



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PENGAMATAN MIKROSTRUKTUR, REKRISTALISASI,  
DAN KEKERASAN DARI BAJA API 5LX 42 YANG  
DIDIFORMASI MULTIPASS SEARAH PROSES CANAI  
PADA TEMPERATUR 700 °C.**

**SKRIPSI**

**TAUFIK M NUR**

**0706268921**

**FAKULTAS TEKNIK**

**PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL**

**DEPOK**

**JANUARI 2011**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PENGAMATAN MIKROSTRUKTUR, REKRISTALISASI,  
DAN KEKERASAN DARI BAJA API 5LX 42 YANG  
DIDIFORMASI MULTIPASS SEARAH PROSES CANAI  
PADA TEMPERATUR 700 °C.**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**TAUFIK M NUR**

**0706268921**

**FAKULTAS TEKNIK**

**PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL**

**DEPOK**

**JANUARI 2011**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

**Nama : Taufik M Nur**

**NPM : 0706268921**

**Tanda Tangan :**

**Tanggal : 10 Januari 2011**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Taufik M Nur  
NPM : 0706268921  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul Skripsi : Pengamatan Mikrostruktur, Rekristalisasi, dan Kekerasan dari Baja API 5L X42 yang Dideformasi Multipass Searah Proses Canai Pada Temperatur 700 °C.

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

### DEWAN PENGUJI

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

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

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

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : Januari 2011

## KATA PENGANTAR

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

- (1) Ir. Rini Riastuti, M.Sc, selaku pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini.
- (2) Seluruh dosen dan staf pengajar Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI yang telah memberikan pengetahuan dan ilmu yang bermanfaat.
- (3) Bapak Dimas Patriangga dari PT. Bakrie Pipe Industries yang telah membantu memfasilitasi material untuk skripsi ini.
- (4) M Nur dan Yulita selaku orang tua dan beserta keluarga saya yang senantiasa mendoakan saya, memberikan bantuan baik moril maupun materil.
- (5) Astrini Wulandari, Deny Firmansyah, Lendi Trigondo selaku rekan kerja yang telah banyak membantu saya dalam penelitian ini.
- (6) Seluruh karyawan, staf, serta teknisi Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI
- (7) Sahabat dan teman-teman yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini.
- (8) Semua pihak yang telah membantu penyelesaian skripsi ini yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Akhir kata, penulis berharap Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi semua pihak dalam pengembangan ilmu.

Depok, 10 Januari 2011

Penulis

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

---

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

Nama : Taufik M Nur  
NPM : 0706268921  
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 (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

Pengamatan Mikrostruktur, Rekristalisasi, dan Kekerasan dari Baja API 5L X42 yang Dideformasi Multipass Searah Proses Canai Pada Temperatur 700 °C

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : Januari 2011

Yang menyatakan

(Taufik M Nur)

## ABSTRAK

Nama : Taufik M Nur  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul : Pengamatan Mikrostruktur, Rekristalisasi, dan Kekerasan dari Baja API 5L X42 yang Dideformasi Multipass Searah Proses Canai Pada Temperatur 700 °C

Berbagai penelitian telah dilakukan terhadap proses canai untuk mendapatkan material dengan sifat mekanis yang baik namun nilai ekonomisnya tetap tinggi.. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh deformasi multipass searah proses canai pada temperatur 700 °C terhadap mikrostruktur dan kekerasan Baja API 5L X42. Sampel dideformasi pada temperatur 700°C dengan waktu tahan 10 menit dan derajat deformasi 60 % dilanjutkan dengan derajat deformasi 20%, 15%,10% pada temperatur 500 °C kemudian didinginkan cepat dengan media air. Dengan derajat deformasi 60% pada temperatur 700 °C akan terjadi rekristalisasi. Proses canai hangat yang dilakukan dibawah temperatur rekristalisasi akan menghasilkan *deformation band* yang akan mempengaruhi kekerasan material. Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses canai hangat dengan parameter yang ada akan meningkatkan kekerasan akhir material yaitu sebesar 252 BHN jika dibandingkan dengan kekerasan awal material 141 BHN.

Kata kunci: Pencanaian hangat, deformasi multipass, deformation band, kekerasan, rekristalisasi.

## ABSTRACT

Name : Taufik M Nur  
Study Program : Metallurgy and Materials Engineering  
Title : Investigations of Microstructure, Recrystallization, and Hardness of API 5L X42 Steel which Deformed Unidirectional Multipass in Rolling Process at Temperature of 700 °C .

Various studies have been carried out on rolling process to obtain materials with good mechanical properties but its economic value remains high. This study aims to determine the influence of unidirectional multipass deformation process at a temperature of 700 °C rolled on the microstructure and hardness of API 5L X42 steel. Samples were heated and deformed at a temperature of 700 °C with holding time 10 minutes and 60% deformation degree, followed by the 20%, 15%, 10% deformation degree at a temperature of 500 °C and then quenched with water. With the degree of deformation 60% at a temperature 700 °C recrystallization will occur. Warm rolled process conducted under the recrystallization temperature will result a deformation bands that will affect the hardness of the material. The results showed that the warm rolling process with the existing parameters will increase the final hardness material that is equal to 252 BHN compared to the initial hardness material 141 BHN.

Keywords: Warm rolling, multipass deformation, deformation band, hardness, recrystallization.

# DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI .....	v
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS.....	vi
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT .....	viii
DAFTAR ISI .....	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR .....	xii
DAFTAR RUMUS .....	xiv
DAFTAR LAMPIRAN .....	xv
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang Penelitian .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	2
1.3 Tujuan .....	2
1.4 Ruang Lingkup.....	3
1.4.1 Material .....	3
1.4.2 Parameter Penelitian .....	3
1.4.3 Tempat Penelitian .....	3
1.5 Sistematika Penulisan .....	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Baja Karbon .....	5
2.1.1 Baja Karbon Rendah .....	6
2.2 Pengaruh Deformasi Plastis .....	8
2.3 Pengaruh Ukuran Butir Terhadap Sifat Mekanis Baja .....	10
2.3.1 Penghalusan Butir Ferit.....	12
2.4 Proses Canai .....	12
2.5 Rekoveri, Rekristalisasi, dan Pertumbuhan Butir .....	14
2.5.1 Rekoveri .....	15

2.5.1.1 Subgrain.....	16
2.5.2 Rekristalisasi.....	16
2.5.2.1 Rekristalisasi Dinamis.....	17
2.5.2.2 Rekristalisasi Statis.....	19
2.5.3 Pertumbuhan Butir.....	20
2.6 Thermo-Mechanical Controlled Process (TMCP).....	21
2.6.1 Warm Rolling.....	22
2.6.1.1 Deformation Band.....	23
2.7 Quenching.....	24
2.8 Grain Aspect Ratio.....	25
<b>BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....</b>	<b>26</b>
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	26
3.2 Alat dan Bahan.....	27
3.2.1 Alat.....	27
3.2.2 Bahan.....	27
3.3 Prosedur Penelitian.....	27
3.3.1 Pemilihan Material.....	27
3.3.2 Preparasi Benda Uji.....	28
3.3.3 Proses TMCP dan Warm Rolling.....	29
3.3.4 Preparasi, Pengujian Metalografi dan Pengamatan Mikrostruktur.....	32
3.3.5 Pengukuran Besar Butir.....	33
3.3.6 Pengukuran Grain Aspect Ratio (GAR).....	33
3.3.7 Uji Kekerasan.....	35
<b>BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>37</b>
4.1 Pengukuran Dimensi Benda Uji.....	37
4.2 Ukuran Butir Ferit.....	39
4.2.1 Pengukuran Diameter Butir Ferit.....	39
4.2.1 Pengukuran Grain Aspect Ratio (GAR).....	41
4.3 Hasil Pengamatan Metalografi.....	44
4.3.1 Pengaruh Temperatur Reheating terhadap Mikrostruktur.....	44
4.3.2 Pengaruh Warm Rolling terhadap Mikrostruktur.....	46

4.3.2 Rekristalisasi .....48

4.4 Pengujian Kekerasan .....50

4.4.1 Pengaruh Temperatur Reheating Terhadap Kekerasan.....51

4.4.2 Pengaruh Temperatur dan Deformasi Terhadap Kekerasan .....52

4.4.3 Pengaruh Rekristalisasi Terhadap Kekerasan .....54

4.4.3 Hubungan Kekerasan dan Kekuatan Baja Karbon .....55

BAB 5 KESIMPULAN .....57

REFERENSI .....58



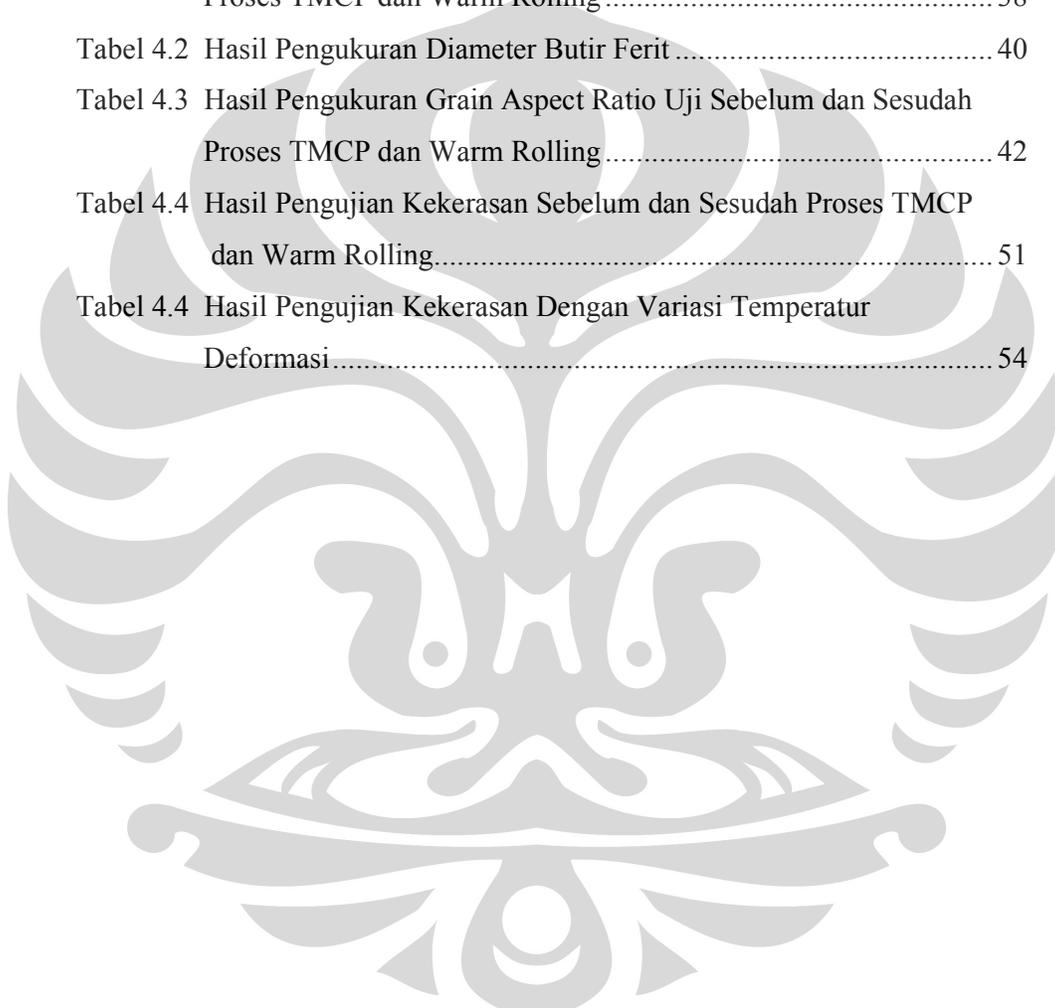
## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Diagram Fe-Fe <sub>3</sub> C .....	5
Gambar 2.2 Transformasi Fasa Pada Baja Karbon .....	7
Gambar 2.3 Kombinasi Elongasi dan Kekuatan untuk Berbagai Jenis Baja Karbon Rendah .....	8
Gambar 2.4 Analogi Pergerakan Dislokasi .....	9
Gambar 2.5 Ilustrasi Batas Butir dan Pergerakan Dislokasi .....	10
Gambar 2.6 Pengaruh besar butir terhadap nilai kekuatan .....	11
Gambar 2.7 Skematis Proses Canai .....	13
Gambar 2.8 Transformasi Morfologi Butir Setelah Proses Canai .....	13
Gambar 2.9 Skematik Proses Anil .....	14
Gambar 2.10 Skematik Perubahan Morfologi Butir yang Terdeformasi .....	17
Gambar 2.11 Kurva Tegangan dan Regangan Dengan variasi Temperatur Deformasi. $\epsilon_c$ Merupakan Regangan Kritis Untuk Terjadinya Rekristalisasi Dinamis .....	18
Gambar 2.12 Skematis Proses Recovery, Rekristalisasi dan Pertumbuhan Butir .....	20
Gambar 2.13 Perbedaan Mikrostruktur Antara Proses Canai Konvensional dan Proses TMCP .....	21
Gambar 2.14 Perbandingan Antara Jalur Proses Konvensional dan TMCP ....	22
Gambar 2.15 Mekanisme Terbentuknya <i>Deformation Band</i> .....	23
Gambar 2.16 Mikrostruktur AISI SS 316 Electrolytic Etch of 10% Oxalic Acid in Water, Stainless Steel Cathode, 6V, 10 s. 200x .....	24
Gambar 2.17 Ilustrasi Pengukuran GAR .....	25
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian .....	26
Gambar 3.2 Ilustrasi Benda Uji dan Pemasangan Termokopel .....	28
Gambar 3.3 Ilustrasi Benda Uji Sebelum Dipreparasi .....	28
Gambar 3.4 Skematik Pengujian Benda Uji B .....	29
Gambar 3.5 Skematik Pengujian Benda Uji C .....	30
Gambar 3.6 Skematik Pengujian Benda Uji D .....	30
Gambar 3.7 Skematik Pengujian Benda Uji E .....	31

Gambar 3.8 Skematik Pengujian Benda Uji F.....	31
Gambar 3.9 Furnace Carbolite.....	32
Gambar 3.10 Mesin Onoroll dan Rangkaian Alat .....	32
Gambar 3.11 Lingkaran yang Digunakan Untuk Penghitungan Besar Butir Dengan Metode Intercept Heyn .....	34
Gambar 3.12 Prinsip Pengujian Kekerasan Dengan Metode <i>Rockwell B</i> .....	36
Gambar 4.1 Benda Uji Yang Telah Dideformasi .....	36
Gambar 4.2 Mekanisme Roll Flattening .....	39
Gambar 4.3 Grafik Pengaruh Temperatur <i>Reheating</i> dan Deformasi Terhadap Ukuran Diameter Butir Ferit.....	40
Gambar 4.4 Foto Mikrostruktur Baja API 5L X42, Benda Uji A0 .....	44
Gambar 4.5 Foto Mikrostruktur Baja API 5L X42, Benda Uji A1 .....	45
Gambar 4.6 Foto Mikrostruktur Baja API 5L X42 Sebelum dan Sedudah Proses TMCP dan Warm Rolling .....	47
Gambar 4.7 Rekristalisasi Pada Baja API 5L X42 .....	49
Gambar 4.8 Mikrostruktur Baja API 5L X42 Dengan variasi Temperatur Deformasi .....	50
Gambar 4.9 Grafik Nilai Kekerasan Benda Uji.....	52
Gambar 4.10 Grafik Nilai Kekerasan Benda Uji yang Dideformasi Pada Temperatur 500 °C.....	54
Gambar 4.11 Grafik Nilai Kekuatan Tarik Benda Uji.....	55

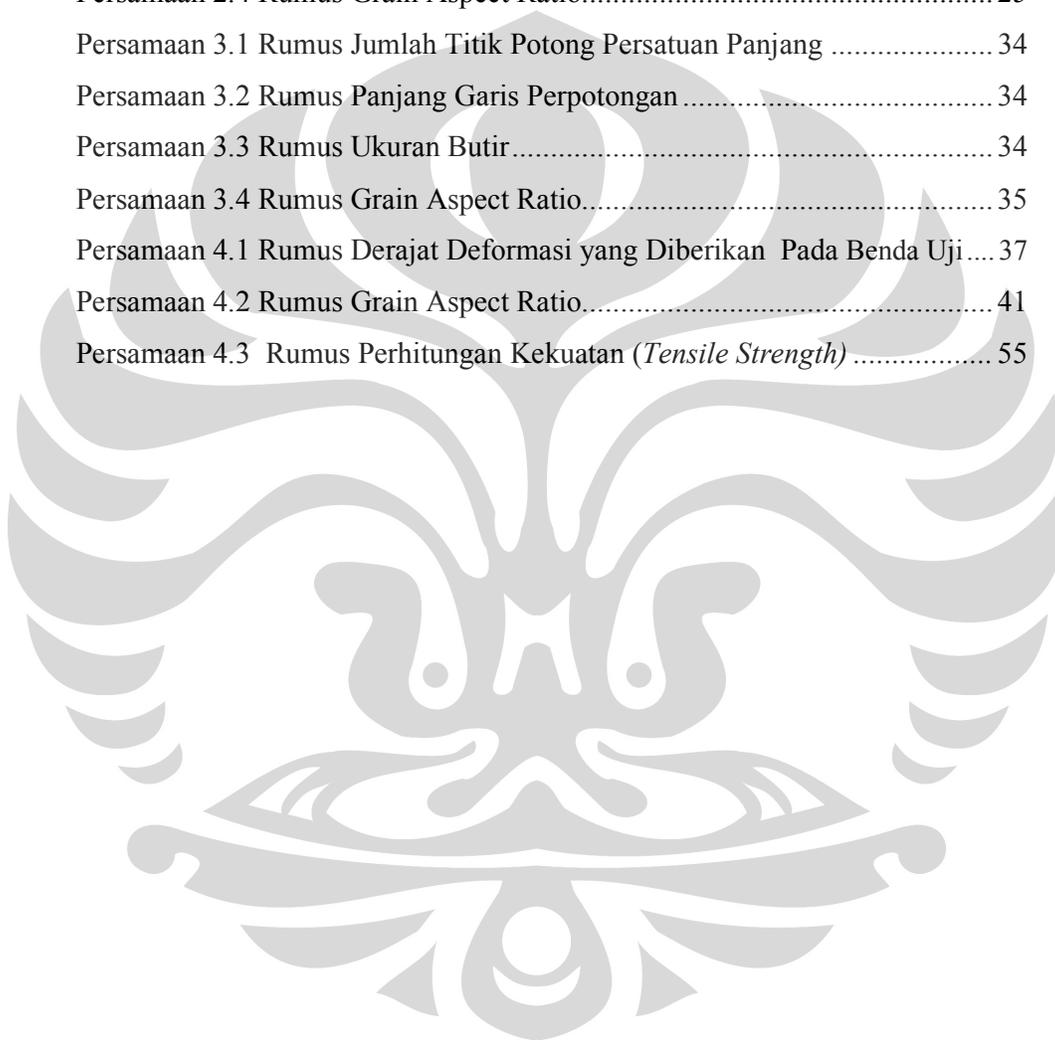
## DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	Komposisi Sampel Benda Uji .....	3
Tabel 3.1	Komposisi Sampel Benda Uji .....	28
Tabel 3.2	Simbol dan Penandaan Skematik Metode Rockwell B .....	36
Tabel 4.1	Hasil Pengukuran Dimensi Benda Uji Sebelum dan Sesudah Proses TMCP dan Warm Rolling .....	38
Tabel 4.2	Hasil Pengukuran Diameter Butir Ferit .....	40
Tabel 4.3	Hasil Pengukuran Grain Aspect Ratio Uji Sebelum dan Sesudah Proses TMCP dan Warm Rolling .....	42
Tabel 4.4	Hasil Pengujian Kekerasan Sebelum dan Sesudah Proses TMCP dan Warm Rolling .....	51
Tabel 4.4	Hasil Pengujian Kekerasan Dengan Variasi Temperatur Deformasi .....	54



## DAFTAR RUMUS

Persamaan 2.1 Hall-Petch Equation.....	11
Persamaan 2.2 Rumus Derajat Deformasi .....	14
Persamaan 2.2 Zener-Hollomon Equation .....	18
Persamaan 2.4 Rumus Grain Aspect Ratio.....	25
Persamaan 3.1 Rumus Jumlah Titik Potong Persatuan Panjang .....	34
Persamaan 3.2 Rumus Panjang Garis Perpotongan.....	34
Persamaan 3.3 Rumus Ukuran Butir.....	34
Persamaan 3.4 Rumus Grain Aspect Ratio.....	35
Persamaan 4.1 Rumus Derajat Deformasi yang Diberikan Pada Benda Uji....	37
Persamaan 4.2 Rumus Grain Aspect Ratio.....	41
Persamaan 4.3 Rumus Perhitungan Kekuatan ( <i>Tensile Strength</i> ) .....	55



## DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1. Hasil Pengujian Komposisi Baja Karbon Rendah SS 400
- Lampiran 2. Pehitungan Ukuran Butir
- Lampiran 3. Tabel Diameter Butir ASTM E112
- Lampiran 4. Tabel Konversi Nilai Kekerasan ASTM E140
- Lampiran 5. Grafik Akuisisi Temperatur Benda Uji B
- Lampiran 6. Grafik Akuisisi Temperatur Benda Uji C
- Lampiran 7. Grafik Akuisisi Temperatur Benda Uji D
- Lampiran 8. Grafik Akuisisi Temperatur Benda Uji E
- Lampiran 9. Grafik Akuisisi Temperatur Benda Uji F
- Lampiran 10. Foto Mikrostruktur Sampel A0
- Lampiran 11. Foto Mikrostruktur Benda Uji A1
- Lampiran 12. Foto Mikrostruktur Benda Uji B
- Lampiran 13. Foto Mikrostruktur Benda Uji C
- Lampiran 14. Foto Mikrostruktur Benda Uji D
- Lampiran 15. Foto Mikrostruktur Benda Uji E
- Lampiran 16. Foto Mikrostruktur Benda Uji F

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang Penelitian

Penggunaan baja di dunia sampai saat ini masih belum dapat tergantikan oleh material lainnya. Baja merupakan material yang paling banyak digunakan pada dunia industri[1]. Baja merupakan sesuatu yang fundamental bagi kehidupan manusia dan sangat penting bagi pertumbuhan ekonomi. Baja adalah salah satu elemen penting dalam pembangunan ekonomi yang berkelanjutan yang menuntut tersedianya infrastruktur, transportasi, energi, perumahan dan konstruksi [2]. Baja dengan segala sifat yang dimilikinya masih menjadi pilihan masyarakat untuk memenuhi aplikasi yang diharapkan dari suatu bahan.

Pada era globalisasi saat ini kebutuhan manusia terus meningkat disertai tuntutan untuk terpenuhinya kebutuhan tersebut. Begitu juga halnya dengan industri baja sekarang ini, seiring dengan perkembangan yang ada di dalam dunia industri maka dibutuhkan baja yang memiliki sifat dan karakteristik yang sesuai dengan kondisi pada saat baja tersebut diaplikasikan. Perkembangan teknologi yang semakin maju sekarang ini menyebabkan perlu adanya inovasi dalam hal rekayasa material. Pertimbangan dalam merekayasa material tidak hanya berdasarkan sifat mekanik yang baik tetapi sisi ekonomis dari material baru tersebut.

