



UNIVERSITAS INDONESIA

**PERSAMAAN KINETIKA PERTUMBUHAN BUTIR
AUSTENIT BAJA HSLA-Nb 0,056% PADA KONDISI NON-
ISOTERMAL SETELAH PROSES CANAI PANAS**

SKRIPSI

**AGUNG PRIHANTONO
04 05 04 00 58**

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
JUNI 2009**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PERSAMAAN KINETIKA PERTUMBUHAN BUTIR
AUSTENIT BAJA HSLA-Nb 0,056% PADA KONDISI NON-
ISOTERMAL SETELAH PROSES CANAI PANAS**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar

Sarjana Teknik (S.T.)

AGUNG PRIHANTONO

04 05 04 00 58

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
JUNI 2009**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

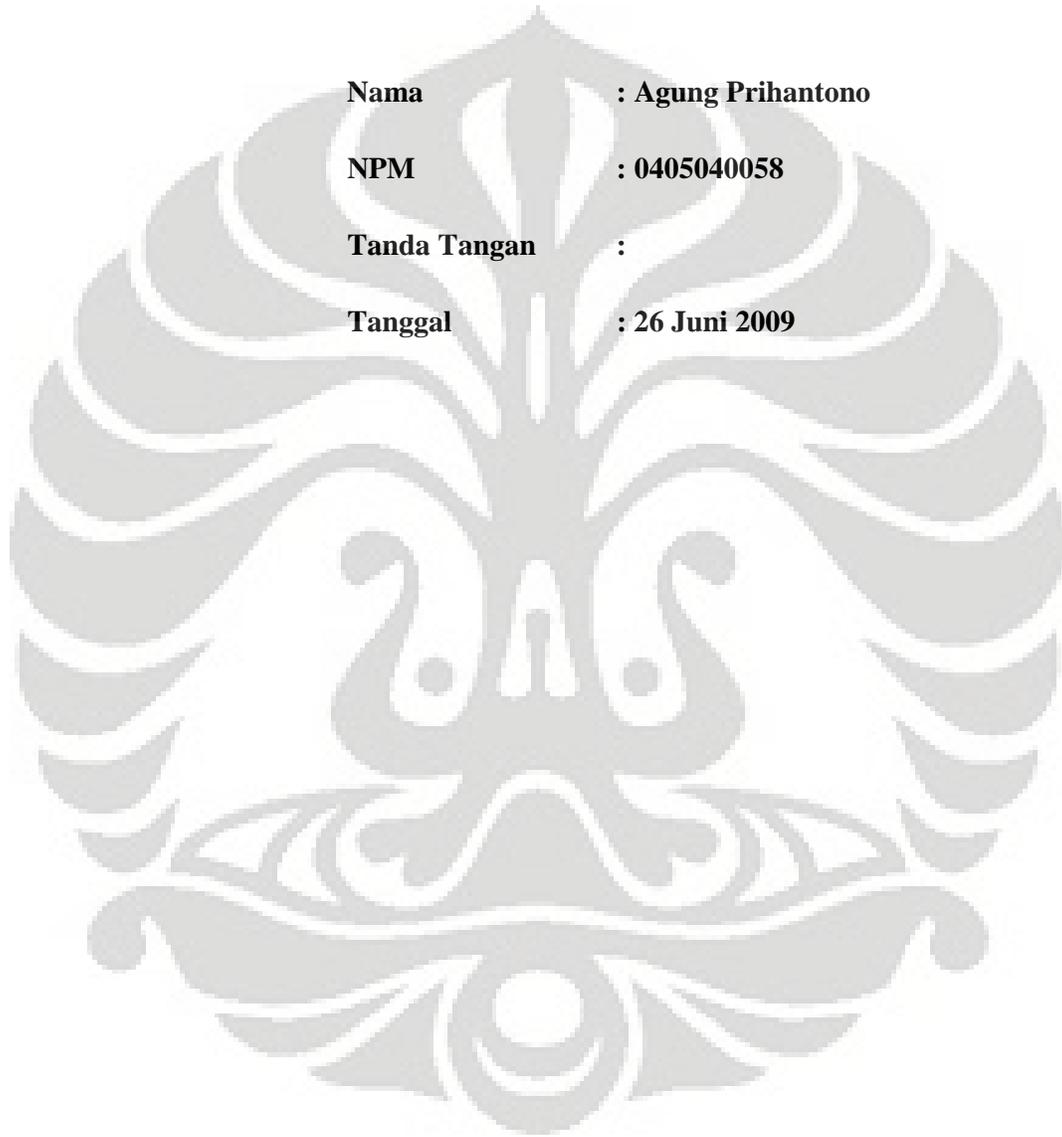
Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar

Nama : Agung Prihantono

NPM : 0405040058

Tanda Tangan :

Tanggal : 26 Juni 2009



HALAMAN PENGASAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Agung Prihantono
NPM : 0405040058
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi : Persamaan Kinetika Pertumbuhan butir austenite
baja HSLA - Nb 0,056% pada kondisi non-
isothermal setelah proses canai panas

Telah Berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.) pada program studi Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Myrna Ariati Mochtar, M.S (.....)

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

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

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 ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik jurusan Metalurgi dan Material pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan 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.Myrna Ariati Mochtar, M.S., selaku dosen pembimbing saya yang telah menyediakan banyak waktu, tenaga dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- (2) Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan materi dan moral;
- (3) Tri Wahyu Sulistio yang merupakan rekan penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
- (4) Sahabat dan pihak 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 pendidikan khususnya dalam bidang rekayasa material.

Depok, 20 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 : AGUNG PRIHANTONO
NPM : 0405040058
Program Studi : Metalurgi dan Material
Departemen : Metalurgi dan Material
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

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 :

**PERSAMAAN KINETIKA PERTUMBUHAN BUTIR AUSTENIT
BAJA HSLA-Nb 0,056% PADA KONDISI NON-ISOTERMAL
SETELAH PROSES CANAI PANAS**

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

(Agung Prihantono)

ABSTRAK

Nama : Agung Prihantono
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul : Persamaan Kinetika Pertumbuhan Butir Austenit Baja HSLA-Nb
0,056% Pada Kondisi Non-Isotermal Setelah Proses Canai Panas

Saat ini banyak dikembangkan material baja dengan menambahkan unsur paduan ringan (sekitar 0,15%). Unsur tersebut dipadukan ke baja dengan salah satu metodenya melalui penguatan presipitat dan penghalusan butir. Dalam penelitian ini material yang digunakan yaitu baja HSLA 0,056% Nb, yang di reheating pada temperatur sekitar 1200°C. Dengan memodifikasi kecepatan pendinginan yang tentunya akan menghasilkan besar butir akhir yang berbeda. Data ukuran butir ini digunakan untuk memodifikasi persamaan kinetika butir sellars. Dengan menambahkan variabel kecepatan pendinginan dan penyesuaian konstanta, Konstanta untuk persamaan sellars pada baja HSLA 0,056% Nb adalah 1×10^{13} dan kecepatan pendinginannya adalah 12,7.

Kata Kunci : Baja HSLA-Nb, Persamaan kinetika butir sellars, Penguatan presipitat

ABSTRACT

Name : Agung Prihantono
Departemen : Metalurgi dan Material
Theme : Kinetics of Austenitic Grain Growth in HSLA-Nb 0,056% Steel
after Hot Rolled at Non – Isothermal Condition

At this time, there are many development of steel with added alloying material less than 0,15 % Wt. One of kind method for alloyed this material with precipitation and grain refinement strengthening. In this research we use HSLA 0,056% Nb steel, which is reheat until 1200 °C, with modification of cooling rate variation which is final grain is different. Grain size used for modification of sellars kinetics grain equation. With adding cooling rate and constant value. The result of this research is 1×10^{13} constant value and 12,7 for cooling rate .

Key Words : HSLA-Nb steel, Sellars kinetics grain equation, Precipitation strengthening

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	ii
KATA PENGANTAR.....	iii
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	iv
ABSTRAK.....	v
ABSTRACT.....	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR LAMPIRAN.....	xi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
I.1. Latar Belakang Penelitian.....	1
I.2. Tujuan.....	4
I.3. Ruang Lingkup.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
II.1. Mekanisme Penguatan Pada Material Logam.....	6
II.2. Mekanisme Penguatan Dengan Penghalusan Butir.....	7
II.3. Proses Termomekanik (<i>Thermomekanikal Process</i>).....	8
II.4. Proses Canai Panas.....	9
II.5. Proses Recovery, Rekrystalisasi dan Pertumbuhan Butir.....	12
II.5.1. Proses Recovery.....	12
II.5.2. Proses Rekrystalisasi.....	14
II.5.3. Proses Pertumbuhan Butir.....	16
II.6. Pertumbuhan Butir Austenit dalam keadaan Isotermal.....	16
II.7. Baja HSLA.....	20
II.8. Baja HSLA-Nb.....	24
II.9 Mekanisme Penguatan Baja HSLA-Nb.....	25
II.9.1. Penguatan Presipitat.....	25
II.9.2. Penghalusan Butir Ferrit.....	27
BAB III METODE PENELITIAN.....	31
III.1. Bahan Penelitian.....	31
III.2. Prosedur Penelitian.....	31
III.2.1. Pembuatan Benda Uji.....	32
III.2.2. Proses Pemanasan.....	32
III.2.3. Proses Canai Panas.....	33
III.2.4. Proses Pendinginan.....	33
III.2.5. Preparasi, Pengujian Pengamatan Mikrostruktur.....	33
III.2.6. Penghitungan Besar Butir Austenit.....	34
III.3. Diagram Alir Penelitian.....	35

BAB IV PEMBAHASAN.....	35
IV.1. Temperatur Kelarutan Presipitat Nb(CN).....	35
IV.2. Evaluasi Hasil Pengujian Baja HSLA 0,056% Nb.....	36
IV.3. Hasil Mikrostruktur.....	37
IV.4. Grafik Akuisisi Temperatur.....	42
IV.5. Perhitungan Ukuran Butir Austenit.....	47
IV.6. Korelasi antara Kecepatan Pendinginan dengan Ukuran Butir Austenit....	51
IV.7. Pertumbuhan Butir Austenit Dalam Keadaan Isotermal dengan Non Isotermal.....	52
IV.8. Komparasi dengan Penelitian Lainnya.....	56
 BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	 61
V.I. Kesimpulan.....	61
V.II. Saran.....	62
 DAFTAR REFERENSI.....	 63
LAMPIRAN I.....	65
LAMPIRAN II.....	69
LAMPIRAN III.....	73

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Thermomechanical Control Process	4
Gambar 2.1	Ilustrasi Batas Butir dan Pergerakan Dislokasi	7
Gambar 2.2	Perubahan Ukuran Butir Selama Proses Termomekanik	9
Gambar 2.3	Ilustrasi Tegangan Pada Proses Canai	10
Gambar 2.4	Ilustrasi Pertumbuhan Butir Saat Canai Panas	11
Gambar 2.5	Skematis Pengerolan Pada Thermomechanical Processing	12
Gambar 2.6	Skematis Proses Recovery, Rekristalisasi dan Pertumbuhan Butir	13
Gambar 2.7	Pembentukan Sub-butir	14
Gambar 2.8	Perbandingan Antara Rekristalisasi Dinamik dan Statik	15
Gambar 2.9	Pergerakan Batas Butir	17
Gambar 2.10	Pengaruh Partikel Fasa Kedua Pada Pertumbuhan Butir	17
Gambar 2.11	Pertumbuhan Butir Austenit Pada Temperatur Konstan	18
Gambar 2.12	Proses Pertumbuhan Butir Sejalan Peningkatan Waktu	20
Gambar 2.13	Kelarutan Beberapa Carbonitrida Pada Austenit	22
Gambar 2.14	Pengaruh Ukurang Parikel NbCN Terhadap Yield Strength	24
Gambar 2.15	Hubungan Dislokasi dan Partikel Presipitat	25
Gambar 2.16	Pengaruh Beberapa Unsur Paduan Terhadap Ukuran Butir Ferrit	26
Gambar 2.17	Profil Time-Temperatur Untuk Pengerolan Terkendali	28

Gambar 2.18	Evolusi Ukuran Butir Selama Deformasi	28
Gambar 2.19	Pengendapan dan Kelarutan Vanadium dan NbCN Pada Austenit	29
Gambar 3.1	Ilustrasi Benda Uji dan Pemasangan Termokopel	31
Gambar 3.2	Diagram Alir Penelitian	34
Gambar 4.4.1	Ilustrasi Variabel Untuk Pendinginan Dalam Keadaan Kontinyu	43
Gambar 4.6	Hubungan Antara Kecepatan Pendinginan dengan Ukuran Butir Austenit	51
Gambar 4.7	Grafik sebelum modifikasi	55
Gambar 4.8	Grafik Hasil Percobaan dengan Permodelan	56
Gambar 4.9	Perbandingan Model Persamaan dengan Penelitian Lain	58

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	Komposisi Kimia Baja HSLA-Nb Dalam Persen Berat	4
Tabel 3.1	Komposisi Kimia Baja HSLA-Nb Dalam Persen Berat	27
Tabel 4.2	Evaluasi Sampel Uji	37
Tabel 4.3	Hasil Foto Mikrostruktur Sampel Uji	38
Tabel 4.4	Grafik akuisisi dari sampel uji	43
Tabel 4.5	Ukuran butir hasil percobaan	48
Tabel 4.6	Data hasil percobaan	54
Tabel 4.7	Diameter butir austenit sebelum modifikasi	55
Tabel 4.8	Diameter butir austenit setelah modifikasi	57
Tabel 4.9	Perbandingan hasil modifikasi	59

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN I : Peralatan Pendukung	65
LAMPIRAN II : Contoh Perhitungan Ukuran Butir	69
LAMPIRAN III : Foto Mikro	73



BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang Penelitian

Sampai saat ini, banyak material yang digunakan dalam berbagai aplikasi yang membutuhkan kekuatan (*strength*) yang tinggi. Hal ini berakibat jika material tersebut mempunyai sifat mekanis yang baik yaitu kekuatan yang tinggi, maka jangkauan penggunaannya akan sangat luas dalam kehidupan sehari-hari. Terlebih bila dikombinasikan dengan sifat-sifat lain seperti massa jenis ringan, kemudahan proses pembuatan (*manufacturing*) dan perakitan (*assembly*). Oleh karena pentingnya hal-hal di atas, maka terdapat beberapa metode untuk meningkatkan kekuatan dan ketangguhan baja. Diantaranya : pengerasan regang (*strain hardening*), penguatan presipitat (*precipitation hardening*), penguatan batas butir (*grain boundary strengthening*) dan penguatan larutan padat (*solid solution strengthening*) Salah satu metode yang sering digunakan adalah metode penghalusan ukuran butir, dan untuk menunjangnya material yang biasa digunakan untuk metode ini adalah baja HSLA (*High Strength Low Alloy*).

Menurut definisinya, Baja HSLA adalah baja dengan penambahan unsur-unsur padua tertentu dalam jumlah yang kecil ($< 0,15\%$) yang mampu menghasilkan sifat mekanis sama baiknya dengan baja lainnya melalui metode penguatan presipitat dan penghalusan ukuran butir. Dalam hal ini baja HSLA adalah baja yang mempunyai keunggulan tinggi dan sudah bisa diproduksi di Indonesia, akan tetapi jika dibandingkan dengan dengan produk luar negeri lainnya, harga jual produk dalam negeri masih sangat tinggi, hal ini dikarenakan belum efisiennya proses produksi baja dalam negeri. Oleh karena itu pengembangan-pengembangan dan *research* dari produk yang sudah ada harus tetap ditingkatkan.

Salah satu baja HSLA yang sedang dikembangkan dan mempunyai sifat mekanis yang baik adalah baja HSLA-Nb. Efek dari penambahan Niobium (Nb) pada baja mampu meningkatkan kekuatan luluh (*yield strength*) baja HSLA melalui metode penguatan presipitat dan penghalusan butir. Penambahan unsur-unsur lain seperti Cu dan Ni bertujuan untuk meningkatkan ketahanan korosi

atmosferik dan meningkatkan kekerasan yang disebabkan terbentuknya fasa kedua (*secondphase*)⁽¹⁾.

Selain pengembangan *microalloy steel*, hal terpenting yang harus diperhatikan untuk mendapatkan baja HSLA dengan *mechanical properties* yang baik yaitu pengontrolan terhadap proses pembentukan, yaitu dengan cara kontrol mikrostruktur dalam hal ini ukuran butir. Sifat mikrostruktur akhir yang terbentuk sangat mempengaruhi sifat mekanis dari baja HSLA. Pengontrolan mikrostruktur yang baik merupakan cara yang efektif untuk mendapatkan baja HSLA dengan sifat mekanis yang baik. Hal ini karena struktur butir yang diinginkan pada mikrostruktur akhir tergantung pada bentuk dan kinetika ukuran butir selama proses pemanasan awal (*reheating*), dimana untuk mendapatkan bentuk ferrite yang halus, maka harus terbentuk ukuran butir austenite yang berukuran kecil saat proses *reheating* awal. Untuk itu diperlukanlah TMCP (*TermoMechanical Control Process*),⁽²⁾ yaitu proses yang dapat mengontrol ukuran mikrostruktur baja HSLA selama proses pemanasan awal (*reheating*), canai panas (*hot rolling*) serta pendinginan.

Parameter yang berpengaruh dalam mengontrol besar butir austenite pada saat proses TMCP adalah dengan mengontrol:

- Temperatur
 - Waktu tahan
 - Besar deformasi mesin roll
 - Waktu tahan sebelum pendinginan
 - Kecepatan pendinginan akhir.
- } Saat reheating
- } Untuk mengontrol pertumbuhan butir austenit setelah canai panas

Butir austenite yang mengalami forming setelah canai panas ini mula-mula akan ter-recovery, ter-rekristalisasi, dan akhirnya mengalami pertumbuhan butir (*grain growth*). Apabila butir austenite sempat tumbuh jadi besar, maka butir ferrite akhir juga akan memiliki ukuran yang besar dan sifat mekanisnya akan menurun⁽³⁾. Oleh karenanya perlu perhatian khusus pada pertumbuhan butir austenite setelah canai panas, agar didapat sifat mekanis yang maksimal. Untuk mengamati kinetika pertumbuhan butir dalam keadaan isothermal, kita menggunakan persamaan sellars⁽⁴⁾. dan beck⁽⁵⁾.

Namun di industri, setelah proses canai panas, dalam kenyataannya yang terjadi adalah kondisi pendinginan non-isothermal. Pendinginan non isothermal ini sangat dipengaruhi antara lain oleh kecepatan pendinginan, perbedaan temperatur selama pendinginan, dan akan berakibat kinetika pertumbuhan butir yang berbeda dibandingkan pertumbuhan dalam keadaan isothermal.

Dari masalah-masalah tersebut maka penelitian ini dilakukan untuk mengamati laju pertumbuhan butir austenit pada baja HSLA-Nb dengan *mikroalloying* Cu dan Ni hasil *continuous casting* setelah dilakukan canai panas dengan pendekatan pendinginan non-isothermal. Kualitas material Baja HSLA hasil canai panas ini dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya:

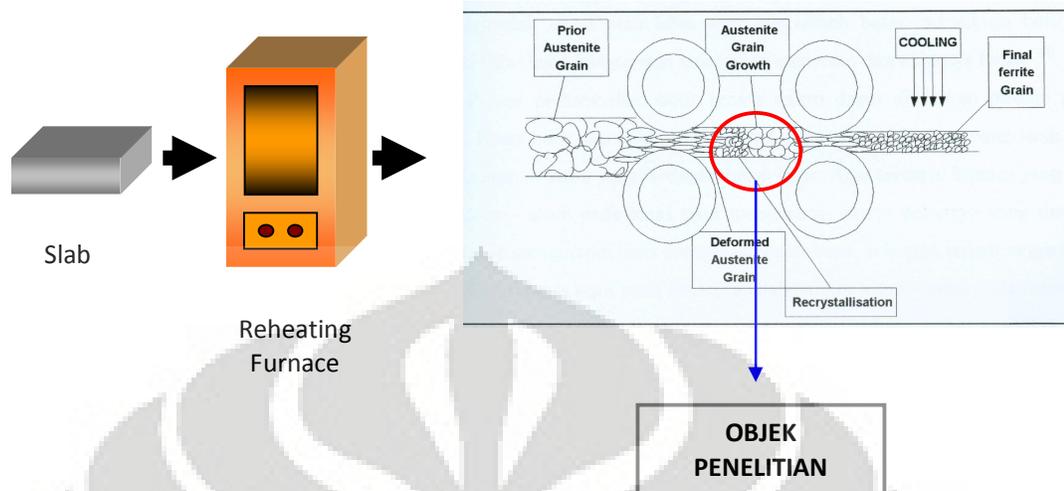
Faktor internal :

- Komposisi kimia material
- Data historis material
- Ukuran butir awal material

Faktor eksternal :

- Temperatur reheat
- Temperatur deformasi
- Laju deformasi
- Persen deformasi

Dengan adanya penelitian ini diharapkan adanya suatu referensi tentang kinetika pertumbuhan butir untuk keadaan non-isothermal dan dapat memberikan masukan untuk industri baja tanah air.



