan berupa gambar dan pengukuran diameter butir ferit. Bab ini juga akan membahas mengenai analisis dari hasil pengujian dan membandingkannya dengan literatur sehingga didapatkan suatu analisis yang dapat menggambarkan pengaruh canai hangat terhadap perubahan struktur mikro, kekerasan dan ketahanan korosi pada spesimen yang diuji.

#### Bab 5 Kesimpulan

Membahas mengenai kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan.



## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Metalurgi Baja Karbon

Baja karbon adalah logam paduan yang merupakan kombinasi dari besi dan karbon dan paduan elemen lain yang jumlahnya tidak terlalu banyak untuk dapat mempengaruhi sifatnya<sup>[4]</sup>. Komposisi baja karbon biasanya mengandung tidak lebih dari 1.0% karbon (C) serta sejumlah kecil paduan seperti mangan (Mn) dengan kadar maksimal 1,65%, silikon (Si) dengan kadar maksimal 0,6% dan tembaga (Cu) dengan kadar maksimal 0,6%. Baja dengan kadar karbon yang rendah memiliki sifat yang sama dengan besi, lunak dan mudah dibentuk.

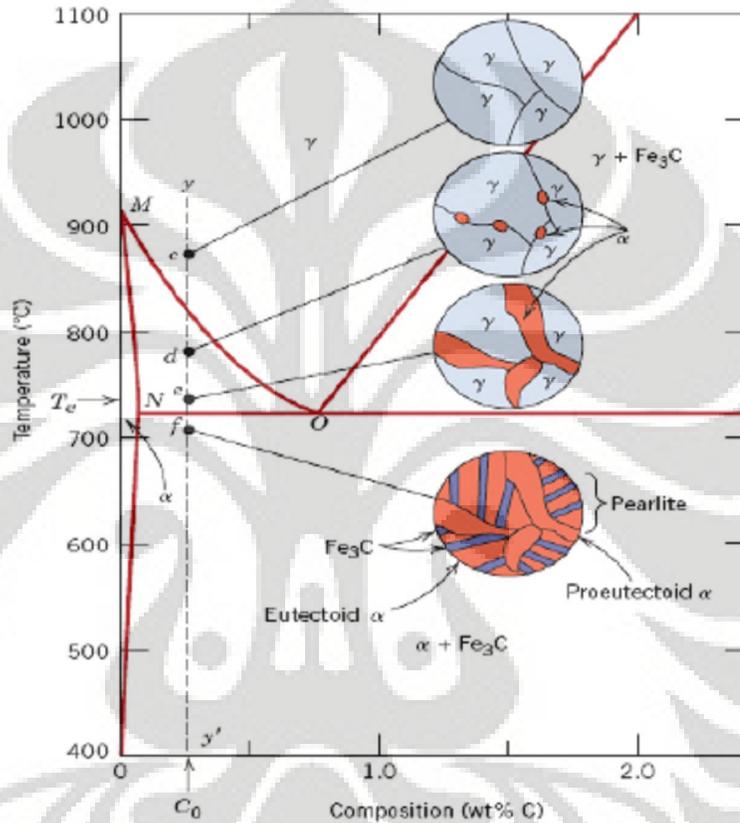
Meningkatnya kandungan karbon menjadikan logam lebih keras dan kuat namun keuletannya berkurang dan lebih sulit untuk di las. Baja karbon dapat diklasifikasikan menjadi tiga bagian menurut kadar karbon yang dikandungnya, yaitu baja karbon rendah dengan kadar karbon kurang dari 0,3 %, baja karbon sedang mengandung 0,3-0,6 % karbon, dan baja karbon tinggi mengandung 0,6-1,0 % karbon.

##### 2.1.1 Baja Karbon Rendah

Baja jenis ini mengandung kadar karbon (C) hingga 0.30%. Kategori terbesar pada baja jenis ini adalah produk pengerolan/canai, misal *sheet*, biasanya hasil dari kondisi pengerolan canai dingin (*cold-rolled*) dan proses anil. Kandungan karbonnya yang rendah dan struktur mikronya yang terdiri dari fasa ferit dan perlit menjadikan baja karbon rendah bersifat lunak dan kekuatannya lemah namun keuletan dan ketangguhannya sangat baik. Baja karbon rendah kurang responsif terhadap perlakuan panas untuk mendapatkan struktur mikro martensit. Oleh karena itu untuk meningkatkan kekuatan dari baja karbon rendah dapat dilakukan dengan proses canai dingin maupun karburisasi<sup>[1]</sup>.

Kadar karbon untuk baja dengan kemampuan bentuk yang baik (*high formability*) sangatlah rendah, kurang dari 0.10% C, dengan kadar mangan maksimal

hingga 0.4% Mn. Penggunaannya digunakan pada *automobile body panels*, *tin plate*, dan produk kawat. Untuk produk baja struktural, kadar karbon ditingkatkan hingga kira-kira 0.30%, dengan kadar mangan yang lebih besar hingga 1.5%. Material ini dapat digunakan untuk *stamping*, *forging*, *seamless tube*, dan *boiler plate*. Skematik perubahan fasa pada baja karbon rendah dapat dilihat pada Gambar 2.1



Gambar 2.1 Transformasi fasa pada Baja karbon<sup>[1]</sup>

## 2.2 Pengaruh Deformasi Plastis Terhadap Struktur Mikro

Deformasi plastis sering diklasifikasikan sebagai perlakuan yang selalu dilakukan pada pengerjaan panas atau pengerjaan dingin terhadap logam. Yang membedakan diantara keduanya adalah pada pengerjaan dingin proses deformasi plastis tidak diikuti proses rekristalisasi. Sedangkan pada pengerjaan panas terjadi proses rekristalisasi yang berlangsung secara bersamaan dengan proses deformasi. Deformasi plastis merupakan hasil dari pergerakan dari salah satu kristal yang disebut dislokasi (ASM 1973). Pada logam yang dideformasi plastis terdapat sejumlah

dislokasi yang terjadi pada kristal-kristalnya. Kepadatan dislokasi dapat seragam atau memiliki nilai yang jauh berbeda dari satu titik ke titik yang lain. Kevariasian dislokasi memberikan peningkatan terhadap kevariasian *large-scale deformation*, termasuk slip dan *twinning*. Bidang kristalografi dimana garis dislokasi melintang dikenal dengan bidang slip. Garis-garis slip nampak seperti jejak pada bidang slip, yang mana dapat dilihat pada permukaan baja (ASM 1973). Garis slip menandakan terjadi transfer material pada sisi-sisi yang berlawanan terhadap bidang slip. *Planer slip* menunjukkan garis slip berbentuk lurus (*straight*), sedangkan *wavy slip* menunjukkan garis slip berbentuk secara tak beraturan. Garis *wavy slip* mengindikasikan rangkaian pemutusan mikroskopik pada dua atau lebih bidang *intersecting slip* seperti yang disebabkan oleh penyimpangan *cross slip* pada *screw dislocation*.

Deformasi dan slip pada material polikristalin (suatu susunan yang tersusun lebih dari satu kristal tunggal seperti baja) terlihat sedikit kompleks (Callister 1997). Untuk orientasi kristalografi yang acak pada sejumlah butir, arah dari slip akan berbeda dari butir yang satu dengan butir yang lain. Hal ini terjadi karena masing-masing pergerakan dislokasi yang terjadi pada slip sistem memiliki orientasi masing-masing. Deformasi plastis sebaiknya terjadi pada produksi bidang slip dan pemanjangan butir sepanjang arah dimana spesimen mengalami pemanjangan (Callister 1997).

### 2.3 Deformasi dengan slip

Slip merupakan mekanisme terjadinya deformasi yang paling sering dijumpai. Slip menggambarkan pergerakan yang besar pada bagian kristal yang relatif terhadap yang lain sepanjang bidang kristalografi dan dalam arah kristalografi. Slip terjadi bila sebagian dari kristal tergeser relatif terhadap bagian kristal yang lain sepanjang bidang kristalografi tertentu. Bidang tempat terjadinya slip disebut bidang slip (*slip plane*) dan arah pergeserannya pada umumnya pada bidang slip disebut arah slip (*slip direction*). Slip terjadi pada bidang slip dan arah slip yang paling padat atom, karena untuk menggeser atom pada posisi ini memerlukan energi paling kecil. Terjadinya

slip dengan cara bergesernya garis dislokasi dapat digambarkan dengan analogi gerakan permadani atau karpet<sup>[5]</sup>. Untuk menggeser karpet yang telah digelarkan di lantai dengan menarik sekaligus tentu akan sangat berat. Akan lebih mudah, bila mula-mula dibuat lekukan pada tepi karpet (analog dengan garis dislokasi) dan mendorong tekukan tersebut hingga mencapai ujung kain dari karpet. Bila slip terjadi disebelah butir kristal maka slip akan diteruskan kebutir berikutnya dimana arah bidang slip akan berbeda sehingga dislokasi akan tertahan pada batas butir. Untuk membuat slip berikutnya pada bidang yang sama akan memerlukan gaya yang lebih besar. Oleh karena itu maka logam yang telah mengalami deformasi akan bertambah kuat dan keras.

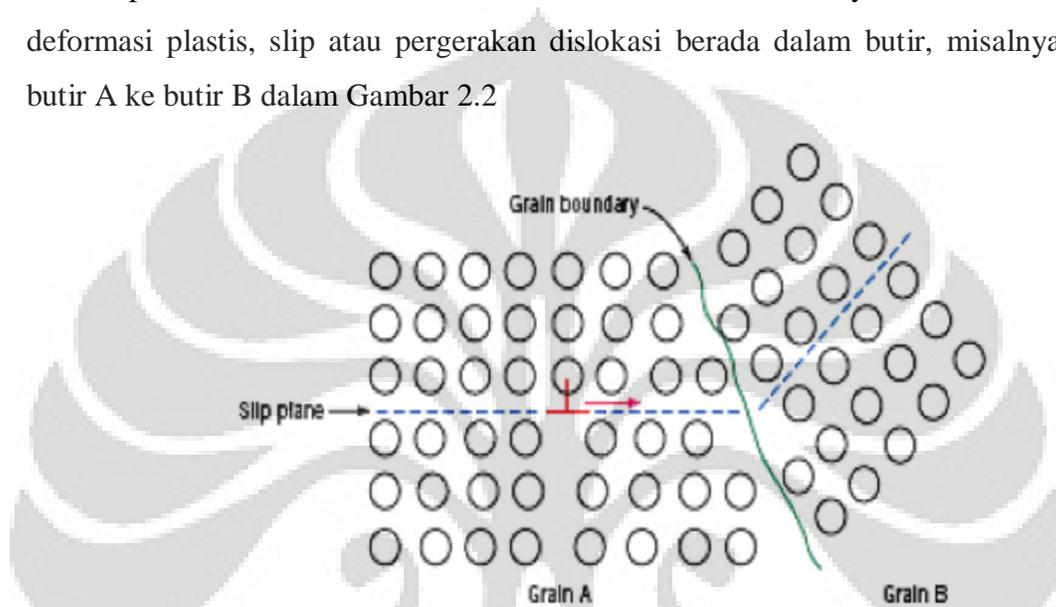
#### **2.4 Pengaruh Besar Butir Terhadap Sifat Struktural Baja**

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

1. Secara umum, pada baja ukuran butir besar tidak diinginkan seperti ukuran butir halus (kecil) karena mempengaruhi terhadap nilai kekuatan yang lebih rendah dan dapat menurunkan nilai elastisitasnya. Kecenderungan untuk terjadi perpatahan juga cenderung terjadi peningkatan pada ukuran struktur butir yang kasar (Smith 1993).
2. Baja dengan butir halus memiliki lebih banyak batas-batas butiran yang berfungsi sebagai hambatan untuk dislokasi. Karena itu, kepadatan yang lebih tinggi dari batas butir akan menghasilkan *yield* dan *tensile stress* yang lebih tinggi (Smith 1993). Bidang regangan *fracture toughness* biasanya meningkat dengan pengurangan ukuran butiran ketika komposisi dan variabel struktur mikro lainnya dijaga konstan (Callister 1997). Pengurangan ukuran butiran menurunkan temperatur transisi secara signifikan, yang merupakan temperatur yang mengubah dari elastis menjadi getas (Totten dan Howes 1997). Oleh karena itu, penurunan ukuran butiran biasanya akan meningkatkan kekuatan dan ketangguhan baja.

## 2.5 Mekanisme Penguatan Dengan Penghalusan Butir

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



**Gambar 2.2** Ilustrasi Batas Butir dan Pergerakan Dislokasi<sup>[1]</sup>

Batas butir bertindak sebagai penghalang pergerakan dislokasi karena dua alasan:

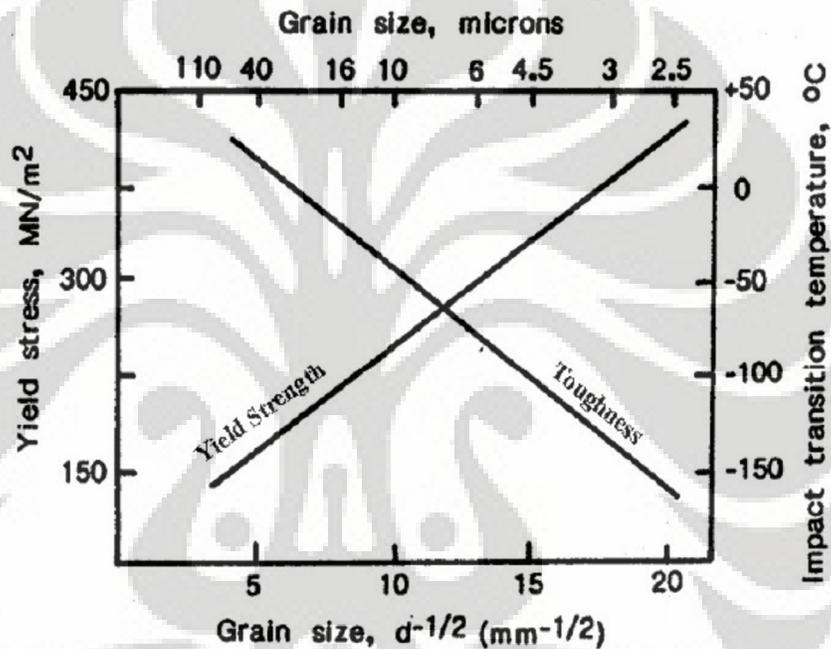
1. Ketidaksamaan *arrangement* atom dalam area batas butir akan menghasilkan berubahnya *slip plane* dari butir satu ke butir lainnya.
2. Karena dua butir tersebut memiliki orientasi yang berbeda, dislokasi yang menuju butir B harus merubah arah pergerakannya (karena perbedaan orientasi tersebut mengakibatkan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

Untuk mengetahui pengaruh ukuran butir dari teori diatas kita buktikan dengan persamaan Hall Petch dengan  $d$  adalah diameter butir rata rata, dan  $k_y$  adalah konstanta untuk material tertentu. Persamaan 2.1 ini tidak berlaku untuk

material polikristal dengan butir yang sangat besar dan dengan butir yang amat sangat halus.

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

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



Gambar 2.3 Pengaruh Besar Butir terhadap Nilai Kekuatan<sup>[6]</sup>

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

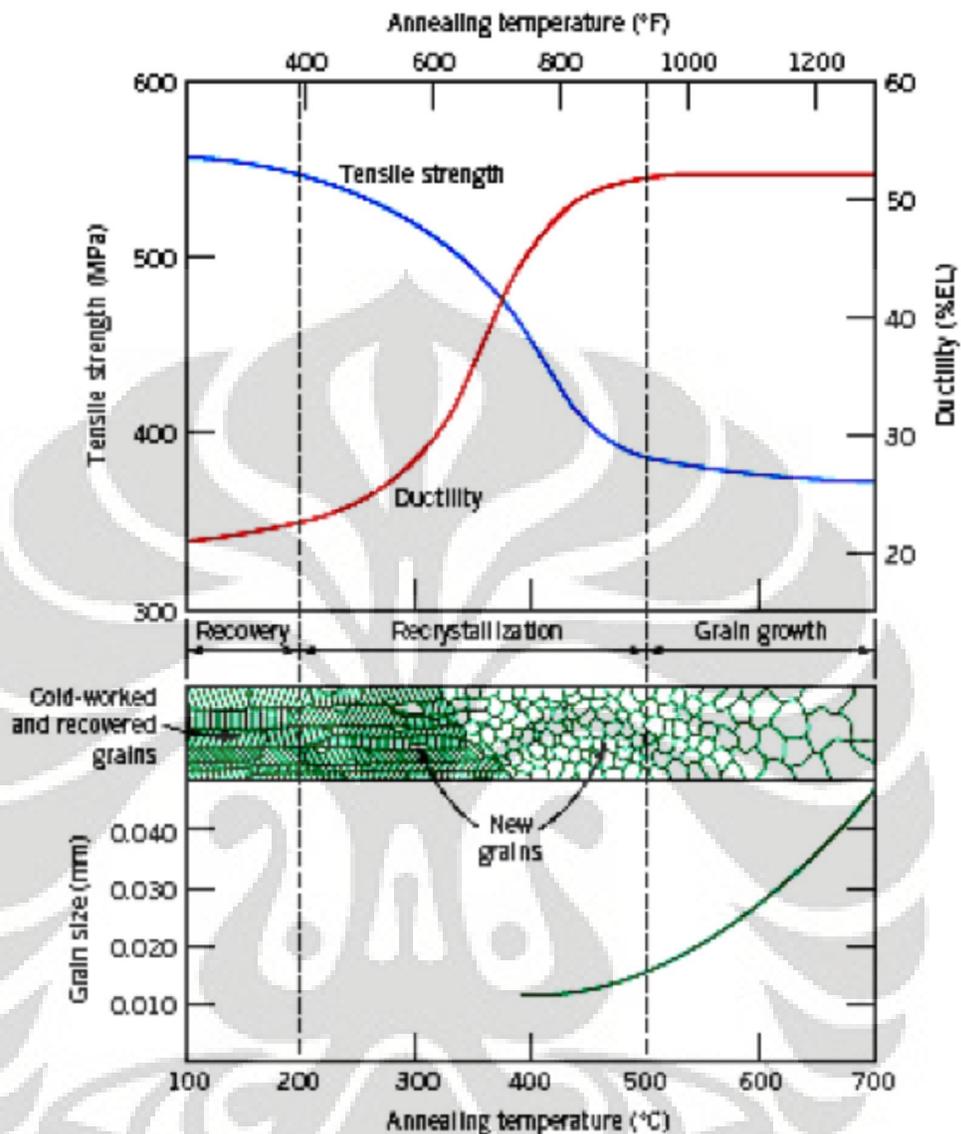
## 2.6 Recovery, Rekristalisasi, dan Pertumbuhan Butir

Material polikristalin yang mengalami deformasi plastis menunjukkan terjadinya perubahan pada bentuk butir, pengerasan regangan (*strain hardening*) dan peningkatan pada kepadatan dislokasi (Callister 1997). Beberapa sisa energi internal

disimpan dalam material sebagai energi regangan (*strain energy*), yang mana berhubungan dengan area tegangan (*tensile*), tekan (*compressive*), dan geser (*shear*) disekeliling dislokasi yang baru terbentuk. Kecenderungan sifat penyimpanan energi internal tersebut dapat dihilangkan setelah tahap pengerjaan dingin dengan perlakuan panas seperti proses anil. Penghilangan energi tersebut dilakukan dengan dua proses berbeda yang terjadi pada temperatur yang dinaikkan kemudian diidentifikasi sebagai proses *recovery* dan rekristalisasi, yang juga dimungkinkan untuk pertumbuhan butir.

