



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGAMATAN STRUKTUR MIKRO PADA BAJA KARBON
RENDAH SETELAH CANAI HANGAT**

SKRIPSI

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

**Jordan Suharto
0405040384**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
JUNI 2009**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Jordan Suharto
NPM : 0405040384

Tanda Tangan :
Tanggal : 26 Juni 2009

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Jordan Suharto
NPM : 0405040384
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi : Pengamatan Struktur Mikro Pada Baja Karbon Rendah Setelah Canai Hangat

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir Rini Riastuti M.Sc ()
Penguji 1 : Ir. Myrna Ariati Mochtar M.Si ()
Penguji 2 : Dr. Ir. Dedi Priadi, DEA ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 7 Juli 2009

KATA PENGANTAR

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

1. Ir. Rini Riastuti M.Sc dan Prof. Dr. Ir. Eddy S. Siradj, M.Eng selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini
2. Pihak PT. Danwo Steel Sejati, Bpk Ir. Darmayadi, yang telah banyak membantu dalam usaha memperoleh baik data maupun material uji yang saya perlukan;
3. Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral; dan
4. Keluarga besar DTMM yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 26 Juni 2009

Penulis

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Jordan Suharto
NPM : 0405040384
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Departemen : Teknik Metalurgi dan Material
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

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

PENGAMATAN STRUKTUR MIKRO PADA BAJA KARBON RENDAH SETELAH CANAI HANGAT

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, 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 : 26 Juni 2009

Yang menyatakan

(Jordan Suharto)

ABSTRAK

Nama : Jordan Suharto
Program Studi : Metalurgi dan Material
Judul : Pengamatan Struktur Mikro Pada Baja Karbon Rendah Setelah Canai Hangat

Penelitian terhadap proses penghalusan butir serta efisiensi energi pada produksi harus dilakukan pada masa kini. Oleh karena itu penelitian ini dilakukan untuk mengetahui mekanisme penghalusan butir pada baja karbon rendah dengan memperhitungkan faktor efisiensi. Penelitian ini akan membandingkan dua proses penghalusan butir *Thermo Mechanical Controlled Process* (TMCP) dan Pengerjaan Hangat (Warm Working). Kedua proses dilakukan dengan menggunakan mesin canai laboratorium. Dalam penelitian ini material yang digunakan yaitu baja SS 400, yang mana tergolong baja karbon rendah. Dengan memodifikasi temperatur akhir canai, pemanasan ulang dan metode deformasi yang dilakukan pada temperatur hangat, pada akhirnya akan menghasilkan besar butir akhir yang berbeda satu sama lain. Perhitungan besar butir menggunakan metode *jeffries* (ASTM E112). Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa kedua proses menghasilkan butir yang halus karena hampir seluruh proses mendapatkan diameter rata-rata butir $7.6 - 12.8 \mu\text{m}$. Namun tiap proses memiliki karakteristik tersendiri, khususnya pada penghalusan butir ferit

Kata kunci: Penghalusan Butir, TMCP, Pengerjaan Hangat, Besar Butir

ABSTRACT

Name : Jordan Suharto
Study Program : Metalurgi dan Material
Judul : Microstructure Investigation of Low Carbon Steel After Warm Rolling

The research of grain refinement process that followed by efficiency of energy on production process must be done in this age. Therefore, this research has done to know well the mechanism of grain refinement on low carbon steels with efficiency of energy as consideration. This research will compare two different process of grain refinement that are Thermo Mechanical Controlled Process (TMCP) and Warm Working. Both of process will be done by rolling laboratory. The material of research is SS 400 steel, which is rank to low carbon steels. With modification on final rolling temperature, reheating, and deformation method that will be done at warm temperature, as a result will produce many final grain size that different each other. Grain size will be measured by using Jeffries method (ASTM E112). As the final result, all of the process has showed that each process produced fine grain because the range of grain average diameters between 7.6 – 12.8 μm . Nonetheless, each process has theirs own characteristic, especially on ferrite grain refinement.

Keyword: Grain Refinement, TMCP, Warm Working, Grain Size

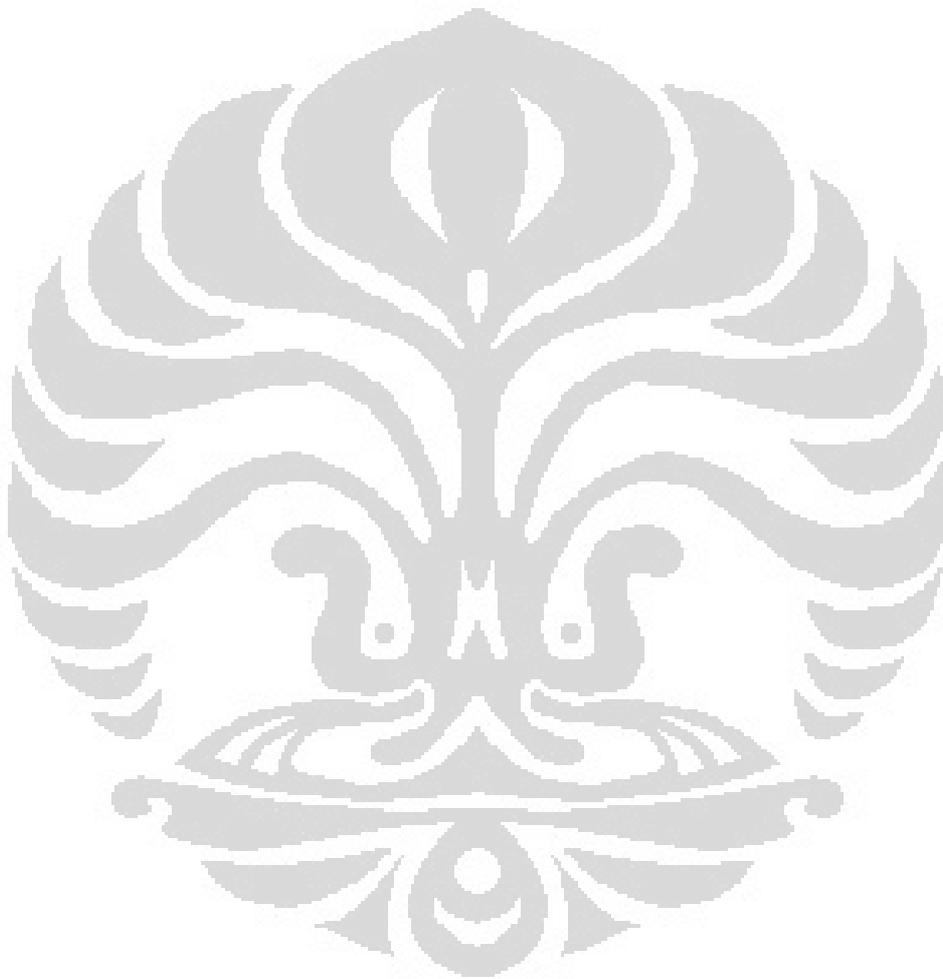
DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS.....	v
ABSTRAK.....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xv
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan Kajian.....	2
1.3 Ruang Lingkup Kajian.....	2
1.3.1 Material.....	2
1.3.2 Parameter Penelitian.....	2
1.4 Tempat Penelitian.....	3
1.5 Sistematika Penulisan.....	3

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Metalurgi Baja Karbon.....	5
2.1.1. Baja Karbon Rendah	5
2.2 Pengaruh Deformasi Plastis Terhadap Struktur Mikro	7
2.3 Pengaruh Besar Butir Terhadap Sifat Struktural Baja	8
2.4 Mekanisme Penguatan Dengan Penghalusan Butir.....	8
2.5 Recovery, Rekristalisasi, dan Pertumbuhan Butir.....	10
2.5.1 Recovery.....	11
2.5.2 Rekristalisasi	13
2.5.3. Pertumbuhan Butir	16
2.6 Thermo-Mechanical Controlled Process (TMCP)	16
2.7 Warm Working.....	20
2.8 Perhitungan Besar Butir	21
BAB 3 METODE PENELITIAN.....	24
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	24
3.2 Alat Dan Bahan	25
3.2.1 Alat	25
3.2.2 Bahan.....	25
3.3 Prosedur Penelitian.....	25
3.3.1 Pemilihan Material	25
3.3.2 Preparasi Sampel	26
3.3.3 Proses Termomekanikal (TMCP) dan <i>Warm Working</i>	27

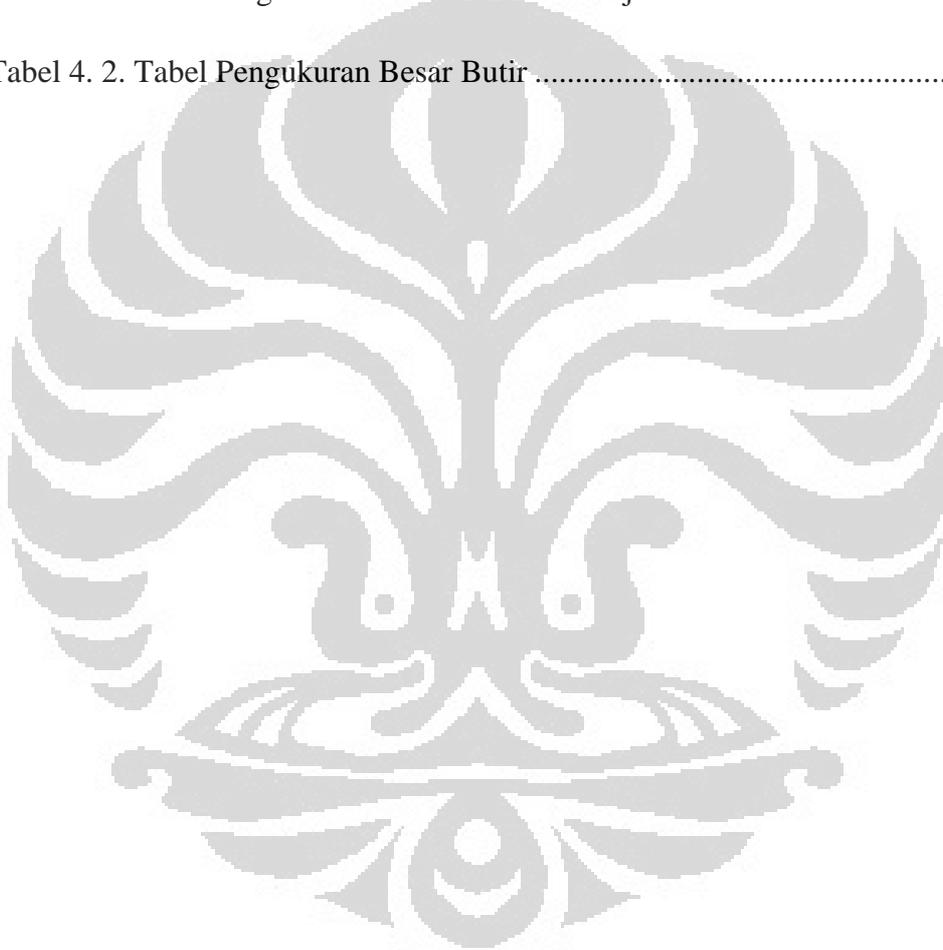
3.3.4	Preparasi, Pengujian dan Pengamatan Metalografi.....	33
BAB 4 HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN.....		35
4.1	Hasil Pengujian	35
4.1.1	Hasil Pengukuran Ketebalan Benda Uji.....	35
4.1.2	Hasil Penghitungan butir.....	36
4.2	Hasil Pengamatan Metalografi.....	37
4.2.1	Sampel Awal / Proses A.....	37
4.2.2	Pengaruh Temperatur Akhir Canai	38
4.2.2.1	Proses B.....	38
4.2.2.2	Proses C.....	39
4.2.3	Pengaruh Pemanasan Ulang / <i>Reheating</i>	40
4.2.3.1	Proses D.....	40
4.2.3.2	Proses E.....	41
4.2.4	Pengaruh Metode Deformasi.....	42
4.2.4.1	Proses F.....	42
4.2.4.2	Proses G.....	43
4.3	Pembahasan.....	44
4.3.1	Hubungan Temperatur Akhir Canai Terhadap Besar Butir ...	44
4.3.2	Hubungan Pemanasan / <i>reheating</i> Terhadap Besar Butir	45
4.3.3	Hubungan Metode Canai Terhadap Besar Butir	47
BAB 5 KESIMPULAN.....		49
5.1	Kesimpulan.....	49

DAFTAR REFERENSI.....	50
LAMPIRAN	52



DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1. Pengali <i>jefferies</i> yang digunakan dalam perhitungan besar butir	22
Tabel 3. 1. Komposisi Benda Uji	26
Tabel 4. 1 Tabel Pengukuran Ketebalan Benda Uji	35
Tabel 4. 2. Tabel Pengukuran Besar Butir	36



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Transformasi fasa pada Baja karbon	6
Gambar 2.2. Ilustrasi Batas Butir dan Pergerakan Dislokasi	9
Gambar 2. 3 . Pengaruh besar butir terhadap nilai kekuatan.....	10
Gambar 2. 4 . Skematis Proses Recovery, Rekristalisasi dan Pertumbuhan Butir.....	12
Gambar 2. 5 . Pembentukan Sub-butir	13
Gambar 2. 6 . Perbandingan Antara Rekristalisasi Dinamik dan Statik.....	15
Gambar 2. 7 . Perbandingan Besar Butir antara pengerolan konvensional (kiri) dan TMCP (kanan)	17
Gambar 2. 8 . Perbandingan antara jalur proses konvensional dan TMCP. Bagian garis 'Zig-zag' mengindikasikan proses rolling	18
Gambar 2. 9 . Evolusi struktur mikro selama proses TMCP.....	19
Gambar 2. 10 Perbedaan struktur mikro antara proses konvensional dan proses TMCP	20
Gambar 2. 11 . Ilustrasi perhitungan butir menggunakan metode planimetri.[11].....	22
Gambar 3. 1. Ilustrasi benda uji dan pemasangan termokopel.....	26
Gambar 3. 2. Diagram proses B	28
Gambar 3. 3 Diagram proses C	29
Gambar 3. 4. Diagram proses D	30

Gambar 3. 5. Diagram proses E	31
Gambar 3. 6. Diagram proses F.....	32
Gambar 3. 7. Diagram proses G	33
Gambar 4. 1 Foto struktur mikro ferit baja karbon rendah tanpa perlakuan, etsa Nital 2%. (atas) perbesaran 500 x ,(bawah) perbesaran 100 x	37
Gambar 4. 2. Foto struktur mikro ferit baja karbon rendah perlakuan proses B, etsa Nital 2%. (a) perbesaran 500 x ,(b) perbesaran 100 x	38
Gambar 4. 3. Foto struktur mikro ferit baja karbon rendah perlakuan proses C, etsa Nital 2%. (a) perbesaran 500 x ; (b) perbesaran 100 x.....	39
Gambar 4. 4. Foto struktur mikro ferit baja karbon rendah perlakuan proses D, etsa Nital 2%. (a) perbesaran 500 x ; (b) perbesaran 100 x.....	40
Gambar 4. 5. Foto struktur mikro ferit baja karbon rendah perlakuan proses E, etsa Nital 2%. (a) perbesaran 500 x ; (b) perbesaran 100 x.....	41
Gambar 4. 6. Foto struktur mikro ferit baja karbon rendah perlakuan proses F, etsa Nital 2%. (a) perbesaran 500 x ,(b) perbesaran 100 x.....	42
Gambar 4. 7. Foto struktur mikro ferit baja karbon rendah perlakuan proses G, etsa Nital 2%. (a) perbesaran 500 x ; (b) perbesaran 100 x.....	43
Gambar 4. 8. Grafik Diameter Rata-Rata Butir (A) sampel awal; (B) proses B; dan (C) proses C.....	44
Gambar 4. 9. Diameter Rata-Rata Butir (A) sampel awal; (D) proses D; dan (E) proses E	45
Gambar 4. 10. Diameter Rata-Rata Butir (A) sampel awal; (F) proses F; dan (G) proses G	47

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN 1. Proses B56
LAMPIRAN 2. Proses C57
LAMPIRAN 3. Proses D58
LAMPIRAN 4. Proses E59
LAMPIRAN 5. Proses F60
LAMPIRAN 6. Proses G61
LAMPIRAN 7. Sertifikat Pabrik / <i>Mill Certificate</i>62
LAMPIRAN 8. Hasil Spektrografi63

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Permasalahan yang sering terjadi pada baja yang diaplikasikan pada industri adalah terjadinya kerusakan yang berupa retakan sepanjang pipa karena kurang memadainya sifat mekanik yang dimiliki material tersebut. Perkembangan teknologi terhadap dunia industri kini telah membawa perubahan yang sangat besar dalam penggunaan atau pemilihan material, khususnya material baja. Bersamaan dengan perkembangan tersebut maka akan terjadi peningkatan kebutuhan terhadap baja yang memiliki karakteristik dan sifat yang sesuai dengan kondisi kerja pada saat diaplikasikan. Selain itu, faktor efisiensi energi pun kini menjadi bagian dari perkembangan. Karena perkembangan teknologi kini bukan hanya sekedar kebutuhan teknis saja tetapi juga ekonomis. Mengingat dengan keadaan industri manufaktur baja Indonesia, yang saat ini masih menggunakan teknologi lama dan ketersediaan bahan baku yang masih minim, perlu dilakukan perkembangan dalam penelitian agar dengan menggunakan alat yang ada dan bahan baku yang tersedia dapat diproduksi baja yang sesuai dengan permintaan saat ini.

Penggunaan Baja Karbon Rendah ($\%wtC < 0,3 \%$) masih mendominasi pada dunia industri terutama industri pipa. Karena memiliki nilai ekonomis yang tinggi dibanding baja lainnya. Biasanya penggunaan baja ini dalam bentuk hasil pengerolan, teranilisasi atau kondisi normalisasi. Sifat mekanik dari baja ini bergantung pada mikrostrukturnya. Struktur ferrite-pearlite merupakan struktur yang sering dijumpai pada baja karbon rendah. Kekuatan atau sifat mekanik dari struktur ferrite-pearlite ini dipengaruhi besar butir ferit[1]. Beberapa metode yang digunakan industri untuk memperhalus struktur butir ferit-pearlit ini, yaitu: modifikasi komposisi kimia, normalizing, deformasi plastis melalui pengerolan terkendali, pendinginan cepat, dan pengerjaan hangat / *warm working*.

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

Berdasarkan pemaparan diatas maka penelitian ini akan membahas studi mekanisme evolusi struktur mikro butir ferrite dalam baja karbon rendah (Low Carbon Steels).

1.2 Tujuan Kajian

Tujuan dari kajian ini adalah untuk :

1. Mengamati pengaruh temperatur akhir canai / *finishing temperature roll* terhadap evolusi struktur mikro sesudah proses TMCP dan *Warm Working*.
2. Mengamati pengaruh pemanasan ulang / *reheating* terhadap evolusi struktur mikro sesudah proses TMCP dan *Warm Working*.
3. Mengamati pengaruh antara deformasi tunggal dan deformasi berulang terhadap evolusi struktur mikro sesudah proses TMCP dan *Warm Working*.

1.3 Ruang Lingkup Kajian

1.3.1 Material

Penelitian menggunakan pelat SS 400 dengan komposisi C 0.163%; Mn 0.644%; Si 0.189%; Al 0.035%; P 0.011% dan S 0.002%.

1.3.2 Parameter Penelitian

Parameter yang divariabelkan

- Temperatur Akhir Canai

Temperatur akhir canai dibagi menjadi dua yaitu pada temperatur 900°C dan 650°C

- Pemanasan Ulang

Proses pemanasan dibagi menjadi dua yaitu pemanasan ulang hingga 650 °C kemudian dideformasi secara bolak-balik (proses I) dan pemanasan ulang hingga 1150 °C, didinginkan, dipanaskan lagi hingga 650 °C lalu dideformasi secara bolak-balik.