Gambar 1.1. *Thermomechanical Control Process*

I.2 Tujuan

Penelitian ini dilakukan dengan maksud :

1. Mengamati pertumbuhan butir austenit baja HSLA-Nb 0,056% setelah canai panas, dalam keadaan pendinginan kontinu.
2. Mendapatkan persamaan untuk kinetika pertumbuhan butir austenit selama canai panas pada kondisi non-isotermal.

I.3 Ruang Lingkup

Ruang lingkup penelitian ini meliputi :

1. Menggunakan benda uji baja HSLA-Nb hasil *continous casting*, dengan komposisi sebagai berikut :

Komposisi	91173T	Komposisi	91173T
Ti	0.004	Cu	0.042
C	0.172	Nb	0.056
Si	0.259	V	0.004
Mn	1,048	Ni	0.263
P	0.014	Cr	0.020
S	0.003	N	0.031
Al	0.044	Cu+Cr	0.062

Tabel 1.1. Komposisi kimia baja HSLA-Nb dalam persen berat

2. Melakukan pemanasan isothermal pada temperatur 1200 °C
3. Melakukan canai panas dengan deformasi sekitar 40%
4. Proses pendinginan kontinyu dengan variabel kecepatan pendinginan
5. Pengamatan butir austenite dengan menggunakan mikroskop optik
6. Pengamatan besar butir austenite menggunakan metode perbandingan dan mengacu pada standar ASTM E 112

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Mekanisme Penguatan Pada Material Logam

Pada prinsipnya rekayasa dari suatu logam umumnya menggunakan ilmu metalurgi dan material, untuk mendesain material yang memiliki kekuatan tinggi, keuletan dan ketangguhan. Ketika suatu material meningkat kekuatannya umumnya keuletan akan menurun.

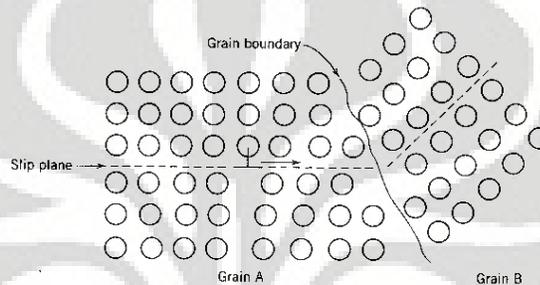
Hal mendasar yang perlu diingat dalam penguatan material adalah terjadinya pergerakan dislokasi dan penghalangan pergerakan dislokasi yang akan meningkatkan sifat mekanik dari logam. Karena deformasi plastis makroskopis berhubungan dengan pergerakan dislokasi dalam jumlah besar, kemampuan dislokasi untuk dapat bergerak berhubungan dengan kemampuan logam untuk diubah secara plastis. Dengan menghambat pergerakan dislokasi, sifat mekanis dapat ditingkatkan, karena energi mekanik yang dibutuhkan untuk membuat deformasi plastis akan semakin besar. Sebaliknya, apabila *pergerakan dislokasi* tidak ada yang menahan, logam akan lebih mudah untuk mengalami perubahan bentuk apapun, dan akan menjadi semakin lunak.

Oleh karena itu, kita dapat mengambil kesimpulan bahwa seluruh mekanisme penguatan pada material terutama logam, mempunyai prinsip sederhana yaitu : menahan atau menghalangi pergerakan dislokasi, yang mengakibatkan material menjadi lebih keras dan lebih kuat. Mekanisme penguatan (*strengthening mechanism*) yang sering digunakan pada baja adalah ⁽³⁾:

- Penambahan paduan (*alloying*), biasanya menggunakan unsur Nb, Cr, Ni, Mn
- Perlakuan panas (*heat treatment*), biasanya kita memanaskan baja pada range temperatur Austenite ($723^{\circ}\text{C} - 1200^{\circ}\text{C}$)
- Pengerasan regangan (*strain hardening*), biasanya kita memberikan gaya/pembebanan kepada material dari luar seperti: *rolling, forging, tensile force*, dll
- Penghalusan ukuran butir (*grain size reduction*), biasanya menggunakan V, Ti dan Nb

II.2 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 dapat dilihat pada gambar 2.1 dan tentunya karena perbedaan orientasi tersebut yang menjadikan adanya batas butir. Saat deformasi plastis, slip atau pergerakan dislokasi berada dalam butir, misalnya dari butir A ke butir B dalam Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Ilustrasi Batas Butir dan Pergerakan Dislokasi

Batas butir bertindak sebagai penghalang pergerakan dislokasi karena dua alasan:

1. Ketidaksamaan susunan 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

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

Persamaan 2.1 Hall-Patch Equation

Untuk mengetahui pengaruh ukuran butir dari teori diatas kita buktikan dengan persamaan *Hall patch* ⁽³⁾. dengan d adalah diameter butir rata – rata, dan σ_0 dan k_y adalah konstanta untuk material tertentu. Persamaan 2.1. ini tidak

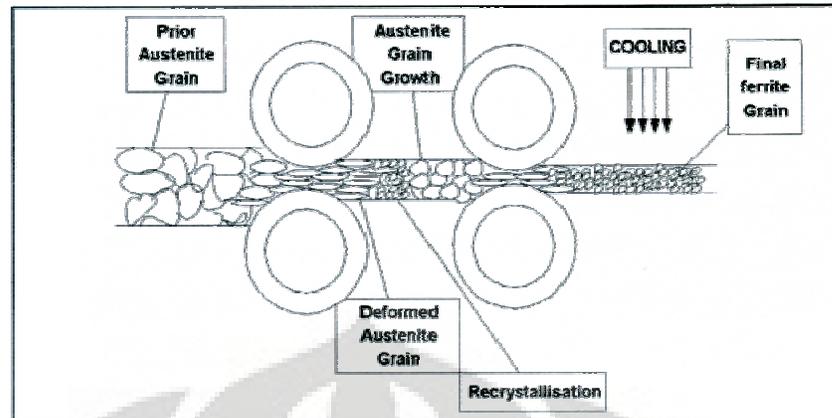
berlaku untuk material polikristal dengan butir yang sangat besar dan dengan butir yang amat sangat halus.

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.

Ukuran butir dapat dikontrol oleh laju pembekuan 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⁽³⁾.

II.3 Proses Termomekanik (*Thermomechanical process*)

Proses termomekanik dilakukan dengan tujuan untuk mengontrol mikrostruktur suatu material selama proses pembuatannya agar menghasilkan sifat mekanis yang baik. Secara umum, proses termomekanik terdiri dari proses pemanasan awal (*reheating*), canai panas (*hot rolling*), serta pendinginan (*cooling*)⁽²⁾. Proses pemanasan awal sangat penting dalam menghasilkan sifat mekanis benda sebab dengan pemanasan awal kita dapat memprediksi mikrostruktur akhir yang terbentuk. skema perubahan mikrostruktur dan ukuran butir selama proses termomekanik dapat dilihat pada Gambar 2.2. Pengontrolan butir austenit ini pertama terjadi saat proses pemanasan awal. Hal yang mempengaruhi pertumbuhan besar butir austenit yaitu temperatur *reheating* dan waktu tahan. Makin lama waktu tahan, maka besar butir austenit menjadi semakin besar. Makin tinggi temperatur, maka ukuran butir menjadi semakin besar. Hal ini terjadi karena semakin tinggi temperatur dan waktu tahan, maka kemampuan butir untuk berdifusi ke butir lainnya menjadi semakin besar pula atau kesempatan butir untuk tumbuh semakin besar (*grain growth*).



Gambar 2.2. Perubahan ukuran Butir Selama proses Termomekanik⁽⁶⁾

Pengontrolan butir austenit selanjutnya terjadi setelah proses canai panas, dimana rentang waktu antara canai panas pertama dan kedua, atau rentang waktu antara canai panas dengan pendinginan, akan memberikan kesempatan pada butir austenit untuk mengalami recovery, rekristalisasi dan bahkan pertumbuhan butir. Untuk menghasilkan butir ferit dengan ukuran yang halus di akhir proses, maka butir austenit juga harus dibuat menjadi halus.

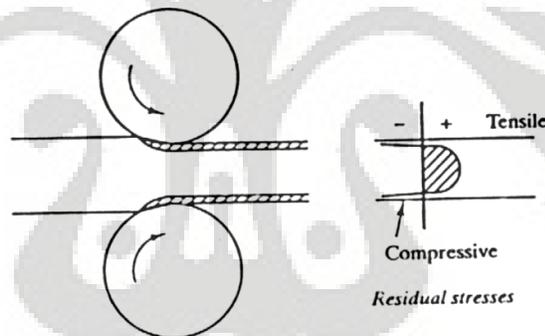
II.4 Proses Canai Panas

Proses canai (*Hot Rolling*) 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 dikomparasi 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 dalam kenyataan di lapangan. Biasanya tergantung pada pengaturan dari canai pada mills atau pengaturan stands untuk canai⁽⁷⁾.

Proses canai panas sebenarnya adalah proses canai dengan temperatur diatas temperatur rekristalisasi dari material. Oleh karena itu, regangan yang terjadi karena proses perubahan bentuk material akan dihilangkan oleh proses rekristalisasi⁽⁸⁾.

Regangan yang terjadi pada proses deformasi material akan menghasilkan tegangan sisa (*Residual Stress*). Hal ini disebabkan karena pada deformasi

material (dalam pengerjaan dingin) akan terjadi deformasi tidak homogen. Deformasi 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 di atasnya. Lapisan permukaan material benda kerja akan berusaha mengembang. Dengan demikian permukaan benda kerja akan mengalami tegangan tekan (compressive stress) sedangkan lapisan dalam akan mengalami tegangan tarik (tension stress). Ilustrasi ini dapat dilihat pada Gambar 2.3. Tegangan – tegangan inilah yang dikenal dengan tegangan sisa. Tegangan sisa sangat berpengaruh pada sifat – sifat material dan kinerja dari material itu sendiri.

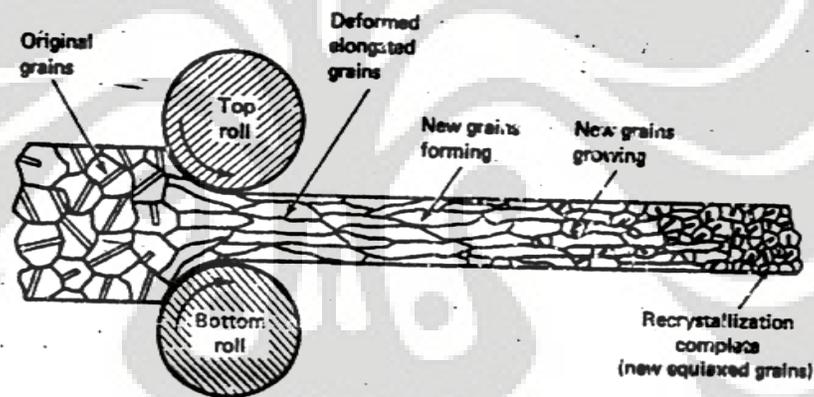


Gambar 2.3. Ilustrasi Tegangan Pada Proses Canai⁽⁸⁾

Secara umum, perlu untuk melakukan pengurangan atau penghilangan tegangan sisa yang dihasilkan oleh pengerjaan dingin untuk meningkatkan sifat material. Hal ini dapat dicapai dengan beberapa cara, yaitu dengan perlakuan panas atau mekanis. Perlakuan mekanis yaitu memberikan tegangan yang berlawanan atau melakukan deformasi plastis lanjut yang bertujuan memberikan kesempatan lepasnya tegangan yang tidak seragam. Sedangkan perlakuan panas dilakukan pada temperatur tertentu pada material, atau sering disebut *stress-relieving treatment*⁽⁸⁾.

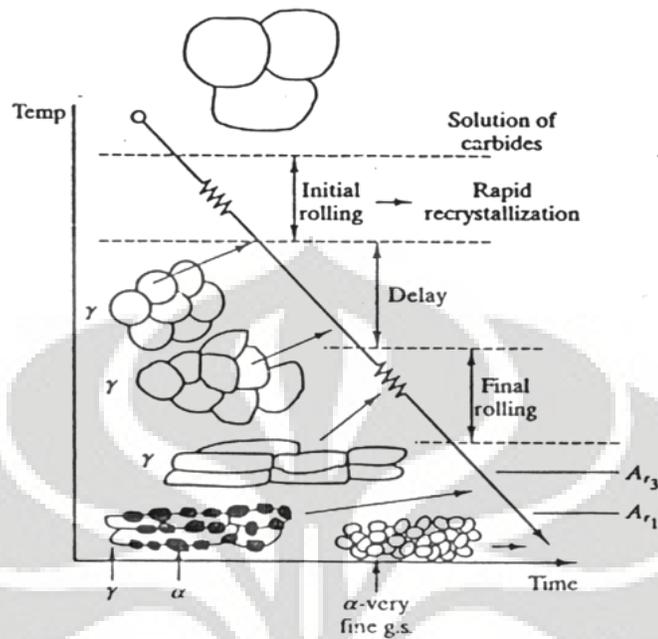
Proses canai panas merupakan suatu proses dimana proses deformasi langsung diimbangi dengan proses perlakuan panas, sehingga tidak terjadi tegangan sisa. Yang terjadi adalah proses pergerakan dislokasi, recovery, rekristalisasi, dan pertumbuhan butir sehingga akan didapat material dengan sifat dan kinerja yang relatif lebih baik ⁽⁹⁾.

Faktor yang penting dalam proses canai panas adalah temperatur akhir proses. Proses canai panas harus berakhir pada temperatur tepat diatas temperatur rekristalisasi untuk memperoleh 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 2.4. menunjukkan ilustrasi dari pertumbuhan butir pada saat dilakukan proses canai panas.



Gambar 2.4. Ilustrasi Pertumbuhan Butir saat Canai Panas ⁽¹⁵⁾

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. Tetapi keakuratan dari ukuran hasil proses canai kurang baik. Untuk itu, pada proses termomekanik, biasanya canai panas merupakan tahap pertama yang nantinya akan diteruskan dengan proses canai dingin. Skematis dari thermomechanical processing dapat dilihat pada Gambar 2.5

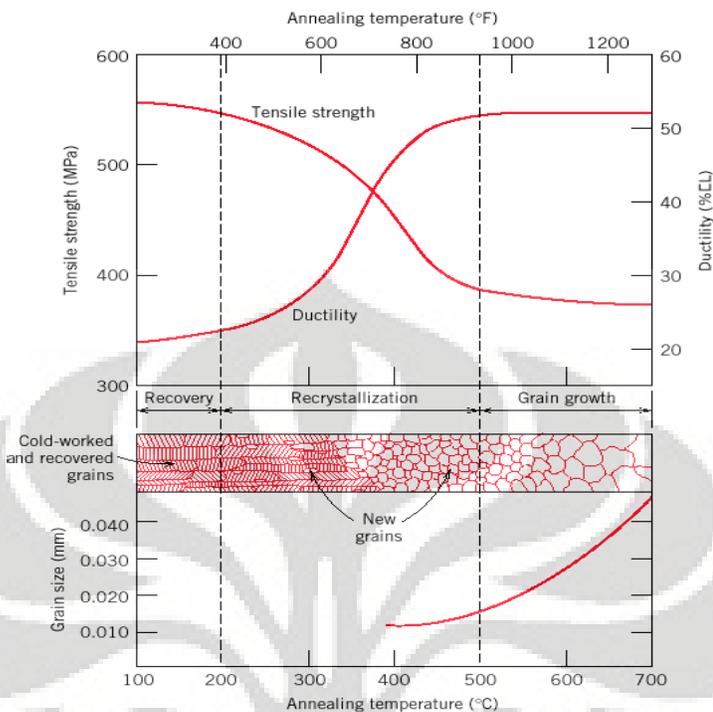


Gambar 2.5. Skematis pengerolan pada Thermomechanical Processing⁽⁸⁾

II.5. Proses Recovery, Rekristalisasi, dan Pertumbuhan Butir

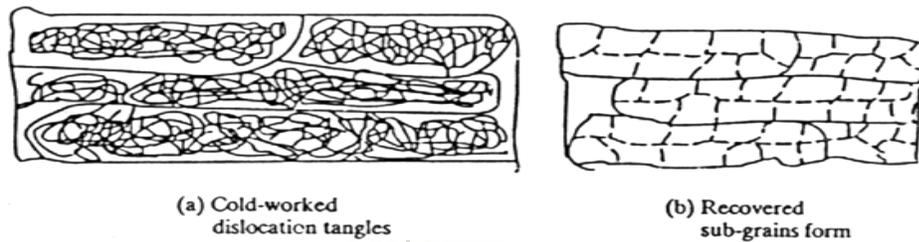
II.5.1. Proses Recovery

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 2.6.



Gambar 2.6. Skematis Proses Recovery, Rekristalisasi dan Pertumbuhan Butir⁽³⁾

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. (2^0 – 3^0 misorientasi). Proses ini dapat dilihat pada Gambar 2.7. Dari kedua efek yang dijelaskan tersebut didapat kekuatan material yang sama setelah dilakukan pengerjaan dingin⁽¹¹⁾.



Gambar 2.7. Pembentukan Sub-butir⁽¹⁵⁾

II.5.2. Rekristalisasi

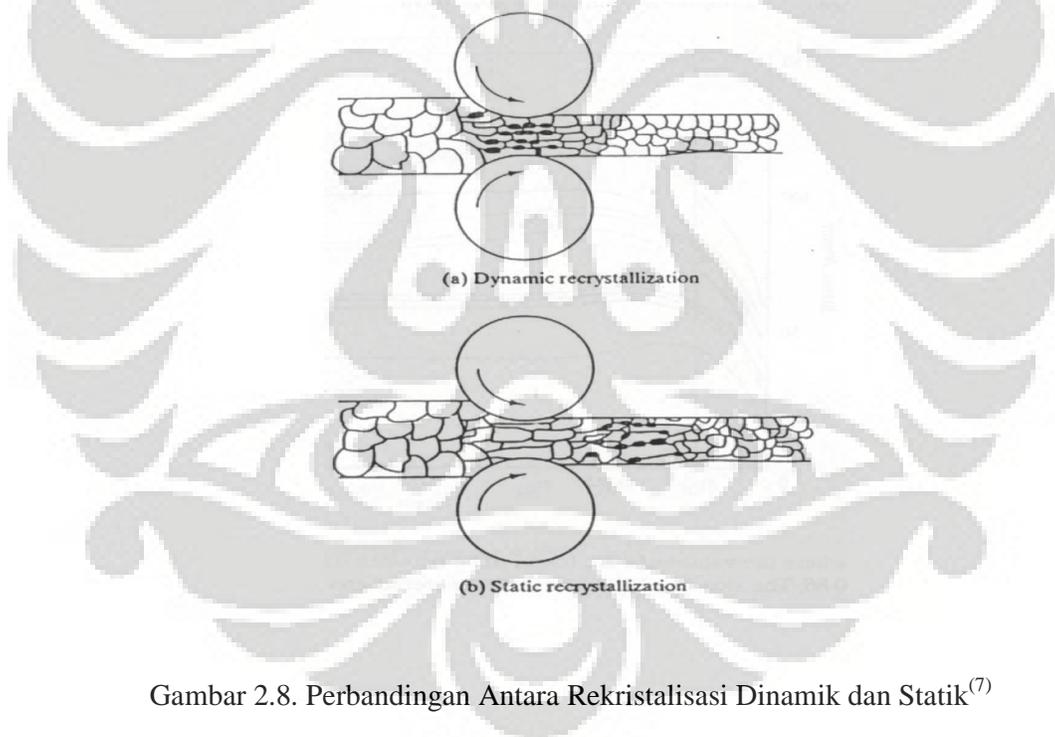
Ketika tahanan recovery akan berakhir, pembentukan inti dari butir baru akan mulai terjadi. Sama seperti proses solidifikasi, rekristalisasi adalah proses transformasi nukleasi dan pertumbuhan butir. Inti dari butir baru terjadi dari bergabungnya sub-butir dan permukaan untuk nukleasi heterogen adalah cacat mikrostruktur seperti permukaan batas butir dan inklusi. Butir yang baru tumbuh merupakan butir yang bebas regangan (strain-free) dan terikat dengan batas butir bersudut besar yang memiliki mobilitas sangat tinggi yang akan menyapu semua jejak dari butir yang terdahulu.

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. Dan karena butir yang baru merupakan butir yang bebas regang, maka efek dari pengerjaan dingin (strain hardening) akan menghilang. Sehingga material akan memiliki kekuatan dan kekerasan yang sama seperti sebelum dilakukan pengerjaan dingin.