### 2.6.1 *Recovery*

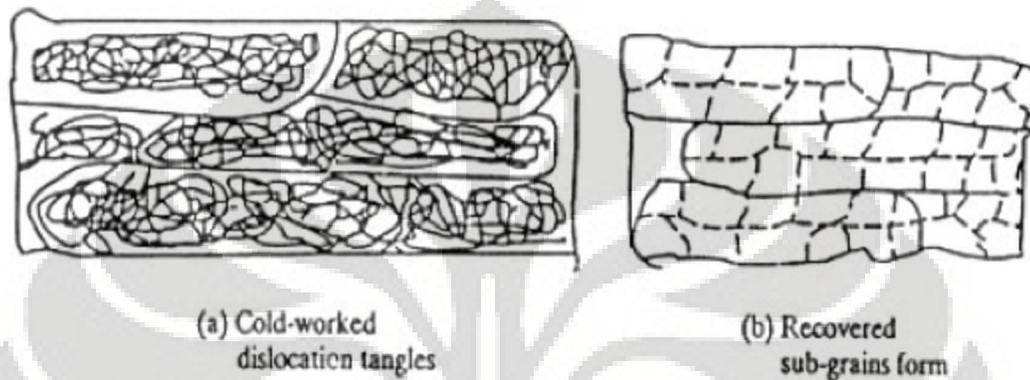
*Recovery* adalah proses penghilangan energi internal (*internal strain energy*) yang tersimpan yang diperoleh selama proses pengerjaan dingin melalui perlakuan panas. Selama proses ini, sifat fisik dan mekanik dari baja pengerjaan dingin akan kembali seperti sebelum dilakukan pengerjaan dingin (ASM 1973). Proses *recovery* adalah proses pertama yang terjadi setelah deformasi. Pada tahapan ini tidak ada perubahan yang cukup berarti pada sifat mekanis dari material seperti yang terlihat pada Gambar 2.4.



**Gambar 2.4** Skematis Proses *Recovery*, Rekristalisasi dan Pertumbuhan Butir<sup>[1]</sup>

Perubahan struktur mikro dari material selama tahapan *recovery* ini tidak melibatkan pergerakan batas butir dengan sudut yang besar. Untuk benda kerja yang butirnya memipih setelah canai dingin, tidak terlihat perubahan pada butir tersebut. Namun pada tingkatan submikroskopis, terjadi perubahan pada titik cacat dan klusternya, penghilangan dan pengaturan ulang dislokasi, serta pembentukan sub-butir dan pertumbuhannya. Perubahan mikrostruktural ini akan melepas sebagian besar tegangan dalam dan tahapan *recovery* ini dipergunakan untuk proses *stress-*

*relieving*. Hilangnya beberapa dislokasi mengakibatkan berkurangnya kekuatan dari material, tetapi hilangnya dislokasi ini diimbangi dengan pembentukan sub-butir, yaitu butir dengan batas butir bersudut kecil ( $2-3^\circ$  misorientasi). Dari kedua efek yang dijelaskan tersebut didapat kekuatan material yang sama setelah dilakukan pengerjaan dingin.



Gambar 2.5 Pembentukan Sub-butir

Laju *recovery* adalah proses yang dipengaruhi yang teraktifasi melalui panas yang mana akan menurun dengan penambahan waktu dan penurunan temperatur (Bryne 1965). *Temperature grain recovery* (TGR) memiliki korelasi dengan temperatur rekristalisasi (TR) dan temperatur lebur (TM) dari material yang sama. Untuk meperjelas korelasi tersebut dapat dilihat melalui persamaan 2.2 (Totten dan Howes 1997).

$$TGR = TR + 300 = 0.4TM + 300 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (2.2)$$

Selama perlakuan panas, sangat sulit untuk menentukan secara jelas antara *recovery* dan rekristalisasi karena kedua proses tersebut sering terjadi *overlap*. Secara khusus, terdeteksi bahwa hanya terjadi penurunan yang sedikit pada kekuatan dan kekuatan selama proses *recovery*. Umumnya, peningkatan kembali sifat mekanik terhadap proses anil diperoleh satu per lima dengan proses *recovery* (Bryne 1963).

### 2.6.2. Rekristalisasi

Ketika tahap *recovery* akan berakhir, pembentukan inti dari butir baru akan mulai terjadi. Rekristalisasi adalah proses transformasi nukleasi dan pertumbuhan

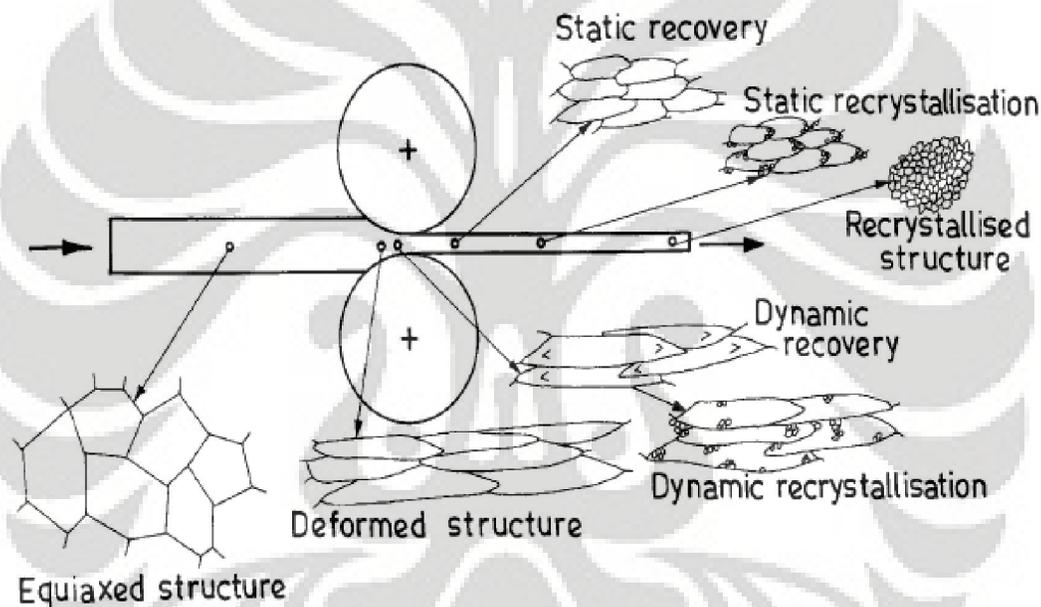
butir. Inti dari butir baru terjadi dari bergabungnya sub-butir dan permukaan untuk nukleasi heterogen adalah cacat struktur mikro seperti permukaan batas butir dan inklusi. Butir yang baru tumbuh merupakan butir yang bebas regangan (*strain-free*) dan terikat dengan batas butir bersudut besar yang memiliki mobilitas sangat tinggi yang akan menyapu semua jejak dari butir yang terdahulu. Sehingga proses rekristalisasi mengarah kepada pembentukan formasi butir yang bebas energi internal dalam material yang telah mengalami proses pengerjaan dingin (Callister 1997). Ketika semua butir terdahulu yang telah digantikan oleh butir baru yang bebas regangan, maka dapat dikatakan material tersebut telah terekristalisasi dengan sempurna (*fully recrystallized*). Seperti telah dijelaskan bahwa gaya penggerak untuk proses rekristalisasi adalah energi yang tersimpan saat pengerjaan dingin, maka jika pengerjaan dinginnya tinggi, semakin kecil energi termal yang digunakan, berarti semakin rendah temperatur dari rekristalisasi.

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

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

deformasi panas (*hot deformation*), keduanya bergantung pada jumlah dan laju deformasi (Gorelik 1981).

Dalam pengerjaan panas, proses rekristalisasi yang terjadi dapat dibagi menjadi dua, yaitu rekristalisasi dinamis dan rekristalisasi statis. Seperti telah dijelaskan bahwa canai panas adalah proses deformasi dan rekristalisasi pada saat yang hampir bersamaan. Proses rekristalisasi yang terjadi saat material sedang dideformasi disebut rekristalisasi dinamis, sedangkan rekristalisasi statis terjadi sesaat setelah material mengalami deformasi. Ilustrasi dari penjelasan tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.6.



**Gambar 2.6** Perbandingan Antara Rekristalisasi Dinamik dan Statik<sup>[7]</sup>

Pada rekristalisasi dinamis, saat material mengalami deformasi, 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 oleh beberapa faktor antara lain regangan, kecepatan regangan dan temperatur, seperti yang telah diteliti oleh Zener-Hollomon.

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

proses munculnya nuklei pada batas butir dapat terjadi dan proses rekristalisasi dapat berlangsung.

### **2.6.3. Pertumbuhan Butir**

Setelah proses rekristalisasi selesai, butir dengan bebas regangan selanjutnya akan tumbuh jika spesimen baja dibiarkan pada temperatur yang tinggi. Pertumbuhan butir ditunjukkan sebagai peningkatan besar butir rata-rata pada material polikristalin. Pertumbuhan butir biasanya merupakan lanjutan setelah proses *recovery* dan proses rekristalisasi. Hal ini terjadi 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 (Callister 1997). 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 (ASM 1973).

## **2.7 Pengaruh Waktu Tahan Pada Besar Butir Ferit**

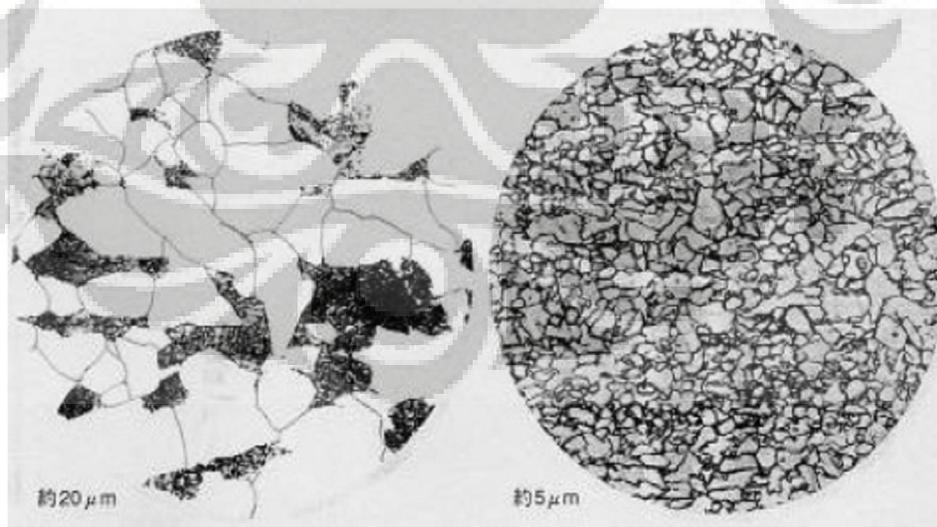
Selain temperatur, waktu tahan juga mempengaruhi besar butir ferit yang terbentuk. Pertumbuhan butir terjadi karena adanya pengurangan energi bebas pada batas butir, seperti yang telah diketahui bahwa pada batas butir terdapat atom-atom dengan energi bebas yang lebih tinggi daripada atom-atom pada butir. Untuk mencapai kestabilan, maka atom-atom pada batas butir mengurangi energi bebasnya dengan cara mengurangi permukaan batas butir. Akibatnya terjadi migrasi batas butir, dimana migrasi batas butir ini adalah difusi atom-atom pada batas butir menuju ke butir yang semakin lama akan bergabung (*coalescence*) membentuk butir yang lebih besar. Oleh sebab itu waktu tahan akan memberikan kesempatan atom-atom tersebut untuk bergabung.

## 2.8 Thermo-Mechanical Controlled Process (TMCP)

Pada masa yang lalu, pada canai panas / *hot rolling* digunakan hanya untuk mendapatkan dimensi nominal saja seperti ketebalan, lebar dan panjang. Karena persyaratan kualitas yang tinggi, perlakuan panas seperti *normalizing* atau *quench and tempering* perlu dilakukan sebagai proses lanjutannya. Kini dengan persyaratan kualitas yang lebih tinggi lagi, proses baru untuk *plate rolling* telah ditemukan. Proses itu adalah TMCP<sup>[8]</sup>.

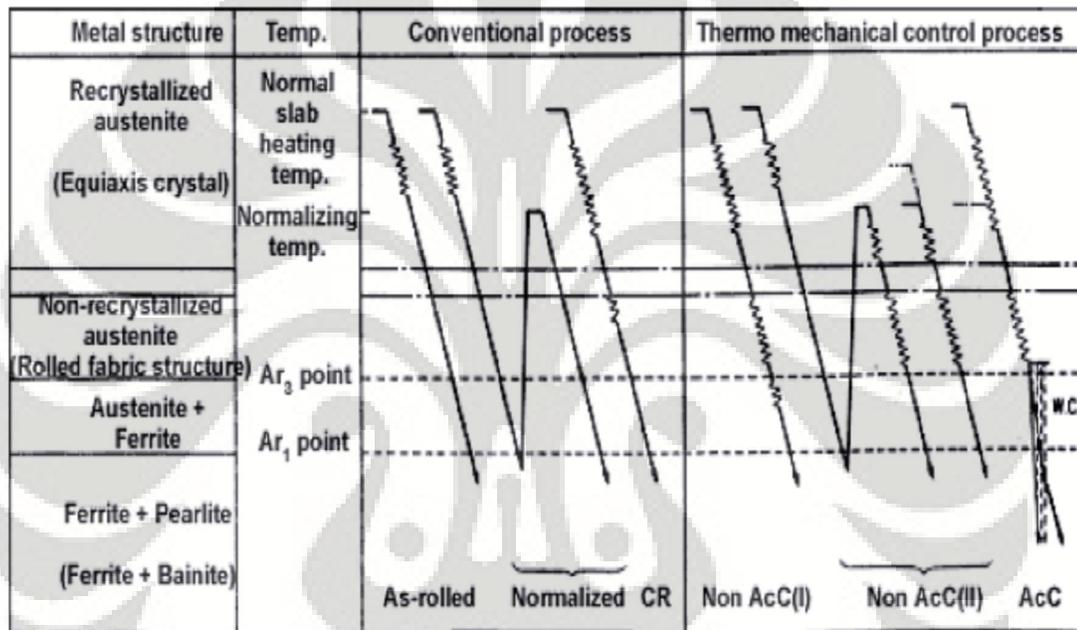
*Thermomechanical Controlled Process* (TMCP) dapat dikarakteristikan sebagai proses yang melibatkan panas dan deformasi. TMCP adalah sebuah teknik perlakuan logam yang didesain untuk meningkatkan kekuatan sekaligus ketangguhan. Peningkatan kekuatan dan ketangguhan dalam TMCP didapat dari adanya mekanisme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

TMCP merupakan istilah kolektif pada beberapa proses yang berbeda untuk menghasilkan baja dengan butir halus yang memiliki nilai kekuatan tinggi, ketangguhan yang baik dan kemampuan yang sempurna<sup>[9]</sup>. Pada TMCP, sifat mekanis baja terutama ditentukan melalui kombinasi dari perlakuan mekanik (*mechanical working*), proses *recovery*, rekristalisasi (*recrystallisation*), dan pertumbuhan butir (*grain growth*)<sup>[10]</sup>.



