



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI PENGARUH DEFORMASI DAN TEMPERATUR TERHADAP
BESAR BUTIR FERIT PADA BAJA HSLA A572 GRADE 50 HASIL
PROSES CANAI PANAS**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana

**GILANG PRABOWO
0606074911**

**FAKULTAS TEKNIK METALURGI & MATERIAL
PROGRAM STUDI S1 REGULER
DEPOK
JUNI 2010**

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Gilang Prabowo

NPM : 0606074911

Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material

Judul Skripsi : Studi Pengaruh Deformasi dan Temperatur Terhadap Besar Butir Ferit Pada Baja HSLA A572 Grade 50 Hasil Proses Canai Panas

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 : Dr. Ir Dedi Priadi, DEA ()

Penguji 1 : Dr. Ir Winarto, M.Sc ()

Penguji 2 : Dr. Ir Myrna Ariati, M.S ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal :

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis sampailam ke hadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-nya sehingga penulisan skripsi ini dapat diselesaikan sesuai dengan waktu yang telah direncanakan. Adapun tujuan dari penulisan skripsi ini adalah untuk memenuhi persyaratan dalam mencapai gelar Sarjana Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis menyadari bahwa skripsi ini tidak akan dapat diselesaikan dengan baik tanpa adanya bantuan, bimbingan dan dorongan baik moral maupun materiil dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis juga ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Ir. Dedi Priadi DEA, selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, dorongan, serta motivasi dalam menyelesaikan skripsi ini.
2. Seluruh dosen dan staf pengajar Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI yang telah memberikan pengetahuan dan ilmi yang bermanfaat.
3. Bapak Richar A.M Napitupulu yang telah memberikan topic serta bantuan serta saran yang membangun selama penelitian.
4. Rekan-rekan satu Tim Penelitian dan Tugas Akhir yaitu Agus Somantri alias Aso (tetap semangat), Anugrah Martua Raja alias Coki kapan kita ngadu PES lagi, R, Bagus (terima kasih atas printernya).
5. Rekan-rekan *Warm Rolling* yaitu Amri Kiswara (Amoy), Nofardiansyah (bejo), Ali Mahardika, Ronald Hasian (kronal), Bintang Suryo.
6. Ibu, Bapak dan seluruh anggota keluarga terima kasih atas do'a, cinta, kasih sayang, motivasi, serta dukungan moril yang telah diberikan kepada penulis.
7. Hany Fauzia terima kasih atas cinta dan inspirasi yang telah diberikan selama ini.
8. Semua pihak, baik secara langsung maupun tidak langsung yang telah membantu penulis namun tidak bisa disebutkan satu persatu

Depok, Junmi 2010

Penulis

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

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

Nama : Gilang Prabowo

NPM : 0606074911

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 (*Nonexclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

Studi Pengaruh Deformasi dan Temperatur Terhadap Besar Butir Ferit Pada Baja HSLA A572 Grade 50 Hasil Proses Canai Panas

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 : 25 Juni 2010

Yang menyatakan

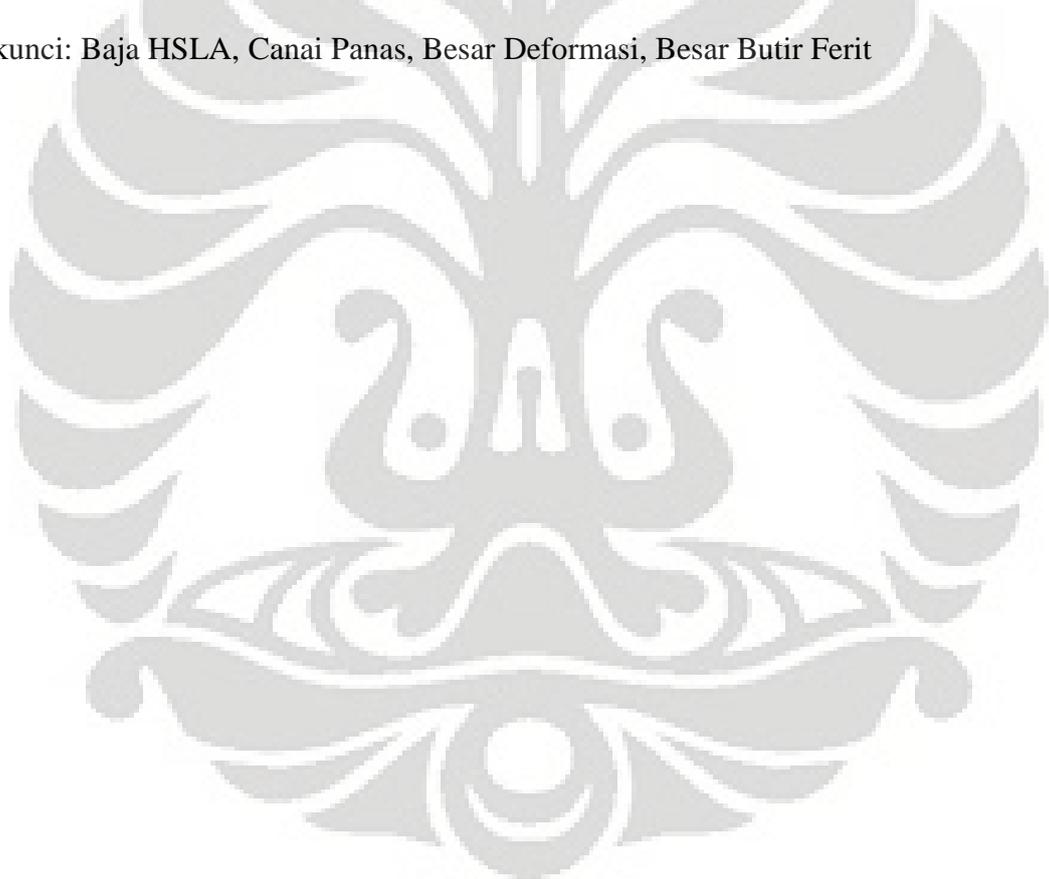
(Gilang Prabowo)

ABSTRAK

Nama : Gilang Prabowo
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul : Studi Pengaruh Deformasi dan Temperatur Terhadap Besar Butir Ferit pada Baja HSLA A 572 Grade 50 Hasil Proses Canai Panas

Penelitian ini bertujuan untuk melihat pengaruh deformasi dan temperatur deformasi terhadap besar butir ferit dan persentase fasa ferit pada Baja HSLA A572 Grade 50 hasil proses canai panas. Benda uji berupa baja paduan rendah kekuatan tinggi (HSLA) dengan kandungan 0.028% Nb, 0,0085%C dan sejumlah kecil paduan lainnya yang di *reheating* pada temperatur sekitar 1150°C kemudian dilakukan canai panas pada temperatur 850°C dan 950°C dengan besar reduksi 0,1; 0,2; 0,3 kemudian dilakukan pendinginan udara. Perhitungan besar butir menggunakan metode *intercept* (ASTM E112). Dari hasil penelitian didapat dengan bertambahnya deformasi maka besar butir ferit akan semakin mengecil dan semakin besar laju pendinginan maka persentase fasa ferit yang dihasilkan akan semakin kecil.

Kata kunci: Baja HSLA, Canai Panas, Besar Deformasi, Besar Butir Ferit

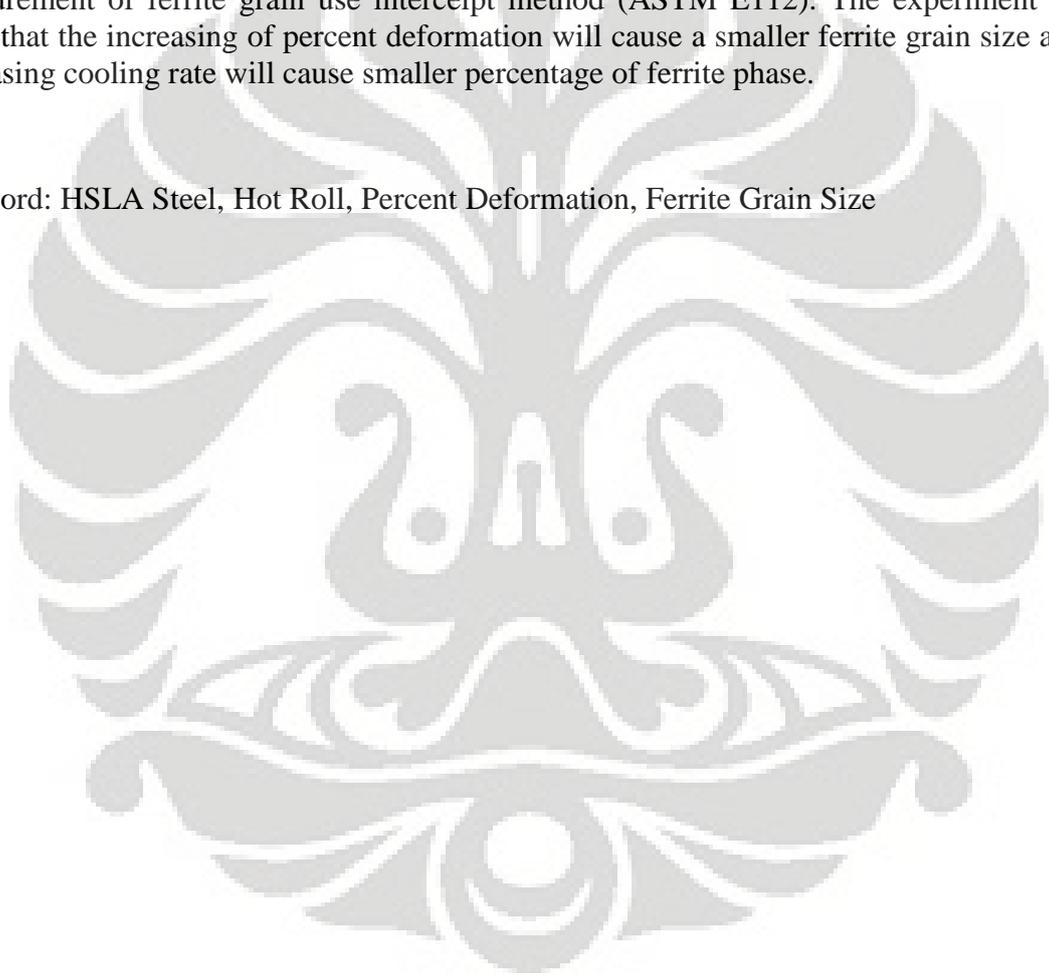


ABSTRACT

Name : Gilang Prabowo
Study Program : Metallurgy and Material Engineering
Title : Study of Influence of Deformation and Temperature to the Ferrite Grain Size at HSLA A572 Grade 50 Steel as Hot Roll Process Product

The main purpose of this research is to study the effect of deformation and temperature deformation to the ferrite grain size and percentage of ferrite phase at HSLA A572 Grade 50 steel as a hot rolling process product. The specimen is High Strength Low Alloy Steel with 0,0285Nb, 0,0085%C content and other low alloy that reheated at 1150°C temperature and then hot rolled at 850°C and 950°C with deformation 0,1; 0,2 and 0,3 then air cooled. The measurement of ferrite grain use intercept method (ASTM E112). The experiment results show that the increasing of percent deformation will cause a smaller ferrite grain size and the increasing cooling rate will cause smaller percentage of ferrite phase.

Keyword: HSLA Steel, Hot Roll, Percent Deformation, Ferrite Grain Size



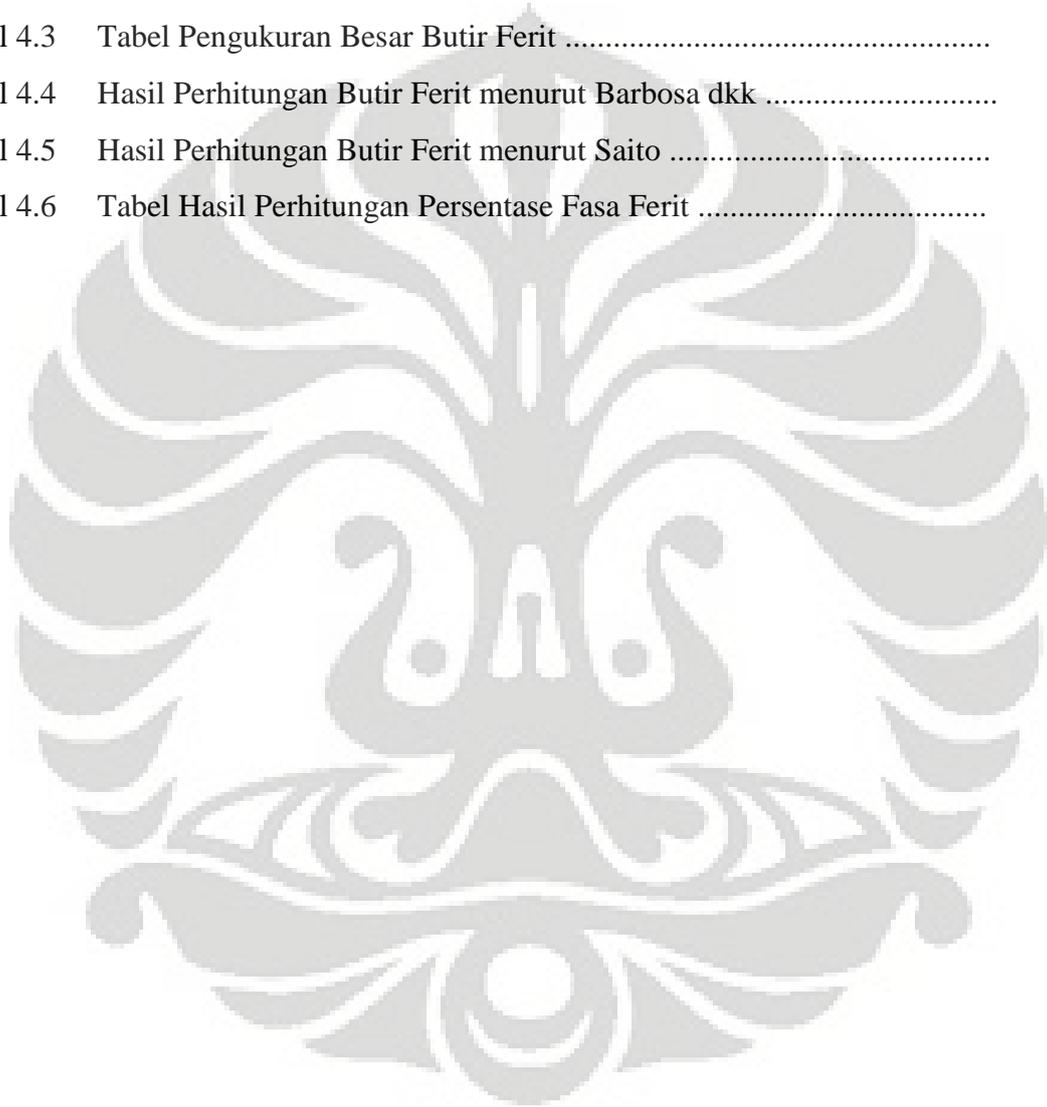
DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan	1
1.3 Ruang Lingkup	2
	2
BAB 2 Tinjauan Pustaka	
2.1 <i>Thermomechanical Processing</i> Baja HSLA	4
2.2 Proses Canai Panas	4
2.3 Kelarutan Karbida	5
2.4 Pengaruh Deformasi Plastis Terhadap Struktur Mikro	8
2.5 Penghalusan Butir Ferit.....	8
2.6 <i>Recovery</i> , Rekrystalisasi, Dan Pertumbuhan Butir	9
2.6.1 <i>Recovery</i>	10
2.6.2 Rekrystalisasi	10
2.6.3 Pertumbuhan Butir	12
2.7 Transformasi Pada Saat Pendinginan	14
2.7.1 Diagram TTT	14
2.7.2. Pertumbuhan Ferit	14
2.7.3 Pembentukan Struktur Perlit	17

2.8 Tinjauan Perumusan Kinetika	18
2.8.1 Perumusan Dalam Menentukan Ukuran Butir Ferit	18
2.8.2 Perumusan Dalam Menghitung Persentase Fasa Ferit	18
	19
BAB 3 METODE PENELITIAN	
3.1 Diagram Alir Penelitian	21
3.2 Bahan Sampel Penelitian	21
3.3 Peralatan Penelitian	22
3.4 Prosedur Penelitian	22
3.4.1 Pembuatan Benda Uji	24
3.4.2 Proses Pemanasan	24
3.4.3 Proses Canai Panas	25
3.4.4 Proses Pendinginan	25
3.4.5. Preparasi, Pengujian Metalografi dan Pengamatan Mikrostruktur	26
3.4.6. Penghitungan Besar Butir Ferit	26
	27
BAB 4 HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	
4.1 Hasil Pengujian	28
4.1.1 Hasil Pengukuran Dimensi Benda Ui Setelah Proses Canai Panas	28
4.1.2 Hasil Pengukuran Regangan	28
4.2 Hasil Pengamatan Metalografi	28
4.3 Penghitungan Butir Ferit	29
4.3.1 Besar Butir Ferit Hasil Pecobaan	36
4.3.2 Besar Butir Ferit Menurut Model Empiris	36
4.4 Hasil Perhitungan Persentase Fasa Ferit	40
	43
BAB 5 KESIMPULAN	
	47
DAFTAR REFERENSI	
LAMPIRAN 1	48
LAMPIRAN 2	50
LAMPIRAN 3	51
LAMPIRAN 4	57

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Nilai Koefisien dan Standard Deviasi dari persamaan Sellars dan Beynon	19
Tabel 3.1	Komposisi Baja HSLA A572 Grade 50	22
Tabel 4.1	Pengukuran Dimensi Benda Uji Setelah Pencanaian	28
Tabel 4.2	Tabel Pengukuran Regangan Pada Benda Uji	28
Tabel 4.3	Tabel Pengukuran Besar Butir Ferit	37
Tabel 4.4	Hasil Perhitungan Butir Ferit menurut Barbosa dkk	41
Tabel 4.5	Hasil Perhitungan Butir Ferit menurut Saito	42
Tabel 4.6	Tabel Hasil Perhitungan Persentase Fasa Ferit	44



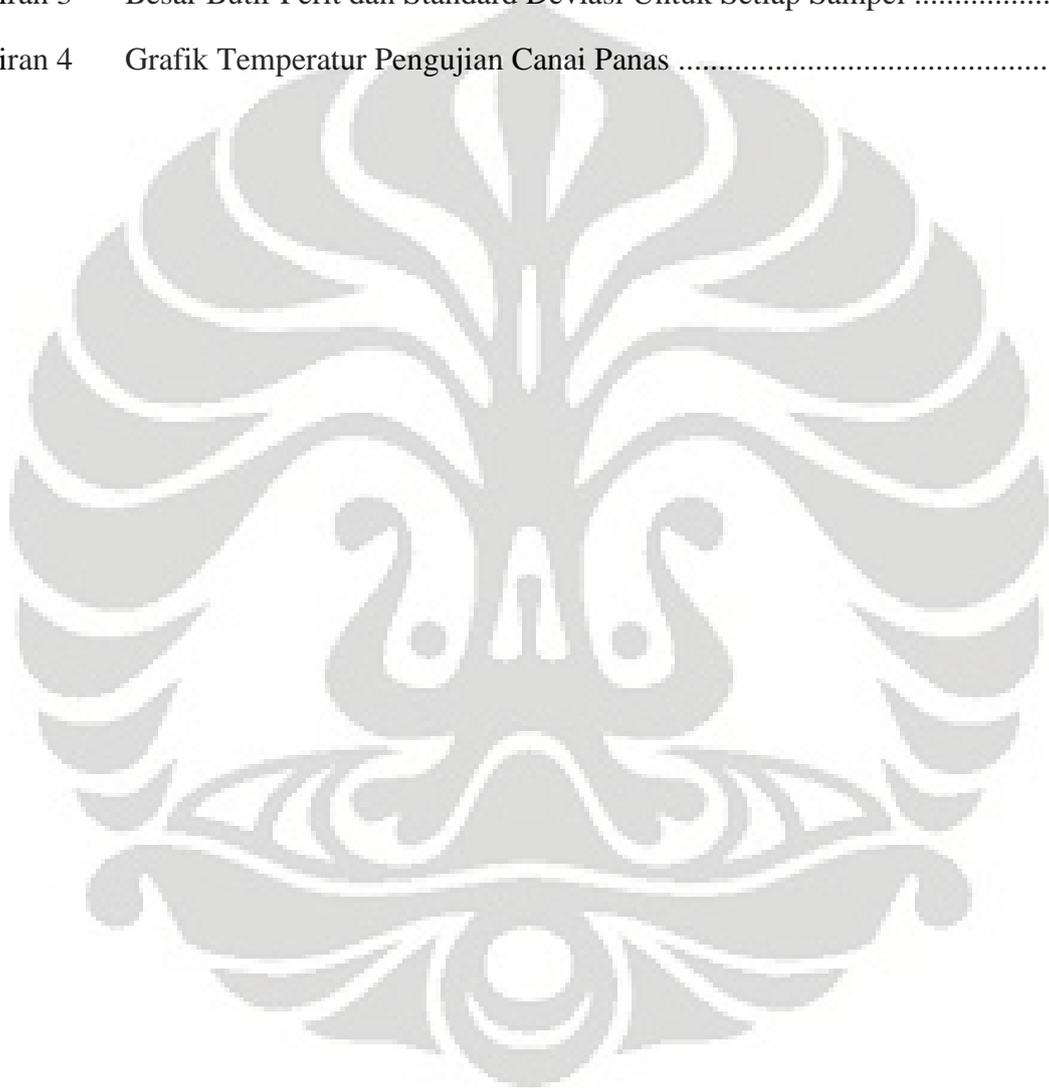
DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Perubahan ukuran Butir Selama proses Termomekanik	4
Gambar 2.2	Ilustrasi Tegangan Pada Proses Canai	6
Gambar 2.3	Ilustrasi Pertumbuhan Butir saat Canai Panas	7
Gambar 2.4	Skematis Pencapaian pada <i>Thermomechanical Processing</i>	7
Gambar 2.5	Skematis Proses <i>Recovery</i> , Rekristalisasi dan Pertumbuhan Butir	11
Gambar 2. 6	Pembentukan Sub-butir	12
Gambar 2.7	Perbandingan Antara Rekristalisasi Dinamik dan Statik	13
Gambar 2.8	Transformasi struktur mikro baja pada saat pendinginan baja (a)eutectoid (b) hipoeutektoid, dan (c) hipereutektoid	15
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian	21
Gambar 3.2	<i>Hardware</i> dan <i>Software</i> untuk proses canai panas. (a) komputer; (b) program aplikasi canai panas	23
Gambar 3.3	Peralatan proses canai panas. (a) Dapur <i>carbolite</i> ; (b) Mesin Ono Roll dua tingkat	23
Gambar 3.4	Perangkat Metalografi dan foto mikro. (a) Mesin Amplas-Poles; (b) Mikroskop Optik	24
Gambar 3.5	Gambar 3.5 Skema Pembacaan Temperatur pada Benda Uji	25
Gambar 4.1	Foto struktur mikro ferit baja HSLA, setelah deformasi 12% pada temperatur 850°C etsa Nital 2%..(Perbesaran 200x)	29
Gambar 4.2	Foto struktur mikro ferit baja HSLA, setelah deformasi 12% pada temperatur 850°C etsa Nital 2%..(Perbesaran 500x)	29
Gambar 4.3	Foto struktur mikro ferit baja HSLA, setelah deformasi 21% pada temperatur 860°C etsa Nital 2%..(Perbesaran 200x)	30