Salah satu pengembangan proses untuk menghasilkan baja dengan sifat-sifat yang sesuai dengan kebutuhan industri tersebut dapat dilakukan dengan menggunakan proses *Thermomechanical 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[3]. Proses TMCP ini sangat identik dengan proses canai (*rolling*) dengan mengubah geometri dan ukuran dari material. Proses

TMCP telah berkembang dengan adanya proses dengan menggunakan pengerjaan hangat (*warm working*)[3]. *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[4],

Baja karbon rendah merupakan salah satu jenis baja yang dipakai secara meluas dalam dunia industry, terutama untuk sektor minyak dan gas. Baja karbon rendah sifatnya dipengaruhi oleh kandungan karbonnya dan juga mikrostrukturnya. Struktur *ferrite-pearlite* merupakan struktur yang sering dijumpai pada baja karbon rendah. Dengan adanya perpaduan antara proses pengerjaan hangat (*warm working*) dan juga penggunaan baja karbon rendah diharapkan mendapatkan peningkatan yang signifikan terhadap sifat akhir baja dan efisiensi dari segi biaya dengan adanya kontrol terhadap mikrostruktur baik ukuran dan bentuk butir. Sehingga dengan adanya kontrol terhadap mikrostruktur dari butir diharapkan dapat meningkatkan sifat mekanis.

## 1.2 Perumusan Masalah

Masalah yang dikaji pada penelitian kali ini adalah untuk melihat pengaruh deformasi *multipass* searah yang dilanjutkan dengan pendinginan air terhadap ukuran butir ferit yang dihasilkan pada proses TMCP dan *warm rolling* pada spesimen baja karbon rendah (API 5LB X42). Pada penelitian spesimen akan diuji dengan dideformasi 60% pada temperatur 700 °C dilanjutkan dengan deformasi searah sebesar 20% + 15% + 10 % pada temperatur diatas 500 °C dilanjutkan pendinginan air. Melalui pengujian mikrostruktur, pengujian kekerasan dan pengukuran ukuran butir akan didapat hubungan antara pengaruh deformasi *multipass* dan pendinginan air terhadap mikrostruktur, kekerasan , dan ukuran butir.

## 1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk :

1. Mengamati ukuran dan morfologi butir ferit setelah dilakukan proses TMCP.

2. Mengamati pengaruh deformasi multipass searah terhadap evolusi struktur mikro setelah proses TMCP.
3. Mengamati pengaruh deformasi multipass searah terhadap rekristalisasi setelah proses TMCP.
4. Mengamati pengaruh rekristalisasi terhadap kekerasan baja karbon rendah
5. Mengetahui sifat mekanis dari baja karbon rendah setelah di lakukan proses TMCP dengan parameter yang telah ada.

#### 1.4 Ruang Lingkup

Ruang Lingkup dari penelitian ini adalah :

##### 1.4.1 Material

Penelitian menggunakan pelat API 5L X42 yang tergolong Baja Karbon Rendah dengan komposisi terdapat pada Tabel 1.1 sebagai berikut :

Tabel 1.1 Komposisi Kimia Spesimen Uji

Komposisi	C	Cu	Nb	P	S	Cr	Mn	Si
% Berat	0.14	0.04	0.001	0.007	0.003	0.01	0.65	0.19

##### 1.4.2 Parameter Penelitian

###### a. Temperatur Akhir Canai

Temperatur akhir canai dilakukan pada temperatur 700 °C untuk deformasi 60% dan temperatur diatas 500 °C untuk deformasi 20, 15, dan 10%.

###### b. Metode Deformasi

Deformasi dilakukan dengan metode multipass searah proses canai pada deformasi 60%, 20%, 15%, dan 10%.

###### c. Media Pendinginan

Media pendingin yang digunakan adalah udara (*air cooling*).

##### 1.4.3 Tempat Penelitian

Proses penelitian dilakukan di beberapa tempat, yaitu :

1. Proses TMCP dan pengerjaan hangat dilakukan di Laboratorium Teknologi Perubahan Bentuk Departemen Metalurgi dan Material FTUI.
2. Preparasi sampel dan pengamatan struktur mikro dilakukan di Laboratorium Metalografi dan HST Departemen Metalurgi dan Material FTUI.
3. Pengujian kekerasan dilakukan di Laboratorium CMPFA Departemen Metalurgi dan Material FTUI.

### **1.5 Sistematika Penulisan**

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

#### **Bab 1 : Pendahuluan**

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

#### **Bab 2 : Dasar Teori**

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

#### **Bab 3 : Metodologi Penelitian**

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

#### **Bab 4 : Hasil dan Pembahasan**

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

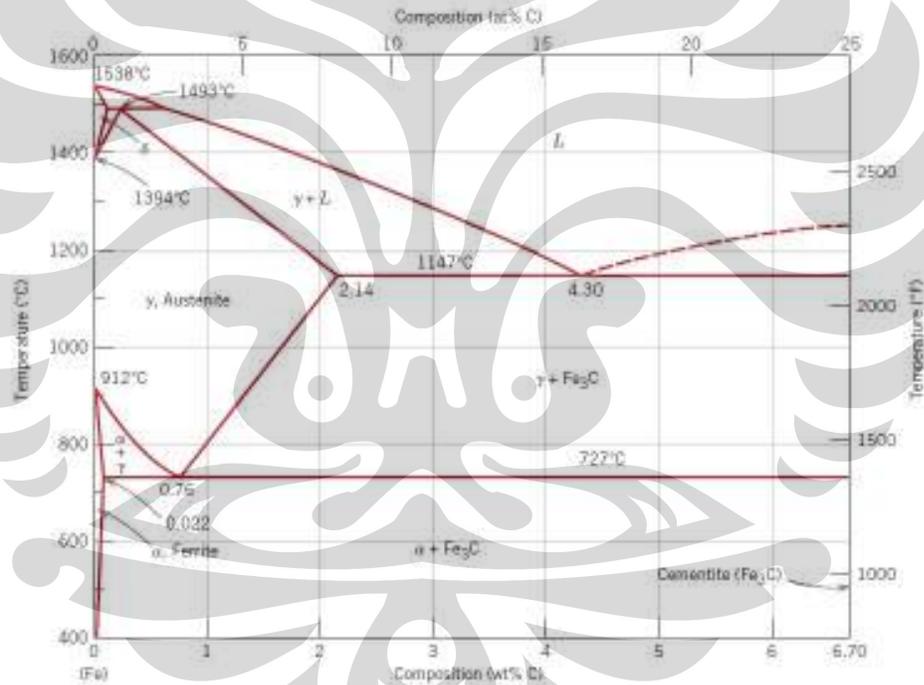
#### **Bab 5 :Kesimpulan**

Membahas mengenai kesimpulan akhir berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan.

## BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Baja Karbon

Baja karbon adalah logam paduan yang merupakan kombinasi dari besi dan karbon dan paduan elemen lain yang jumlahnya tidak terlalu banyak yang akan mempengaruhi sifat akhir dari baja karbon[5]. 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%[6].



Gambar 2.1. Diagram Fasa Fe-Fe<sub>3</sub>C[7].

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

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

Baja karbon dapat diklasifikasikan menurut kandungan karbonnya menjadi tiga jenis yaitu[7]:

1. Baja karbon rendah

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

2. Baja karbon medium

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

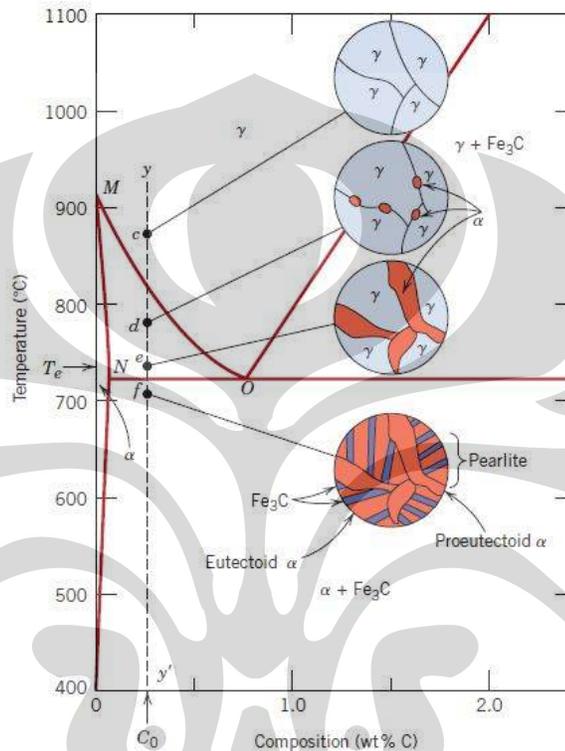
3. Baja karbon tinggi

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

### 2.1.1 Baja Karbon Rendah

Baja jenis ini mengandung kadar karbon ( $\% C$ ) hingga 0.25% dan kandungan mangan berada antara 0.40% dan 1.5%. Baja karbon rendah diproduksi biasanya dalam bentuk lembaran atau gulungan baja yang dibuat dengan proses canai dingin (*cold work*) 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. Baja karbon rendah

kurang responsif terhadap perlakuan panas untuk mendapatkan mikrostruktur martensit, sehingga untuk meningkatkan kekuatan dari baja karbon rendah dapat dilakukan dengan proses canai dingin.

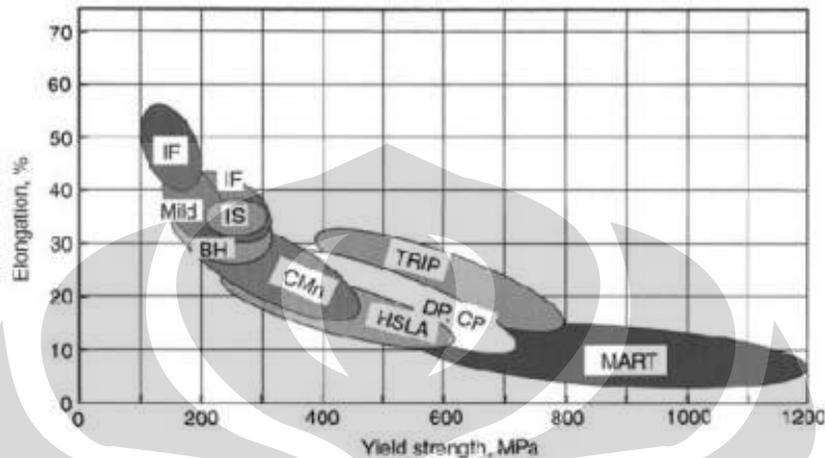


Gambar 2.2. Transformasi Fasa pada Baja Karbon Rendah[7].

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*.

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

*interstitialfree* atau *ultra-low carbon steels*, *controlledrolled-microalloyed steels* (*highstrength low-alloy steels*), *dual-phase steels*, dan baja TRIP[6].



Gambar 2.3. Kombinasi Elongasi dan Kekuatan untuk Berbagai Jenis Baja Karbon Rendah[6].

## 2.2 Pengaruh Deformasi Plastis

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

Karakteristik pengerjaan dingin :

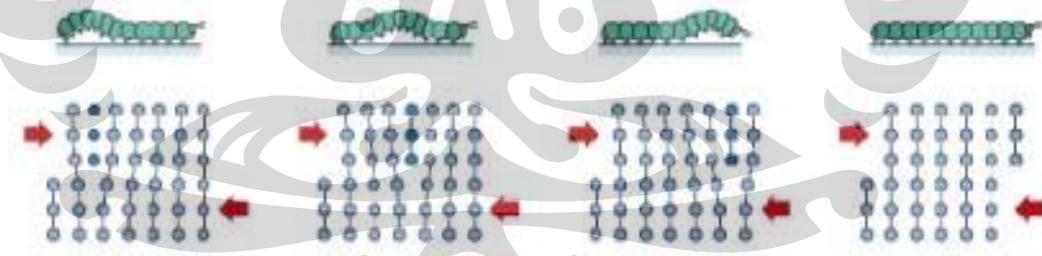
- o Memiliki kekerasan dan kekuatan yang tinggi
- o Memiliki ketangguhan dan keuletan yang rendah
- o Struktur butir yang terdiri dari butir yang berdeformasi meregang
- o Untuk baja karbon rendah, memperlihatkan titik regang yang kontinyu

Karakteristik pengerjaan panas :

- o Secara umum lebih halus dan memiliki kekuatan yang rendah
- o Ketangguhan yang rendah dan keuletan yang tinggi

- o Struktur butirnya terdiri dari butir yang terekristalisasi equiaxed
- o Untuk baja karbon rendah, memperlihatkan titik regang yang kontinyu

Deformasi plastis berhubungan dengan pergerakan sejumlah dislokasi[7]. Berdasarkan proses yang dilakukan, deformasi plastis yang terjadi merupakan hasil dari pergerakan dari salah satu kristal yang disebut dislokasi (ASM 1973). Proses terjadinya deformasi plastis melalui pergerakan dislokasi merupakan mekanisme *slip*. Slip merupakan mekanisme terjadinya deformasi yang paling sering dijumpai. Slip menggambarkan pergerakan yang besar pada bagian kristal yang relatif terhadap yang lain sepanjang bidang kristalografi dan dalam arah kristalografi. Slip terjadi bila sebagian dari kristal tergeser relatif terhadap bagian kristal yang lain sepanjang bidang kristalografi tertentu. Bidang tempat terjadinya slip disebut bidang slip (*slip plane*) dan arah pergeserannya pada umumnya pada bidang slip disebut arah slip (*slip direction*). Slip terjadi pada bidang slip dan arah slip yang paling padat atom, karena untuk menggeser atom pada posisi ini memerlukan energi paling kecil. Pergerakan dislokasi dapat disamakan dengan cara bergerak yang dilakukan oleh ulat bulu seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4.



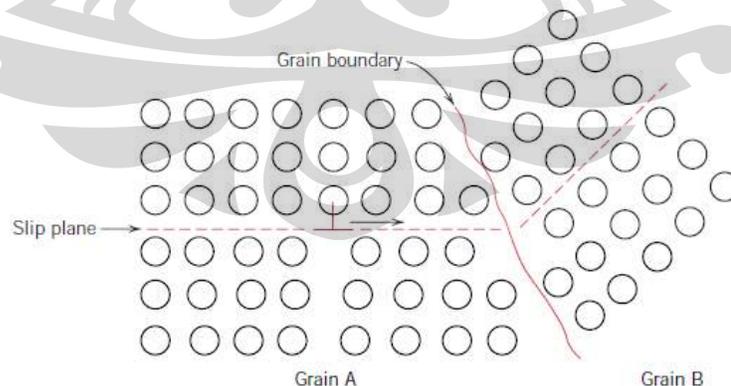
Gambar 2.4. Analogi Pergerakan Dislokasi[7]

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

### 2.3 Pengaruh Ukuran Butir Terhadap Sifat Mekanis Baja

Sifat mekanis dari suatu material sangat dipengaruhi oleh ukuran butir atau diameter butir rata-rata dalam logam polikristal[7]. Baja dengan ukuran butir yang kasar (besar) memiliki keuletan yang tinggi, namun kekuatannya rendah. Berbeda dengan baja dengan ukuran butir halus (kecil) memiliki kekuatan yang tinggi. Perbedaan sifat yang dimiliki oleh material yang berbeda ukuran butirnya disebabkan adanya perbedaan jumlah batas butir yang dimiliki material tersebut. Batas butir terjadi karena adanya perbedaan orientasi dari kisi kristal. Batas butir merupakan penghalang bagi pergerakan dislokasi. Sehingga ketika dislokasi terhalang oleh batas butir maka akan dibutuhkan energi yang lebih besar untuk menggerakkan dislokasi sehingga material menjadi lebih keras. Material dengan ukuran butir yang besar memiliki batas butir yang sedikit menyebabkan dislokasi lebih mudah bergerak sehingga material menjadi lebih ulet, sedangkan material dengan ukuran butir yang kecil memiliki batas butir yang banyak yang menyebabkan dislokasi sulit bergerak sehingga material menjadi keras.

Ketika deformasi plastis, terjadi pergerakan dislokasi dengan mekanisme slip. Dislokasi bergerak didalam butir menuju batas butir pada arah dan orientasi terpadat dalam suatu kisi kristal. Ilustrasi pergerakan dislokasi dapat dilihat pada Gambar 2.5



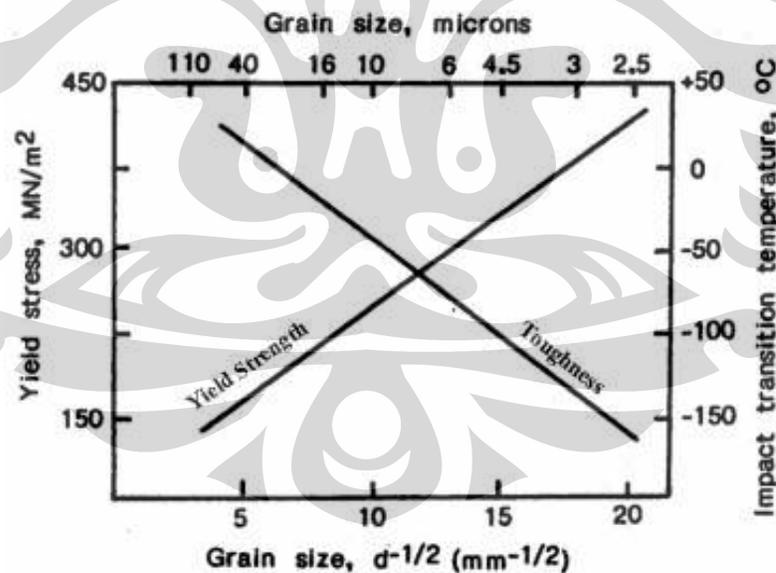
Gambar 2.5. Ilustrasi batas butir dan pergerakan dislokasi[7].

Batas butir bertindak sebagai penghalang pergerakan dislokasi karena dua alasan[7] :

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

Untuk mengetahui pengaruh ukuran butir dari teori diatas dapat buktikan dengan persamaan Hall Petch dengan  $d$  adalah diameter butir rata rata,  $\sigma_0$  dan  $k_y$  adalah konstanta untuk material tertentu. Persamaan 2.1 ini tidak berlaku untuk material polikristal dengan butir yang sangat besar dan dengan butir yang amat sangat halus.

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



Gambar 2.6. Pengaruh Besar Butir terhadap Nilai Kekuatan[8].

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.

### 2.3.1 Penghalusan Butir Ferit

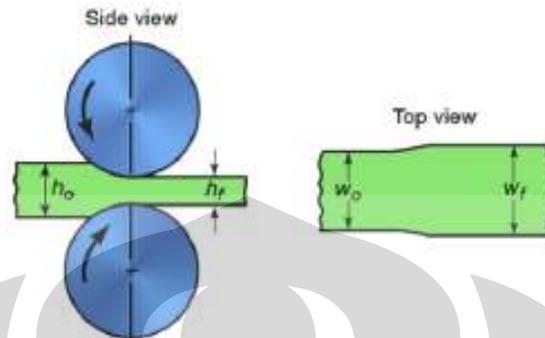
Pada proses pemanasan ulang, fasa ferit terbentuk selama proses pendinginan lanjut (*continous cooling*) dengan menggunakan pendinginan udara. Selain itu pembentukan fasa ferit tergantung pada kandungan karbon, kandungan paduan dan laju pendinginan. Pada proses pengerjaan panas, ketika baja dalam keadaan fasa austenit ditransformasi menjadi struktur ferit dan perlit selama pendinginan. 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.

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°C) terbentuk butir yang lebih besar, sedangkan pada anil temperatur tinggi (600°C) dihasilkan butir dengan ukuran yang lebih besar[9].

Penghalusan butir ferit dapat dihasilkan dengan memperhalus butir austenit pada saat pendinginan ke temperatur ruang. Selain itu penambahan elemen seperti karbon dan mangan atau peningkatan kapasitas pendinginan dari temperatur austenite, juga akan menghasilkan butir yang halus[10].

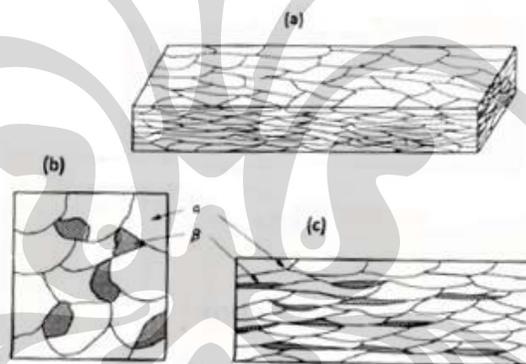
### 2.4 Proses Canai

Proses Canai (*rolling*) didefinisikan sebagai reduksi luas area penampang dari logam atau pembentukan umum dari produk logam menggunakan canai yang berputar (*rotating roll*)[11]. Selama proses canai terjadi proses perubahan pada bentuk pada benda uji dimana pada saat proses tersebut adanya gaya tekan (*compressive load*) terjadi pengurangan ketebalan dan penambahan panjang akan tetapi massa tetap konstan tidak mengalami perubahan.



Gambar 2.7. Skematik Proses Canai[12].

Setelah terjadi proses canai, butir-butir dalam material yang sebelumnya *equiaxed* akan terdeformasi menjadi panjang (*elongated grain*).



Gambar 2.8. Transformasi Morfologi Butir Setelah Proses Canai a) *elongated grain* b) sebelum dideformasi (*equiaxed grain*) b) setelah dideformasi (*elongated grain*)[13].

Secara umum, berdasarkan temperatur pengerjaan proses canai terbagi dua :

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

Regangan atau % deformasi yang diberikan terhadap material pada proses canai dapat dihitung dengan persamaan :

$$\% \text{ Deformasi} = \ln \frac{h_u}{h_f} \dots \dots \dots (2.2)$$

Dimana :

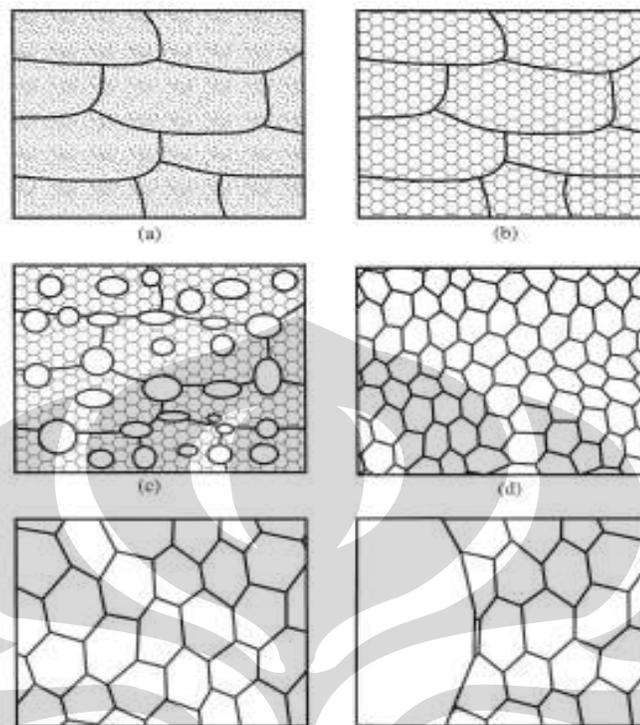
% Deformasi : regangan yang diberikan

ho : tebal awal material (mm)

hf : tebal akhir material (mm)

## 2.5 Rekoveri, Rekristalisasi, dan Pertumbuhan Butir

Material kristalin yang mengalami deformasi plastis menunjukkan terjadinya perubahan pada bentuk butir, pengerasan regangan (*strain hardening*) dan peningkatan pada kepadatan dislokasi[7]. Energi bebas dari material kristalin meningkat selama deformasi karena kehadiran dislokasi dan antarmuka (*interface*), dan material yang mengandung cacat seperti ini secara termodinamika tidak stabil. Jika material tersebut kemudian dipanaskan hingga temperatur tinggi, proses aktivasi secara termal akan mengakibatkan penghilangan cacat ataupun penyusunan kembali cacat/dislokasi[14].