**Gambar 2.7** Perbandingan besar butir antara pencanaian konvensional (kiri) dan TMCP (kanan)<sup>[11]</sup>

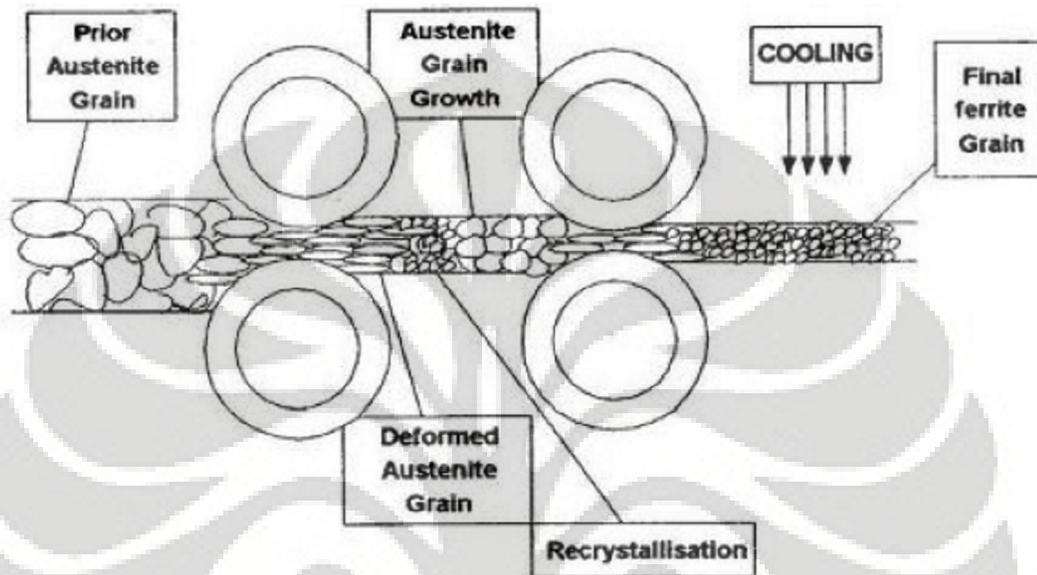
Mekanisme penghalusan butir dalam pengerolan terkendali (*controlled rolling*) adalah rekristalisasi pada austenit selama deformasi panas. Proses ini dipengaruhi oleh komposisi paduan, temperatur pengerolan, dan derajat deformasi yang berlangsung selama pengerolan. Bila austenit tidak memiliki partikel fasa kedua maka dihasilkan pertumbuhan butir yang nyata sehingga mekanisme penghalusan butir menjadi terbatas. Untuk lebih lengkapnya mengetahui perbandingan antara jalur proses konvensional dan TMCP, dapat dilihat pada gambar Gambar 2.8.



Gambar 2.8. Perbandingan antara jalur proses konvensional dan TMCP. Bagian garis 'Zig-zag' mengindikasikan proses *rolling*<sup>[12]</sup>

Jalur proses TMCP, pada bagian awal (*rough steel section*), seperti *slab*, dipanaskan hingga temperatur yang digunakan pada pengerjaan panas yaitu sekitar 1200°C. Kemudian diikuti reduksi yang dilakukan pada temperatur yang lebih rendah. Deformasi plastis pada temperatur lebih rendah menghasilkan ukuran butir yang halus (*fine grain size*) dan menghambat terjadinya presipitasi. Selanjutnya masuk proses pendinginan. Pendinginan tersebut yang mengarahkan baja pada kisaran temperatur transisi, dan hasil transformasi austenit ke ferit menghasilkan butir ferit halus (*fine ferrite grain*) dan penyebaran presipitat yang baik. Untuk beberapa

baja TMCP, tahap akhir pendinginan, selama transformasi telah terjadi sepenuhnya, dipercepat dengan pendinginan air untuk menghasilkan ukuran butir yang lebih halus. Pendinginan yang dipercepat (*accelerated cooling*) terkadang dapat menghasilkan formasi bainit sama seperti, atau sebagai ganti, formasi ferit.



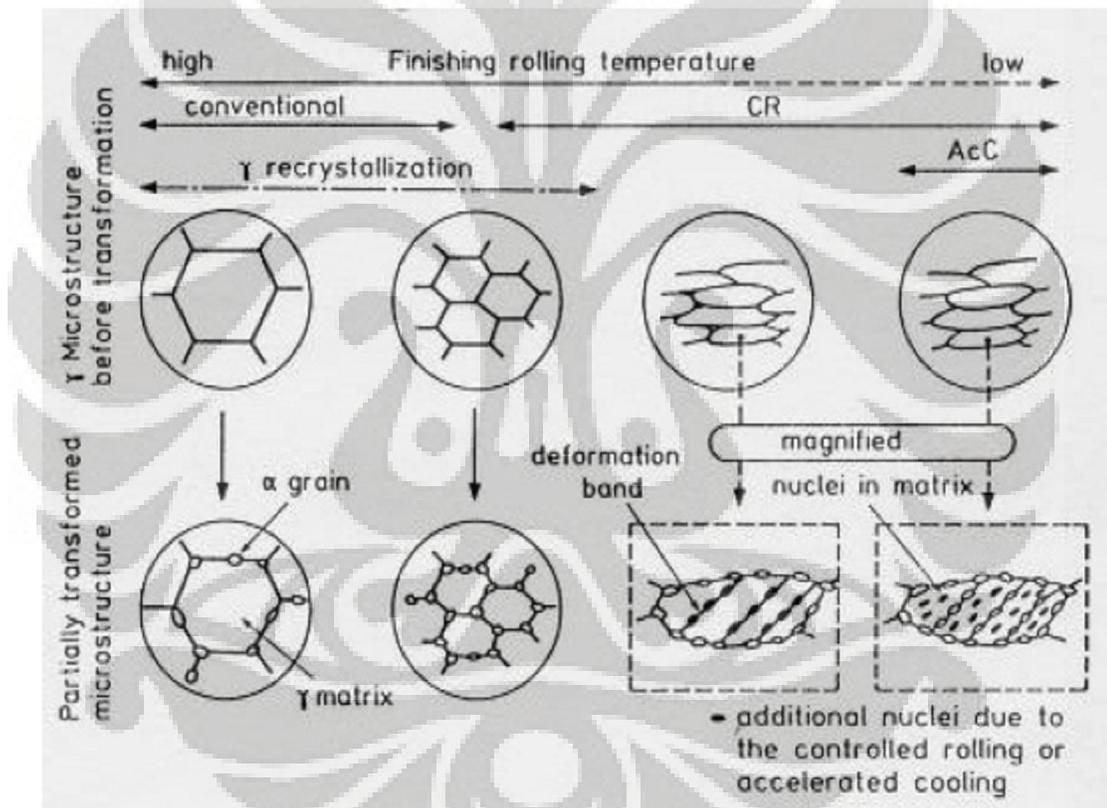
Gambar 2.9 Evolusi struktur mikro selama proses TMCP<sup>[13]</sup>

Terdapat berbagai macam TMCP, yang beberapa halnya diilustrasikan berbeda dengan proses konvensional pada gambar. Jalur TMCP dapat dijadikan tiga kategori besar, yaitu<sup>[11]</sup>:

1. Pencapaian terkendali dibawah temperatur *normalizing*, masih fasa austenit sepenuhnya (*fully austenitic*) (diatas temperatur  $A_3$ ) diikuti dengan pendinginan cepat dengan kecepatan pendinginan sekitar  $10^\circ\text{C}/\text{sec}$ . Tujuan dari proses ini adalah untuk memperhalus ukuran butir dengan pencapaian terkendali (*controlled rolling*) dan untuk meningkatkan kekuatan dengan menekan formasi ferit dan perlit untuk menghasilkan bainit yang kuat dan tangguh.
2. Pencapaian terkendali dilakukan pada temperatur diatas  $A_3$  dan dibawah temperatur *normalizing*, pada daerah austenit ferit tercampur. Sebagai tambahan pada penghalusan butir austenit, butir terekristalisasi menjadi

pipih dan penukleasian ferit halus didapatkan melalui deformasi. Pada temperatur diatas  $A_1$ , pencanaan terkendali dihentikan, dan diikuti pendinginan cepat menuju temperatur ruang.

3. Pencanaan terkendali dilakukan sebagai bagian proses awal (*preliminary*), diikuti pendinginan dan pemanasan kembali hingga diatas temperatur  $A_3$  dan kemudian pendinginan cepat hingga dibawah temperatur  $A_1$ . Tujuan dari teknik ini adalah untuk membentuk ukuran butir paling halus pada *equiaxed austenite* (*finest equiaxed austenite grain size*) sebelum pencanaan terkendali dimulai.



Gambar 2.10. Perbedaan struktur mikro antara proses konvensional dan proses TMCP<sup>[14]</sup>

## 2.9. Warm Working

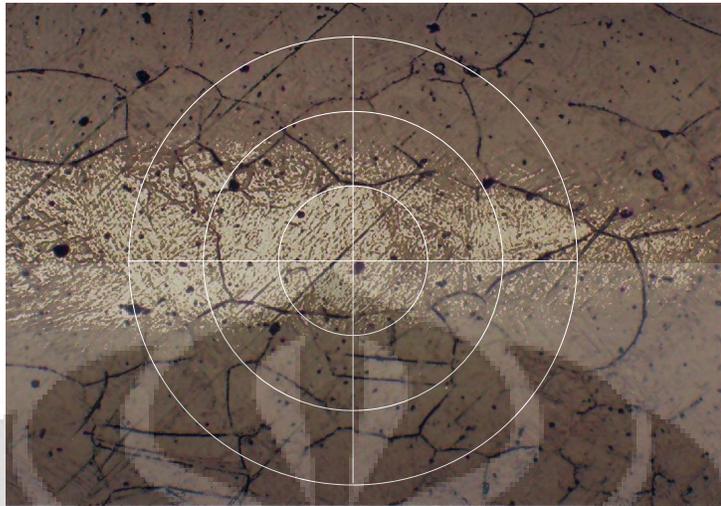
*Warm Working* merupakan salah satu metode perlakuan terhadap material logam yang menghasilkan struktur mikro yang sangat halus, pada material logam dan paduannya dengan temperatur kerja di antara pengerjaan panas (*hot working*) dan

pengerjaan dingin (*cold working*). Selain menghasilkan struktur mikro yang halus, proses tersebut juga akan mengalami pembentukan subgrain berukuran mikrometer dan sub-mikrometer pada butir yang berukuran lebih besar. Sebagai hasil pembentukan subgrain ini, sifat mekanis dari material akan meningkat. Deformasi plastis yang terjadi memberikan kontribusi pada pembentukan butir sub-divisi dan *local dynamic recovery* dan pengerjaan hangat akan terjadi proses rekristalisasi berkontribusi pada proses penghalusan butir.

*Warm Working*, proses pengerjaannya berada pada rentang temperatur 550 °C-850 °C sehingga dapat dijelaskan bahwa metode ini sangatlah menghemat energi. Selain efisiensi energi, metode ini banyak diminati karena memiliki beberapa keuntungan lainnya. Sebagai contoh, jika dibandingkan dengan pengerjaan dingin, metode ini membutuhkan *deformation forces* yang lebih rendah, dapat diaplikasikan pada baja dengan jarak yang luas, memberikan rasio deformasi yang lebih besar, menghasilkan deformasi yang lebih seragam terhadap daerah transversal dan menghasilkan struktur mikro dengan tegangan sisa yang lebih rendah<sup>[12]</sup>. Kemudian jika dibandingkan dengan pengerjaan panas, metode ini menghasilkan struktur mikro yang lebih halus dengan sifat mekanis yang tinggi, kualitas permukaan dan pengendalian dimensional yang lebih baik, material yang dibuang akibat proses dekarburisasi atau oksidasi yang lebih rendah<sup>[14]</sup>. Juga terdapat studi yang menyatukan bahwa proses *warm working* berhubungan dengan jarak temperatur berada diantara pengerjaan panas dan pengerjaan dingin, setelah terjadi deformasi plastis, material sebagian mengalami pengerasan tegangan (*strain hardened*) dan sebagian mengalami rekristalisasi<sup>[15]</sup>.

## 2.10 Metode Perhitungan Besar Butir

Setelah metode etsa dapat menampilkan batas butir struktur mikro, maka besar butir dihitung dengan menggunakan metode *intercept*, sesuai dengan standar perhitungan metalografi kuantitatif ASTM E112. Teknik penghitungan dilakukan sebagai berikut :



**Gambar 2.11.** Metode *Intercept*, dengan menggunakan garis berbentuk lingkaran dengan total panjang garis 500 mm, dengan perbesaran 100x

Dari gambar 2.11 di atas, dihitung jumlah titik potong antara total panjang garis yang ditarik sepanjang 500 mm dengan batas butir pada foto struktur mikro dengan perbesaran 100 kali. 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 :

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

$L_T$  = Panjang Garis Total (Sesuai standar ASTM =500 mm)

$M$  = Perbesaran

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

## 2.11 Korosi

### 2.11.1 Pengertian Korosi

Korosi adalah perusakan logam karena adanya reaksi kimia atau elektrokimia antara logam dengan lingkungannya. Adapun lingkungan yang dimaksud adalah dapat berupa larutan asam, air dan uap yang masing-masing mempunyai daya hantar listrik yang berbeda-beda. Perusakan logam yang dimaksud adalah berkurangnya nilai logam baik dari segi ekonomis, maupun teknis. Penurunan kualitas logam ini dapat saja membuat kecelakaan yang tak terduga. Disamping itu logam yang mengalami korosi dapat membuat penampilan yang tak menyenangkan, untuk mengatasi hal ini diperlukan biaya perawatan yang tidak sedikit. Hal inilah yang mengakibatkan korosi dari segi biaya sangat mahal.

Korosi adalah gejala yang timbul secara alami, sehingga bagaimana pun juga korosi ini tidak dapat dihindari, yang disebabkan oleh perubahan energi. Ketika korosi berlangsung secara alami, proses yang terjadi secara spontan sehingga disertai suatu pelepasan energi bebas. Dalam keadaan sebebaskan-bebasnya alam senantiasa berkepentingan untuk meminimumkan energi seperti diketahui bahwa korosi memakan kebanyakan logam dalam waktu yang cukup lama, dengan demikian kelihatannya alam sengaja meminimumkan energi logam melalui korosi.

Logam sering memiliki bermacam-macam cacat volume yang diperoleh akibat proses produksinya bahkan meskipun ketidakseragaman ini dapat dikurangi melalui pengendalian mutu yang seksama, struktur mikroskopik logam biasanya tetap tidak seragam, hal inilah yang mengakibatkan terjadinya korosi sel galvanik. Karena setiap fasa mempunyai komponen dan strukturnya sendiri-sendiri. Oleh karena itu masing-masing mempunyai potensial elektroda tertentu. Akibatnya sel galvanik dapat terjadi dalam dua fasa bila logam berada dalam suatu elektrolit.

Mekanisme korosi tidak terlepas dari reaksi elektrokimia. Reaksi elektrokimia melibatkan perpindahan elektron-elektron. Perpindahan elektron merupakan hasil reaksi redoks (reduksi-oksidasi). Mekanisme korosi melalui reaksi elektrokimia melibatkan reaksi anodik di daerah anodik. Reaksi anodik (oksidasi) diindikasikan

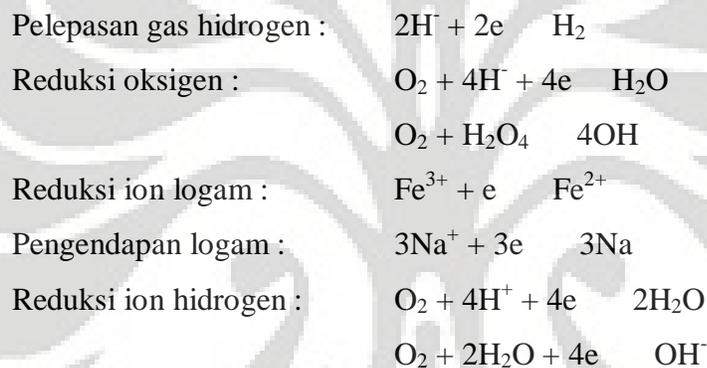
melalui peningkatan valensi atau produk elektron-elektron<sup>[9]</sup>. Reaksi anodik yang terjadi pada proses korosi logam yaitu :



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

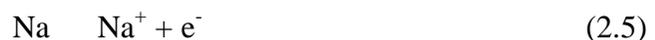


Reaksi katodik juga berlangsung di proses korosi. Reaksi katodik diindikasikan melalui penurunan nilai valensi atau konsumsi elektron-elektron yang dihasilkan dari reaksi anodik. Reaksi katodik terletak di daerah katoda. Beberapa jenis reaksi katodik yang terjadi selama proses korosi logam yaitu :



### 2.11.2 Korosi Air Laut

Laju korosi logam mungkin empat atau lima kali lebih cepat dibandingkan bila logam itu terendam seluruhnya ditempat yang sama karena terdapatnya faktor oksigen dan ion  $Cl^-$  yang secara bergantian atau bersamaan menyerang benda uji. Natrium klorida apabila dilarutkan kedalam air, zat ini menghasilkan suatu medium korosi yang sangat agresif, sama dengan air laut. Reaksi-reaksi yang menggambarkan pembentukan garam dapur dituangkan dalam persamaan sebagai berikut :



Persamaan (2.5) dan (2.6) dijumlahkan



Apabila suatu bahan ionik dilarutkan kedalam air maka ion-ionnya memisahkan diri dan menyebar secara acak diantara molekul-molekul air. Berapapun banyaknya garam yang digunakan untuk membuat larutan, banyaknya ion natrium selalu sama dengan banyaknya ion klorida. Pernyataan ini disebut elektrolitas. Jadi setiap kali ada sebuah ion positif terbentuk, sebuah ion negatif juga terbentuk<sup>[17]</sup>.