Gambar 4.4	Foto struktur mikro ferit baja HSLA, setelah deformasi 21% pada temperatur 860°C etsa Nital 2%..(Perbesaran 500x)	30
Gambar 4.5	Foto struktur mikro ferit baja HSLA, setelah deformasi 25% pada temperatur 860°C etsa Nital 2%..(Perbesaran 200x)	31
Gambar 4.6	Foto struktur mikro ferit baja HSLA, setelah deformasi 25% pada temperature 860°C Nital etsa 2%..(Perbesaran 500x)	31
Gambar 4.7	Foto struktur mikro ferit baja HSLA, setelah deformasi 7% pada temperatur 980°C etsa Nital 2%..(Perbesaran 500x)	32
Gambar 4.8	Foto struktur mikro ferit baja HSLA, setelah deformasi 7% pada temperatur 900°C etsa Nital 2%..(Perbesaran 1000x)	32
Gambar 4.9	Foto struktur mikro ferit baja HSLA, setelah deformasi 12% pada temperatur 960°C etsa Nital 2%..(Perbesaran 500x)	33
Gambar 4.10	Foto struktur mikro ferit baja HSLA, setelah deformasi 12% pada temperatur 960°C etsa Nital 2%..(Perbesaran 1000x)	33
Gambar4.11	Foto struktur mikro ferit baja HSLA, setelah deformasi 17% pada temperatur 970°C etsa Nital 2%..(Perbesaran 1000x)	34
Gambar4.12	Foto struktur mikro ferit baja HSLA, didinginkan diudara pada pada temperatur 950°C tanpa deformasi etsa Nital 2%..(Perbesaran 500x) ..	34
Gambar4.13	Foto struktur mikro ferit baja HSLA, didinginkan diudara pada pada temperatur 850°C tanpa deformasi etsa Nital 2%..(Perbesaran 500x)	35
Gambar4.14	Foto struktur mikro ferit baja HSLA, didinginkan diudara pada pada temperatur 850°C tanpa deformasi etsa Nital 2%..(Perbesaran 1000x)	35
Gambar4.15	Grafik hubungan antara besar butir ferit dengan besar deformasi	38
Gambar4.16	Grafik besar butir ferit menurut Barbosa	41
Gambar4.17	Grafik besar butir ferit menurut Saito	42
Gambar4.18	Grafik perbandingan antara besar butir ferit berdasarkan percobaan dengan model Barbosa dan Saito	43
Gambar4.19	Grafik persentase fasa ferit terhadap besar deformasi canai panas	44
Gambar4.20	Grafik persentase fasa ferit terhadap laju pendinginan setelah deformasi canai panas	45

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Perhitungan Temperatur Kelarutan Presipitat	50
Lampiran 2	Perhitungan Butir Ferit Metode <i>Intercept Heyn</i>	51
Lampiran 3	Besar Butir Ferit dan Standard Deviasi Untuk Setiap Sampel	57
Lampiran 4	Grafik Temperatur Pengujian Canai Panas	59



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan material pada saat ini mengalami perkembangan dari tahun ke tahun, dimana baja adalah salah satu material yang mempunyai peranan penting dalam perkembangan teknologi. Sehingga berbagai penelitian dilakukan untuk mengembangkan material ini dengan tujuan untuk meningkatkan sifat mekanisnya. Dimana untuk mendapatkan sifat mekanis yang baik dapat dilakukan dengan mengontrol mikrostruktur. Struktur butir yang diinginkan pada mikrostruktur akhir bergantung pada butir yang terbentuk selama proses pemanasan awal (*reheating*), dimana untuk mendapatkan butir ferit yang halus, maka harus terbentuk butir austenit yang berukuran kecil saat proses pemanasan awal. Untuk itu dibutuhkan suatu proses yang dapat mengontrol mikrostruktur baja karbon selama proses pemanasan awal (*reheating*), deformasi panas (*hot deformed*), serta pendinginan (transformasi akhir). Proses ini dikenal dengan nama proses pengontrolan termomekanik atau *Thermomechanical Control Process* (TMCP).

Dalam proses canai panas baja perubahan struktur yang sering diamati adalah proses rekristalisasi austenit dan transformasi ferit dari austenit dalam rangka mempelajari hubungannya dengan deformasi dan temperatur canai dan pada baja HSLA A572 grade 50, perubahan struktur juga diikuti dengan adanya presipitasi karbida/ karbonitrida yang berperan cukup besar dalam pengontrolan ukuran butir.

Proses transformasi ferit dari austenit selanjutnya akan menjadi bagian terpenting dalam mengontrol ukuran butir. Ukuran butir ferit yang halus dapat diperoleh dengan mengatur besar deformasi dan laju pendinginan. Pada baja HSLA adanya presipitat karbida/ karbonitrida yang terbentuk dalam proses canai panas dapat menahan pertumbuhan butir austenit, dimana karbida kompleks yang terlarut dalam austenit (*carbide forming elements*) merupakan elemen *deep hardening* yang kuat. Karbida berfungsi untuk menaikkan kekerasan, kekuatan dan ketahanan aus (*wear resistance*)^[1].

Karbida kompleks yang tidak terlarut dalam austenit akan menurunkan pertumbuhan butir dan mengurangi *hardenability*. Kekerasan dan *wear resistance* suatu paduan yang kaya karbida ditentukan oleh jumlah, ukuran dan distribusi partikel karbidanya. Pengaruh unsur paduan tersebut dikontrol oleh komposisi komposisi kimia, metode manufakturnya dan perlakuan panas sehingga dapat dilihat peranan karbida dalam pertumbuhan ferit yang optimal.

Secara umum proses transformasi dipengaruhi oleh laju pendinginan sehingga dengan mengatur temperatur transformasi A_{r3} dan laju pendinginan yang tepat dapat ditentukan laju nukleasi butir ferit. Hubungan antara pengaruh deformasi dan laju pendinginan terhadap butir ferit dapat disusun dalam perumusan kinetika sederhana yang merupakan salah satu metode permodelan mikrostruktur setelah deformasi^[1].

1.2 Tujuan Penelitian

1. Mengamati pengaruh deformasi dan temperatur pengerolan terhadap ukuran butir ferrit pada baja HSLA hasil proses canai panas
2. Mengamati pengaruh deformasi dan temperatur terhadap fraksi fasa ferit. pada baja HSLA hasil proses canai panas

1.3 Ruang Lingkup

Ruang lingkup penelitian ini meliputi :

1. Penelitian dilakukan dengan menggunakan material baja HSLA A572 Grade 50
2. Proses TMCP pada baja HSLA
 - a. Temperatur *Reheating* : 1150° C dengan waktu tahan 15 menit
 - b. Reduksi ketebalan : 0,10; 0,20 dan 0,30
 - c. Media Pendinginan : udara
 - d. Proses deformasi dilakukan pada temperatur deformasi 860°C dan 950°C
3. Proses pengujian metalografi

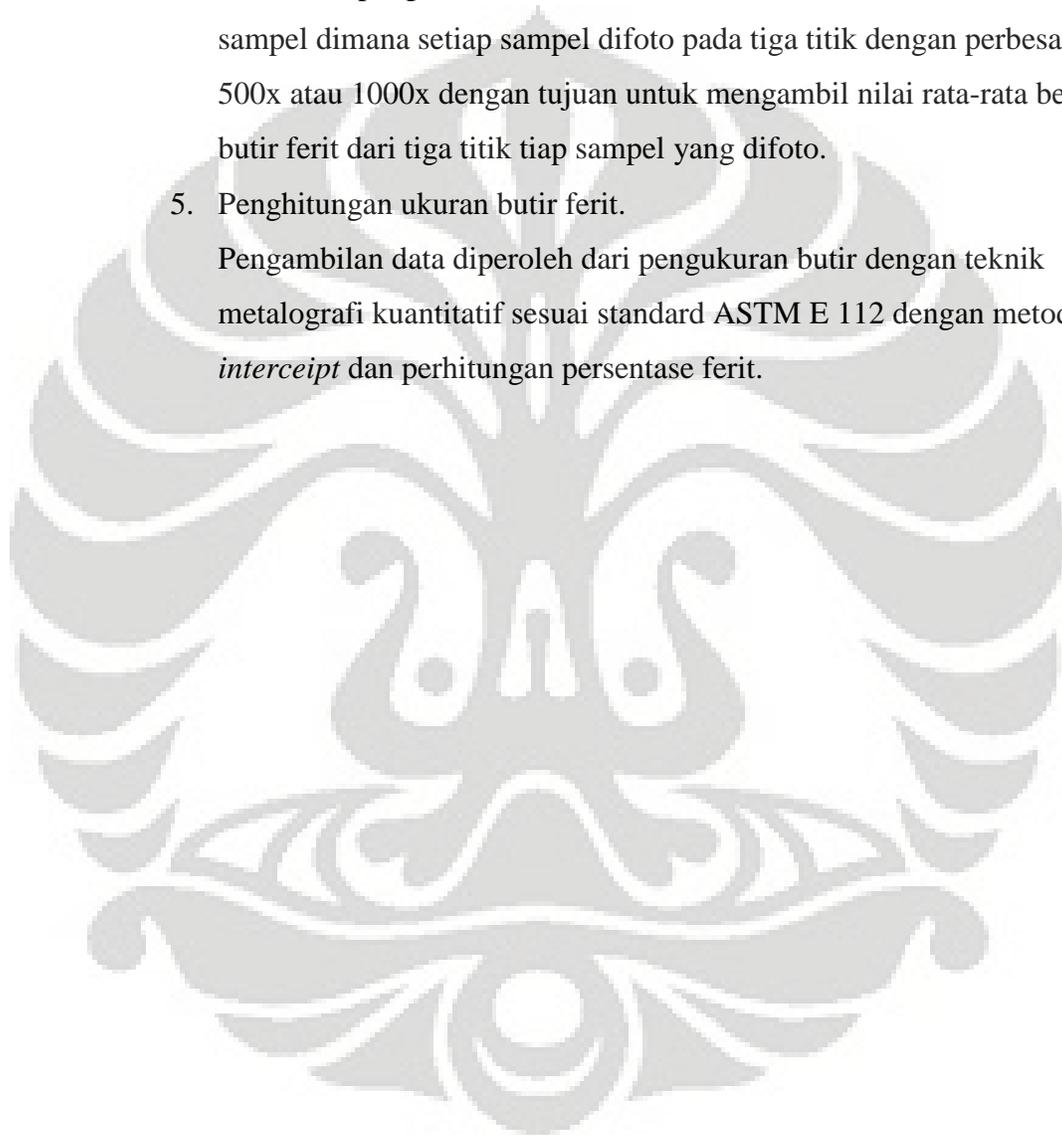
Dilakukan pengampelasan mulai dari ukuran mesh 80-1500 diikuti dengan pemolesan dengan cairan poles. Kemudian dilakukan pengetsaan dengan etsa nital 2-3% dengan waktu etsa 5-10 detik.

4. Foto mikro sampel baja HSLA hasil canai panas

Dilakukan pengambilan foto mikro dari struktur butir ferit untuk setiap sampel dimana setiap sampel difoto pada tiga titik dengan perbesaran 500x atau 1000x dengan tujuan untuk mengambil nilai rata-rata besar butir ferit dari tiga titik tiap sampel yang difoto.

5. Penghitungan ukuran butir ferit.

Pengambilan data diperoleh dari pengukuran butir dengan teknik metalografi kuantitatif sesuai standard ASTM E 112 dengan metode *intercept* dan perhitungan persentase ferit.

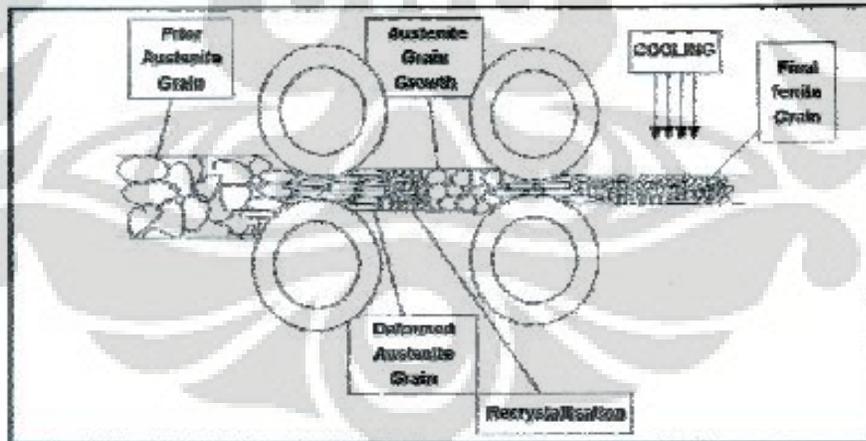


BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Thermomechanical Processing Baja HSLA

Proses termomekanik adalah suatu proses pengontrolan struktur mikro untuk mendapatkan sifat mekanis yang baik dari suatu material. Secara umum proses ini terdiri dari pemanasan awal (*reheating*), deformasi panas (*hot deformed*), serta pendinginan (transformasi akhir). Struktur butir yang diinginkan pada struktur mikro akhir bergantung pada butir yang terbentuk selama proses pemanasan awal (*reheating*), dimana untuk mendapatkan butir ferit yang halus, maka harus terbentuk butir austenit yang berukuran kecil saat proses pemanasan awal. Selain itu waktu tahan dan temperatur reheating juga mempengaruhi pertumbuhan besar butir austenit. Dimana semakin tinggi temperatur pemanasan maka ukuran butir menjadi semakin besar. Begitu juga dengan waktu tahan, semakin lama waktu tahan maka butir austenit akan semakin besar. Hal ini karena difusi butir ke butir lainnya dipengaruhi oleh waktu tahan dan temperatur *reheating*.



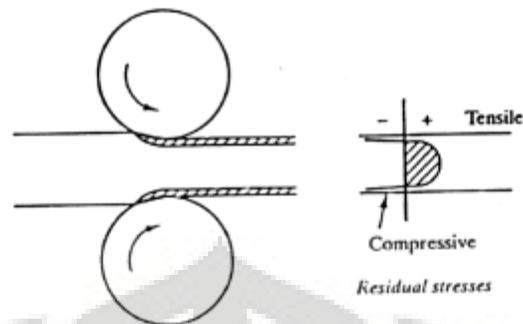
Gambar 2.1 Perubahan ukuran Butir Selama proses Termomekanik⁽²⁾

Pengontrolan butir austenit setelah proses canai panas, dimana rentang waktu antara canai panas dengan pendinginan akan memberikan waktu untuk butir austenit untuk mengalami *recovery*, rekristalisasi bahkan mengalami pertumbuhan butir.

2.2 Proses Canai Panas

Proses canai panas adalah suatu mekanisme kompresi tidak langsung karena gaya atau tegangan yang digunakan adalah tekanan radial dari canai itu sendiri. Tekanan ini akan mendeformasi material dan menarik material melalui celah (gap) canai. Proses ini dapat dibandingkan dengan proses kompresi atau tempa bedanya proses ini berlangsung secara kontinyu. Proses canai ini paling banyak digunakan dan oleh karena itu banyak sekali variasi yang dipergunakan di lapangan. Biasanya tergantung pada pengaturan dari canai pada *mills* atau pengaturan *stands* untuk canai⁽³⁾.

Proses canai panas adalah proses canai dengan temperatur diatas temperatur rekristalisasi dari material. Oleh karena itu, regangan yang terjadi karena proses pengubahan bentuk material akan dihilangkan oleh proses rekristalisasi⁽⁴⁾. Regangan yang terjadi pada proses deformasi material akan menghasilkan tegangan sisa. Hal ini disebabkan karena pada deformasi material (pada pengerjaan dingin) terjadi deformasi yang tidak homogen. Deformasi yang tidak homogen ini terjadi karena adanya perbedaan friksi antara benda kerja dengan alat pembentuk (*forming tools*). Seperti pada proses canai dingin, dengan persen reduksi area yang lebih rendah, deformasi akan terpusat pada permukaan material dimana friksi antara canai dan benda kerja terjadi. Lapisan dalam material akan mencegah pengembangan lapisan diatasnya Lapisan permukaan material benda kerja akan berusaha mengembang. Dengan demikian permukaan benda kerja akan mengalami tegangan tekan (*compressive stress*) sedangkan lapisan dalam akan mengalami tegangan tarik (*tension stress*). Ilustrasi ini dapat dilihat pada Gambar 2.2. Tegangan – tegangan inilah yang dikenal dengan tegangan sisa. Tegangan sisa sangat berpengaruh pada sifat – sifat material dan kinerja dari material itu sendiri.

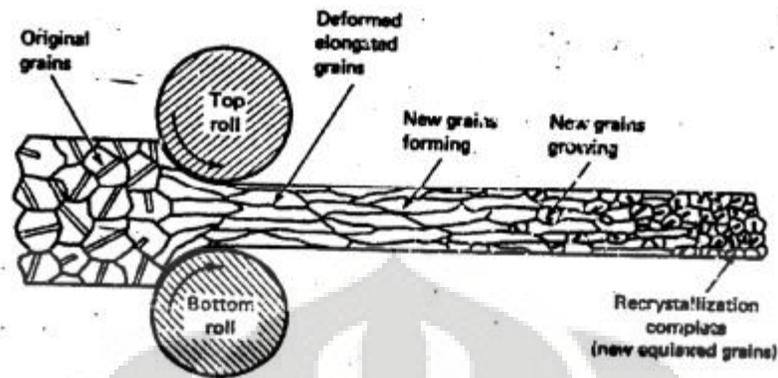


Gambar 2.2 Ilustrasi Tegangan Pada Proses Canai⁽⁴⁾

Sehingga secara umum untuk meningkatkan sifat material perlu dilakukan pengurangan atau penghilangan tegangan sisa yang dihasilkan oleh pengerjaan dingin, hal ini dapat dilakukan dengan beberapa cara, yaitu dengan perlakuan panas atau mekanis. Perlakuan mekanis yaitu dengan cara memberikan tegangan yang berlawanan atau memberikan deformasi plastis lanjut dengan tujuan memberikan kesempatan lepasnya tegangan yang tidak seragam. Sedangkan perlakuan panas dilakukan pada temperatur tertentu pada material, atau sering disebut *stress-relieving treatment*⁽⁴⁾.

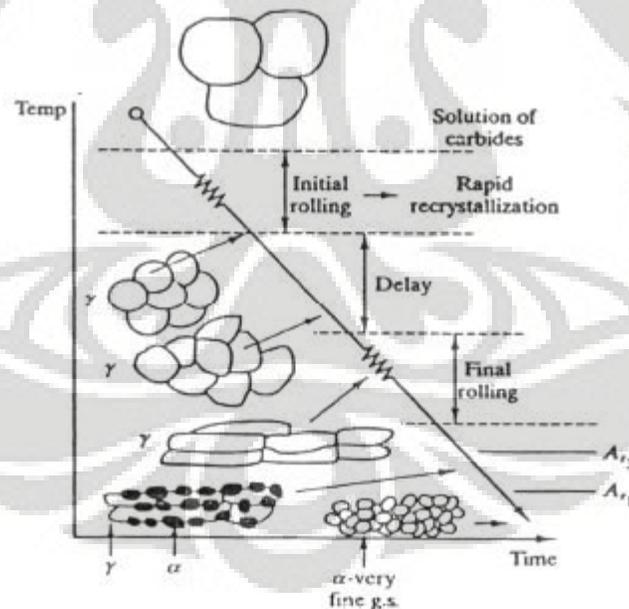
Proses canai panas adalah proses deformasi yang langsung diimbangi dengan proses perlakuan panas, sehingga tidak terjadi tegangan sisa. Yang terjadi pada proses ini adalah pergerakan dislokasi, *recovery*, rekristalisasi, dan pertumbuhan butir sehingga akan didapat material dengan sifat dan kinerja yang relatif lebih baik⁽⁵⁾.

Faktor yang penting pada proses canai panas adalah temperatur akhir proses, dimana proses canai panas harus berakhir pada temperatur tepat diatas temperatur rekristalisasi agar diperoleh ukuran butir yang kecil dan halus. Jika temperatur akhir jauh diatas temperatur rekristalisasi, pertumbuhan butir akan terjadi. Sedangkan jika temperatur akhir dibawah temperatur rekristalisasi, akan terjadi pengerasan regangan (*strain hardening*). Gambar 2.3 menunjukkan ilustrasi dari pertumbuhan butir pada saat dilakukan proses canai panas.



Gambar 2.3 Ilustrasi Pertumbuhan Butir saat Canai Panas⁽⁶⁾.