Proses rekristalisasi ini memungkinkan untuk mengontrol ukuran besar butir dan sifat mekanis dari material. Ukuran besar butir dari material yang terekristalisasi akan tergantung pada besarnya pengerjaan dingin, temperatur annealing, waktu tahanan dan komposisi dari material. Ini didasarkan pada hukum rekristalisasi⁽⁸⁾:

1. Pengerjaan dingin kritis yang minimum diperlukan sebelum terjadi rekristalisasi
2. Semakin kecil persentase pengerjaan dingin, semakin tinggi temperatur yang digunakan untuk menghasilkan rekristalisasi
3. Larutan dan dispersi yang halus akan menghambat rekristalisasi

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 2.8.



Gambar 2.8. Perbandingan Antara Rekristalisasi Dinamik dan Statik⁽⁷⁾

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⁽⁸⁾.

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.

II.5.3. Pertumbuhan Butir

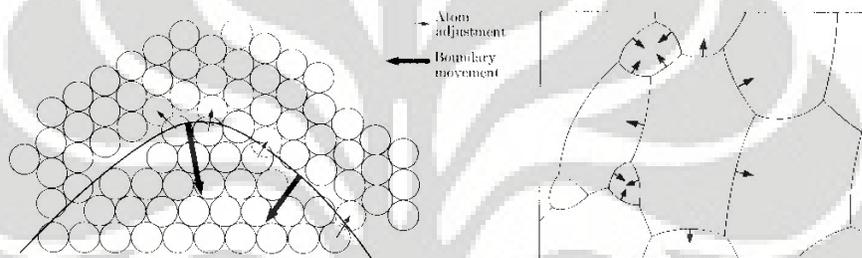
Proses pertumbuhan butir dimulai ketika proses rekristalisasi telah selesai. Ditandai dengan pengurangan secara bertahap dari kekuatan material sebagai akibat dari membesarnya ukuran butir. Penambahan temperatur seperti pada Gambar 2.6 akan menyebabkan bertambahnya energi yang diberikan pada butir. Temperatur 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⁽¹²⁾.

II.6. Pertumbuhan Butir Austenit Dalam Kondisi Isotermal

Pertumbuhan butir terjadi karena adanya pembesaran butir tertentu dan terdifusinya butir yang lebih kecil. Batas butir memiliki atom-atom dengan energi bebas yang lebih tinggi daripada atom-atom yang terdapat dalam butir. Agar tercapai kondisi yang stabil, maka atom-atom pada batas butir mengurangi energi bebasnya yang tinggi dengan cara mengurangi luas permukaan batas butir, sehingga terjadi migrasi batas butir. Migrasi batas butir pada dasarnya adalah difusi atom-atom pada batas butir. Energi minimum yang dibutuhkan agar atom-atom dapat berdifusi untuk memperoleh keadaan yang lebih stabil dinamakan

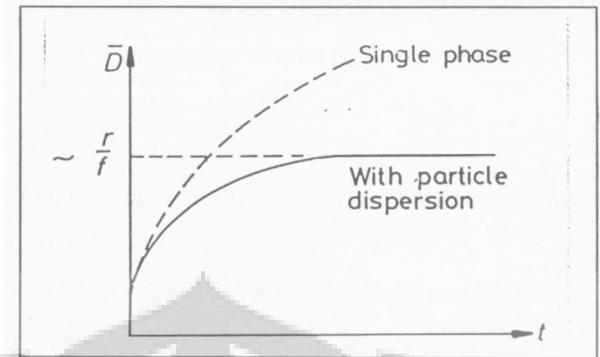
energi aktivasi untuk pertumbuhan butir (Q)⁽¹²⁾. Migrasi batas butir akan mengurangi energi bebas batas butir serta meningkatkan ukuran butir.

Jika butir berbentuk melengkung, atom cenderung stabil pada permukaan cekung daripada permukaan cembung, sehingga atom tersebut akan menarik atom pada permukaan cembung. Perpindahan panas pada temperatur yang tinggi akan memindahkan butir dengan permukaan cembung pada butir pada permukaan cekung. Butir yang mempunyai permukaan berbentuk cembung akan hilang menjadi butir yang besar⁽¹³⁾. Ilustrasinya dapat dilihat pada Gambar 2.9



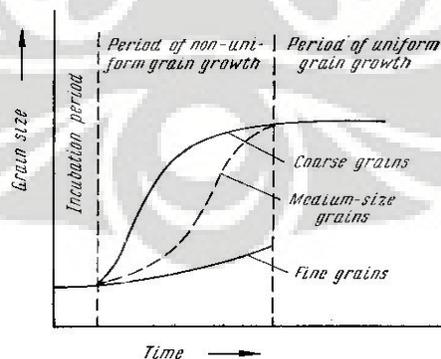
Gambar 2.9. Pergerakan Batas Butir⁽¹³⁾

Butir austenit muncul secara langsung begitu terjadi proses transformasi dari pearlit ke austenit. Ukurannya tergantung pada jumlah inti yang terbentuk sesuai waktu dan kecepatan pertumbuhan. Semakin banyak fasa karbida yang tersebar semakin kecil ukuran austenite⁽²⁾.



Gambar 2.10. Pengaruh partikel fasa kedua pada pertumbuhan butir ⁽¹⁴⁾

Butir austenit biasanya sangat kecil ($500-1000 \mu\text{m}^2$) saat pertama kali terbentuk, tetapi tumbuh secara cepat jika ditahan untuk beberapa lama pada temperatur isothermal atau dengan peningkatan temperatur. Butir austenit tumbuh secara spontan dan karenanya menurunkan energi bebas dengan mengurangi permukaan butir. Pertumbuhan butir terjadi akibat pembesaran butir tertentu dan terdifusinya butir yang lebih kecil yang secara termodinamik kurang stabil. Pada awalnya, dengan menahan butir austenit pada temperatur konstan tidak akan terlihat pertumbuhan butir secara signifikan. Tahap ini disebut sebagai tahap inkubasi. Semakin tinggi temperatur, semakin singkat waktu yang dibutuhkan untuk inkubasi. Tahap kedua akan terlihat adanya pertumbuhan ukuran butir yang tidak seragam (*non-uniform grain growth*). Setelah ini, pertumbuhan butir cenderung konstan dan penambahan waktu tahan lebih lanjut akan menyebabkan ukuran butir menjadi sama (*uniform grain growth*).



Gambar 2.11. Pertumbuhan butir austenit vs waktu pada temperatur konstan ⁽²⁾

Untuk menentukan ukuran butir austenit selama pertumbuhan normal dibawah kondisi anil isothermal dapat digunakan persamaan yang dihasilkan dari percobaan Beck⁽⁵⁾, yaitu:

$$d^n - d_o^n = C \cdot t \quad (2.2)$$

dimana d merupakan diameter butir akhir, d_o diameter butir awal, t waktu anil, n dan C konstanta yang tergantung dari komposisi paduan dan temperatur anil.

Sebelumnya Sellars⁽⁴⁾ dkk telah menganalisa data pertumbuhan butir pada baja C-Mn dan dapat menemukan persamaan untuk menghitung nilai konstanta C diatas, yaitu:

$$d^n - d_o^n = \left[A \exp\left(\frac{-Q_{gg}}{RT}\right) \right] \cdot t \quad (2.3)$$

Persamaan 2.3 Persamaan pertumbuhan butir isothermal

dimana n dan A merupakan konstanta yang tergantung pada komposisi material dan kondisi proses, Q_{gg} energi aktivasi untuk pertumbuhan butir, R konstanta gas universal 8,314 J/mol K, T temperatur absolut, dan t adalah waktu⁽⁵⁾.

Pembentukan butir austenit membutuhkan waktu untuk inti pertama terbentuk dan kemudian butir austenit tersebut tumbuh dengan laju yang lebih tinggi sejalan dengan terbentuknya lebih banyak inti. Butir austenit tumbuh secara cepat jika pada saat pemanasan isothermal dilakukan penahanan selama waktu tertentu, sebab dengan adanya penahanan tersebut akan meningkatkan difusi atom melalui batas butir, dari butir yang kecil menuju butir yang besar.

Penambahan waktu akan meningkatkan jarak antar butir sesuai persamaan⁽¹⁵⁾:

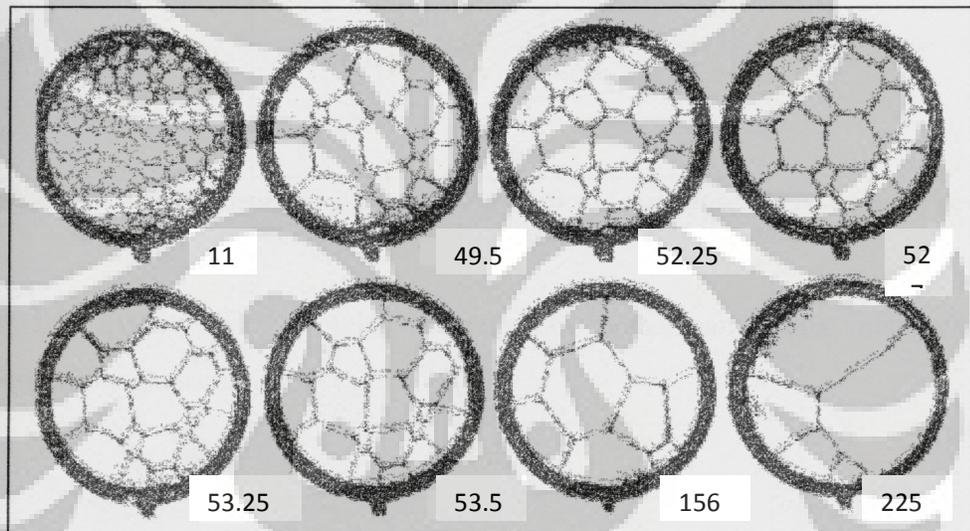
$$t = \frac{l^2}{D} \quad (2.4)$$

dimana l adalah jarak antar butir, D koefisien difusi, dan t adalah waktu. Nilai D ditentukan melalui persamaan Arrhenius⁽¹⁵⁾:

$$D = D_o \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (2.5)$$

Persamaan 2.5 Persamaan Arrhenius

dimana D koefisien difusi, D_o konstanta Arrhenius yang tergantung struktur kristal, Q energi aktivasi untuk difusi, R konstanta gas universal 8,314 J/mol K dan T merupakan temperatur. Semakin lama dilakukan penahanan waktu pada saat pemanasan isothermal, maka jarak antar butir akan meningkat dan butir semakin besar.



Gambar 2.12. Proses Pertumbuhan butir sejalan peningkatan waktu (menit) ⁽¹⁴⁾

II.7. BAJA HSLA

Menurut *American Society for Metals* ¹⁾, baja HSLA merupakan jenis baja yang memiliki kandungan karbon rendah (*low carbon steel*) serta unsur paduan yang sangat rendah (umunya kurang dari 0,15%) dimana paduan ini menghasilkan kekuatan luluh (*Yield Strength*) diatas 275 Mpa pada kondisi *as rolled* atau normalisasi. Baja HSLA, atau *microalloyed steel*, dibuat untuk menghasilkan sifat mekanis yang baik serta mempunyai ketahanan yang lebih baik terhadap korosi atmosferik daripada baja karbon konvensional. Komposisi kimia dari baja HSLA

berbeda-beda untuk setiap produk dengan ketebalan yang berbeda sehingga menghasilkan sifat mekanis yang diinginkan. Baja HSLA mempunyai kandungan karbon yang rendah (0,05~0,25% C) sehingga mampu bentuk dan mampu las dari baja ini lebih baik daripada baja karbon rendah (*mild steel*). Baja HSLA mempunyai kandungan Mangan hingga mencapai 2%. Untuk kombinasi biasanya ditambahkan sejumlah kecil Chromium, Nikel, Molybdenum, Tembaga, Nitrogen, Vanadium, Niobium, Titanium, dan Zirconium. Penggunaan *microalloyed* Niobium dan Vanadium ditambah dengan proses pengerolan terkendali akan meningkatkan kekuatan luluh, ketangguhan, serta memperbaiki sifat mampu las.

Baja HSLA dapat dibagi menjadi 7 kategori sebagai berikut ⁽¹⁾:

1. *Weathering Steel*, yaitu baja HSLA yang mengandung sejumlah kecil unsur paduan seperti tembaga dan fosfor yang berfungsi untuk meningkatkan ketahanan korosi serta sebagai penguat *solid solution*.
2. *Microalloyed Ferrite-Pearlite Steel*, yaitu baja HSLA yang mengandung unsur paduan kurang dari 0,1%, seperti niobium, vanadium, dan titanium sebagai pembentuk karbida yang kuat atau pembentuk karbon-nitrida (*cabonitride*). Unsur-unsur paduan ini berfungsi untuk penguatan presipitat, penghalusan butir, serta untuk mengontrol temperatur transformasi.
3. *As Rolled Pearlitic Steel*, yaitu baja HSLA yang mengandung unsur carbon-mangan serta penambahan sejumlah kecil unsur paduan lain untuk meningkatkan kekuatan, ketangguhan, mampu bentuk, serta mampu las.
4. *Acicular Ferrite (Low Carbon Bainite) Steel*, yaitu baja HSLA dengan kandungan karbon rendah (kurang dari 0,08%) tetapi memiliki kekuatan luluh yang tinggi serta sifat mampu las, mampu bentuk, dan ketangguhan yang baik.
5. *Dual Phase Steel*, yaitu baja HSLA yang memiliki mikrostruktur pulau-pulau martensit yang tersebar dalam matriks ferit sehingga mempunyai sifat kombinasi antara keuletan yang baik dengan kekuatan tarik yang tinggi.
6. *Inclusion Shape Controlled Steel*, yaitu baja HSLA yang memiliki keuletan serta ketangguhan yang baik karena adanya penambahan sedikit unsur paduan kalsium (Ca), Zirconium (Zr), Titanium (Ti) serta logam tanah jarang (*rare earth*) sehingga dapat mengubah bentuk sulfida dari bentuk balok menjadi bentuk yang hampir bulat, kecil, serta tersebar.

7. *Hydrogen-Induced Cracking Resistant*, yaitu baja HSLA yang memiliki kandungan karbon (C) dan mangan (Mn) yang rendah, bentuk inklusi yang terkontrol serta kandungan tembaga (Cu) yang lebih besar dari 0,26%.

Komposisi baja HSLA berbeda-beda tergantung penggunaannya. Penambahan unsur paduan akan memberikan pengaruh yang berbeda-beda terhadap sifat mekanisnya. Berikut ini beberapa unsur paduan yang sering ditambahkan pada baja HSLA:

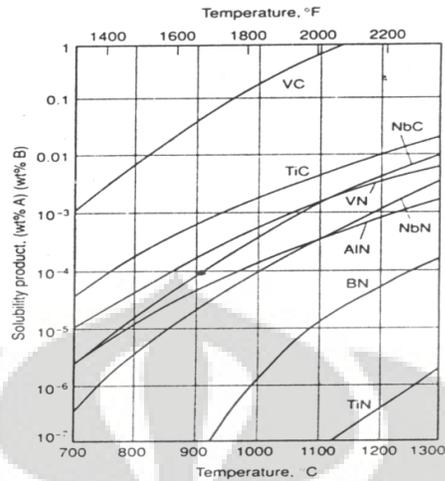
1. Karbon (C)

Karbon meningkatkan jumlah pearlite pada mikrostruktur. Makin tinggi kadar karbon akan menurunkan mampu las dan ketangguhan. Kandungan karbon maksimal pada baja HSLA *as rolled* ialah 0,2%. Semakin tinggi kadar karbon, maka cenderung akan terbentuk martensit serta bainit pada mikrostruktur hasil pengerolan. Kekuatan yang baik disebabkan oleh⁽¹⁾:

- Ukuran butir ferit yang halus hasil dari pengerolan terkendali (*controlled rolling*) serta adanya unsur paduan mikro (*microalloyed*) khususnya Niobium.
- Penguatan presipitat oleh unsur Vanadium, Niobium, serta Titanium

2. Nitrogen (N)

Penambahan nitrogen pada baja yang mengandung Vanadium dapat meningkatkan penguatan presipitat dimana dengan adanya presipitat akan menghalangi dislokasi batas butir sehingga dihasilkan butir ferit yang halus. Makin tinggi temperatur, kelarutan presipitat akan semakin meningkat.



Gambar 2.13. Grafik kelarutan beberapa *carbonitride* dalam austenit terhadap temperatur⁽¹⁾

3. Mangan (Mn)

Fungsi utamanya adalah sebagai penguat larutan padat (*solid solution strengthening*) di ferit serta menurunkan temperatur transformasi austenit-ferit.

4. Silikon (Si)

Kandungan silikon maksimal yaitu sebesar 0.259%. Silikon mempunyai pengaruh yang cukup signifikan dalam penguatan larutan padat (*solid solution strengthening*).

5. Tembaga (Cu)

Penambahan tembaga lebih dari 0.042% meningkatkan kekuatan baik pada baja karbon rendah maupun medium dengan sedikit penurunan keuletan.

6. Fosfor

Fosfor merupakan penguat ferit yang efektif dengan penguatan *solid solution*. Fosfor dapat meningkatkan ketahanan korosi tetapi menurunkan keuletan. Pada kadar rendah (< 0,05%) dapat menyebabkan *embrittlement* karena segregasi pada batas butir austenit prior.

7. Chromium

Chromium biasanya ditambahkan dengan tembaga untuk meningkatkan ketahanan korosi atmosferik.

8. Nikel

Nikel dapat ditambahkan sampai kadar 1% sampai 5% untuk meningkatkan kekuatan.

9. Niobium (Nb)

Penambahan sejumlah kecil niobium (0,03% sampai dengan 0,05%) pada baja *microalloyed* dapat meningkatkan kekuatan luluh dengan adanya penguatan presipitat serta penghalusan butir. Niobium merupakan unsur penghalus butir yang lebih baik dibanding vanadium karena *niobium-carbide* lebih stabil pada austenit dibandingkan dengan *vanadium-carbide* pada temperatur pengerolan. Semakin rendah kelarutan *niobium-carbide* di austenit, maka semakin stabil endapannya, sehingga dapat mengunci pergerakan batas butir austenit dan menghambat pertumbuhan butir austenit tersebut.

10. Vanadium (V)

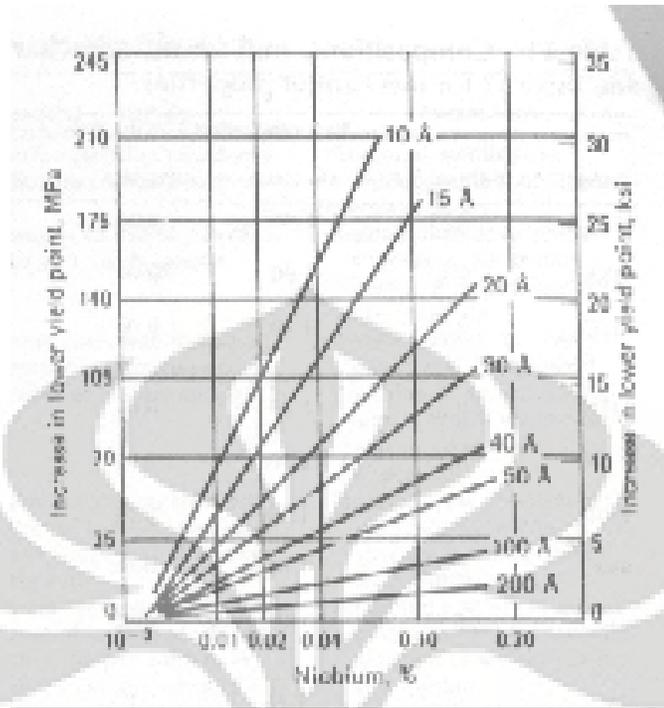
Vanadium berfungsi untuk meningkatkan kekuatan dari baja HSLA dengan mekanisme penguatan presipitat pada ferit serta memperhalus ukuran butir ferit.

11. Titanium (Ti)

Titanium berfungsi untuk penguatan presipitat serta mengontrol bentuk sulfida. Penambahan sejumlah kecil titanium dapat membatasi pertumbuhan butir austenit.

II.8. BAJA HSLA-Nb

Baja HSLA-Nb termasuk kedalam jenis baja HSLA *microalloyed ferrite-pearlite*, dimana unsur niobium akan meningkatkan kekuatan luluh dengan cara penguatan presipitat, yang besarnya peningkatan kekuatan tersebut bergantung pada ukuran serta jumlah dari presipitat *niobium-carbide*.