### **2.11.3 Pengaruh *Heat Treatment* Pada Korosi**

Banyak sifat mekanis material ditingkatkan dengan berbagai macam perlakuan panas. Tetapi, beberapa sifat seperti kekerasan dan kekuatan sering dicapai dengan terkompensasinya ketahanan korosinya. Sebagai contoh, kekerasan dan kekuatan baja martensitik berbanding terbalik dengan ketahanan korosi yang lebih rendah dibanding baja feritik ataupun austenitik. Kekuatan tinggi yang dicapai untuk baja penguatan endapan adalah melalui pembentukan endapan kedua selama pemanasan larutan dan proses *aging*. Telah disebutkan diatas, endapan dengan sifat elektrokimia sangat jelas berbeda dari matriks yang memiliki efek yang parah terhadap korosi<sup>[18]</sup>.

Proses seperti pengerjaan dingin, dimana material secara plastis berubah menjadi bentuk yang diinginkan, mengarah pada pembentukan butir yang memanjang dan sangat berbeda dan penurunan pada ketahanan korosi. Pengerjaan dingin juga dapat mengakibatkan tegangan sisa yang dapat membuat material rentan terhadap *stress corrosion cracking*. Sebuah kemajuan dalam ketahanan korosi dapat dicapai dengan melakukan anil pada temperatur dimana rekristalisasi butir terjadi. Anil sebagian dapat menyebabkan terjadinya *stress relief* tanpa efek besar pada keseluruhan kekuatan material.

### **2.11.4 Pengaruh Deformasi Pada Laju Korosi**

Perlakuan canai panas atau deformasi merupakan salah satu cara untuk memodifikasi sifat suatu material. Perlakuan ini selain memodifikasi material secara bentuk fisik juga dapat merubah dalam hal bentuk dan jenis struktur mikro yang dibentuk. Terkait dengan adanya perubahan morfologi struktur mikro dapat

mempengaruhi beberapa sifat dasar dari material tersebut, salah satunya adalah adanya perubahan terhadap ketahanan korosi. Perubahan struktur mikro ini mengakibatkan terjadinya perubahan kerapatan dislokasi dan perubahan distorsi dalam atom.

Pemberian deformasi ini mengakibatkan meningkatnya besar tegangan yang dimiliki karena makin rapatnya dislokasi yang merupakan cacat kristal. Sebagaimana diketahui, bahwa dengan terjadinya peningkatan regangan ini akan berakibat pada sifat korosinya, dimana daerah pada suatu material yang memiliki tegangan yang lebih tinggi bersifat akan lebih anodik, sedangkan bagian yang kurang tergangannya akan bersifat katodik, karena adanya perbedaan ini korosi yang terjadi cenderung korosi galvanis. Sel galvanis mikro juga dapat terjadi akibat adanya perubahan mikrostruktur itu sendiri tanpa melihat adanya perbedaan tegangan antar daerah, perbedaan antara daerah butir dan batas butir juga berpengaruh kepada korosi galvanis mikro.

Perbedaan antara daerah butir dan batas butir ini terjadi karena adanya perbedaan energi bebas pada kedua daerah tersebut. Dimana energi bebas pada batas butir memiliki nilai yang lebih tinggi daripada pada butir, sehingga apabila batas butir meningkat akibat perlakuan deformasi, maka akan makin tinggi pula energi bebas dan potensial pun akan menjadi negatif, sehingga laju korosi material tersebut akan meningkat. Hal ini juga berlaku sebaliknya<sup>[18]</sup>.

#### **2.11.5 Pengaruh Derajat Deformasi Terhadap Laju Korosi**

Akibat pengerjaan dingin suatu benda akan mengalami deformasi, dimana akan timbul *stress* dimana mengalami tegangan yang berbeda dengan bagian yang lainnya. Bagian yang mengalami tegangan yang lebih besar akan menjadi anoda dan akan terkorosi lebih hebat. Seperti contoh yaitu batang logam yang ditebuk dan sebuah paku. Pada batang logam yang ditebuk, korosi lebih cepat terjadi pada daerah tekukannya karena telah mengalami deformasi berupa tegangan. Sedangkan pada paku, daerah yang lebih cepat terkorosi adalah pada kepala dan ujungnya.

### 2.11.6 Korosi Polarisasi

Polarisasi, pada dasarnya merupakan perubahan potensial dari potensial setengah sel kesetimbangan (dalam kondisi setimbang), menjadi tidak setimbang. Perubahan potensial ini biasanya disebabkan oleh mengalirnya arus. Polarisasi diklasifikasikan kedalam dua jenis, yaitu polarisasi katodik dan polarisasi anodik.

Ketika beberapa langkah pada reaksi setengah sel mengontrol laju dari aliran muatan (elektron), reaksi dikatakan dalam kondisi dibawah aktivasi atau kontrol transfer muatan, dan akan menghasilkan polarisasi aktivasi. Hubungan antara polarisasi aktivasi dan tegangan lebih dengan laju reaksi dinyatakan sebagai berikut:

$$\eta_a = \beta_a \log \frac{i_a}{i_c} \quad (2.8)$$

$$\eta_c = \beta_c \log \frac{i_c}{i_a} \quad (2.9)$$

Persamaan (2.8) untuk polarisasi anodik atau (2.9) untuk polarisasi katodik.

Polarisasi adalah suatu metoda pengukuran laju korosi pada keadaan yang menyimpang dari keadaan setimbangnya, unsur yang penting untuk kita ketahui dalam pengukuran laju korosi pada pengukuran polarisasi adalah sesuai dengan persamaan<sup>[19]</sup> dibawah, yakni ;

$$CR = 0.129 \frac{W t}{D} \quad (2.10)$$

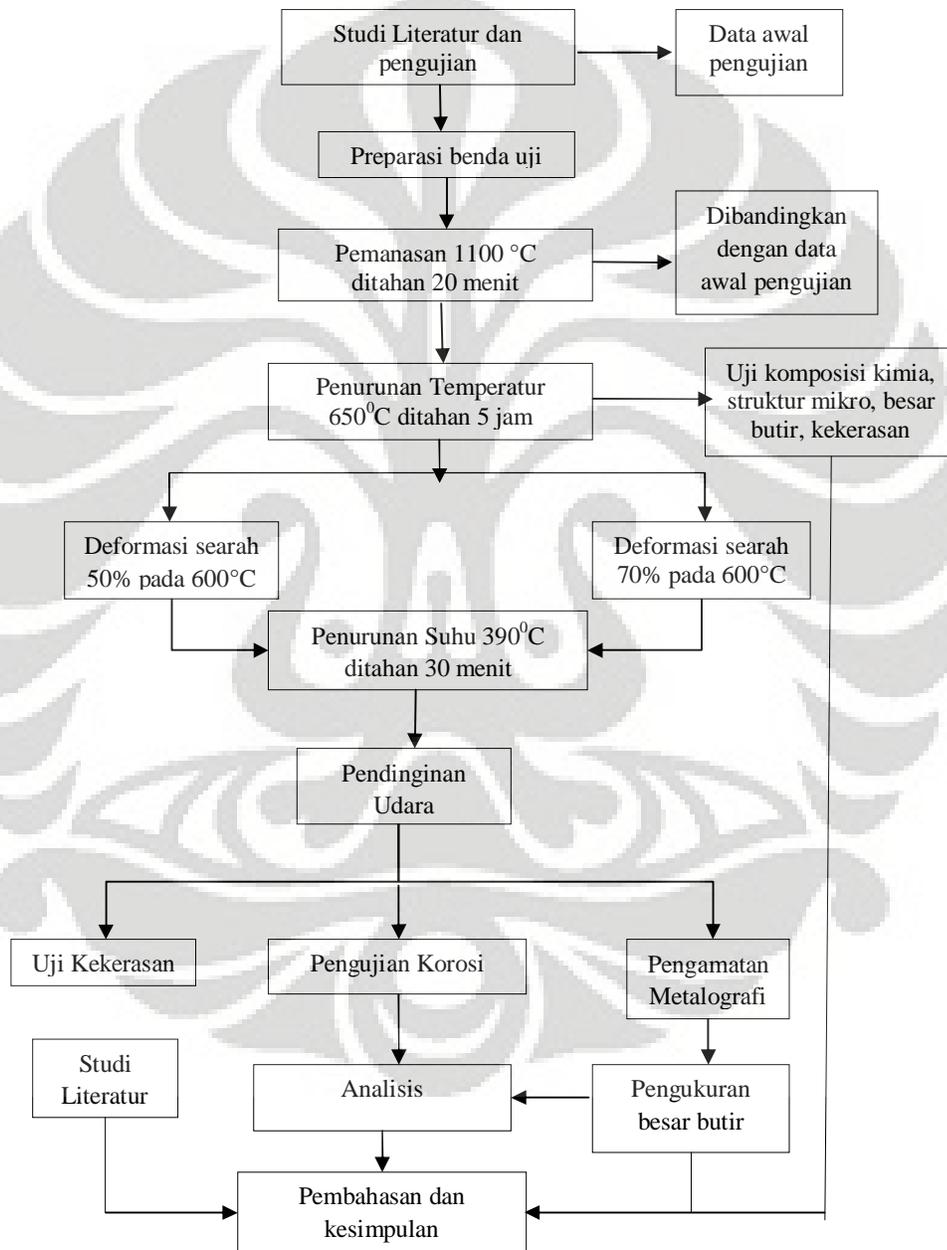
Dimana CR adalah laju korosi (*corrosion rate*); D adalah densitas material; i adalah rapat arus, dan W adalah berat ekivalen material.

### BAB 3

## METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir Penelitian

Tahapan proses penelitian dapat dilihat pada diagram alir di bawah ini :



Gambar 3.1. Diagram Alir Proses Penelitian

### 3.2. Alat dan Bahan

#### 3.2.1. Alat

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

#### 3.2.2 Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah material Baja Karbon Rendah SS 400.

**Tabel 3.1.** Komposisi dari baja SS 400 dalam % berat

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

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah Baja Karbon Rendah yang disiapkan untuk dilakukan perlakuan panas kemudian dilakukan proses canai hangat dengan variasi besar deformasi. Setelah itu dilakukan uji kekerasan dan uji ketahanan korosi.

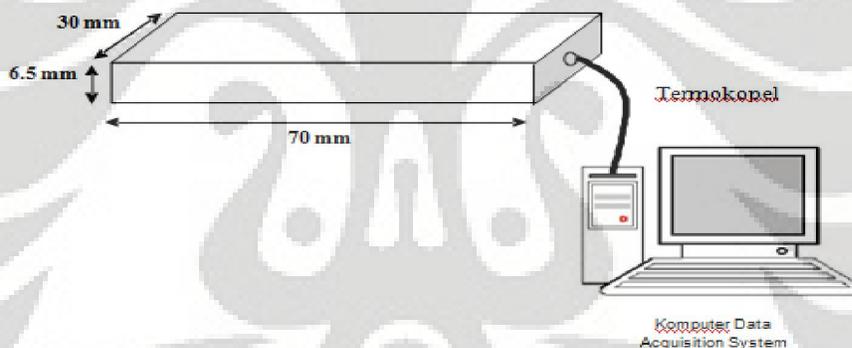
### 3.3 Prosedur Penelitian

#### 3.3.1 Pemilihan Material

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

#### 3.3.2 Preparasi Sampel

Spesimen yang digunakan pada penelitian ini dipotong sehingga berbentuk seperti pada gambar 3.2. Spesimen diberi lubang untuk meletakkan kawat termokopel sebagai alat pengukur temperatur spesimen. Pengukuran temperatur menggunakan data *acquisition system* yang dihubungkan dengan komputer. Kedalaman lubang adalah 6 mm dengan diameter 2,5 mm yang disesuaikan diameter termokopel.

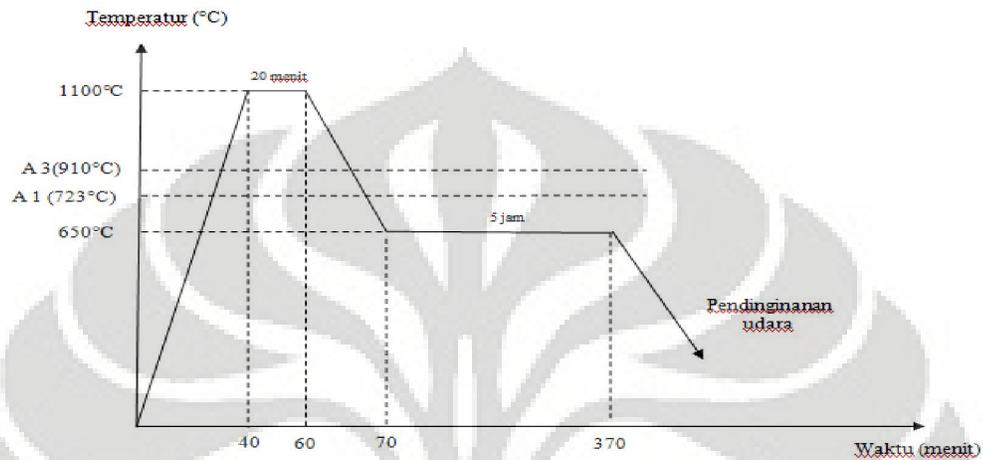


Gambar 3.2 Ilustrasi benda uji dan pemasangan termokopel

#### 3.3.3 Proses Termomekanikal (TMCP) dan *Warm Working*

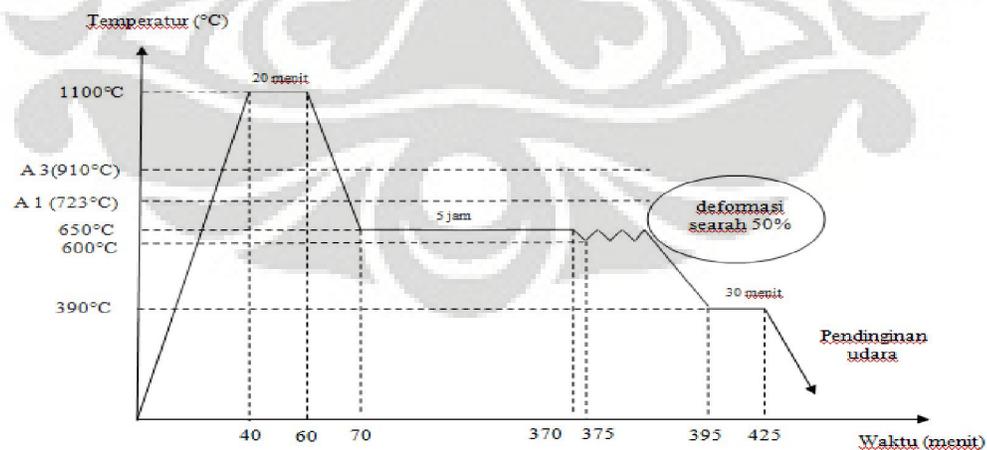
Seluruh spesimen yang akan diukur disiapkan untuk berbagi tes, kemudian masing-masing dimasukkan ke dalam *furnace* atau dapur perapian dengan untuk dipanaskan hingga suhu  $1100^{\circ}\text{C}$ . Kemudian dilanjutkan dengan melakukan canai dengan besaran deformasi 50 % dan 70 % secara searah (*irreversible*) pada temperatur pengerjaan hangat. Penelitian ini juga terbagi atas beberapa variasi proses, yaitu :

1. Spesimen A dipanaskan hingga suhu  $1100^{\circ}\text{C}$  lalu ditahan selama 20 menit, kemudian suhu dibiarkan turun hingga  $650^{\circ}\text{C}$  dan ditahan selama 5 jam. Spesimen ini tidak dilakukan proses deformasi. Proses ini dapat dijelaskan pada gambar siklus proses spesimen A di bawah ini.



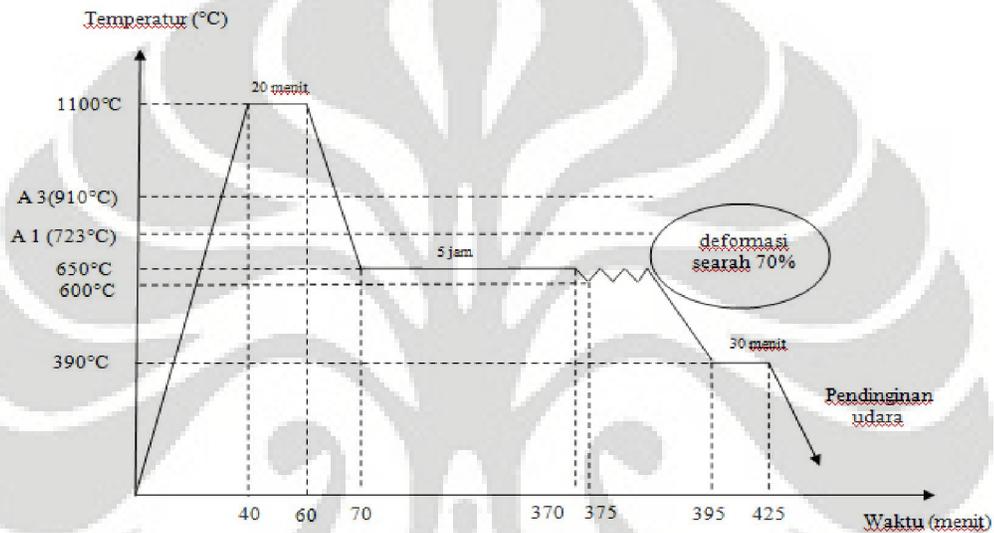
Gambar 3.3 Siklus Proses Spesimen A

2. Spesimen B dipanaskan pada suhu  $1100^{\circ}\text{C}$  dan ditahan selama 20 menit, kemudian terjadi penurunan suhu ke  $650^{\circ}\text{C}$  dan ditahan selama 5 jam. Pada suhu  $600^{\circ}\text{C}$  spesimen dilakukan deformasi searah (*single pass rolling*) 50 %, kemudian dimasukkan ke dalam dapur perapian dan suhu diturunkan hingga  $390^{\circ}\text{C}$  dan ditahan 30 menit. Kemudian didinginkan di udara. Proses ini dapat dijelaskan pada gambar di bawah ini.