- Metode Deformasi

Deformasi dilakukan dengan dua metode yaitu metode searah (single pass roll) dan metode bolak-balik (reversible).

1.4 Tempat Penelitian

Penelitian terhadap proses TMCP dan pengerjaan hangat dilakukan di Laboratorium Metalurgi Mekanik Departemen Metalurgi dan Material. Sedangkan preparasi sampel untuk pengamatan struktur mikro dilakukan di Laboratorium Metalografi dan HST Departemen Metalurgi dan Material.

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

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

Bab 2 Dasar Teori

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

Bab 3 Metodologi Penelitian

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

Bab 4 Hasil Pengujian dan Analisis

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

Bab 5 Kesimpulan

Membahas mengenai kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Metalurgi Baja Karbon

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

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

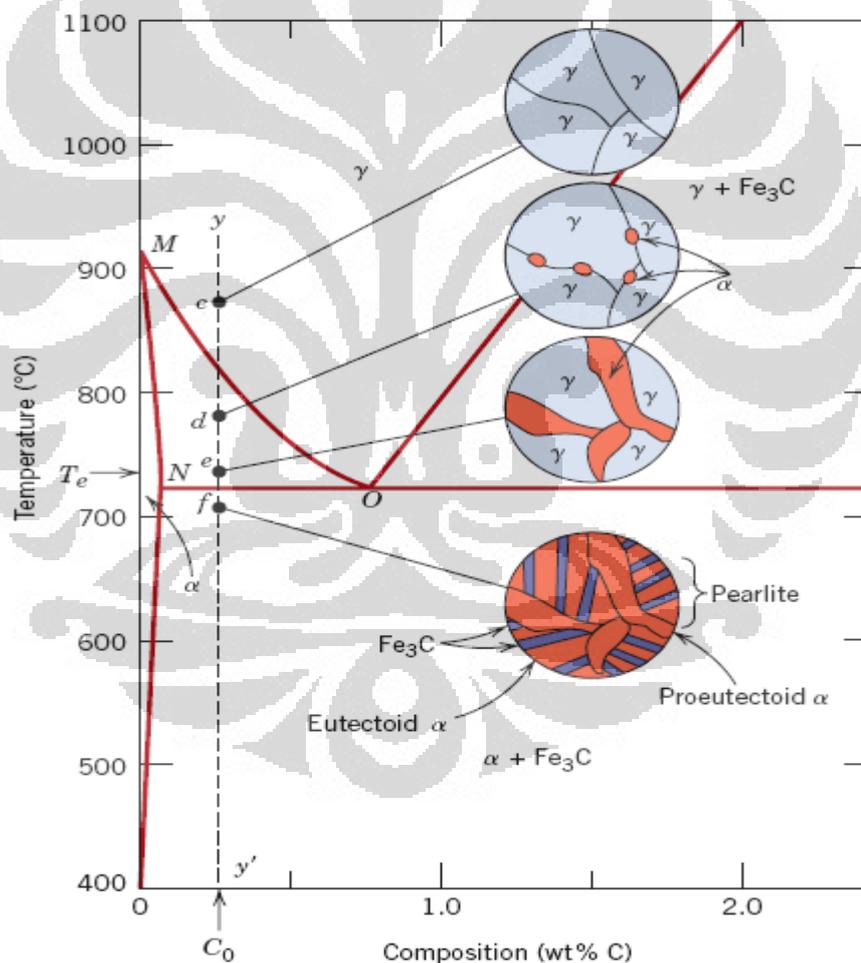
2.1.1. Baja Karbon Rendah

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

Kadar karbon untuk baja yang baik kemampubentukannya (high-formability) sangatlah rendah, kurang dari 0.10% C, dengan kadar manganese max. hingga 0.4% Mn. Penggunaannya digunakan pada *automobile body panels*, *tin plate*, dan produk kawat/ *wire*.

Untuk produk baja struktural, kadar karbon ditingkatkan hingga kira-kira 0.30%, dengan kadar manganese yang lebih besar hingga 1.5%. Material ini dapat digunakan untuk *stampings*, *forgings*, *seamless tubes*, dan *boiler plate*.

Skematik perubahan fasa pada baja karbon rendah dapat dilihat pada Gambar 2.1



Gambar 2. 1 Transformasi fasa pada Baja karbon

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

2.2 Pengaruh Deformasi Plastis Terhadap Struktur Mikro

Deformasi plastis sering diklasifikasikan sebagai perlakuan yang selalu dilakukan pada pengerjaan panas atau pengerjaan dingin terhadap logam. Yang membedakan diantara keduanya adalah pada pengerjaan dingin proses deformasi plastis tidak diikuti proses rekristalisasi. Sedangkan pada pengerjaan panas terjadi proses rekristalisasi yang berlangsung secara bersamaan dengan proses deformasi. Deformasi plastis merupakan hasil dari pergerakan dari salah satu Kristal yang disebut dislokasi (ASM 1973). Pada logam yang dideformasi plastis terdapat sejumlah dislokasi yang terjadi pada kristal-kristalnya. Kepadatan dislokasi dapat seragam atau memiliki nilai yang jauh berbeda dari satu titik ke titik yang lain. Kevariasian dislokasi memberikan peningkatan terhadap kevariasian *large-scale deformations*, termasuk *slip* dan *twinning*. Bidang kristalografi dimana garis dislokasi melintang dikenal dengan bidang *slip*. Garis-garis slip nampak seperti jejak pada bidang *slip*, yang mana dapat dilihat pada permukaan baja (ASM 1973). Garis *slip* menandakan terjadi transfer material pada sisi-sisi yang berlawanan terhadap bidang *slip*. *Planer slip* menunjukkan garis *slip* berbentuk lurus (*straight*), sedangkan *wavy slip* menunjukkan garis slip berbentuk secara tak beraturan. Garis *wavy slip* mengindikasikan rangkaian pemutusan mikroskopik pada dua atau lebih bidang *intersecting slip* seperti yang disebabkan oleh penyimpangan *cross slip* pada *screw dislocation*.

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

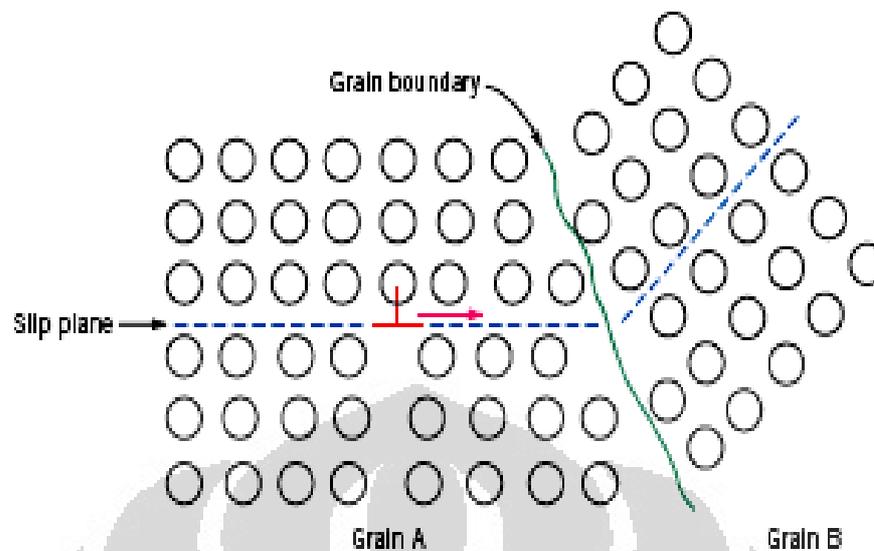
2.3 Pengaruh Besar Butir Terhadap Sifat Struktural Baja

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

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

2.4 Mekanisme Penguatan Dengan Penghalusan Butir

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



Gambar 2.2. Ilustrasi Batas Butir dan Pergerakan Dislokasi

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

Batas butir bertindak sebagai penghalang pergerakan dislokasi karena dua alasan:

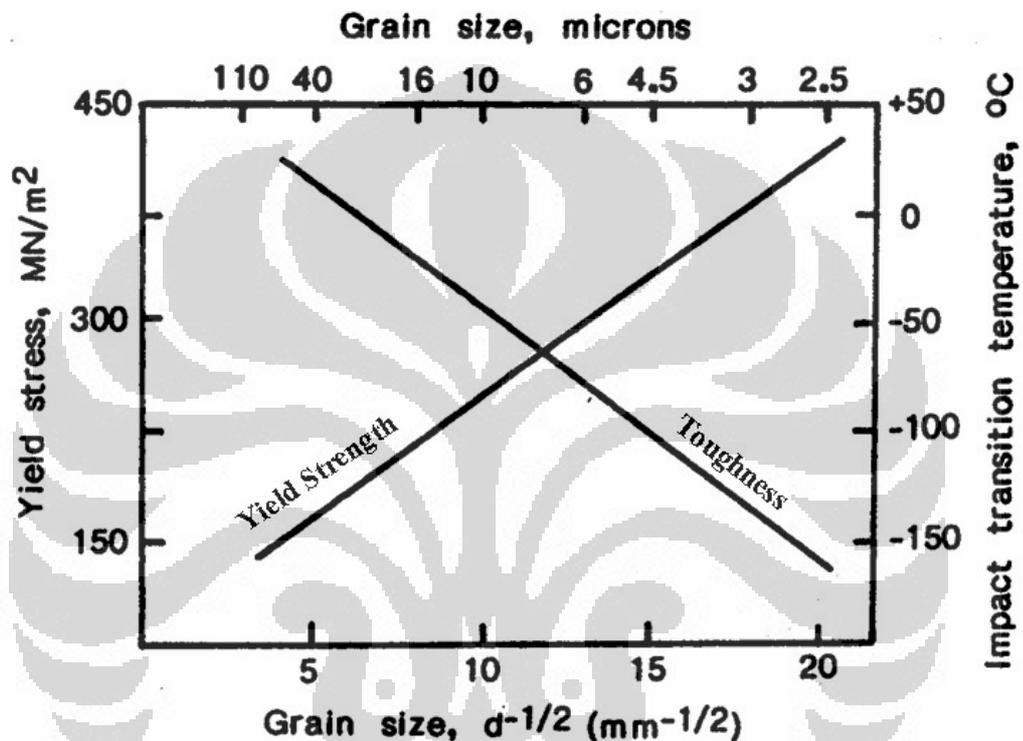
1. Ketidaksamaan *arrangement* atom dalam area batas butir akan menghasilkan berubahnya slip plane dari butir satu ke butir lainnya.
2. Karena dua butir tersebut memiliki orientasi yang berbeda, dislokasi yang menuju butir B harus merubah arah pergerakannya (karena perbedaan orientasi tersebut mengakibatkan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

Untuk mengetahui pengaruh ukuran butir dari teori diatas kita buktikan dengan *Hall patch Equation*. dengan d adalah diameter butir rata – rata, dan σ_0 dan k_y adalah konstanta untuk material tertentu. Persamaan 2.1. ini tidak berlaku untuk material polikristal dengan butir yang sangat besar dan dengan butir yang amat sangat halus.

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

Persamaan 2.1 Hall-Petch Equation

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



Gambar 2.3 . Pengaruh besar butir terhadap nilai kekuatan

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

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

2.5 Recovery, Rekristalisasi, dan Pertumbuhan Butir

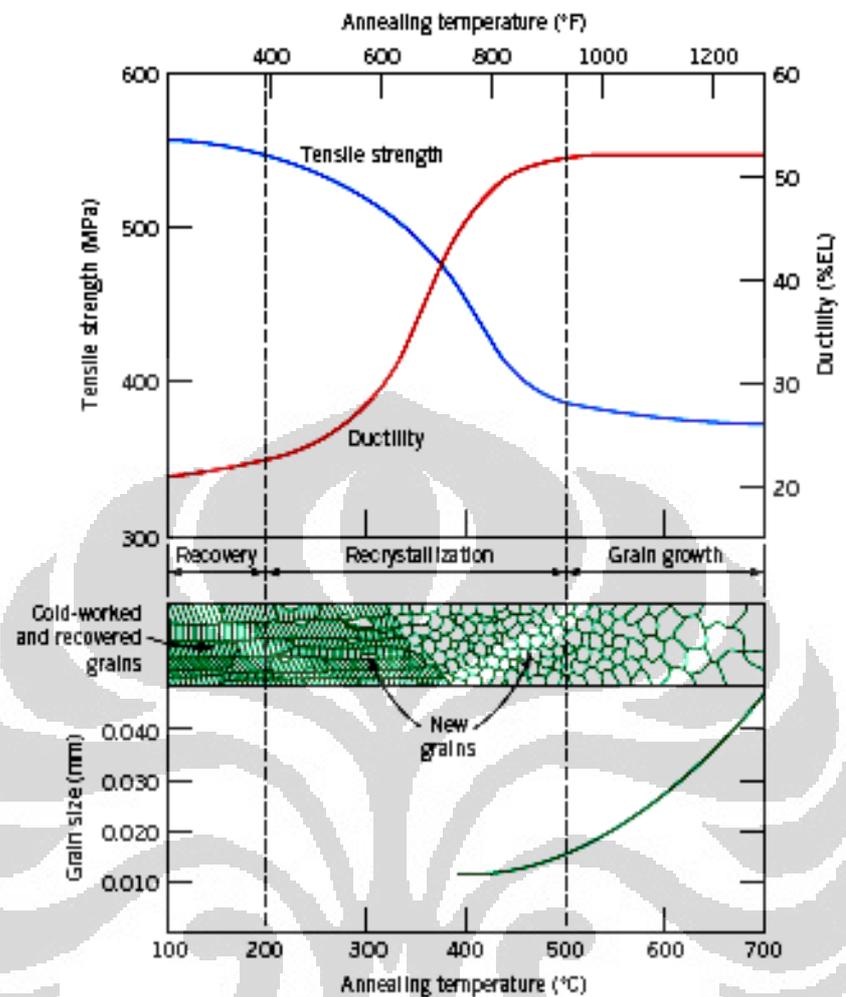
Material polikristalin yang mengalami deformasi plastis menunjukkan terjadinya perubahan pada bentuk butir, pengerasan regangan (strain hardening)

dan peningkatan pada kepadatan dislokasi (Callister 1997). Beberapa sisa energi internal disimpan dalam material sebagai energi regangan (strain energy), yang mana berhubungan dengan area tegangan (tensile), tekan (compressive), dan geser (shear) disekeliling dislokasi yang baru terbentuk. Kecenderungan sifat penyimpanan energi internal tersebut dapat dihilangkan setelah tahap pengerjaan dingin dengan perlakuan panas seperti proses anil (annealing). Penghilangan energi tersebut dilakukan dengan dua proses berbeda yang terjadi pada temperatur yang dinaikkan yang kemudian diidentifikasi sebagai proses rekoveri dan rekristalisasi, yang juga dimungkinkan untuk pertumbuhan butir.

2.5.1 Recovery

Rekoveri adalah proses penghilangan energi internal (internal strain energy) yang tersimpan yang diperoleh selama proses pengerjaan dingin melalui perlakuan panas (heat treatment). Selama proses ini, sifat fisik dan mekanik dari baja pengerjaan dingin akan kembali seperti sebelum dilakukan pengerjaan dingin (ASM 1973).

Proses rekoveri adalah proses pertama yang terjadi setelah deformasi. Pada tahapan ini tidak ada perubahan yang cukup berarti pada sifat mekanis dari material seperti yang terlihat pada Gambar 2.3

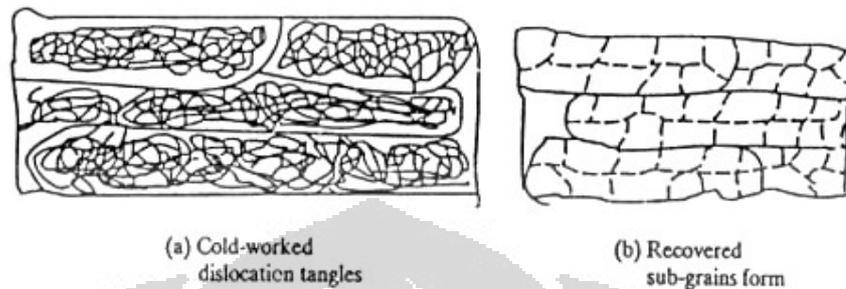


Gambar 2. 4 . Skematis Proses Recovery, Rekristalisasi dan Pertumbuhan Butir

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

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

dengan pembentukan sub-butir, yaitu butir dengan batas butir bersudut kecil. ($2-3^{\circ}$ misorientasi). Dari kedua efek yang dijelaskan tersebut didapat kekuatan material yang sama setelah dilakukan pengerjaan dingin.



Gambar 2. 5 . Pembentukan Sub-butir

William C. Leslie, *The Physical Metallurgy of Steel*, (Michigan : McGraw Hill Company, 1982)

Laju rekoveri adalah proses yang dipengaruhi yang teraktifasi melalui panas yang mana akan menurun dengan penambahan waktu dan penurunan temperatur (Bryne 1965).

Temperatur *grain recovery* (TGR) memiliki korelasi dengan temperatur rekristalisasi (TR) dan temperatur lebur (TM) dari material yang sama. Untuk memperjelas korelasi tersebut dapat dilihat melalui persamaan 2.2 (Totten and Howes 1997).

$$TGR = TR - 300 = 0.4TM - 300 [^{\circ}C]$$

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

2.5.2 Rekristalisasi

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

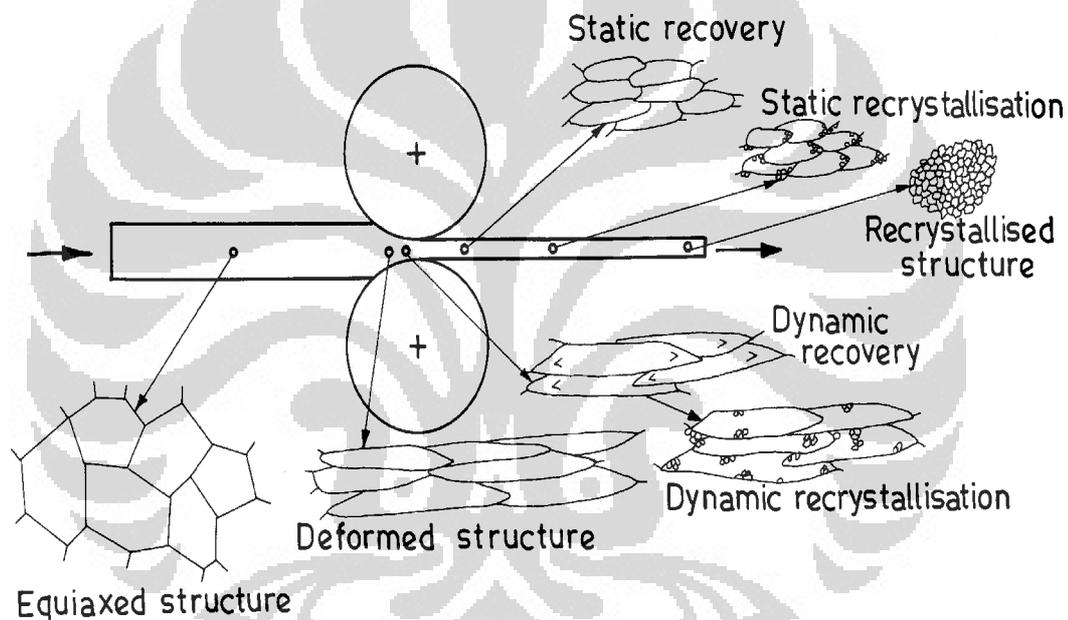
pertumbuhan butir. Inti dari butir baru terjadi dari bergabungnya sub-butir dan permukaan untuk nukleasi heterogen adalah cacat mikrostruktur seperti permukaan baats butir dan inklusi. Butir yang baru tumbuh merupakan butir yang bebas regangan (strain-free) dan terikat dengan batas butir bersudut besar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

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

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

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

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



Gambar 2. 6 . Perbandingan Antara Rekristalisasi Dinamik dan Statik

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

Pada rekristalisasi dinamis, saat material mengalami deformasi, terjadi regangan di dalam material, dan apabila regangan tersebut adalah regangan kritis (ϵ_0) maka akan tersedia cukup energi untuk terbentuk nuklei pada batas butir yang terdeformasi. Proses ini dipengaruhi faktor – faktor antara lain regangan, kecepatan regangan dan temperatur, seperti yang telah diteliti oleh Zener-Hollomon.