Pada temperatur diatas temperatur rekristalisasi, material akan menjadi lebih lunak dan lebih ulet dibandingkan pada temperatur ruang, sehingga tidak dibutuhkan tenaga yang besar untuk deformasi. Karena tidak ada pengerasan regangan, maka reduksi ukuran material yang tebal bisa dilakukan. Skematis dari *thermomechanical processing* dapat dilihat pada Gambar 2.4



Gambar 2.4 Skematis pencanaan pada *Thermomechanical Processing*⁽⁴⁾

2.3 Kelarutan Karbida

Pada proses pemanasan awal (reheating), penting untuk diperhatikan karena menentukan jumlah partikel presipitat karbida-Nb yang terlarut serta ukuran butir mula-mula dari austenit, kelarutan partikel karbonitrida ini merupakan fungsi dari temperatur, dimana Irvine dan Pickering telah merumuskan *solubility product* dari baja Nb sebagai

$$\text{Log (Nb).(C + 12/14.N)} = 2,26 - 6770/T \quad (2.1)$$

Dimana d adalah diameter partikel dan T adalah temperatur absolute partikel larut secara keseluruhan

Selama proses pemanasan, partikel karbida mampu mengunci batas butir sehingga menahan beberapa waktu pertumbuhan butir austenit. Namun apabila partikel telah mencapai temperatur T_c (*grain coarsening temperatur*), sebagian partikel akan larut dan akibatnya terjadi pengkasaran butir yang tidak seragam yang disebut pertumbuhan butir abnormal. Karena itu penentuan temperatur absolut diperlukan untuk mendapatkan ukuran butir austenit yang seragam, sebagai tahap awal proses canai panas.

2.4 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. 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

2.5 Penghalusan Butir Ferit

Penghalusan butir ferit dapat dihasilkan dari butir austenit yang diperhalus pada saat pendinginan ke temperatur ruang. Salain itu penambahan elemen seperti karbon, mangan dan niobium juga akan mengasilkan butir yang halus. Niobium merupakan paduan yang efektif untuk memperhalus butir dengan proses pencanaan terkendali. Pada permulaan canai panas, semua unsur Nb, C dan M akan larut dalam fasa austenit, namun presipitat akan terbentuk kembali pada saat temperatur pencanaan turun. Presipitat Nb yang terbentuk ini dipengaruhi oleh regangan atau sering disebut *Strain-induced precipitation*⁽⁶⁾. Adanya presipitat ini pada batas butir austenit yang terdeformasi akan menghambat rekristalisasi dengan cara menghasilkan inti dalam jumlah besar pada butir austenit yang telah terdeformasi sehingga akan

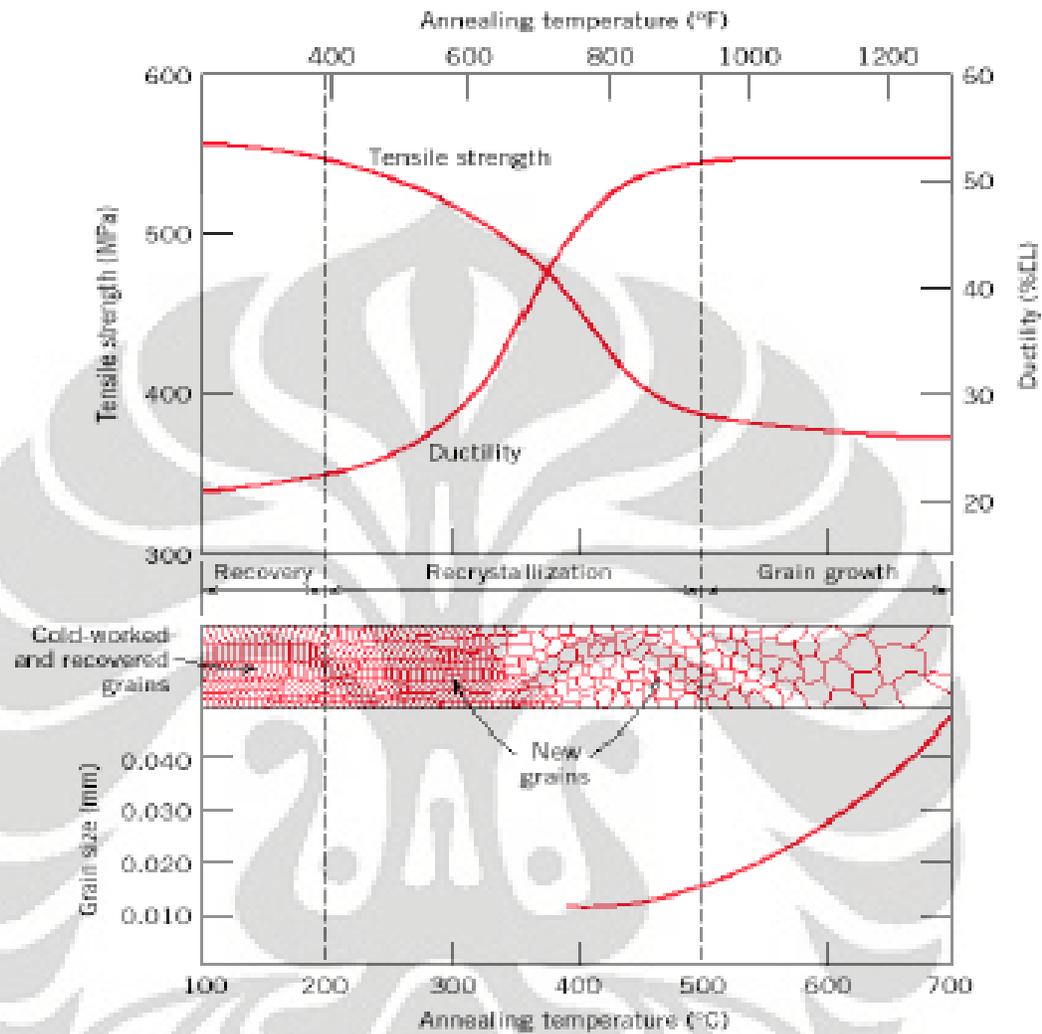
dihasilkan yang halus selama proses pendinginan. Namun adanya presipitat ini dalam butir hanya akan terbentuk apabila dibawah temperatur 900°C sebab pada temperatur dibawah 900°C , pembentukan presipitat akan terjadi lebih cepat dibandingkan dengan rekristalisasi. Sehingga semakin banyak butir austenit yang terbentuk maka ukuran butir ferit semakin kecil akibatnya sifat mekanis akan semakin baik.

Mekanisme penguatan yang paling sering digunakan pada baja HSLA adalah penghalusan butir ferit dengan proses canai panas setelah itu barulah mekanisme penguatan presipitat. Partikel yang terbentuk pada temperatur tinggi dalam austenit, walaupun efektif untuk control pertumbuhan butir, tidak akan menyebabkan penguatan karena partikel tersebut terlalu besar. Partikel yang menyebabkan penguatan adalah yang terbentuk pada temperatur rendah dalam austenit, pada transformasi austenit-ferit, dan di dalam ferit selama pendinginan.

2.6 Recovery, Rekristalisasi, Dan Pertumbuhan Butir

2.6.1 Recovery

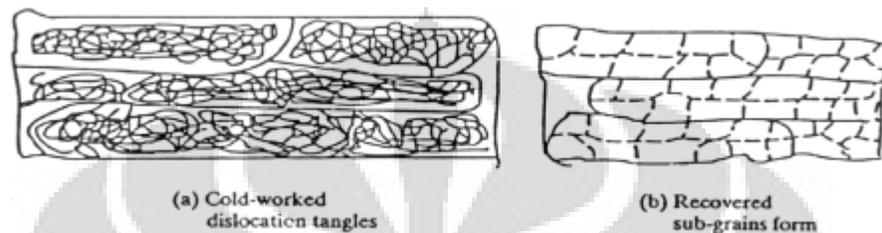
Recovery adalah proses penghilangan energi internal (*internal strain energy*) yang tersimpan yang diperoleh selama proses pengerjaan dingin melalui perlakuan panas (*heat treatment*). Selama proses ini, sifat fisik dan mekanik dari baja pengerjaan dingin akan kembali seperti sebelum dilakukan pengerjaan dingin (ASM 1973). Proses *recovery* adalah proses pertama yang terjadi setelah deformasi. Pada tahapan ini tidak ada perubahan yang cukup berarti pada sifat mekanis dari material seperti yang terlihat pada Gambar 2.5



Gambar 2.5 Skematis Proses *Recovery*, Rekrystalisasi dan Pertumbuhan Butir⁽⁷⁾

Perubahan struktur mikro dari material selama tahapan *recovery* ini tidak melibatkan pergerakan batas butir dengan sudut yang besar. Untuk benda kerja yang butirnya memipih setelah canai dingin, tidak terlihat perubahan pada butir tersebut. Namun pada tingkatan submikroskopis, terjadi perubahan pada titik cacat dan klusternya, penghilangan dan pengaturan ulang dislokasi, serta pembentukan sub-butir dan pertumbuhannya. Perubahan struktur mikro 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. 6 . Pembentukan Sub-butir⁽⁶⁾

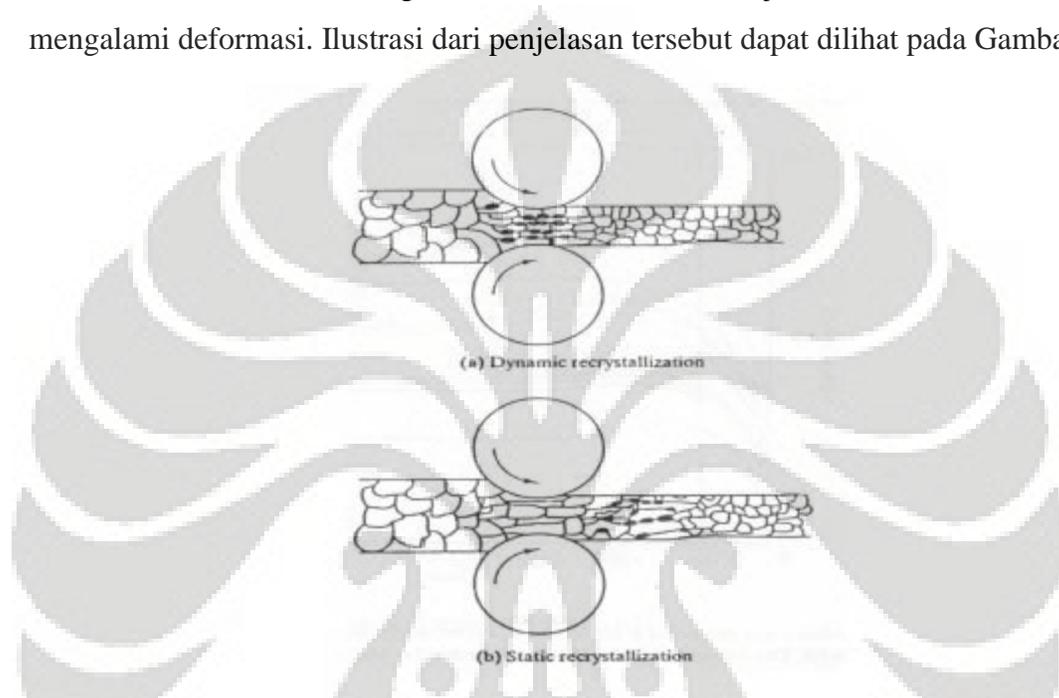
2.6.2 Rekristalisasi

Selama proses canai panas butir austenit yang mengalami regangan menjadi tidak stabil, sehingga cenderung untuk menurunkan tegangan alir dengan proses *recovery* dan pertumbuhan sub-butir baru yang bebas regangan⁽⁸⁾. Rekristalisasi pada baja HSLA terjadi lebih cepat pada temperatur tinggi⁽⁹⁾. Ketika regangan kritis terlampaui, terjadi rekristalisasi. Pada dasarnya tujuan dari proses rekristalisasi pada temperatur tinggi adalah untuk mendapatkan struktur butir austenit yang cukup halus namun mendekati seragam.

Pada temperatur rendah rekristalisasi bereaksi lambat. Sehingga waktu sangat berperan penting dalam menentukan proses rekristalisasi selesai atau hanya sebagian butir yang mengalaminya. Dengan penahanan pada temperatur tertentu untuk waktu yang tertentu, rekristalisasi diharapkan selesai terjadi. Namun pada temperatur yang rendah dibutuhkan waktu tahan yang lebih lama.

Proses rekristalisasi ini memungkinkan untuk mengontrol ukuran besar butir dan sifat mekanis dari material. Faktor yang paling penting yang mempengaruhi proses rekristalisasi pada logam dan paduannya adalah; (1) besaran deformasi, (2) temperatur, (3) waktu, (4) besar butir awalan, dan (5) komposisi logam (Smith 2004).

Dalam pengerjaan panas, proses rekristalisasi yang terjadi dapat dibagi menjadi dua, yaitu rekristalisasi dinamis dan rekristalisasi statis. Seperti telah dijelaskan bahwa pada canai panas terjadi 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



Gambar 2.7 Perbandingan Antara Rekristalisasi Dinamik dan Statik ⁽¹⁰⁾

Pada rekristalisasi dinamis, saat material mengalami deformasi, terjadi regangan di dalam material, dan apabila regangan tersebut adalah regangan kritis (ϵ_c) 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⁽⁴⁾. Sama seperti proses rekristalisasi dinamis, pada proses rekristalisasi statis juga terbentuk nuklei, hanya saja pembentukan tersebut terjadi setelah deformasi. Dengan adanya temperatur yang tinggi (diatas temperatur rekristalisasi dari material), maka proses munculnya nuklei pada batas butir dapat terjadi dan proses rekristalisasi dapat berlangsung.

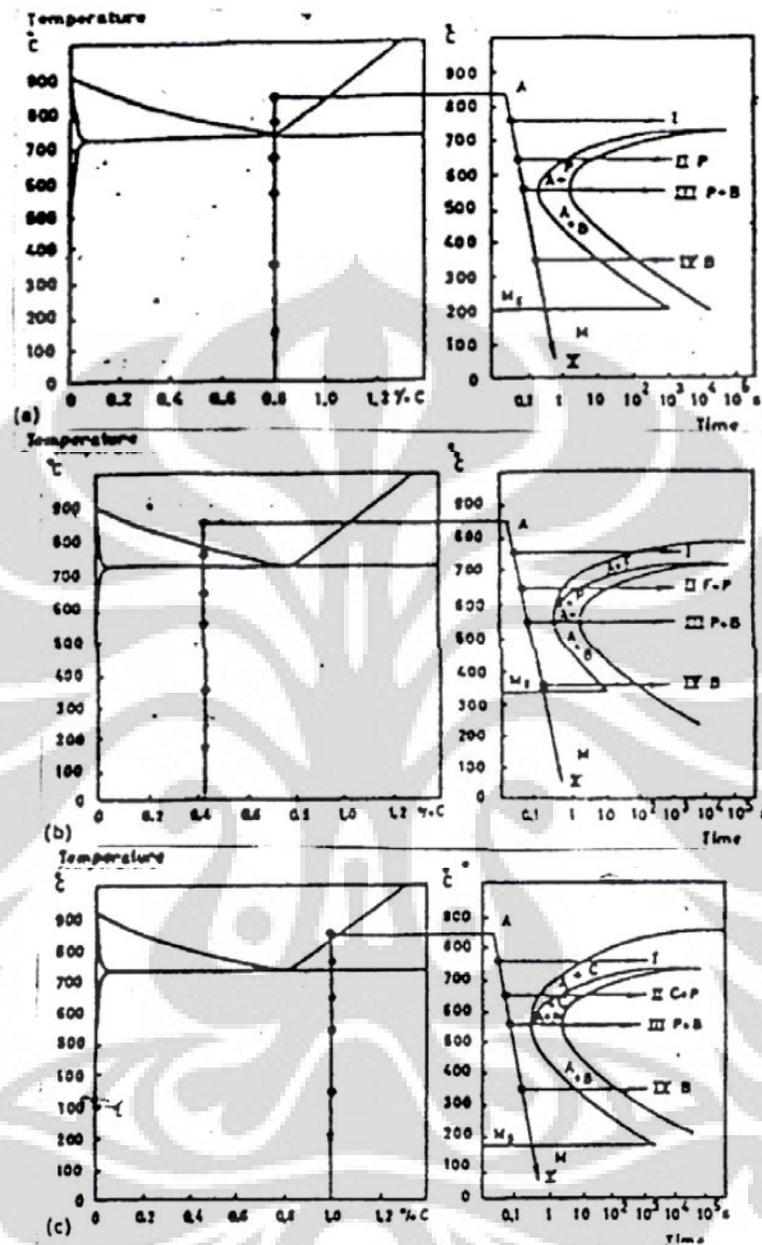
2.6.3 Pertumbuhan Butir

Proses pertumbuhan butir dimulai ketika proses rekristalisasi telah selesai. Ditandai dengan pengurangan secara bertahap dari kekuatan material sebagai akibat dari membesarnya ukuran butir. Penambahan temperatur seperti pada Gambar 2.5 akan menyebabkan bertambahnya energi yang diberikan pada butir. Temperatur tinggi akan menyebabkan meningkatnya energi getaran termal, sehingga mempercepat atom berdifusi melalui batas butir dari butir yang kecil menuju yang lebih besar. Oleh karena itu didapat ukuran besar butir yang relatif besar setelah proses pertumbuhan butir ini selesai. Karena ukuran butir yang membesar, maka akan terjadi menurunnya sifat mekanis seperti kekerasan dan tegangan luluh⁽¹⁰⁾.

2.7 Transformasi Pada Saat Pendinginan

2.7.1 Diagram TTT

Diagram TTT (*Time Temperature Transformation*) adalah suatu diagram yang menggambarkan hubungan struktur mikro baja yang terbentuk pada saat pendinginan, dengan memperlihatkan perubahan temperatur dan waktu untuk bertransformasi. Diagram TTT ini juga dikenal dengan sebutan *Isothermal Transformation* (IT) karena pembuatannya pada temperatur yang konstan. Contoh diagram TTT untuk baja karbon dari berbagai komposisi dapat dilihat pada gambar 2.8. Terlihat bahwa untuk baja hipoeutektoid, terdapat daerah pembentukan ferit sedangkan sebaliknya pada baja hipereutektoid daerah pembentukan ferit digantikan oleh perlit.



Gambar 2.8 Transformasi struktur mikro baja pada saat pendinginan baja (a) eutektoid (b)hipoeutektoid, dan (c) hipereutektoid⁽¹⁰⁾

Nukleasi ferit terjadi pada proses transformasi selama pendinginan. Pembentukan ferit diawali dengan nukleasi ferit. Tempat-tempat potensial untuk nukleasi ferit diantaranya⁽¹¹⁾.

a. Batas butir austenit, yang merupakan tempat nukleasi ferit terutama pada sisi-sisi butir. Nukleasi ferit terjadi secara teratur sepanjang batas butir austenit, dimungkinkan karena merupakan tempat yang mempunyai energi yang lebih tinggi karena merupakan cacat kristal. Nukleasi yang lebih sering akan terjadi pada austenit yang terdeformasi.

b. Pita-pita deformasi, yang merupakan tempat nukleasi ferit intragranular. Pita-pita deformasi merupakan tempat untuk nukleasi ferit. Namun tidak semua pita-pita deformasi potensial dan efektif sebagai tempat nukleasi.

c. Partikel fasa kedua. Partikel fasa kedua yaitu karbida/nitrida yang tidak larut merupakan tempat nukleasi.

d. Sub batas butir, nukleasi yang terjadi pada sub batas butir ini hanya terjadi jika deformasi sub struktur tanpa *recovery*. *Recovery* yang minimal menyebabkan ferit akan potensial untuk ternukleasi. Jadi dengan deformasi yang kecil, sub struktur akan *te-recovery* dan terbentuk struktur butir ferit karena adanya nukleasi intragranular. Waktu penahanan pada temperatur tertentu yang lebih singkat menghasilkan nukleasi intragranular yang lebih banyak sehingga terbentuk ferit yang lebih seragam, hal ini dipengaruhi oleh partikel presipitat fasa kedua yang mampu menghambat *recovery* dan menghasilkan potensial nukleasi sub batas butir yang tinggi

Laju nukleasi selama transformasi dipengaruhi oleh *driving force* yang diperlukan. Semakin kecil *driving force* maka laju nukleasi semakin besar. Pengurangan *driving force* untuk nukleasi dapat dilakukan melalui nukleasi heterogen seperti pada batas butir, dislokasi dan inklusi. Sehingga laju nukleasi heterogen lebih tinggi dibandingkan laju nukleasi homogen yang hanya tergantung pada setiap atom untuk tempat nukleasi potensial⁽¹¹⁾.

2.7.2. Pertumbuhan ferit

Pertumbuhan ferit diawali dengan proses nukleasi dimana proses difusi karbon sangat menentukan bentuk morfologi dari struktur ferit. Pada pendinginan lambat (*undercooling*) dibawah temperatur A_3 , ferit bernukleasi pada batas butir austenit dan tumbuh secara lokal saja dengan membentuk struktur yang disebut batas butir allotriomorf. Pada pendinginan yang lebih cepat, ada kecenderungan ferit akan tumbuh sebagai pelat yang disebut struktur widmanstatten dimana ukurannya lebih kecil (halus)^[11].

Ferit juga dapat tumbuh dalam matriks austenit yang disebut intragranular ferit. Struktur ferit ini cenderung seragam dengan pendinginan lambat dan berbentuk seperti plat pada pendinginan cepat. Tetapi untuk nukleasi di dalam matriks lebih kecil dibandingkan pada batas butir. Sehingga ukuran dari intragranular ferit bergantung dari ukuran butir austenit. Pada butir austenit yang halus, ferit akan terbentuk pada batas butir akan meningkatkan konsentrasi karbon dalam matriks, dan mengurangi laju pendinginan (*undercooling*) sehingga proses nukleasi menjadi lebih sulit. Sedangkan pada batas butir besar dibutuhkan waktu lebih lama untuk proses difusi karbon menuju bagian tengah matriks sehingga ada banyak waktu untuk nukleasi terjadi dari dalam matriks (intragranular). Kemudian untuk proses nukleasi pada temperatur yang berbeda, nukleus yang terbentuk pada temperatur paling tinggi akan terjadi pada permukaan butir dan diikuti pada sisi butir pada temperatur paling rendah. Pada butir yang kecil, dimana terdapat banyak tempat untuk nukleasi pada permukaan dan sisi butir, nukleasi terjadi di atas temperatur widmanstatten (T_w) dan membentuk struktur allotriomorf. Pada butir yang besar sebagian nukleasi terjadi pada temperatur tinggi dan sisa austenit akan tidak bertransformasi hingga mencapai temperatur T_w dimana ferit akan lebih mudah bernukleasi pada batas butir dan tumbuh sebagai struktur widmanstatten. Jumlah fraksi ferit dalam hal ini akan berkurang dengan menurunnya temperatur transformasi^[11].