Gambar 2.9. Skematik Proses Anil a) Butir yang Terdeformasi. b) Rekoveri c) Rekristalisasi Sebagian d) Rekristalisasi Penuh e) Pertumbuhan Butir f) *Abnormal Grain Growth*[14].

### 2.5.1 Rekoveri

Proses rekoveri merupakan proses yang pertama terjadi ketika material yang terdeformasi dipanaskan ke temperatur tinggi. Rekoveri adalah proses penghilangan energi internal (*internal strain energy*) yang tersimpan yang diperoleh selama proses pengerjaan dingin melalui perlakuan panas (heat treatment). Mekanisme penghilangan energi internal yang tersimpan dari material dengan penghilangan dan penyusunan kembali dislokasi[14]. Selama proses rekoveri, sifat fisik dan mekanik dari baja pengerjaan dingin akan kembali seperti sebelum dilakukan pengerjaan dingin[15]. Perubahan mikrostruktur selama rekoveri relatif homogen dan biasanya tidak mempengaruhi batas butir material yang terdeformasi. Perubahan mikrostruktur dari material selama tahapan recovery ini tidak melibatkan pergerakan batas butir dengan sudut yang besar.

### 2.5.1.1 Subgrain

Untuk benda kerja yang butirnya memipih setelah canai dingin setelah proses rekoveri tidak terlihat perubahan pada butir tersebut. Namun pada tingkatan submikroskopis, terjadi perubahan pada titik cacat dan klusternya, penghilangan dan pengaturan ulang dislokasi, serta pembentukan sub-butir dan pertumbuhannya. Perubahan mikrostruktural ini akan melepas sebagian besar tegangan dalam dan tahapan rekoveri ini dipergunakan untuk proses *stress-relieving*. Hilangnya beberapa dislokasi mengakibatkan berkurangnya kekuatan dari material, tetapi hilangnya dislokasi ini diimbangi dengan pembentukan sub-butir, yaitu butir dengan batas butir bersudut kecil. ( $2-3^0$  misorientasi).

Selama proses rekoveri, dislokasi yang terkena deformasi dapat bergerak, berinteraksi, dan saling menghalangi satu sama lain. Dislokasi yang tersisa kembali berkumpul (menyusun diri) untuk membentuk *subgrain* yang terdapat dalam butir ferit.

Proses rekoveri yang disertai dengan pembentukan subgrain ini juga dikenal dengan poligonisasi[16]. Proses utama yang terjadi saat poligonisasi adalah distribusi ulang dislokasi yang disertai dengan terbentuknya dinding dislokasi (*dislocation walls*). Dinding dislokasi ini memisahkan batas *subgrain* yang satu dan yang lainnya.

### 2.5.2 Rekristalisasi

Pada saat rekoveri tidak semua dislokasi menghilang dan ketika tahap rekoveri akan berakhir, pembentukan inti dari butir baru akan mulai terjadi dengan memanfaatkan energi internal yang masih tersimpan setelah tahap rekoveri. Proses ini disebut rekristalisasi. Rekristalisasi merupakan proses transformasi nukleasi dan pertumbuhan butir. Rekristalisasi dalam proses laku panas merupakan proses aktivasi termal dalam perubahan mikrostruktur dengan jalan pembentukan butir baru bebas regang yang terjadi karena adanya penggabungan sub butir. Inti dari butir baru terjadi dari bergabungnya sub-butir dan permukaan untuk nukleasi heterogen adalah cacat mikrostruktur 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[15].

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 energi pengerjaan dinginnya tinggi, semakin kecil energi termal yang digunakan, berarti semakin rendah temperatur dari rekristalisasi. Butir yang baru merupakan butir yang bebas regangan sehingga efek pengerasan dari pengerjaan dingin akan menghilang. Hal tersebut akan menyebabkan material memiliki kekuatan dan kekerasan yang sama sebelum dilakukan pengerjaan dingin.

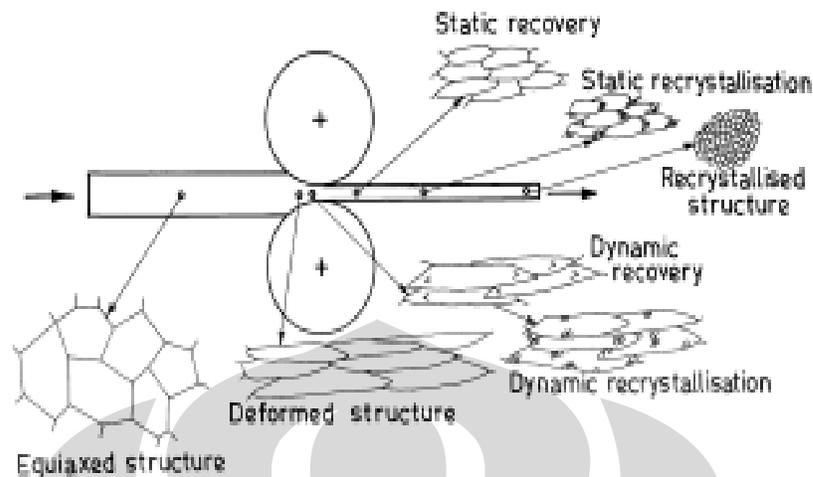
Faktor yang paling penting yang mempengaruhi proses rekristalisasi pada logam dan paduannya adalah ; (1) besaran deformasi / *amount of prior deformation*, (2) temperatur, (3) waktu, (4) besar butir awalan / *initial grain size*, dan (5) komposisi logam atau paduan (Smith 2004).

Proses rekristalisasi memungkinkan untuk mengontrol ukuran besar butir dan sifat mekanis dari material. Ukuran besar butir dari material yang terekristalisasi akan tergantung pada besarnya pengerjaan dingin, temperatur annealing, waktu tahan dan komposisi dari material. Ini didasarkan pada hukum rekristalisasi[17].

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

#### **2.5.2.1 Rekristalisasi Dinamis**

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



Gambar 2.10 Skematik Perubahan Morfologi Butir yang Terdeformasi[18].

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 faktor – faktor antara lain regangan, kecepatan regangan dan temperatur, seperti yang telah diteliti oleh Zener-Hollomon.

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

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT) \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana :

$\dot{\epsilon}$  : Laju regangan ( $s^{-1}$ )

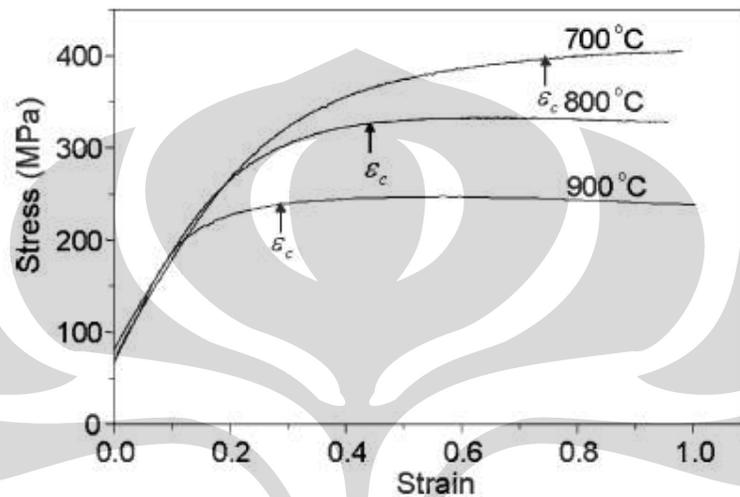
$Q$  : Energi aktivasi deformasi (J/mol)

$R$  : Konstanta gas (8.31 J.K /mol)

$T$  : Temperatur Absolut (K)

Rekristalisasi dinamis yang terjadi bergantung pada parameter  $Z$  dan regangan yang diberikan . Rekristalisasi dinamis terjadi ketika parameter  $Z$  lebih

kecil dibanding parameter  $Z$  kritis ( $Z_c$ ) dan regangan ( $\epsilon$ ) yang diberikan lebih besar dibanding regangan kritis ( $\epsilon_c$ )[19]. Regangan kritis  $\epsilon_c$  pada rekristalisasi dinamis meningkat dengan menurunnya temperatur deformasi, hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.11 dibawah.



Gambar 2.11. Kurva Tegangan dan Regangan Dengan variasi temperatur deformasi.  $\epsilon_c$  Merupakan Regangan Kritis Untuk Terjadinya Rekristalisasi Dinamis[20].

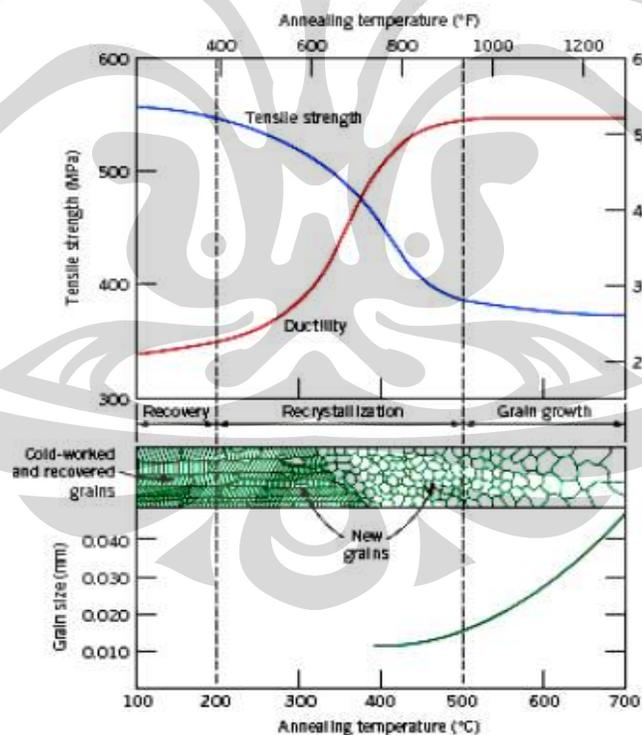
Butir baru yang tumbuh karena proses rekristalisasi dinamis merupakan subbutir yang mengalami pengasaran karena adanya regangan yang diberikan hingga akhirnya menjadi *real grain*[21].

### 2.5.2.2 Rekristalisasi Statis

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

### 2.5.3 Pertumbuhan Butir

Setelah proses rekristalisasi selesai, butir dengan bebas regangan selanjutnya akan tumbuh jika spesimen baja dibiarkan pada temperatur yang tinggi. Pertumbuhan butir ditunjukkan sebagai peningkatan besar butir rata-rata pada material polikristalin. Pertumbuhan butir biasanya merupakan lanjutan setelah proses rekoveri dan proses rekristalisasi. Hal ini terjadi disebabkan adanya migrasi pada batas butir. Tidak semua butir dapat membesar, butir yang lebih besar akan tumbuh yang kemudian menghabiskan butir yang lebih kecil atau yang dikenal dengan *grain cannibalism*[7]. Penambahan proses anil (*extended annealing*) pada temperature tinggi dapat menyebabkan beberapa butir tumbuh menjadi butir dengan ukuran yang sangat besar, yang mana dikenal sebagai rekristalisasi sekunder (*secondary recrystallization*) atau pertumbuhan butir yang abnormal[15].



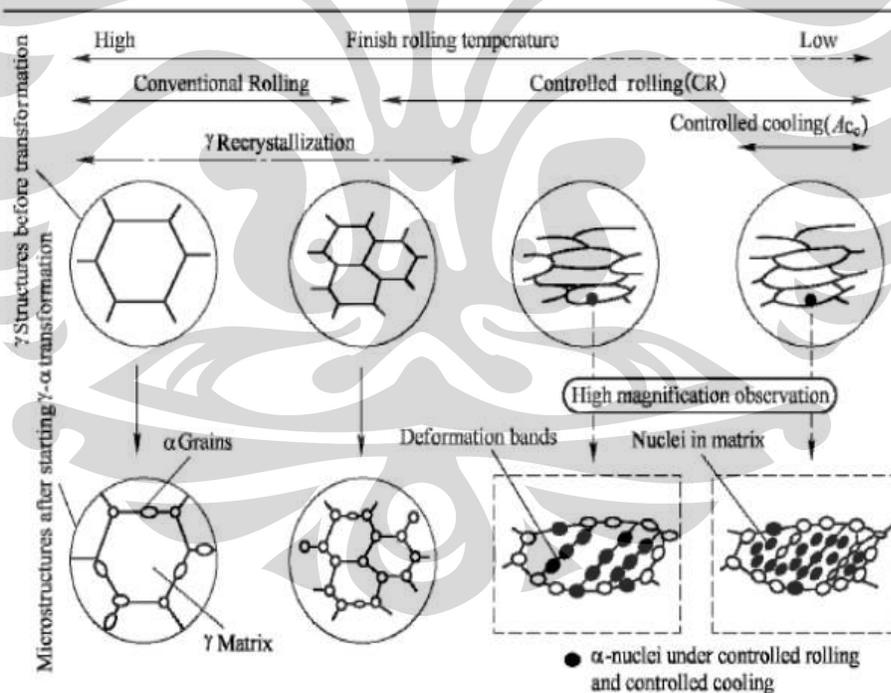
Gambar 2.12. Skematis Proses Recovery, Rekristalisasi dan Pertumbuhan Butir[7].

## 2.6 Thermo-Mechanical Controlled Process (TMCP).

*Thermomechanical processing* merupakan suatu proses untuk mengontrol mikrostruktur suatu material selama pembuatannya untuk menghasilkan sifat mekanis yang lebih baik. Peningkatan kekuatan dan ketangguhan dalam TMCP didapat dari adanya mekanisme pengecilan butir dengan proses deformasi panas yang terkontrol (*controlled rolling*) dan pendinginan yang terkontrol (*controlled cooling*)[22].

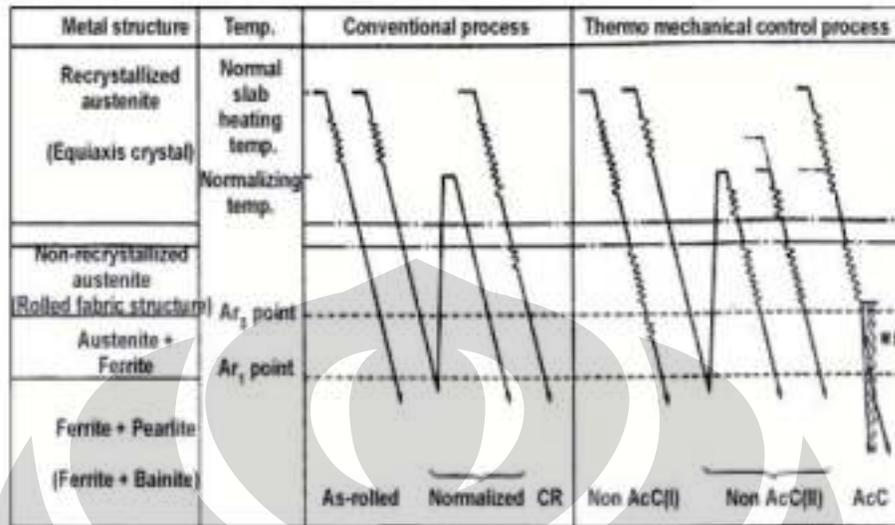
Pada baja TMCP, sifat mekanis (*mechanical properties*) terutama ditentukan melalui kombinasi dari perlakuan *mechanical* (*mechanical working*), proses rekoveri (*recovery processes*), rekristalisasi (*recrystallisation*), dan pertumbuhan butir (*grain growth*)[23].

Perbedaan mikrostruktur yang dihasilkan oleh pengerolan konvensional proses TMCP dapat dilihat pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13. Perbedaan Mikrostruktur Antara Proses Canai Konvensional dan Proses TMCP[22]

Perbandingan proses canai konvensional dengan proses TMCP dapat dilihat pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14. Perbandingan Antara Jalur Proses Konvensional dan TMCP. Bagian garis 'Zig-zag' mengindikasikan proses canai[17].

### 2.6.1 Canai Hangat (*Warm Rolling*)

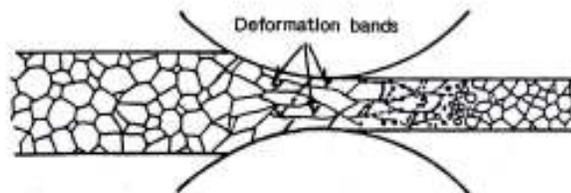
Proses TMCP telah berkembang dengan adanya proses dengan menggunakan pengerjaan hangat (*warm working*) [3]. Canai hangat adalah salah satu metode perlakuan terhadap material logam untuk menghasilkan mikrostruktur yang halus pada material logam dan paduannya dengan temperatur kerja berada di antara temperatur canai panas (*hot rolling*) dan temperatur canai dingin (*cold rolling*). Kisaran temperatur pengerjaan hangat berada pada 500°C-800°C[4], Berdasarkan range temperatur operasi canai hangat, setelah terjadi deformasi plastis, material sebagian mengalami pengerasan regangan/ *strain hardened* dan sebagian mengalami rekristalisasi[24].

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 [25].

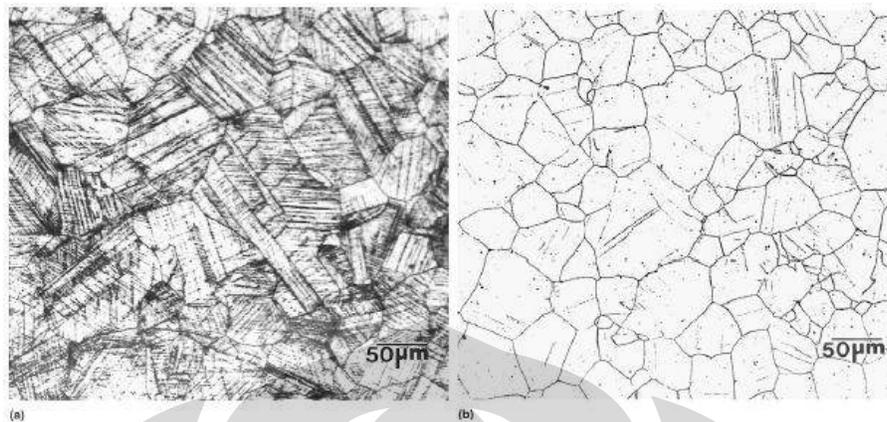
Jika dibandingkan dengan pengerjaan panas yang membutuhkan energi panas yang besar dan mahal, proses pengerjaan hangat ini dapat menghasilkan material yang mendekati dimensi akhir yang diinginkan[26]. Selain itu metode ini menghasilkan mikrostruktur yang lebih halus dengan sifat mekanis yang tinggi, kualitas permukaan dan pengendalian dimensional yang lebih baik, material yang dibuang akibat proses dekarburisasi atau oksidasi yang lebih rendah [27]. 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. Selama pengerjaan hangat pada baja, berbagai macam perubahan mikrostruktur dapat terjadi sehingga merubah sifat-sifat mekanik pada baja .

#### 2.6.1.2 *Deformation Band*

Ketika material dideformasi dibawah ditemperatur rekristalisasi mikrostruktur yang dihasilkan akan mempunyai cacat dalam butir (*intragranular defect*) yang biasa disebut *deformation band*. *Deformation band* merupakan salah satu tempat untuk terjadinya nukleasi butir baru (*nucleation sites*). *Deformation band* yang terdapat didalam butir mempunyai densitas dislokasi sangat tinggi[20]. Densitas dislokasi yang sangat tinggi mengakibatkan dislokasi menjadi sulit bergerak sehingga material sulit dideformasi dan kekerasannya meningkat[28]. Densitas dari *deformation band* akan meningkat jika temperatur deformasi diturunkan[29].



Gambar 2.15. Mekanisme Terbentuknya *Deformation Band*.



Gambar 2.16. Mikrostruktur AISI SS 316 *Electrolytic Etch of 10% Oxalic Acid in Water, Stainless Steel Cathode, 6V, 10 s. 200x. (a) Adanya Deformation Band (b) Setelah Dianil*[30].

## 2.7 Pengaruh Pendinginan Cepat (*Quenching*)

*Quenching* adalah proses pendinginan cepat suatu komponen logam dari temperatur tinggi ke temperatur dimana fasa yang kita inginkan dapat terbentuk. *Quenching* dikatakan berhasil jika kita telah mampu mendapatkan mikrostruktur, kekerasan, kekuatan maupun ketangguhan yang kita inginkan dengan tetap meminimalisasi tegangan sisa, distorsi dan kemungkinan terjadinya retak/*cracking*[31].

Pemilihan media *quench* yang tepat tergantung pada kemampukerasan/*hardenability* material, ketebalan dan geometri benda, serta kecepatan pendinginan untuk mendapatkan mikrostruktur yang diinginkan. Media *quench* atau *quenchant* yang biasa digunakan antara lain: air; oli; lelehan garam; lelehan logam; larutan polimer.

Kemampukerasan adalah kemampuan material untuk dikeraskan, biasanya membentuk struktur martensit. Baja karbon rendah memiliki kemampukerasan yang rendah karena kelarutan karbonnya yang rendah. Sebaliknya pada baja karbon menengah dan tinggi akan mudah membentuk martensit karena kelarutan karbonnya cukup tinggi untuk memudahkan terbentuknya martensit.

Selama proses *quenching*, bentuk maupun ketebalan akan mempengaruhi kecepatan pendinginan dari benda. Hal ini terjadi karena energi panas di dalam

komponen akan terlebih dahulu mengalir ke permukaan benda sebelum nantinya dibuang ke media quench. Inilah yang menyebabkan kecepatan pendinginan antara di dalam dan di permukaan benda berbeda tergantung dari ketebalan dan geometri bentuknya[31].

## 2.8 Grain Aspect Ratio (GAR)

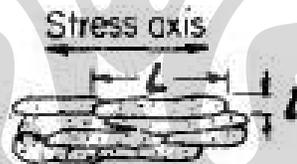
Grain Aspect Ratio (GAR) digunakan untuk mengukur derajat deformasi/elongasi butir yang dihasilkan setelah proses canai (*rolling*) ataupun tempa (*forging*)[30]. GAR merupakan panjang rata-rata batas butir yang sejajar dengan sumbu tegangan dibagi dengan panjang rata-rata batas butir yang tegak lurus terhadap sumbu tegangan[32].

$$\text{GAR} = L/l \dots \dots \dots (2.4)$$

Dimana :

L : panjang rata-rata batas butir yang sejajar dengan sumbu tegangan (mm).