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

2.5.3. Pertumbuhan Butir

Setelah proses rekristalisasi selesai, butir dengan bebas regangan selanjutnya akan tumbuh jika spesimen baja dibiarkan pada temperatur yang tinggi. Pertumbuhan butir ditunjukkan sebagai peningkatan besar butir rata-rata pada material polikristalin. Pertumbuhan butir biasanya merupakan lanjutan setelah proses rekoveri (recovery) dan proses rekristalisasi (recrystallization). Hal ini terjadi disebabkan adanya migrasi pada batas butir. Tidak semua butir dapat membesar. Oleh karena itu, butir yang lebih besar akan tumbuh yang kemudian menghabiskan butir yang lebih kecil (Callister 1997). Penambahan proses anil (extended annealing) pada temperature tinggi dapat menyebabkan beberapa butir tumbuh menjadi butir dengan ukuran yang sangat besar, yang mana dikenal sebagai rekristalisasi sekunder (secondary recrystallization) atau pertumbuhan butir yang abnormal (ASM 1973).

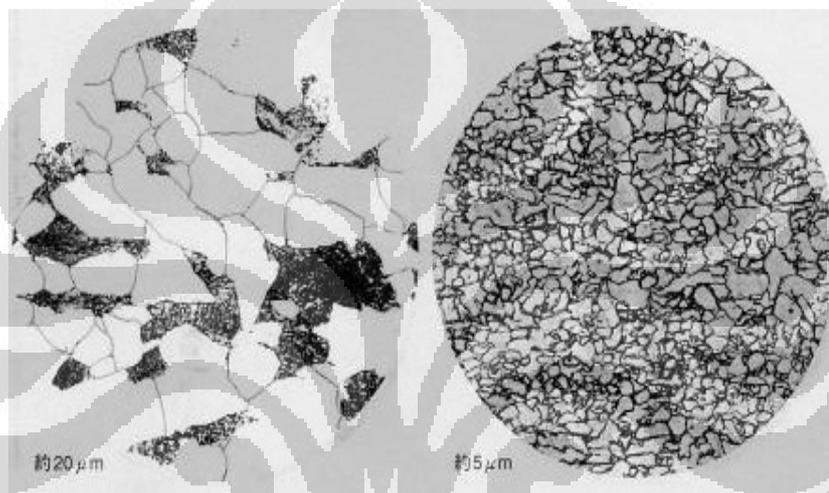
2.6 Thermo-Mechanical Controlled Process (TMCP)

Pada masa yang lalu, pengerolan pada canai panas/hot rolling digunakan hanya untuk mendapatkan dimensi nominal saja seperti ketebalan, lebar dan panjang. Karena persyaratan kualitas yang tinggi, perlakuan panas seperti normalizing atau Quench and Tempering perlu dilakukan sebagai proses lanjutannya. Kini dengan persyaratan kualitas yang lebih tinggi lagi, proses baru untuk plate rolling telah ditemukan. Proses itu adalah TMCP [3].

Thermomechanical Controlled Process (TMCP) dapat dikarakteristikan sebagai proses yang melibatkan panas / heat dan deformasi. TMCP adalah sebuah teknik perlakuan logam yang didesain untuk meningkatkan kekuatan sekaligus ketangguhan. Peningkatan kekuatan dan ketangguhan dalam TMCP didapat dari

adanya mekanisme pengecilan butir dengan proses deformasi panas yang terkontrol (*controlled rolling*).

TMCP merupakan istilah kolektif pada beberapa proses yang berbeda untuk menghasilkan baja dengan butir halus yang memiliki nilai kekuatan tinggi, ketangguhan yang baik dan kemampuan yang sempurna [4]. Pada baja TMCP, sifat mekanis (*mechanical properties*) terutama ditentukan melalui kombinasi dari perlakuan mekanis (*mechanical working*), proses rekoveri (*recovery processes*), rekristalisasi (*recrystallisation*), dan pertumbuhan butir (*grain growth*) [5].

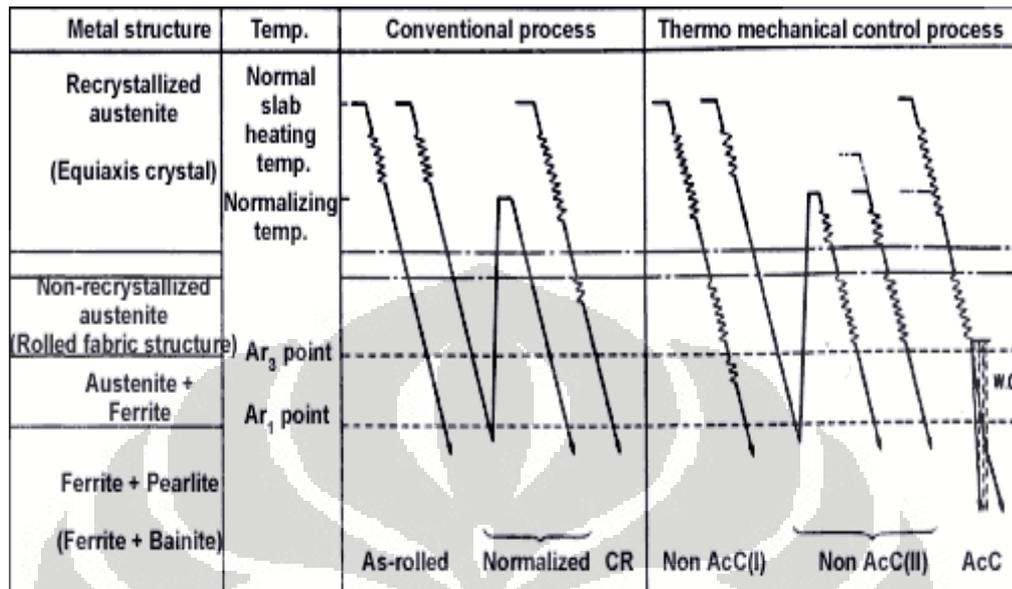


Gambar 2.7 . Perbandingan Besar Butir antara pengerolan konvensional (kiri) dan TMCP (kanan)

Yokota, Tomoyuki. "Ferrite grain size refinement through $\gamma \rightarrow \alpha$ transformation". NKK Corp. (JFE group)

Mekanisme penghalusan butir dalam pengerolan terkendali (*controlled rolling*) adalah rekristalisasi pada austenit selama deformasi panas. Proses ini dipengaruhi oleh komposisi paduan, temperatur pengerolan, dan derajat deformasi yang berlangsung selama pengerolan. Bila austenit tidak memiliki partikel fasa kedua maka dihasilkan pertumbuhan butir yang nyata sehingga mekanisme penghalusan butir menjadi terbatas.

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

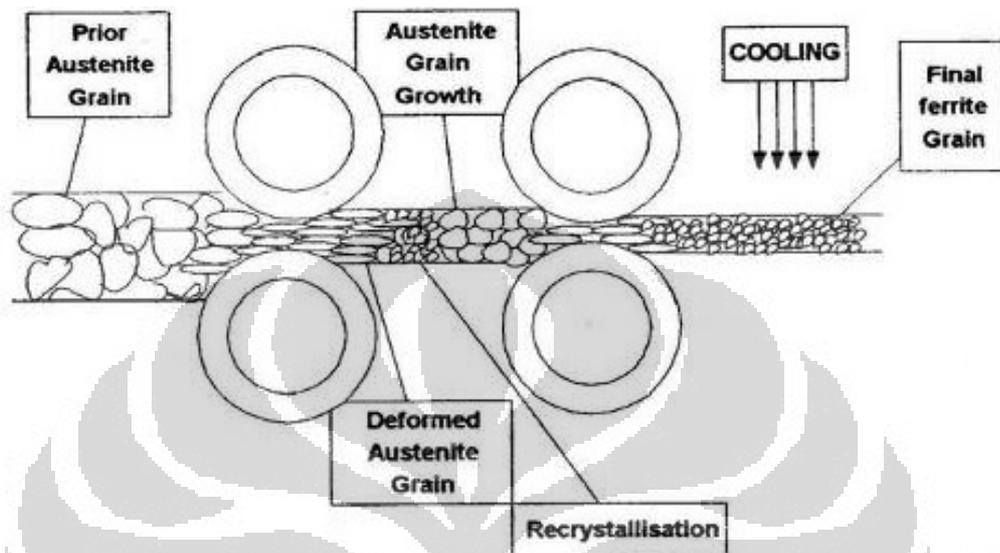


Gambar 2. 8 . Perbandingan antara jalur proses conventional dan TMCP. Bagian garis 'Zig-zag' mengindikasikan proses rolling.

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

Jalur proses TMCP, pada bagian awal (rough steel section), seperti slab, dipanaskan hingga temperatur yang digunakan pada pengerjaan panas yaitu sekitar 1200°C . Kemudian diikuti reduksi / *hot work deformation* yang dilakukan pada temperatur yang lebih rendah. Deformasi plastis pada temperatur lebih rendah menghasilkan ukuran butir yang halus (fine grain sizes) dan menghambat terjadinya presipitasi. Selanjutnya masuk proses pendinginan. Pendinginan tersebut yang mengarahkan baja pada kisaran temperatur transisi, dan hasil transformasi austenit ke ferrit menghasilkan butir ferrit halus (fine ferrite grains) dan penyebaran presipitat yang baik. Untuk beberapa baja TMCP, tahap akhir pendinginan, selama transformasi telah terjadi sepenuhnya, dipercepat dengan pendinginan air untuk menghasilkan ukuran butir yang lebih halus. Pendinginan

yang dipercepat (accelerated cooling) terkadang dapat menghasilkan formasi bainit sama seperti, atau sebagai ganti, formasi ferrit.



Gambar 2. 9 . Evolusi struktur mikro selama proses TMCP

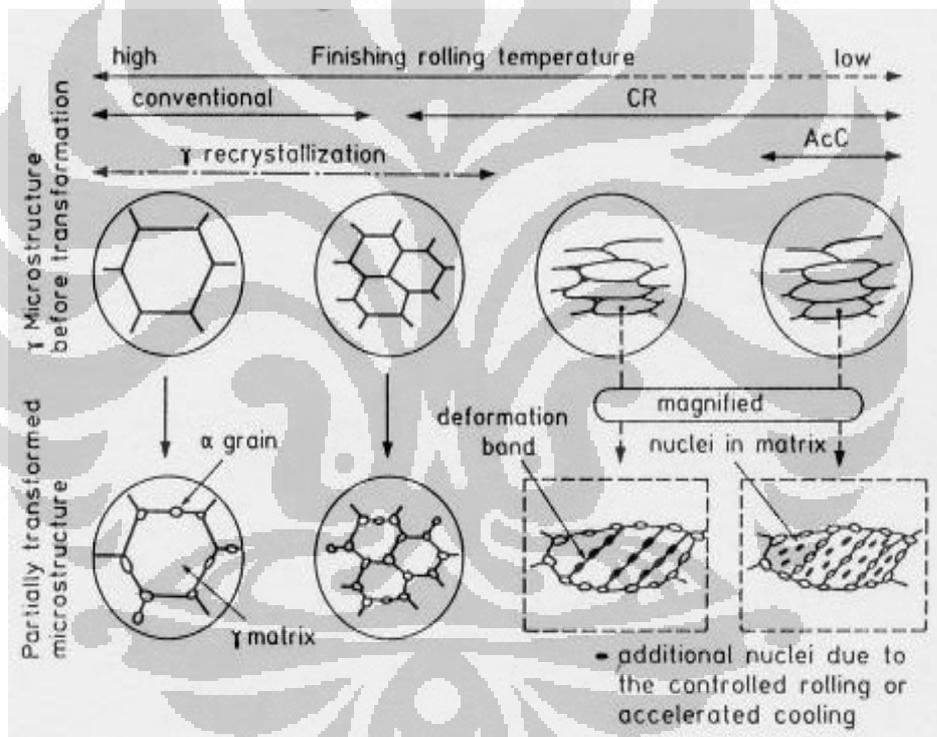
E.S. Siradj, Peluang penelitian dalam Thermomechanical Treatment Baja High Strength Low Alloy. (Seminar sehari Fakultas Teknik Universitas Tarumanegara, 2001)

Terdapat berbagai macam TMCP, yang beberapa halnya diilustrasikan berbeda dengan proses konvensional pada gambar. Jalur TMCP dapat dijadikan tiga kategori besar, yaitu [6]:

1. Pengerolan terkendali dibawah temperatur normalising, masih fasa austenitic sepenuhnya (fully austenitic) (diatas temperatur A_{r3}) diikuti dengan pendinginan cepat dengan kecepatan pendinginan sekitar $10^{\circ}\text{C}/\text{sec}$. Tujuan dari proses ini adalah untuk memperhalus ukuran butir dengan pengerolan terkendali (controlled rolling) dan untuk meningkatkan kekuatan dengan menekan formasi ferrit dan pearlit untuk menghasilkan bainit yang kuat dan tangguh.
2. Pengerolan terkendali dilakukan pada temperatur diatas A_{r3} dan dibawah temperatur normalising, pada daerah austenit ferrit tercampur. Sebagai tambahan pada penghalusan butir austenit, butir

terekristalisasi menjadi pipih dan penerokasian ferrite halus didapatkan melalui deformasi. Pada temperatur diatas Ar_1 , pengerolan terkendali dihentikan, dan diikuti pendinginan cepat menuju temperatur ruang atau temperatur intermediate.

3. Pengerolan terkendali dilakukan sebagai bagian proses awal (preliminary), diikuti pendinginan dan pemanasan kembali hingga diatas temperatur Ar_3 dan kemudian pendinginan cepat hingga dibawah temperatur Ar_1 . Tujuan dari teknik ini adalah untuk membentuk ukuran butir paling halus pada equiaxed austenite (finest equiaxed austenite grain size) sebelum pengerolan terkendali dimulai.



Gambar 2. 10 Perbedaan struktur mikro antara proses konvensional dan proses TMCP

I.Kozasu:Materials Science and Technology, vol.7 Constitution and Properties of Steels
Ed. By F.B.Pickering,VCH,(1993),184

2.7 Warm Working

Warm Working merupakan salah satu metode perlakuan terhadap material logam yang menghasilkan struktur mikro yang sangat halus, pada

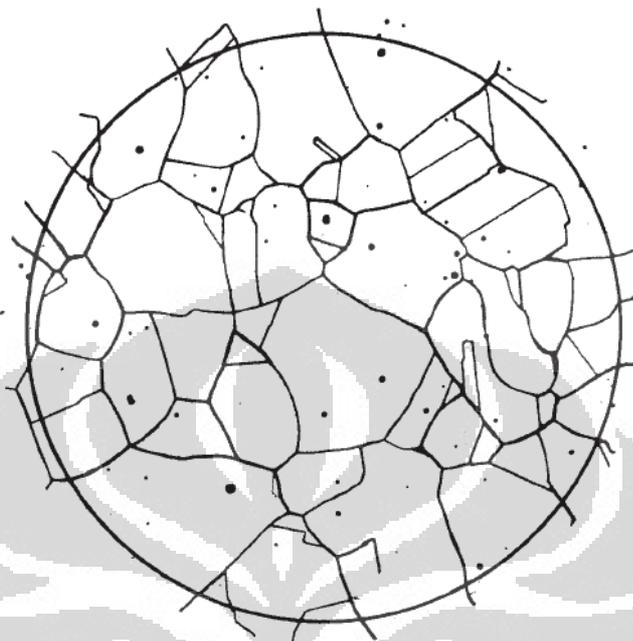
material logam dan paduannya dengan temperatur kerja di antara pengerjaan panas (*hot working*) dan pengerjaan dingin (*cold working*). Selain menghasilkan struktur mikro yang halus, proses tersebut juga akan mengalami pembentukan *subgrain* berukuran *micrometer* dan *sub-micrometer* pada butir yang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

Warm Working, proses pengerjaannya berada pada range temperatur $550^{\circ}\text{C} - 850^{\circ}\text{C}$ sehingga dapat dijelaskan bahwa metode ini sangatlah menghemat energi. Selain efisiensi energi, metode ini banyak diminati karena memiliki beberapa keuntungan lainnya. Sebagai contoh, jika dibandingkan dengan pengerjaan dingin / *cold working*, metode ini membutuhkan *deformation forces* yang lebih rendah, dapat diaplikasikan pada baja dengan range yang luas, memberikan rasio deformasi yang lebih besar, menghasilkan deformasi yang lebih seragam terhadap daerah transversal dan menghasilkan mikrostruktur dengan tegangan sisa yang lebih rendah [7]. Kemudian jika dibandingkan dengan pengerjaan panas / *hot working*, metode ini menghasilkan mikrostruktur yang lebih halus dengan sifat mekanis yang tinggi, kualitas permukaan dan pengendalian dimensional yang lebih baik, material yang dibuang akibat proses dekarburisasi atau oksidasi yang lebih rendah [8] Juga terdapat studi yang menyatukan bahwa proses *warm working* berhubungan dengan range temperatur berada diantara *hot working* dan *cold working*, setelah terjadi deformasi plastis, material sebagian mengalami pengerasan tegangan / *strain hardened* dan sebagian mengalami rekristalisasi [9].

2.8 Perhitungan Besar Butir

Ada beberapa metode yang dapat dilakukan untuk mengukur besar butir dari struktur mikro suatu material salah satunya adalah metode *jefferies* atau biasa disebut dengan planimetri. Metode ini melibatkan jumlah butir yang terdapat dalam

suatu area tertentu dilambangkan dengan N_A . Secara skematis proses perhitungan menggunakan metode ini adalah sebagai berikut.



Gambar 2. 11 . Ilustrasi perhitungan butir menggunakan metode planimetri.[11]

Menurut standar yang telah ditetapkan oleh ASTM E112 perhitungan butir dilakukan dalam sebuah lingkaran yang memiliki luas 5000 mm² atau memiliki diameter sebesar 79.8 mm. Kemudian jumlah butir di dalam lingkaran dan yang berada diluar lingkaran dihitung selanjutnya disubstitusikan ke dalam persamaan berikut.

$$N_A = f \left(N_{\text{Inside}} + \frac{N_{\text{Intercepted}}}{2} \right) \dots\dots\dots(2.2)$$

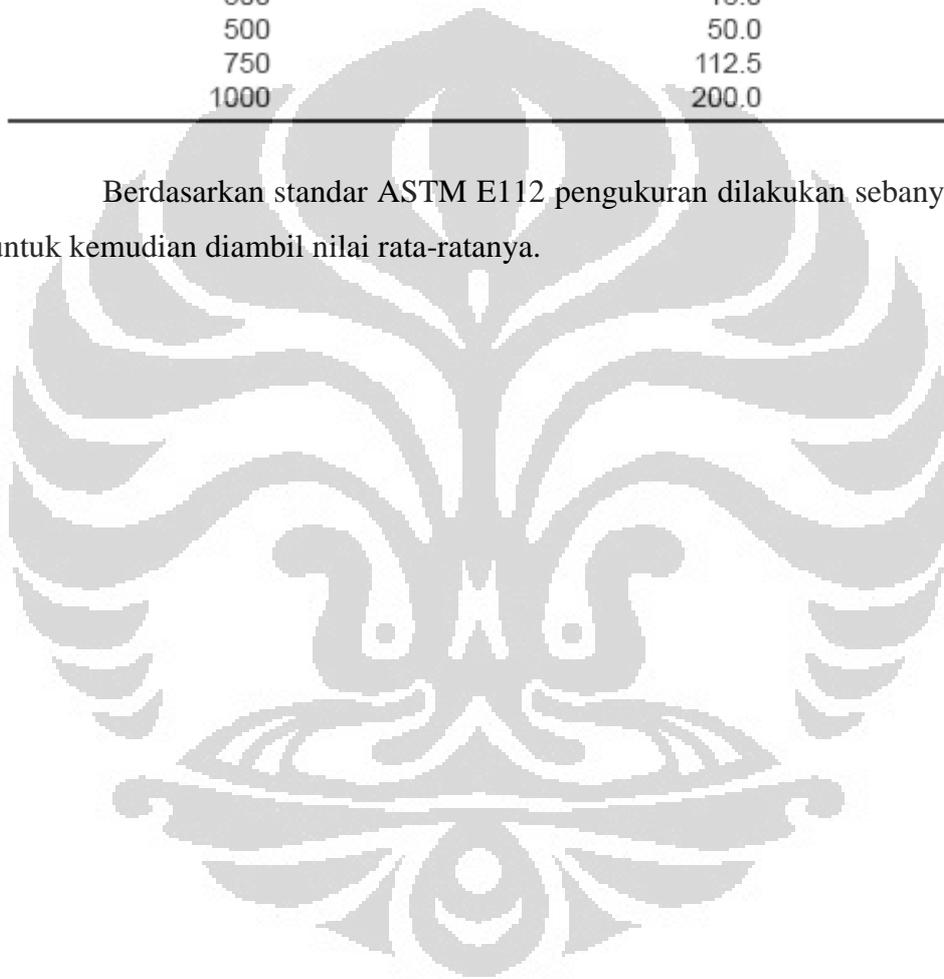
Persamaan 2.2. Perhitungan besar butir melalui metode *Jeffries*

Dengan besar pengali jefferies tergantung dari perbesaran yang digunakan dijelaskan pada tabel 2.1 berikut.