2.7.3 Pembentukan Struktur Perlit

Ketika baja didinginkan dari temperatur austenisasi sampai temperatur di bawah 650 °C, perlit akan segera terbentuk. Pembentukan struktur perlit dimulai pada daerah batas butir austenit atau daerah acak dari butir austenit. Struktur ini terbentuk dari lamel-lamel ferit dan sementit yang terjadi secara bergantian dalam laju pendinginan lambat. Struktur ini terbentuk pada daerah di atas hidung dari diagram TTT.

2.8 Tinjauan Perumusan Kinetika

2.8.1 Perumusan Dalam Menentukan Ukuran Butir Ferit

Pembahasan mengenai struktur akhir produk proses canai panas tidak banyak dilakukan dibandingkan pembahasan mengenai struktur austenit. Namun beberapa penelitian terhadap baja HSLA telah menghasilkan beberapa perumusan penting dalam menentukan ukuran butir ferit dari hubungan persamaan kinetika terhadap beberapa variable dan butir austenit. Sellar^[8] menuliskan hubungan tersebut untuk baja HSLA 0,04% Nb sebagai persamaan

$$d_{\alpha} = (a + bT^{-1/2} + c(1 - \exp(-1,5 \cdot 10^{-2}d_{\gamma})))(1 - 0,45\epsilon^{1/2}) \quad (2.2)$$

dengan d_{α} adalah ukuran butir ferit, T adalah laju pendinginan, d_{γ} adalah ukuran butir austenit dan ϵ adalah besar regangan yang dipakai pada proses canai panas. a , b dan c adalah konstanta yang sangat tergantung dari komposisi dan variable dari kehadiran presipitat.

Menurut Sellars, laju pendinginan dan temperatur transformasi merupakan faktor utama dalam menentukan struktur akhir.

Kemudian dari penelitian Roberts, Sellars dan Beynon[12] sebuah persamaan diperoleh lagi dalam bentuk :

$$d_{\alpha} = a + bd_{\gamma}^{0,3} + cCr^{-0,15} + d[\exp(-\epsilon_{eq})]^{0,5} \quad (2.3)$$

dimana Cr adalah laju pendinginan. Dan Barbosa dkk^[12] mendapatkan nilai koefisien dari persamaan seperti terdapat pada tabel 2.1

Tabel 2.1 Nilai Koefisien dan Standard Deviasi dari persamaan Sellars dan Beynon

Koefisien	Nilai	Standard deviasi	95% confidence limit
a	-16,02	3,13	5,44
b	6,745	1,22	2,12
c	3,646	0,44	0,76
d	5,624	0,75	1,3

Perumusan mengenai hubungan dari variabel proses canai panas terhadap struktur akhir umumnya selalu menyatakan regangan dan laju pendinginan. Ferit yang dihasilkan melalui pendinginan yang berbeda akan mempunyai ukuran butir yang berbeda. Sedangkan regangan mempunyai pengaruh terhadap butir austenit dimana seperti diketahui butir yang terdeformasi akan menghasilkan nukleasi yang banyak, sehingga ukuran butir ferit pun akan lebih bervariasi. Sehingga Saito dkk^[13] juga ikut memberikan perumusan untuk hubungan ini dengan :

$$\ln d_{\alpha} = 0,92 + 0,44 \ln d_{\gamma} - 0,17 \ln Cr - 0,88 \tanh(10 \cdot \Delta \epsilon_t) \quad (2.4)$$

atau

$$d_{\alpha} = \frac{0,92}{Cr^{0,17} \cdot \tanh(10 \Delta \epsilon_t)^{0,88}} \quad (2.5)$$

dimana Cr adalah laju pendinginan dan $\Delta \epsilon_t$ adalah regangan akumulasi sesaat sebelum proses transformasi. Dari masing-masing perumusan yang diberikan memiliki kondisi proses yang berbeda-beda, namun cukup untuk mencoba menjelaskan hubungan dari variabel-variabel sehingga penelitian berikutnya dapat dilakukan perbandingan.

2.8.2 Perumusan Dalam Menghitung Persentase Fasa Ferit

Pendinginan terkontrol dalam proses canai panas adalah langkah terakhir yang berpengaruh terhadap sifat-sifat mekanis. Sifat mekanis ini dipengaruhi oleh ukuran butir ferit, persentase fasa ferit, jarak antara lamel perlit dan ukuran serta distribusi dari partikel presipitat. Dan semua parameter tersebut bergantung dari

komposisi dari material, perilaku butir austenit selama proses *finishing* dan kondisi pendinginan.

Pengembangan model kinetika untuk menjelaskan proses transformasi yang terjadi selama pendinginan memerlukan suatu nilai kuantitatif koefisien perpindahan panas antara media pendingin dan material. Pembahasan mengenai perumusan dalam menentukan hubungan antara pembentukan fraksi transformasi dengan parameter perpindahan panas oleh Avrami merupakan perhitungan yang cukup rumit. Namun Kumar dkk^[14] telah mengevaluasi perhitungan tersebut dari pengujian yang dilakukan, sehingga didapat perumusan hubungan antara laju pendinginan dengan pembentukan fasa ferit atau persentase fasa ferit sebagai :

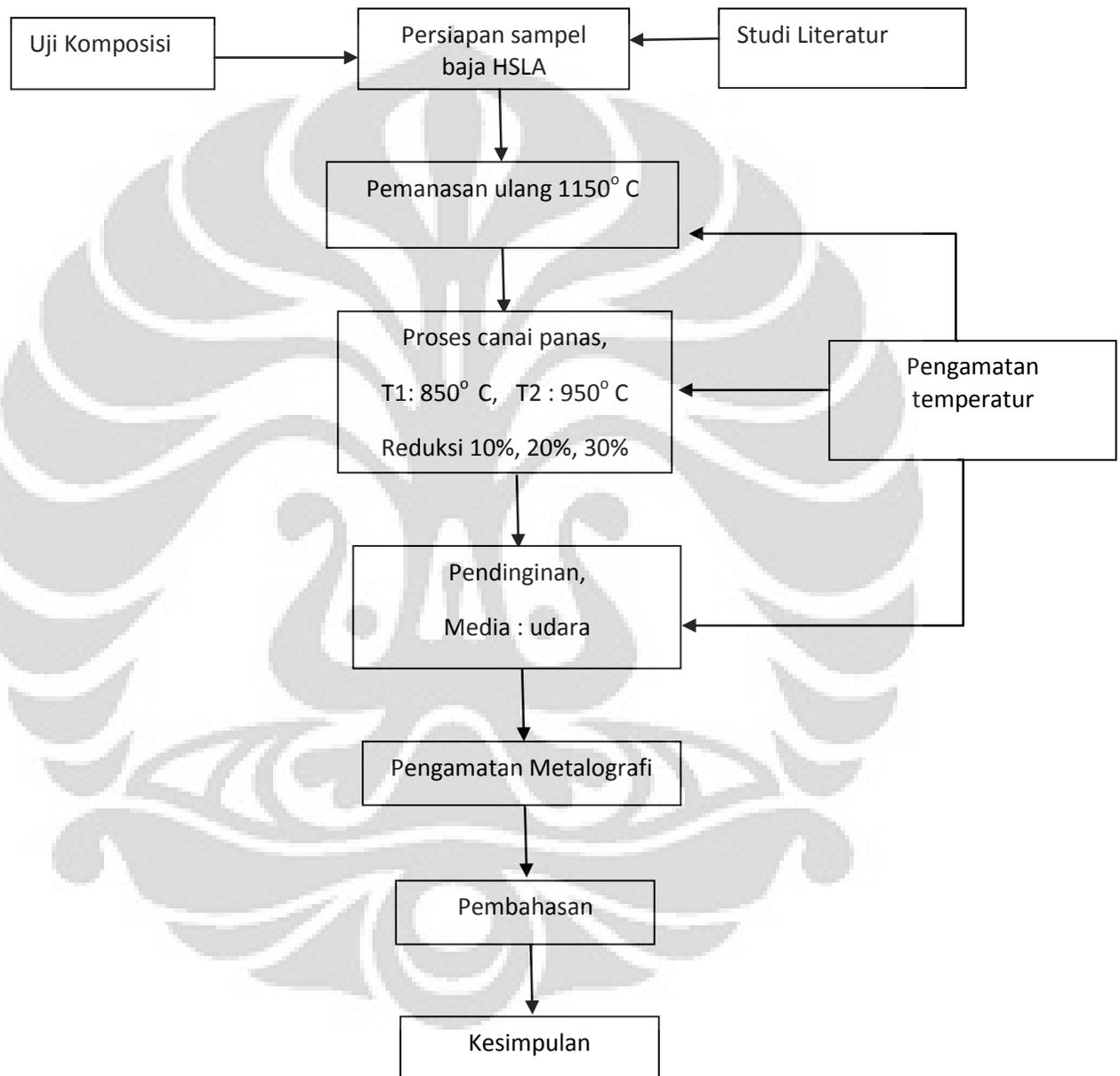
$$\% \text{ ferit} = 0,59 - 0,048 \frac{dT}{dt} \quad (2.6)$$

Dimana perumusan itu adalah model kinetika dalam menghitung fraksi ferit yang terbentuk sebagai fungsi dari laju pendinginan ($\frac{dT}{dt}$)

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.2 Bahan Sampel Penelitian

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah material HSLA A 572 Grade dengan dimensi $P \times L \times T = 60 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$. Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja HSLA yang disiapkan untuk dilakukan perlakuan panas kemudian dilakukan proses canai pada temperatur 850°C dan 950°C dengan variasi besar deformasi canai. Setelah itu dilakukan foto mikro. Dengan komposisi seperti pada tabel 3.1

Tabel 3.1 Komposisi Baja HSLA A572 Grade 50

No Produksi	C	Si	Mn	P	S	Ni	Al	Cu	Nb	V	Ti	Cr	Mo	Fe
09Q3F3138634	0,0085	0,222	1,45	<0.003	<0.003	<0.005	0,049	0,045	0,028	<0.002	<0.002	<0.003	<0.005	98,141

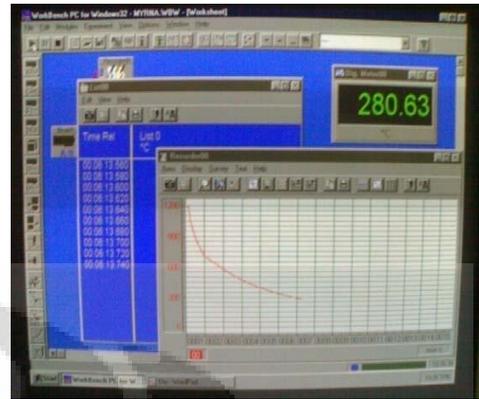
3.3 Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan adalah:

1. Mesin Canai dengan kapasitas 20 ton
2. Mesin Pemanas / Oven Carbolite type RHF 16/8 max temp. 1600°C laju pemanasan $13^{\circ}\text{C}/\text{menit}$ sampai $15^{\circ}\text{C}/\text{menit}$.
3. Termokopel
4. Mesin Komputer Pengukur Temperatur
5. Jangka sorong
6. Mesin Amplas
7. Mesin Poles
8. Mikroskop Optik

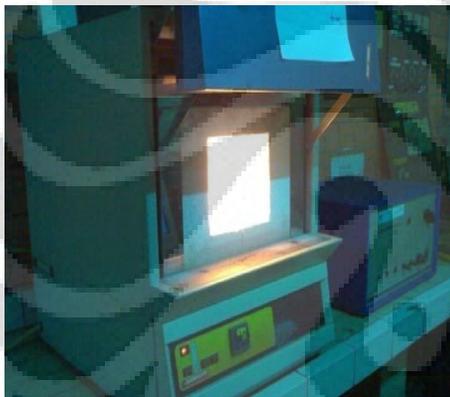


(a)



(b)

Gambar 3.2 Hardware dan Software untuk proses canai panas. (a) komputer; (b) program aplikasi canai panas



(a)



(b)

Gambar 3.3 Peralatan proses canai panas. (a) Dapur carbolite; (b) Mesin Ono Canai dua tingkat



(a)



(b)

Gambar 3.4 Perangkat Metalografi dan foto mikro. (a) Mesin Amplas-Poles; (b) Mikroskop Optik

3.4 Prosedur Penelitian

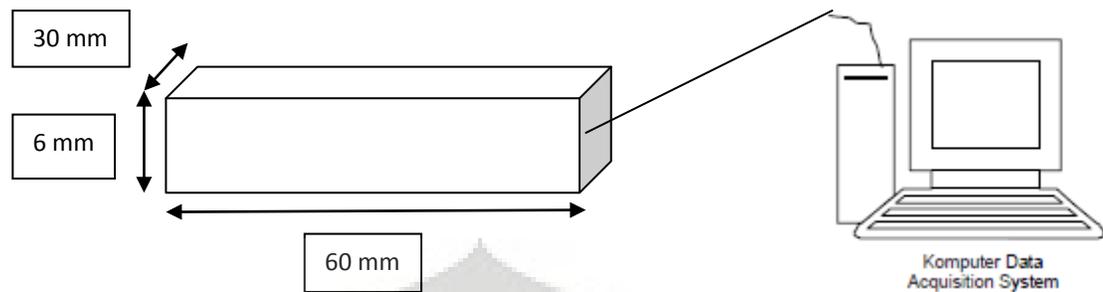
Prosedur yang dilakukan dalam penelitian ini antara lain adalah pembuatan benda uji, proses heating atau pemanasan benda uji, proses pencanaan panas, proses pendinginan dengan media udara, preparasi uji metalografi dan pengamatan mikrostruktur, terakhir adalah penghitungan besar butir ferit.

3.4.1 Pembuatan Benda Uji

Benda uji dengan dimensi yang telah ditulis sebelumnya, dibuat dengan proses pemotongan menggunakan gergaji mesin. Deformasi permukaan yang besar dan panas yang timbul dari proses pemotongan ini tidak akan signifikan pada penelitian, mengingat prosedur penelitian yang dilakukan antara lain pemanasan sampai di atas temperatur rekristalisasi sehingga struktur mikro akan menjadi homogen sebelum proses canai panas.

Proses selanjutnya adalah proses dengan mesin frais untuk mendapatkan permukaan yang rata dan memiliki ketebalan seragam. Kemudian benda uji diberi lubang berdiameter 2,5 mm yang berfungsi untuk meletakkan kawat termokopel tipe K sebagai alat untuk mengukur temperatur benda uji. Pengukuran temperatur menggunakan data *acquisition system* yang dihubungkan dengan komputer.

Universitas Indonesia



Gambar 3.5 Skema Pembacaan Temperatur pada Benda Uji

3.4.2 Proses Pemanasan

Proses pemanasan dilakukan dengan memasukkan benda uji ke dalam dapur Carbolite dengan temperatur 1150°C kemudian ditunggu selama kurang lebih 10-15 menit agar temperatur benda uji mencapai temperatur target secara homogen, yang dapat dilihat pada komputer. Proses pemanasan dilakukan di Laboratorium Metalurgi Mekanik Departemen Metalurgi dan Material FTUI.

3.4.3 Proses Canai Panas

Pengerolan (deformasi panas) pada temperatur dan % reduksi yang berbeda-beda. Proses deformasi panas yang dilakukan menggunakan variasi temperatur deformasi dan % reduksi yang berbeda. Canai panas dilakukan dalam satu kali pass dengan besar deformasi sebesar 0,1; 0,2 dan dengan temperatur deformasi 960°C , 860°C dengan % reduksi 20 % dan 30 %.. Pencanaian dilakukan dengan menggunakan mesin canai merek ONO dengan kapasitas beban maksimum 20 tonF yang berada di Laboratorium Metalurgi Mekanik Departemen Metalurgi dan Material FTUI. Proses canai ini dilakukan satu persatu setiap benda uji

3.4.4 Proses Pendinginan

Proses pendinginan dilakukan dengan metode pendinginan udara.

3.4.5. Preparasi, Pengujian Metalografi dan Pengamatan Mikrostruktur

Untuk menjaga supaya kondisi butir benda uji setelah canai panas tidak berubah, maka benda uji tidak mengalami proses pemotongan untuk pengujian metalografi. Tahapan preparasi dimulai dari amplas, poles, kemudian etsa. Pengamplasan dilakukan dengan menggunakan kertas amplas yang dimulai dari amplas kasar hingga amplas halus untuk mendapatkan permukaan benda uji yang halus dan merata di seluruh permukaan. Ukuran kekasaran dari kertas amplas yang digunakan yaitu: #80, #120, #240, #400, #600, #800, #1000, #1200, #1500 (dalam *mesh*). Proses pengamplasan dilakukan dengan 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 itu benda uji dipoles untuk mendapatkan permukaan yang lebih halus dan mengkilap serta menghilangkan bekas goresan akibat pengamplasan. Proses pemolesan dilakukan dengan menggunakan kain poles dan bahan poles berupa *Titanium Oxide*

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 2-3 % untuk memunculkan jejak batas butir struktur akhir dari benda uji sehingga dapat diamati morfologi butir ferit. Setelah itu dilakukan pengamatan dengan mikroskop optik. Keseluruhan proses dilakukan di Laboratorium Metalografi dan *Heat Surface Treatment* di Departemen Metalurgi dan Material FTUI

3.4.6. Penghitungan Besar Butir Ferit

Setelah didapat foto mikro dari benda uji, kemudian dilakukan penghitungan besar butir ferit. Penghitungan ini menggunakan Metode *Intercept* dan merujuk ke standar ASTM E 112 secara manual.



BAB 4

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian

4.1.1 Hasil Pengukuran Dimensi Benda Uji Setelah Proses Canai Panas

Tabel 4.1 Pengukuran Dimensi Benda Uji Setelah Pengerolan

No.Sampel	T.Deformasi	r.rencana	P _{avg}	L _{avg}	T.avg	r aktual
32	850	0.1	71.1	30.46	5.28	0.12
34	860	0.2	78.6	31.12	4.72	0.25
35	860	0.3	80.9	31.072	4.48	0.28
36	960	0.2	67.96	30.1	5.26	0.12
37	980	0.1	64.24	29.88	5.57	0.071
38	970	0.3	68.8	29.04	4.96	0.17

4.1.2 Hasil Pengukuran Regangan

Regangan yang terjadi pada benda uji dihitung melalui persamaan berikut

$$\varepsilon = \ln \frac{H_0}{H_f} \quad (4.1)$$

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

Dimana ε = regangan yang terjadi

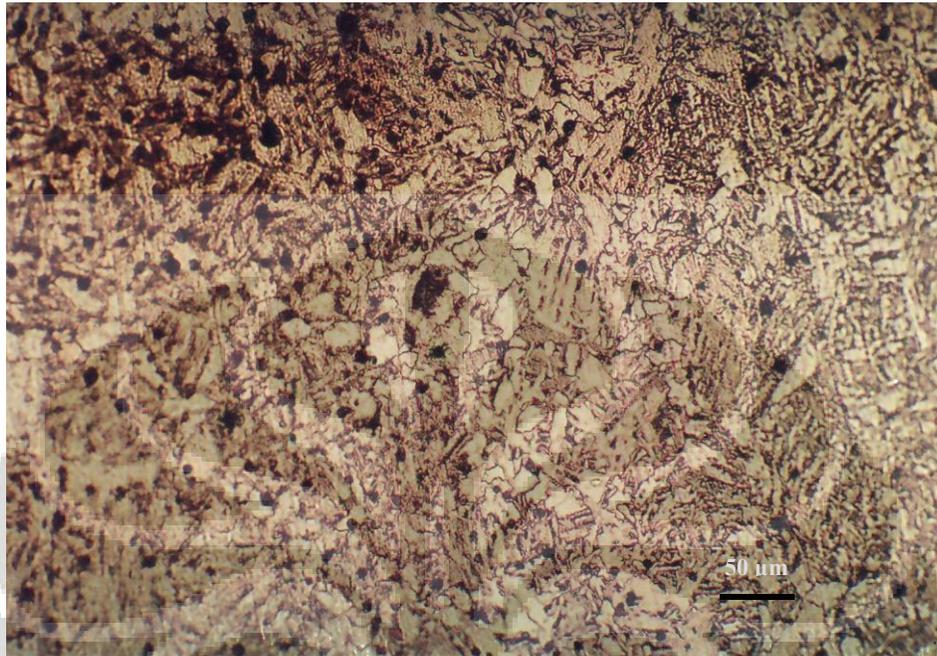
H_0 = Ketebalan Awal

H_f = Ketebalan Akhir

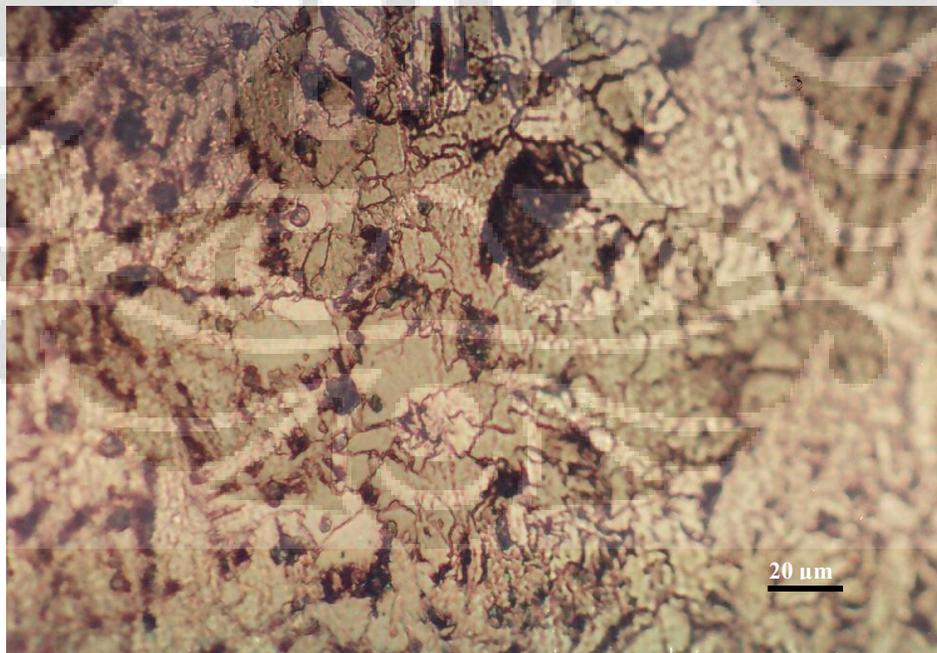
Tabel 4.2 Tabel Pengukuran Regangan Pada Benda Uji