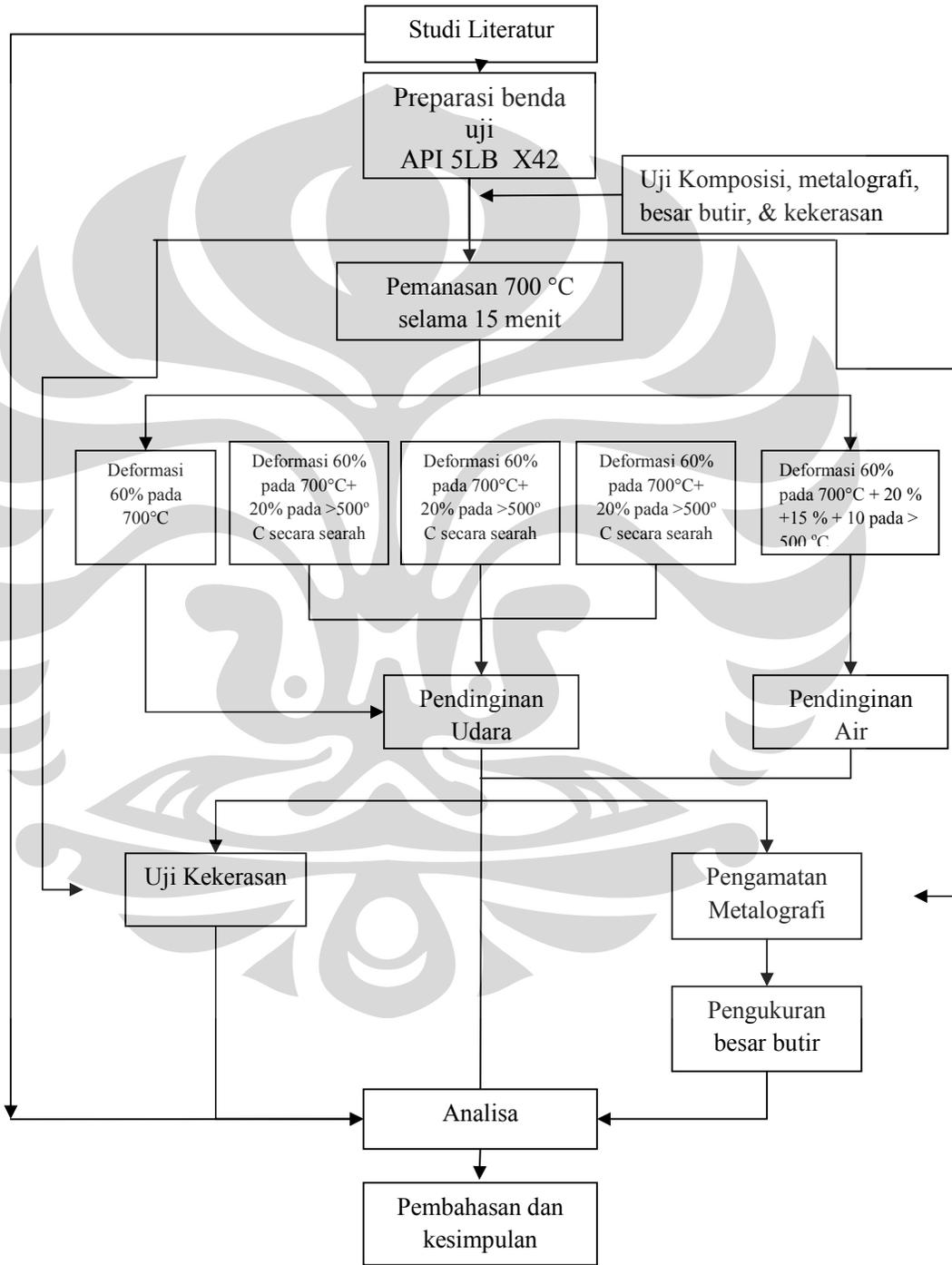
l : panjang rata-rata batas butir yang tegak lurus terhadap sumbu tegangan (mm).



Gambar 2.17. Ilustrasi Pengukuran GAR[32].

### BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian

## **3.2 Alat dan Bahan**

### **3.2.1 Alat**

1. Mesin Roll dengan kapasitas 20 ton
2. Dapur Pemanas / *Oven Carbolite*
3. *Furnace Portable*
4. *Temperature Controller*
5. Termokopel
6. *Termowire*
7. Mesin Komputer Pengukur Temperatur
8. Alat uji keras Vickers
9. Jangka Sorong
10. Mesin Amplas
11. Mesin Poles
12. Mikroskop Optik
13. Mikroskop Ukur
14. Lain-Lain : Kabel Roll, Kantong Plastik, Gergaji, Label, Spidol, Tang Penjepit, Palu, Penggaris, Sarung Tangan.

### **3.2.2 Bahan**

1. Baja Karbon Rendah API 5L X42
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  $\text{HNO}_3$

## **3.3 Prosedur Penelitian**

### **3.3.1 Pemilihan Material**

Berdasarkan relevansi antara studi literatur dan tujuan penelitian, maka material yang akan digunakan sebagai benda uji adalah Baja API 5L X42 yang

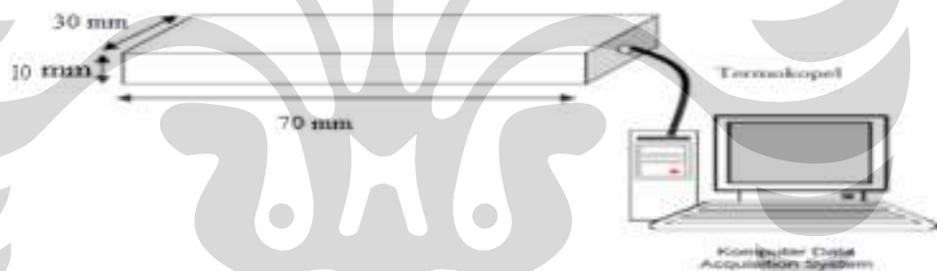
merupakan baja karbon rendah. Komposisi dari benda uji terdapat pada Tabel 3.1, yaitu:

Tabel 3.1 Komposisi Kimia Benda Uji

Komposisi	C	Cu	Nb	P	S	Cr	Mn	Si
% Berat	0.14	0.04	0.001	0.007	0.003	0.01	0.65	0.19

### 3.3.2 Preparasi Benda Uji

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



Gambar 3.2 Ilustrasi Benda Uji dan Pemasangan Termokopel



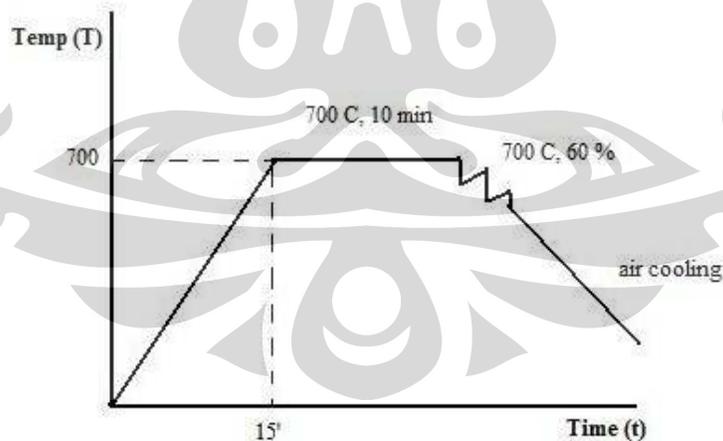
Gambar 3.3 Ilustrasi Benda Uji Sebelum Dipreparasi.

### 3.3.3 Proses TMCP dan *Warm Rolling*

Seluruh spesimen yang akan diukur disiapkan untuk berbagi tes, kemudian masing-masing dimasukkan ke dalam *furnace* atau dapur perapian dengan untuk dipanaskan hingga suhu  $700^{\circ}\text{C}$  ditahan selama 10 menit. Kemudian dilanjutkan dengan melakukan canai multipass searah dengan besaran deformasi 60%, 20 %, 15, 10% pada temperatur pengerjaan hangat dilanjutkan dengan pendinginan air. Proses canai dilakukan dengan menggunakan mesin *OnoRoll* berkapasitas 20 ton.

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

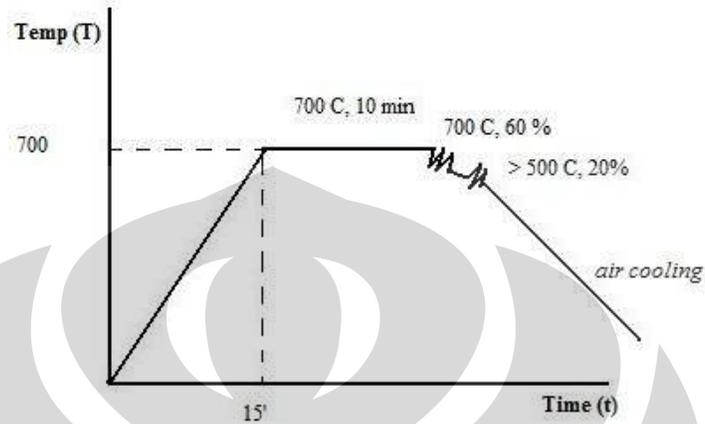
1. Benda Uji A adalah benda uji awal yang tidak mengalami perlakuan panas, yang diidentifikasi mikrostruktur, dan kekerasannya sebagai pembanding untuk benda uji berikutnya
2. Benda Uji B dipanaskan pada suhu  $700^{\circ}\text{C}$  selama 15 menit, kemudian ditahan selama 10 menit kemudian di *rolling* dengan deformasi 60 % kemudian didinginkan dengan media udara.



Gambar 3.4 Skematik Pengujian Benda Uji B.

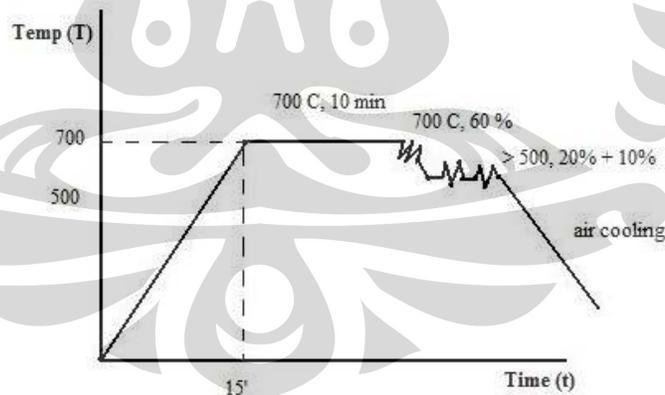
3. Benda Uji C dipanaskan pada suhu  $700^{\circ}\text{C}$  selama 15 menit, kemudian ditahan selama 10 menit kemudian di canai dengan deformasi 60 %

dilanjutkan dengan deformasi 20 % secara searah, kemudian didinginkan dengan media udara.



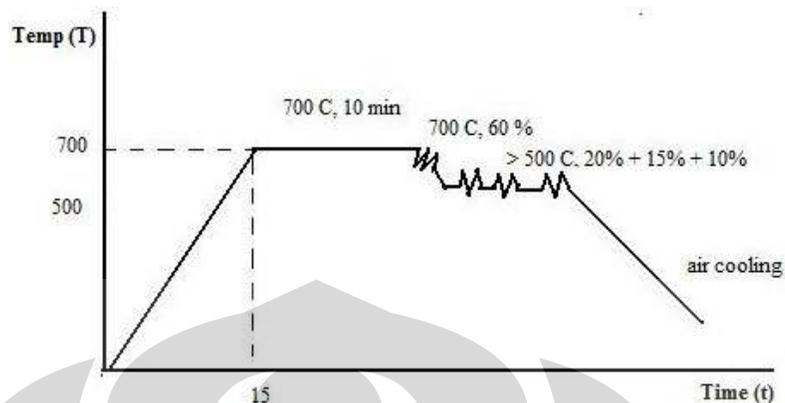
Gambar 3.5. Skematik Pengujian Benda Uji C

4. Benda uji D dipanaskan pada suhu  $700^{\circ}\text{C}$  selama 15 menit, kemudian ditahan selama 10 menit kemudian di canai dengan deformasi 60 % dilanjutkan dengan deformasi 20 % dan 15 % secara searah, kemudian didinginkan dengan media udara.



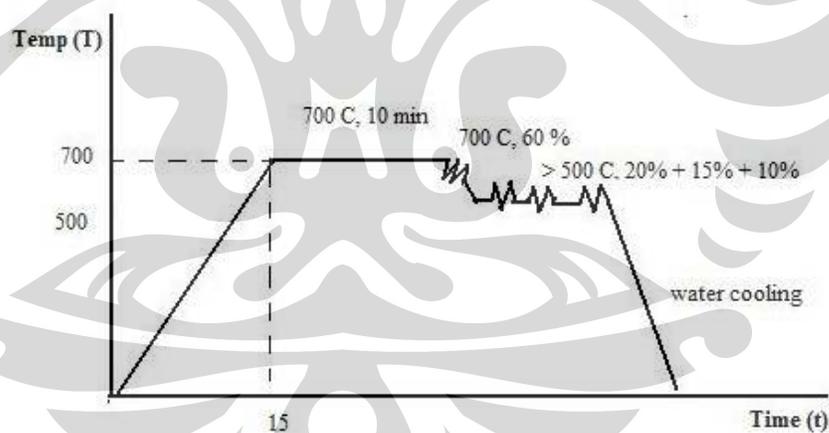
Gambar 3.6. Skematik Pengujian Benda Uji D

5. Benda uji E dipanaskan pada suhu  $700^{\circ}\text{C}$  selama 15 menit, kemudian ditahan selama 10 menit kemudian di canai dengan deformasi 60 % dilanjutkan dengan deformasi 20 %, 15 %, dan 10 % secara searah, kemudian didinginkan dengan media udara.



Gambar 3.7. Skematik Pengujian Benda Uji E

6. Benda uji F dipanaskan pada suhu  $700^{\circ}\text{C}$  selama 15 menit, kemudian ditahan selama 10 menit kemudian di canai dengan deformasi 60 % dilanjutkan dengan deformasi 20 %, 15 %, dan 10 % secara searah, kemudian didinginkan dengan media air.



Gambar 3.8. Skematik Pengujian Benda Uji F



Gambar 3.9. *Furnace Carbolite*



Gambar 3.10 Mesin Onoroll dan Rangkaian Alat

### 3.3.4 Preparasi, Pengujian Metalografi dan Pengamatan Mikrostruktur

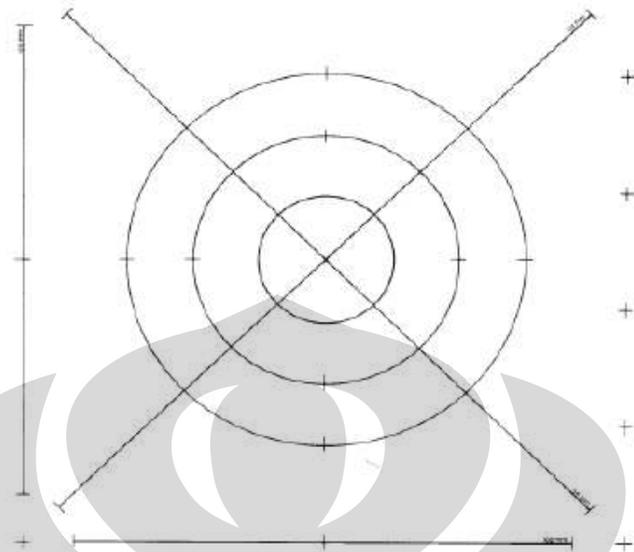
Pengujian metalografi bertujuan untuk mengamati mikrostruktur dari benda uji. Preparasi benda uji berdasarkan *ASTM E 3 – 01 “Standard Guide for Preparation for Metallographic Specimens”* [33].

Untuk benda uji yang berukuran kecil dilakukan proses *mounting* terlebih dahulu untuk mempermudah penanganan benda uji metalografi. Setelah itu dilakukan proses pengamplasan untuk meratakan bagian benda uji yang akan di amati mikrostrukturnya. Pengamplasan dilakukan dengan menggunakan kertas amplas yang dimulai dari amplas kasar hingga amplas halus agar didapat permukaan benda uji yang halus dan rata di seluruh permukaan. Ukuran kekasaran dari kertas amplas yang digunakan yaitu: #80, #120, #240, #400, #600, #800,

#1000, #1200, #1500 (dalam mesh). Dalam melakukan pengamplasan, arah pengamplasan diubah setiap mengganti tingkat kekasaran kertas amplas, hal ini bertujuan untuk menghilangkan sisa pengamplasan sebelumnya sehingga didapat permukaan yang halus pada benda uji. Setelah selesai melakukan pengamplasan, maka benda uji dipoles agar mendapatkan permukaan yang lebih halus dan mengkilap serta menghilangkan bekas goresan akibat pengamplasan. Benda uji dipoles dengan menggunakan kain beludru dan zat poles yang digunakan adalah alumina. Setelah dilakukan proses poles, benda uji dietsa dengan Nital 2% untuk untuk memunculkan jejak batas butir struktur akhir dari benda uji sehingga dapat diamati morfologi butir ferrit. Setelah itu dilakukan pengamatan dengan mikroskop optik.

### **3.3.5 Pengukuran Besar Butir**

Pengujian dan perhitungan besar butir dilakukan dengan menggunakan standar ASTM E112 “*Standard Test Method for Determining Average Grain Size*”[34]. 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 3.11. Lingkaran yang Digunakan Untuk Penghitungan Besar Butir Dengan Metode Intercept Heyn[34].

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

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

dan panjang garis perpotongan ( $L_3$ ) adalah:

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

dimana :

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

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

M = Perbesaran

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

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

### 3.3.6 Pengukuran Grain Aspect Ratio

Untuk butir yang sangat memanjang (*highly elongated*) metode perhitungan besar butir dengan Metode Intercept Heyne tidak dapat memberikan gambaran secara valid. Sehingga digunakan metode GAR ( Grain Aspect Ratio) mengamati morfologi butir yang dihasilkan oleh proses canai hangat dan TMCP karena butir yang dihasilkan memanjang. Nilai GAR dapat dihitung melalui persamaan berikut :

$$\text{GAR} = L/l \dots \dots \dots (3.4)$$

Dimana :

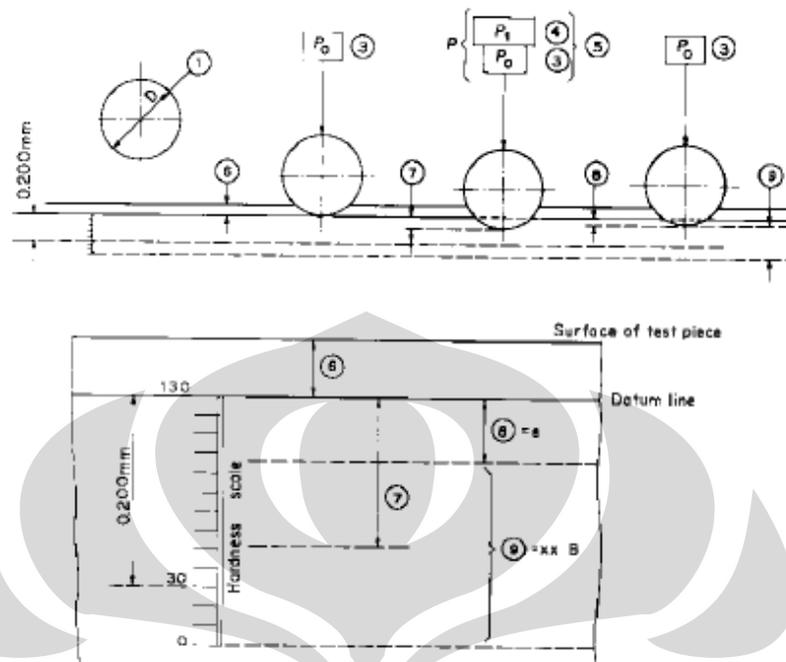
GAR = Grain Aspect Ratio

L = panjang rata-rata batas butir yang sejajar dengan sumbu tegangan (mm)

l = panjang rata-rata batas butir yang tegak lurus terhadap sumbu tegangan (mm)

### 3.3.7 Uji Kekerasan

Metode pengujian kekerasan yang dipakai yaitu Metode Rockwell yang menggunakan standard ASTM E18 “*Standard Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials*”[35]. Indentor yang digunakan kerucut intan dengan sudut yang dibentuk muka intan 120°. Pembebanan dilakukan dengan dua tahap; tahap pertama adalah pembebanan minor kemudian pembebanan mayor. Nilai kekerasan ditentukan dengan perbandingan kedalaman kedua tahap pembebanan. Berbeda dengan metode Brinell dan Vickers dimana kekerasan suatu bahan dinilai dari diameter atau diagonal jejak yang dihasilkan, maka metode Rockwell merupakan uji kekerasan dengan pembacaan langsung (*direct reading*). Metode ini banyak dipakai dalam industri karena pertimbangan praktis. Variasi dalam beban dan indentor yang digunakan membuat metode ini memiliki banyak macamnya. Metode Rockwell yang digunakan pada penelitian ini adalah Rockwell B (dengan indentor bola baja berdiameter 1/6 inci dan beban 100 kg). Waktu yang digunakan untuk indentasi yaitu 5 detik.



Gambar 3.12 Prinsip Pengujian Kekerasan Dengan Metode *Rockwell B* [35].

Tabel 3.2 Simbol dan Penanda Skematik Metode Rockwell B[35].

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

## BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1. Pengukuran Dimensi Benda Uji

Deformasi yang diberikan terhadap benda uji dimasukkan kedalam persamaan berikut :

$$\% \text{ Deformasi} = \ln \frac{h_0}{h_f} \dots \dots \dots (4.1)$$

Dimana :

% Deformasi = Besarnya prosentase yang diberikan

$h_0$  = Ketebalan awal (mm)

$h_f$  = Ketebalan akhir (mm)

Setiap benda uji diukur ketebalannya menggunakan jangka sorong. Pengukuran ketebalan benda uji dilakukan sebanyak tiga kali sehingga didapat rata-rata ketebalan untuk setiap benda uji. Hasil pengukuran ketebalan benda uji dapat dilihat pada Tabel 4.1.

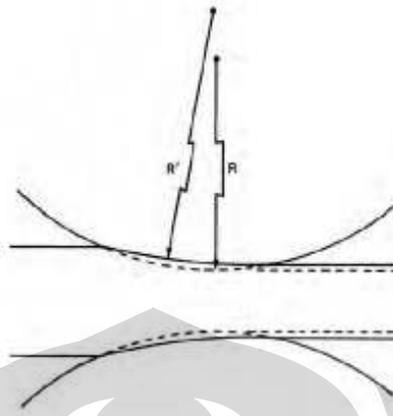


Gambar 4.1. Benda Uji Yang Telah Dideformasi

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

No	Benda Uji	ho (mm)	% Deformasi Teoritis	hf Teoritis (mm)	% Reduksi Teoritis	hf Aktual (mm)	% Deformasi Aktual	% Reduksi Aktual
1	A	9.45	-	9.45	-	9.45	-	-
2	B	9.45	60 %	5.18	45.18 %	5.25 5.4 5.5	56,89 %	43.38 %
3	C	9.45	60 – 20%	4.24	55.13 %	4.4 4.3 4.3	17.85 %	54.14 %
4	D	9.45	60 – 20 – 15 %	3.65	61.37 %	3.75 3.7 3.75	12.73 %	60.49 %
5	E	9.45	60 – 20 – 15 - 10 %	3.3	65.07 %	3.45 3.45 3.5	5.15 %	63.33 %
6	F	9.45	60 – 20 – 15 - 10 %	3.3	65.07 %	3.4 3.4 3.5	6.12 %	63.66 %

Dari data tabel 4.1 terlihat perbedaan ketebalan akhir aktual (hf aktual) dan ketebalan akhir teoritis (hf teoritis) dari setiap benda uji. Perbedaan yang terjadi pada nilai ketebalan akhir benda uji ini disebabkan adanya mekanisme *roll flattening* pada saat proses canai. Ketika benda uji masuk kedalam *roller*, terjadi reaksi antara benda uji dan *roller*. Jika benda uji memiliki kekerasan yang cukup tinggi, reaksi yang terjadi juga meningkat yang mengakibatkan roller terdeformasi secara elastis[13]. Sedangkan perbedaan ketebalan untuk setiap pengukuran benda uji disebabkan deformasi yang tidak seragam pada setiap sisi benda uji.