Tabel 2. 1. Pengali *jefferies* yang digunakan dalam perhitungan besar butir [11]

Magnification Used, M	Jeffries' Multiplier, f , to Obtain Grains/mm ²
1	0.0002
10	0.02
25	0.125
50	0.5
75 ^A	1.125
100	2.0
150	4.5
200	8.0
250	12.5
300	18.0
500	50.0
750	112.5
1000	200.0

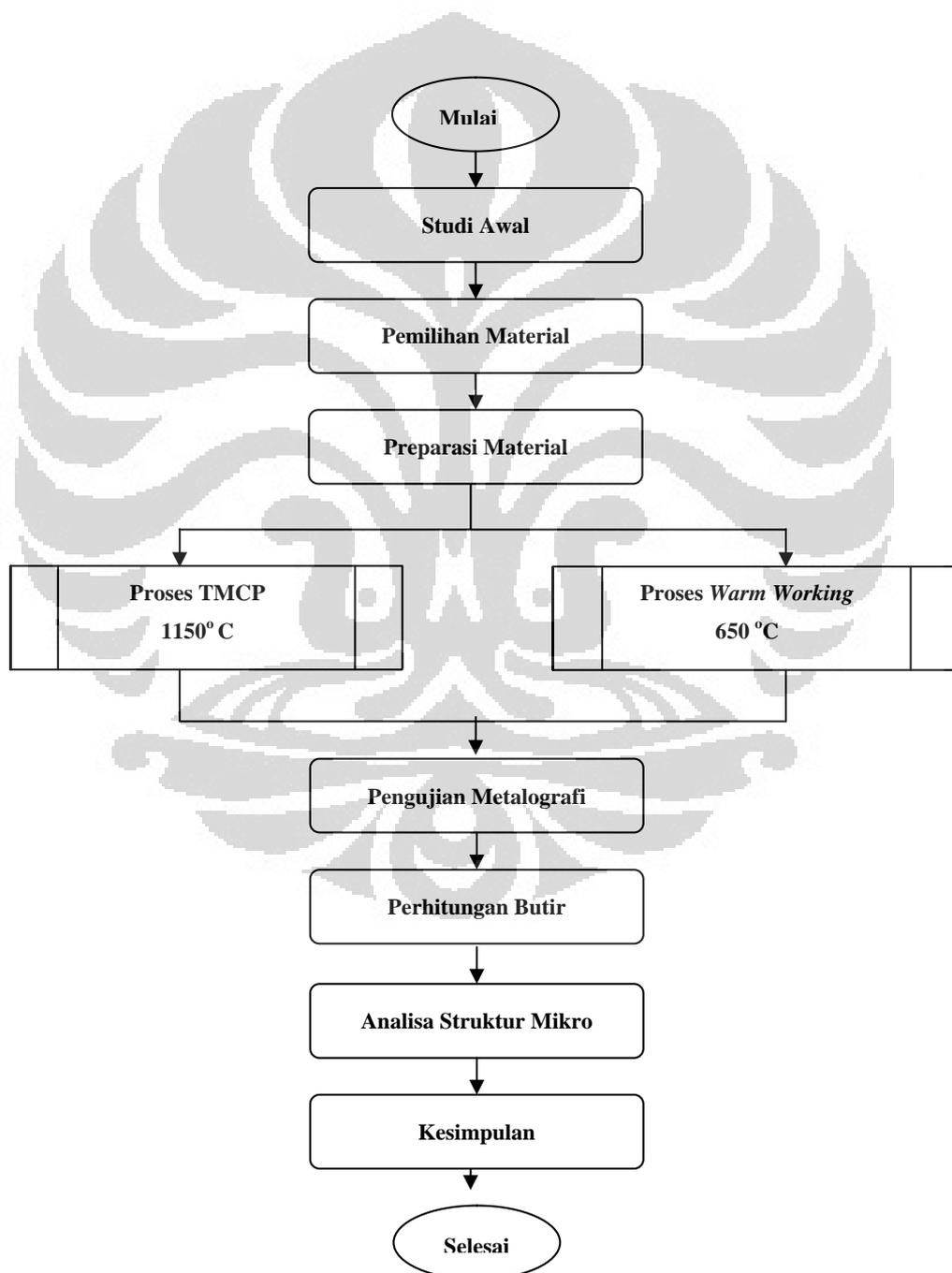
Berdasarkan standar ASTM E112 pengukuran dilakukan sebanyak 3 kali untuk kemudian diambil nilai rata-ratanya.



BAB 3 METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Proses pengujian dapat dilihat pada diagram alir berikut ini:



Semua pengujian dilakukan di Departemen Metalurgi Material Universitas Indonesia Depok.

3.2 Alat Dan Bahan

3.2.1 Alat

1. Mesin Roll dengan kapasitas 20 ton
2. Mesin Pemanas / Oven Carbolite
3. Termokopel
4. Mesin Komputer Pengukur Temperatur
5. Jangka sorong
6. Mesin Amplas
7. Mesin Poles
8. Mikroskop Optik

3.2.2 Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah material Baja Karbon Rendah SS 400 dengan dimensi 60 x 30 x 10.1 (mm).

3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Pemilihan Material

Penelitian diawali dengan pemilihan material sampel uji berdasarkan relevansi antara studi literatur. Pada tahap ini juga ditentukan area mana yang akan diambil sebagai sampel uji. Material baja yang menjadi sampel uji adalah JIS

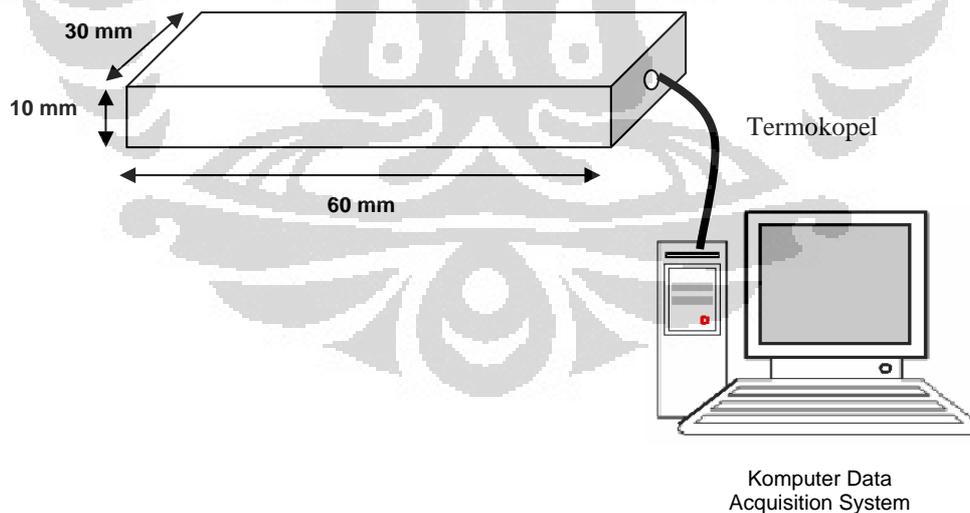
G 3101 SS 400 yang mana merupakan jenis baja karbon rendah. Dengan komposisi :

Tabel 3. 1. Komposisi Benda Uji

Komposisi	C	Mn	Si	Al	P	S
(Wt %)	0.163	0.644	0.189	0.035	0.011	0.002

3.3.2 Preparasi Sampel

Sampel yang digunakan pada penelitian ini hasil preparasi *slab* yang dipotong sehingga berbentuk balok dengan dimensi 60 x 30 x 10 (mm). Kemudian diberikan lubang untuk meletakkan kawat termokopel tipe K sebagai alat untuk mengukur temperatur benda uji. Pengukuran temperatur menggunakan data *acquisition system* yang dihubungkan dengan komputer Adapun kedalaman lubang adalah 5 mm dengan diameter 2,5 mm sesuai diameter termokopel



Gambar 3. 1. Ilustrasi benda uji dan pemasangan termokopel

3.3.3 Proses Termomekanikal (TMCP) dan *Warm Working*

Penelitian ini dilakukan mengikuti langkah prosedur penelitian secara berurutan. Langkah – langkah penelitian secara umum adalah persiapan benda uji, pemanasan kembali (reheating) benda uji pada temperatur 1150°C, lalu dilanjutkan dengan melakukan canai dengan besaran deformasi tertentu baik secara *single-pass* maupun secara berulang (*reversible*) baik pada temperatur pengerjaan panas maupun temperatur pengerjaan hangat, dan pengamatan metalografi.

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

1. Benda Uji Tanpa Perlakuan

Proses A

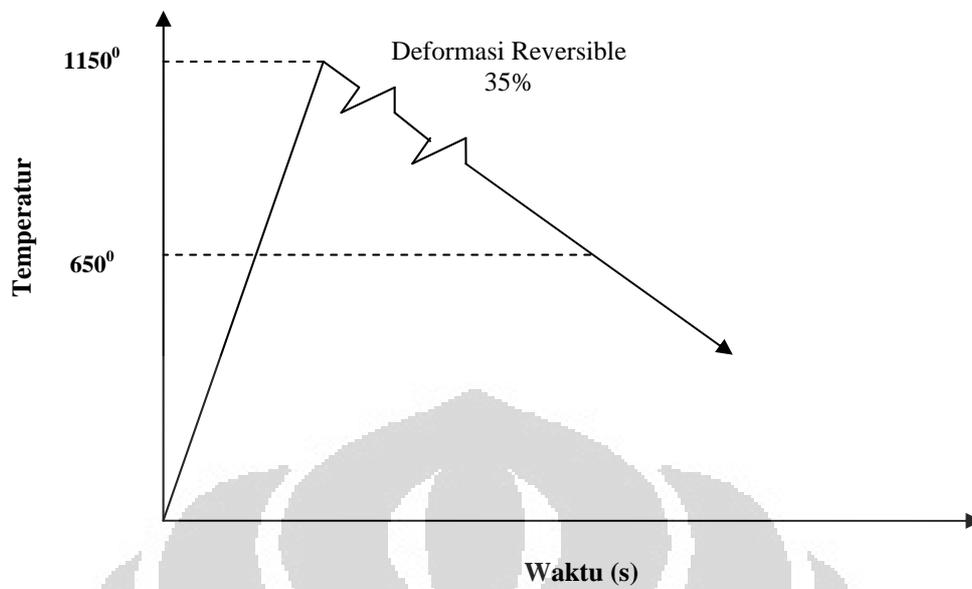
Benda uji tidak diberi perlakuan sama sekali. Karena benda uji tersebut akan menjadi tolak ukur bagi proses selanjutnya. Benda uji diberi label A.

2. Pengaruh Temperatur Akhir Canai

Proses B

Proses pemanasan dilakukan dengan memasukkan benda uji ke dalam dapur Carbolite kemudian dinaikkan temperaturnya hingga 1150°C, kemudian ditunggu selama kurang lebih 5 – 10 menit supaya temperatur benda uji mencapai temperatur target secara homogen. Setelah proses pemanasan, material dideformasi sebesar 35% dengan metode bolak balik (*reversible*).

Material yang telah di deformasi kemudian didinginkan hingga temperatur ruang melalui pendinginan udara. Proses deformasi dilakukan dengan metode bolak balik (*reversible*). Benda uji diberi label B.

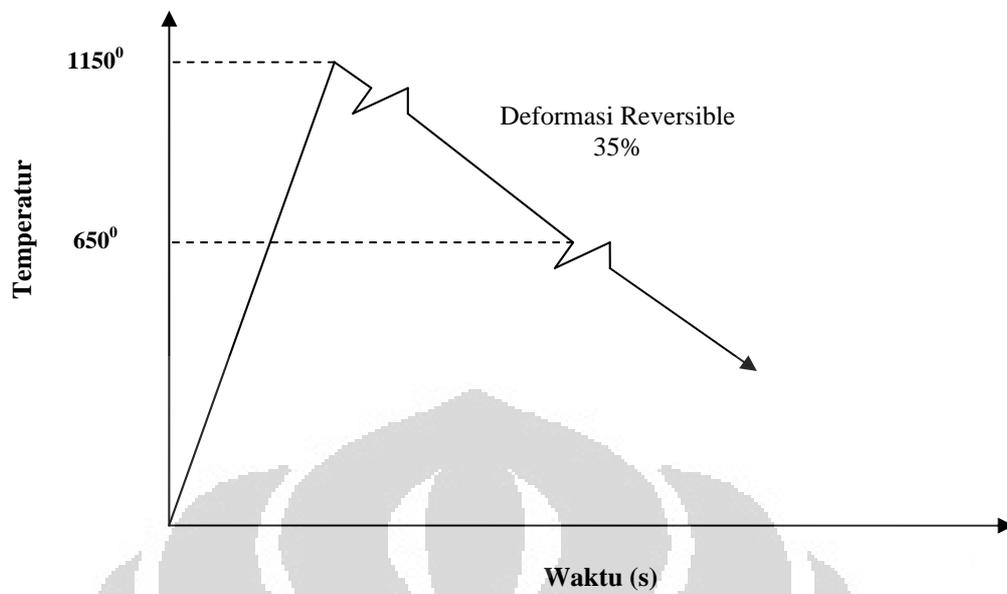


Gambar 3. 2. Diagram proses B

Proses C

Proses pemanasan dilakukan dengan memasukkan benda uji ke dalam dapur Carbolite kemudian dinaikkan temperturnya hingga 1150°C, kemudian ditunggu selama kurang lebih 5 – 10 menit supaya temperatur benda uji mencapai temperatur target secara homogen. Setelah proses pemanasan, material dideformasi sebesar 35%.

Material yang telah di deformasi kemudian didinginkan hingga temperatur benda uji mencapai 650°C. Kemudian material di deformasi sebesar 35%. Selanjutnya material didinginkan hingga temperatur ruang melalui pendinginan udara. Proses deformasi dilakukan dengan metode bolak balik (reversible). Benda uji diberi label C.

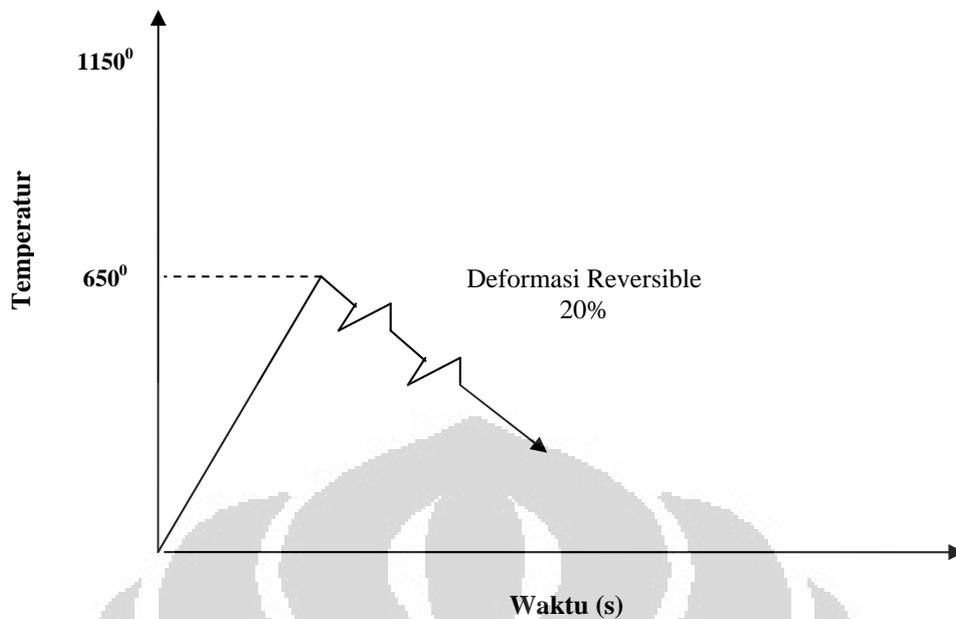


Gambar 3. 3 Diagram proses C

3. Pengaruh Pemanasan / *Reheating*

Proses D

Proses pemanasan dilakukan dengan memasukkan benda uji ke dalam dapur Carbolite kemudian dinaikkan temperaturnya hingga 650°C, kemudian ditunggu selama kurang lebih 5 – 10 menit supaya temperatur benda uji mencapai temperatur target secara homogen. Kemudian material di deformasi sebesar 20% dengan metode bolak balik (reversible). Selanjutnya material didinginkan hingga temperatur ruang melalui pendinginan udara. Benda uji diberi label D.

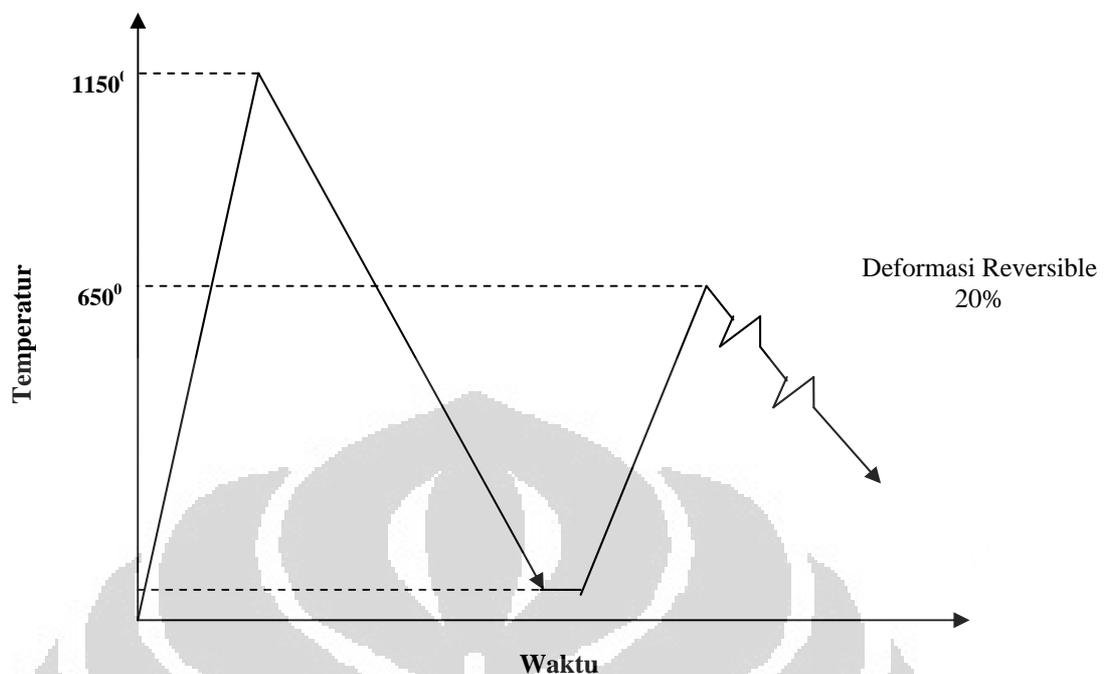


Gambar 3. 4. Diagram proses D

Proses E

Proses pemanasan dilakukan dengan memasukkan benda uji ke dalam dapur Carbolite kemudian dinaikkan temperturnya hingga 1150°C , kemudian ditunggu selama kurang lebih 5 – 10 menit supaya temperatur benda uji mencapai temperatur target secara homogen. Kemudian material didinginkan dengan pendinginan udara.