Gambar 3.4 Siklus Proses Spesimen B

3. Spesimen C dipanaskan pada suhu 1100 °C selama 20 menit, kemudian terjadi penurunan temperatur ke 650 °C dan ditahan selama 5 jam. Pada suhu 600 °C spesimen dilakukan deformasi searah (*single pass rolling*) 70 %, kemudian dimasukkan ke dalam dapur perapian dan suhu diturunkan hingga 390 °C dan ditahan 30 menit. Kemudian didinginkan di udara. Proses ini dapat dijelaskan pada gambar di bawah ini.



Gambar 3.5 Siklus Proses Spesimen C



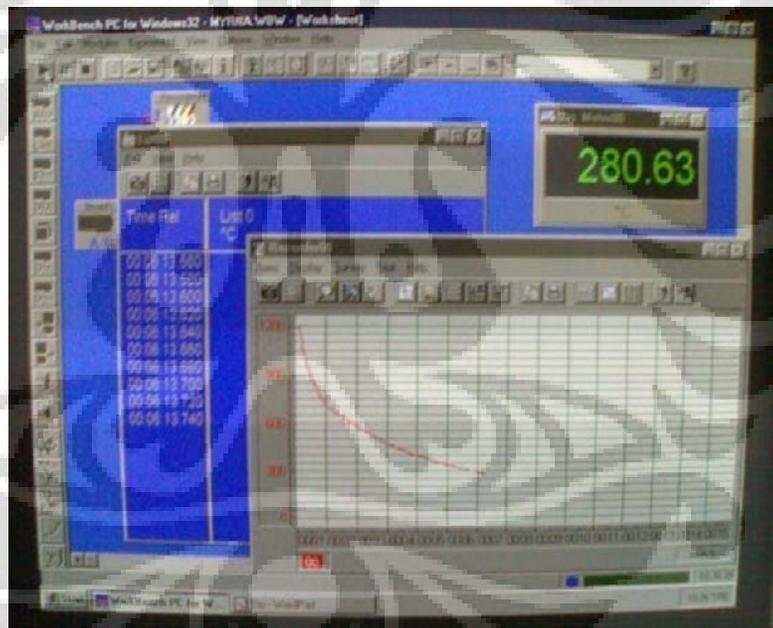
**Gambar 3.6** Dapur Eurotherm yang digunakan untuk proses pemanasan ulang



**Gambar 3.7** Mesin *roll* yang digunakan untuk proses canai hangat



**Gambar 3.8** *Data acquisition* yang digunakan selama proses canai panas



**Gambar 3.9** Tampilan pada layar komputer pada saat proses canai hangat

### 3.3.4 Uji Metalografi

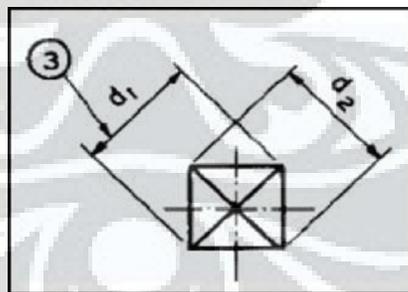
Untuk dapat diamati mikrostrukturnya, maka dilakukan pengujian metalografi. Untuk spesimen yang berukuran kecil biasanya dilakukan proses

**Universitas Indonesia**

mounting terlebih dahulu untuk mempermudah penanganan sampel metalografi. Setelah itu dilakukan proses pengamplasan untuk meratakan bagian sampel yang akan diuji mikrostrukturnya. Pengamplasan dilakukan dengan menggunakan kertas amplas yang dimulai dari amplas kasar hingga amplas halus agar didapat permukaan benda uji yang halus dan rata di seluruh permukaan. Ukuran kekasaran dari kertas amplas yang digunakan yaitu: #80, #120, #240, #400, #600, #800, #1000, #1200, #1500 (dalam mesh). Setelah selesai melakukan pengamplasan, maka sampel dipoles agar mendapatkan permukaan yang lebih halus dan mengkilap serta menghilangkan bekas goresan akibat pengamplasan. Setelah dilakukan proses poles, benda uji dietsa dengan Nital 3 % untuk memunculkan jejak batas butir struktur akhir dari benda uji sehingga dapat diamati morfologi butir ferrit. Setelah itu dilakukan pengamatan dengan mikroskop optik.

### 3.3.5 Uji Kekerasan

Metode pengujian kekerasan yang dipakai yaitu metode kekerasan Vickers yang menggunakan standar ASTM E92. Prinsip pengujiannya yaitu dengan melakukan penjejakan atau indentasi pada sampel dengan indentor intan berbentuk piramida dengan kemiringan sekitar  $136^\circ$ . Jejak indentasi yang terdapat pada sampel akan berbentuk segi empat atau belah ketupat yang dapat dihitung panjang diagonal-diagonalnya (lihat Gambar 3.10).



Gambar 3.10 Uji kekerasan metode vickers

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

Universitas Indonesia

maka nilai kekerasan dari sampel dapat diketahui dengan menggunakan rumus kekerasan Vickers. Berikut merupakan persamaan untuk mencari kekerasan Vickers (ASTM E 92)<sup>[10]</sup>:

$$VHN = \frac{2P \sin(\theta/2)}{d^2} = \frac{1.854P}{d^2} \quad (3.1)$$

Dimana : P = beban yang digunakan (kg)  
 d = rata-rata diagonal jejak (mm)  
 = sudut kemiringan intan = 136°

### 3.3.6 Uji Korosi

Metode pengujian yang dilakukan adalah dengan menggunakan korosi polarisasi. Polarisasi adalah suatu metoda pengukuran laju korosi pada keadaan yang menyimpang dari keadaan setimbangnya, unsur yang penting untuk kita ketahui dalam pengukuran laju korosi pada pengukuran polarisasi adalah sesuai dengan persamaan [19] dibawah, yakni ;

$$CR = 0.129 \frac{W I}{D} \quad (3.2)$$

Dimana: CR = laju korosi / *corrosion rate* (mpy)  
 D = densitas material (g/cm<sup>3</sup>)  
 I = rapat arus (A/cm<sup>2</sup>)  
 W = berat ekuivalen material (g).

## BAB 4

### HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN

#### 4.1. Hasil Pengujian

##### 4.1.1. Hasil Pengukuran Dimensi Spesimen

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

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

Persamaan 4.1. Perhitungan regangan sesungguhnya (*true strain*) pada spesimen.

% Deformasi = Besar prosentase perubahan ketebalan

$H_0$  = Ketebalan Awal (mm)

$H_f$  = Ketebalan Akhir (mm)

Setelah deformasi, pengukuran dimensi menggunakan jangka sorong dilakukan.

**Tabel 4.1** Data Hasil Pengukuran Dimensi Spesimen

No	Spesimen	Tebal Awal (mm)	Derajat Deformasi	Tebal Akhir (mm)	Real Deformasi	Panjang Awal (mm)	Panjang Akhir (mm)		E (GPa)	(Gpa)
1	A	6,5	0 %	-	-	-	-	-	-	-
2	B	6,5	50 %	4,8	30,31 %	70	87,9	0,256	207	52,93
3	C	6,5	70 %	4,11	46,08 %	70	101,4	0,448	207	92,85

##### 4.1.2. Hasil Perhitungan Besar Butir Spesimen

**Tabel 4. 2** Data Perhitungan Besar Butir Spesimen

No	Spesimen	Perbesaran (d)	Jumlah butir (n)	Pl (1/mm)	L3 (mm)	G (ASTM E 112)	d (µm)
1	<i>Bulk</i>	-	-	-	-	-	15
2	A	200	129	51.6	0.019379845	8.084269917	18.32
3	B	200	170	68	0.014705882	8.880854234	16.62
4	C	200	220	88	0.011363636	9.625031839	12.77

### 4.1.3. Hasil Pengujian Korosi Polarisasi

Metoda : Potensiometrik (NaCl 3.5 %)

Range :  $\pm 0.25$  mV vs EoC (SCE)

Scan Rate : 4 mV/s

T :  $25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$

**Tabel 4.3** Data Pengukuran Laju Korosi Spesimen

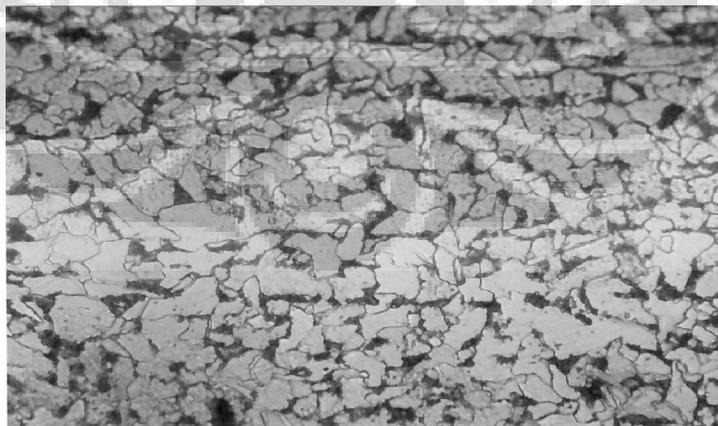
No	Spesimen	Luas (cm <sup>2</sup> )	Ecor (mV)	Icor (A)	CR (mpy)
1	<i>Bulk</i>	0.785	-671.3	$1.76 \times 10^{-5}$	8.046
2	A	0.8536	-698.2	$7.409 \times 10^{-6}$	3.385
3	B	0.882	-609	$8.476 \times 10^{-6}$	3.873
4	C	0.9	-621.1	$1.106 \times 10^{-5}$	5.055

**Tabel 4.4** Data Pengukuran Hasil Kekerasan Spesimen

No	Spesimen	Derajat Deformasi	Nilai Kekerasan Vickers (VHN)
1	<i>Bulk</i>	0 %	202
2	A	0 %	105
3	B	50 %	156
4	C	70 %	168

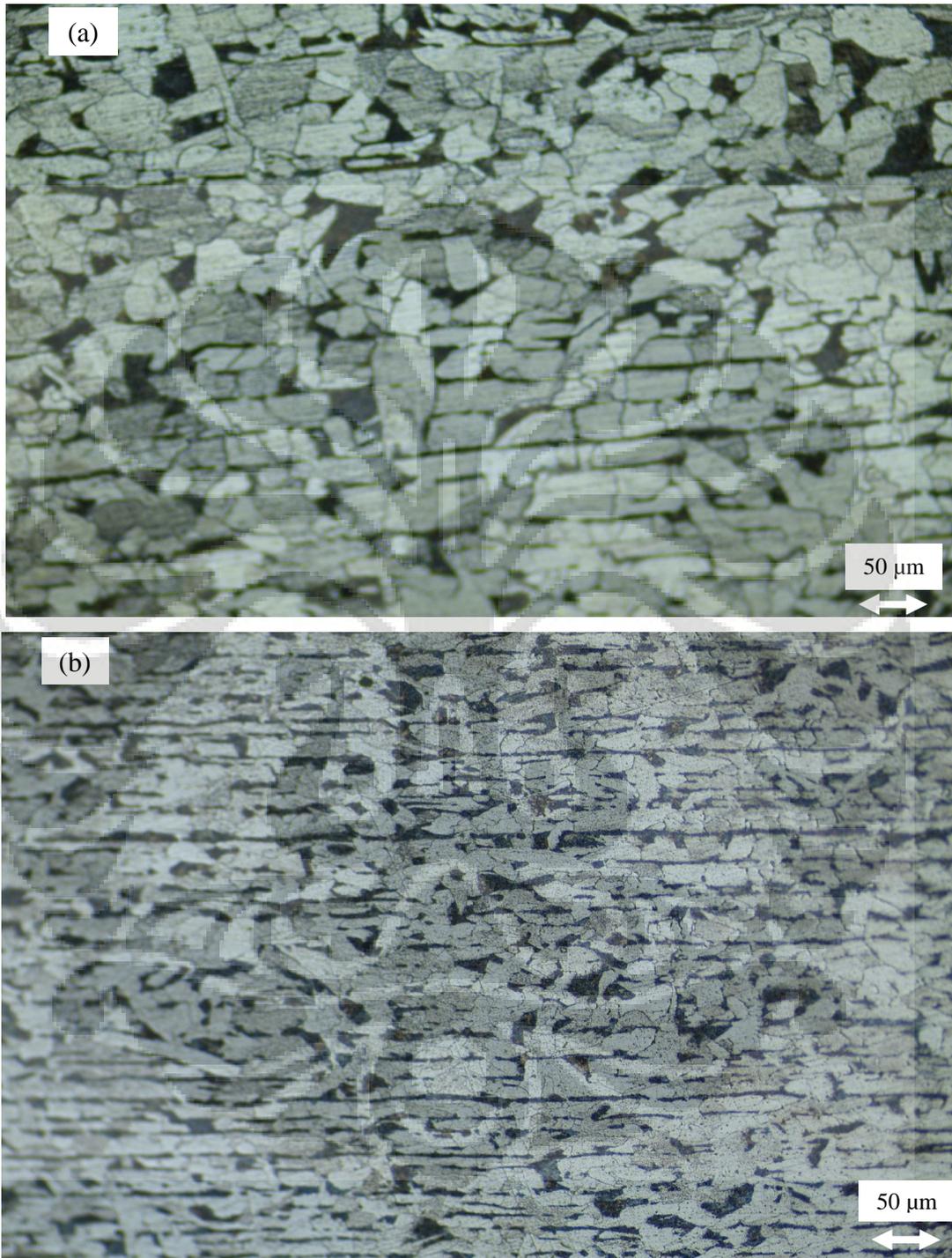
## 4.2. Hasil Pengamatan Metalografi

### 4.2.1. Spesimen Awal (*bulk*)



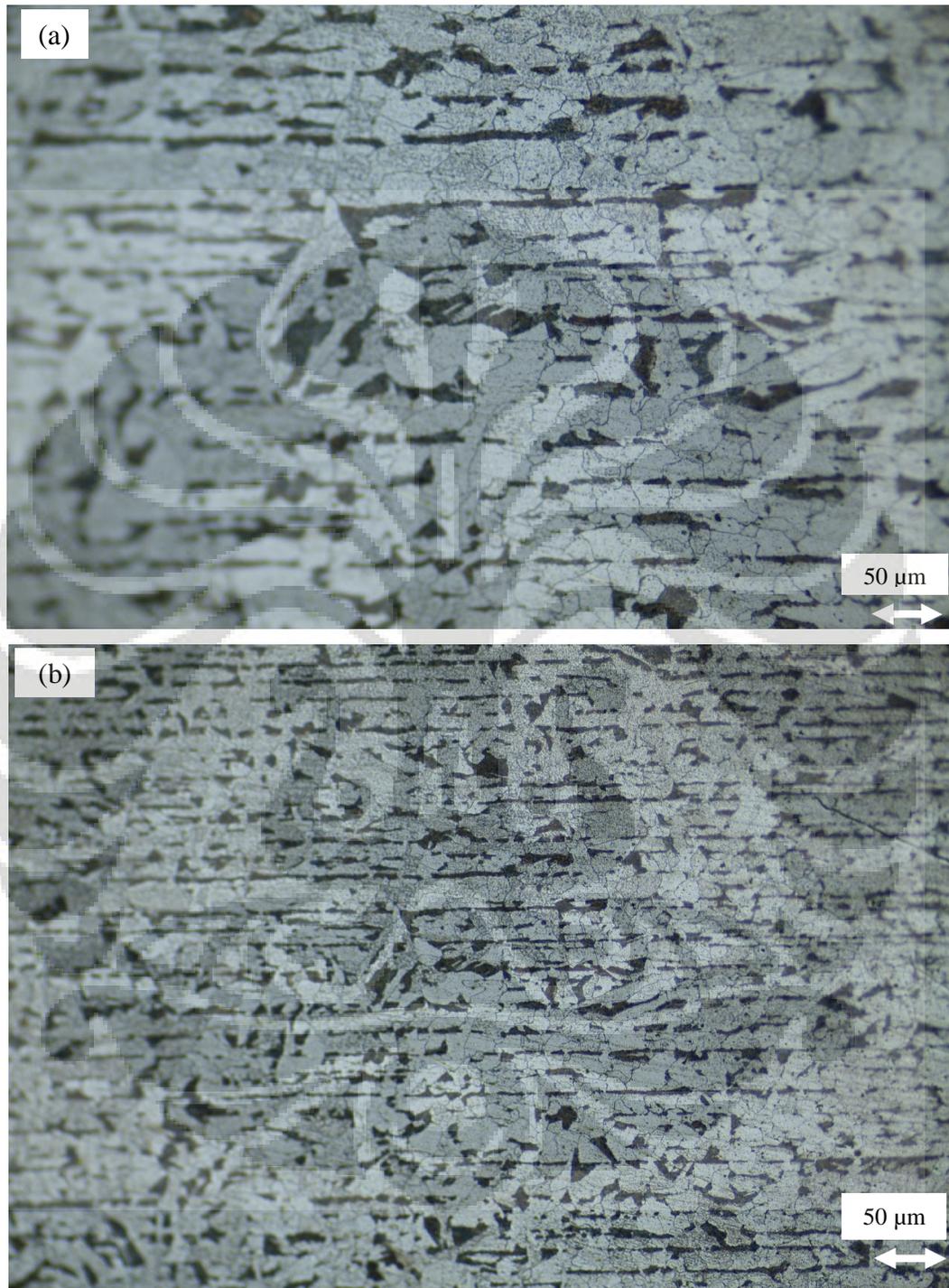
**Gambar 4.1** Foto struktur mikro ferit (terang) dan perlit (gelap) pada spesimen awal (*bulk*), etsa Nital 2% perbesaran 500x