No. sampel	reduksi aktual	regangan
32	0.12	0.12
34	0.21	0.23
35	0.25	0.29
36	0.12	0.13
37	0.07	0.07
38	0.1733	0.19

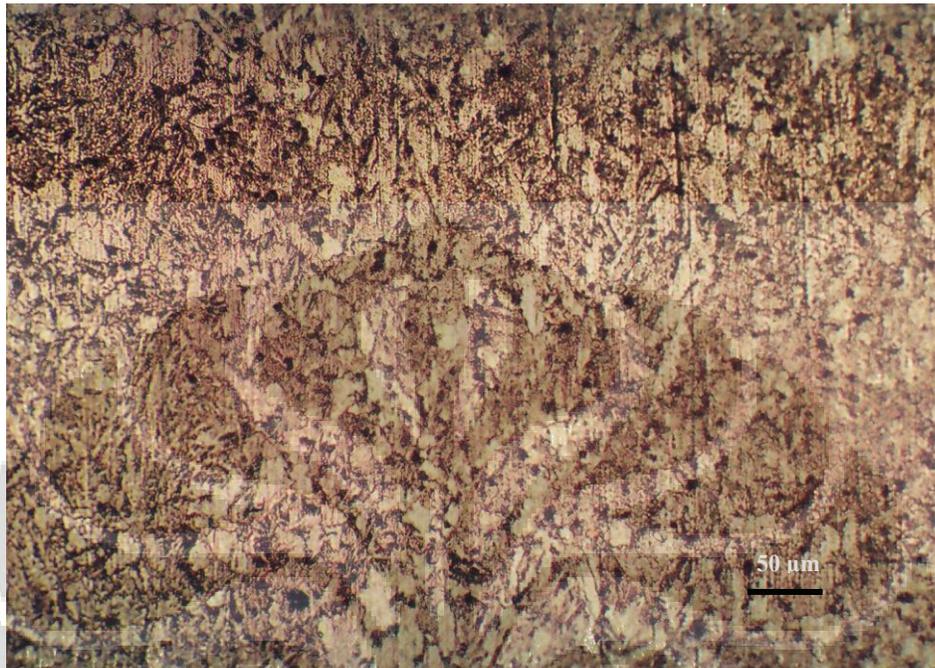
4.2 Hasil Pengamatan Metalografi



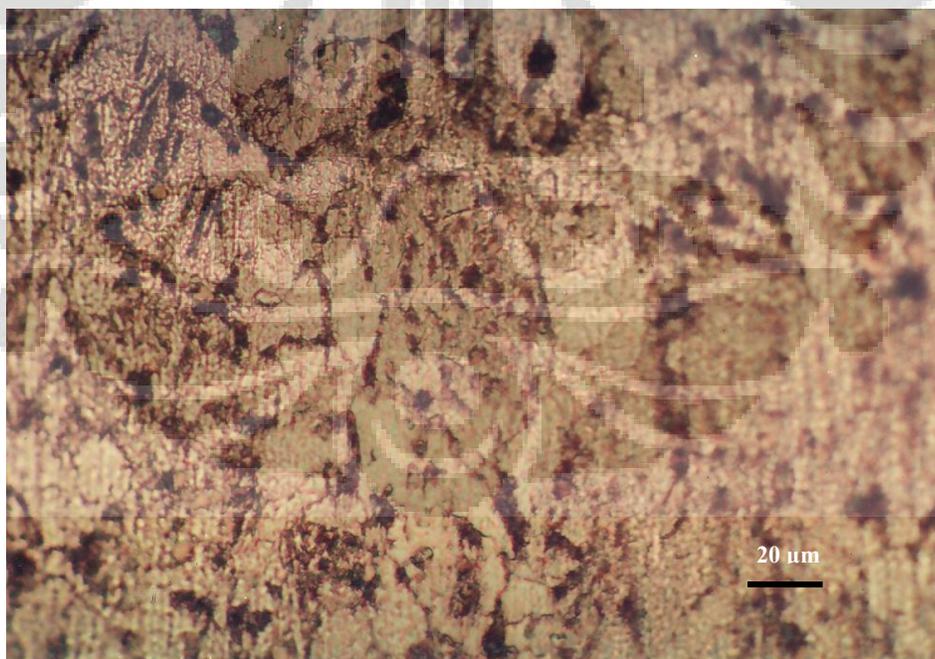
Gambar 4.1 Foto struktur mikro ferit baja HSLA, setelah deformasi 12% pada temperatur 850°C etsa Nital 2%..(Perbesaran 200x)



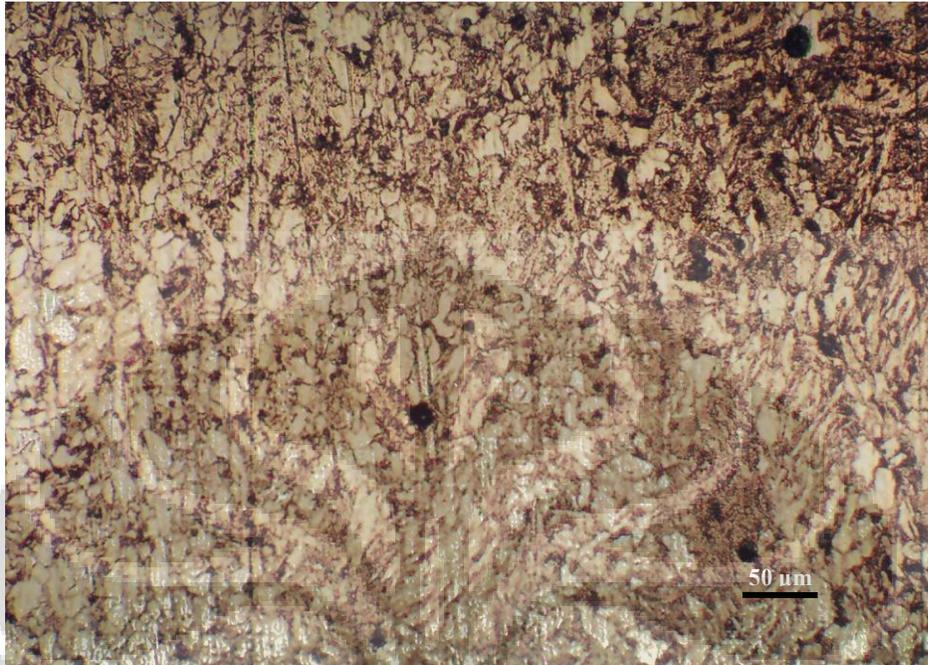
Gambar 4.2 Foto struktur mikro ferit baja HSLA, setelah deformasi 12% pada temperatur 850°C etsa Nital 2%..(Perbesaran 500x)



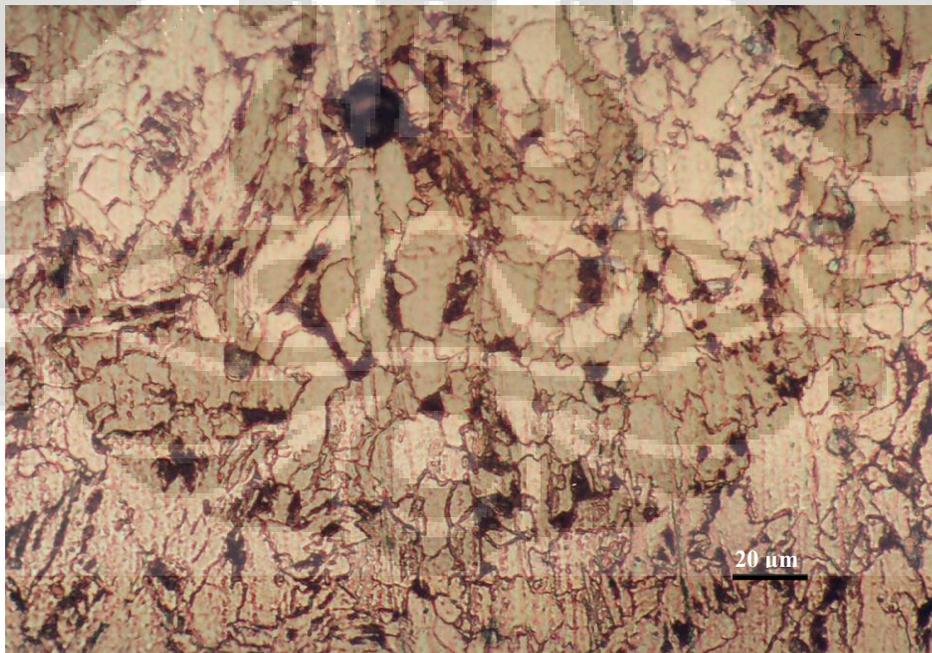
Gambar 4.3 Foto struktur mikro ferit baja HSLA, setelah deformasi 21% pada temperatur 860°C etsa Nital 2%..(Perbesaran 200x)



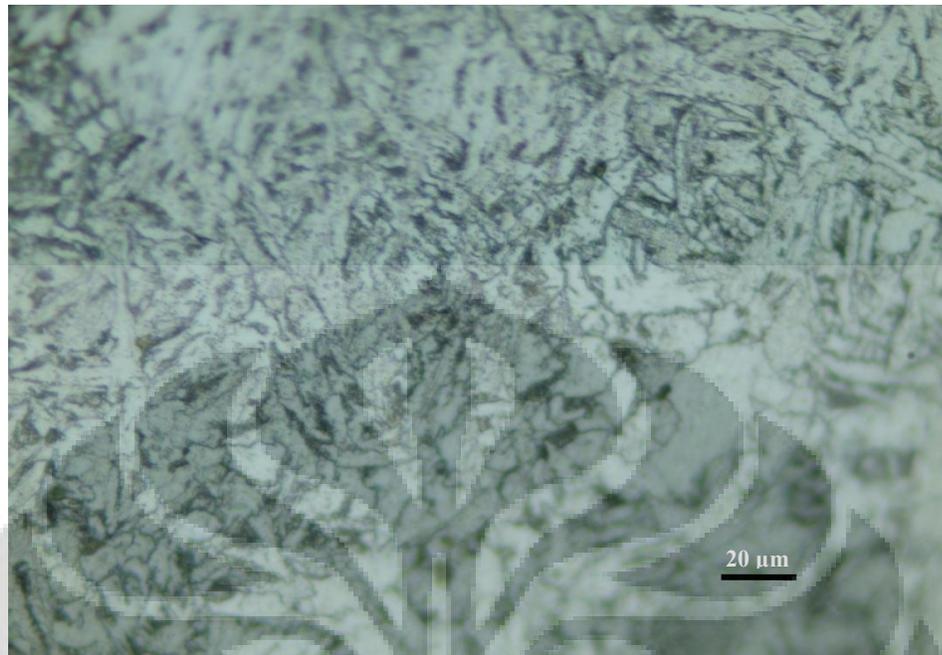
Gambar 4.4 Foto struktur mikro ferit baja HSLA, setelah deformasi 21% pada temperatur 860°C etsa Nital 2%..(Perbesaran 500x)



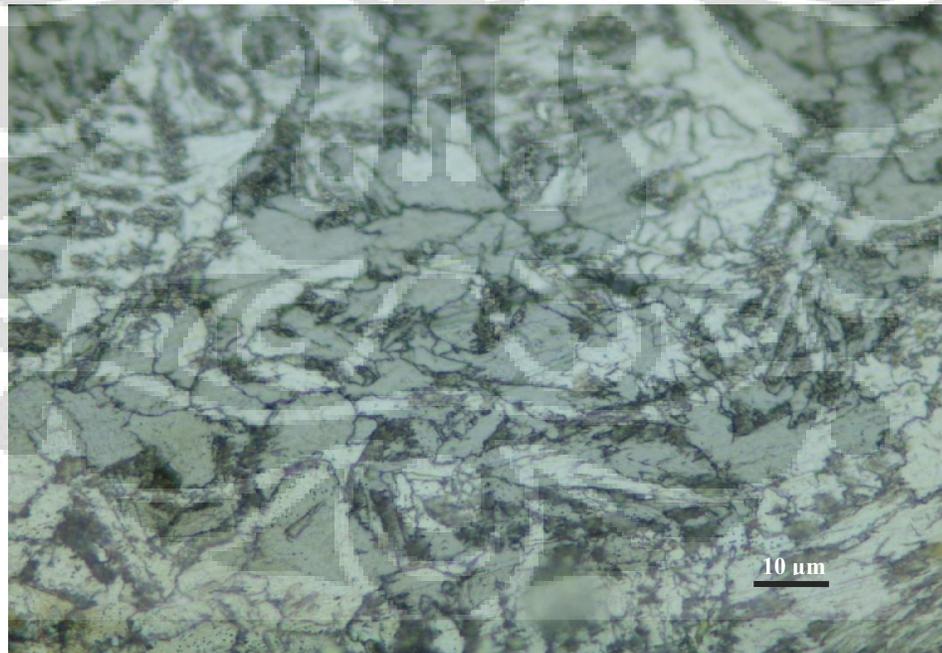
Gambar 4.5 Foto struktur mikro ferit baja HSLA, setelah deformasi 25% pada temperatur 860°C etsa Nital 2%..(Perbesaran 200x)



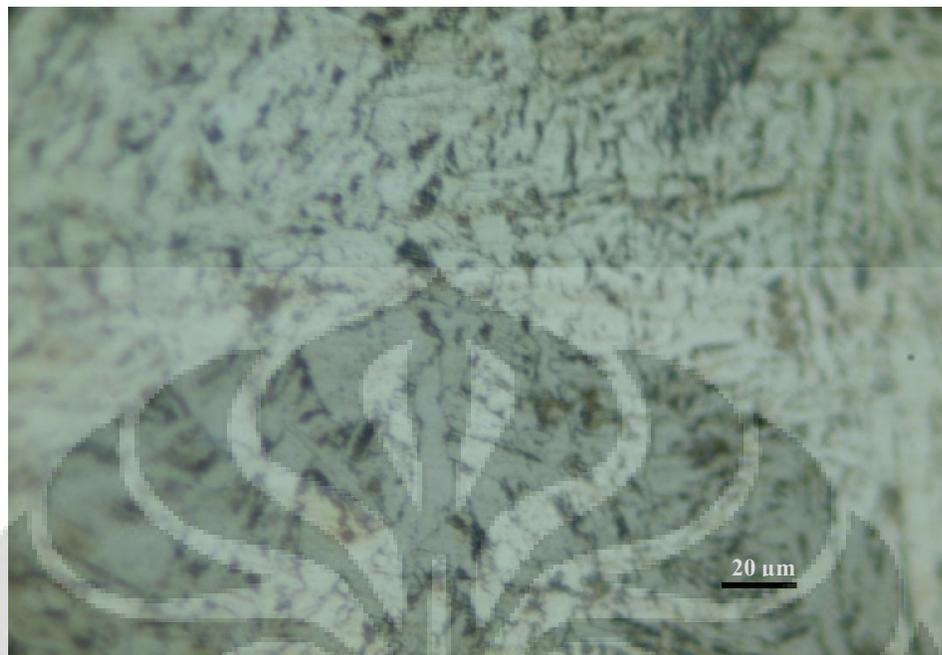
Gambar 4.6 Foto struktur mikro ferit baja HSLA, setelah deformasi 25% pada temperatur 860°C etsa Nital 2%..(Perbesaran 500x)



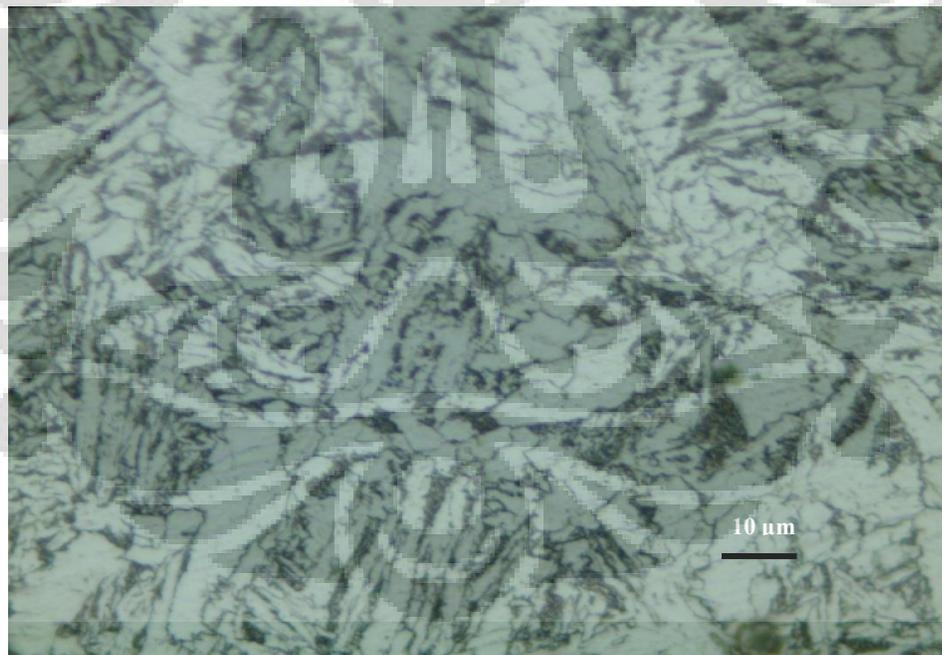
Gambar 4.7 Foto struktur mikro ferit baja HSLA, setelah deformasi 7% pada temperatur 980°C etsa Nital 2%..(Perbesaran 500x)



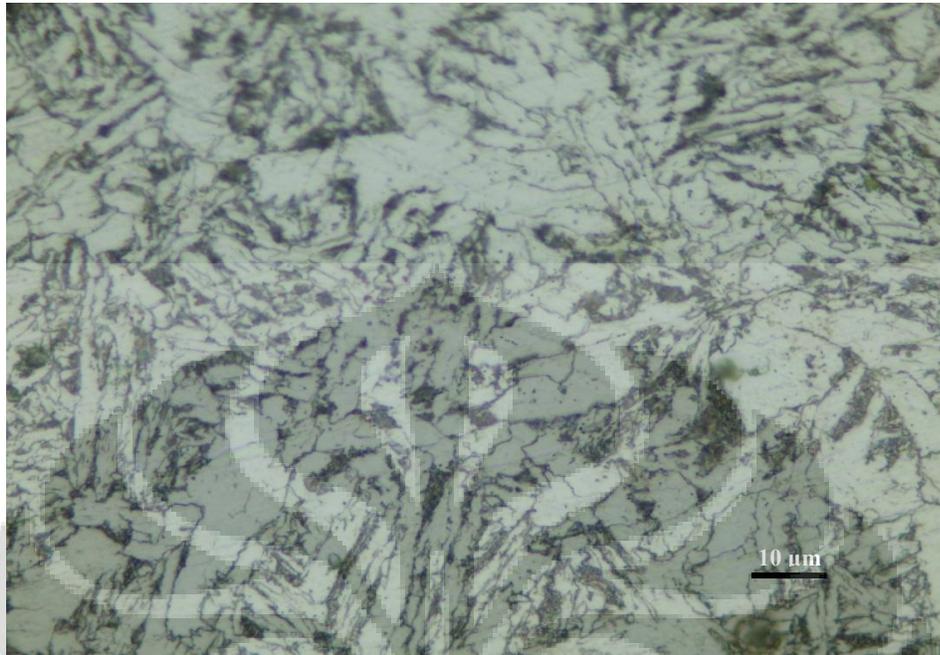
Gambar 4.8 Foto struktur mikro ferit baja HSLA, setelah deformasi 7% pada temperatur 900°C etsa Nital 2%..(Perbesaran 1000x)



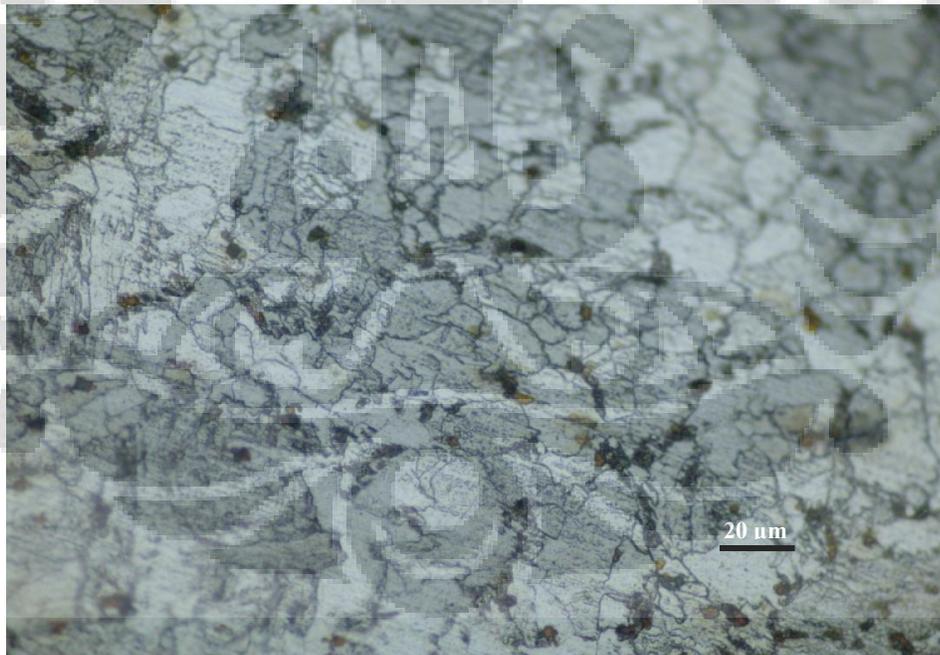
Gambar 4.9 Foto struktur mikro ferit baja HSLA, setelah deformasi 12% pada temperatur 960°C etsa Nital 2%..(Perbesaran 500x)