Setelah benda uji dingin, dilanjutkan dengan proses pemanasan hingga temperatur benda uji mencapai 650°C . Kemudian material di deformasi sebesar 20% dengan metode bolak balik (reversible). Selanjutnya material didinginkan hingga temperatur ruang melalui pendinginan udara. Benda uji diberi label E.

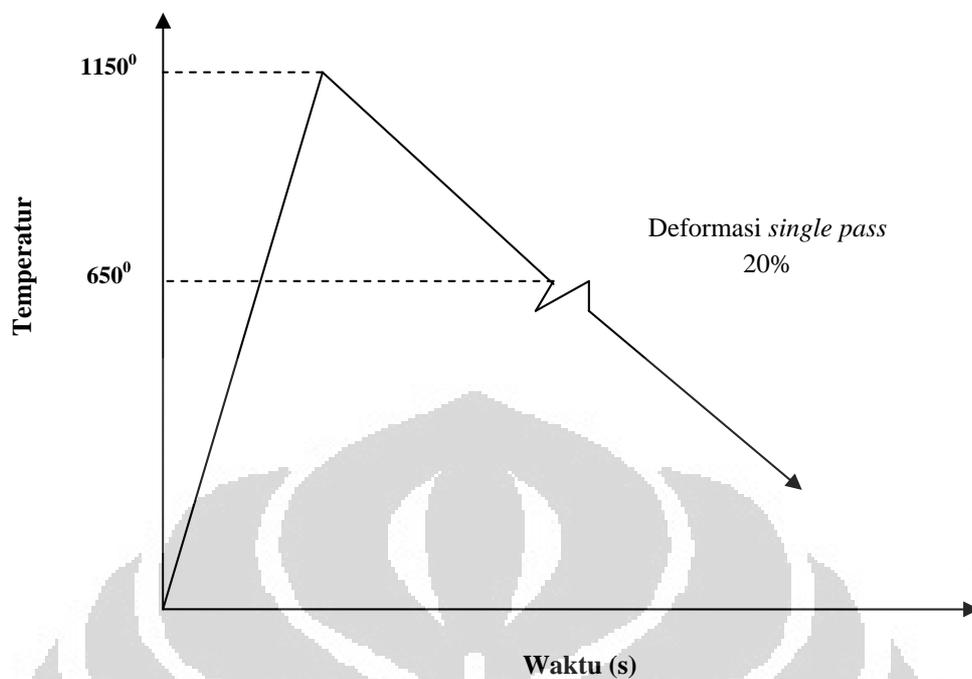


Gambar 3. 5. Diagram proses E

4. Pengaruh Metode Deformasi

Proses F

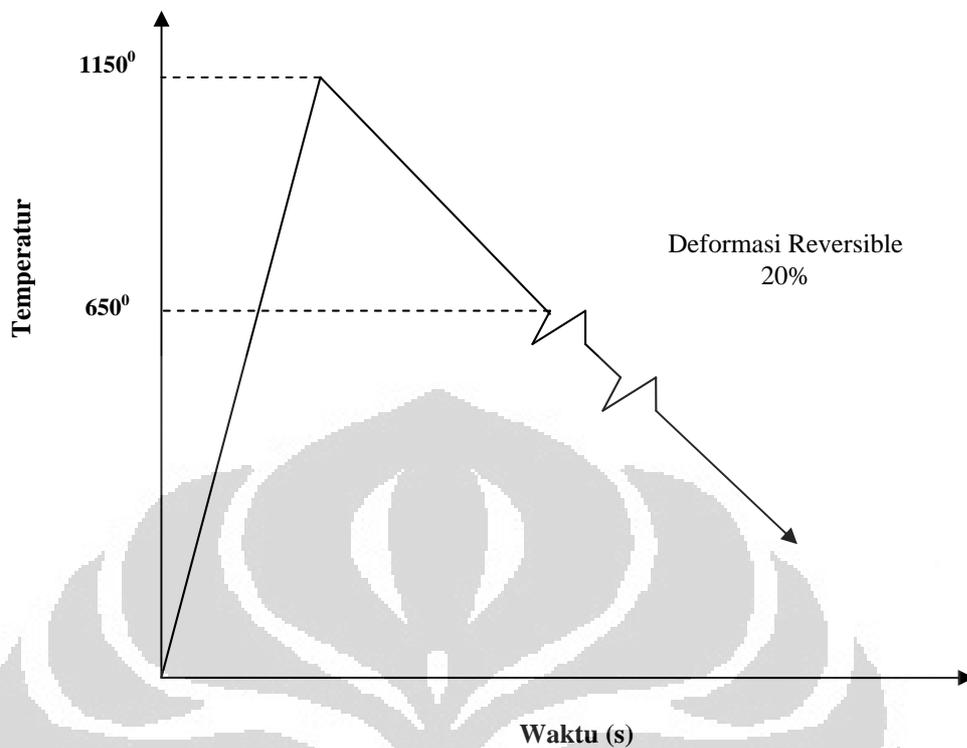
Proses pemanasan dilakukan dengan memasukkan benda uji ke dalam dapur Carbolite kemudian dinaikkan temperaturnya hingga 1150°C, kemudian ditunggu selama kurang lebih 5 – 10 menit supaya temperatur benda uji mencapai temperatur target secara homogen. Setelah proses pemanasan, material didinginkan hingga temperatur benda uji mencapai 650°C. Kemudian material di deformasi sebesar 30% dengan metode *single pass*. Selanjutnya material didinginkan hingga temperatur ruang melalui pendinginan udara. Benda uji diberi label F.



Gambar 3. 6. Diagram proses F

Proses G

Proses pemanasan dilakukan dengan memasukkan benda uji ke dalam dapur Carbolite kemudian dinaikkan temperaturnya hingga 1150°C , kemudian ditunggu selama kurang lebih 5 – 10 menit supaya temperatur benda uji mencapai temperatur target secara homogen. Setelah proses pemanasan, material didinginkan hingga temperatur benda uji mencapai 650°C . Kemudian material di deformasi sebesar 20% dengan metode bolak balik (reversible). Selanjutnya material didinginkan melalui hingga temperatur ruang pendinginan udara. Benda uji diberi label G.



Gambar 3. 7. Diagram proses G

3.3.4 Preparasi, Pengujian dan Pengamatan Metalografi

Dalam penelitian ini dilakukan hanya dilakukan pengujian metalografi. Tujuan dari proses ini adalah mendapatkan pencitraan struktur mikro dari material yang telah dilakukan proses TMCP dan pengerjaan hangat / *warm working*.

Untuk menjaga supaya kondisi butir benda uji setelah proses canai tidak berubah, maka benda uji tidak mengalami proses pemotongan untuk pengujian metalografi. Untuk dapat diamati mikrostrukturnya, benda uji terlebih dahulu diampelas. Proses pengamplasan dilakukan untuk meratakan bagian samping benda uji khususnya pada bagian yang posisinya dekat dengan lubang termokopel. Pengamplasan dilakukan dengan menggunakan kertas ampelas yang dimulai dari ampelas kasar hingga ampelas halus untuk mendapatkan permukaan benda uji yang halus dan merata di seluruh permukaan. Ukuran kekasaran dari kertas ampelas yang digunakan yaitu: #80, #120, #240, #400, #600, #800, #1000, #1200, #1500

(dalam mesh). Proses pengamplasan dilakukan dengan merubah arah pengamplasan setiap pergantian tingkat kekasaran kertas amplas, sehingga bisa dipastikan sisa pengamplasan sebelumnya telah hilang dan didapat permukaan yang halus dari benda uji

Setelah proses pengamplasan selesai sampel dipoles untuk mendapatkan permukaan yang lebih halus dan mengkilap serta menghilangkan bekas goresan akibat pengamplasan. Sampel dipoles dengan menggunakan kain beludru dan zat polesnya menggunakan alumina. Kemudian benda uji dietsa dengan Nital 3 % untuk untuk memunculkan jejak batas butir struktur akhir dari benda uji sehingga dapat diamati morfologi butir ferrit. Setelah itu dilakukan pengamatan dengan mikroskop optik. Keseluruhan proses dilakukan di Laboratorium Metalografi dan Heat Surface Treatment di Departemen Metalurgi dan Material FTUI



BAB 4 HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian

4.1.1 Hasil Pengukuran Ketebalan Benda Uji

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

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

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

% Deformation = Besar prosentase perubahan ketebalan
 H_0 = Ketebalan Awal
 H_f = Ketebalan Akhir

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

Tabel 4. 1 Tabel Pengukuran Ketebalan Benda Uji

No	Benda Uji / Sampel	Tebal Awal (mm)	Derajat Deformasi	Tebal Akhir (mm)	Real Deformasi
1	A	10.1	-	10.1	-
2	B	10.1	35% (r) ~ 50.35%	5.5	45.54%
3	C	10.1	35% (r) ~ 50.35%	5.61	44.45%
4	D	10.1	20% (r) ~ 32.97%	7.3	27.72%
5	E	10.1	20% (r) ~ 32.97%	7.4	26.73%
6	F	10.1	20% (nr) ~ 18.13%	8.5	15.84%
7	G	10.1	20% (r) ~ 32.97%	7.6	24.75%

4.1.2 Hasil Penghitungan butir

Perhitungan butir dilakukan sebanyak 3 kali perhitungan. Setelah dilakukan 3 kali perhitungan maka dapat diperolehlah diameter butir. Perhitungan besar butir ferit dilakukan menggunakan metode planimetri (*jefferies*) dan contoh perhitungannya dapat dilihat pada lampiran.

Hasil perhitungan besar butir ferit dari baja karbon rendah (benda uji) adalah sebagai berikut

Tabel 4. 2. Tabel Pengukuran Besar Butir

No	Benda Uji / Sampel	d	d (rata-rata)	ASTM Grain Size	Keterangan
1	A	11,304	11.288	9.986	
		11.433			
		11.128			
2	B	11.163	11.122	10.027	1150°C – deform 35 % reversible
		11.076			
		11.128			
3	C	12.126	11.912	9.83	1150°C – deform 35 % - 650°C – deform 35 %
		11.785			
		11.826			
4	D	7.791	7.697	11.092	650°C – deform 20 % reversible
		7.773			
		7.527			
5	E	12.751	12.874	9.608	1150°C – 25°C (pendinginan udara) – 650°C – deform 20 % reversible
		12.936			
		12.936			
6	F	11.805	11.635	9.9	1150°C – 650°C – deform 20 %
		11.724			
		11.377			
7	G	9.987	9.645	10.442	1150°C – 650°C – deform 20 % reversible
		9.315			
		9.633			

4.2 Hasil Pengamatan Metalografi

4.2.1 Sampel Awal / Proses A



500 x

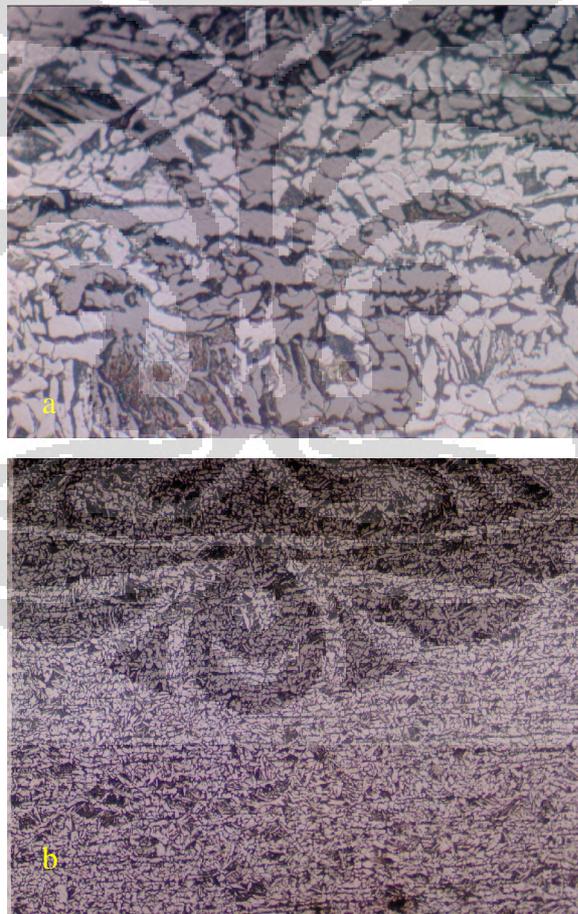
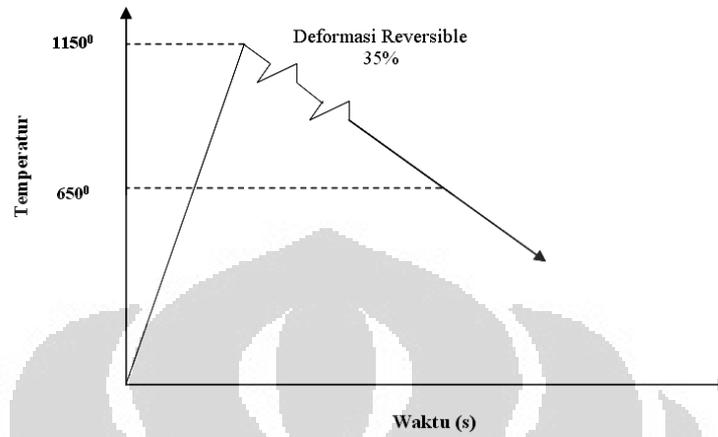


100 x

Gambar 4. 1 Foto struktur mikro ferit baja karbon rendah tanpa perlakuan, etsa Nital 2%. (atas) perbesaran 500 x ,(bawah) perbesaran 100 x .

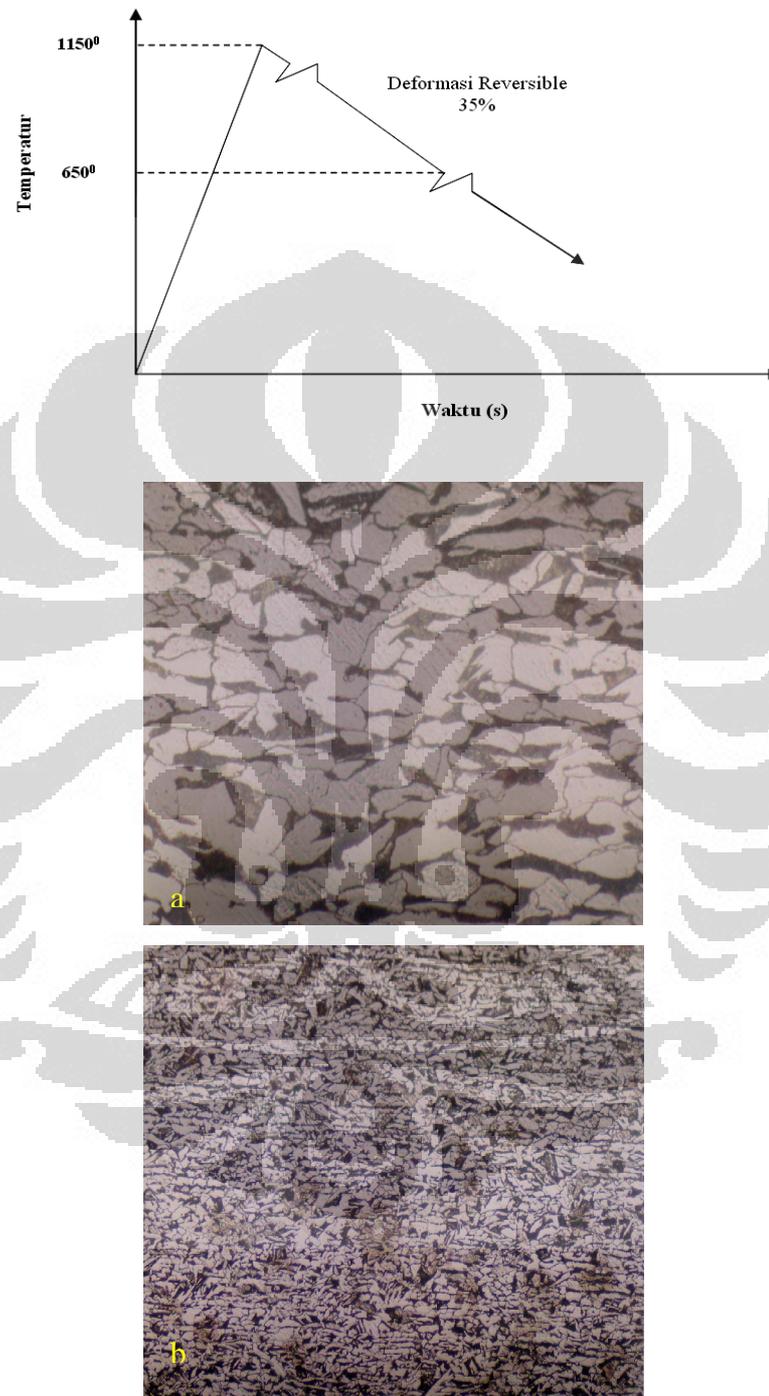
4.2.2 Pengaruh Temperatur Akhir Canai

4.2.2.1 Proses B



Gambar 4. 2. Foto struktur mikro ferit baja karbon rendah perlakuan proses B, etsa Nital 2%. (a) perbesaran 500 x ,(b) perbesaran 100 x .