#### 4.2.2. Spesimen A



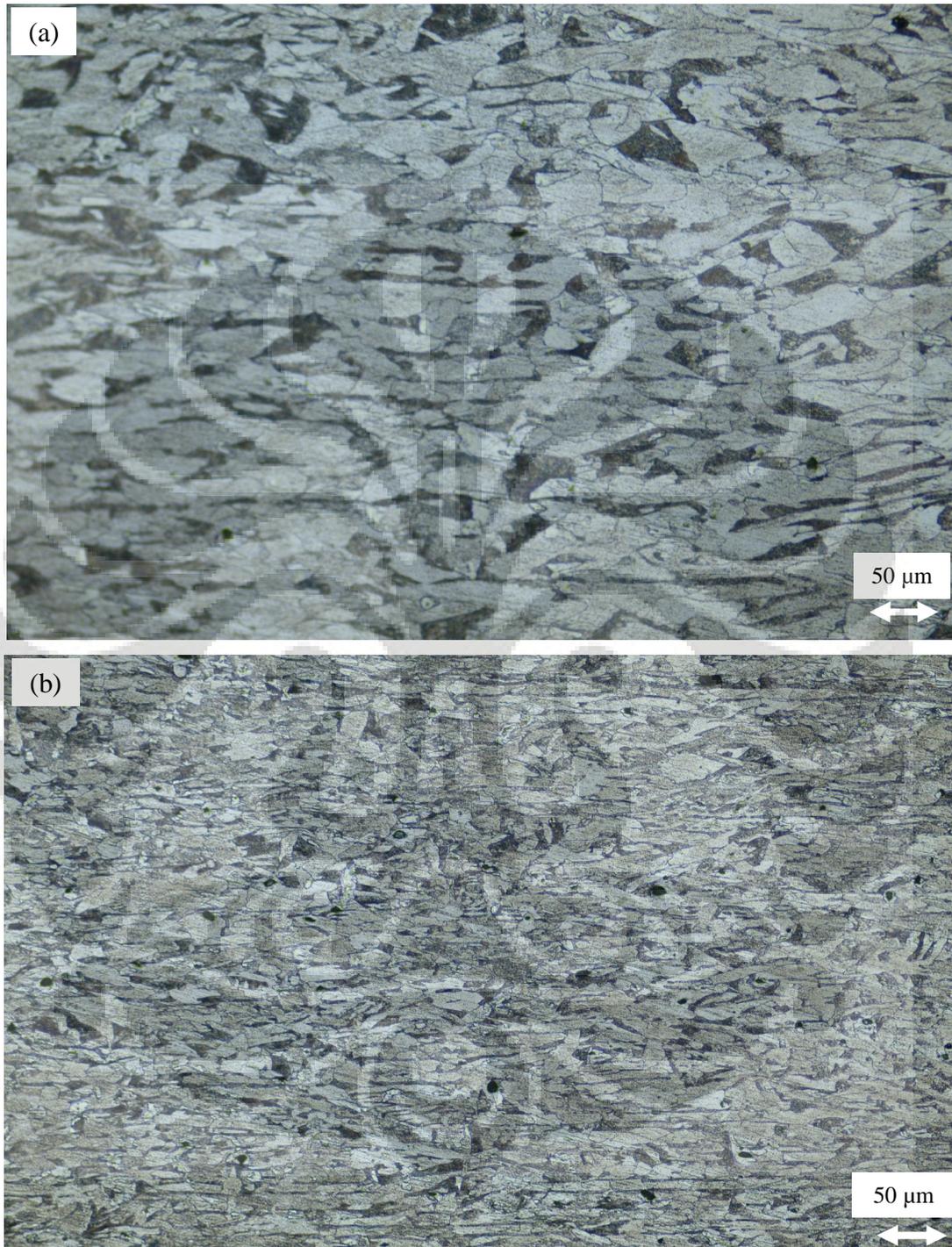
**Gambar 4.2** Foto struktur mikro ferit (terang) dan perlit (gelap) pada spesimen dengan proses pemanasan pada 1100 °C , lalu turun pada 650 °C dan ditahan selama 5 jam tanpa deformasi, etsa Nital 3%. (a) Perbesaran 200x ; (b) Perbesaran 100x

#### 4.2.3. Spesimen B



**Gambar 4.3** Foto struktur mikro ferit (terang) dan perlit (gelap) pada spesimen dengan proses pemanasan pada 1100 °C, turun pada 650 °C dan ditahan selama 5 jam, suhu turun pada 600 °C dilakukan deformasi 50 %, etsa Nital 3%. (a) Perbesaran 200x ; (b) Perbesaran 100x.

#### 4.2.4. Spesimen C



**Gambar 4.4** Foto struktur mikro ferit (terang) dan perlit (gelap) pada spesimen dengan proses pemanasan pada 1100 °C, turun pada 650 °C dan ditahan selama 5 jam, suhu turun pada 600 °C dilakukan deformasi 70 %, etsa Nital 3%. (a) Perbesaran 200x ; (b) Perbesaran 100x

### 4.3. Pembahasan

#### 4.3.1 Pengamatan Struktur Mikro Setelah Proses TMCP

Gambar 4.1 merupakan struktur mikro spesimen awal (*bulk*) dengan struktur ferit yang memiliki butir bulat kecil. Sedangkan pada gambar 4.2 diatas merupakan hasil pengujian spesimen A dengan proses pemanasan pada 1100 °C, suhu diturunkan pada 650 °C dan ditahan selama 5 jam kemudian didinginkan dengan udara, menghasilkan struktur mikro ferit dengan butir poligon besar. Spesimen A mengalami perubahan transformasi dari butir austenit mejadi ferit. Ketika dipanaskan 1100 °C dan ditahan selama 20 menit struktur mikro pada temperatur tersebut adalah austenit, kemudian terjadi keseragaman butir austenit pada waktu tahan selama 20 menit. Kemudian suhu diturunkan pada 650 °C dan ditahan selama 5 jam, spesimen didinginkan dengan udara. Butir yang dihasilkan memiliki struktur ferit (B.K Panigrahi 2001). Perubahan butir ini terjadi karena adanya mekanisme pertumbuhan butir (YANG Xu-yue, et al 2007). Selain temperatur, waktu tahan juga mempengaruhi besar butir yang terbentuk. Pertumbuhan butir terjadi karena adanya migrasi batas butir. Tidak semua butir dapat membesar, tetapi butir yang besar akan bergabung dengan butir yang kecil. Pergerakan batas butir merupakan difusi atom dari satu batas butir kepada batas butir lainnya (Callister 1997). Waktu tahan akan memberikan kesempatan atom-atom tersebut untuk bergabung dan meningkatkan ukuran butir. Selain adanya waktu tahan, spesimen A juga tidak dilakukan deformasi sehingga kedua hal inilah yang membuat ukuran butir spesimen A lebih besar dibanding spesimen B dan spesimen C. Diameter butir spesimen A sebesar 18,32 µm sedangkan diameter butir spesimen B sebesar 16,62 µm dan diameter butir spesimen C sebesar 12,77 µm.

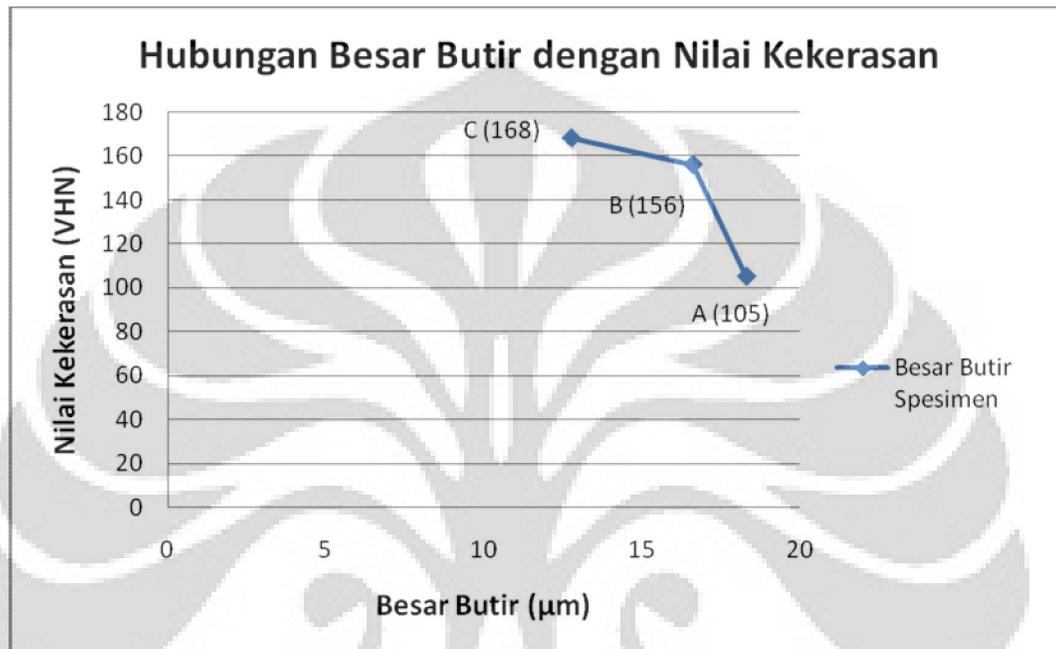
Gambar 4.3 yang merupakan foto spesimen B dengan proses pemanasan pada 1100 °C dan ditahan selama 20 menit. Kemudian suhu diturunkan pada 650 °C dan ditahan selama 5 jam, suhu turun pada 600 °C dan pada suhu tersebut dilakukan deformasi searah sebesar 50 %. Spesimen selanjutnya didinginkan dengan udara. Butir yang dihasilkan pada spesimen B jika dibandingkan butir pada spesimen A, memiliki butir ferit yang lebih pipih dibandingkan dengan butir spesimen A. Hal ini

disebabkan karena adanya perlakuan yang berbeda pada spesimen B dimana spesimen B mengalami proses canai hangat pada 600 °C. Ketika dilakukan proses canai, spesimen B mengalami proses *recovery* dan rekristalisasi. Pada proses rekristalisasi terjadi perbaikan sifat mekanik dan dihasilkan butir poligon baru yang bebas regangan. Proses canai panas adalah proses deformasi dan rekristalisasi pada saat yang hampir bersamaan. Pada rekristalisasi, saat mengalami deformasi, terjadi regangan di dalam material dan apabila regangan tersebut adalah regangan kritis (  $\sigma_c$  ) akan tersedia energi yang cukup tinggi untuk membentuk nuklei pada batas butir yang dideformasi (B.K Panigrahi 2001). Proses deformasi membentuk butir menjadi pipih (*elongated*) dan memanjang. Oleh karena itu, pada spesimen B memiliki butir yang pipih memanjang. Butir yang dihasilkan pada spesimen B lebih kecil dibandingkan dengan butir spesimen A, diameter butir spesimen A sebesar 18,32  $\mu\text{m}$  sedangkan diameter butir spesimen B sebesar 16,62  $\mu\text{m}$ .

Gambar 4.4 merupakan hasil foto spesimen C dengan proses pemanasan pada 1100 °C dan ditahan selama 20 menit. Kemudian suhu diturunkan pada 650 °C dan ditahan selama 5 jam, suhu turun pada 600 °C dan pada suhu tersebut dilakukan deformasi searah sebesar 70 %. Spesimen selanjutnya didinginkan dengan udara. Jika dibandingkan hasil pengujian spesimen C dengan hasil pengujian spesimen B, terdapat perbedaan derajat deformasi yang dilakukan. Derajat deformasi spesimen B adalah 0,5, dimana lebih kecil jika dibandingkan dengan derajat deformasi spesimen C yang bernilai 0,7. Hal ini menjelaskan bahwa semakin tinggi derajat deformasi yang diberikan, beban yang diberikan semakin besar akibatnya butir yang dikenai deformasi tersebut akan semakin pipih dan memanjang. Hal ini yang terjadi pada butir spesimen C dimana butir yang dihasilkan lebih pipih dan memanjang dibandingkan dengan butir spesimen B. Selain itu, dapat diketahui juga bahwa butir yang dihasilkan pada spesimen C lebih kecil dibandingkan dengan spesimen B, diameter butir spesimen C sebesar 12,77  $\mu\text{m}$  sedangkan diameter butir spesimen B sebesar 16,62  $\mu\text{m}$ .

### 4.3.2. Hubungan Besar Butir Terhadap Kekerasan

Ketiga spesimen dilakukan perhitungan besar butir untuk mengetahui pengaruhnya terhadap kekerasan. Hubungan besar butir spesimen dengan kekerasan dapat dilihat pada gambar 4.5 dibawah ini.



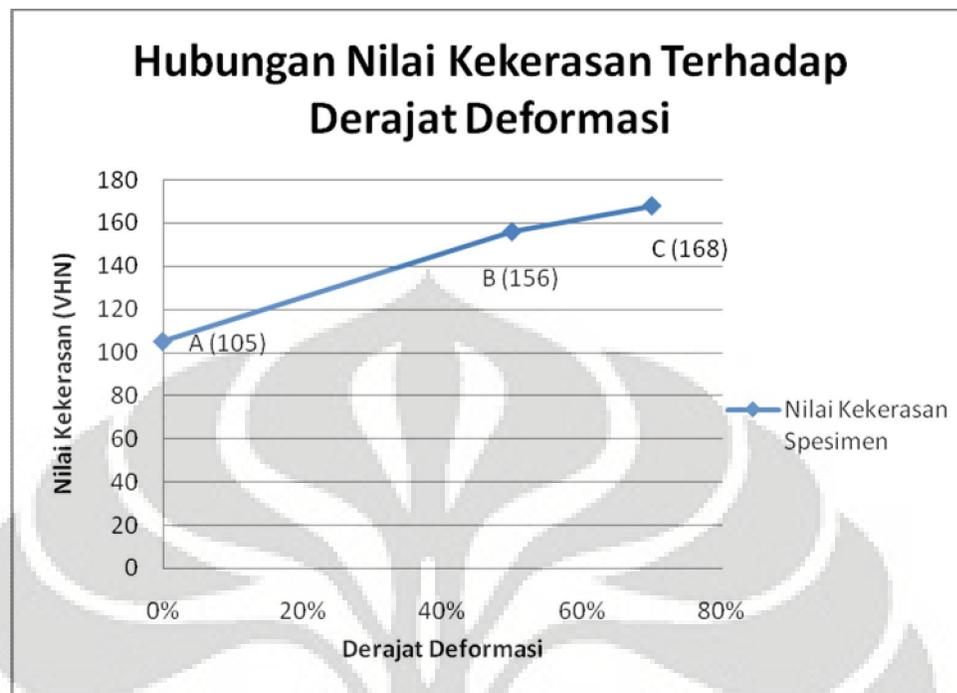
Gambar 4.5 Grafik Hubungan Besar Butir dengan Kekerasan

Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa semakin besar butir maka nilai kekerasan yang dihasilkan semakin rendah. Spesimen A merupakan proses pemanasan 1100 °C dan ditahan selama 20 menit, kemudian suhu turun menjadi 650 °C dan ditahan selama 5 jam tanpa adanya deformasi, kemudian didinginkan di udara. Sedangkan spesimen B dan spesimen C dilakukan proses pemanasan pada 1100 °C dan ditahan selama 20 menit. Kemudian suhu diturunkan pada 650 °C dan ditahan selama 5 jam, suhu turun pada 600 °C dan pada suhu tersebut dilakukan deformasi searah, spesimen B sebesar 50 % dan spesimen C sebesar 70 %, kemudian didinginkan dengan udara. Spesimen A yang memiliki butir terbesar memiliki nilai kekerasan terendah dibandingkan dengan nilai kekerasan spesimen B dan spesimen C. Hal ini disebabkan karena spesimen A mengalami proses pertumbuhan butir (*grain growth*). Pertumbuhan butir terjadi karena adanya waktu tahan yang lama pada

TMCP. Pada proses pertumbuhan butir, batas butir mengalami migrasi, dimana migrasi batas butir adalah adanya difusi atom pada batas butir menuju lainnya yang semakin lama akan bergabung membentuk butir yang besar. Akibatnya, batas butir yang merupakan penghalang pergerakan dislokasi menjadi berkurang sehingga kekerasan material tersebut menurun. Sedangkan spesimen B dan spesimen C memiliki butir yang lebih kecil. Pada kedua spesimen tersebut mengalami proses rekristalisasi statis karena terdapat waktu setelah proses deformasi/rekristalisasi dinamis. Pada proses canai panas / hangat, rekristalisasi dan deformasi terjadi pada saat yang hampir bersamaan. Ketika rekristalisasi, saat mengalami deformasi, terjadi regangan dan apabila mencapai regangan kritis maka akan cukup energi untuk membentuk nuklei pada batas butir yang dideformasi. Nuklei ini akan membentuk butir-butir halus pada material. Material dengan butir halus memiliki banyak batas butir, dimana batas butir tersebut berfungsi sebagai penghalang pergerakan dislokasi. Karena itu, kepadatan yang lebih tinggi dari batas butir akan menghasilkan *yield* dan *tensile stress* yang lebih tinggi (Smith 1993). Selain itu, material yang mengalami deformasi menunjukkan terjadinya perubahan pada bentuk butir, pengerasan regangan (*strain hardening*) dan peningkatan pada kepadatan dislokasi (Callister 1997). Oleh karena itu nilai kekerasan pada spesimen B dan spesimen C lebih tinggi dibanding dengan spesimen A.