Gambar 4.2. Mekanisme Roll Flattening[36].

## 4.2 Ukuran Butir Ferit

### 4.2.1 Pengukuran Diameter Butir Ferit

Reheating atau pemanasan akan mengubah ukuran diameter butir ferit. Hal ini ditunjukkan oleh hasil perhitungan butir ferit dengan metode *Intercept Heyn* sesuai dengan ASTM E-112 dan contoh perhitungannya dapat dilihat pada lampiran. Perhitungan butir dilakukan sebanyak 3 kali perhitungan. Untuk setiap benda uji setelah dilakukan 3 kali perhitungan maka dapat diperoleh diameter butir rata-rata.

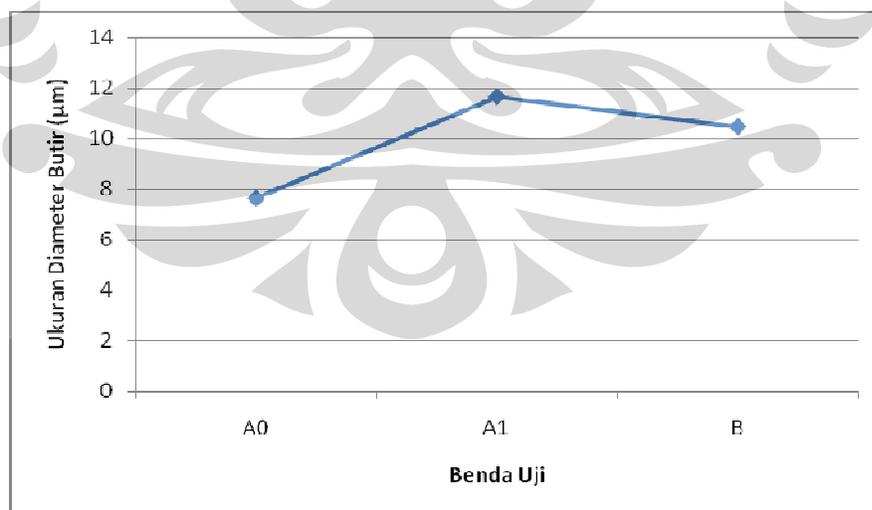
Pengukuran diameter butir dengan metoda *Intercept Heyn* hanya dilakukan terhadap benda uji yang memiliki butir *equiaxed* dan sedikit memanjang, sedangkan untuk butir yang sangat memanjang (*highly elongated*) dan pipih menggunakan pengukuran *Grain Aspect Ratio* (Subbab 4.2.2)

Hasil pengukuran diameter butir dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2. Hasil Pengukuran Diameter Butir Ferit.

No	Benda Uji	Temp Reheating (°C)	% Deformasi	Ukuran Butir Ferit			
				G No	Diameter Butir (µm)	Standard Deviasi	Diameter rata-rata butir (µm)
1	A0	-	-	11.06	7.75	0.11	7.65 ± 0.11
				11.14	7.56		
				11.1	7.66		
2	A1	700	-	9.90	11.62	0.21	11.65 ± 0.21
				9.94	11.45		
				9.84	11.87		
3	B	700	60 %	10.18	10.55	0.29	10.47 ± 0.29
				10.29	10.15		
				10.13	10.73		

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



Gambar 4.3. Grafik Pengaruh Temperatur *Reheating* dan Deformasi Terhadap Ukuran Diameter Butir Ferit Untuk Setiap Benda Uji.

Dari Tabel 4.2 dapat dilihat bahwa Benda Uji A0 yang tidak dilakukan pemanasan ulang dan deformasi mempunyai ukuran butir  $7.65 \mu\text{m} \pm 0.11$ . Dengan melakukan pemanasan ulang terhadap Benda Uji A1, terjadi pertumbuhan butir dimana ukuran diameter ferit menjadi  $11.65 \mu\text{m} \pm 0.21$ . Untuk Benda Uji B yang dilakukan pemanasan ulang dan deformasi sebesar 60% terjadi penghalusan butir dimana butir memiliki ukuran diameter ferit  $10.47 \mu\text{m} \pm 0.29$ .

Dari perbandingan antara Benda Uji A0 dan A1, terjadi pengasaran ukuran butir ferit, hal ini disebabkan karena terjadinya proses pertumbuhan butir (*grain growth*). Proses pertumbuhan butir ini terjadi karena adanya energi panas berlebih dalam waktu lama yang diberikan terhadap Benda Uji A1[14]. Pertumbuhan butir yang terjadi karena adanya migrasi batas butir akibat difusi atom-atom dari suatu butir ke butir lainnya sehingga terjadi perubahan batas butir. Peningkatan temperatur akan mempercepat proses difusi tersebut karena bertambahnya energi yang diberikan butir sehingga semakin meningkat temperatur maka akan diperoleh butir yang relatif besar[7]. Sedangkan untuk Benda uji B, dimana benda uji dilakukan reheating dan dideformasi, ukuran diameter butir ferit kembali mengecil. Hal ini disebabkan karena terjadinya proses rekristalisasi. Energi regangan yang berasal dari derajat deformasi yang diberikan berkolaborasi dengan panas yang diberikan (*reheating*) melebihi energi aktivasi untuk terbentuknya butir baru, sehingga proses rekristalisasi terjadi.

#### 4.2.2 Pengukuran Grain Aspect Ratio (GAR)

Penghitungan GAR dari butir pada setiap benda di uji dilakukan sebanyak tiga kali. Dari tiga kali perhitungan diperoleh GAR rata rata dari setiap benda uji. GAR dapat dihitung dengan persamaan berikut[32]:

$$\text{GAR} = L/l \dots \dots \dots (4.2)$$

Dimana :

GAR = Grain Aspect Ratio

L : panjang rata-rata batas butir yang sejajar dengan sumbu tegangan (mm)

l : panjang rata-rata batas butir yang tegak lurus terhadap sumbu tegangan (mm)

Hasil pengukuran GAR untuk setiap benda uji dapat dilihat pada Tabel 4.3

Tabel 4.3 Hasil Pengukuran GAR Benda Uji Sebelum dan Setelah Proses TMCP dan *Warm Rolling*

No	Benda Uji	GAR (Grain Aspect Ratio) Butir Ferit				
		Panjang Butir (mm)	Lebar Butir (mm)	GAR (L/l)	Standar Deviasi	GAR rata-rata
1	A0	5.483	3.9	1.4	0.26	1.33 ± 0.26
		4.8	3.08	1.55		
		4.25	4.05	1.04		
2	A1	7.21	7.11	1.01	0.03	1.043 ± 0.03
		7.55	7.24	1.04		
		7.16	6.61	1.08		
3	B	11.5	2.87	4.00	0.37	4.08 ± 0.37
		13.16	3.5	3.76		
		12.59	2.8	4.49		
4	C	15.18	2.9	5.23	0.9	6.12 ± 0.9
		20.2	3.3	6.12		
		19.7	2.8	7.03		
5	D	25	2.3	10.86	0.51	11.44 ± 0.51
		22.5	1.9	11.84		
		16.75	1.44	11.63		
6	E	22.58	1.61	14.02	0.39	14.44 ± 0.39
		26.17	1.8	14.53		
		25.15	1.7	14.79		
7	F	24.1	1.54	15.64	0.71	14.87 ± 0.71
		26.84	1.82	14.74		
		30.15	2.18	14.22		

Nilai GAR yang diperoleh menunjukkan morfologi butir ferit yang dihasilkan. Butir ferit yang *equiaxed* mempunyai nilai  $GAR = 1$ [37]. Untuk benda uji yang mempunyai GAR lebih besar dari satu, morfologi butirnya memanjang (*elongated*). Semakin besar nilai GAR, morfologi butir semakin panjang dan semakin pipih. Dari Tabel 4.3 dapat dilihat bahwa morfologi butir untuk benda uji A0 dan A1 memiliki butir yang *equiaxed*. Benda uji A0 merupakan benda uji yang belum mengalami perlakuan panas (*heat treatment*) maupun deformasi sehingga butir yang dihasilkan *equiaxed* ( $GAR = 1.33 \pm 0.26$ ). Untuk Benda Uji A1 merupakan benda uji yang mengalami perlakuan panas dengan dipanaskan hingga temperatur  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$  selama sepuluh menit dan ditahan selama 15 menit kemudian didinginkan dengan media pendingin udara. Morfologi butir untuk Benda Uji A1 berupa butir yang *equiaxed* ( $GAR = 1.043 \pm 0.03$ ).

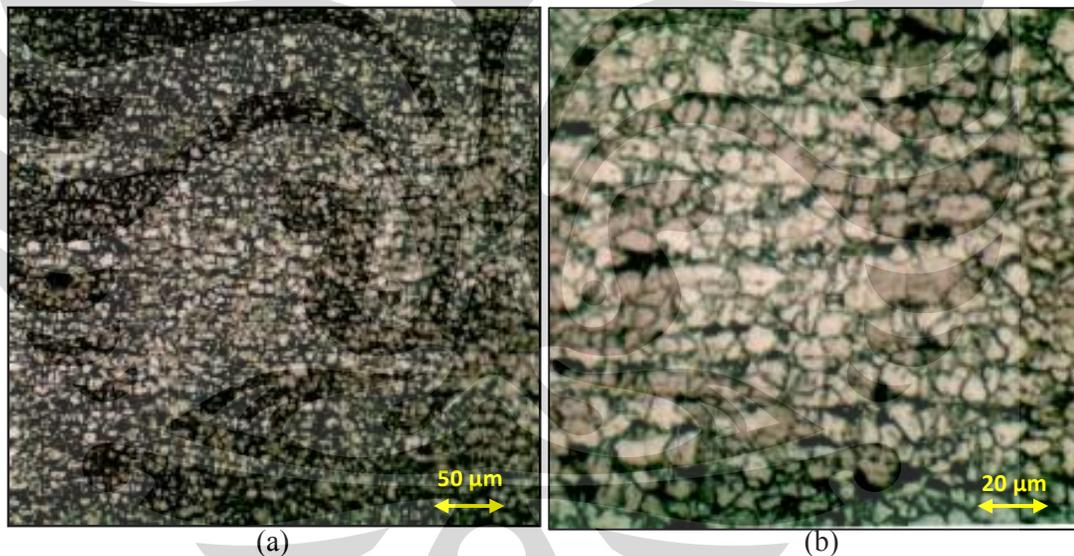
Morfologi butir pada Benda Uji B merupakan butir yang memanjang ( $GAR = 4.08 \pm 0.37$ ). Hal ini dikarenakan Benda Uji B telah mengalami perlakuan panas dan deformasi, sehingga butir-butirnya ikut terdeformasi menjadi lebih panjang[13]. Untuk Benda Uji C butirnya memiliki nilai ( $GAR = 6.12 \pm 0.9$ ) yang lebih tinggi dari Benda Uji B, artinya butir C memiliki morfologi butir yang lebih panjang dan lebih pipih dibanding butir B. Deformasi yang lebih besar yang diberikan terhadap Benda Uji C ( $60\% + 20\%$ ) mengakibatkan butirnya lebih panjang daripada Benda Uji B. Begitu juga untuk Benda Uji D ( $GAR = 11.44 \pm 0.51$ ), morfologi butir yang dihasilkan lebih panjang dan lebih pipih dibanding yang Benda Uji B dan C. Hal ini disebabkan karena derajat deformasi yang diberikan terhadap Benda Uji D ( $60\% + 20\% + 15\%$ ) lebih besar. Untuk Benda Uji E butirnya lebih panjang dan lebih pipih dibanding butir pada Benda Uji B, C, dan D. Hal ini juga disebabkan karena derajat deformasi yang diberikan lebih besar ( $60\% + 20\% + 15\% + 10\%$ ) terhadap Benda Uji E. Walaupun derajat deformasi yang diberikan terhadap Benda Uji F ( $60\% + 20\% + 15\% + 10\%$ ) sama dengan Benda Uji E, morfologi butir yang dihasilkan sedikit lebih pipih dibandingkan benda uji E. Hal ini dikarenakan media pendingin yang berbeda yang diberikan terhadap masing-masing benda uji. Benda Uji F menggunakan media pendingin air (*quench*) sedangkan untuk Benda Uji E media pendingin yang digunakan adalah udara artinya proses *quench* menghambat terjadinya difusi atom, oleh sebab

itu semakin tinggi kecepatan pendinginan suatu media *quench*, semakin terhambat difusi atom – atom, semakin halus dan seragam pula butir yang dihasilkan. Semakin cepat kecepatan pendinginan, semakin halus butir yang dihasilkan [38].

### 4.3 Pengamatan Metalografi

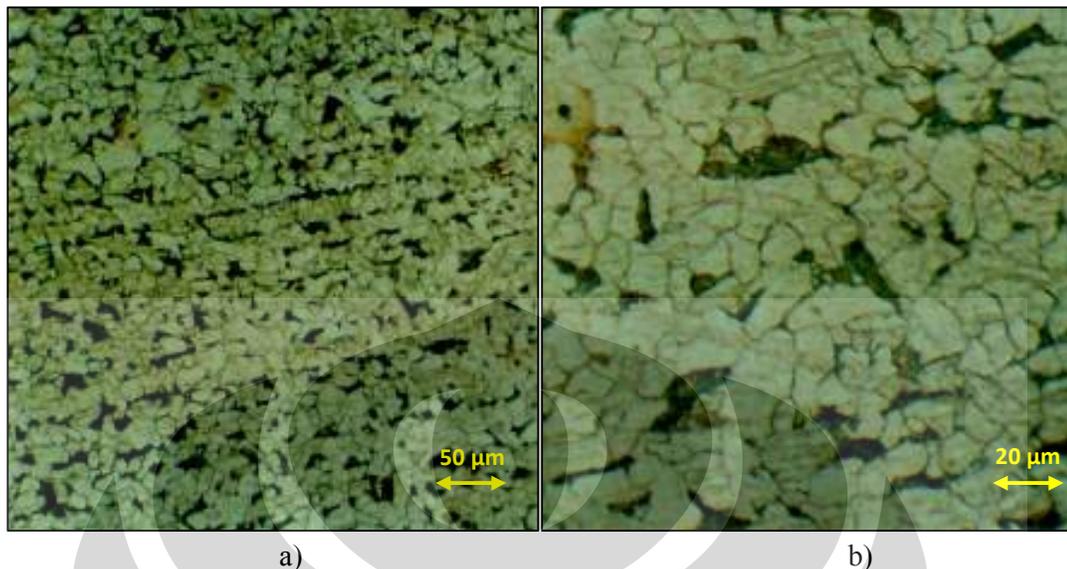
Pengamatan metalografi dengan mikroskop optik bertujuan untuk mengamati mikrostruktur hasil proses pencanaan.. Pengamatan dilakukan dengan menggunakan etsa Nital 2 %, selama 4 - 7 detik. Pengamatan meliputi morfologi dan ukuran butir sebelum dan sesudah proses.

#### 4.3.1 Pengaruh Temperatur Reheating Terhadap Mikrostruktur



Gambar 4.4. Foto Mikrostruktur Baja API 5L X42 Benda Uji A0, Etsa Nital 2 %.  
(a) Perbesaran 200x (b) Perbesaran 500x.

Pada Gambar 4.4, jika dilihat dari panjang dan lebar butir dari Benda Uji A0, butir yang dimilikinya merupakan butir yang *equiaxed* dan cukup halus. Pada Gambar 4.4(b) terlihat matriks butir terdiri atas ferit (berwarna terang) dan perlit (berwarna gelap).



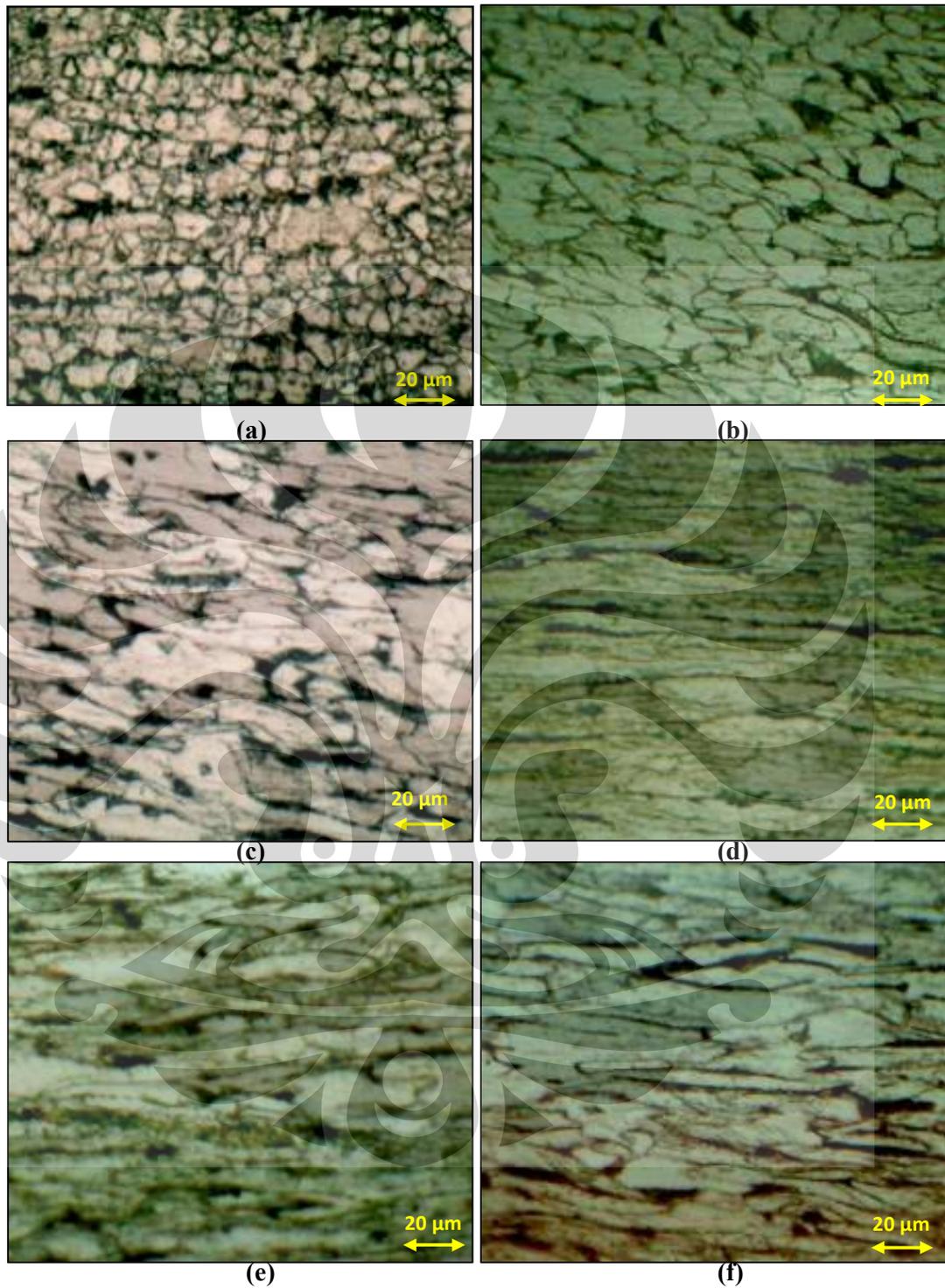
Gambar 4.5 Foto Mikrostruktur Baja API 5L X42 Benda Uji A1, Etsa Nital 2 %.  
(a) Perbesaran 200x (b) Perbesaran 500x.

Gambar 4.5 merupakan mikrostruktur dari benda uji yang telah mengalami pemanasan ulang. Pada gambar terlihat butir yang dihasilkan *equiaxed*. Jika dibandingkan dengan morfologi Benda Uji A0 (Gambar 4.4), morfologi butir Benda Uji A1 terlihat lebih besar. Hal ini disebabkan karena adanya mekanisme pertumbuhan butir karena perlakuan panas yang diberikan terhadap Benda Uji A1. Faktor yang mempengaruhi pertumbuhan butir adalah temperatur dan waktu tahan.. 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[7]. Waktu tahan akan memberikan kesempatan atom-atom tersebut untuk bergabung dan meningkatkan ukuran butir. Pada Gambar 4.5(b), terlihat ukuran butir yang tidak seragam, beberapa butir memiliki ukuran butir yang lebih besar, peristiwa ini dikenal dengan *abnormal grain growth*. Pada keadaan tertentu, ketika mikrostruktur tidak stabil, beberapa butir tumbuh secara cepat, dan memakan butir-butir yang lebih kecil. *Driving force* untuk terjadinya *abnormal grain growth* ini biasanya berasal dari pengurangan energi batas butir dari butir-butir yang tumbuh normal[14].

#### 4.3.2 Pengaruh Temperatur dan Deformasi Terhadap Mikrostruktur

Gambar 4.6 merupakan pengamatan evolusi mikrostruktur yang terjadi selama proses *warm rolling*. Proses pengamatan metalografi menggunakan etsa nital 2 %. Dari gambar tersebut kita dapat mengamati perubahan morfologi maupun ukuran dari butir yang terjadi karena pengaruh *warm rolling*.





Gambar 4.6. Mikrostruktur Baja API 5L X42 Sebelum dan Sesudah Proses TMCP dan *Warm Rolling*. Etsa Nital 2 %.Perbesaran 500x(a) Benda uji A. (b) Benda Uji B. (c) Benda Uji C. (d) Benda Uji D. (e) Benda Uji E. (f) Benda Uji F.

Pada Gambar 4.6 (a) , Benda Uji A0 merupakan benda uji tanpa perlakuan panas maupun deformasi. Terlihat bahwa morfologi butirnya *equiaxed* dan tidak terlalu besar. Gambar 4.6(b) merupakan Benda Uji B yang mengalami *reheating* 700 °C yang ditahan selama sepuluh menit kemudian dideformasi sebesar 60% dan didinginkan udara. Pada Gambar 4.6(b) terlihat bahwa, beberapa butir membesar dan sedikit terelongasi. Ukuran butir yang menjadi besar disebabkan adanya perlakuan *reheating* yang cukup lama terhadap benda uji, sehingga beberapa butir tumbuh menjadi besar. Butir yang terelongasi pada Benda Uji B terjadi karena adanya pengaruh deformasi yang diberikan terhadap benda uji. Diantara butir yang terelongasi terdapat butir-butir baru yang *equiaxed*, hal ini terjadi karena adanya mekanisme rekristalisasi (Subbab 4.3.3).