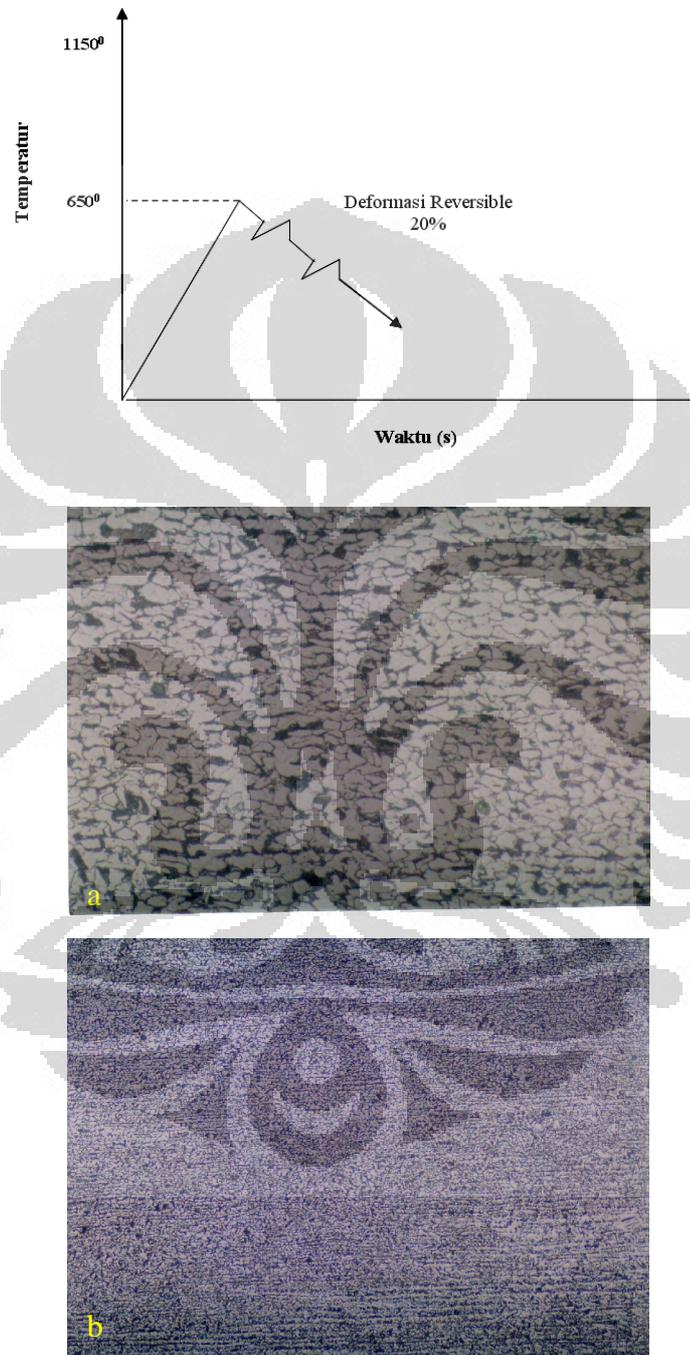
4.2.2.2 Proses C



Gambar 4. 3. Foto struktur mikro ferit baja karbon rendah perlakuan proses C, etsa Nital 2%. (a) perbesaran 500 x ; (b) perbesaran 100 x

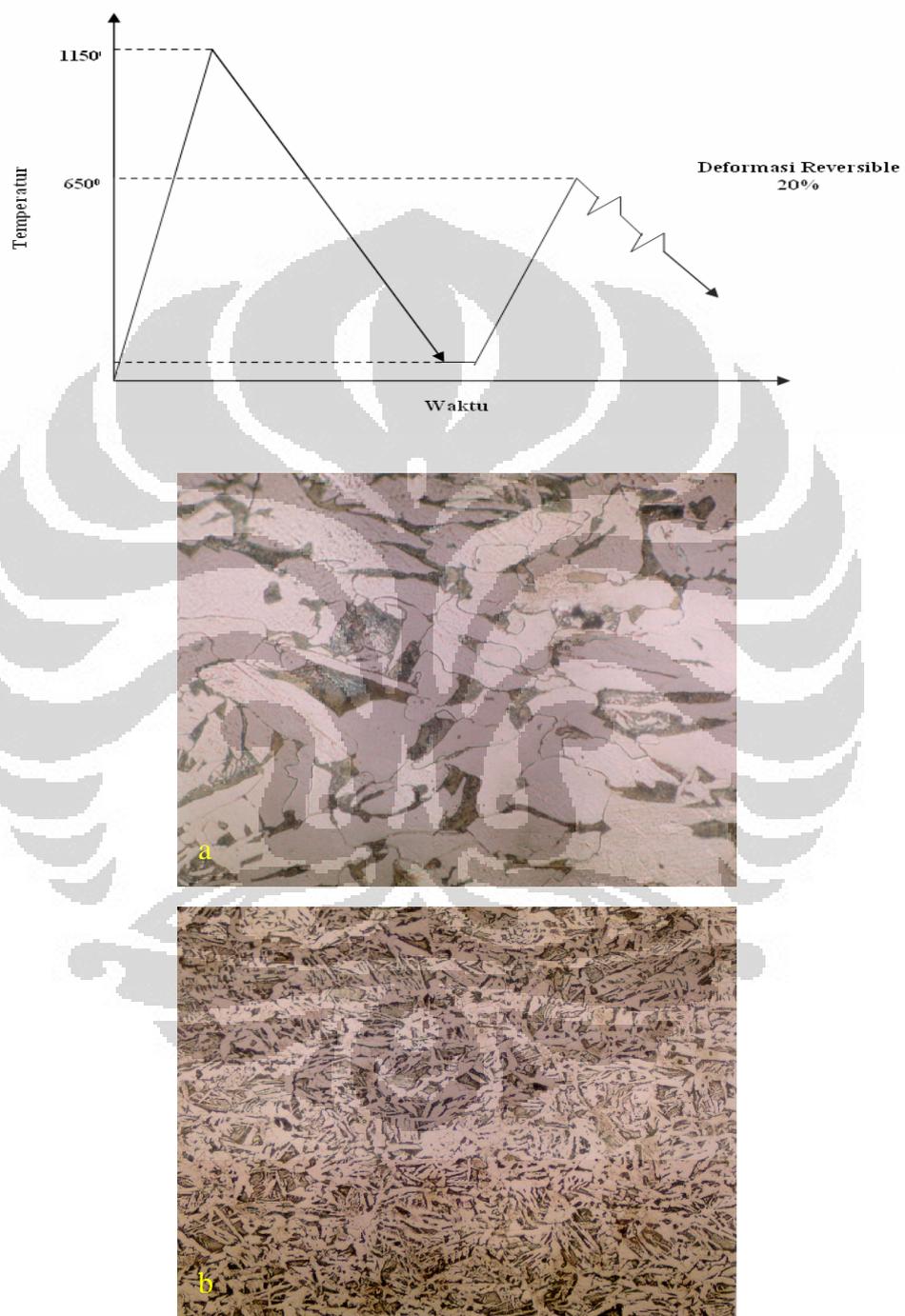
4.2.3 Pengaruh Pemanasan Ulang / *Reheating*

4.2.3.1 Proses D



Gambar 4. 4. Foto struktur mikro ferit baja karbon rendah perlakuan proses D, etsa Nital 2%. (a) perbesaran 500 x ; (b) perbesaran 100 x

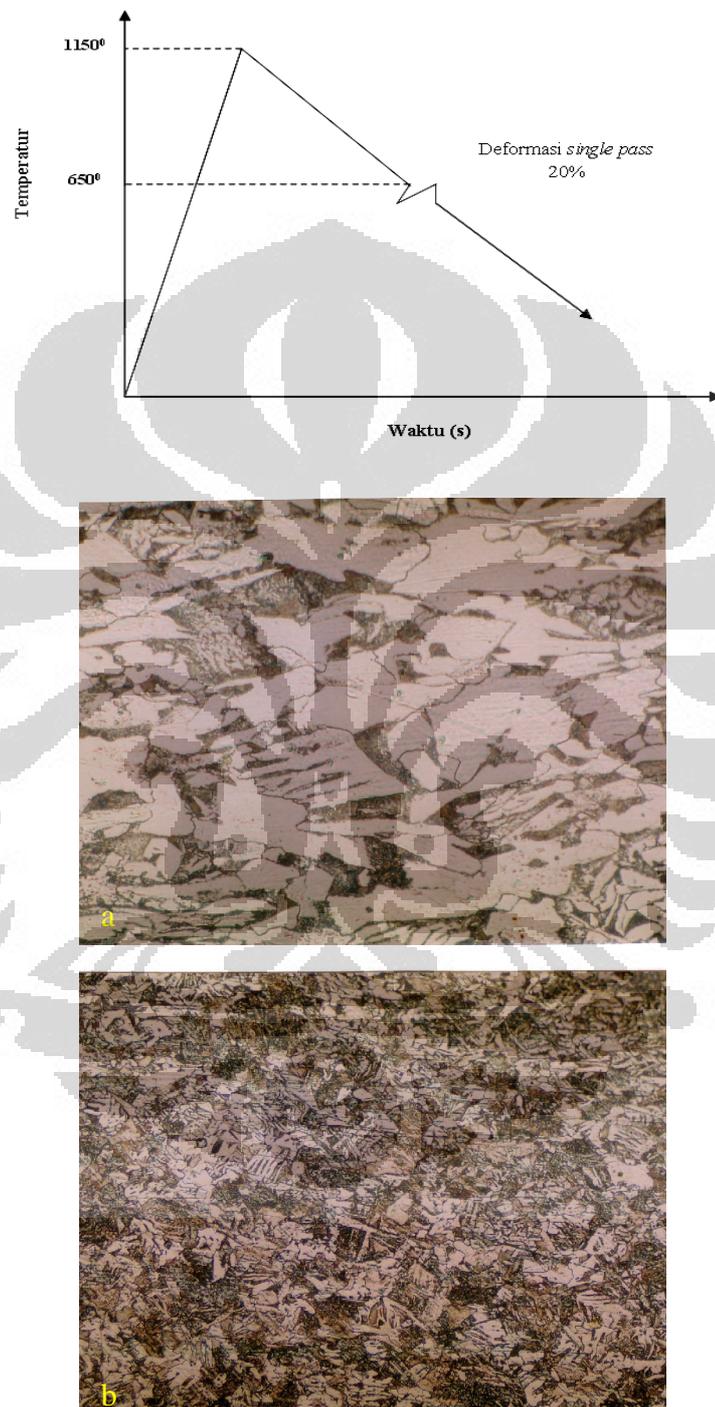
4.2.3.2 Proses E



Gambar 4. 5. Foto struktur mikro ferit baja karbon rendah perlakuan proses E, etsa Nital 2%. (a) perbesaran 500 x ; (b) perbesaran 100 x

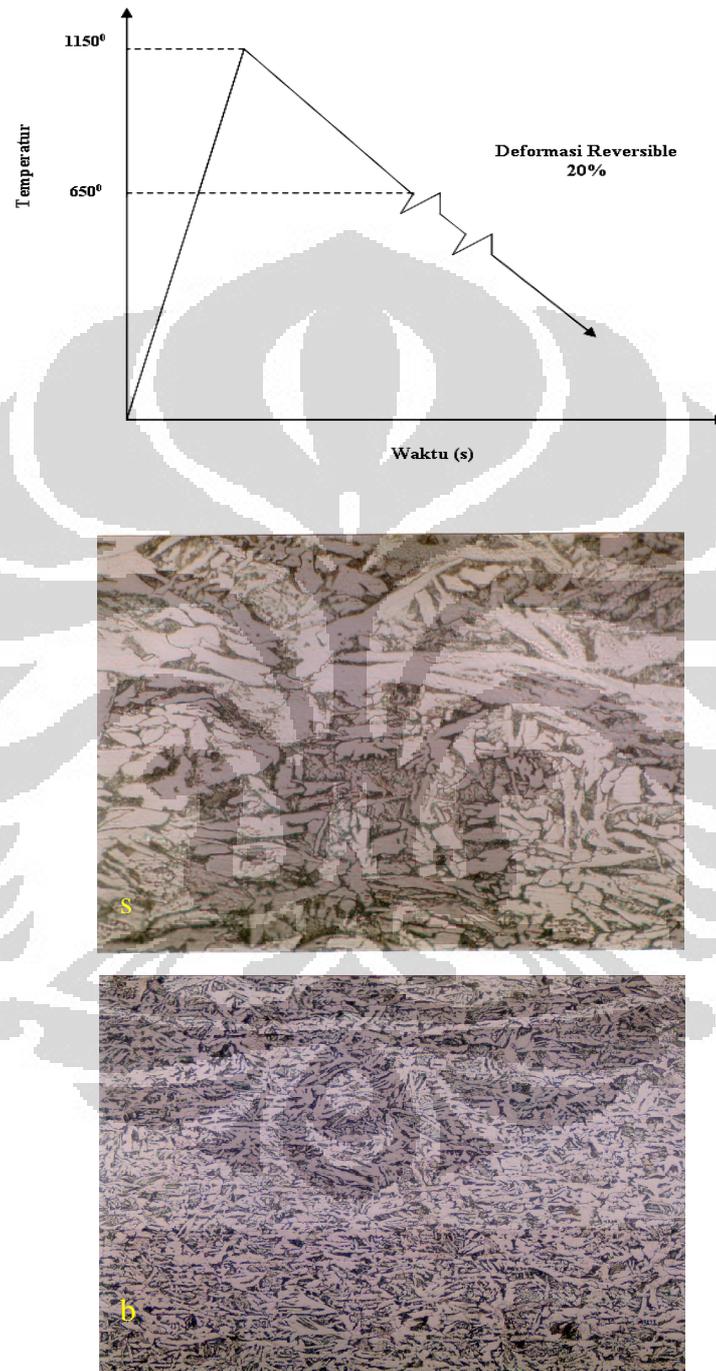
4.2.4 Pengaruh Metode Deformasi

4.2.4.1 Proses F



Gambar 4. 6. Foto struktur mikro ferit baja karbon rendah perlakuan proses F, etsa Nital 2%. (a) perbesaran 500 x ,(b) perbesaran 100 x

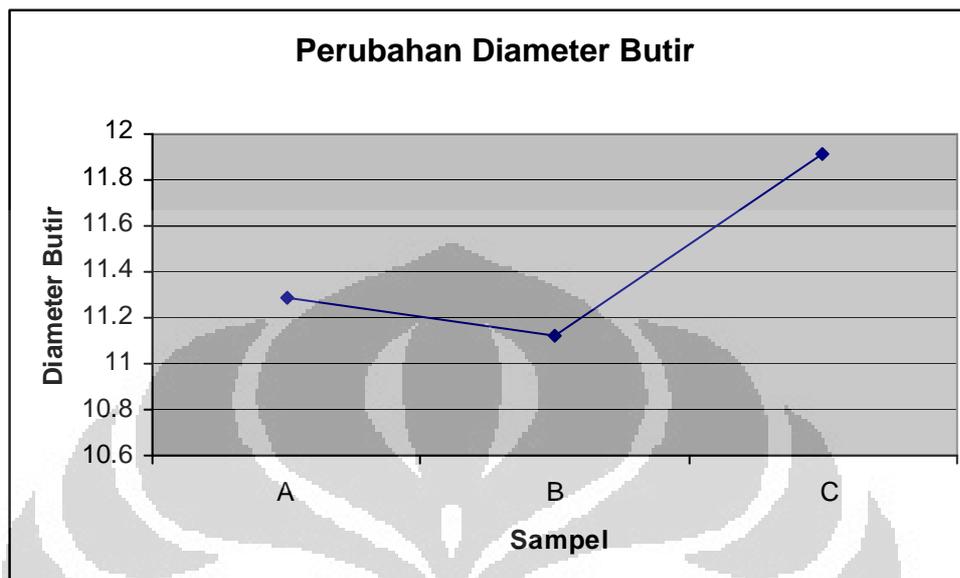
4.2.4.2 Proses G



Gambar 4. 7. Foto struktur mikro ferit baja karbon rendah perlakuan proses G, etsa Nital 2%. (a) perbesaran 500 x ; (b) perbesaran 100 x

4.3 Pembahasan

4.3.1 Hubungan Temperatur Akhir Canai Terhadap Besar Butir



Gambar 4. 8. Grafik Diameter Rata-Rata Butir (A) sampel awal; (B) proses B; dan (C) proses C.

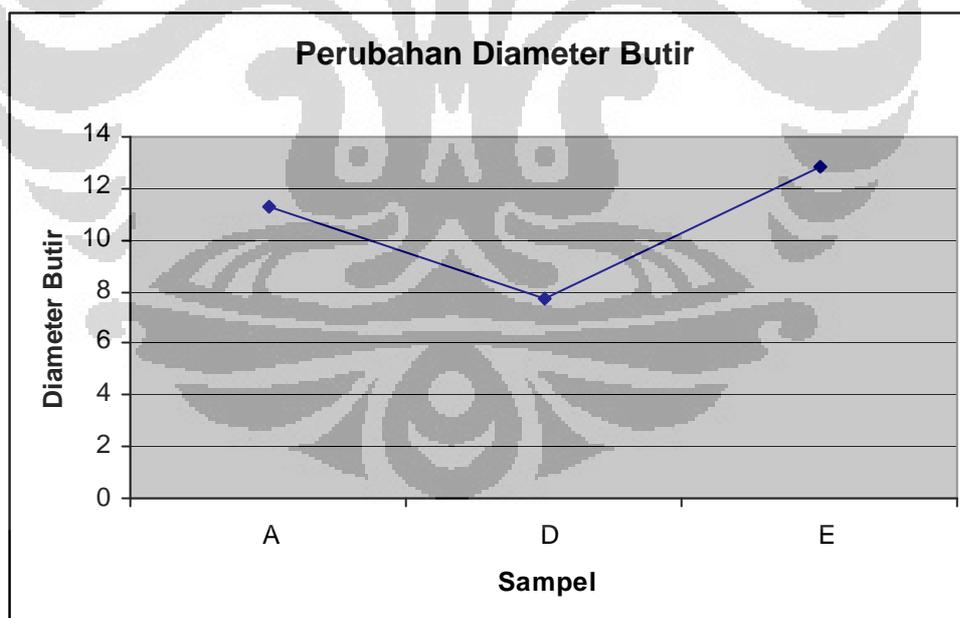
Proses untuk mengetahui evolusi struktur mikro berdasarkan perbedaan temperatur akhir canai saat proses canai, sebelumnya benda uji mengalami pemanasan ulang (reheating) dan keduanya mengalami proses canai dengan metode bolak-balik (reverse). Selanjutnya mengalami pendinginan udara. Untuk perbandingan, temperatur akhir canai dibedakan khususnya pada saat canai kedua. Untuk proses B, temperatur akhir canai dilakukan pada temperatur 900°C , sedangkan proses C dilakukan pada temperatur 650°C .

Menurut gambar 4.10. grafik perubahan butir antara material awal, material setelah proses B (Sampel B) dan material setelah proses C (Sampel C) menunjukkan bahwa terjadi perubahan besar butir cenderung menurun pada setelah proses B dan cenderung meningkat setelah proses C. Berdasarkan hasil penghitungan besar butir, perbedaan temperatur akhir canai mengakibatkan besar butir yang berbeda pula. Hasil pengamatan struktur mikro dapat dilihat pada gambar 4.2 hingga 4.3. Dari hasil pengamatan struktur mikro terlihat bahwa butir ferit yang mengalami deformasi dengan temperatur akhir 900°C (gambar 4.2)

memiliki bentuk yang agak kecil jika dibandingkan dengan butir ferit yang mengalami deformasi dengan temperatur akhir 650°C (gambar 4.3). Hal tersebut terjadi dikarenakan pada proses C, terdapat jeda waktu / *delay time* untuk material mengalami pertumbuhan butir. Seperti pada gambar 4.2, setelah proses B (Sampel B) besar diameter rata-rata butir yang di dapat sebesar $11.122\ \mu\text{m}$ dan pada gambar 4.3 setelah proses C (Sampel C) besar diameter rata-rata butir yang di dapat sebesar $11.912\ \mu\text{m}$.

Secara kualitatif, hasil struktur mikro kedua proses menampakkan bahwa butir ferit mengalami penghancuran akibat deformasi / canai bolak-balik. Dari hasil pengamatan selanjutnya, walaupun ukuran butir dari kedua proses ini berbeda, keduanya memiliki morfologi butir ferit yang halus dan berbentuk pipih. Pada masing-masing proses ukuran butir feritnya tidak seragam.