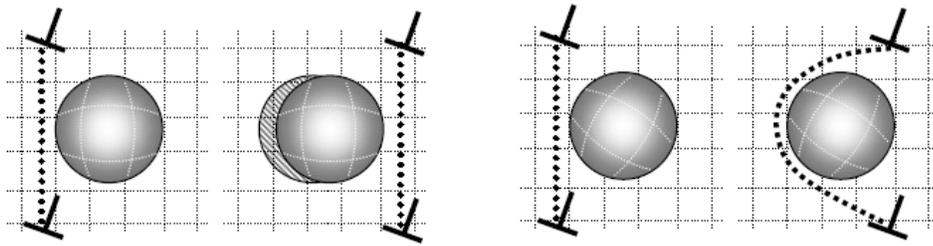
Gambar 2.14. Pengaruh ukuran partikel niobium karbida terhadap *yield strength*⁽¹⁾

Penggunaan unsur paduan niobium dalam jumlah yang sangat kecil (*microalloyed*) lebih baik dibandingkan dengan vanadium sebab niobium dapat memberikan efek penguatan presipitat sekaligus penghalusan butir. Tiap penambahan 0,01% niobium akan meningkatkan kekuatan sebesar 35 - 40 MPa. Peningkatan kekuatan akan diikuti dengan peningkatan ketangguhan. Temperatur akhir (*finishing temperature*) yang tinggi harus dihindari dari baja ini, sebab akan menghasilkan struktur *Widmenstatten ferrite*, yang akan mengurangi ketangguhan⁽¹⁾

II.9. MEKANISME PENGUATAN BAJA HSLA-Nb

II.9.1. Penguatan Presipitat

Penguatan presipitat (*Precipitation Hardening*) pada dasarnya terjadi pada unsur yang memiliki kelarutan yang tinggi pada temperatur tinggi dan unsur tersebut harus dapat membentuk endapan yang dapat menghalangi dislokasi, sehingga akan terjadi mekanisme penguatan⁽¹²⁾.



Gambar 2.15. Hubungan dislokasi dan partikel presipitat. a. Dislokasi meluncur pada slip plane dan memotong partikel. b. Dislokasi mengelilingi partikel ⁽¹⁶⁾

Penguatan ini terjadi karena adanya karbida, nitrida, maupun karbonitrida. Dengan adanya karbon dan nitrogen, unsur-unsur seperti Niobium, Titanium, dan Vanadium akan membentuk senyawa logam M(CN) yang stabil, yaitu senyawa logam yang tidak larut pada fasa austenit, yang akan mengunci pergerakan batas butir austenit selama rekristalisasi sehingga mencegah pertumbuhan butir austenit dan menghasilkan butir ferit yang halus.

Irvine ⁽⁵⁾ menemukan temperatur kelarutan presipitat Nb(CN) melalui persamaan:

$$\log(Nb) \left(C + \frac{12}{14} N \right) = 2,26 - \frac{6770}{T} \quad (2.6)$$

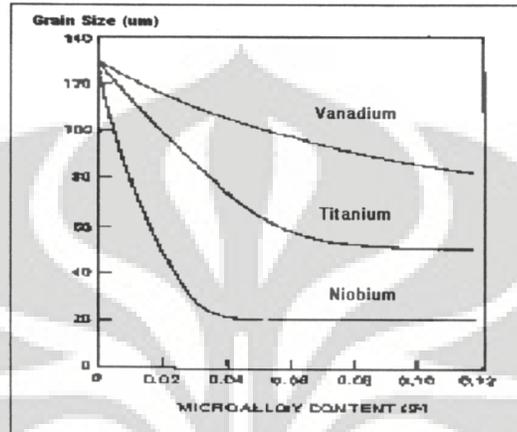
Persamaan 2.6 Persamaan Irvine

dimana (Nb) dan $[C + \frac{12}{14}N]$ merupakan konsentrasi keseimbangan dari Nb, C, dan N dalam larutan matriks (%berat) pada temperatur absolut dan T merupakan temperatur kelarutan Nb(CN) (K).

Presipitat Nb(CN) akan larut seluruhnya kedalam fasa austenit apabila dipanaskan diatas temperatur kelarutannya sehingga tidak ada lagi yang menghambat pertumbuhan butir sehingga butir akan bertambah besar dengan cepat. Kontrol besar butir austenit bisa dilakukan dengan memanaskan material dibawah temperatur kelarutan carbonitridenya.

Penambahan unsur niobium untuk mencegah perbesaran butir selama pengerolan lebih efektif dibandingkan presipitat vanadium V(CN). Dengan kelarutan yang semakin rendah, maka akan semakin banyak presipitat yang tidak

larut pada fasa austenit yang dapat mencegah pertumbuhan butir austenit sehingga akan semakin banyak pula dihasilkan butir ferrite yang halus. Pengaruh ini dapat dilihat pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16. Pengaruh berbagai unsur paduan terhadap ukuran butir ferrit ⁽¹⁵⁾

II.9.2 Penghalusan Butir Ferrit

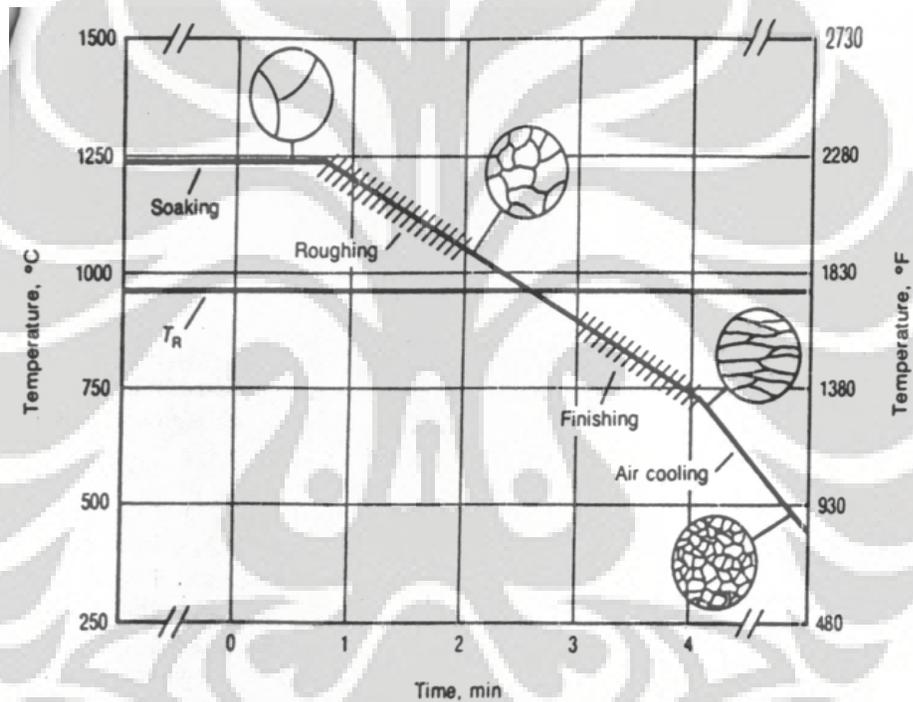
Ferit pada baja HSLA dapat ditingkatkan kekuatannya dengan penghalusan butir. Penghalusan butir ini didapat melalui tiga langkah yaitu pemanasan (*reheating*), *hot rolling*, dan pendinginan (*cooling*), termasuk:

- Penambahan Titanium atau Aluminium untuk memperlambat pertumbuhan butir austenit ketika baja dipanaskan untuk deformasi panas atau perlakuan panas sesudahnya
- Pengerolan terkendali (*Controlled rolling*) dari *microalloyed steel* sehingga austenit bertransformasi menjadi ferrit dengan ukuran butir yang halus
- Menambahkan paduan atau pendinginan cepat untuk menurunkan temperatur transformasi austenit-ferrit

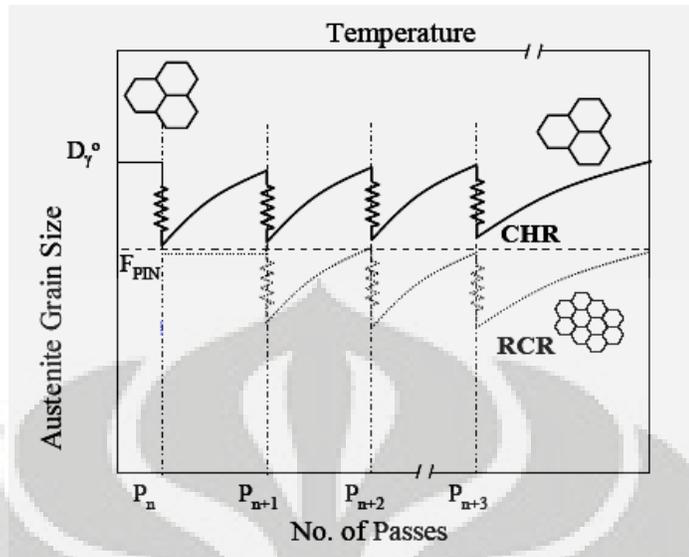
Pengerolan terkendali merupakan metode dimana pada masing-masing langkah pengerolan dilakukan kontrol temperatur, dengan jumlah reduksi pada masing-masing *pass* dan temperatur akhir telah diperhitungkan. Penggunaan pengerolan terkendali dapat meningkatkan kekuatan dan ketangguhan serta mengurangi kandungan karbon dalam *microalloyed steel*. Pengurangan kadar karbon tidak hanya meningkatkan ketangguhan tetapi juga meningkatkan kemampuan las. Tiga metode pengerolan terkendali yaitu ⁽¹⁾:

- Pengerolan terkendali konvensional (*Conventional Controlled Rolling*)
- Pengerolan terkendali rekristalisasi (*Recrystallization Controlled Rolling*)
- Pengerolan terkendali rekristalisasi dinamik (*Dynamic Recrystallization Controlled Rolling*)

Ketiga metode tersebut menggunakan teknik yang berbeda untuk penghalusan butir, tetapi pada prinsipnya sama yaitu *roughing* untuk menghaluskan butir dengan mengulang rekristalisasi. Pada saat *roughing*, presipitat karbinitrida yang stabil diperlukan untuk menahan batas butir dari austenit yang terekristalisasi dan mencegah pertumbuhannya.

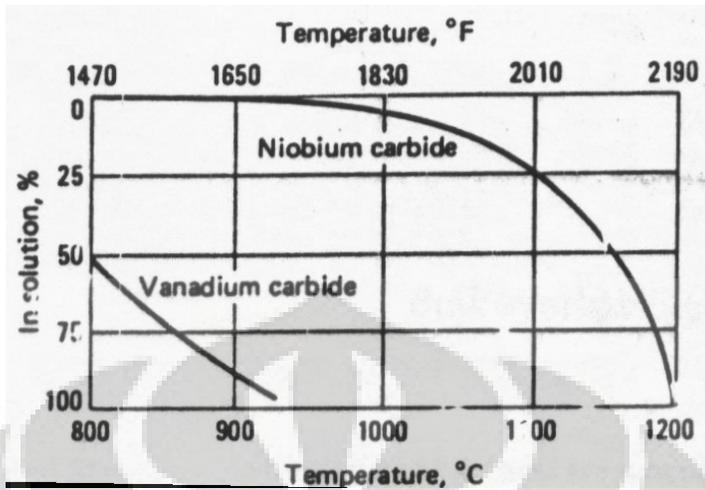


Gambar 2.17. Profil *time-temperature* untuk pengerolan terkendali⁽¹²⁾



Gambar 2.18. Evolusi ukuran butir selama deformasi pada pengerolan terkendali konvensional dan rekristalisasi⁽⁷⁾

Niobium merupakan paduan yang paling efektif untuk penghalusan butir melalui proses pengerolan terkendali konvensional. Pada permulaan canai panas (*hot rolling*), semua unsur Nb, C, dan N akan larut dalam fasa austenit, namun akan terbentuk presipitat kembali pada saat temperatur pengerolan turun. Presipitat Nb(CN) yang terbentuk ini dipengaruhi oleh regangan atau sering disebut *strain-induced Nb(CN) precipitation*. *Strain-induced precipitate* menguntungkan karena menghambat rekristalisasi dengan mencegah migrasi batas butir austenit dan menghasilkan inti dalam jumlah yang sangat besar pada austenit yang terdeformasi untuk pembentukan ferit yang halus selama pendinginan.



Gambar 2.19. Pengendapan dan kelarutan *Vanadium* dan *Niobium Carbide* pada austenite⁽¹²⁾

Partikel yang terbentuk pada temperatur tinggi dalam austenit walaupun efektif untuk kontrol pertumbuhan butir, namun tidak akan menyebabkan penguatan karena partikel tersebut terlalu besar. Partikel yang menyebabkan penguatan adalah yang terbentuk pada temperatur rendah dalam austenit, pada transformasi ferit ke austenit, serta didalam ferit selama pendinginan.

BAB III

METODE PENELITIAN

III.1. Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan sebagai benda uji dalam penelitian adalah baja HSLA-Nb hasil pengecoran kontinu dengan kode produksi yang memiliki komposisi terlihat pada Tabel 3.1. dibawah.

Tabel 3.1. Komposisi kimia baja HSLA-Nb dalam persen berat

Komposisi	91173T	Komposisi	91173T
Ti	0.004	Cu	0.042
C	0.172	Nb	0.056
Si	0.259	V	0.004
Mn	1,048	Ni	0.263
P	0.014	Cr	0.020
S	0.003	N	0.031
Al	0.044	Cu+Cr	0.062

Dari bahan baja HSLA-Nb diatas, dibentuk benda uji sebanyak 10 buah dengan dimensi:

- Panjang : 50 mm
- Lebar : 30 mm
- Tebal : 10 mm

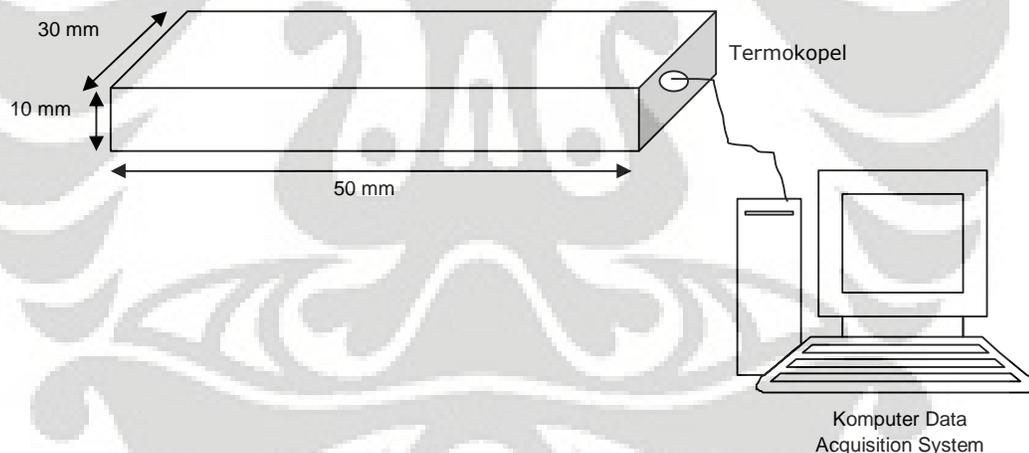
III.2. Prosedur Penelitian

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

III.2.1. 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 dengan kedalaman 20 – 30 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. Ilustrasi benda uji dan pemasangan termokopel dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Ilustrasi benda uji dan pemasangan termokopel

III.2.2. Proses Pemanasan

Proses pemanasan dilakukan dengan memasukkan benda uji ke dalam dapur Carbolite dengan temperatur 1200°C , temperatur tersebut digunakan setelah penulis menghitung temperatur kelarutan presipitat yaitu sebesar 1167°C kemudian ditunggu selama kurang lebih 5-10 menit supaya temperatur benda uji

mencapai temperatur target secara homogen, yang dapat dilihat pada komputer. Temperatur 1200⁰C dipilih untuk meyakinkan seluruh presipitat telah larut, sesuai dengan persamaan Irvine⁽⁵⁾ yang telah dijelaskan pada bab dasar teori penelitian. Proses pemanasan dilakukan di Laboratorium Metalurgi Mekanik Departemen Metalurgi dan Material FTUI.

III.2.3. Proses Canai Panas

Canai panas dilakukan dalam satu kali pass dengan regangan deformasi sebesar $\epsilon = 0,4$. 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.

III.2.4. Pendinginan

Proses pendinginan dibagi menjadi dua tahap, yaitu pendinginan dengan udara dan dilanjutkan dengan waterjet spray. Pendinginan dengan udara digunakan untuk mendapatkan beberapa variasi kecepatan pendinginan. Variasi kecepatan pendinginan dilakukan dengan menggunakan *heating jacket*, kipas angin dan pendinginan udara, kemudian dilanjutkan dengan pendinginan menggunakan waterjet spray. Pendinginan dengan waterjet spray dimaksudkan supaya benda memiliki struktur akhir martensit, yang diperlukan untuk pengamatan struktur mikro austenit prior.

III.2.5. Preparasi, Pengujian Metalografi dan Pengamatan Mikrostruktur

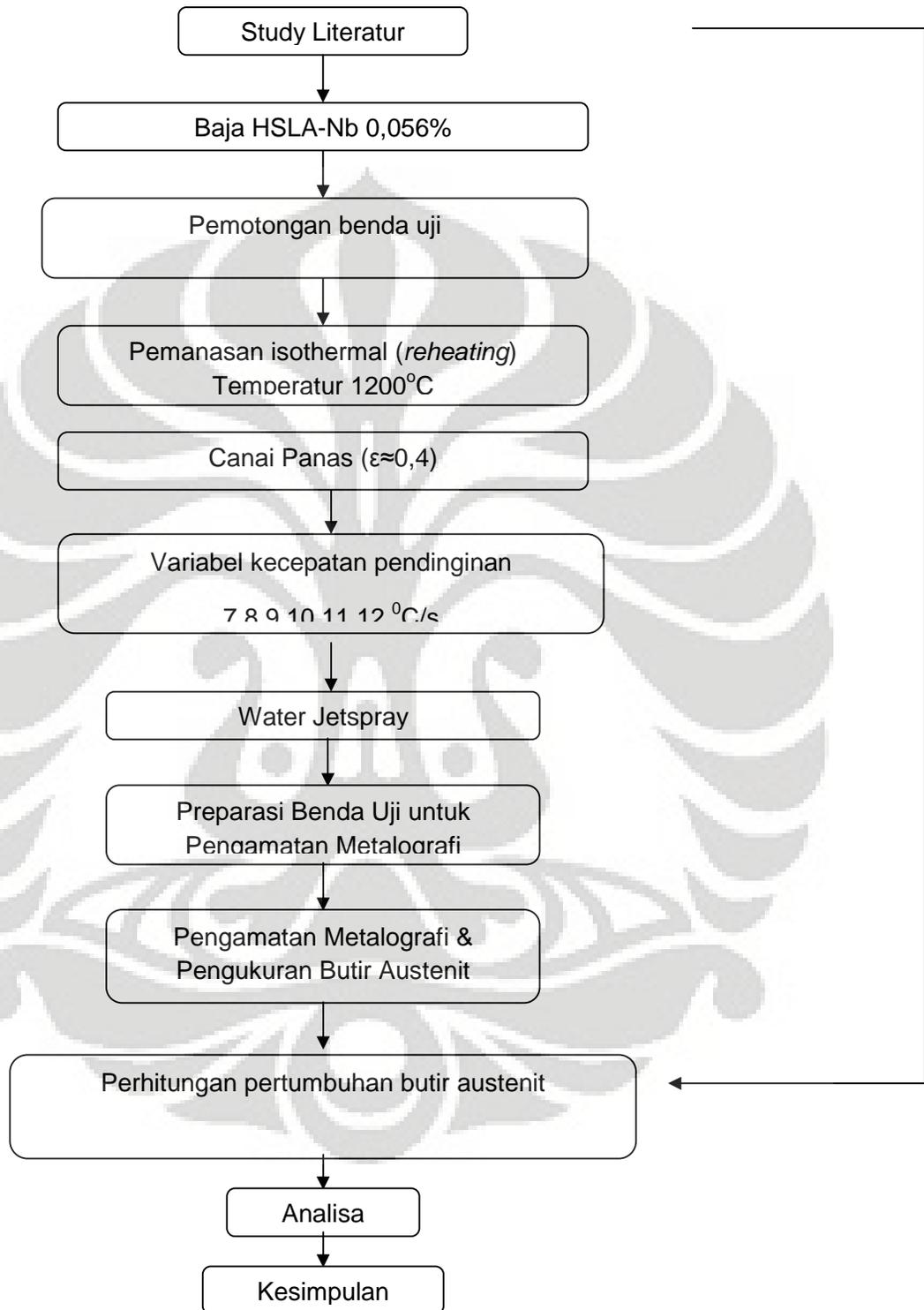
Untuk menjaga supaya kondisi butir benda uji setelah canai panas tidak berubah, maka benda uji tidak mengalami proses pemotongan untuk pengujian metalografi. Preparasi benda uji dilakukan untuk melihat jejak struktur butir austenit prior dalam struktur akhir yang terbentuk setelah pendinginan. Tahapan 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*. Proses selanjutnya yaitu etsa yang bertujuan untuk memunculkan jejak batas butir austenit prior dalam struktur akhir dari benda uji. Zat etsa dan waktu etsa yang tepat sangat berpengaruh untuk mendapatkan jejak batas butir austenit prior. Proses etsa yang dilakukan merupakan etsa kimia dengan menggunakan larutan etsa kimia dengan menggunakan larutan jenuh asam pikrik (30 gram asam pikrik dalam 100 ml alkohol 96%) ditambah 1 tetes *dodecyl benzo sulfonate* ditambah 1 tetes HCl. Keseluruhan proses dilakukan di Laboratorium Metalografi dan HST di Departemen Metalurgi dan Material FTUI.