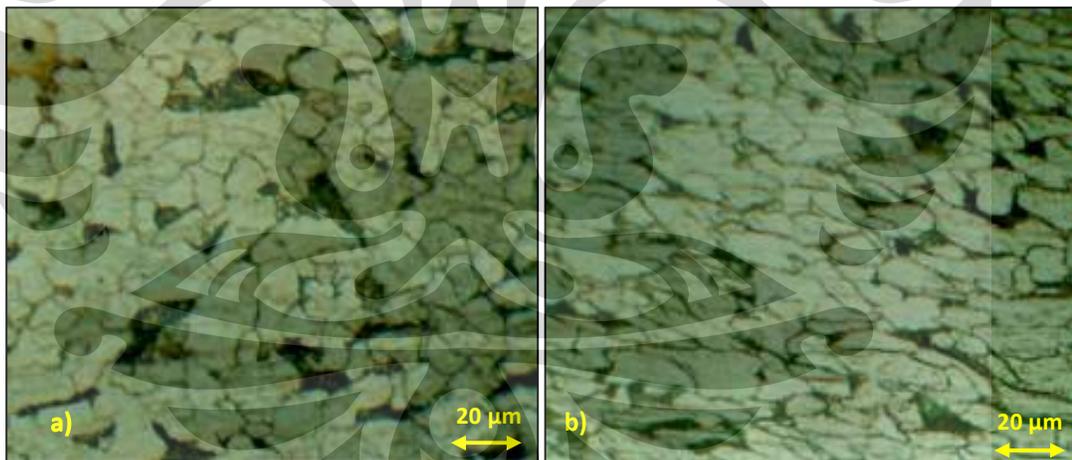
Gambar 4.6(c) merupakan mikrostruktur dari Benda Uji C yang mengalami *reheating* 700 °C selama sepuluh menit kemudian dideformasi multipass searah sebesar 60% dan dilanjutkan deformasi 20% pada temperatur 500 °C yang didinginkan dengan media udara. Morfologi butir yang dihasilkan akibat proses yang diberikan adalah butir yang memanjang. Jika dibandingkan dengan morfologi butir Benda Uji B, morfologi butir benda uji C sedikit lebih panjang dan lebih pipih. Hal ini disebabkan adanya deformasi lanjut yang diberikan terhadap Benda Uji C berupa tekanan dari *roller* sehingga butir tertekan dan memipih. Besarnya derajat deformasi yang diberikan sebesar 20% membuat butir hanya terdeformasi menjadi sedikit lebih panjang.

Pada Gambar 4.6(d) dan 4.6(e) terlihat morfologi butir Benda Uji D dan Benda Uji E. Benda Uji D merupakan benda uji yang mengalami *reheating* 700 °C selama sepuluh menit kemudian dideformasi multipass searah sebesar 60% yang dilanjutkan deformasi 20% dan 15% pada temperatur 500 °C yang didinginkan dengan media udara. Sedangkan untuk Benda Uji E adalah benda uji yang mengalami *reheating* 700 °C selama sepuluh menit kemudian dideformasi multipass searah sebesar 60% yang dilanjutkan deformasi 20%, 15%, 10% pada temperatur 500 °C yang didinginkan dengan media udara. Morfologi butir yang dihasilkan juga memanjang dan pipih. Morfologi butir pada Benda Uji E lebih panjang dan lebih pipih dibanding morfologi butir benda uji lainnya. Hal ini

dikarenakan total derajat deformasi yang diberikan terhadap Benda Uji E lebih besar jika dibandingkan dengan benda uji lainnya.

Untuk Benda Uji F, morfologi butir dapat dilihat pada Gambar 4.6 (f). Benda Uji F adalah benda uji yang mengalami reheating 700 °C selama sepuluh menit kemudian dideformasi multipass searah sebesar 60% dan dilanjutkan deformasi 20% pada temperatur 500 °C yang didinginkan dengan media air (*quench*). Perbedaan media pendinginan yang dilakukan terhadap Benda Uji F, membuat morfologi butir yang dihasilkan sedikit berbeda walaupun perlakuan panas dan deformasi yang diberikan sama dengan Benda uji E. Morfologi butir yang dihasilkan sedikit lebih panjang dan pipih dibanding benda uji E. Hal ini dikarenakan media pendinginan air berupa air (*quench*), menghambat terjadinya difusi atom sehingga butir tidak terus tumbuh dan butir yang dihasilkan lebih kecil [38].

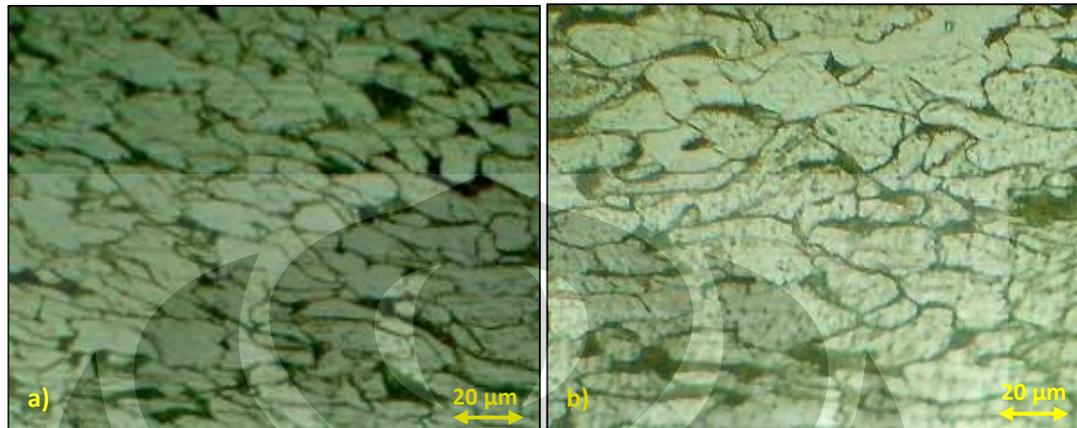
#### 4.3.3 Rekristalisasi



Gambar 4.7 Rekristalisasi Pada Baja API 5L X42, Etsa Nital 2 %, Perbesaran 500x (a) Reheating 700 °C Ditahan selama 10 menit Tanpa Deformasi (b) Reheating 700 °C Ditahan Selama 10 Menit Defomasi 60%.

Pada Gambar 4.7(b) dapat dilihat bahwa benda uji yang mengalami deformasi membentuk butir-butir baru yang *equiaxed* diantara butir-butir yang terelongasi. Pada temperatur *reheating* 700 °C dan derajat deformasi 60 %, energi regangan yang ekuivalen dengan derajat deformasi dan energi termal yang

ekivalen dengan temperatur deformasi yang diberikan melebihi energi aktivasi untuk terbentuknya butir baru sehingga memicu terjadinya rekristalisasi.



Gambar 4.8 Mikrostruktur Baja API 5L X42 Dengan Variasi Temperatur, Etsa Nital 2%, Perbesaran 500x. (a) Deformasi 60% Pada Temperatur 700°C. (b) Deformasi 60% Pada Temperatur 650 °C [39].

Gambar 4.8 merupakan mikrostruktur Baja API 5L X42 dengan derajat deformasi 60% namun temperatur reheating dan temperatur defomasinya berbeda. Gambar 4.8(a) merupakan benda uji yang di-*reheating* dan dideformasi pada temperatur 700 °C, sedangkan Gambar 4.8(b) merupakan benda uji yang di-*reheating* dan dideformasi pada temperatur 650 °C Pada Gambar 4.7 (b), mikrostruktur yang dihasilkan terlihat lebih besar dan panjang (*elongated*), sedangkan pada Gambar 4.7(a) terlihat adanya butir-butir baru yang tumbuh disekitar butir yang terdeformasi. Pada temperatur *reheating* dan temperatur deformasi 650 °C dengan derajat deformasi 60 %, walaupun dengan energi regangan yang sama, rekristalisasi tidak terjadi karena energi termal yang dihasilkan dari temperatur yang diberikan tidak dapat memicu terjadinya rekristalisasi.

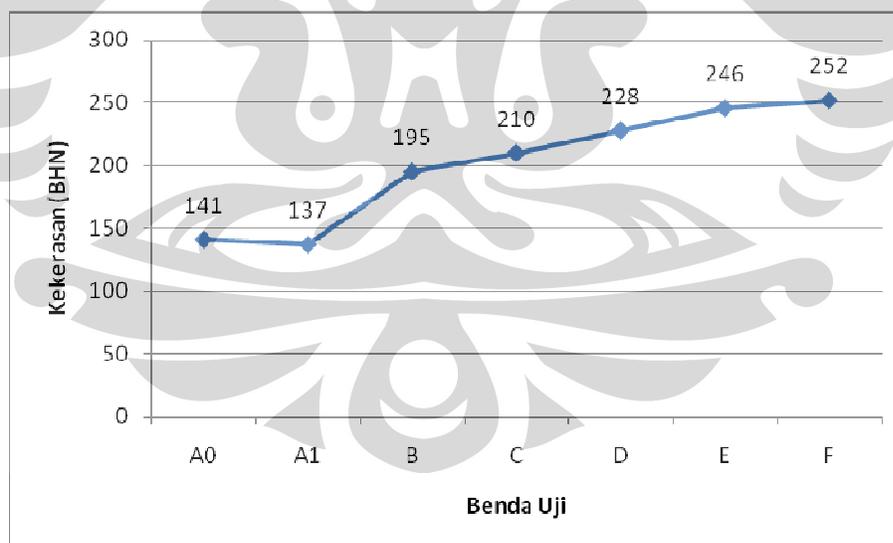
#### 4.4 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan dengan Metode Rockwell[35]. Pengukuran dilakukan sebanyak tiga kali. Nilai kekerasan Rockwell tersebut kemudian dikonversi ke dalam satuan Metode Brinnel dengan menggunakan tabel perbandingan

yang terdapat pada standar ASTM E140 “*Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness*” [40]. Hasil pengukuran dapat dilihat di Tabel 4.4 .

Tabel 4.4. Hasil Pengukuran Kekerasan Benda Uji Sebelum dan Sesudah Proses TMCP dan *Warm Rolling* (700 °C)

No	Benda Uji	HRB	BHN	$\sigma$ (Mpa)
1	A0	77	141	486.45
2	A1	75	137	472.65
3	B	92	195	672.75
4	C	95	210	724.5
5	D	98	228	786.6
6	E	101	246	848.7
7	F	102	252	869.4



Gambar 4.9. Grafik Nilai Kekerasan Benda Uji

#### 4.4.1 Pengaruh Temperatur Reheating Terhadap Kekerasan.

Hasil pengujian kekerasan pada benda uji sebelum dan setelah dilakukan pemanasan ulang dapat dilihat pada Tabel 4.4. Pada Benda Uji A1 yang mengalami *reheating* hingga temperatur 700 °C kekerasannya menurun (137 BHN) jika dibandingkan dengan kekerasan Benda Uji A0 (141 BHN). Temperatur pemanasan ulang akan mempengaruhi sifat mekanis material dimana butir mengalami rekristalisasi kemudian terjadi pertumbuhan butir yang menurunkan sifat mekanis seperti kekerasan dan kekuatan[7]. Penurunan kekerasan ini disebabkan oleh temperatur *reheating* yang tinggi dan cukup lama selama 10 menit sehingga terjadi pertumbuhan butir yang membuat ukuran butir menjadi lebih besar. Ukuran butir yang besar akan mengurangi nilai kekerasan 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[7].

#### **4.4.2 Pengaruh Temperatur dan Deformasi Terhadap Kekerasan**

Setelah dilakukan *reheating*, selanjutnya benda uji di deformasi. Nilai kekerasan untuk setiap benda uji dapat dilihat pada Tabel 4.4 diatas. Untuk Benda Uji B yang mengalami deformasi sebesar 60% kekerasannya meningkat 38.2 % dari 141 BHN menjadi 195 BHN. Peningkatan kekerasan Benda Uji B dipengaruhi karena adanya sebagian butir yang terekristalisasi lebih halus, deformasi yang diberikan juga berkontribusi dalam peningkatan kekerasan Benda Uji B. Hal ini dikarenakan ketika material dideformasi, regangan yang diberikan menghasilkan *deformation band* atau *microband* yang mempunyai densitas dislokasi sangat tinggi[20]. Densitas dislokasi yang sangat tinggi mengakibatkan dislokasi menjadi sulit bergerak sehingga material sulit dideformasi dan kekerasannya meningkat[28]. Peningkatan kekerasan yang terjadi cukup

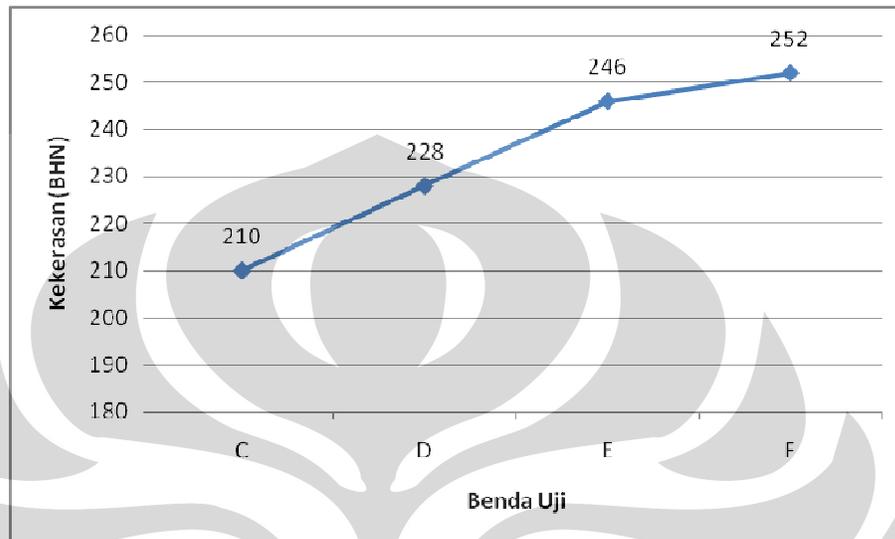
signifikan, hal ini sebanding dengan besarnya deformasi yang diberikan terhadap benda uji .

Untuk Benda Uji C, yang mengalami deformasi lanjut sebesar  $60\% + 20\%$  (multipass) pada temperatur  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  kekerasannya meningkat menjadi 210 BHN. Peningkatan terjadi karena deformasi yang dilakukan pada temperatur dibawah temperatur rekristalisasinya , sehingga terbentuklah butir dengan geometri *pancake* yang mengandung banyak cacat dalam matriksnya[22]. Cacat dalam matriks (dislokasi, *microband*, dll) mengandung konsentrasi tegangan yang besar sehingga sulit untuk dideformasi dan material menjadi keras. Pada Gambar 4.6 (c) pada halaman 47, morfologi butir yang sedikit terelongasi juga mempengaruhi kekerasan, dimana butir yang terelongasi memiliki energi yang tinggi dibatas butirnya. Peningkatan kekerasan yang terjadi tidak terlalu besar karena besarnya deformasi lanjut yang diberikan terhadap Benda Uji C juga tidak terlalu besar hanya 20%.

Untuk Benda Uji D yang mengalami deformasi sebesar  $60\% + 20\% + 15\%$  dan Benda Uji E yang mengalami deformasi sebesar  $60\% + 20\% + 15\% + 10\%$  pada temperatur  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  kekerasannya juga meningkat. Benda Uji D memiliki kekerasan 228 BHN, sedangkan untuk Benda Uji E kekerasannya sebesar 246 BHN. Jumlah energi regangan yang diberikan meningkat seiring dengan bertambahnya besar deformasi yang diberikan[36]. Energi regangan yang bertambah namun temperatur deformasi yang diberikan jauh dibawah temperatur rekristalisasi material menyebabkan terjadinya efek *strain hardening*. Peningkatan energi regangan mengakibatkan energi regangan sisa yang tersimpan dalam material meningkat setelah dideformasi yang mengakibatkan material menjadi keras..

Benda Uji F mengalami perlakuan panas dan deformasi yang sama dengan Benda Uji E namun berbeda dalam media pendinginannya. Benda Uji F yang menggunakan air sebagai media pendingin (*water quenching*) jika dibandingkan dengan Benda Uji E yang menggunakan media udara sebagai media pendingin memiliki kekerasan yang lebih tinggi yaitu sebesar 252 BHN. Hal ini dikarenakan pendinginan dengan media air yang memiliki temperatur yang rendah

mempercepat laju pendinginan sehingga difusi batas butir terhambat dan butir yang dihasilkan lebih halus yang pada akhirnya akan meningkatkan kekerasan material[38].



Gambar 4.10. Grafik Nilai Kekerasan Benda Uji yang Dideformasi pada Temperatur 500 °C.

Pada Gambar 4.10, untuk benda uji yang dideformasi multipass pada temperatur 500 °C terjadi peningkatan nilai kekerasan dengan bertambahnya total derajat deformasi yang diberikan pada benda uji. Besarnya derajat deformasi total yang diberikan terhadap benda uji akan mempengaruhi kekerasannya.

#### 4.4.3 Pengaruh Rekristalisasi Terhadap Kekerasan.

Tabel 4.5 Hasil Pengujian Kekerasan Dengan Variasi Temperatur Deformasi [39]

No	Benda Uji	HRB	BHN
1	Benda Uji B	92	195
2	Benda Uji B1	98	228

Pada Tabel 4.5, Benda Uji B yang mengalami deformasi sebesar 60% pada temperatur 700 °C memiliki kekerasan yang lebih rendah dibanding Benda Uji B1

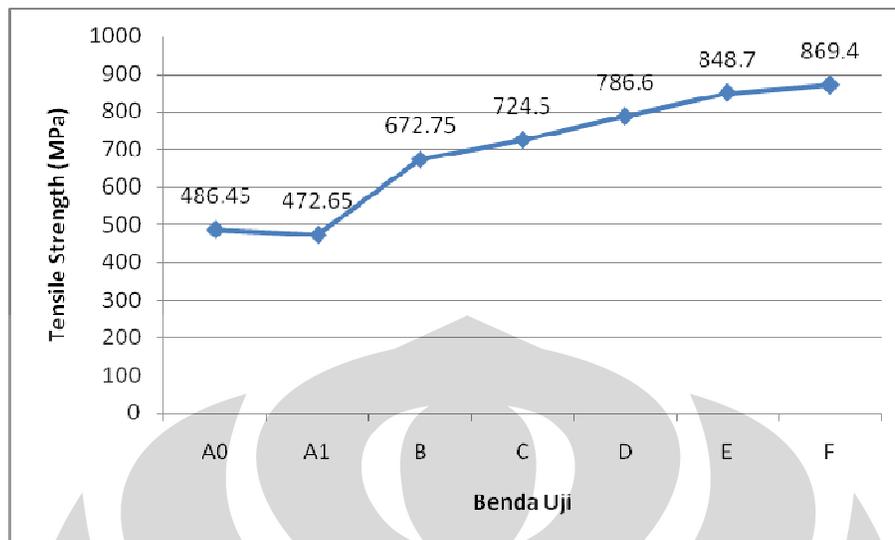
yang mengalami deformasi 60% pada temperatur 650 °C. Hal ini dikarenakan pada Benda Uji B mengalami peristiwa rekristalisasi, dimana butir-butir baru yang terbentuk merupakan butir yang bebas regangan sehingga regangan dalam material lebih sedikit yang mengakibatkan material lebih lunak jika dibandingkan dengan Benda Uji B1.

Proses rekristalisasi cenderung melunakkan suatu logam. Mekanisme pelunakan ini dapat ditelusuri kembali dari proses nukleasi butir rekristalisasi, dimana munculnya butir baru tersebut menurunkan energi dalam material dengan cara menggantikan daerah terdeformasi dengan daerah bebas regangan. Pada daerah terdeformasi dengan kepadatan dislokasi yang tinggi, kekerasan suatu logam terjadi melalui pengerasan regangan (*strain hardening*), dimana dislokasi-dislokasi saling mengunci/menahan satu sama lain sehingga mobilitas mereka terhambat dan energi dalam pun meningkat. Dengan digantikannya struktur berdislokasi tinggi dengan struktur bebas regangan, energi dalam pun turun kembali dan logam pun melunak [41].

#### **4.4.4 Hubungan Kekerasan dan Kekuatan Baja Karbon**

Untuk Baja, nilai kekerasan dari material dapat dikonversikan menjadi kekuatan tarik (*tensile strength*) melalui Persamaan 4.3 berikut :

$$TS \text{ (Mpa)} = 3.45 \times \text{BHN} \dots \dots \dots (4.3)$$



Gambar 4.11. Grafik Nilai Kekuatan Tarik Benda Uji.

Dari Persamaan 4.3 diperoleh suatu hubungan dimana peningkatan nilai kekerasan sebanding dengan peningkatan nilai kekuatan tarik. Hal ini juga dapat dilihat pada Gambar 4.12, dimana Benda Uji A0 memiliki kekuatan tarik sebesar 486.45 MPa, Benda Uji A1 sebesar 472.65 Mpa, Benda Uji B sebesar 672.75 MPa, Benda Uji C sebesar 724.5 MPa, Benda Uji D sebesar 786.6 MPa, Benda Uji E sebesar 848.7 MPa, dan Benda Uji F sebesar 869.4 MPa. Peningkatan kekuatan ini disebabkan karena deformasi yang diberikan menghasilkan tegangan sisa didalam material yang menyebabkan dislokasi sulit bergerak sehingga material sulit terdeformasi dan menjadi kuat.

## BAB 5 KESIMPULAN

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

1. Pemanasan ulang hingga temperatur 700 °C yang ditahan selama lima belas menit akan membesarkan ukuran butir menjadi  $11.65 \mu\text{m} \pm 0.21$  jika dibandingkan dengan ukuran butir awal yaitu sebesar  $7.65 \mu\text{m} \pm 0.11$ .
2. Penambahan terhadap derajat deformasi total pada setiap benda uji akan meningkatkan nilai Grain Aspect Ratio (GAR). GAR Benda uji A0 =  $1.33 \pm 0.26$ , Benda uji B =  $4.08 \pm 0.37$ , Benda uji C =  $6.12 \pm 0.9$ , Benda uji D =  $11.44 \pm 0.51$ , Benda uji E =  $14.44 \pm 0.39$ , Benda uji F =  $14.87 \pm 0.71$ .
3. Proses deformasi searah proses canai pada temperatur 700 °C dengan derajat deformasi 60%, 20%, 15%, 10% dan pendinginan material akan meningkatkan nilai GAR akhir material yaitu sebesar  $14.87 \pm 0.71$  jika dibandingkan dengan benda uji awal yang memiliki nilai GAR sebesar  $1.33 \pm 0.26$ .
4. Proses canai pada temperatur 700 °C dengan deformasi 60 % akan menghasilkan butir-butir baru yang *equiaxed* karena terjadinya proses rekristalisasi.
5. Penambahan terhadap derajat deformasi total pada setiap benda uji akan meningkatkan nilai kekerasan material. Dimana kekerasan Benda uji A0 = 77 HRB, Benda uji B = 92 HRB, Benda uji C = 95 HRB, Benda uji D = 98 HRB, Benda uji E = 101 HRB, Benda uji F = 102 HRB
6. Proses deformasi multipasas searah proses canai pada temperatur 700 °C dengan derajat deformasi 60% - 20% - 15% - 10% dengan pendinginan air akan meningkatkan kekerasan akhir material sebesar 78.7% yaitu dari 141 BHN menjadi 252 BHN.
7. Proses deformasi multipass searah proses canai pada temperatur 700 °C dengan derajat deformasi 60% - 20% - 15% - 10% dengan pendinginan air akan meningkatkan nilai kuat tarik akhir material sebesar 78.7% dari 486.45 MPa menjadi 869.4 MPa.