4.3.2 Hubungan Pemanasan / *reheating* Terhadap Besar Butir



Gambar 4. 9. Diameter Rata-Rata Butir (A) sampel awal; (D) proses D; dan (E) proses E

Mengetahui pengaruh pemanasan ulang / *reheating* pada evolusi struktur mikro sangatlah diperlukan karena tentunya masing-masing proses akan

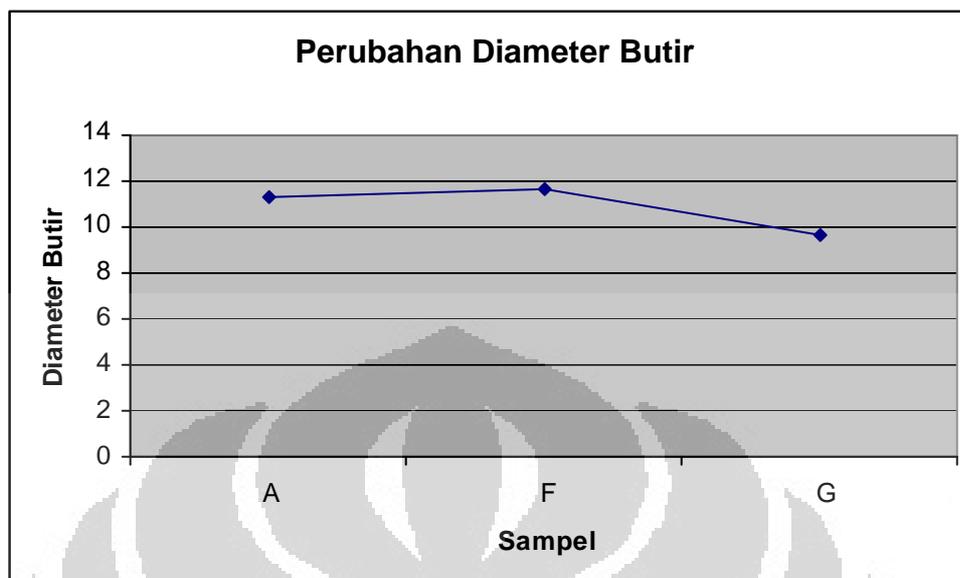
menghasilkan morfologi butir ferit yang berbeda.. Yang menjadi tolak ukur adalah proses pemanasan ulang (reheating). Pada proses D, benda uji hanya mengalami proses pemanasan ulang (reheating) hingga temperatur 650°C kemudian dilakukan deformasi bolak balik (reverse). Pada proses E, benda uji mengalami proses pemanasan ulang (reheating) hingga temperatur 1150°C yang kemudian didinginkan hingga temperatur ruang lalu dipanaskan kembali hingga temperatur 650°C kemudian dilakukan deformasi bolak balik (reverse).

Secara kuantitatif, menurut gambar 4.11. grafik perubahan butir antara material awal, material setelah proses D (Sampel D) dan material setelah proses E (Sampel E) menunjukkan bahwa terjadi perubahan besar butir cenderung menurun pada setelah proses D dan cenderung meningkat setelah proses E. Seperti pada gambar 4.4, benda uji setelah proses D (Sampel D) memiliki besar diameter rata-rata butir sebesar $7.697\ \mu\text{m}$ dan pada gambar 4.5, benda uji setelah proses E (Sampel E) besar diameter rata-rata butir yang di dapat sebesar $12.874\ \mu\text{m}$.

Secara kualitatif, hasil pengamatan struktur mikro terlihat bahwa butir ferit yang mengalami proses pemanasan ulang (reheating) hingga temperatur 650°C kemudian dilakukan deformasi bolak balik/*reverse* (gambar 4.4) memiliki bentuk yang agak kecil jika dibandingkan dengan butir ferit yang mengalami proses pemanasan ulang (reheating) hingga temperatur 1150°C yang kemudian didinginkan hingga temperatur ruang lalu dipanaskan kembali hingga temperatur 650°C kemudian dilakukan deformasi bolak balik (gambar 4.5).

Dari hasil pengamatan selanjutnya, morfologi butir ferit hasil proses pemanasan ulang (reheating) temperatur 650°C kemudian dilakukan deformasi bolak balik menghasilkan butir ferit yang sangat halus dan ukurannya seragam. Sedangkan morfologi butir ferit hasil proses pemanasan ulang (reheating) hingga temperatur 1150°C yang kemudian didinginkan hingga temperatur ruang lalu dipanaskan kembali hingga temperatur 650°C kemudian dilakukan deformasi bolak balik memiliki menghasilkan butir ferit yang halus namun ukurannya tidak seragam.

4.3.3 Hubungan Metode Canai Terhadap Besar Butir



Gambar 4. 10. Diameter Rata-Rata Butir (A) sampel awal; (F) proses F; dan (G) proses G

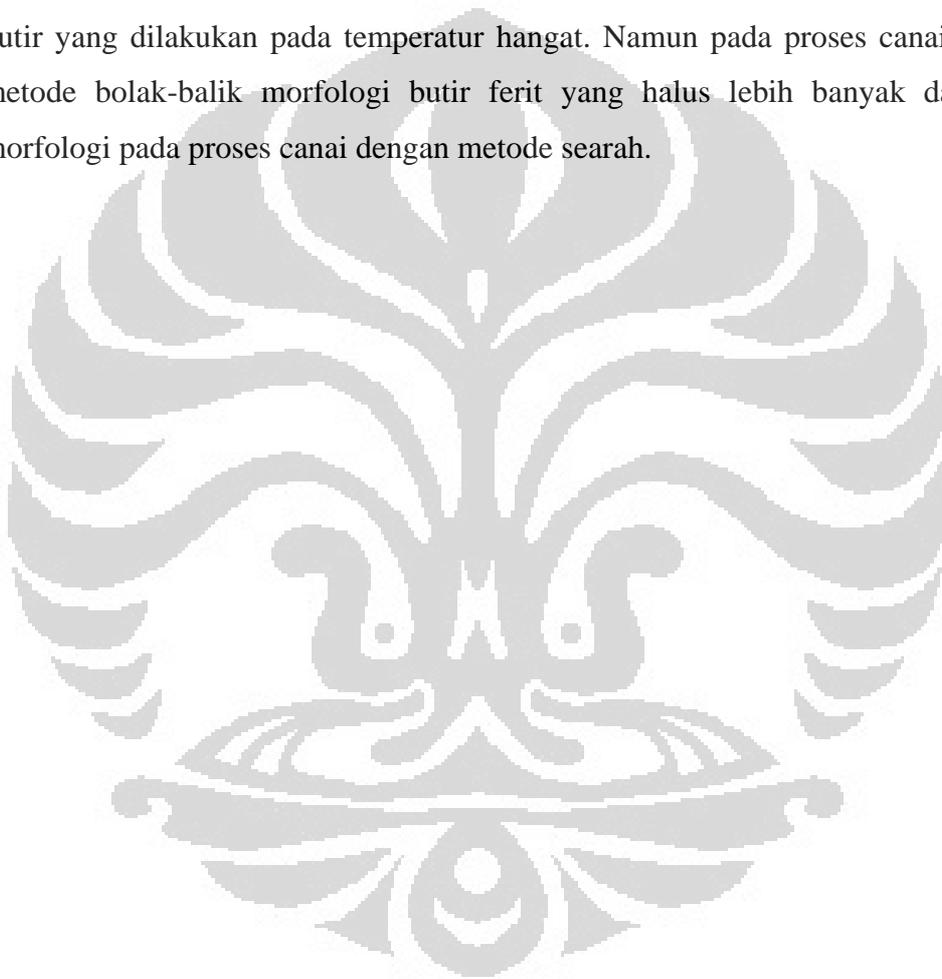
Perbedaan metode canai saat proses canai yang terjadi pada rentang temperatur pengerjaan hangat yang sebelumnya benda uji mengalami pemanasan ulang (reheating) kemudian dilanjutkan proses canai pada temperatur 650°C dan diakhiri dengan deformasi canai. Metode canai yang dilakukan dibagi menjadi dua yaitu metode searah / *single-pass roll* (Proses F) dan metode bolak balik / *reverse* (Proses G).

Menurut gambar 4.12. grafik perubahan butir antara material awal, material setelah proses F (Sampel F) dan material setelah proses G (Sampel G) menunjukkan bahwa terjadi perubahan besar butir cenderung membesar pada setelah proses F dan cenderung menurun setelah proses G. Secara kuantitatif, perbedaan metode deformasi ini tentunya menghasilkan besar butir yang berbeda pula. Seperti pada gambar 4.6, setelah proses F (Sampel F) besar diameter rata-rata butir yang di dapat sebesar 11.635 µm dan pada gambar 4.7 setelah proses G besar diameter rata-rata butir yang di dapat sebesar 9.645 µm.

Secara kualitatif, hasil pengamatan struktur mikro dapat dilihat pada gambar 4.6 hingga 4.7. Dari hasil pengamatan struktur mikro terlihat bahwa butir

ferit yang mengalami proses canai pada temperatur hangat 650°C dengan metode searah / *single-pass roll* (gambar 4.6) memiliki bentuk yang agak besar jika dibandingkan dengan butir ferit yang mengalami proses canai dengan metode bolak balik / *reverse* (gambar 4.7). Hasil ini diakibatkan oleh besar deformasi pada proses canai searah lebih kecil dibanding proses canai bolak-balik.

Dari hasil pengamatan selanjutnya, morfologi dari butir ferit di kedua material terlihat acak pada suatu posisi dan berbentuk pipih akibat penghalusan butir yang dilakukan pada temperatur hangat. Namun pada proses canai dengan metode bolak-balik morfologi butir ferit yang halus lebih banyak dari pada morfologi pada proses canai dengan metode searah.



BAB 5 KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

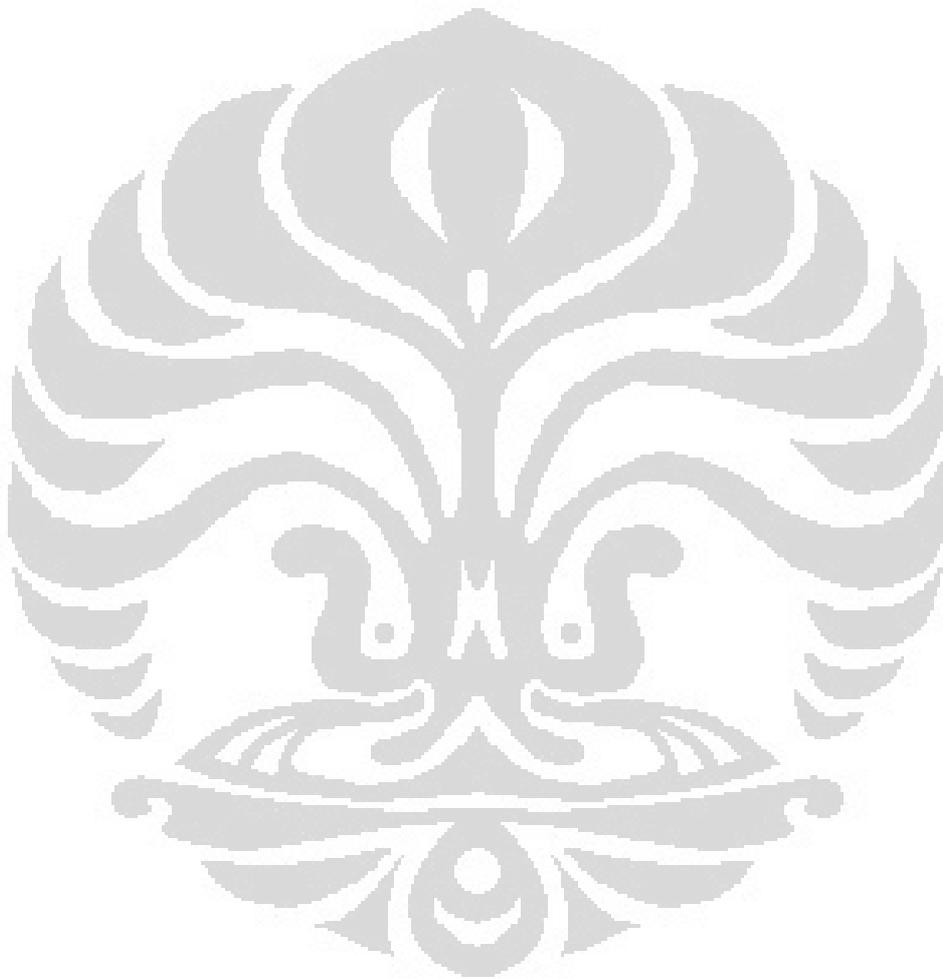
Dari hasil pengujian dan analisis yang Penulis lakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada proses B dimana temperatur akhir canai dilakukan pada 950°C besar butir ferit yang di dapat $11.122\ \mu\text{m}$ lebih kecil dibandingkan pada proses C dimana temperatur akhir canai dilakukan pada 650°C besar butir ferit yang di dapat $11.912\ \mu\text{m}$ yang diakibatkan adanya jeda waktu antar deformasi sehingga terjadi pertumbuhan butir pada ferit sebelum deformasi akhir
2. Pada proses D yang mana proses pemanasan kembali / *reheating* pada temperatur 1150°C akan menghasilkan besar butir ferit lebih besar ($12.874\ \mu\text{m}$) dibandingkan dengan proses E yang hanya mengalami pemanasan kembali / *reheating* pada temperatur 650°C ($7.697\ \mu\text{m}$)
3. Besar deformasi memberikan pengaruh pada ukuran akhir besar butir ferit, yaitu pada proses F dimana metode deformasi searah (20%) akan didapatkan ukuran butir ferit yang lebih besar ($11.635\ \mu\text{m}$) dibandingkan dengan proses G dimana metode deformasi bolak-balik / *reversible* (20%+20%) didapatkan ukuran butir ferit ($9.645\ \mu\text{m}$).
4. Dari keseluruhan proses, dapat disimpulkan bahwa proses deformasi pada temperatur 650°C dengan deformasi (20%+20%) secara *reversible* akan menghasilkan ukuran butir $7.697\ \mu\text{m}$ (proses D).

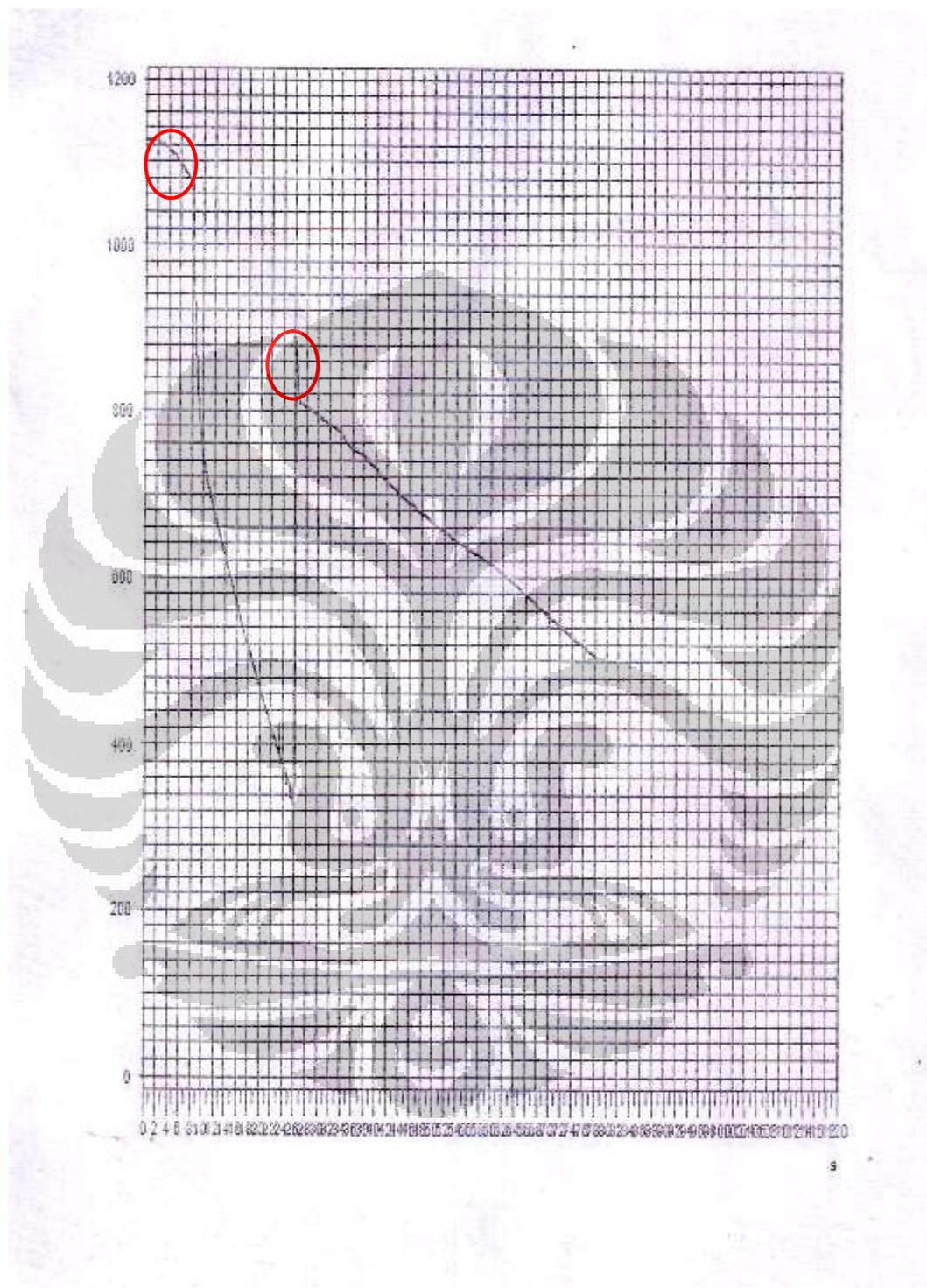
DAFTAR REFERENSI

- [1] ASM Specialty Handbook, *Carbon and Alloy Steel*, (ASM International, 1996)
- [2] William D. Callister, Jr., *Materials Science and Engineering An Introduction* 7th Edition (USA: 2007)
- [3] Imai, Shiro. Proceedings of The Twelfth (2002) International Offshore and Polar Engineering Conference Kitakyushu, Japan, May 26-31, 2002. "General Properties of TMCP Steels". Plate Technical Dept., Nippon Steel Corporation. Tokyo Japan. *ISBN 1-880653-58-3 (Set); ISSN 1098-6189 (Set)*
- [4] Dryden, John. "Controlled Rolled XLERPLATE® - Strong, Tough and Weldable" Diakses 3 Des. 2008 dari www.bluescopesteel.com.au/go/news/controlled-rolled-xlerplate-strong-tough-and-weldable
- [5] Nicholas, Joanne. "What are TMCP (Thermo-Mechanically Controlled Processed) steels?" Copyright © 2000, TWI Ltd. Diakses 2 Des. 2008 <http://www.twi.co.uk/content/faqjmn002.html>
- [6] Yokota, Tomoyuki."Ferrite grain size refinement through $\gamma \rightarrow \alpha$ transformation". NKK Corp. (JFE group)
- [7] 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
- [8] I.Kozasu:Materials Science and Technology,vol.7 Constitution and Properties of Steels Ed. By F.B.Pickering,VCH,(1993),184.
- [9] H. K. D. H. BHADESHIA. 2001. Bainite In Steels: Transformations, Microstructure And Properties. Second Edition. (IOM Communications Ltd.)
- [10] C.H Lee, Bhadesia, H.-C Lee. "Effect of plastic deformation on the formation of acicular ferrite." (*Materials Science and Engineering A360* (2003) 249-257)

- [11] ASTM E 112-96 rev, *Standart Test Methods for Determining Average Grain Size*, (ASTM International, 2000)