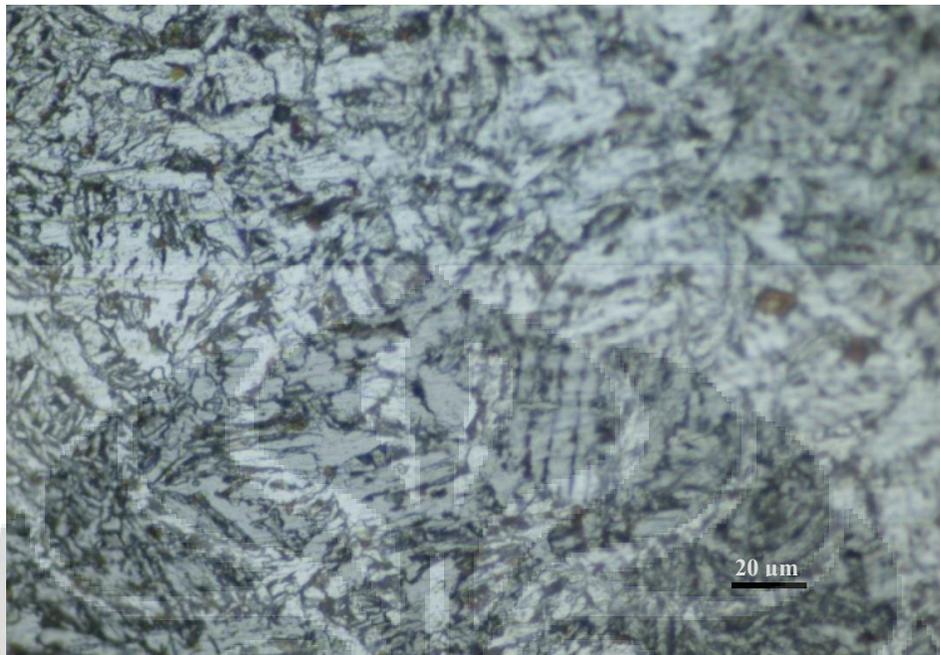
Gambar 4.10 Foto struktur mikro ferit baja HSLA, setelah deformasi 12% pada temperatur 960°C etsa Nital 2%..(Perbesaran 1000x)



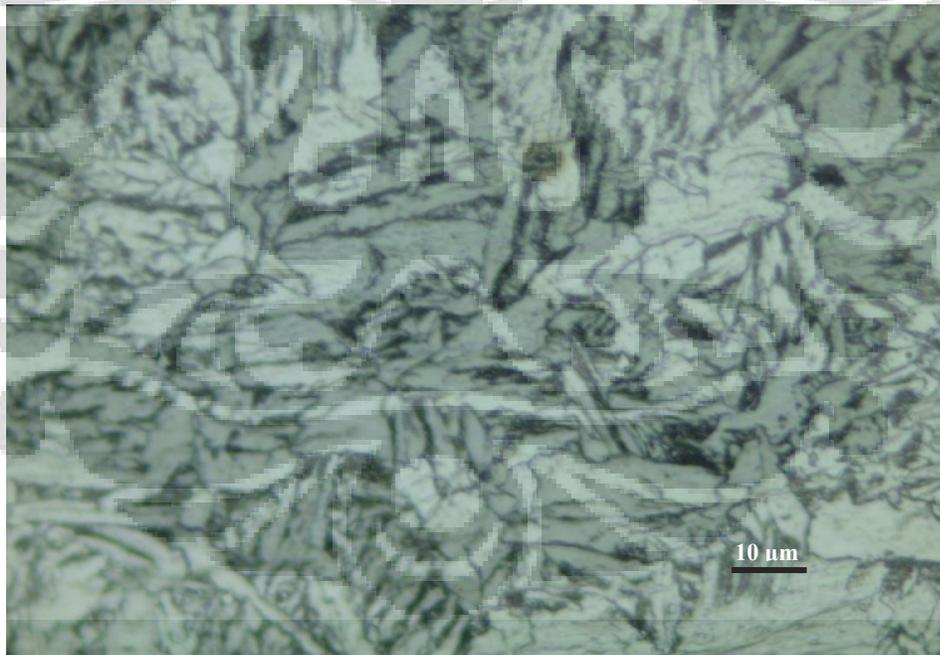
Gambar 4. 11Foto struktur mikro ferit baja HSLA, setelah deformasi 17% pada temperatur 970°C etsa Nital 2%..(Perbesaran 1000x)



Gambar 4.12Foto struktur mikro ferit baja HSLA, didinginkan diudara pada pada temperatur 950°C tanpa deformasi etsa Nital 2%..(Perbesaran 500x)



Gambar 4.13 Foto struktur mikro ferit baja HSLA, didinginkan diudara pada pada temperatur 850°C tanpa deformasi etsa Nital 2%..(Perbesaran 500x)



Gambar 4.14 Foto struktur mikro ferit baja HSLA, didinginkan diudara pada pada temperatur 850°C tanpa deformasi etsa Nital 2%..(Perbesaran 1000x)

4.3 Penghitungan Butir Ferit

4.3.1 Besar Butir Ferit Hasil Percobaan

Dari hasil pengamatan metalografi pada bab 4.2, maka dapat diperoleh besar butir ferit yang terbentuk. Perhitungan butir dilakukan sebanyak 3 kali perhitungan. Setelah dilakukan 3 kali perhitungan maka dapat diperolehlah diameter butir. Perhitungan besar butir ferit dilakukan menggunakan metode *Intercept (Heyn)*. Metode *Intercept (Heyne)*. Plastik transparan dengan tiga garis lingkaran yang berdiameter 79.5, 47.8, dan 31 mm, dengan panjang total 500 mm dengan perbesaran 500 X (panjang garis sebenarnya 1 mm) diletakkan di atas foto atau sampel. Kemudian dihitung jumlah titik yang terpotong oleh semua lingkaran (A) serta jumlah titik pertemuan tiga titik (*triple junction*) (B). Kemudian hitung nilai P yakni jumlah titik potong batas butir dengan lingkaran, dimana P merupakan jumlah 1.5 kali titik pertemuan tiga titik (A) ditambah jumlah titik potong oleh ketiga lingkaran (B).

$$P = [1.5 (A) + (B)]$$

Kemudian hitung nilai P_L dimana

$$P_L = [P/(L_T/M)]$$

dengan

L_T = panjang garis total

M = perbesaran

Kemudian hitung L_3 dimana

$$L_3 = [1/P_L]$$

dari nilai L_3 dapat menentukan besar butir ASTM G melalui perhitungan

$$G = [- 6.646 \log L_3 - 3.298]$$

Contoh perhitungan pada sampel no 32:

Pada sampel no 32 dengan perbesaran 500x terdapat 53 jumlah titik yang berpotongan dengan garis. Sehingga $M=500$, $L_T=500$

$$P_L = [53/(500/500)]$$

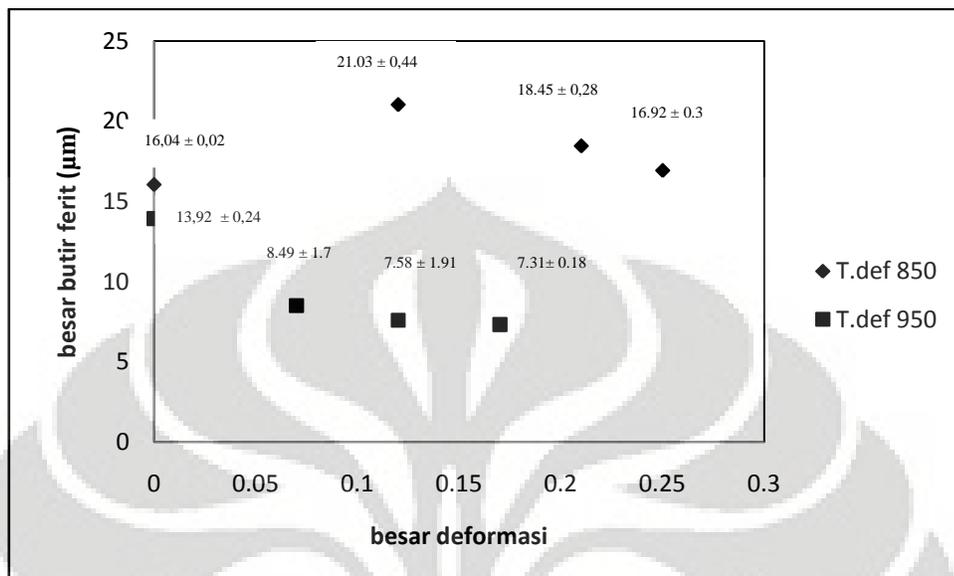
$$L_3 = 1/53 = 0.0188$$

$$G = [-6.646 \log 0.0188 - 3.298] = 8.1862$$

Kemudian dari nilai ini dibandingkan dengan ASTM E112 sehingga didapatkan besar butir = 21.28 μm . Hasil besar butir ferit dari baja HSLA yang lain dapat dilihat pada tabel 4.3.

Tabel 4.3 Tabel Pengukuran Besar Butir Ferit

No	T. Def	Deformasi		D ferit (μm)	D ferit rata-rata (μm)	ASTM Grain Size
		rencana	aktual			
1	850	0.1	0.12	21.28	21.03 \pm 0.44	8.20
				20.51		
				21.28		
2	860	0.2	0.21	18.17	18.45 \pm 0.28	8.57
				18.74		
				18.45		
3	860	0.3	0.25	17.02	16.92 \pm 0.3	8.82
				16.57		
				17.09		
4	960	0.2	0.12	13.69	7.58 \pm 1.91	11.13
				13.86		
				14.23		
5	970	0.1	0.07	17.49	8.49 \pm 1.7	10.80
				17.58		
				17.67		
6	960	0.3	0.17	8.49	7.31 \pm 0.18	11.24
				8.62		
				8.36		
7	Tanpa deformasi (860)	0	0	16.66	16.66	8.87
8	Tanpa deformasi (960)	0	0	13.69	13.69	9.37



Gambar 4.15 grafik hubungan antara besar butir ferit dengan besar deformasi

Dari tabel 4.3 dan gambar 4.15 memperlihatkan hasil pengukuran butir ferit, yang menunjukkan besar diameter butir ferit hasil proses canai panas menjadi lebih kecil dengan semakin besarnya deformasi. Dapat dilihat bahwa pada butir ferit tanpa deformasi yang didinginkan di udara pada 950°C mula-mula sebesar 13,69 µm menjadi lebih kecil dengan ukuran 8,49 µm pada reduksi 0,07 dan butir ferit menjadi lebih kecil sebesar 7,31 µm pada reduksi 0,17, begitu juga dengan butir ferit yang di deformasi pada 850°C, seperti tercantum dalam tabel 4.3 menunjukkan kecenderungan diameter butir ferit semakin kecil dengan meningkatnya deformasi. Seperti pada deformasi 0,25 dihasilkan diameter butir ferit yang paling kecil yaitu 16,92 µm. Besar diameter butir ferit ditentukan oleh besar diameter butir austenit setelah proses canai panas.

Proses TMCP memiliki tujuan meningkatkan nilai kekuatan dan kekerasan dari suatu material dengan cara melakukan kontrol terhadap mikrostruktur. Tujuan ini dapat tercapai jika mikrostruktur yang terbentuk setelah deformasi adalah berupa butir ferit yang halus. Butir ferit yang halus dapat dicapai dengan terlebih dahulu melakukan kontrol terhadap butir austenit sebelum temperatur transformasi. Oleh karena itu austenit yang terekristalisasi sempurna dengan melakukan deformasi di atas temperatur transformasinya akan mengakibatkan butir ferit yang dihasilkan lebih kecil. Pada saat pengerjaan panas rekristalisasi dan pertumbuhan butir terjadi secara berkelanjutan.

Namun demikian, jika proses pencapaian akhir dilakukan di atas temperatur A_{r3} (temperatur transformasi austenit menjadi ferit). Presipitat akan mengendap kembali akibat menurunnya kelarutan presipitat dalam butir austenit akibat penurunan temperatur. Partikel presipitat ini mencegah pertumbuhan butir austenit bahkan rekristalisasi. Proses penghalusan butir ini dipengaruhi oleh jumlah paduan, derajat deformasi dan temperatur pencapaian. Pada saat proses pencapaian terjadi butir austenit mengalami elongasi akibat deformasi yang diberikan. Ketika terjadi pendinginan di bawah A_{t3} butir ferit bernukleasi dari batas butir austenit yang tidak mengalami rekristalisasi sehingga butir ferit yang dihasilkan menjadi lebih kecil.

Sebagaimana diketahui proses rekristalisasi dari butir yang terdeformasi dapat ditahan oleh unsur paduan terlarut, *strain-induced precipitation*, ukuran butir yang terlalu besar dan kehadiran partikel fasa kedua ataupun presipitat yang masih tersisa. Temperatur rendah dan deformasi yang terlalu kecil juga dapat menghambat proses rekristalisasi. Pada proses canai panas, dimana awal dari proses nukleasi ferit dari butir austenit yang terdeformasi, banyaknya nukleasi bergantung dari besar regangan yang diberikan. Menurut Roberts dkk^[9] dan Sellars^[8], luas permukaan butir yang lebih besar memiliki banyak tempat nukleasi sesuai dengan prinsip pertumbuhan ferit pada butir yang besar, dimana akan menghasilkan struktur butir yang tumbuh seperti acicular. Dengan bertambahnya besar deformasi, maka nukleasi ferit semakin banyak dan pertumbuhan butir ferit akan lebih mudah membentuk widmanstätten.

Dari gambar 4.15 juga dapat dilihat pengaruh temperatur canai panas terhadap besar butir ferit. Sebagai contoh pada besar deformasi yang sama yaitu 0,12 dapat dilihat butir ferit yang dihasilkan dari proses canai panas pada temperatur 850°C mempunyai ukuran yang lebih besar yaitu sebesar 21,30 μm daripada butir ferit yang dideformasi pada temperatur 950°C yaitu sebesar 7.58 μm . Hal ini bertentangan dengan teori pertumbuhan butir, dimana semakin tinggi temperature deformasi, maka butir akan sempit tumbuh, sehingga akan memiliki ukuran yang lebih besar. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh tingkat ketelitian dalam mengamati dan menghitung foto mikrostruktur, adanya perbedaan energi aktivasi pada masing-masing sampel yang disebabkan oleh adanya waktu tahan yang tidak sama (10 menit) untuk masing-masing sampel. Pada proses *reheating* 3 buah sampel sekaligus dipanaskan pada saat bersamaan namun pengerolan dilakukan secara bergiliran, sehingga sampel ke-2 dan ke-3 mengalami waktu tahan yang lebih lama. Selain itu juga, proses pengeluaran sampel dari dapur menyebabkan terjadinya perubahan temperatur pada sampel ke-2 dan ke-3 yang masih ada di dalam dapur.

4.3.2 Besar Butir Ferit Menurut Model Empiris

Berdasarkan penelitian Roberts, Sellars dan Beynon^[12] (persamaan 2.3) dapat dihitung besar butir ferit.

$$d_{\alpha} = a + b d_{\gamma}^{0,3} + c Cr^{-0,15} + d [\exp(-\epsilon_{eq})]^{0,5}$$

Contoh perhitungan pada sampel no 32 dengan T.Deformasi 850°C :

$$Cr = 6,11, d_{\gamma} = 95,47 \mu\text{m} \quad \epsilon_{eq} = 0,12, \text{ dengan } a = -16,02. \quad b = 6,745 = c = 3,646 \quad d = 5,624$$

Sehingga:

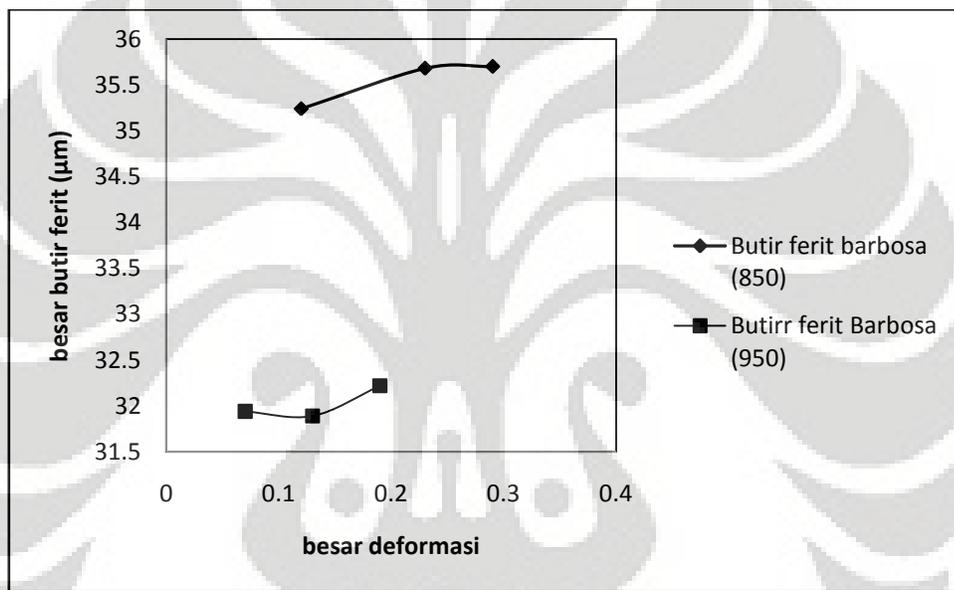
$$d_{\alpha} = 16,02 + 6,745 \cdot 95,47^{0,3} + 3,646 \cdot 6,11^{-0,15} + 5,624 [\exp(0,12)]^{0,5}$$

$$d_{\alpha} = 16,02 + 26,48151 + 0,76 + 5,99$$

sehingga didapatkan $d_{\alpha} = 35,24 \mu\text{m}$

Tabel 4.4 Hasil Perhitungan Butir Ferit menurut Barbosa dkk

No	T,Deformasi	Cr (cooling rate)	ϵ (regangan)	d_{α}
1	850°C	6.11	0.12	35.24
2	860°C	5	0.23	35.68
3	860°C	6.87	0.29	35.72
4	960°C	8.62	0.13	31.94
5	970°C	6.33	0.07	31.89
6	970°C	6.8	0.19	32.22



Gambar 4.16 grafik besar butir ferit menurut Barbosa

Sedangkan menurut Saito dkk merumuskan besar butir ferit dengan persamaan 2.5 yaitu:

$$d_{\alpha} = 0,92 / [Cr^{0,17} \cdot \tanh(10\Delta\epsilon)^{0,88}]$$

contoh perhitungan pada sampel no 36

$$d_{\alpha} = 0,92 / [8,62^{0,17} \cdot \tanh(10 \cdot 0,13)^{0,88}]$$

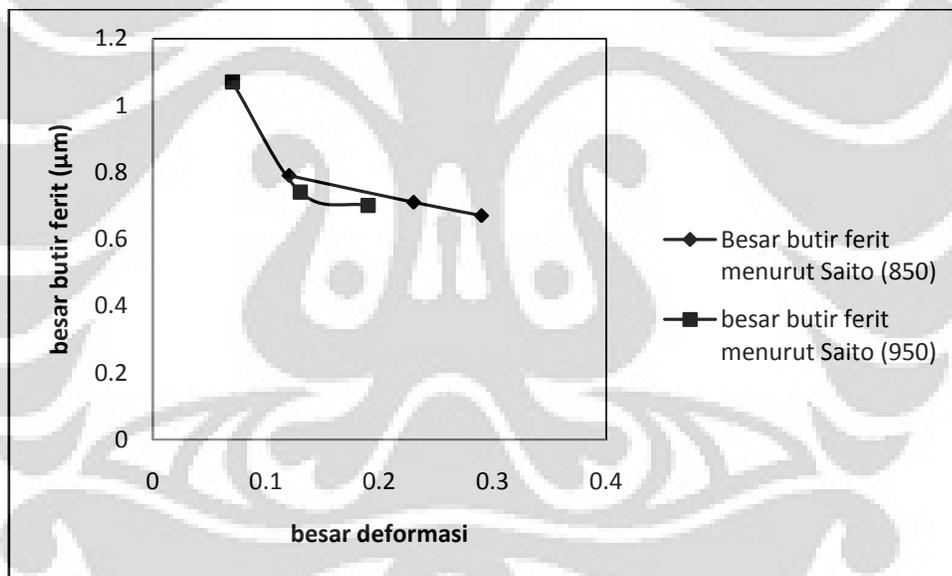
$$d_{\alpha} = 0,92 / 1,227319$$

sehingga $d_{\alpha} = 0,74 \mu\text{m}$

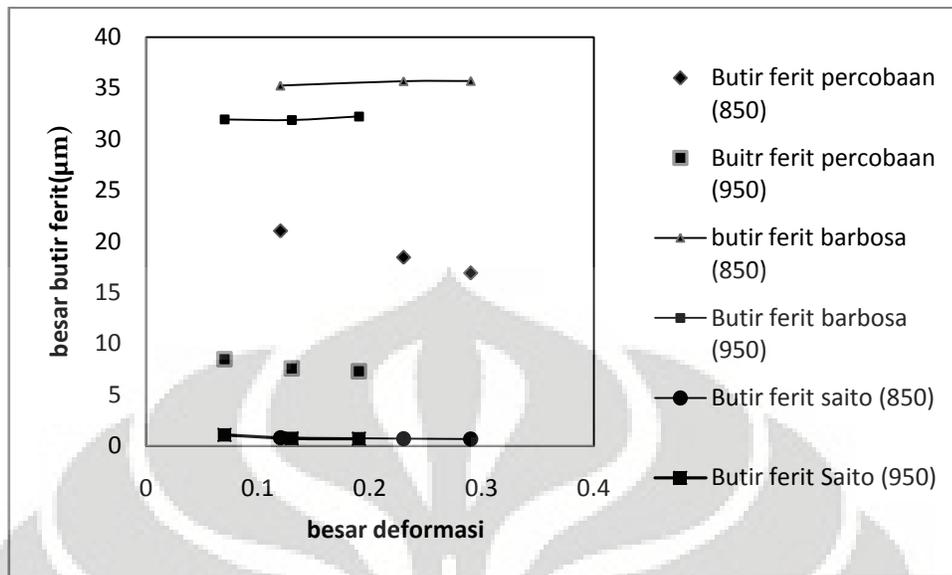
Besar butir ferit yang lain dapat dilihat pada tabel dibawah

Tabel 4.5 Hasil Perhitungan Butir Ferit menurut Saito

No	T,Deformasi	Cr (cooling rate)	ϵ (regangan)	d_a
1	850°C	6.11	0.12	0.79
2	860°C	5	0.23	0.71
3	860°C	6.87	0.29	0.67
4	960°C	8.62	0.13	0.74
5	970°C	6.33	0.07	1.07
6	970°C	6.8	0.19	0.70



Gambar 4.17 Grafik besar butir ferit menurut Saito



Gambar 4.18 Grafik perbandingan antara besar butir ferit berdasarkan percobaan dengan model Barbosa dan Saito

Dapat dilihat pada gambar 4.17 terlihat bahwa besar butir ferit berdasarkan percobaan cenderung lebih dekat kepada permodelan Saito, karena pada model Saito butir ferit menjadi lebih kecil dengan bertambahnya deformasi. Sedangkan pada model Barbosa butir ferit meningkat dengan bertambahnya deformasi yang diberikan.