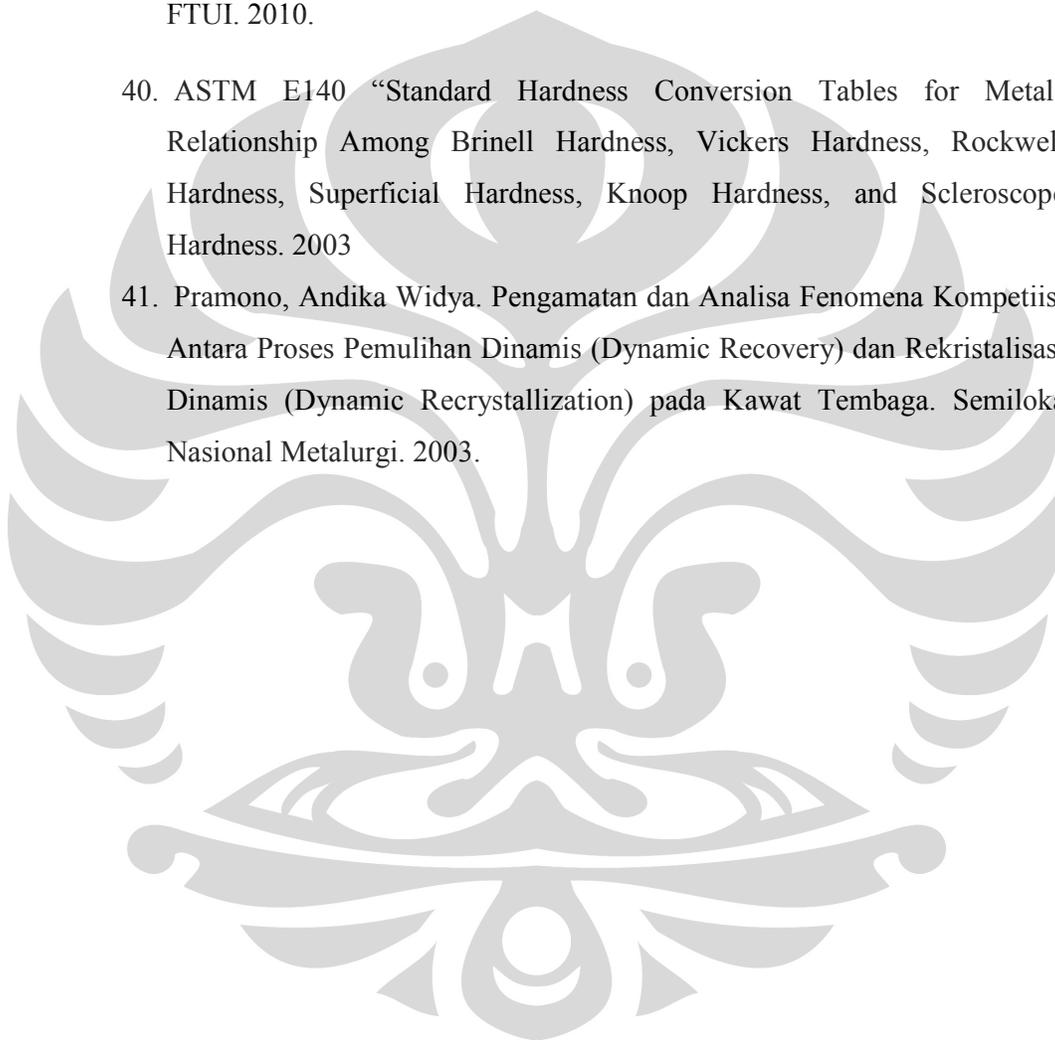
## DAFTAR PUSTAKA

1. D. Gandy. Carbon Steel Handbook. Electric Power Research Institute. Final Report. March 2007. Hal 1-1
2. Christmas, Ian. Fit to take on the new challenges. Metal Bulletin weekly on 12 January. [www.worldsteel.org](http://www.worldsteel.org). 2009
3. 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
4. Yuwei Gao, Tianfu Jing, Guiying Qiao, Jinku Yu, Tiansheng Wang, Qun Li, Xinyu Song, Shuqiang Wang, and Hong Gao. Microstructural evolution and tensile properties of low-carbon steel with martensitic microstructure during warm deforming and annealing.
5. Edwin Scott, Jr., “ASA Materials Market Digest”, [www.asa.net](http://www.asa.net), 2009, hal 1-6.
6. George Krauss. STEEL: Processing, Structure, and Performance, ASM International. USA: 2005.
7. William D. Callister, Jr. Fundamental of Materials Science and Engineering 5th edition. USA: 2003.
8. Pickering, F. B. Physical Metallurgy And The Design Of The Steels. Applied Science Publishers, London. 1978. pp. 1-88.
9. 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).
10. Putra, Oggie Prima Dita. Transformasi Austenite-Ferit Dengan Variasi Derajat Deformasi dan Pengaruhnya Pada Laju Korosi HSLA 0.029% Nb . Skripsi Program Sarjana FTUI. 2008
11. Shey, John A., Introduction to Manufacturing Processes, 2nd Edition, McGraw-Hill Book Company, New York. 1987.

12. Kalpakjian, Serope dan S. R. Schmid.. Manufacturing Processes for Engineering Materials 5th ed. Pearson Education : UK. 2008
13. Harris, John Noel.. Mechanical Working of Metals : Theory and Practice. Pergamon Press : UK. 1983.
14. Humphreys, F.J. and M. Hatherly, Recrystallization and Related Annealing Phenomena. Pergamon Press. 2004 .
15. ASM Handbook. Vol. 09, Metallography and Microstructure , (ASM International). 1991.
16. Tootten, Goerge E. Steel Heat Treatment. Taylor and Francis Group. 2006.
17. 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.
18. 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
19. . Yang, Zhongmin and Ruizhen WANG. Formation of Ultra-fine Grain Structure of Plain Low Carbon Steel through Deformation Induced Ferrite Transformation ISIJ International, Vol. 43. 2003. 761–766
20. Beladi, Hossein et al. The Effect of Multiple Deformations on the Formation of Ultrafine Grained Steel. METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A. VOLUME 38A. MARCH 2007.
21. Long Fei, Li, Yang Wang Yue and Sun Zuking, Dynamic Recrystallization of Ferrite in Low Carbon Steel. 2008
22. Weng, Yuqing. Ultra-Fine Grained Steels. Metallurgical Industry Press, 2009. Trans. Chaoxijing Gang--Gang de Zuzhi Xihua Lilun yu Kongzhi Jishu. 2003.
23. Nicholas, Joanne. What are TMCP (Thermo-Mechanically Controlled Processed) steels? Copyright © 2000, TWI Ltd.
24. S. Dobatkin, J. Zrnik, I. Mamuzic, Ultrafine-Grained Low Carbon Steels By Severe Plastic Deformation, METALURGIJA 47. 2008. 181-186

25. H. K. D. H. Bhadeshia.. Bainite In Steels: Transformations, Microstructure And Properties. Second Edition. IOM Communications Ltd. 2001.
26. G. H Akbari, C. M Sellars and J.A Whiteman. Microstrutural development During Warm Rolling of an IF Steel. Pergamon. Acta Mater. Acta Metallurgica. Vol 45, No 12. 1997. PP 5047-5058.
27. I.Kozasu. Constitution and Properties of Steels Ed. By F.B.Pickering, . Materials Science and Technology,vol.7 VCH . 1993.
28. Smallman R.E and R.J Bishop. Modern Physical Metallurgy and Materials Engineering. 6th ed. Butterworth-Heinemann. 1999.
29. Toroghinejad Mohammad R. et al. Effect of Rolling Temperature on the Deformation and Recrystallization Textures of Warm-Rolled Steels. METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A. VOLUME 34A. MAY 2003.
30. Bramfitt, Bruce L and Arlan O. Benschoter. Metallographer's Guide Practices and Procedures for Irons and Steels. ASM International.2002
31. ASM Handbook. Vol. 04, Heat Treating, (ASM International). 1991
32. Crains, R.L et al .Grain Growth in Dispersion Strengthened Superalloys by Moving Zone Heat Treatments. Metalurgical Transaction A. Vol 6A. January 1975.
33. ASTM E3. "Standard Guide for Preparation for Metallographic Specimens". 2003
34. ASTM E112. "Standard Test Method for Determining Average Grain Size. 2003
35. ASTM E18. "Standard Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials. 2003
36. Hosford, William F and Robbert M Caddel. METAL FORMING Mechanics and Metallurgy. Cambridge University Press. 2007
37. Eickemeyer, J. AGuth and B Holzapfel. Elongated Grains in Cube Textured Nickel Substrate Tapes and Flat Wires. IOP Publishing. 2008.

38. Zhiliang Ning, P. Cao, H. Wang, Jianfei Sun, Diankun Liu. Effect of Cooling Conditions on Grain Size of AZ91 Alloy. *J. Mater. Sci, Technol*, Vol. 23 No. 5. 2007.
39. Firmansyah, Deny. Studi Pengaruh Deformasi Multi-Pass Searah Pada Proses Canai Hangat 650 °C Dengan Pendinginan Air terhadap Struktur Mikro dan Kekerasan Baja API 5LX 42 PSL 2. Skripsi Program Sarjana FTUI. 2010.
40. ASTM E140 “Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness. 2003
41. Pramono, Andika Widya. Pengamatan dan Analisa Fenomena Kompetiisi Antara Proses Pemulihan Dinamis (Dynamic Recovery) dan Rekristalisasi Dinamis (Dynamic Recrystallization) pada Kawat Tembaga. *Semiloka Nasional Metalurgi*. 2003.





Lampiran 1. Hasil Pengujian Komposisi Baja Karbon Rendah API 5L X42

CHEMICAL ANALYSIS REPORT																				Date		Page		
Project : Laboratory Technician Title : Quality Record & Surveyor		PG. No. : 4 3 8 3 4 3 3		Pipe Size : B 20" x 9.5 mm		Specification : API 5 L-3 42M PSL-2		Test Frequency : 3 / BRAT		Date : 2 8 0 6 1 0 0		Page : 1 of 1		MM-1 : -		VAG-4 : -		ATM-8 : -		WTM-18 : -		KT-24 : -		
Item No.		Pipe Number		C	Mn	P	S	Cr	Ni	Al	Cu	Mo	Ni	Si	Ti	Ca	N	V	B	CE (EW)	CE (Pcm)	Element	Result	Remarks
				%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	Min (%)	Max (%)
1	82803 S	945	952	0.13	0.68	0.011	0.005	0.02	0.001	0.213	0.05	0.008	0.02	0.21	0.003	0.001	0.001	0.02	0.0005	0.26	0.18	V		
2	82804 S	946	974	0.13	0.67	0.011	0.004	0.02	0.001	0.214	0.05	0.008	0.02	0.21	0.003	0.001	0.001	0.02	0.0005	0.25	0.18	V		
3	82716 S	049	1041	0.16	0.64	0.007	0.003	0.01	0.001	0.046	0.03	0.007	0.02	0.18	0.004	0.001	0.001	0.01	0.0004	0.28	0.20	V		
4	82716 S	058	1063	0.16	0.64	0.007	0.003	0.01	0.001	0.046	0.03	0.007	0.02	0.18	0.004	0.001	0.001	0.01	0.0004	0.28	0.20	V		
5	82721 S	952	1107	0.15	0.75	0.007	0.007	0.16	0.001	0.037	0.04	0.007	0.02	0.21	0.003	0.001	0.001	0.01	0.0004	0.30	0.20	V		
6	82721 S	853	1327	0.14	0.74	0.006	0.006	0.16	0.001	0.038	0.04	0.007	0.02	0.21	0.003	0.001	0.001	0.01	0.0004	0.30	0.20	V		
7	82806 S	054	1171	0.13	0.65	0.007	0.003	0.01	0.001	0.238	0.04	0.007	0.02	0.21	0.003	0.001	0.001	0.01	0.0004	0.25	0.18	V		
8	82806 S	056	1193	0.14	0.65	0.007	0.003	0.01	0.001	0.239	0.04	0.007	0.02	0.21	0.003	0.001	0.001	0.01	0.0004	0.25	0.18	V		
9	82806 S	058	1738	0.14	0.74	0.006	0.002	0.02	0.001	0.052	0.07	0.007	0.02	0.23	0.004	0.001	0.001	0.01	0.0004	0.27	0.19	V		
10	82806 S	059	1756	0.14	0.74	0.006	0.002	0.02	0.001	0.052	0.07	0.007	0.02	0.23	0.004	0.001	0.001	0.01	0.0003	0.26	0.19	V		

CE (Pcm) = C+Mn/30+(Ni+Cu+Cr)/50+Ni/60+Mo/13+V/10+SR  
 CE (EW) = C+Mn/6+(Cr+Mo+V)/10+Ni/40/13  
 V : Accept  
 R : Reject

TEST/INSPECTION PERFORMED  
 MIP: 29/10/10 REV: 0  
 Date: 2/11/10

Prepared By: [Signature]  
 [Stamp]

Prepared By: [Signature]  
 [Stamp]

Form No. 12C-Revision 1

## Lampiran 2. Perhitungan Ukuran Butir.

No	Benda Uji	N1	N2	N3	Number Intercept	Perbesaran (M) X (kali)	PL	L <sub>3</sub>	G (ASTM) Grain Size No.	Diameter Besar Butir (μm)	Deviasi	Diameter Besar Butir Rata-Rata
1	Benda Uji A0 : Benda uji Awal (Bulk)- Tanpa Perlakuan	71	47	27	145	500	145	0.0069	11.06	7.75	0.11	7.65 ± 0.11
		74	46	29	149	500	149	0.0067	11.14	7.56		
		73	45	29	147	500	147	0.0068	11.1	7.66		
2	Benda Uji A1 : Reheating 700 °C, tahan 10 menit. Air cooling	48	31	18	97	500	97	0.0103	9.90	11.62	0.21	11.65 ± 0.21
		46	34	20	100	500	100	0.01	9.94	11.45		
		43	32	20	95	500	95	0.0105	9.84	11.87		
3	Benda Uji B : Reheating 700 °C, tahan 10 menit, deformasi 60%, air cooling	56	36	15	107	500	107	0.0093	10.18	10.55	0.29	10.47 ± 0.29
		55	37	18	110	500	110	0.0090	10.29	10.15		
		54	37	14	105	500	105	0.0095	10.13	10.73		

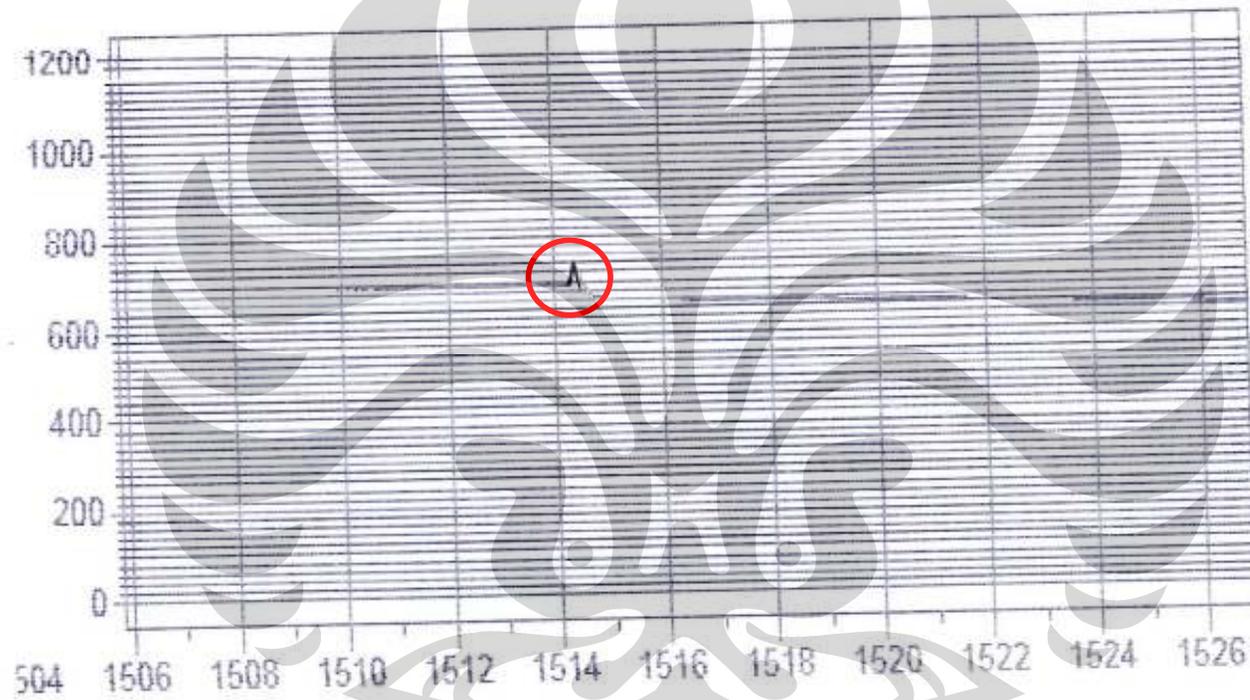
Lampiran 3. Tabel Diameter Ukuran Butir (ASTM E112)

Grain Size No. G	$\bar{N}_A$ Grains/Unit Area		$\bar{A}$ Average Grain Area		$\bar{d}$ Average Diameter		$\bar{\tau}$ Mean Intercept		$\bar{N}_L$
	No./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	No./mm
00	0.25	3.88	0.2581	258064	0.5080	508.0	0.4525	452.5	2.21
0	0.50	7.75	0.1290	129032	0.3592	359.2	0.3200	320.0	3.12
0.5	0.71	10.96	0.0912	91239	0.3021	302.1	0.2691	269.1	3.72
1.0	1.00	15.50	0.0645	64516	0.2540	254.0	0.2263	226.3	4.42
1.5	1.41	21.92	0.0456	45620	0.2136	213.6	0.1903	190.3	5.26
2.0	2.00	31.00	0.0323	32258	0.1796	179.6	0.1600	160.0	6.25
2.5	2.83	43.84	0.0228	22810	0.1510	151.0	0.1345	134.5	7.43
3.0	4.00	62.00	0.0161	16129	0.1270	127.0	0.1131	113.1	8.84
3.5	5.66	87.68	0.0114	11405	0.1068	106.8	0.0951	95.1	10.51
4.0	8.00	124.00	0.00806	8065	0.0898	89.8	0.0800	80.0	12.50
4.5	11.31	175.36	0.00570	5703	0.0755	75.5	0.0673	67.3	14.87
5.0	16.00	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	258.00	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 4. Tabel Konversi Nilai Kekerasan ASTM E140

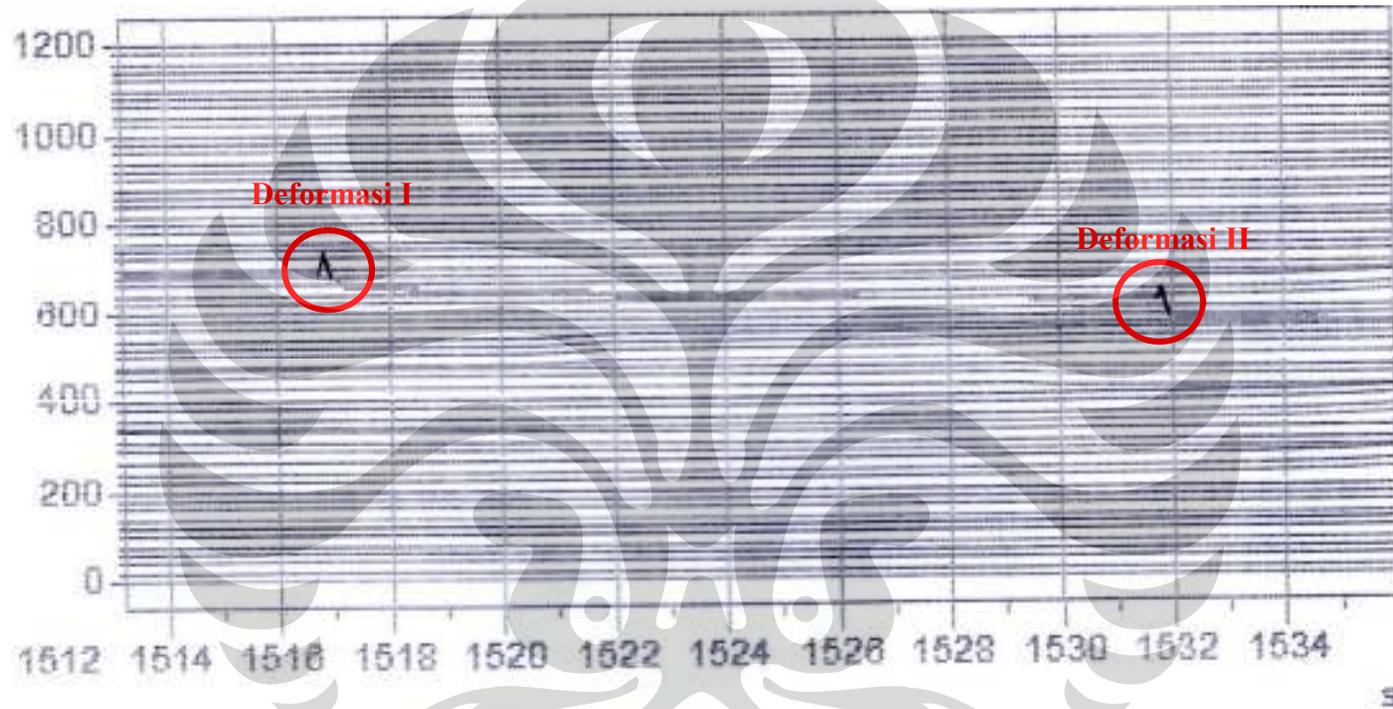
Rockwell B Hardness Number, 100-kgf (HRB)	Vickers Hardness Number (HV)	Brinell Hard- ness Number, 3000-kgf, (HBS)	Knoop Hard- ness Number, 500-gf, and Over (HK)	Rockwell A Hardness Number, 60-kgf, (HRA)	Rockwell F Hardness Number, 60-kgf, (HRF)	Rockwell Superficial Hardness Number			Rockwell B Hardness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

Lampiran 5. Grafik Akuisisi Temperatur Benda Uji B.