III.2.6. Penghitungan Besar Butir Austenit

Setelah didapat foto mikro dari benda uji, kemudian dilakukan penghitungan besar butir austenit. Penghitungan ini menggunakan Metode Perbandingan dan merujuk ke standar ASTM E 112 secara manual. Hasil perhitungan juga diperiksa kembali dengan software Picsara.

III.3. Diagram Alir Penelitian



BAB IV

PEMBAHASAN

IV.1. Temperatur Kelarutan Presipitat Nb(CN)

Biasanya hampir semua material tak terkecuali baja diperlukan paduan (*alloying*) yang berfungsi untuk memperbaiki sifat mekanis dari baja tersebut. Biasanya baja tersebut dipadu dengan unsur-unsur seperti C,Ti,Nb,Si,dan V. Namun biasanya kita harus menentukan temperatur kelarutan dari unsur-unsur tersebut karena apabila kita tidak menentukan temperatur kelarutan dari paduan tersebut maka akan menimbulkan masalah, seperti material menjadi keras sebelum diberi perlakuan (hal ini dikarenakan unsur-unsur yang ditambahkan belum larut sempurna sehingga membentuk presipitat yang menghalangi pergerakan dislokasi), unsur-unsur yang ditambahkan belum larut sempurna sehingga banyak terdapat presipitat yang tidak diinginkan sebelum waktunya. Presipitat Nb(CN) akan larut seluruhnya kedalam fasa austenit apabila dipanaskan diatas temperatur kelarutannya sehingga tidak ada lagi yang menghambat pertumbuhan butir sehingga butir akan bertambah besar dengan cepat. Kontrol besar butir austenit bisa dilakukan dengan memanaskan material dibawah temperatur kelarutan carbonitridenya. oleh karena kita terlebih dahulu harus menentukan temperatur kelarutan. Menurut Irvine temperatur kelarutan presipitat baja Nb(CN) adalah :

$$\log(Nb) \left(C + \frac{12}{14} N \right) = 2,26 - \frac{6770}{T} \quad (4.1)$$

dimana (Nb) dan $[C+12/14N]$ merupakan konsentrasi keseimbangan dari Nb, C, dan N dalam larutan matriks (%berat) pada temperatur absolut dan T merupakan temperatur kelarutan Nb(CN) (K). Dari komposisi baja kita dapat menghitung temperatur kelarutan presipitat Nb(CN) baja HSLA-Nb 0,056%, yaitu:

Nb : 0.056 %Wt

C : 0.172 %Wt

N : 0.031 %Wt

Menurut irvine :

$$\log(Nb) \left(C + \frac{12}{14} N \right) = 2,26 - \frac{6770}{T}$$

$$\log 0,056 \{0,172 + 0,85714285714285714285714285714286 \times 0,031\} = 2,26 -$$

$$\frac{6770}{T}$$

$$\frac{6770}{T} = 2,26 - \log 0,056 \{0,198571428\}$$

$$\frac{6770}{T} = 4,713895214$$

$$T = 1440 \text{ K} \approx 1167 ^\circ\text{C}$$

$$T = 1440 - 273 ^\circ\text{C} = 1167 ^\circ\text{C}$$

IV.2. Evaluasi Hasil Pengujian Baja HSLA 0,056% Nb

Dalam penelitian kali ini, penulis menggunakan 10 buah baja HSLA Nb 0,056% . sampel tersebut di dapatkan dari hasil pengecoran secara kontinyu (*continuous casting*). Pengujian terhadap baja HSLA Nb 0,056% ini dilakukan di laboratorium Metalurgi Mekanik Departemen Teknik Metalurgi dan Material. Berikut merupakan tabel evaluasi hasil pengujian.

Tabel 4.2. Evaluasi Sampel Uji

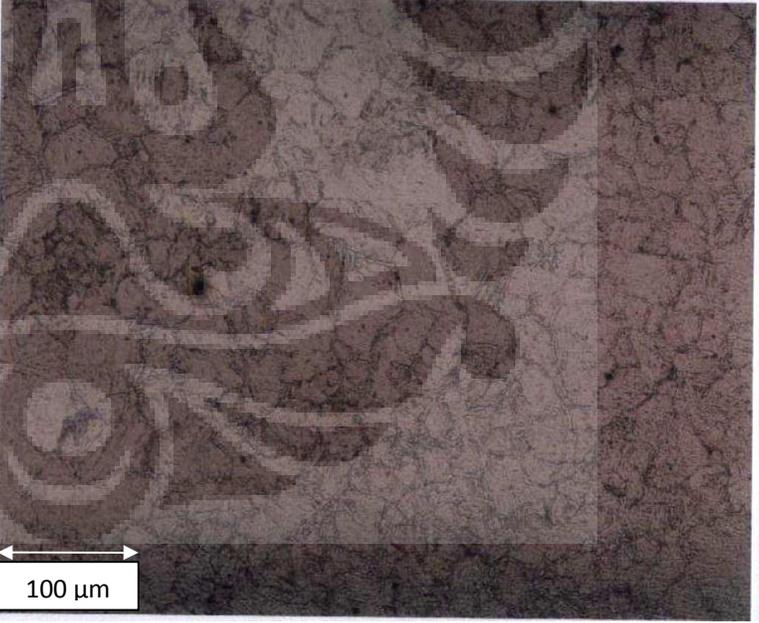
No.	ΔT (K)	t (S)	Kecepatan Pendinginan (K/S)	ϵ_{Real}
1	0	0	-Eror-	0,3
2	200	26	7,6	0,21
3	170	20	8,5	0,29
4	180	19	9,47	0,26
5	250	24	10,24	0,34
6	240	21	11,4	0,31
7	380	34	11,176	0,27
8	0	0	-Eror-	0,29
9	240	20	12	0,29
10	190	20	9,5	0,39

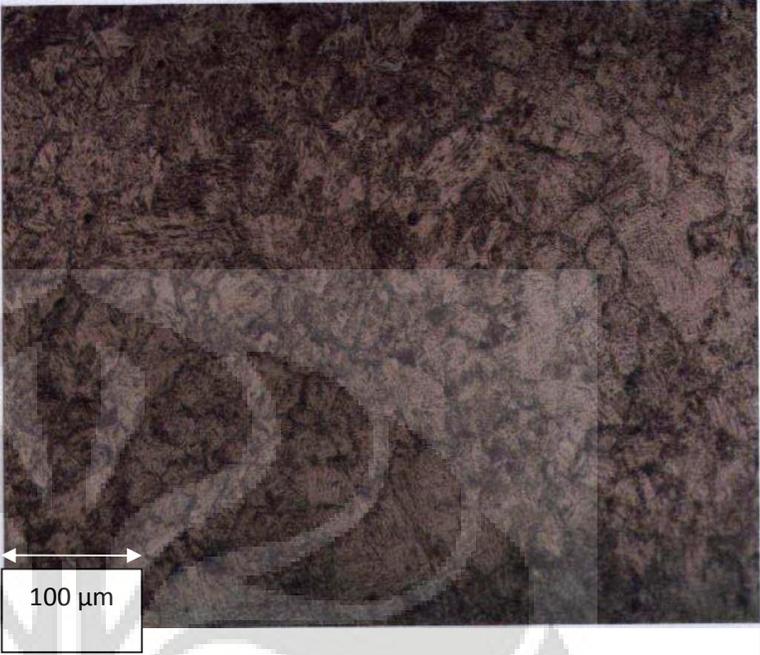
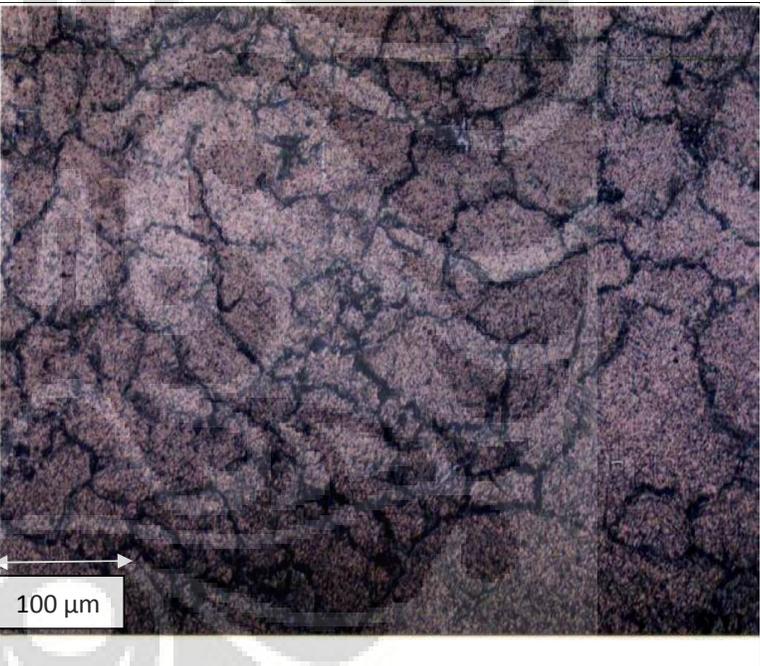
Dari tabel di atas dapat kita ketahui bahwa dari 10 sampel baja hanya terdapat 2 buah sampel yang tidak bisa diambil grafik akuisisinya dikarenakan kesalahan teknis pada komputer sistem akuisisi data, sehingga tidak dapat mencatat perubahan temperatur dan waktu secara real.

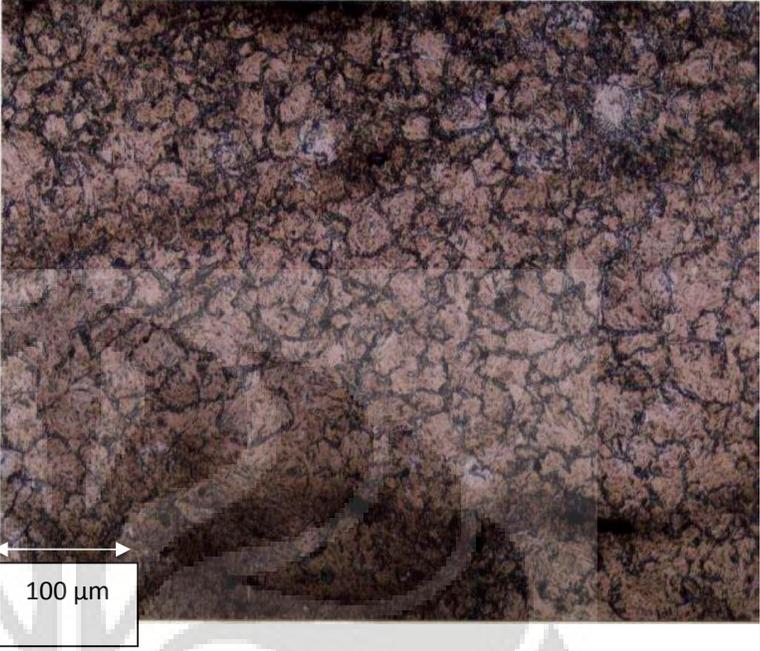
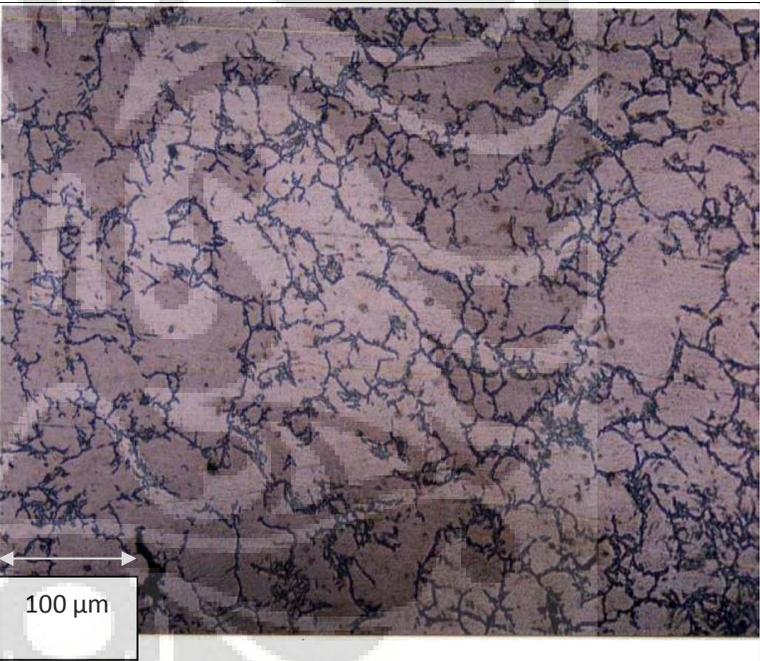
IV.3. Hasil Mikrostruktur

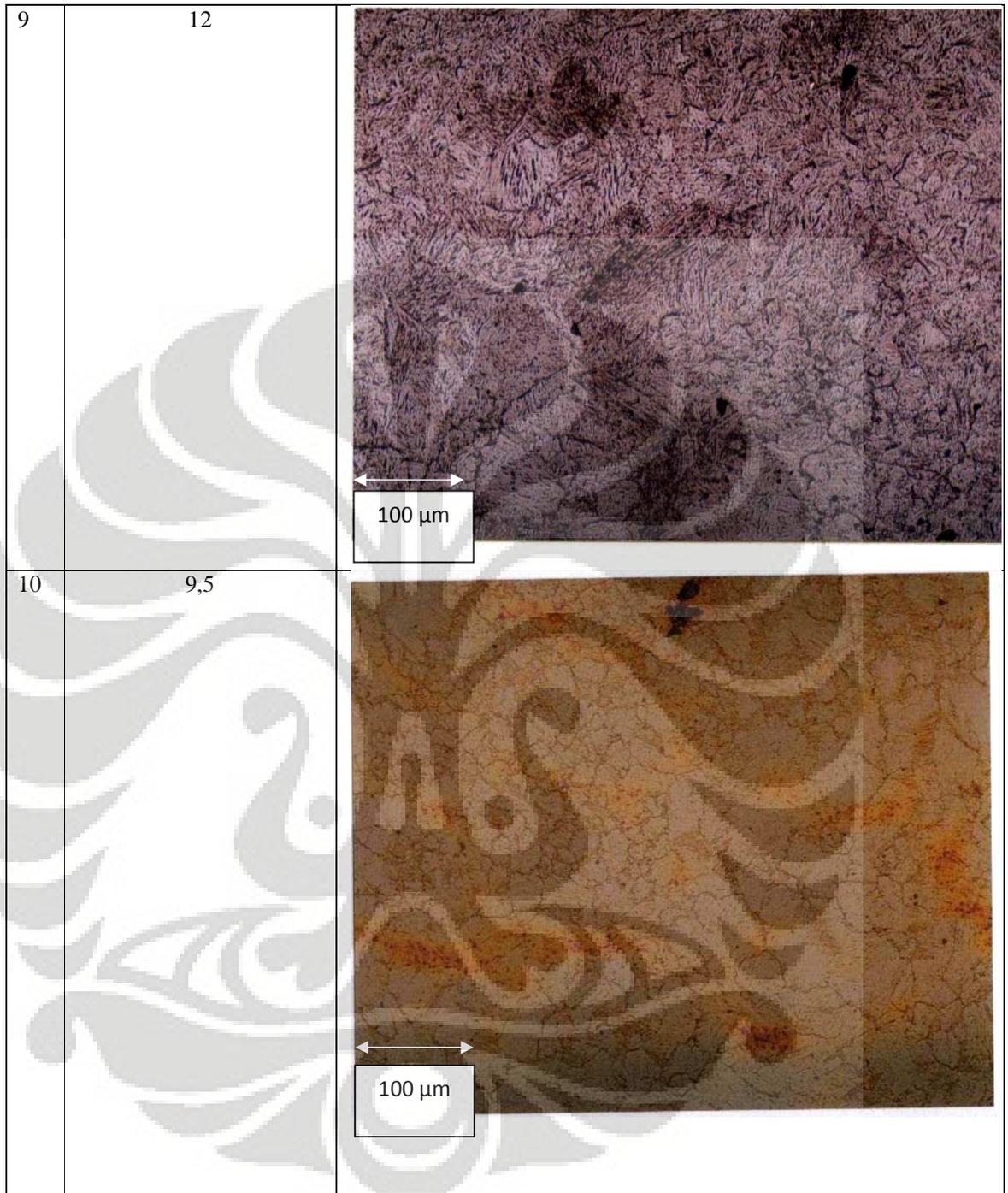
Sesuai dengan metodologi penelitian, baja dipanaskan terlebih dahulu sampai temperatur sekitar 1200°C (1473 K) dengan tujuan agar mendapatkan struktur butir full austenite, setelah itu dilakukan canai panas pada sampel dengan besar deformasi sekitar $\epsilon \approx 0,4$ kemudian keluar dari alat canai panas dilakukan pendinginan udara dengan variasi kecepatan pendinginan setelah itu di quench dengan menggunakan water cooling system agar mendapatkan struktur akhir martensit. Sampel dilakukan preparasi metalografi dan di etsa menggunakan larutan etsa asam pikrik jenuh ditambah *dodecyl benzo sulfonate*. Kemudian dilakukan pengambilan foto mikro. Berikut ini merupakan tabel hasil foto mikrostruktur sampel uji.

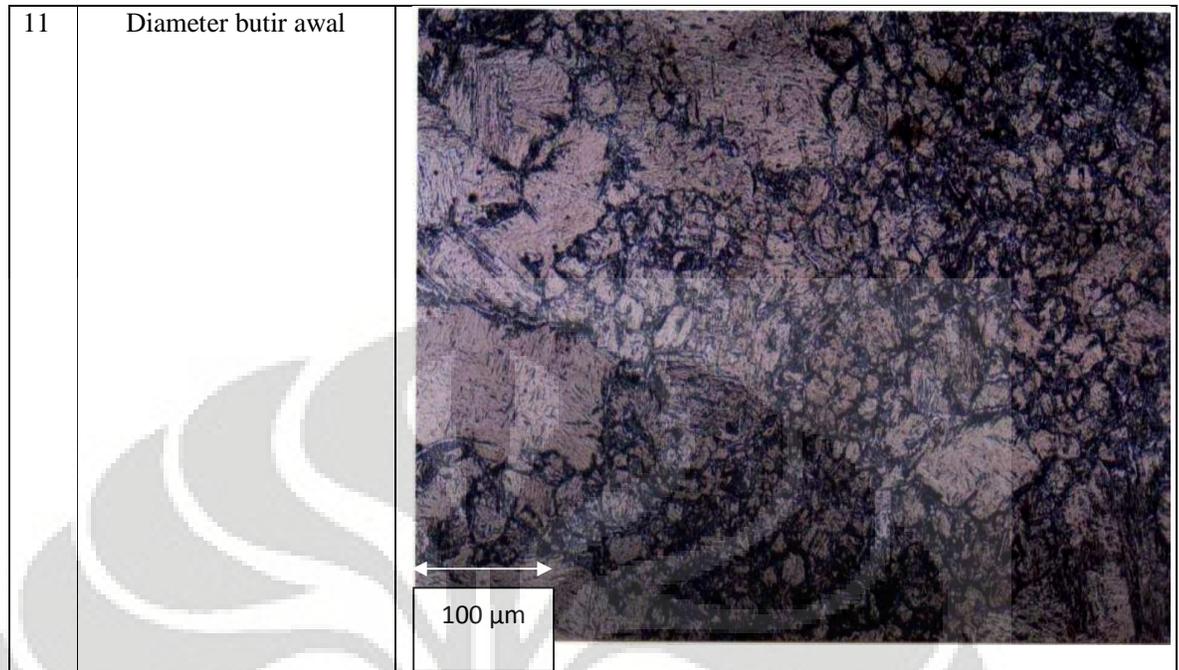
Tabel 4.3. hasil foto mikrostruktur sampel uji.