4.4 Hasil Perhitungan Persentase Fasa Ferit

Persentase fasa ferit dapat dihitung berdasarkan persamaan

$$\% \text{ ferit} = 0,59 - 0,048 \frac{dT}{dt}$$

Contoh perhitungan pada no1 dengan laju pendinginan sebesar 6.11 maka persentase fasa ferit adalah

$$\% \text{ ferit} = 0,59 - (0,048 \cdot 6,11)$$

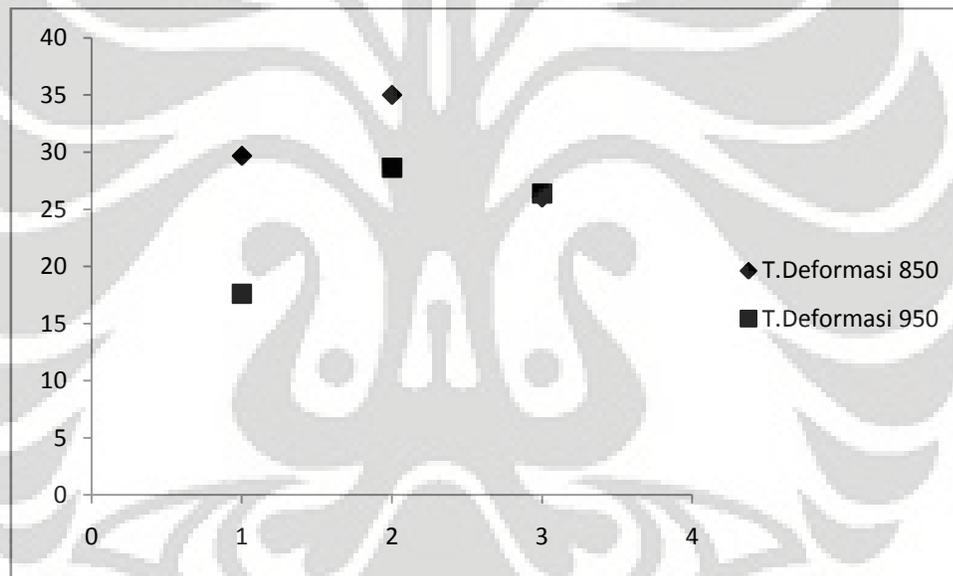
$$\% \text{ ferit} = 0,59 - 0,2933$$

$$\% \text{ ferit} = 0,2967$$

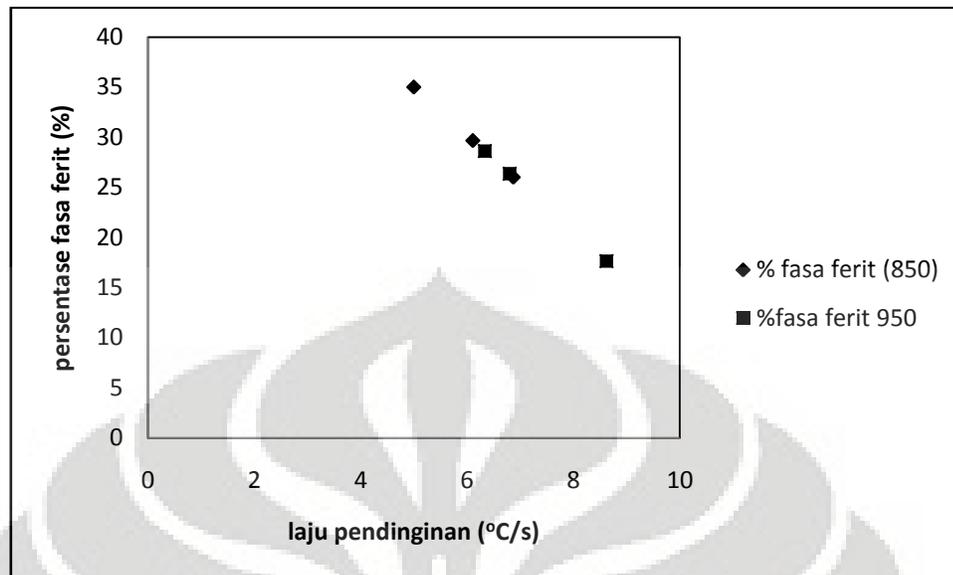
Hasil pengamatan dan perhitungan persentase fasa ferit terangkum dalam tabel 4.6. berdasarkan perhitungan dengan persamaan 2.6, diperoleh data hasil perhitungan persentase fasa ferit terhadap perlit. Jumlah fasa ferit yang terbentuk selama proses pendinginan sangat dipengaruhi oleh proses difusi dari karbon.

Tabel 4.6 Tabel Hasil Perhitungan Persentase Fasa Ferit

No	Deformasi		Cooling Rate	% Fasa Ferit
	Rencana	Aktual		
1	0.1	0.12	6.11	29.67
2	0.2	0.21	5	35
3	0.3	0.25	6.87	26.02
4	0.1	0.12	8.62	17.62
5	0.2	0.71	6.33	28.61
6	0.3	0.17	6.8	26.36



Gambar 4.19 Grafik persentase fasa ferit terhadap besar deformasi canai panas



Gambar 4.20 Grafik persentase fasa ferit terhadap laju pendinginan setelah deformasi canai panas

Dari hasil penelitian pada temperatur canai 850°C didapatkan data bahwa pada deformasi 0,12 didapatkan persentase fasa ferit sebesar 29,67% kemudian meningkat menjadi 35% pada deformasi 0,21 kemudian menurun menjadi 26,02% pada deformasi 0,25 dan pada temperatur deformasi 950°C dengan deformasi 0,07 diperoleh persentase fasa ferit 28,61% 0,12 didapatkan persentase fasa ferit 17,62%, pada deformasi 0,17 sebesar 26,36% . Pada deformasi 0,21 dengan temperatur deformasi 850°C dan deformasi 0,17 pada temperature deformasi 950°C hasil yang diperoleh tidak sesuai literatur dimana persentase fasa ferit bertambah besar seharusnya dengan bertambahnya besar deformasi. proses canai panas diperoleh pula kecenderungan persentase ferit untuk menurun dengan meningkatnya deformasi. Bahwa pada deformasi yang besar karbon berkontribusi pada fasa perlit sehingga pembentukan fraksi fasa ferit pun terasa lebih sedikit begitu pula dengan temperatur pengerolan dimana semakin tinggi temperatur pengerolan maka persentase fraksi ferit pun juga menjadi lebih sedikit

Pada gambar 4.18 dapat dilihat bahwa dengan meningkatnya laju pendinginan maka persentase fasa ferit menjadi semakin kecil. Persentase ferit terhadap laju pendinginan merupakan grafik yang linier. Hal ini sesuai dengan persamaan 2.6 dimana persentase fasa ferit bergantung pada laju pendinginan.



BAB 5

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa:

1. Dengan bertambahnya deformasi canai panas maka besar butir ferit semakin mengecil. Peningkatan besar deformasi (% reduksi) dapat meningkatkan mekanisme penghalusan butir, dengan ukuran butir yang lebih kecil dan seragam maka akan meningkatkan jumlah batas butir yang berakibat pada peningkatan energi bebas dibatas butir.
2. Pengaruh temperatur canai panas terhadap besar butir ferit pada percobaan tidak sesuai dengan literatur dimana butir ferit pada temperatur deformasi 850°C mempunyai butir yang lebih besar dibandingkan butir ferit yang dideformasi pada temperatur 950°C. Pada deformasi 0,12 pada temperatur deformasi 850°C mempunyai ukuran butir 21,03 μm sedangkan pada temperatur deformasi 950°C dengan deformasi yang sama yakni 0,12 mempunyai ukuran butir 7,58 μm .
3. Besar butir ferit percobaan lebih mendekati kepada model Saito dimana besar butir semakin mengecil dengan bertambahnya deformasi.
4. Perbandingan terbentuknya fasa ferit dan perlit dipengaruhi oleh pendinginan, dimana pendinginan cepat menghasilkan fasa ferit lebih sedikit.

DAFTAR REFERENSI

- [1] Norman. Anton : “Perilaku Perubahan Struktur Mikro Dengan Pemanasan Awal 1080° C Pada Canai Panas Baja HSLA-Nb.” Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2002.
- [2] Anita Juliawatri. “Pengaruh Waktu Tahan Terhadap Besar Butir Austenit Prior pada Baja HSLA 0.029%Nb Hasil Coran Kontinu Selama Pemanasan *Isothermal*.” Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2002.
- [3] J.N. Harris, *Mechanical Working of Metal*, (UK: Pergamon Press, 1983)P.L. Mangonon, *The Principles of Material Selection for Engineering Design*, (Prentice Hall, Inc, 1999)
- [4] Brooks. R. Charlie, *Heat Treatment Structure & Properties of Non Ferrous Alloy*, (Ohio : American Society for Metals, 1998)
- [5] William C Leslie, *The Physical Metallurgy of Steel*, (Michigan : McGraw Hill Company, 1982)
- [6] J.N. Harris, *Mechanical Working of Metal*, (UK: Pergamon Press, 1983)William D Callister,
- [7] C.M Sellars, *A Look at The Metalurgy of the Heat Rolling Steel*, University of Sheffield ASM Handbook Volume 09, *Metallography and Microstructures, Metallography and Microstructure of Carbon and Low Alloy steel, Tabel of Chemical and Etchants*
- [8] Roberts, W, H.Lidefelt, A.Sandberg, *Mechanism of enhanced Ferrite Nucleations from Austenite in Microalloyed Steels*, Swedish Institute for Metal Research, Stockholm
- [9] J.N. Harris, *Mechanical Working of Metal*, (UK: Pergamon Press, 1983)
- [10] K.E Thelning, *Steel and Its Heat Treatment* (London: Butterworth, 1981)
- [11] Aris Diniarto H, “Pengaruh Waktu Tahan dan Temperatur Transformasi terhadap Pertumbuhan Butir Ferit pada Baja HSLA 0,047% Nb Selama Transformasi Isotermal.” Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok, 2000.
- [12] Barbosa, R, S. Yue, J.J Jonas, P.J Hunt, 1987, *Accelerated cooling Applied to the Recrystallization Controlled Rolling of Seamless Tubing, Proceeding of the International Symposium : Accelerated Cooling of Rolled Steel*, Pergamon Press, New York

- [13] Saito, Y, M. Kimura, M. Tanaka, T. Sekine, K. Stubota, T. Tanaka, 1984, *Controlling of Microstructure and Mechanical Properties utilizing Deformation Resistance in Plate Rolling*, Kawasaki Steel Technical Report No.9, Kawasaki Steel Giho
- [14] Kumar, C, C. McCulloch, E.BHawbolt, I.V Samarasakera, 1991, *Modelling Thermal and Microstructural Evolution on runout table of Hot Strip Mill*, The Institute of Metals
- [15] Nandyo Alpalmy, “Analisa Ukuran Butir Ferit Dan Laju Korosi Baja HSLA 0,029% Nb Setelah Canai Panas.” Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok, 2008.
- [16] ASTM E 112-96 rev, *Standart Test Methods for Determining Average Grain Size*, ASTM International, 2000
- [17] Roberts, W, H.Lidefelt, A.Sandberg, *Mechanism of enhanced Ferrite Nucleations from Austenite in Microalloyed Steels*, Swedish Institute for Metal Research, Stockholm
- [18] ASM Handbook Volume 04, *Heat Treatin, Thermomechanical Processing of Steel*,
- [19] ASM Handbook Volume 01, *Irons, Steels, and High-Performance Alloys, High Strength Structural and High Strength Low Alloy Steel*
- [20] Material Science and Engineering an Introduction, (New York, John Wiley & Son, 1997)

Lampiran 1 Perhitungan Temperatur Kelarutan Presipitat

Komposisi Material :

No Produksi	C	Si	Mn	P	S	Ni	Al	Cu	Nb	V	Ti	Cr	Mo	Fe
09Q3F3138634	0,0085	0,222	1,45	<0.003	<0.003	<0.005	0,049	0,045	0,028	<0.002	<0.002	<0.003	<0.005	98,141

Berdasarkan model empiris yang dikembangkan Irvine et al (Bab II, persamaan 11), besarnya temperatur kelarutan presipitat dapat diketahui melalui persamaan :

$$\log (\text{Nb}).(\text{C} + 12/14.\text{N}) = 2,26 - 6770/\text{T}$$

sehingga $\log (0,028).(0,008 + 12/14. 0,002) = 2,26 - 6770/\text{T}$

$$\text{T} = 1365 \text{ }^{\circ}\text{K}$$

$$\text{T} = 1092^{\circ}\text{C}$$

Maka besarnya temperatur kelarutan presipitat adalah 1092°C.

Lampiran 2 Perhitungan Butir Ferit Metode Intercept Heyn

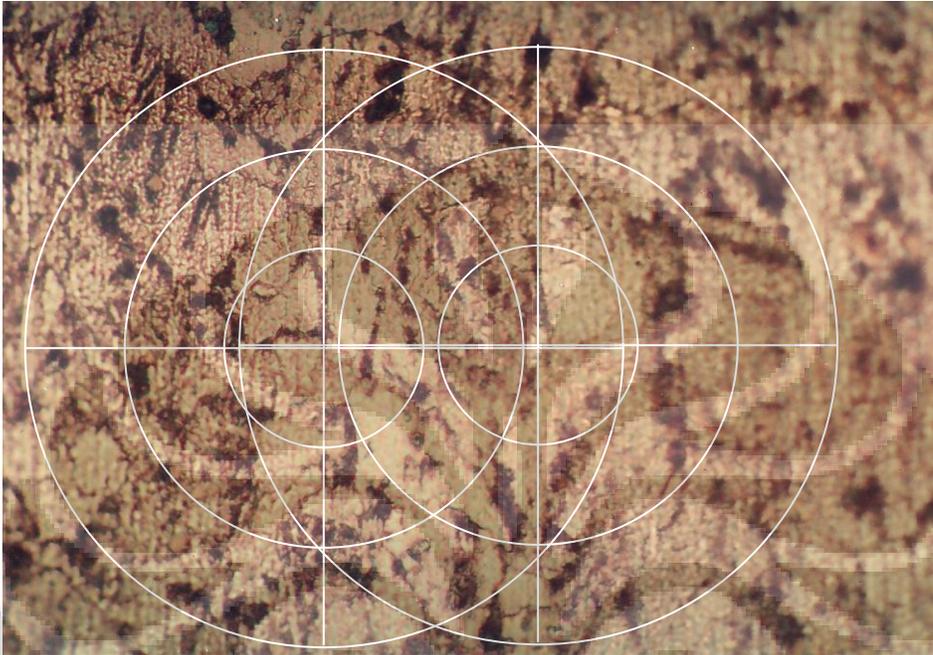
Sampel no 32 Perbesaran 500X, Reheating 1150°C, Tdef= 850°C dan reduksi sebesar 0.12.



Jumlah Perpotongan : 1) $11 + 17 + 25 = 53$, 2) $9 + 18 + 26 = 53$, 3) $10 + 17 + 28 = 55$,
 $G_1 = 8,16$ $G_2 = 8,16$ $G_3 = 8,27$ Tabel 4 ASTM E112 $\rightarrow d_1 = 21,28$, $d_2 = 21,28$, $d_3 = 20,55$
 $d_{avg} = 21,03 \mu\text{m}$

(lanjutan)

Sampel no 34 Perbesaran 500X, Reheating 1150°C, Tdef= 860°C dan reduksi sebesar 0,21



Jumlah Perpotongan : 1) $10 + 24 + 27 = 61$, 2) $9 + 22 + 29 = 60$, 3) $11 + 22 + 29 = 62$

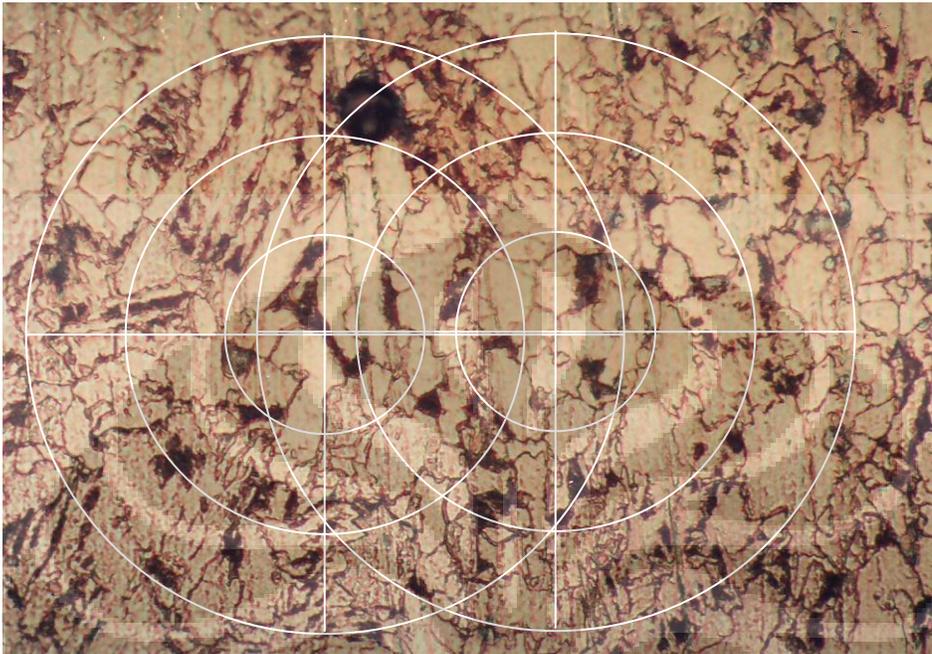
$G_1 = 8,62$ $G_2 = 8,52$, $G_3 = 8,57$ Tabel 4 ASTM E112 $\rightarrow d_1 = 18,17$ $d_2 = 18,74$, $d_3 = 18,45$

$d_{avg} = 18,45 \mu m$

(Lanjutan)

Universitas Indonesia

Sampel no 35 Perbesaran 500X, Reheating 1150°C, Tdef= 860°C dan reduksi sebesar 0,25



Jumlah Perpotongan = 1)10 + 25 +30= 66 , 2)12 + 25 + 29 = 66, 3) 13 + 22+ 33 68

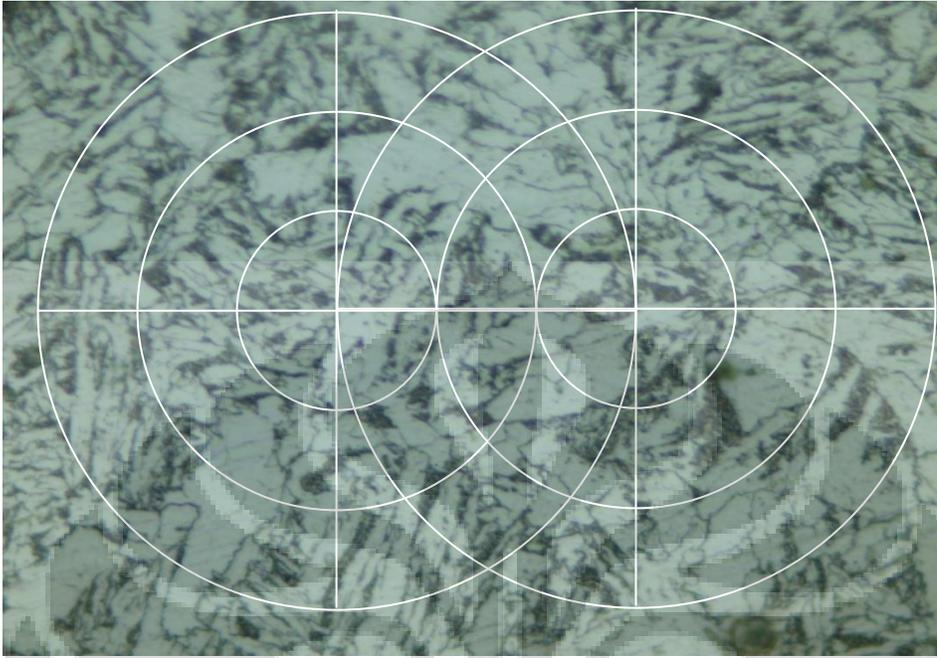
$G_1= 8,80$ $G_2=8,88$, $G_3=8,80$ Tabel 4 ASTM E112 $\rightarrow d_1=17,09$, $d_2=16,57$, $d_3=17,09$

$d_{avg}=16,92 \mu m$

(Lanjutan)

Sampel no 36 Perbesaran 1000X, Reheating 1150°C, Tdef= 960°C dan reduksi sebesar 0,12