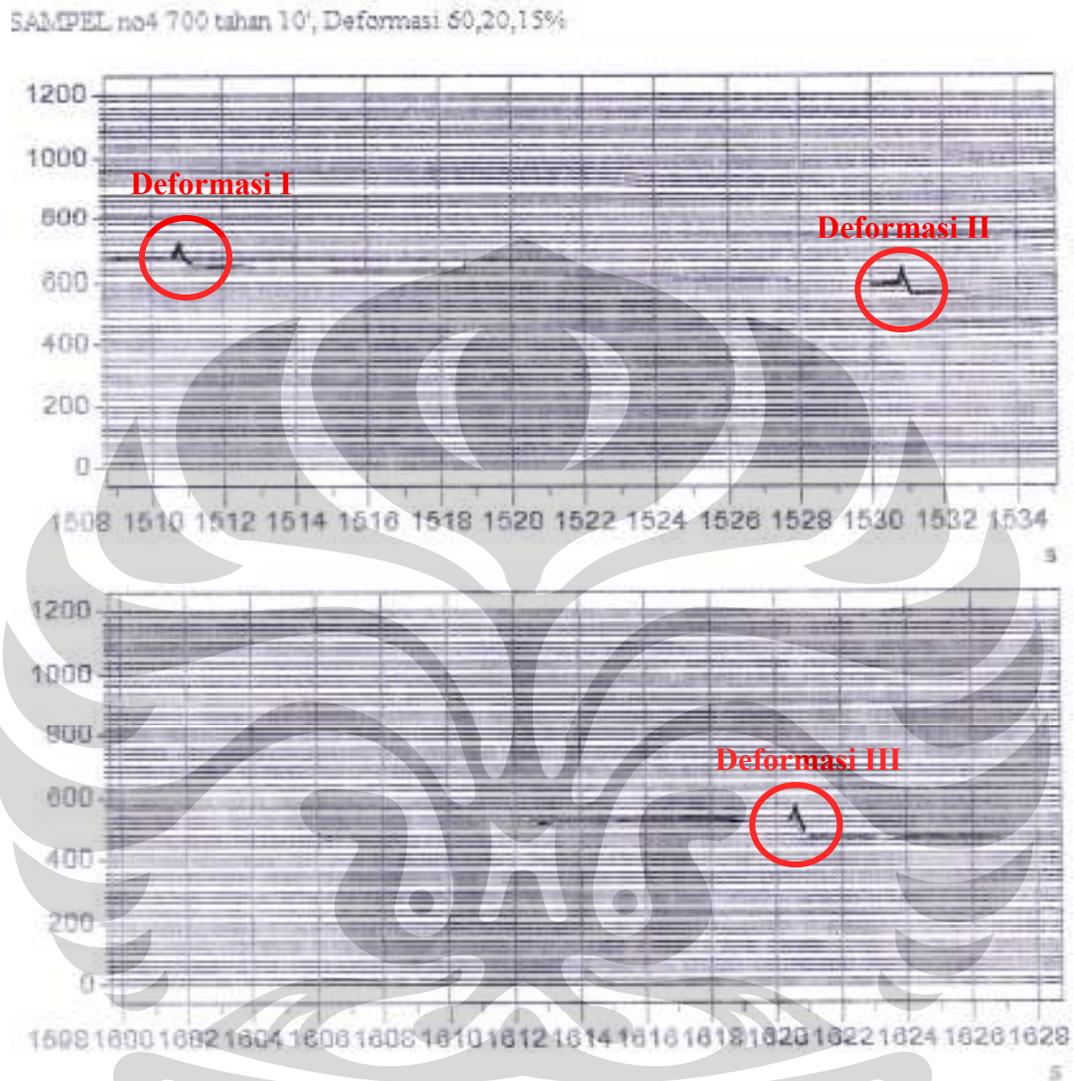
Tanda **O** merupakan indikasi terjadinya deformasi.

Lampiran 6. Grafik Akuisisi Temperatur Benda Uji C



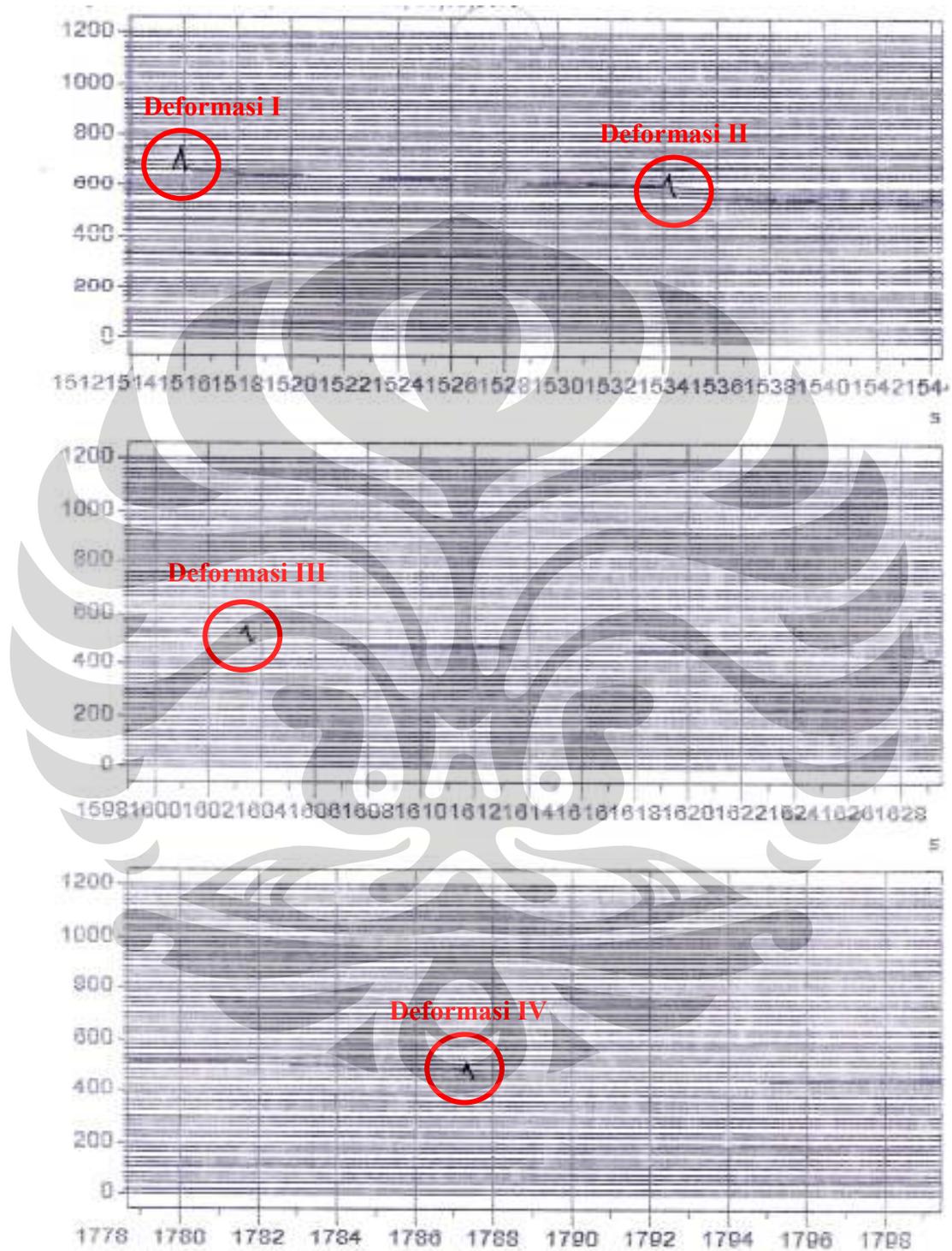
Tanda **O** merupakan indikasi terjadinya deformasi.

## Lampiran 7. Grafik Akuisisi Temperatur Benda Uji D



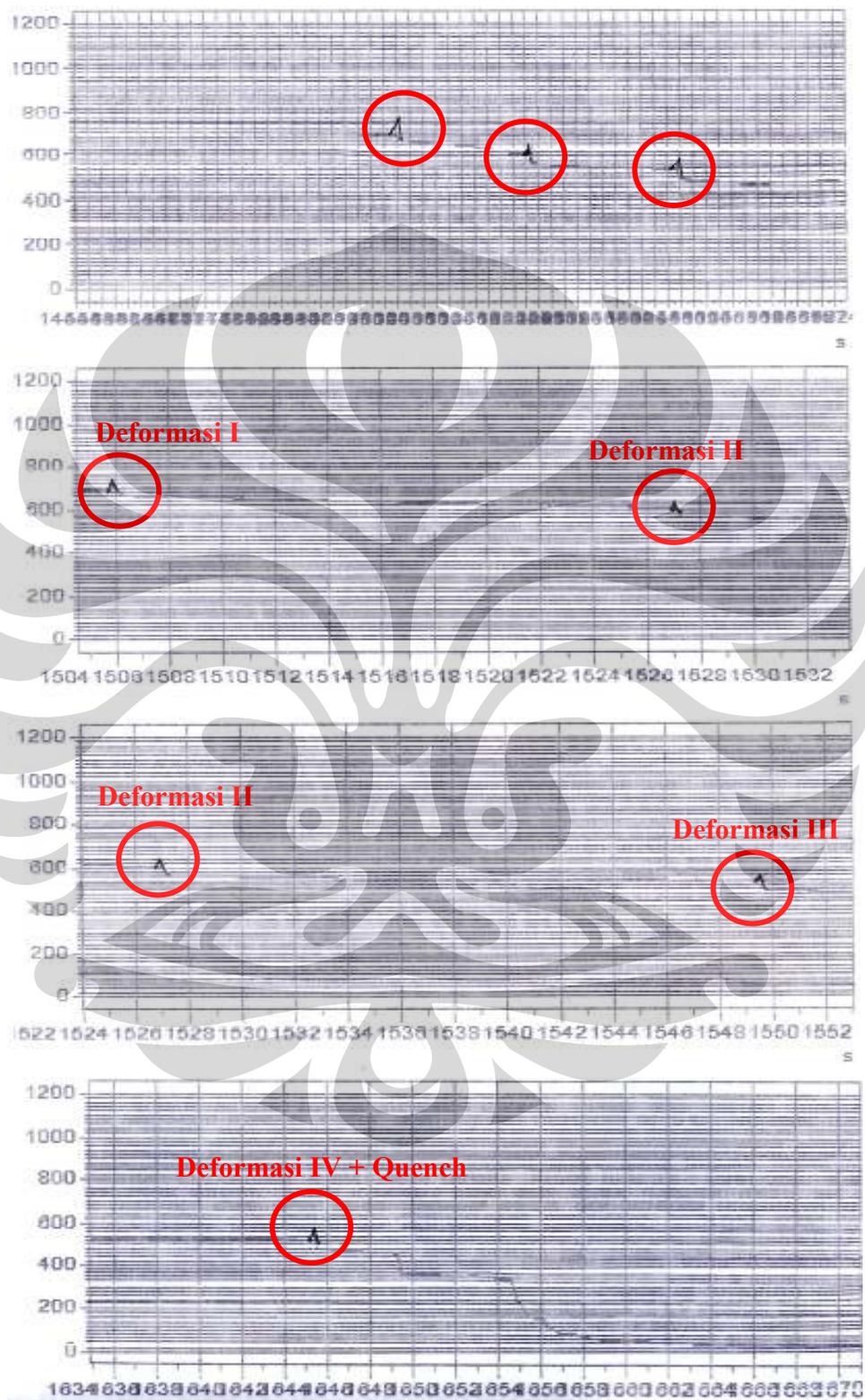
Tanda **O** merupakan indikasi terjadinya deformasi.

Lampiran 8. Grafik Akuisisi Temperatur Benda Uji E

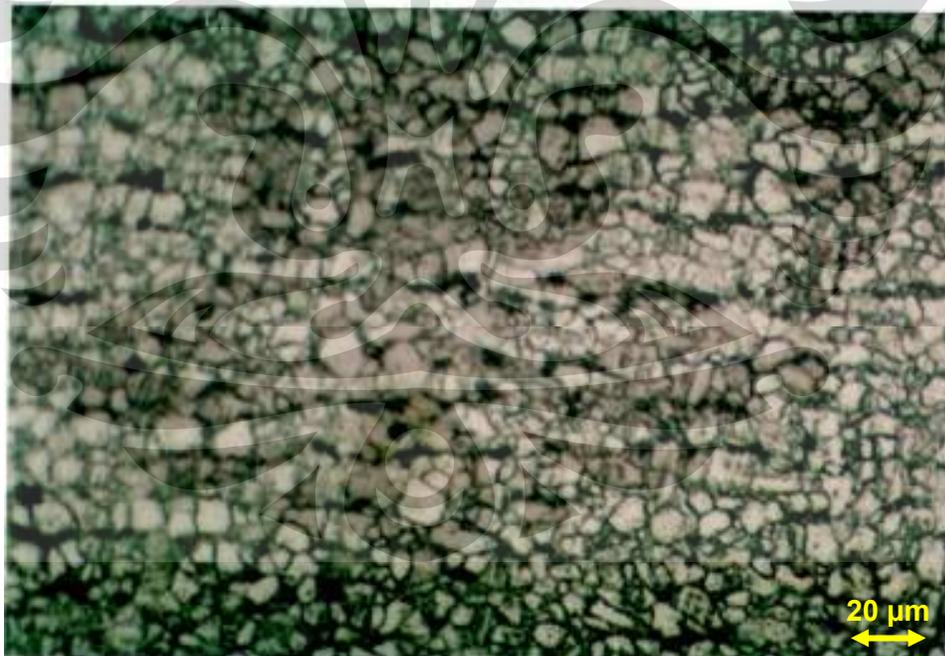


Tanda **O** merupakan indikasi terjadinya deformasi

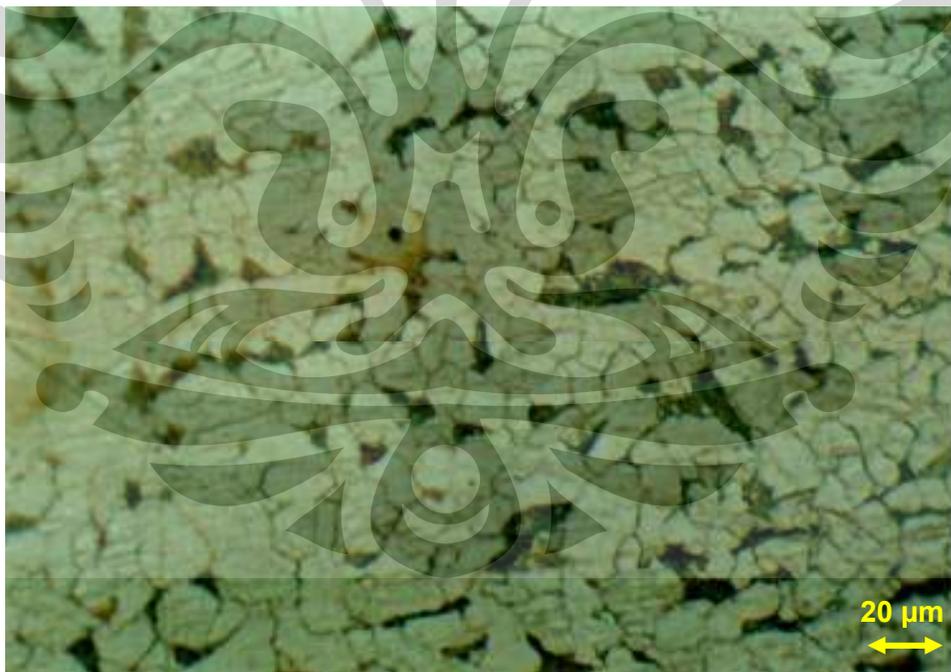
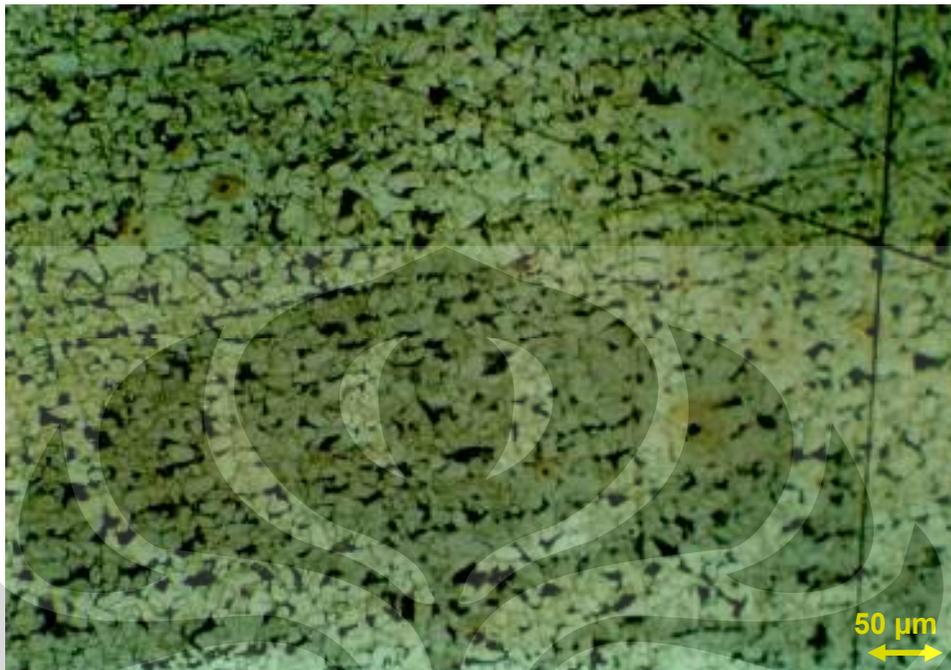
Lampiran 9. Grafik Akuisisi Temperatur Benda Uji F



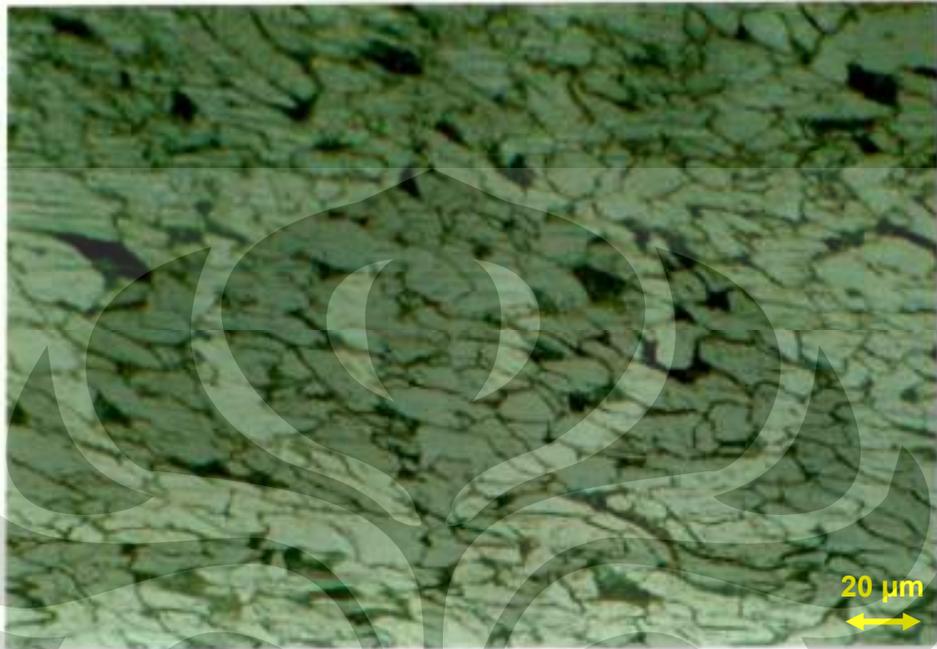
Lampiran 10. Foto Mikrostruktur Sampel A0.



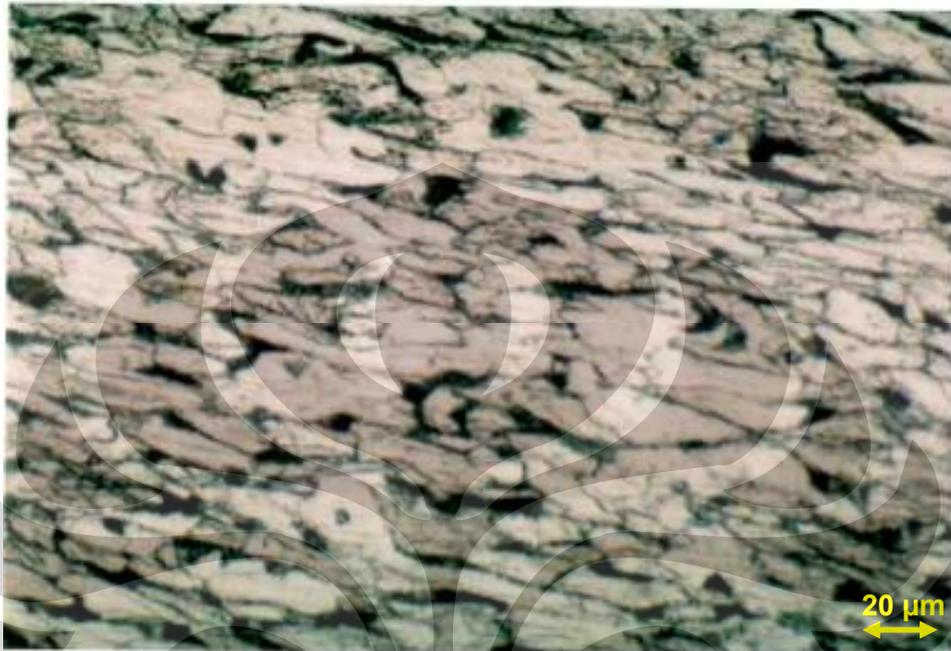
Lampiran 11. Foto Mikrostruktur Benda Uji A1



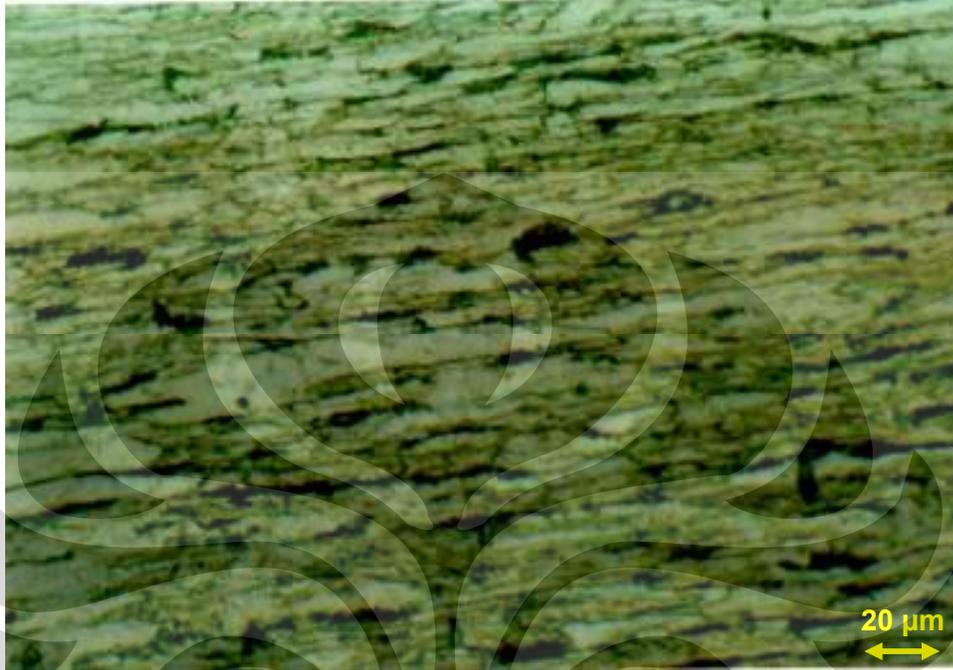
Lampiran 12. Foto Mikrostruktur Benda Uji B



Lampiran 13. Foto Mikrostruktur Benda Uji C



Lampiran 14. Foto Mikrostruktur Benda Uji D



Lampiran 15. Foto Mikrostruktur Benda Uji E



Lampiran 16. Foto Mikrostruktur Benda Uji F