#### **4.3.3. Hubungan Deformasi Terhadap Kekerasan**

Setelah dijelaskan tentang pengaruh besar butir terhadap nilai kekerasan, kemudian akan dijelaskan tentang pengaruh deformasi terhadap kekerasan spesimen. Hasil pengujian kekerasan pada ketiga spesimen dapat dilihat dalam gambar 4.6 dibawah ini.

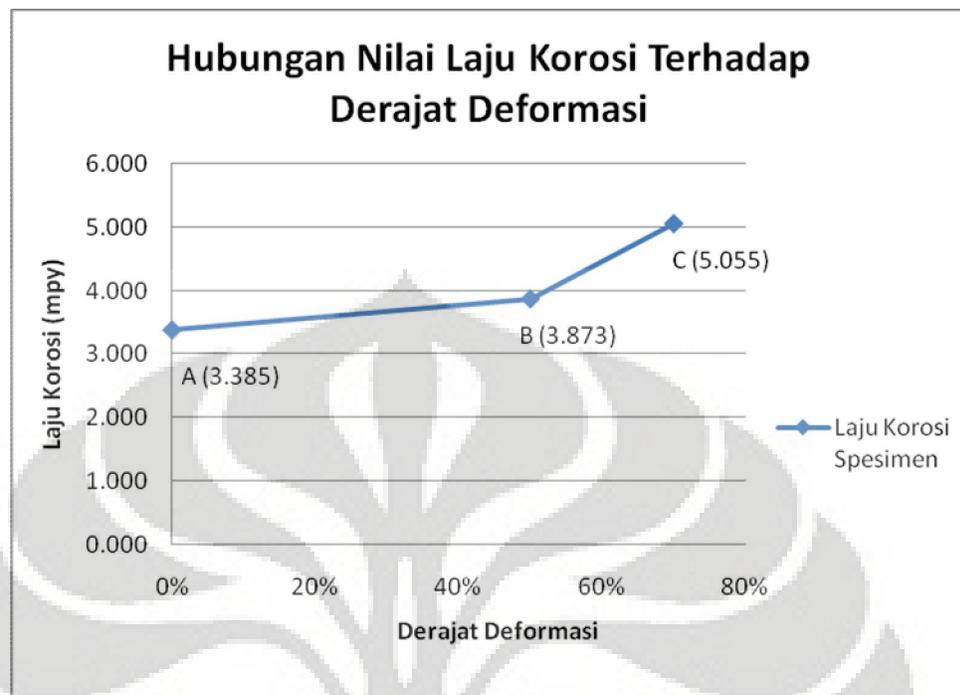


**Gambar 4.6** Grafik Hubungan Derajat Deformasi Terhadap Nilai Kekerasan pada Ketiga Spesimen

Berdasarkan grafik diatas, dapat diketahui bahwa spesimen C memiliki nilai kekerasan paling tinggi, diikuti oleh spesimen B kemudian spesimen A. Ketiga spesimen diberikan derajat deformasi yang berbeda, dimana spesimen C diberikan deformasi yang lebih besar. Semakin besar deformasi yang diberikan maka semakin tinggi nilai kekerasan yang dihasilkan (Callister 1997). Hal ini disebabkan karena pada saat deformasi terjadi pergerakan dan penumpukan dislokasi pada batas butir. Penumpukan ini akan mengakibatkan regangan kisi, yang kemudian akan menghambat pergerakan dislokasi yang baru (deformasi plastis ditandai dengan adanya pergerakan dislokasi), sehingga dibutuhkan kekuatan yang lebih tinggi untuk menggerakkannya. Oleh karena itu, maka material yang mengalami deformasi yang besar akan memiliki nilai kekerasan yang semakin tinggi.

#### 4.3.3. Hubungan Derajat Deformasi Terhadap Laju Korosi

Ketiga spesimen dilakukan pengujian korosi polarisasi untuk mengetahui laju korosinya. Hasil pengujian dapat dilihat pada gambar 4.7 dibawah ini.



**Gambar 4.7** Hubungan Laju Korosi Terhadap Derajat Deformasi pada Ketiga Spesimen

Berdasarkan laju korosi yang diperoleh dari ketiga spesimen, maka dapat disimpulkan bahwa semakin besar derajat deformasi maka semakin cepat laju korosi. Pemberian deformasi ini mengakibatkan meningkatnya besar tegangan permukaan dibandingkan dengan bagian yang lain. Sebagaimana diketahui, bahwa dengan terjadinya peningkatan tegangan ini akan berakibat pada sifat korosinya, dimana daerah pada suatu material yang memiliki tegangan yang lebih tinggi bersifat akan lebih anodik, sedangkan bagian yang kurang tegangannya akan bersifat katodik (ASM Handbook, Vol.13). Oleh karena itu, bagian yang mengalami tegangan yang lebih besar akan menjadi anoda dan akan terkorosi lebih hebat.

Berdasarkan data pengujian, hasil laju korosi ketiga spesimen lebih kecil jika dibandingkan dengan spesimen awal (tanpa dilakukan pengujian). Dengan hasil ini dapat dijelaskan bahwa pengujian yang dilakukan dapat meningkatkan ketahanan korosi spesimen jika dibandingkan spesimen awal. Penelitian ini sesuai dengan tujuan yang diinginkan yaitu meningkatkan kekuatan, ketangguhan dan ketahanan korosi pada suatu material jika dibandingkan dengan spesimen awal.

## **BAB 5**

### **KESIMPULAN**

#### 5.1. Kesimpulan

Dari hasil pengujian dan analisis yang Penulis lakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Proses yang dilakukan meliputi proses canai hangat dengan besaran deformasi yang berbeda, yaitu 0% untuk spesimen A, 50% untuk spesimen B, 70% untuk spesimen C. Ukuran butir pada spesimen A bulat besar / poligon, spesimen B pipih memanjang (*elongated*), spesimen C lebih pipih memanjang (*elongated*).
2. Dari hasil perhitungan butir didapatkan bahwa ukuran butir spesimen A sekitar 18,32  $\mu\text{m}$  yang merupakan butir terbesar, diikuti butir spesimen B yang sebesar 16,62  $\mu\text{m}$ , kemudian butir spesimen C 12,77  $\mu\text{m}$  yang merupakan butir terkecil.
3. Hasil kekerasan yang diperoleh pada spesimen A (tanpa deformasi) sebesar 105 VHN, spesimen B (deformasi 50 %) sebesar 156 VHN, dan spesimen C (deformasi 70 %) sebesar 168 VHN. Berdasarkan pengujian kekerasan, spesimen C memiliki nilai kekerasan yang terbesar diikuti spesimen B kemudian spesimen A. Hal ini menjelaskan bahwa semakin besar deformasi yang diberikan maka kekerasan yang dihasilkan semakin tinggi.
4. Hasil laju korosi yang diperoleh pada spesimen A sebesar 3,385 *mpy*, spesimen B sebesar 3,873 *mpy*, spesimen C sebesar 5,055 *mpy*. Berdasarkan pengujian korosi polarisasi, spesimen C memiliki nilai laju korosi yang terbesar diikuti spesimen B kemudian spesimen A. Hal ini menjelaskan bahwa semakin besar deformasi, semakin tinggi tegangan sehingga laju korosi semakin meningkat.

## DAFTAR PUSTAKA

1. William D. Callister, Jr. *Materials Science and Engineering An Introduction*. 7th Edition (USA: 2007).
2. Krauss George. *Steels Processing, Structure, and Performance*. (ASM International, 2005).
3. R. Supardi. *Korosi dan Kegagalan yang Terjadi Pada Pengecatan Otomotif*, Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Industri Logam dan Mesin. Departemen Perindustrian dan Perdagangan, Bandung, 2002.
4. ASM Specialty Handbook. *Carbon and Alloy Steel*. (ASM International, 1996).
5. Donald R. Askeland. *The Science And Engineering Of Materials*. 1984
6. Pickering, F. B. *Physical Metallurgy And The Design Of The Steels*. Applied Science Publishers, London, 1978, pp. 1-88.
7. B K Panigrahi. *Processing Of Low Carbon Steel Plate And Hot Strip An Overview R&D Centre For Iron And Steel*. Steel Authority Of India Ltd., Ranchi 834 002, India.
8. Imai, Shiro. *Proceedings of The Twelfth (2002) International Offshore and Polar Engineering Conference Kitakyushu, Japan, May 26 31, 2002*. General Properties of TMCP Steels . Plate Technical Dept., Nippon Steel Corporation. Tokyo Japan. ISBN 1-880653-58-3 (Set); ISSN 1098-6189 (Set).
9. Dryden, John. *Controlled Rolled XLERPLATE® - Strong, Tough and Weldable*. Diakses 24 Juni 2010 dari [www.bluescopesteel.com.au/go/news/controlled-rolled-xlerplate strong-tough-and-weldable](http://www.bluescopesteel.com.au/go/news/controlled-rolled-xlerplate-strong-tough-and-weldable).
10. Nicholas, Joanne. *What are TMCP (Thermo-Mechanically Controlled Processed) steels?* Copyright © 2000, TWI Ltd. Diakses 2 Des. 2008 <http://www.twi.co.uk/content/faqjmn002.html>
11. Yokota, Tomoyuki. Ferrite grain size refinement through transformation . NKK Corp. (JFE group).

12. Yajima et al. *Extensive Application of TMCP-manufactured High Tensile Steel Plates to Ship Hulls and Offshore Structures*. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review Vol 24 No. 1, February 1987.
13. E.S. Siradj. Peluang penelitian dalam Thermomechanical Treatment Baja High Strength Low Alloy. (Seminar sehari Fakultas Teknik Universitas Tarumanegara, 2001).
14. I.Kozasu. *Materials Science and Technology*. Vol.7 Constitution and Properties of Steels Ed. By F.B.Pickering, VCH, (1993), 184.
15. H. K. D. H. BHADSHIA. 2001. *Bainite In Steels: Transformations, Microstructure And Properties*. Second Edition. (IOM Communications Ltd.)
16. Gadang Priyotomo, ST. *Makalah Ilmiah Ku (korosi material baja karbon dan stainless steel)*. 2007.  
Diakses 24 Juni 2010 dari  
<http://gadang-e-bookformaterialscience.blogspot.com/2007/11/makalahilmiah-ku-korosi-material-baja.html>
17. Gadang Priyotomo, ST [2008 ]. *Pengenalan Korosi secara umum*  
Diakses 24 Juni 2010 dari  
<http://gadang-e-bookformaterialscience.blogspot.com/2008/05/infopengenalan-korosi-secara-umum.html>
18. ASM Handbook, Vol.13. *Corrosion*. ASM International
19. D.A. Jones. *Principles and Prevention of Corrosion*. 2nd Edition, Singapore, Prentice Hall, 1997.