No	Laju Pendinginan (K/S)	Hasil Foto Mikro
2	7,6	
3	8,5	

4	9,47	 <p>A scanning electron micrograph (SEM) showing a dark, granular surface with a complex, interconnected network of fibers or particles. A scale bar at the bottom indicates 100 μm.</p>
5	10,24	 <p>A scanning electron micrograph (SEM) showing a dark, granular surface with a complex, interconnected network of fibers or particles, similar to the one above but with a slightly different texture. A scale bar at the bottom indicates 100 μm.</p>

6	11,4	
7	11,176	

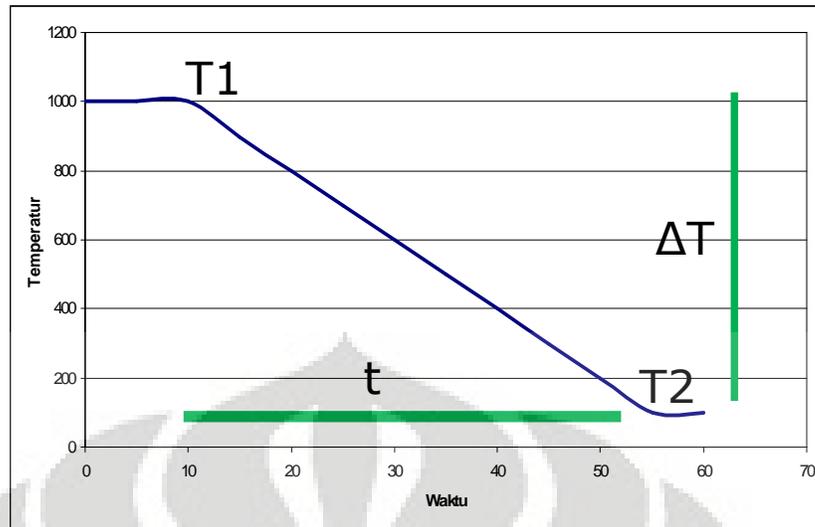




Dari gambar pada tabel 4.3 di atas didapat gambar struktur mikro hasil pengujian yaitu struktur austenit yang di dapat dengan etsa menggunakan asam pikrik seperti pada bab 3. Gambar di atas menggunakan perbesaran 100X.

IV.4. Grafik Akuisisi Temperatur

Selain hasil foto mikro sampel uji, informasi lain yang kita dapatkan adalah berupa grafik akuisisi temperatur. Grafik ini menginformasikan suhu real time sampel uji dengan waktu. Grafik ini didapat dari alat bernama *Work Bench for PC* yaitu dengan menghubungkan ke sampel uji menggunakan *termocouple* tipe K yang akan terbaca di dalam layar komputer. Dari grafik ini kita bisa mengetahui laju pendinginan (*cooling rate*) sampel uji yaitu dengan mengukur perbedaan temperatur sebelum canai panas dengan temperatur setelah dilakukan pendinginan dengan menggunakan air (*water cooling system*) dengan begitu kita dapat mengkalkulasikan besar dari laju pendinginan (*cooling rate*).

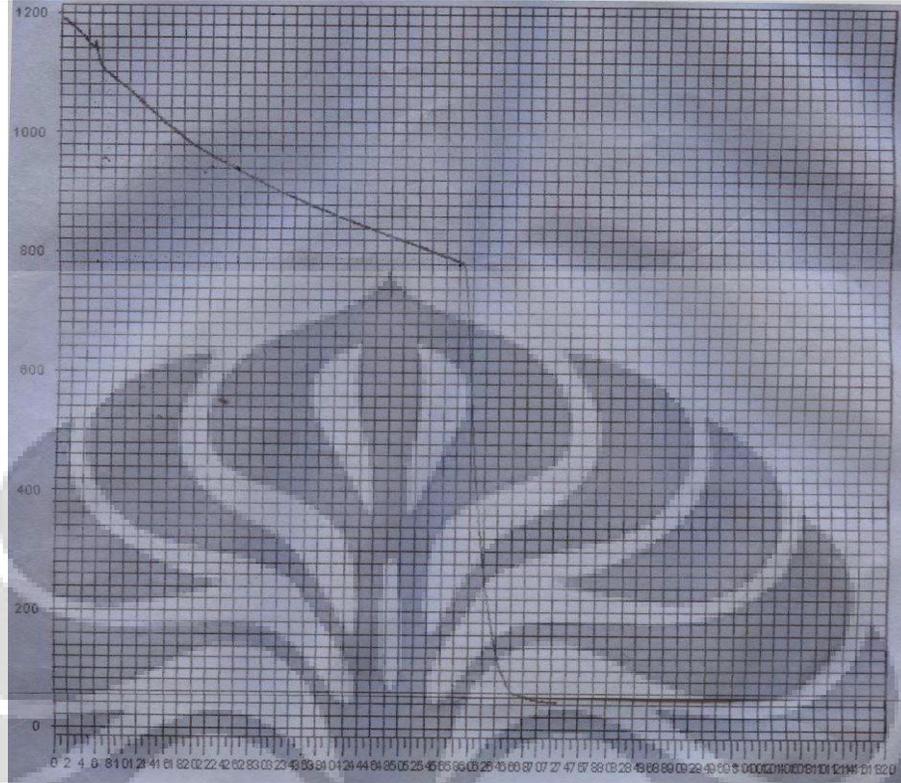


Gambar 4.4.1 Ilustrasi Variabel Untuk Pendinginan Dalam Keadaan Kontinyu

Tabel 4.4.2 Grafik temperatur akuisisi dari sampel uji

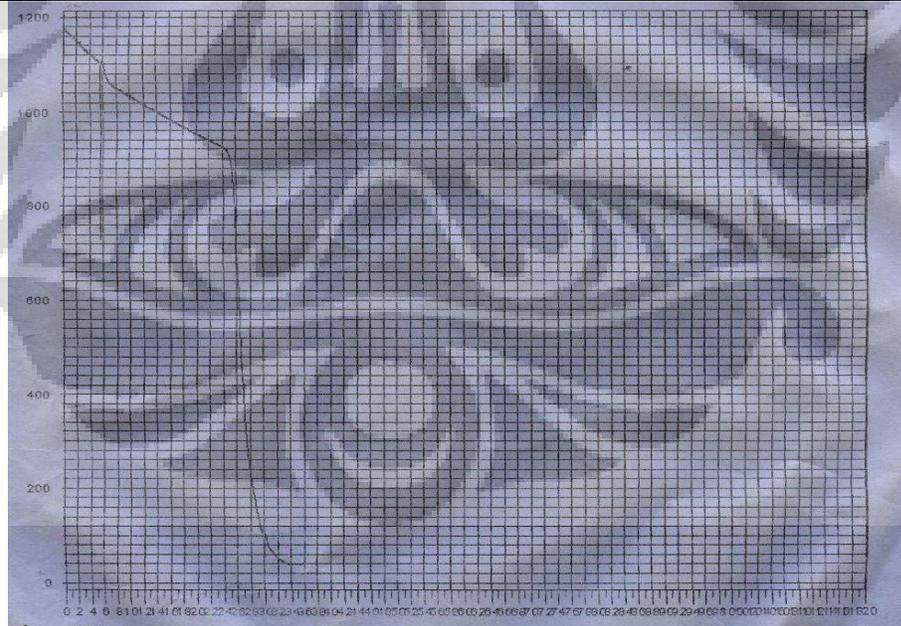
No	Grafik Akuisisi
2	<p data-bbox="727 1709 1024 1745">Laju pendinginan 7,6 K/S</p>

3



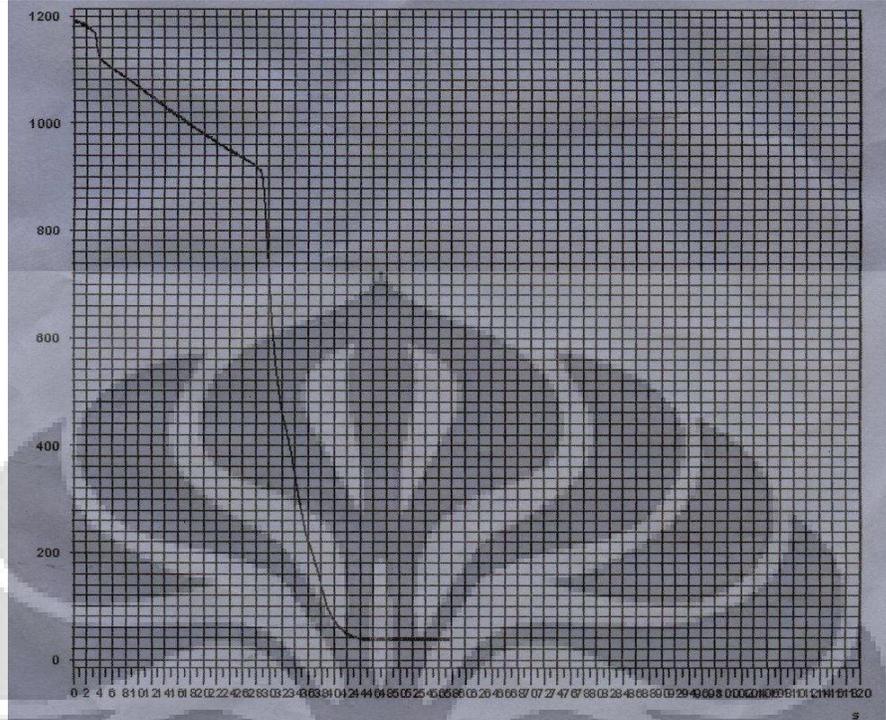
Laju pendinginan 8,5 K/S

4



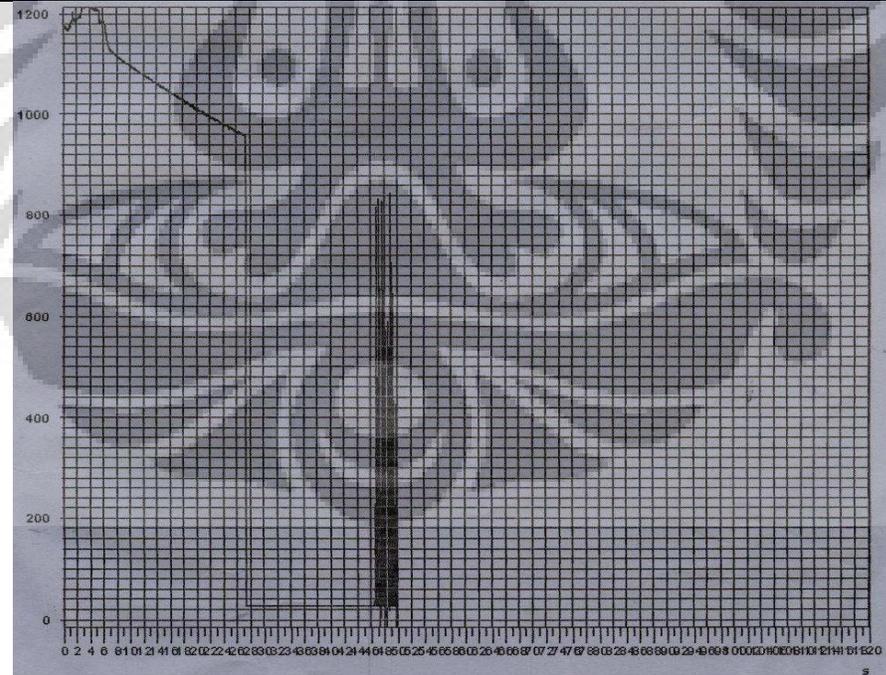
Laju pendinginan 9,47 K/S

5



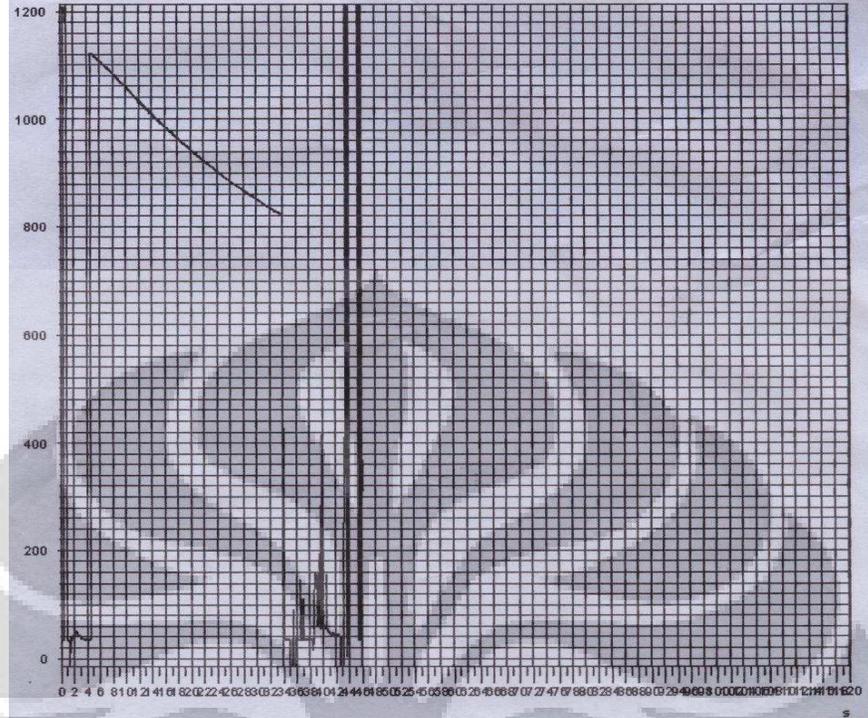
Laju pendinginan 10,24 K/S

6



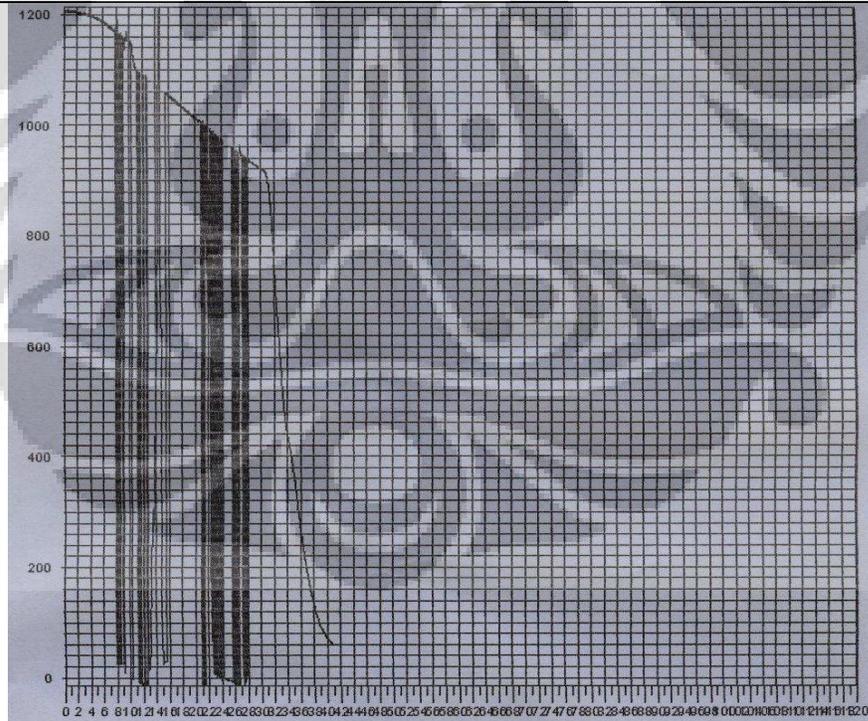
Laju pendinginan 11,4 K/S

7



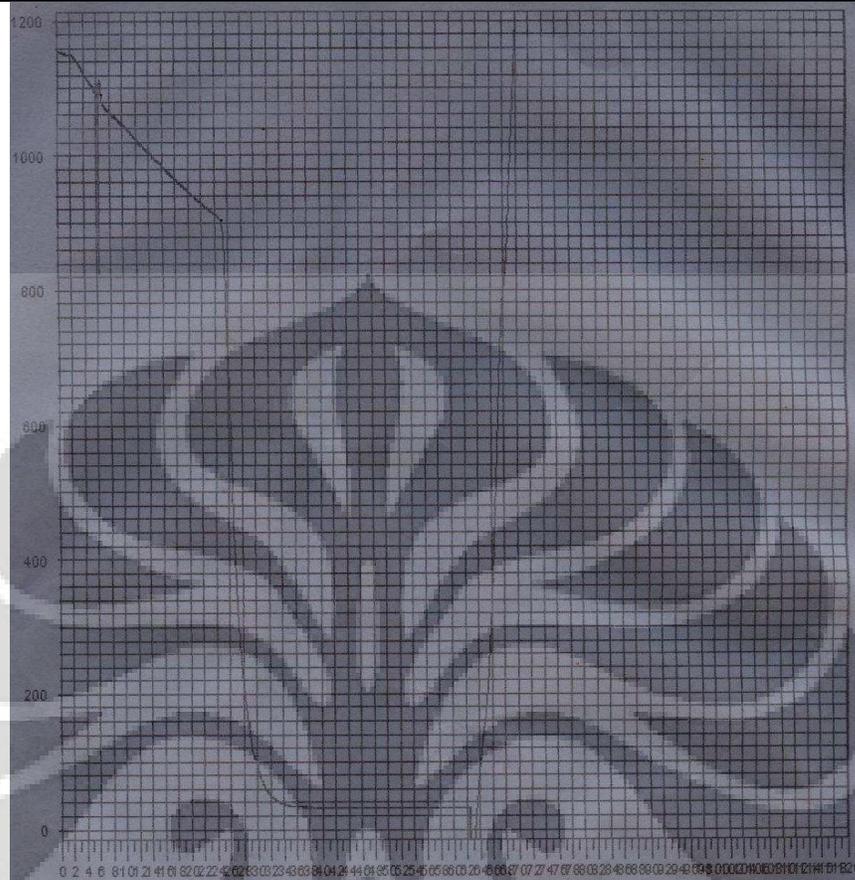
Laju pendinginan 11,176 K/S

9



Laju pendinginan 12 K/S

10



Laju pendinginan 9,5 K/S

IV.5. Perhitungan Ukuran Butir Austenit

Sesuai dengan judul penelitian ini maka setelah mendapatkan grafik akuisisi dan juga foto mikrostruktur dari sampel baja HSLA Nb 0,056% maka hal yang kita selanjutnya lakukan adalah estimasi ukuran butir austenite dari masing-masing sampel. Tiap sampel dihitung sebanyak 10 kali pengukuran baik menggunakan manual atau software picsara, setelah itu hasil dari pengukuran itu di rata-rata. Perhitungan ukuran butir austenit menggunakan picsara dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 4.5 Ukuran butir hasil percobaan

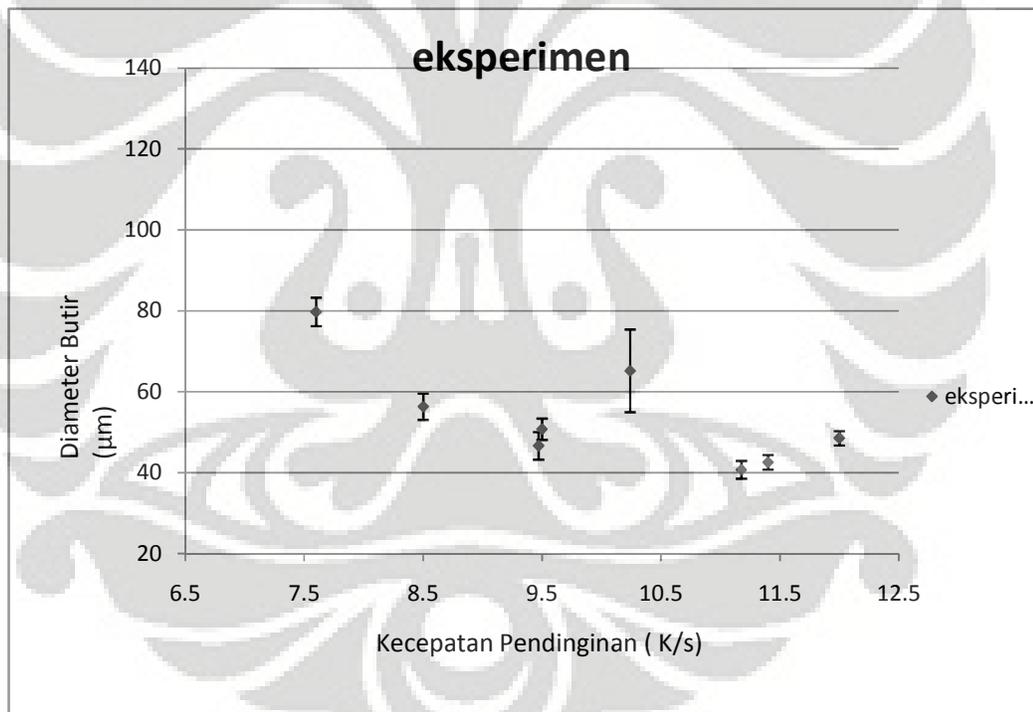
Laju Pendinginan (K/S)	Jumlah perpotongan dengan batas butir	Ukuran butir (μm)	ASTM	Ukuran butir rata-rata (μm)
7,6	10	87.74	4.15	79,736
	10	87.86	4.14	
	10	87.74	4.15	
	11	80.22	4.41	
	12	73.75	4.66	
	11	81.84	4.35	
	11	81.61	4.36	
	11	81.72	4.36	
	12	75.12	4.61	
	15	59.76	5.29	
8,5	18	50.57	5.78	56,316
	17	53.60	5.61	
	17	53.55	5.61	
	16	56.84	5.44	
	16	57.18	5.42	
	16	56.72	5.44	
	17	60,26	5.26	
	17	53.06	5.64	
	18	47.38	5.98	
	14	64.10	5.08	
		19	42.54	
	21	46.92	6.01	

9,47	20	46.97	6.00	46,637
	18	49.84	5.83	
	21	43.08	6.26	
	21	42.94	6.27	
	18	49.84	5.83	
	19	47.07	6.00	
	19	47.22	5.99	
	19	47.22	5.99	
10,24	16	72,76	4.70	65.16875
	19	51.15	5.75	
	18	58.69	5.37	
	17	66.89	4.95	
	16	72.61	4.71	
	18	67.03	4.95	
	15	79.05	4.46	
	15	78.80	4.47	
	16	72.30	4.72	
	18	67.80	4.47	
11,4	21	41.30	6.39	42,564
	22	39.34	6.53	
	21	41.30	6.39	
	20	43.18	6.25	
	20	43.04	6.26	
	20	43.18	6.25	
	20	43.18	6.25	
	19	45.16	6.12	
	21	41.04	6.40	
	19	44.92	6.14	
	23	38.79	6.57	

11,176	21	42.57	6.30	40,71
	22	40.80	6.42	
	25	35.94	6.80	
	22	40.84	6.42	
	17	52.64	5.66	
	24	37.29	6.69	
	22	40.76	6.42	
	24	37.25	6.69	
	22	40.22	6.46	
12	18	49.43	5.85	48,506
	19	46.83	6.01	
	19	47.07	6.00	
	18	49.84	5.83	
	19	49.84	5.83	
	18	49.53	5.84	
	17	49.53	5.84	
	20	44.53	6.16	
	19	49.08	5.87	
	19	49.38	5.85	
9,5	14	63.51	5.11	50,745
	18	49.39	5.85	
	18	49.75	5.83	
	17	52.03	5.70	
	18	49.45	5.85	
	17	52.52	5.67	
	15	59.15	5.32	
	17	52.63	5.66	
	22	38.62	6.58	
	22	40.41	6.45	
	13	68.21	4.89	

Diameter butir awal	13	67.86	4.91	63,769
	13	68.00	4.90	
	14	63.14	5.12	
	11	73.66	4.67	
	14	63.14	5.12	
	13	68.21	4.89	
	12	51.68	5.25	
	12	55.08	5.37	
	12	58.75	5.34	

IV.6. Korelasi antara Kecepatan Pendinginan dengan Ukuran Butir Austenit



Gambar 4.6. Hubungan Antara Kecepatan Pendinginan dengan Ukuran Butir Austenit

Dari data dan informasi yang sudah didapatkan dari penelitian kita kali ini dapat diketahui bahwa terdapat hubungan antara besar diameter butir dengan kecepatan pendinginan. Dari grafik di atas dapat diambil kesimpulan bahwa

semakin kecil ukuran butir austenite sampel hasil TMCP (*TermoMechanical Control Processing*) maka semakin kecil juga kecepatan pendinginan. Hal ini dikarenakan sesuai teori pertumbuhan butir (*grain growth*) dimana semakin tinggi kecepatan pendinginan, maka butir tidak akan sempat tumbuh, sehingga akan memiliki ukuran yang kecil. Selain itu salah satu hal yang mempengaruhi pertumbuhan butir pada material adalah peningkatan suhu.