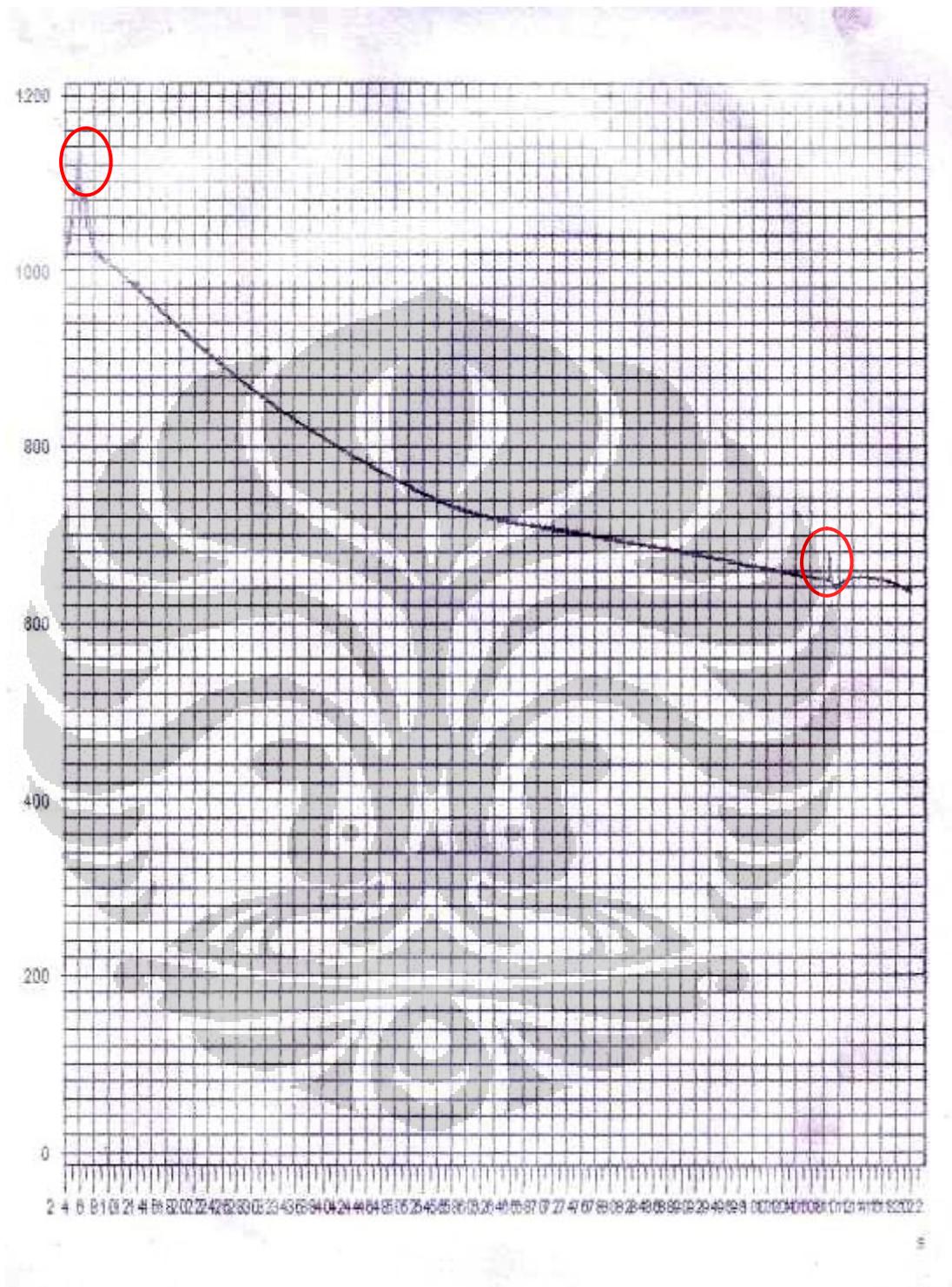


Lampiran 1. Kurva Proses B



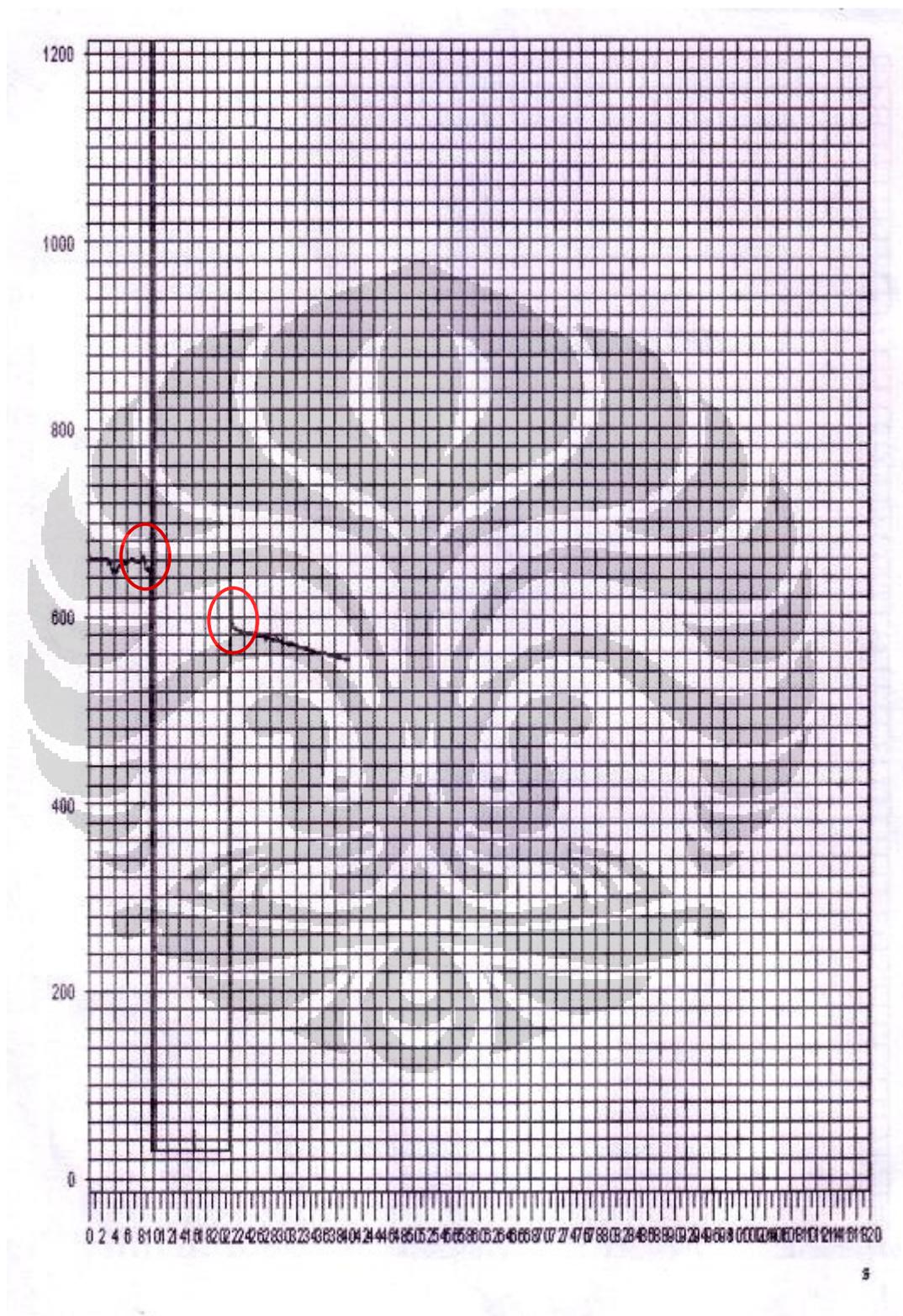
Tanda **○** menandakan letak terjadinya deformasi canai.

Lampiran 2. Kurva Proses C



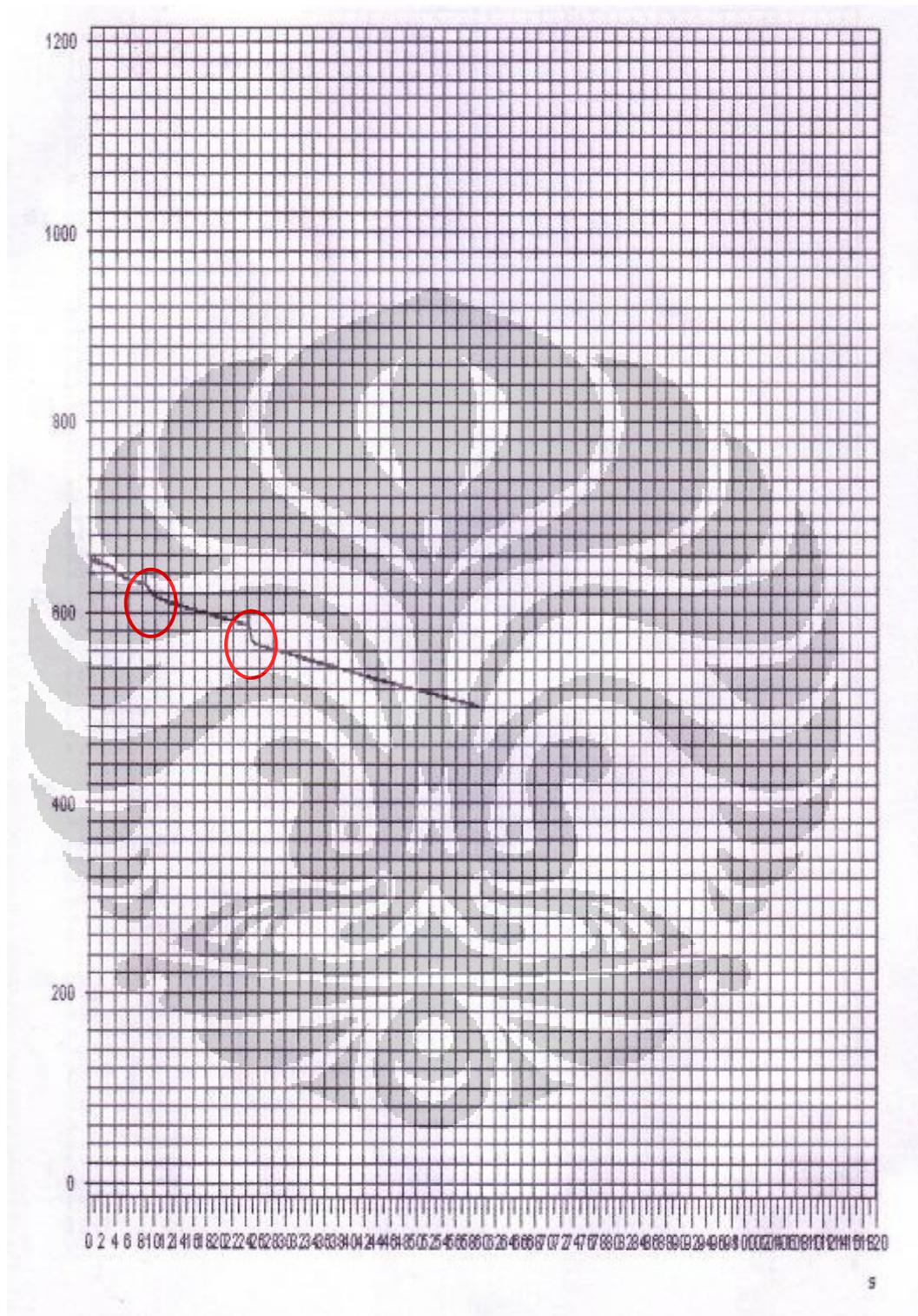
Tanda **O** menandakan letak terjadinya deformasi canai.

Lampiran 3. Kurva Proses D



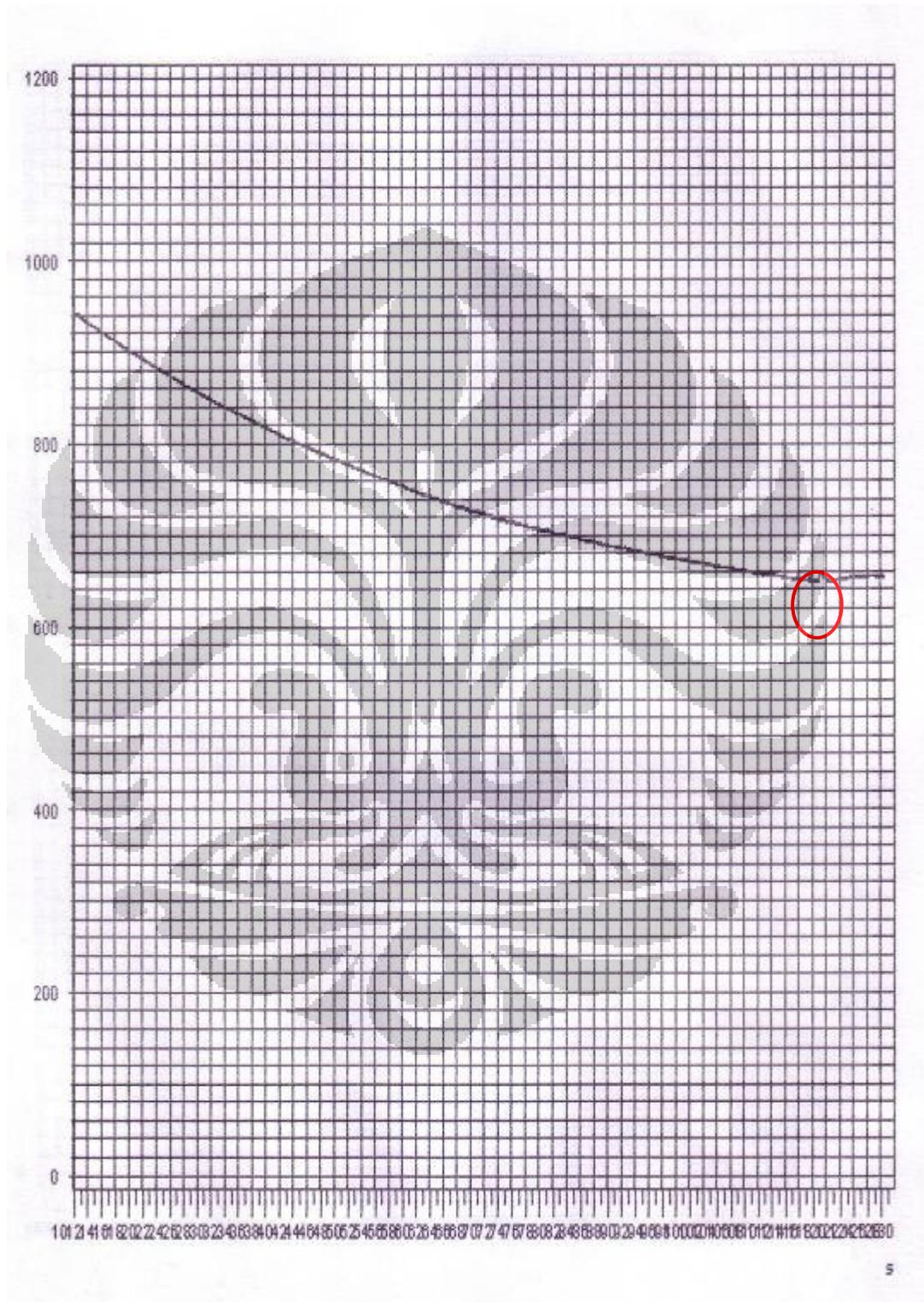
Tanda **○** menandakan letak terjadinya deformasi canai.

Lampiran 4. Kurva Proses E



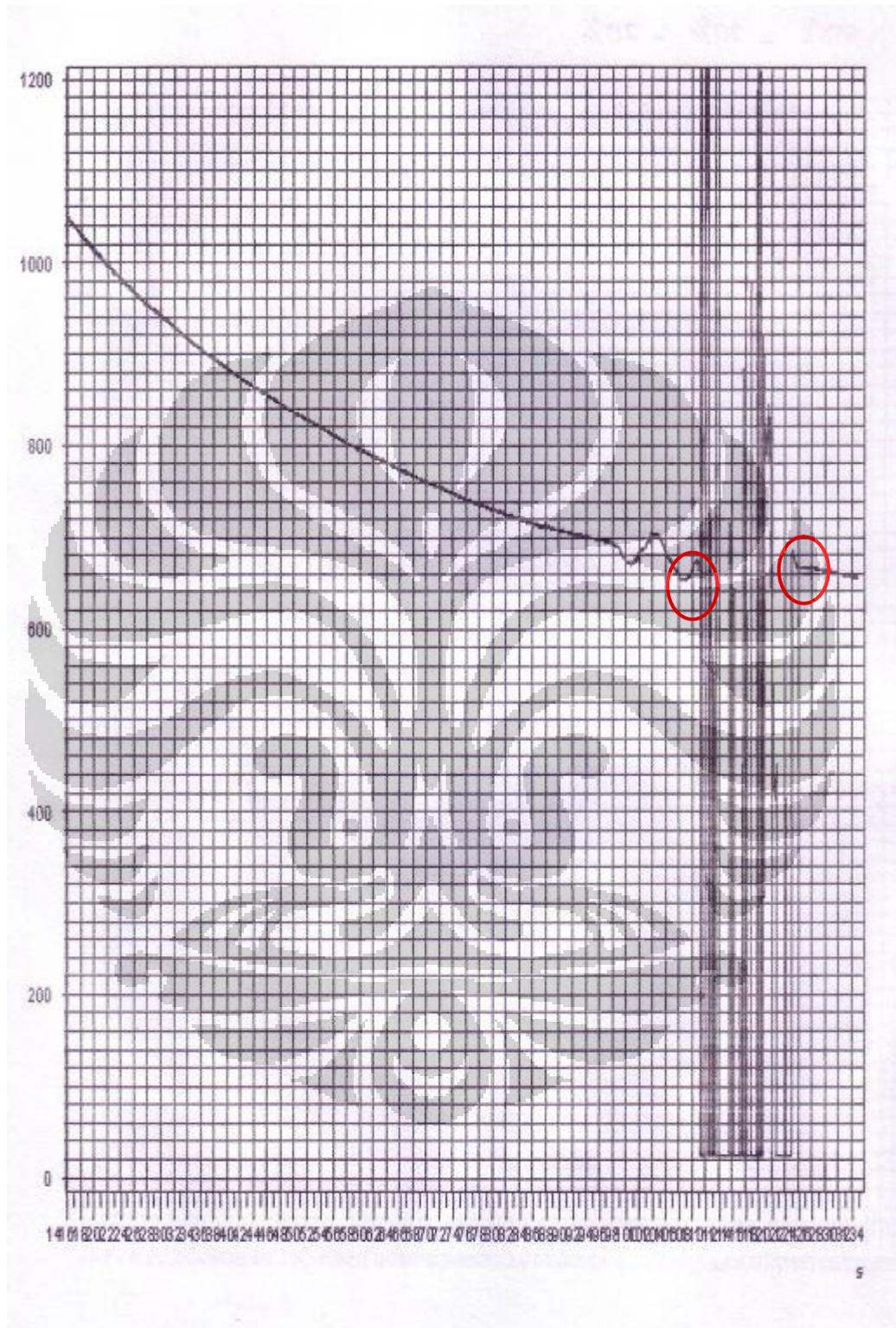
Tanda **O** menandakan letak terjadinya deformasi canai.

Lampiran 5. Kurva Proses F



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

Lampiran 6. Kurva Proses G



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

Lampiran 8. Hasil Spectrometer



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

LABORATORIUM UJI MATERIAL

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

LAPORAN PENGUJIAN KOMPOSISI KIMIA COMPOSITION TEST REPORT

Hal 1 dari 1

No Laporan <i>Report Nr</i>	0267	Bahan <i>Material</i>	Low C Steel
Pemakai Jasa <i>Customer</i>	Bpk. Jordan Suharto	Identitas Bahan <i>Material Identity</i>	Low C Steel
Alamat <i>Address</i>	-	Tanggal Terima <i>Receiving Date</i>	30 April 2009
No Kontrak <i>Contract Nr.</i>	0446/PT.02/FT04/P/2009	Standar <i>Standard</i>	ASTM A751
Tanggal Uji <i>Date of Test</i>	6 Mei 2009	Mesin Uji <i>Testing machine</i>	Optical Emission Spectrometer

Kode Sampel <i>Sample Code</i>	C (%)	Si (%)	S (%)	P (%)	Mn (%)	Ni (%)	Cr (%)
Low C Steel	0.157	0.310	0.013	0.017	1.10	0.007	0.003
	Mo (%)	Ti (%)	Cu (%)	Nb (%)	V (%)	Al (%)	Fe (%)
	< 0.005	< 0.002	0.005	< 0.002	< 0.002	0.028	98.321

Depok, 8 Mei 2009

LABORATORIUM UJI MATERIAL
Manajer Teknis,

(Ahmad Ivan Karayan, ST, M.Eng)

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