Lampiran 1. Foto Spesimen A



Lampiran 2. Foto Spesimen B

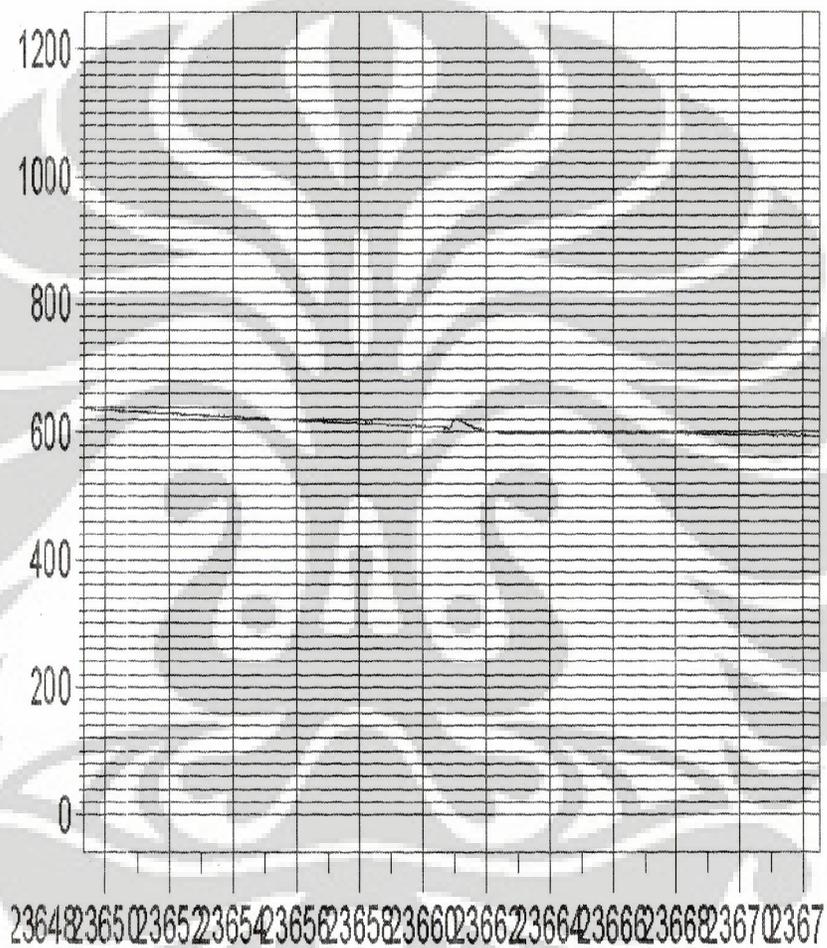


Lampiran 3. Foto Spesimen C



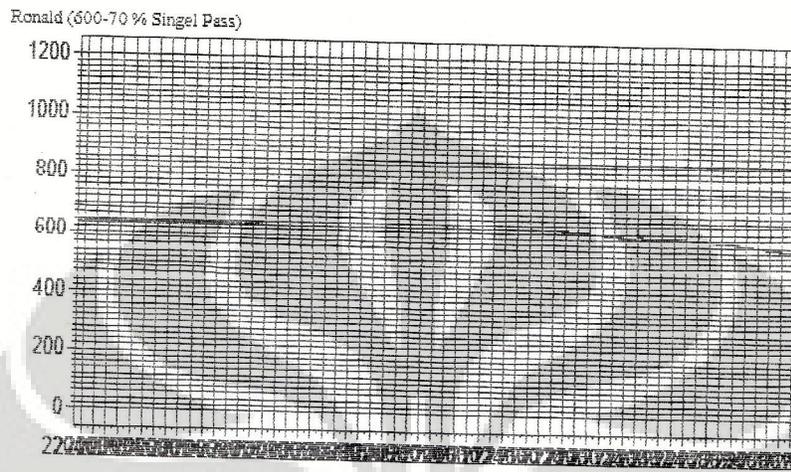
## Lampiran 4. Kurva Proses B

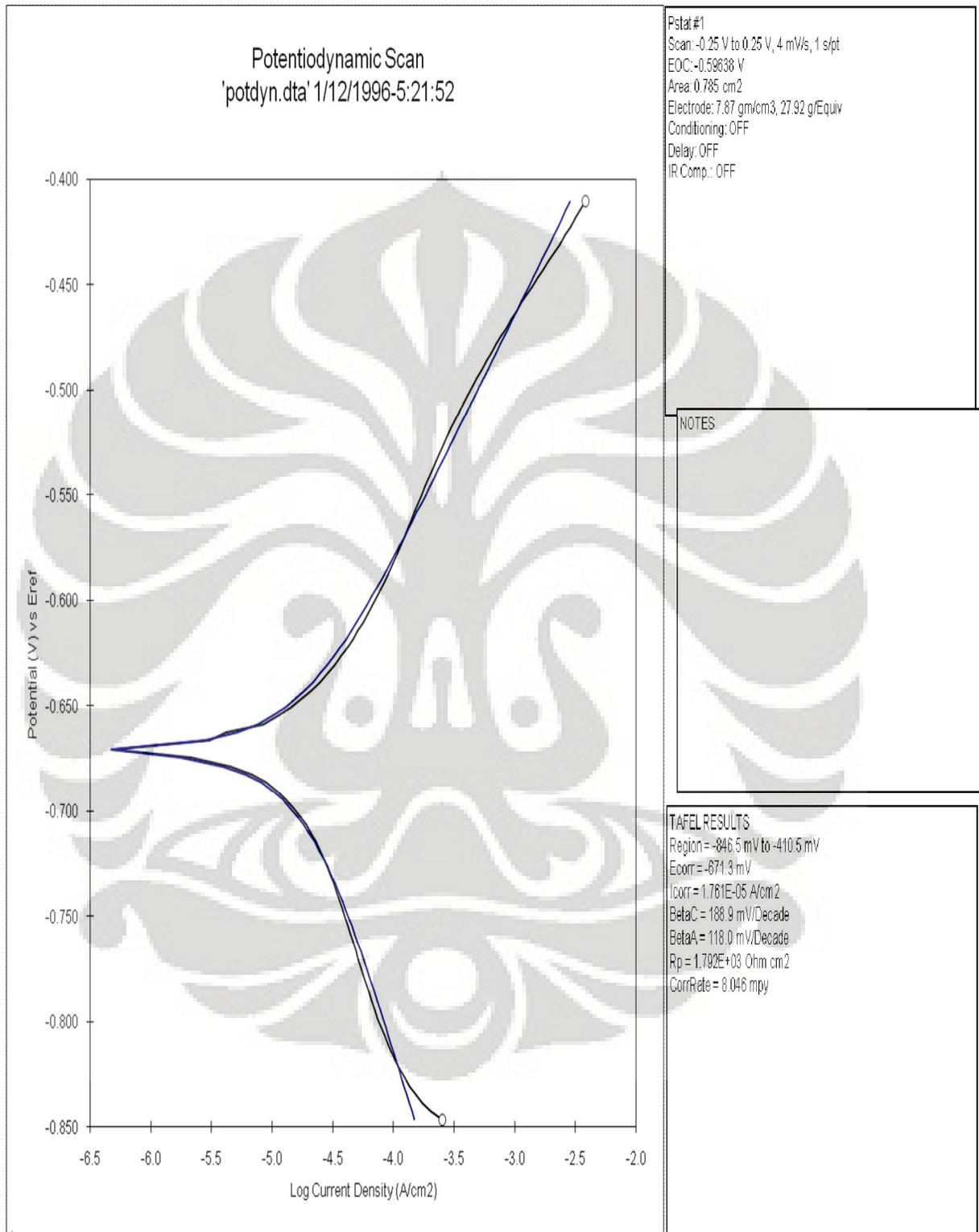
Ronald 600 Sample B 50 % single p



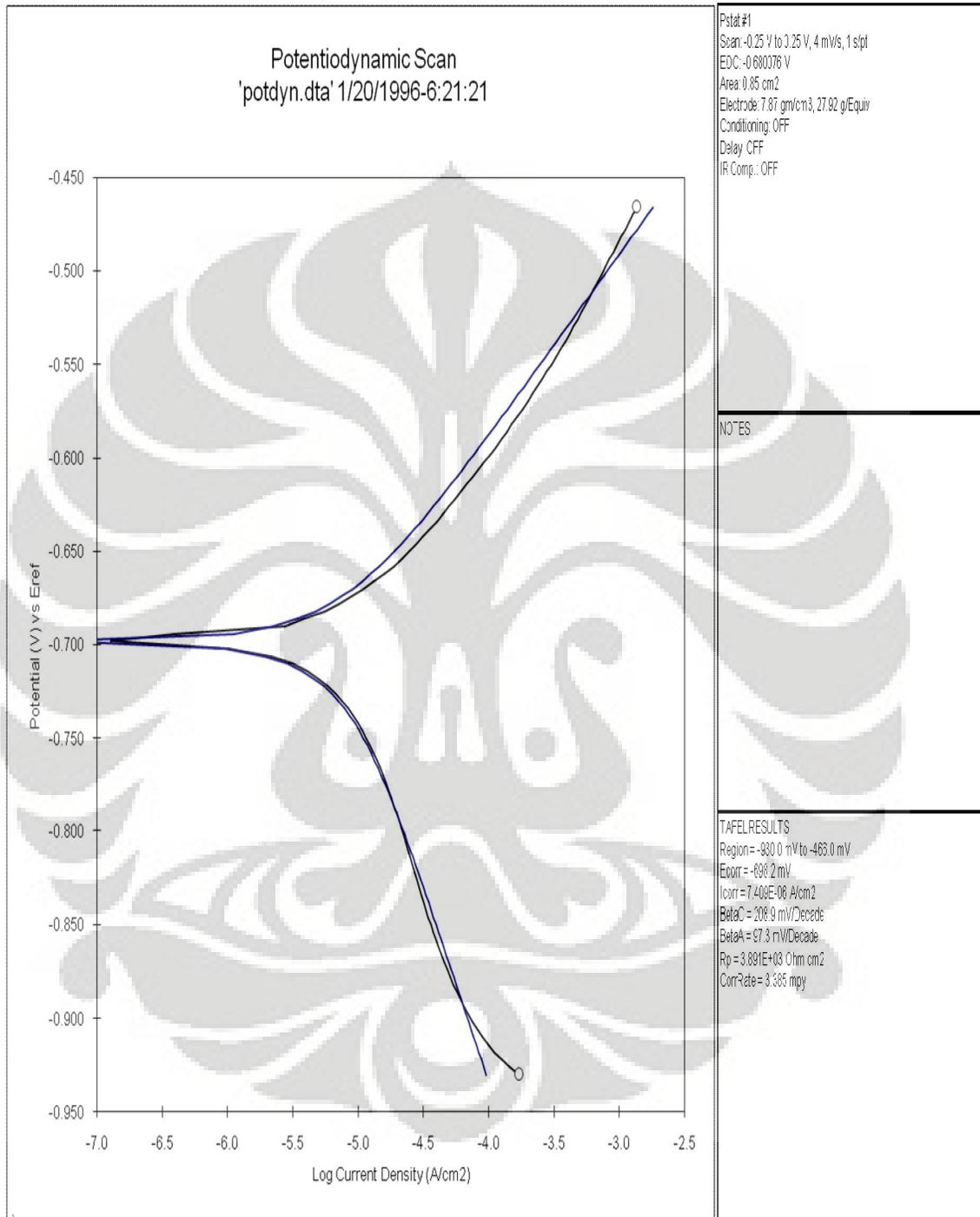
S

Lampiran 5. Kurva Proses C

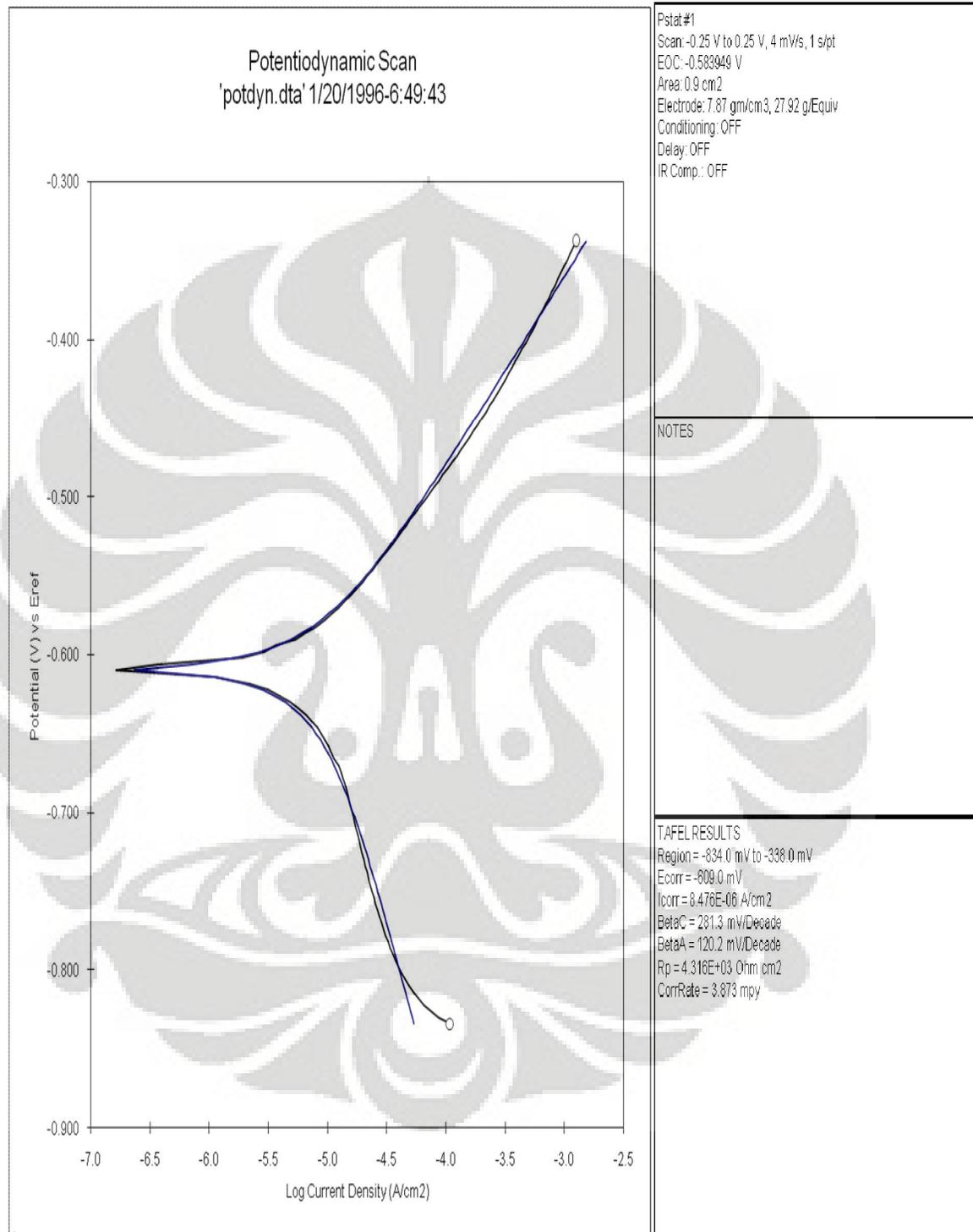


Lampiran 6. Hasil Korosi Polarisasi Spesimen Awal (*Bulk*)

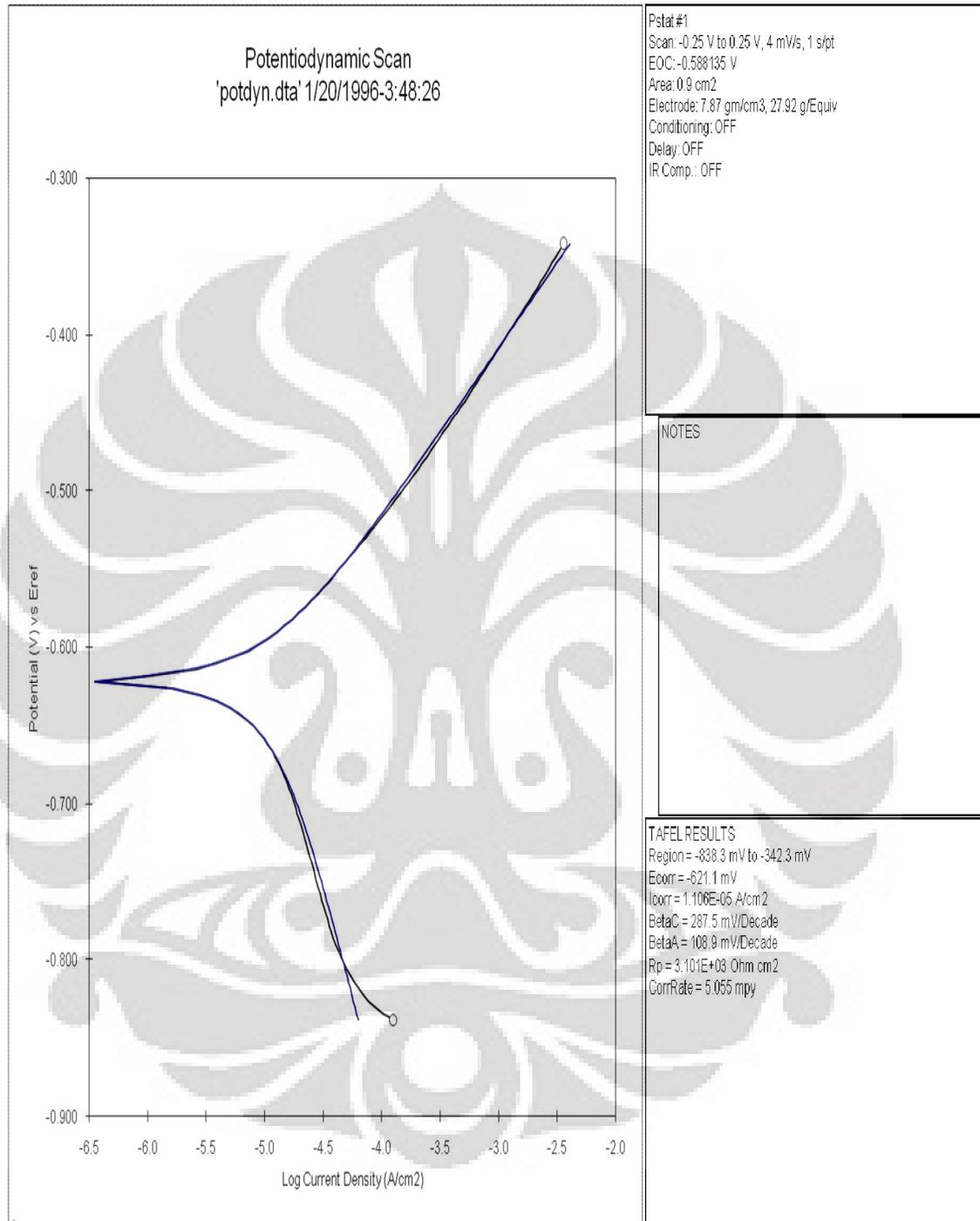
## Lampiran 7. Hasil Korosi Polarisasi Spesimen A



## Lampiran 8. Hasil Korosi Polarisasi Spesimen B



## Lampiran 9. Hasil Korosi Polarisasi Spesimen C



## Lampiran 10. Hasil Spektrometer



**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> (%)
01	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,



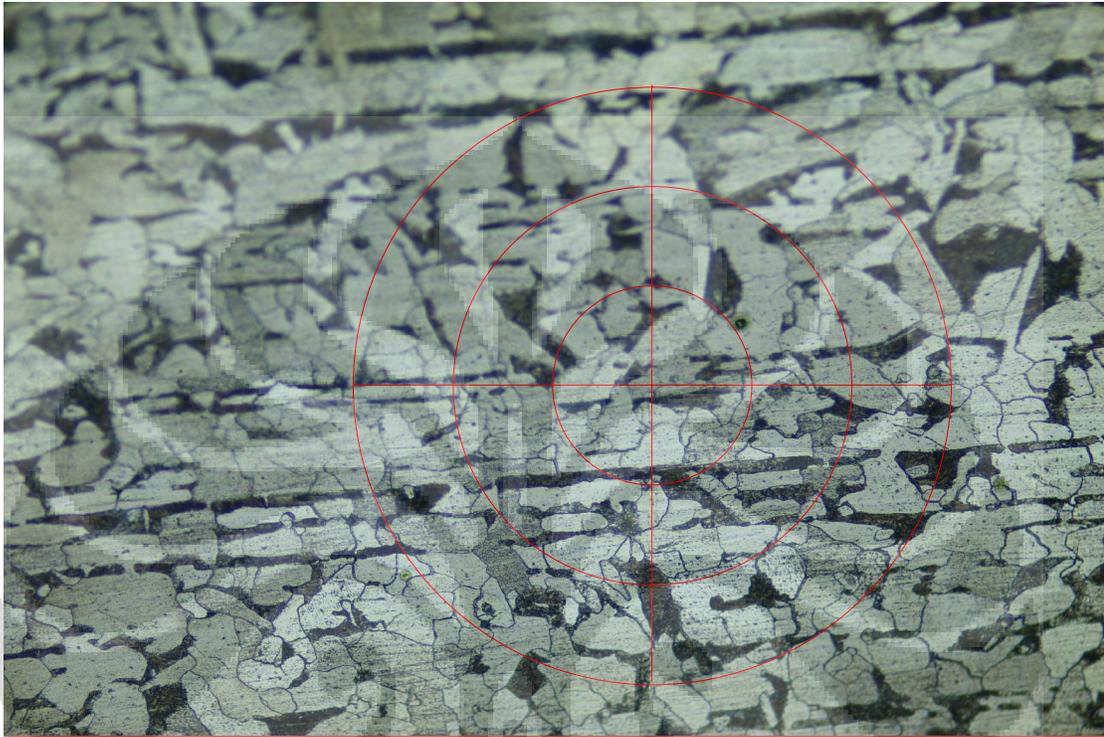
(Ahmad Ivan Karayan, ST, M.Eng)

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

## Lampiran 11. Perhitungan Besar Butir Spesimen

Foto Spesimen A (650 °C-5 jam tanpa deformasi). Perbesaran 200x



(Lanjutan)

Foto Spesimen B (600 °C-50 % single pass). Perbesaran 200x



(Lanjutan)

Foto Spesimen C (600 °C-70 % single pass). Perbesaran 200x



## Lampiran 12. Spesifikasi Alat

## 1. Mesin roll dua tingkat Ono Roll Japan

- Flat rolling
- Capacity = 20 ton F
- Max Roll gap = 15 mm
- Roll Dimension = 104 x 140 mm
- Rolling Speed = 8 mm / minutes
- Torsee = 71,8 kg.m
- Load measurement system = load cell 20 ton F max. dynamic strain ampilifier,

## 2. Dapur Pemanas (furnace)

- carbolite, type RHF 16/8. Serial 10.96/2775
- max temperature 160° C
- VOH = 380220
- Phase = 3tn
- Watts = 8000 w
- 17/ph Amps max

## 3. Mesin Amplas (grinding)

- Buehler Ltd Polimet 1
- 220 v
- 15 Amps
- 1 pH
- Serial no 412-cccv-4887

## 4. Mesin Poles

- union
- Serial 6P-102
- 50/60 Hz, 100 w