Universitas Indonesia



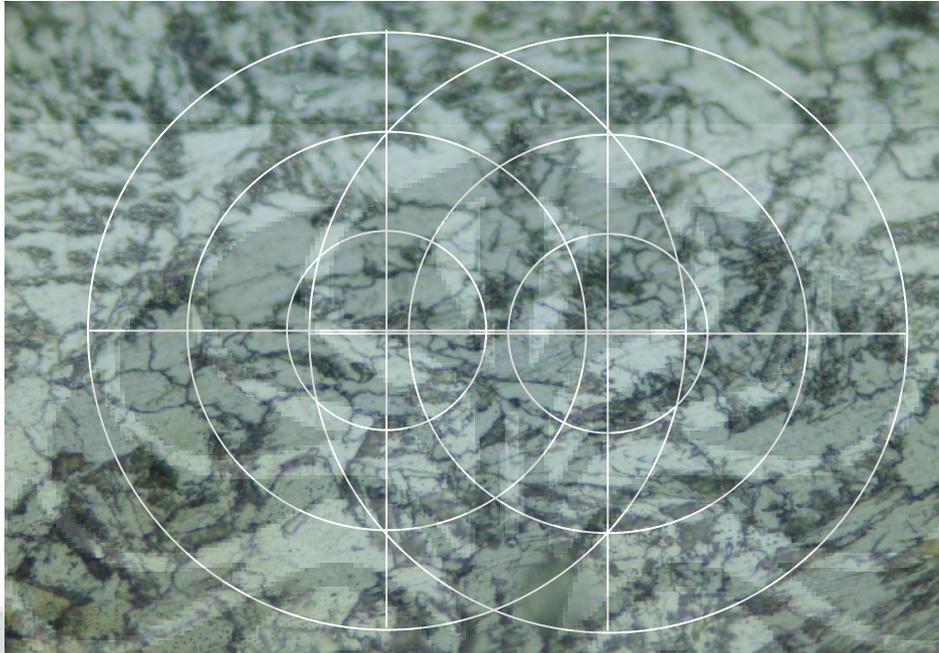
Jumlah Perpotongan = 1) $17+23+35=75$, 2) $18+24+32=74$, 3) $15+23+35=73$

$G_1=11,17$, $G_2=11,13$, $G_3=11,09$ Tabel 4 ASTM E112 $\rightarrow d_1=7,49$, $d_2=7,58$, $d_3=7,67$

$d_{avg}=7,58 \mu\text{m}$

(Lanjutan)

Sampel no 37 Perbesaran 1000X, Reheating 1150°C, Tdef= 980°C dan reduksi sebesar 0,071



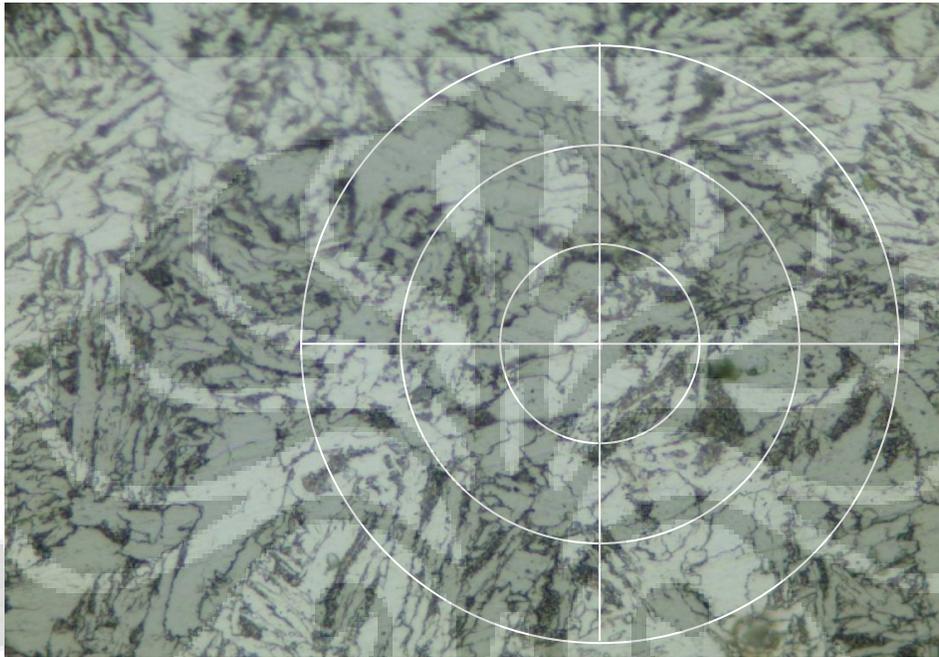
Jumlah Perpotongan = 1) 13+21+32=66 , 2)15+20+30=65 , 3)15+25+27=67

$G_1=10,80$, $G_2=10,75$, $G_3=10,84$ Tabel 4 ASTM E112 $\rightarrow d_1=8,49$, $d_2=8,62$, $d_3=8,36$

$d_{avg}=8,49 \mu m$

(Lanjutan)

Sampel no 38 Perbesaran 1000X, Reheating 1150°C, Tdef= 940°C dan reduksi sebesar 0,17



Jumlah Perpotongan= $19+24+32=75,15+29+35=79,17+25+37=77$

$G_1=11,17, G_2=11,31, G_3=11,24$ Tabel 4 ASTM E112 $\rightarrow d_1=7,49, d_2=7,13, d_3=7,30$

$d_{avg}=7,31 \mu m$

Lampiran 3 Besar Butir Ferit dan Standard Deviasi Untuk Setiap Sampel

Sampel 32		$T_{\text{deform}} = 850^{\circ}\text{C}$		$r=12\%$				
No	Jumlah Perpotongan (P)	L_3	G_i	diameter (d_i) μm	$d=\sum d_i/N$	$d - d_i$	$(d - d_i)^2$	
1	53	0.018868	8.168216	21	21.03167	0.256333	0.065707	
2	55	0.018182	8.275096	20.519	21.03167	-0.51267	0.262827	
3	53	0.018868	8.168216	21	21.03167	0.256333	0.065707	
	Σ			63.095			0.394241	
$sd = (\sum(d-d_i)^2/N-1)^{1/2}$								0.443982

Sampel 34		$T_{\text{deform}} = 860^{\circ}\text{C}$		$r=21.33\%$				
No	Jumlah Perpotongan (P)	L_3	G_i	diameter (d_i) μm	$d=\sum d_i/N$	$d - d_i$	$(d - d_i)^2$	
1	62	0.016129	8.620771	18.17	18.45333	-0.28333	0.080278	
2	60	0.016667	8.526159	18.74	18.45333	0.286667	0.082178	
3	61	0.016393	8.573853	18.45	18.45333	-0.00333	1.11E-05	
	Σ			55.36			0.162467	
$sd = (\sum(d-d_i)^2/N-1)^{1/2}$								0.285015

Sampel 35		$T_{\text{deform}} = 860^{\circ}\text{C}$		$r=25.33\%$				
No	Jumlah Perpotongan (P)	L_3	G_i	diameter (d_i) μm	$d=\sum d_i/N$	$d - d_i$	$(d - d_i)^2$	
1	66	0.015152	8.801168	17.09	16.91667	0.173333	0.030044	
2	68	0.014706	8.887306	16.57	16.91667	-0.34667	0.120178	
3	66	0.015152	8.801168	17.09	16.91667	0.173333	0.030044	
	Σ			50.75			0.180267	
$sd = (\sum(d-d_i)^2/N-1)^{1/2}$								0.300222

(Lanjutan)

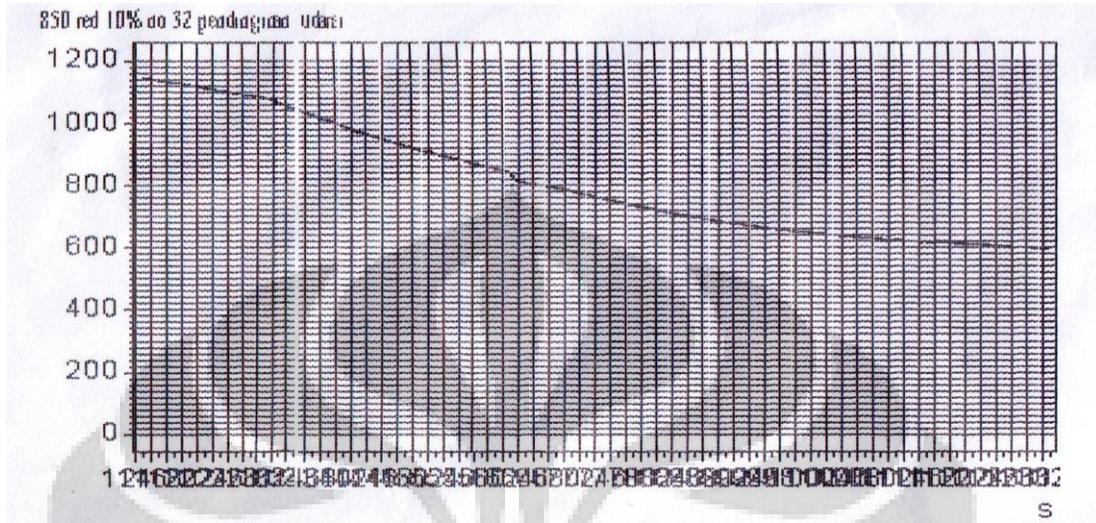
Sampel 36		$T_{\text{deform}} = 960^{\circ}\text{C}$		$r=12.24\%$				
No	Jumlah Perpotongan (P)	L_3	G_i	diameter (d_i) μm	$d=\sum d_i/N$	$d - d_i$	$(d - d_i)^2$	
1	75	0.006667	11.17003272	7.49	5.685	1.805	3.25803	
2	74	0.006757	11.13130181	7.58	5.685	1.895	3.59103	
3	73	0.006849	11.09204394	7.67	5.685	1.985	3.94023	
	Σ			22.74			10.7893	
$sd = (\sum (d-d_i)^2 / N-1)^{1/2}$								1.9156

Sampel 37		$T_{\text{deform}} = 980^{\circ}\text{C}$		$r=7.12\%$				
No	Jumlah Perpotongan (P)	L_3	G_i	diameter (d_i) μm	$d=\sum d_i/N$	$d - d_i$	$(d - d_i)^2$	
1	66	0.007576	10.80118114	63.803	48.25025	15.5528	241.888	
2	65	0.007692	10.75712824	65.395	48.25025	17.1448	293.942	
3	67	0.007463	10.84457157	63.803	48.25025	15.5528	241.888	
	Σ			193.001			777.719	
$sd = (\sum (d-d_i)^2 / N-1)^{1/2}$								1.79682

Sampel 38		$T_{\text{deform}} = 940^{\circ}\text{C}$		$r=17.33\%$				
No	Jumlah Perpotongan (P)	L_3	G_i	diameter (d_i) μm	$d=\sum d_i/N$	$d - d_i$	$(d - d_i)^2$	
1	75	0.006667	11.1700327	7.49	7.30666	0.1833	0.03361	
2	79	0.006329	11.3199578	7.13	7.30666	-0.1767	0.03121	
3	77	0.006494	11.2459689	7.3	7.30666	-0.0067	4.4E-05	
	Σ			21.92			0.0648	
$sd = (\sum (d-d_i)^2 / N-1)^{1/2}$								0.18009

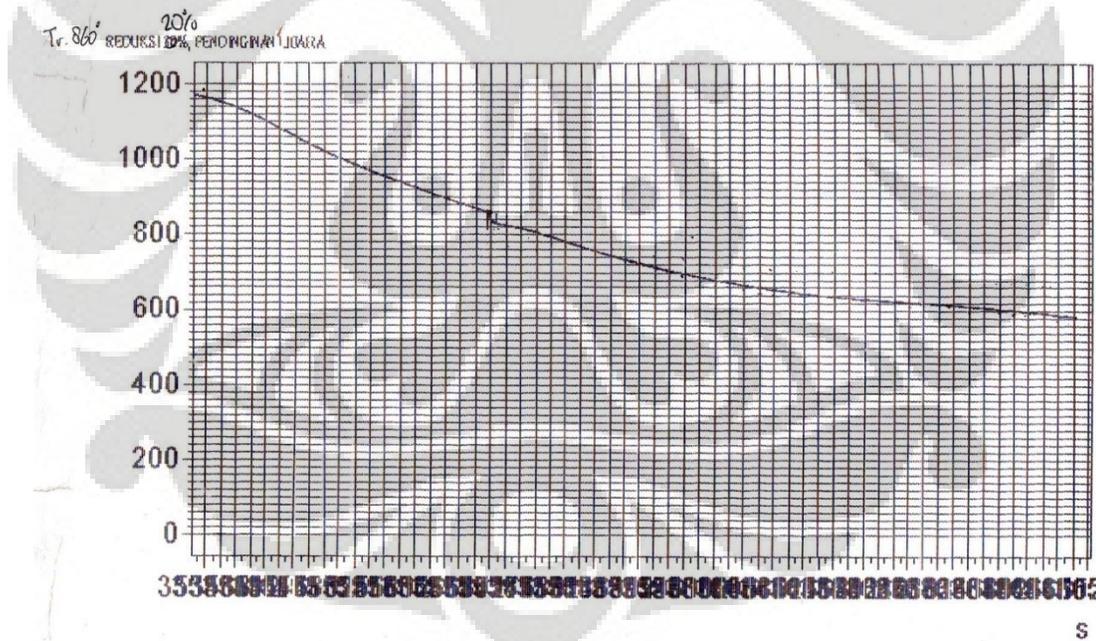
Universitas Indonesia

Lampiran 4 Grafik Temperatur Pengujian Canai Panas



Grafik

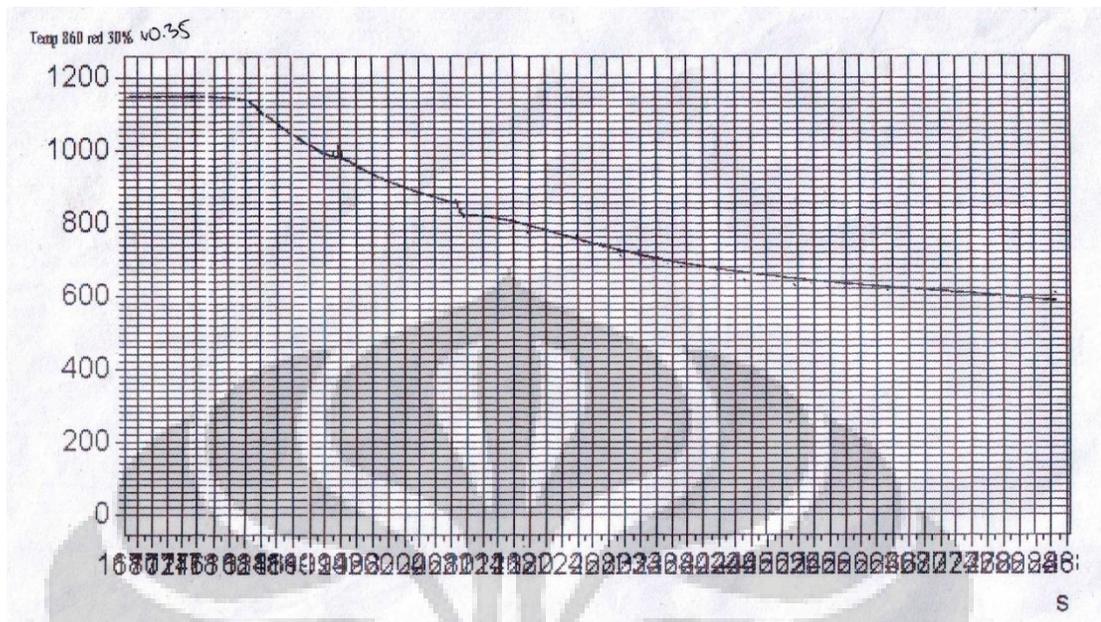
L.4.1. Temperatur Akuisisi sampel 32



Grafik

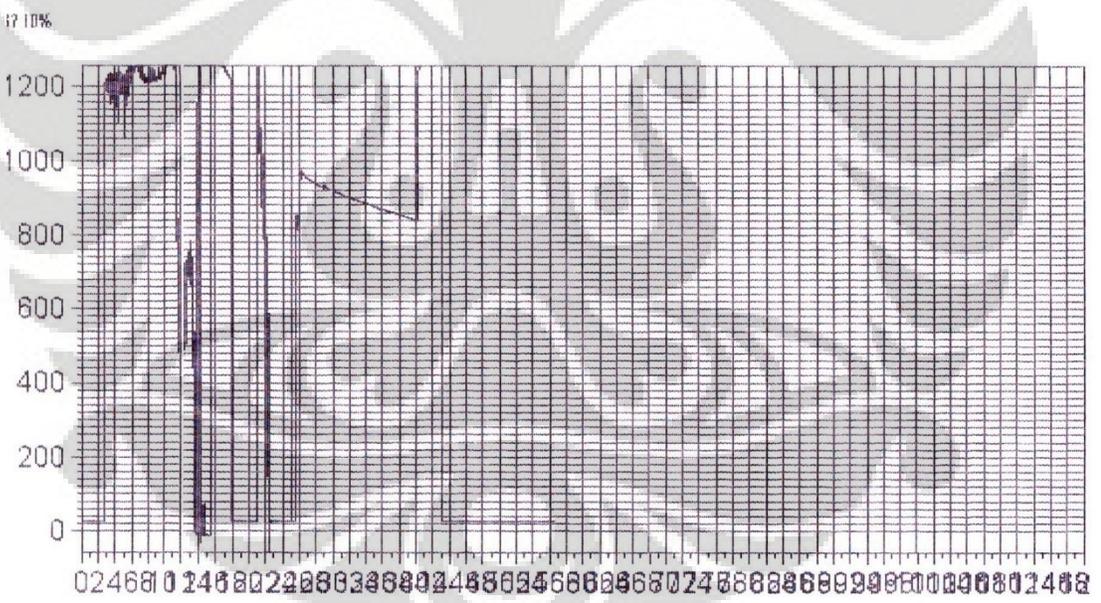
L.4.2. Temperatur Akuisisi sampel 34

(Lanjutan)



Grafik

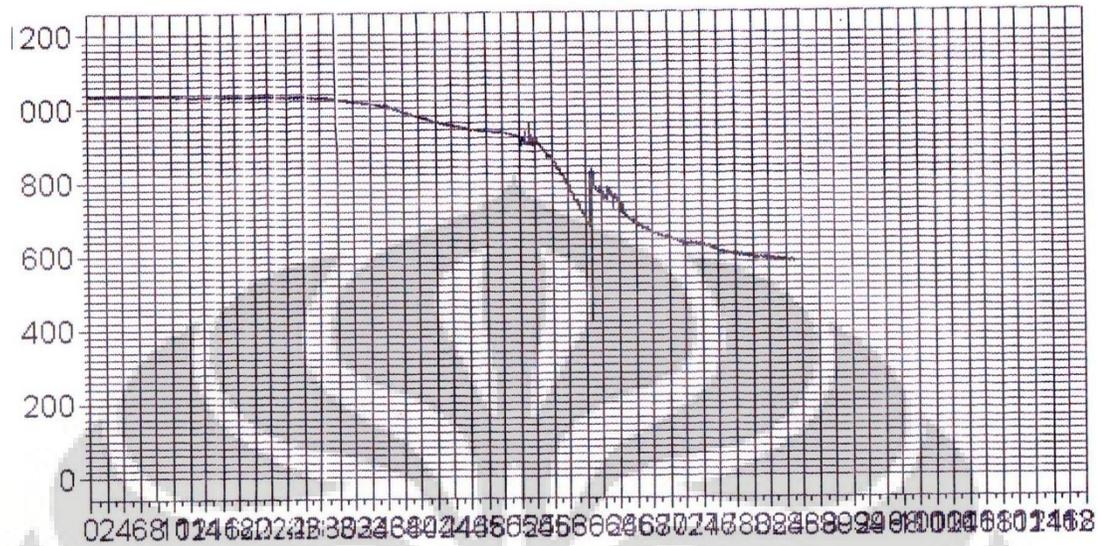
L.4.3. Temperatur Akuisisi sampel 35



Grafik

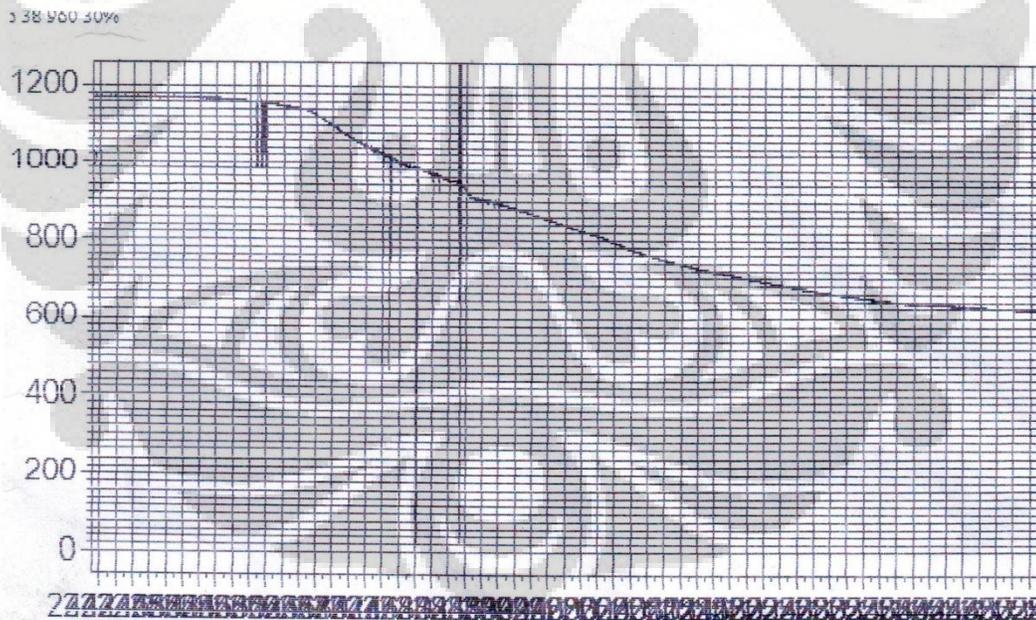
L.4.4 Temperatur Akuisisi sampel 37

(Lanjutan)



s Grafik

L.4.5 Temperatur Akuisisi sampel 36



Grafik

L.4.6 Temperatur Akuisisi sampel 38