IV.7. Pertumbuhan Butir Austenit Dalam Keadaan Isotermal dengan Non - Isotermal

Dalam keadaan sebenarnya keadaan isotermal maupun non isotermal sangat berpengaruh terhadap kekuatan mekanis baja karena struktur akhirnya juga berbeda. Seperti yang telah dijelaskan pada bab landasan teori, persamaan pertumbuhan butir Sellars adalah sebagai berikut:

$$d^n - d_o^n = \left[A \exp\left(\frac{-Q_{gg}}{RT}\right) \right] \cdot t \quad (4.7.1)$$

- Dimana
- d = besar butir akhir (μm)
 - d_0 = besar butir awal (μm)
 - n = *strain hardening* (4,5)
 - A = konstanta ($4,1 \times 10^{23}$)
 - Q_{gg} = energi aktivasi pertumbuhan butir (435.000 J/mol)
 - R = konstanta gas universal (8,314 J/mol-K)
 - T = temperatur absolut (K)
 - t = waktu (detik)

Ket: nilai n, A dan Q_{gg} adalah konstanta untuk baja jenis C-Mn-Nb

Persamaan di atas menunjukkan kinetika pertumbuhan butir dalam keadaan isothermal, yang berarti memiliki nilai T yang akan selalu konstan untuk setiap nilai t yang diberikan. Sedangkan untuk keadaan non-isothermal / kontinyu, nilai T akan berubah mengikuti nilai t yang diberikan. Hal ini menyebabkan adanya variabel T1 dan T2, yang akan menimbulkan adanya ΔT pada setiap nilai t yang diberikan. Untuk mempermudah perhitungan, maka nilai t yang digunakan pada penelitian ini dibatasi antara 10 – 40 detik. Dari data di atas, terlihat bahwa variabel ΔT mempengaruhi kinetika pertumbuhan butir, untuk keadaan non-isothermal. Secara matematis, dapat dijelaskan sebagai berikut.

$$d^n - d_o^n = [A \exp \left(\frac{-Q_{gg}}{RT} \right)] \cdot t$$

$$(=) \quad d^n - d_o^n = [A \exp \left(\frac{-Q_{gg}}{RT} \right)] \cdot t \cdot \frac{\Delta T}{\Delta T}$$

$$(=) \quad d^n - d_o^n = [A \exp \left(\frac{-Q_{gg}}{RT} \right)] \cdot \Delta T \cdot \frac{t}{\Delta T}$$

$$(=) \quad d^n - d_o^n = [A \exp \left(\frac{-Q_{gg}}{RT} \right)] \cdot \Delta T \cdot \frac{1}{Cr(4.7.2)}$$

Dari persamaan diatas, terlihat bahwa untuk pertumbuhan butir non-isothermal, sangat dipengaruhi oleh ΔT dan Cr (*cooling rate* / kecepatan pendinginan) Karena yang menentukan sifat mekanis adalah keadaan butir akhir dari material tersebut

Sebelumnya beck melakukan penelitian untuk menentukan nilai dari ukuran butir dalam keadaan anil isothermal sesuai dengan hubungan perpankangan :

$$D^n - D_0^n = C \cdot t \quad (4.7.3)$$

dengan D adalah diameter butir akhir, D_0 adalah diameter butir awal, t adalah waktu anil, serta n dan C adalah konstanta yang bergantung pada komposisi paduan.

Dari data hasil penelitian didapatkan tabel berupa :

Tabel 4.6 data hasil percobaan

dT (K)	Cr (K/S)	A	Q (J/mol)	R (J/mol-K)	T (K)	$A*1/Cr*\exp(Q/RT)*dT$	d (µm)
190	7.6	4.1E+23	- 435000	8.31	1413	25868586001	84.10429
200	8.5	4.1E+23	- 435000	8.31	1418	17910474901	53.6125
170	9.47	4.1E+23	- 435000	8.31	1273	204639646.4	46.364
180	9.5	4.1E+23	- 435000	8.31	1383	5633301788	53
250	10.24	4.1E+23	- 435000	8.31	1443	22845741948	65
250	11.176	4.1E+23	- 435000	8.31	1348	2590005076	39.3844
240	11.4	4.1E+23	- 435000	8.31	1263	112944920.1	42.564
380	12	4.1E+23	- 435000	8.31	1348	1321428598	48.506

Selanjutnya dibandingkan dengan penghitungan menggunakan persamaan Sellars :

$$d_{rex} = Dd_0^{0,67} \epsilon^{-0,67} \quad (4.7.3)$$

dimana :

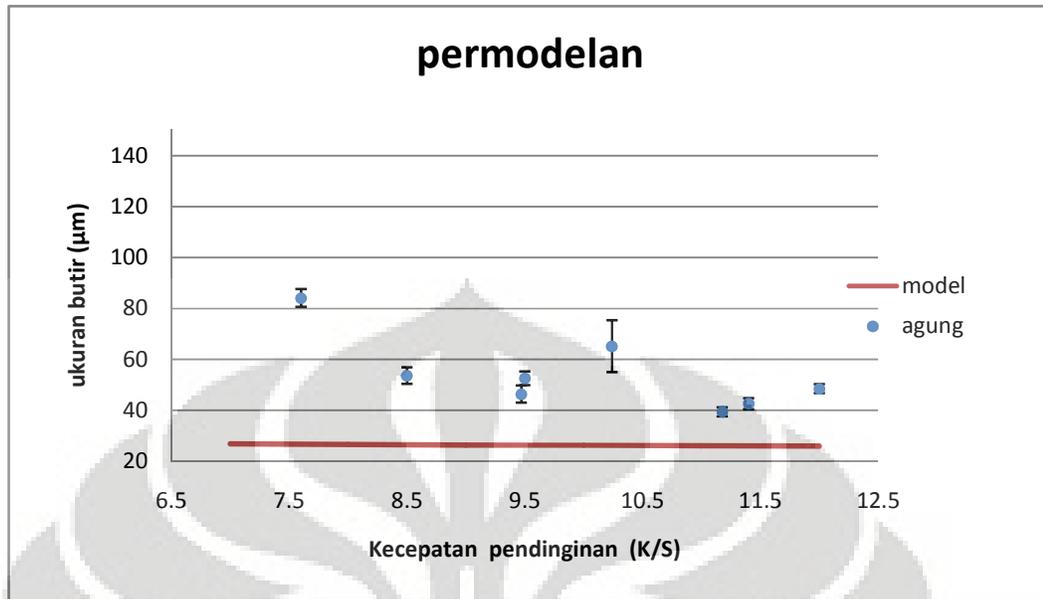
d_{rex} = diameter butir rekristalisasi (µm)

D = konstanta material (0,66)

d_0 = diameter butir awal (µm)

ϵ = besar regangan

Dari persamaan 4.7.3 diperoleh diameter butir rekristalisasi sebesar 24,3219 µm. Nilai ini dimasukkan ke dalam persamaan 4.7.1 sehingga dilakukan simulasi terhadap grafik dengan persamaan 4.7.1 tersebut. Gambar berikut untuk mensimulasikan persamaan non-isotermal dari baja ini.



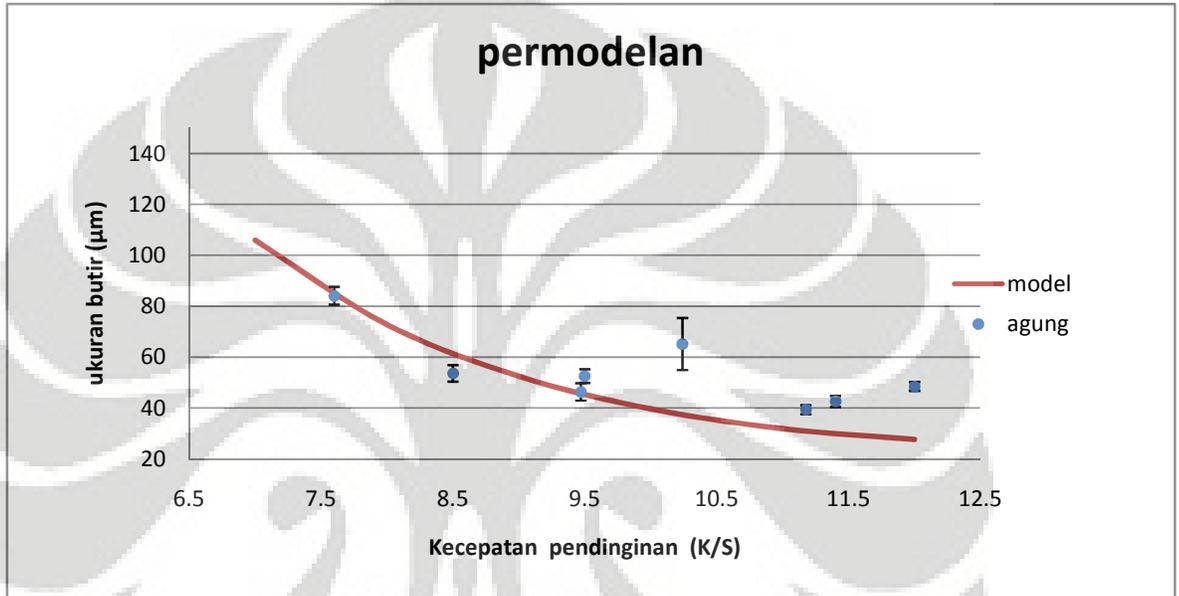
Gambar 4.7 grafik sebelum modifikasi

Dari gambar di atas dapat diketahui bahwa persamaan belum dimodifikasi yang mengakibatkan tidak adanya korelasi antara hasil percobaan dengan permodelan. Sedangkan yang diharapkan adalah kurva mendekati titik-titik hasil percobaan.

Tabel 4.7 diameter butir austenit setelah modifikasi

dT (K)	Cr (K/S)	A	Q (J/mol)	R (J/mol-K)	T (K)	$A \cdot 1/Cr \cdot \exp(Q/RT) \cdot dT$	d (µm)
150	7	4.10E+23	-435000	8.31	1200	1292035508	105.8903
150	8	4.10E+23	-435000	8.31	1200	237015486	72.73786
150	9	4.10E+23	-435000	8.31	1200	53105522.67	52.45406
150	10	4.10E+23	-435000	8.31	1200	13932195.42	39.70201
150	11	4.10E+23	-435000	8.31	1200	4152718.149	31.93261
150	12	4.10E+23	-435000	8.31	1200	1375364.254	27.69947

Dari grafik perpaduan ke-2 tabel di atas kita dapat membuat penyesuaian untuk mendekati model persamaan ke-2 grafik yaitu dengan penambahan suatu konstanta pada model. Setelah beberapa kali pengujian, didapat konstanta yang dapat membuat grafik model mendekati grafik hasil percobaan seperti pada Gambar



Gambar 4.8. grafik hasil percobaan dengan permodelan

Untuk konstanta yang digunakan adalah 1×10^{13} dan variabel Cr menjadi $1/Cr^{12.7}$. Maka modifikasi persamaan akhir menjadi :

$$d^n - d_0^n = \left[A \cdot \exp\left(\frac{-Q_{gs}}{RT}\right) \right] \cdot \left[B \cdot \Delta T \cdot \frac{1}{Cr^m} \right] \quad (4.7.4)$$

dimana ;

d = besar butir akhir (µm)

d₀ = besar butir awal (µm)

n	= strain hardening (4,5)
A	= konstanta ($4,1 \times 10^{23}$)
Q_{gg}	= energi aktivasi pertumbuhan butir (435.000 J/mol)
R	= konstanta gas universal (8,314 J/mol-K)
T	= temperatur absolut (K)
ΔT	= perubahan temperatur selama kondisi non-isotermal (K)
Cr	= kecepatan pendinginan (K/S)
B, m	= konstanta material hasil percobaan dimana ; $B = 1 \times 10^{13}$, $m = 12.7$

IV.8 Komparasi dengan Penelitian Lainnya

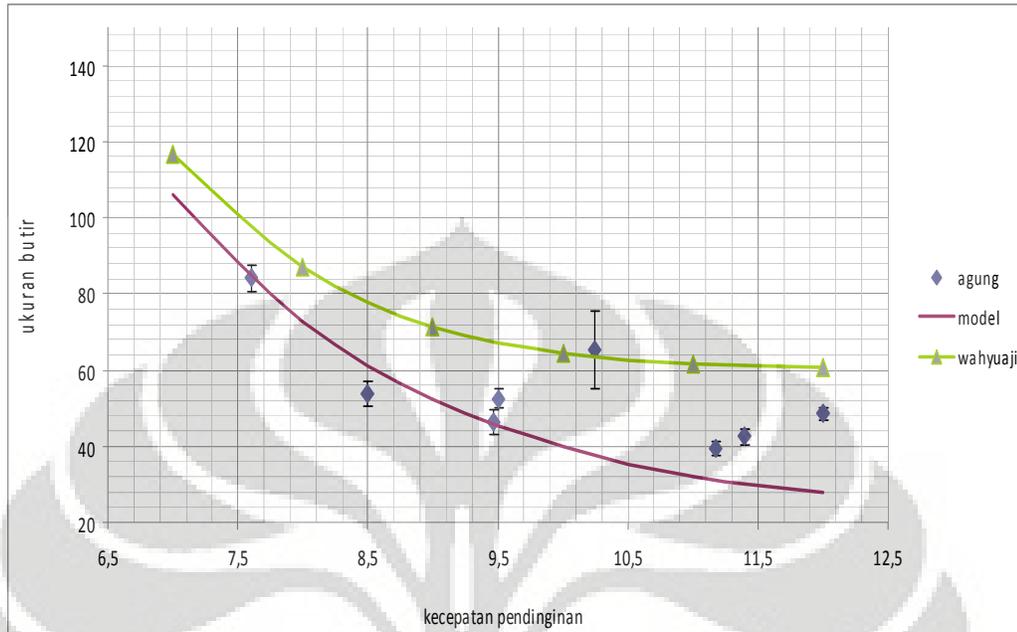
Persamaan pertumbuhan butir non-isotermal di atas dapat dibandingkan dengan persamaan penelitian yang sama untuk material yang berbeda, dimana yang membedakan adalah komposisi material penyusun. Sebelumnya saudara Wahyuaji N. P. yang menggunakan material baja HSLA dengan kode produksi 92397U.

Perbandingan Komposisi Baja dari Penelitian dalam Persen

4.8. Tabel perbandingan komposisi sampel

Komposisi	Kode produksi 91173T	Kode produksi 92397U
Ti	0.004	0,002
C	0.172	0,048
Si	0.259	0,266
Mn	1,048	0,706
P	0.014	0,010
S	0.003	0,007
Al	0.044	0,037
Nb	0.056	0,037
V	0.004	0,003
Ni	0.263	0,022
Cr	0.020	0,018
N	0.031	0,004

Grafik model hasil penelitian dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 4.8. Perbandingan Model Persamaan dengan Penelitian Lain

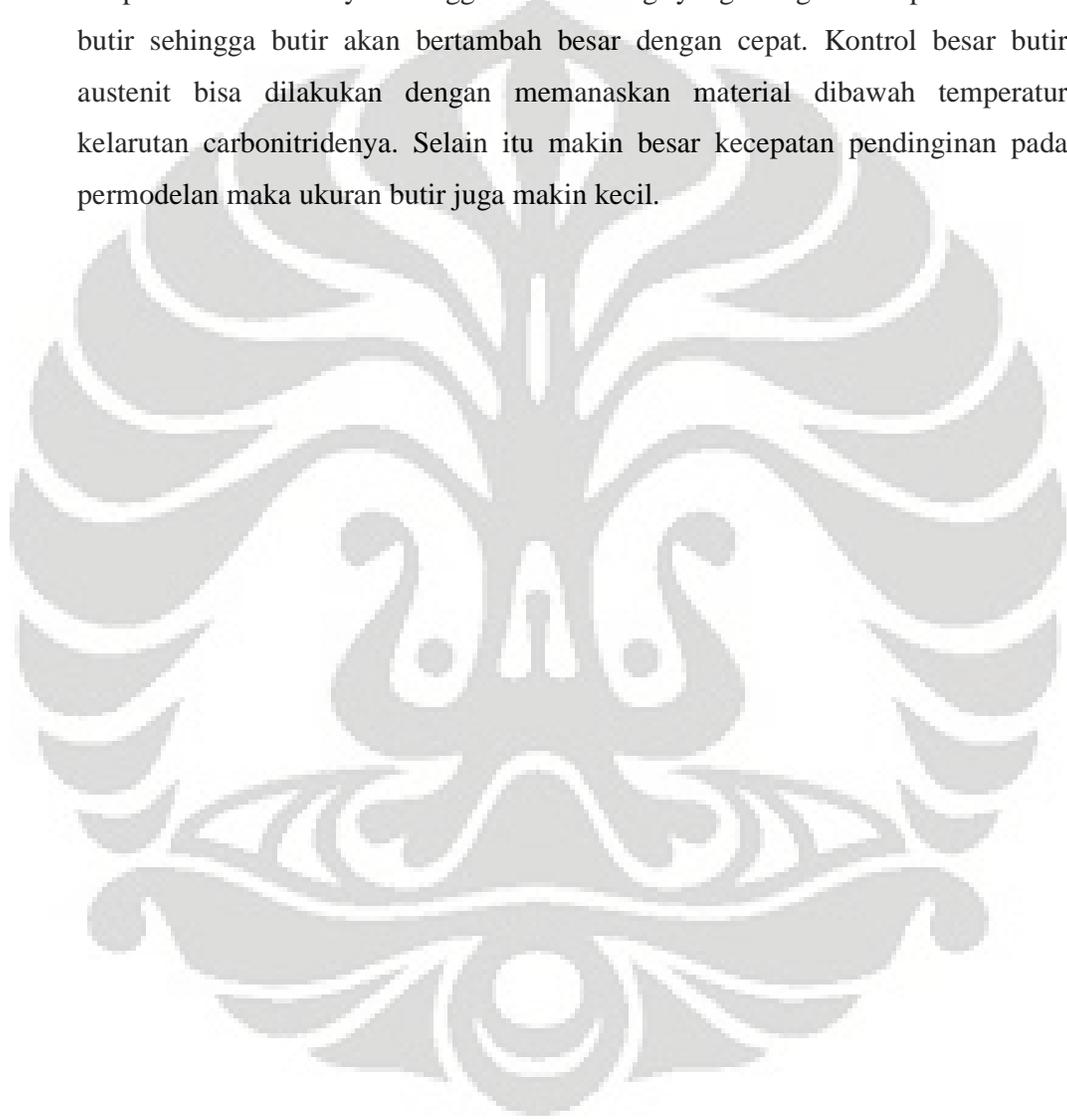
Dari grafik di atas dapat kita ketahui bahwa grafik hasil penelitian sdr wahyuaji berada di atas dari permodelan sedangkan hasil penelitian penulis berada di bawah dari grafik hasil penelitian sdr wahyuaji dan permodelan itu sendiri. Hal ini dikarenakan konstanta dari sdr wahyu aji lebih besar dari pada hasil penelitian yang penulis dapatkan yaitu ;

4.9. Tabel perbandingan hasil modifikasi

Perbedaan	Konstanta B	Cooling rate
Agung	1×10^{13}	12.7
Wahyuaji	1×10^{15}	11

Apabila kita analisa lebih jauh lagi terutama komposisi material dari kedua sampel terdapat perbedaan yang cukup besar yaitu pada komposisi Niobium, karbon, dan nitrogen. Ketiga unsur ini berpengaruh karena akan mempengaruhi temperatur kelarutan presipitat dan temperatur reheating masing-masing baja. Perbedaan temperatur tersebut akan menghasilkan perbedaan diameter butir awal sebelum dilakukan proses canai panas. Dengan temperatur *reheating* yang lebih tinggi (1200 °C) dibandingkan dengan penelitian Wahyuaji (1150 °C), dihasilkan

diameter butir awal yang lebih besar sehingga memperbesar diameter butir pada saat terjadi rekristalisasi. Selain itu komposisi unsur pembentuk presipitat lebih besar dibandingkan komposisi sdr wahyuaji sehingga mengakibatkan besar butir saat reheating dapat dikontrol dengan adanya presipitat tersebut. Presipitat Nb(CN) akan larut seluruhnya kedalam fasa austenit apabila dipanaskan diatas temperatur kelarutannya sehingga tidak ada lagi yang menghambat pertumbuhan butir sehingga butir akan bertambah besar dengan cepat. Kontrol besar butir austenit bisa dilakukan dengan memanaskan material dibawah temperatur kelarutan carbonitridenya. Selain itu makin besar kecepatan pendinginan pada permodelan maka ukuran butir juga makin kecil.



BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

V.I. Kesimpulan

1. Ukuran butir austenit baja HSLA 0.056% Nb setelah canai panas akan menurun seiring dengan peningkatan kecepatan pendinginan. Hal ini terjadi karena dengan peningkatan kecepatan pendinginan, energi yang diperlukan untuk pertumbuhan butir akan semakin berkurang sehingga butir tidak sempat tumbuh.
2. Persamaan kinetika pertumbuhan butir Sellars, hanya berlaku untuk pertumbuhan butir dalam kondisi isothermal. Untuk kondisi yang berbeda (pendinginan kontinyu), diperlukan modifikasi persamaan Sellars tersebut, dengan penambahan variabel dan penyesuaian konstanta.
3. Variabel yang ditambahkan adalah cooling rate (Cr) dan disesuaikan menjadi $1/Cr^{12.7}$, sedangkan konstanta yang digunakan adalah 1×10^{13} . Maka modifikasi persamaan akhir untuk baja HSLA 0.056% Nb menjadi :

$$d^n - d_o^n = \left[A \exp \left(\frac{-Q_{gg}}{RT} \right) \right] \cdot \left[B \cdot \Delta T \cdot \frac{1}{Cr^m} \right]$$

Dimana	d	= besar butir akhir (μm)
	d_0	= besar butir awal (μm)
	n	= <i>strain hardening</i> (4,5)
	A	= konstanta ($4,1 \times 10^{23}$)
	Q_{gg}	= energi aktivasi pertumbuhan butir (435.000 J/mol)
	T	= temperatur deformasi (K)
	ΔT	= perubahan temperatur selama kondisi non-isothermal (K)
	Cr	= kecepatan pendinginan ($^{\circ}\text{C/S}$)
	B, m	= konstanta material hasil percobaan dimana ; $B = 1 \times 10^{13}$ dan $m = 12.7$

V.II. Saran

Dalam penelitian kali ini penulis mempunyai saran agar penelitian yang serupa dapat terus dikembangkan Karena penelitian kali ini mudah-mudahan akan berguna kelak.



DAFTAR REFERENSI

- [1] William H Cubberly and friends, *Properties and Selection: Iron and Steels*, Metal Handbook Vol 1. 9th Edition, (Ohio : American Society for Metals, 1998)
- [2] Y Lakhtin, *Engineering Physical Metallurgy*, (Moscow : Foreign Language Publishing House)
- [3] William D Callister, *Material Science and Engineering an Introduction*, (New York, John Wiley & Son, 1997)
- [4] C.M Sellars, "Static Recrystallization and Precipitation During Hot Rolling of Microalloyed Steels," Mat Science Seminar 23-24 (Oct 1982)
- [5] P. A Manohar, *et al.*, "Grain Growth Predictions in Microalloyed Steels," ISIJ International, Vol. 36 No. 2. (1996)
- [6] 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.
- [7] J.N. Harris, *Mechanical Working of Metal*, (UK: Pergamon Press, 1983)
- [8] P.L. Mangonon, *The Principles of Material Selection for Engineering Design*, (Prentice Hall, Inc, 1999)
- [9] Brooks. R. Charlie, *Heat Treatment Structure & Properties of Non Ferrous Alloy*, (Ohio : American Society for Metals, 1998)
- [10] Sidney H. Avner, *Introduction to Physical Metallurgy*, (Michigan, Mc Graw-Hill Book Co. 1982)

[11] Fanina NW. “Pengaruh Deformasi Canai Panas Terhadap Nilai Kekerasan & Pertumbuhan Butir Alpha pada Bahan Kuningan C26000 (Cartridge Brass)”. Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2003.

[12] R.E Smallman, R.J Bishop, *Metals and Material*, (UK : Butterworth – Heinemann, 1995)

[13] Lawrence H. Van Vlack, *Elements of Materials Science*, (London: Addison-Wesley Publishing Company, Inc, 1960)

[14] D.A Porter, K.E Easterling, *Phase Transformations in Metal and Alloys*. (UK: Van Nostrand Reinhold, Co, 1981)

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

[16] Khaled F. Al-Hajeri, “The Grain Coarsening and Subsequent Transformation of Austenite in the HSLA Steel during High Temperature Thermomechanical Processing,” (University of Pittsburgh. 2005). Diakses 12 Desember 2006 dari ETD.

www.etd.library.pitt.edu/ETD/available/etd-04082005-082222/-10k

[17] Yang H. Bae et al, “Effect of Hot Working on Austenite/Ferrite Transformations in HSLA Steels”, The Minerals, Metal & Material Society, 2002

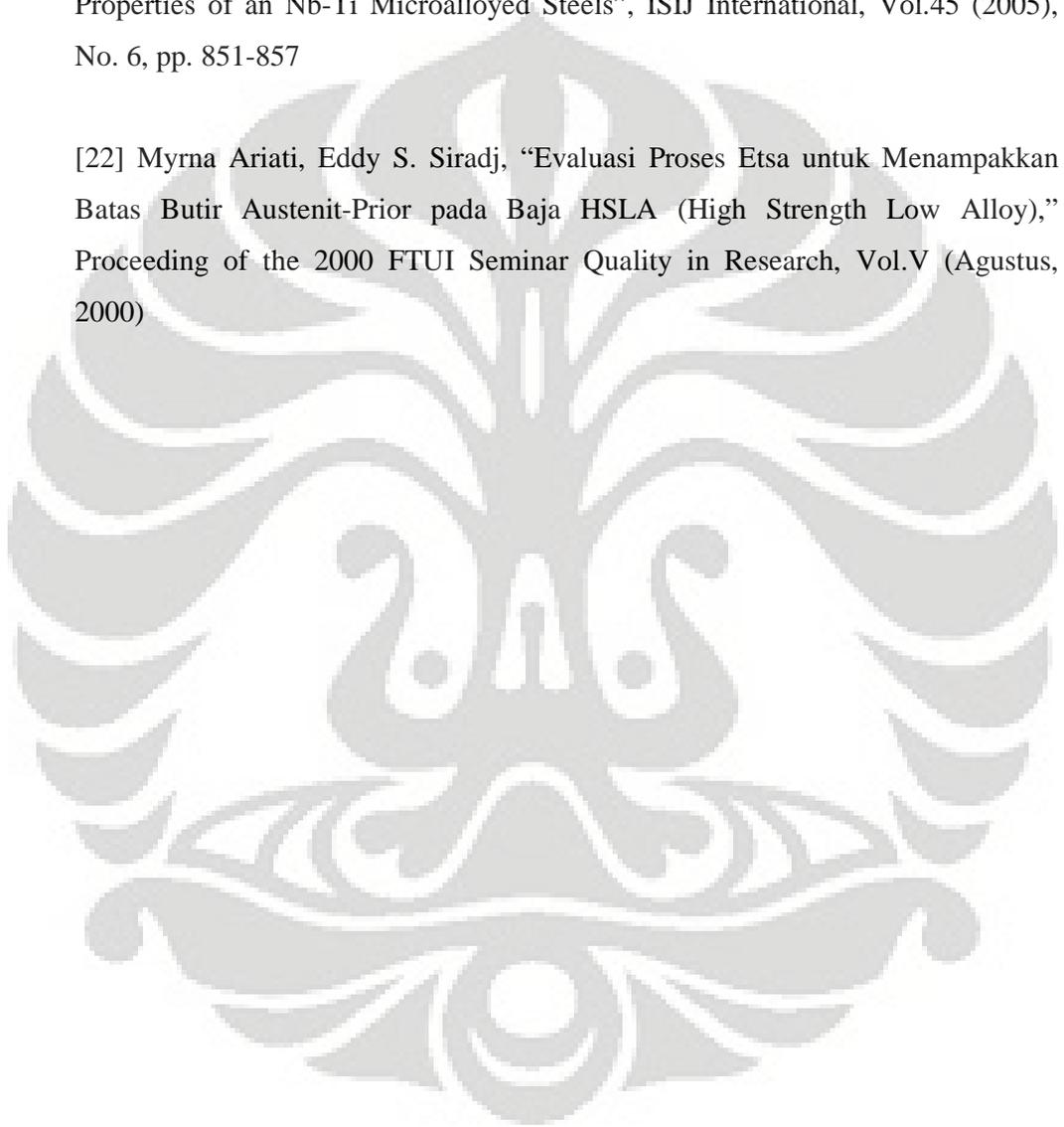
[18] Fang Jian, “Study on the Mechanism of Strengthening and Toughening Effect of Titanium Addition on HSLA Steel”.

[19] Ho-Won Lee et al, “Local Austenite Grain Distribution in Hot Bar Rolling of AISI 4135 Steel”, ISIJ International, Vol. 45 (2005), No.5, pp. 706-712

[20] T.H.Xi et al, "Effect of Zirconium on Microstructures and Mechanical Properties of Microalloyed Steel", *Acta Metall. Sin. (Engl. Lett)* Vol. 19, No.5, pp 319-327, Oct 2006

[21] Yanchun Liu et al, "Effect of TMCP Parameters on the Microstructure and Properties of an Nb-Ti Microalloyed Steels", *ISIJ International*, Vol.45 (2005), No. 6, pp. 851-857

[22] Myrna Ariati, Eddy S. Siradj, "Evaluasi Proses Etsa untuk Menampakkan Batas Butir Austenit-Prior pada Baja HSLA (High Strength Low Alloy)," *Proceeding of the 2000 FTUI Seminar Quality in Research*, Vol.V (Agustus, 2000)



LAMPIRAN I
PERALATAN PENDUKUNG

Gambar sampel uji



Gambar sampel uji setelah canai panas





Gambar sampel uji setelah preparasi metalografi



Mesin canai



Waterjet Spray



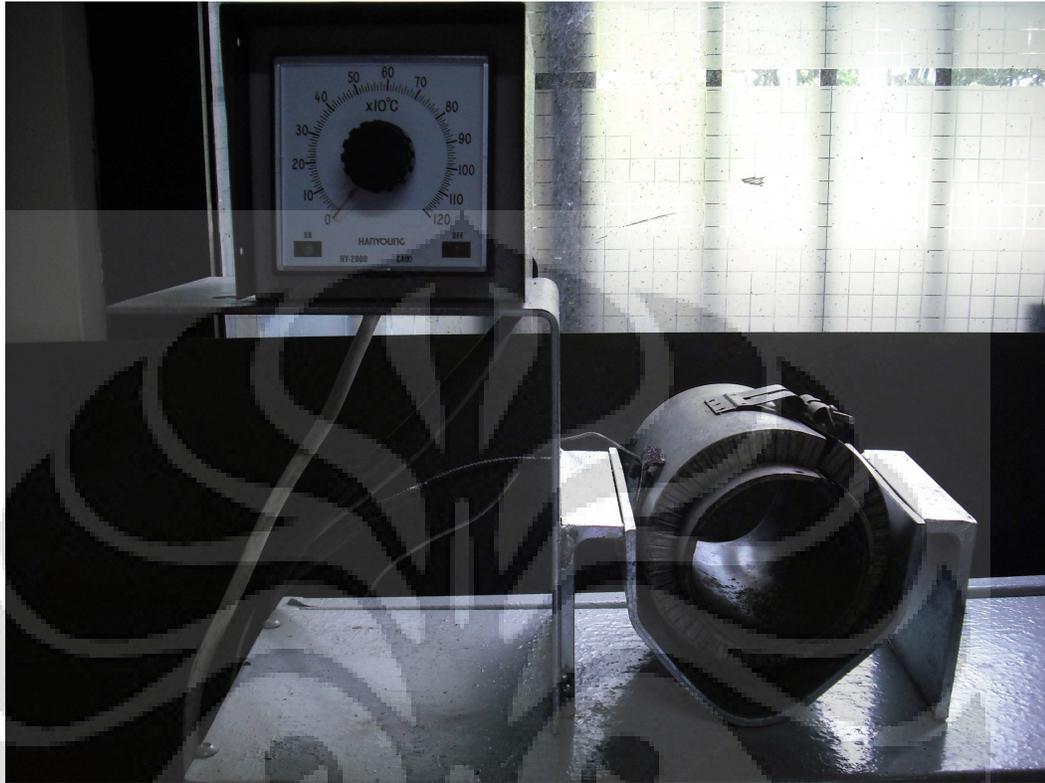
Susunan perlatan kerja



Komputer Data Akuisisi



Heating jacket dan termocontroller



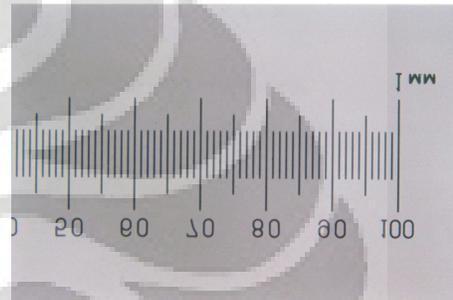
LAMPIRAN II

CONTOH PERHITUNGAN UKURAN BUTIR

Setelah didapat foto mikro dari benda uji, selanjutnya diukur besar butir austenit dengan menggunakan metode perbandingan. Perhitungan dilakukan dengan bantuan foto standar perbesaran tertentu yang berisi skala seperti terlihat pada gambar dibawah.



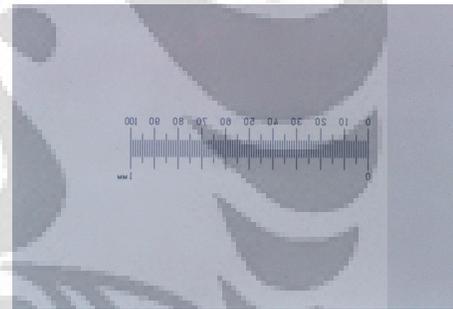
500X



200X



100X



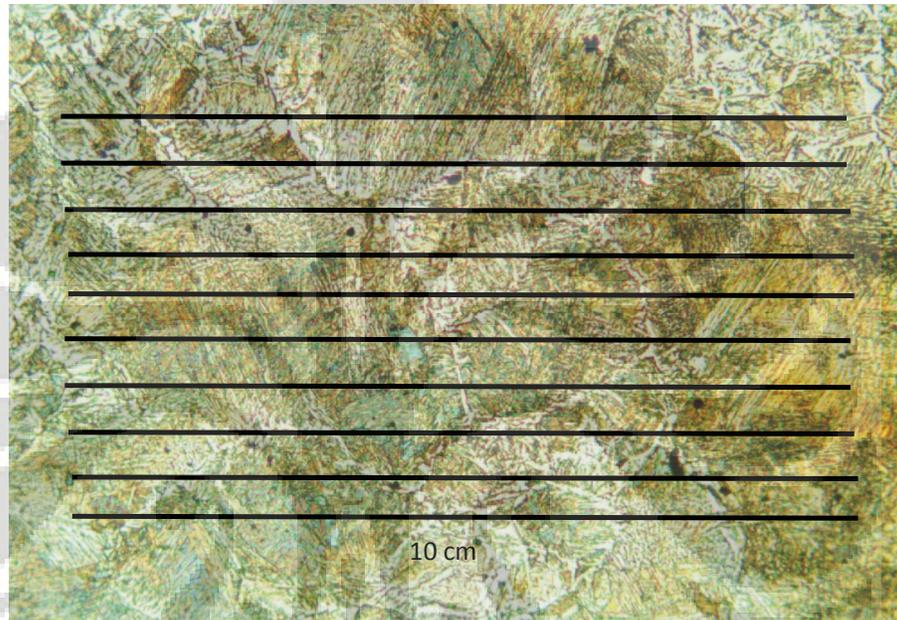
50X

Setiap satu garis skala pada foto skala standar tersebut memiliki panjang $1\mu\text{m}$. Sehingga dengan menggunakan mistar, dapat diketahui perbandingan antara ukuran pada mistar sentimeter dengan ukuran μm pada foto. Sebagai contoh, pada foto standar perbesaran 100X, 10 sentimeter pada mistar ternyata adalah $720\mu\text{m}$ pada foto, sedangkan pada foto standar perbesaran 200X, 10 sentimeter pada mistar ternyata adalah $540\mu\text{m}$ pada foto.

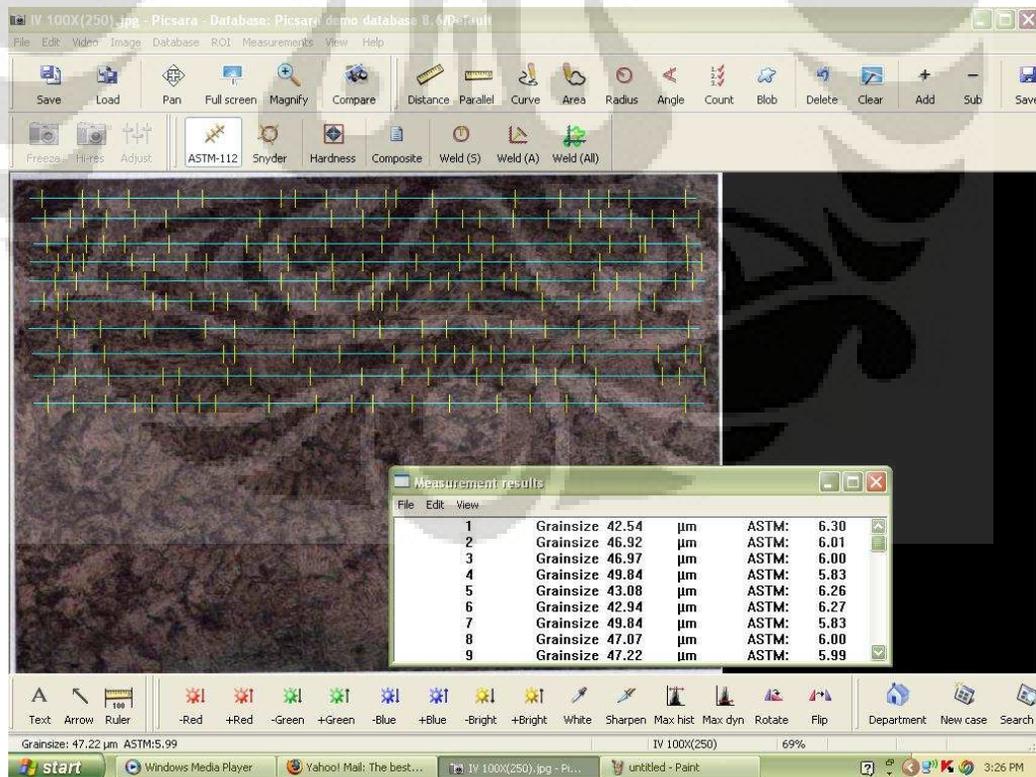
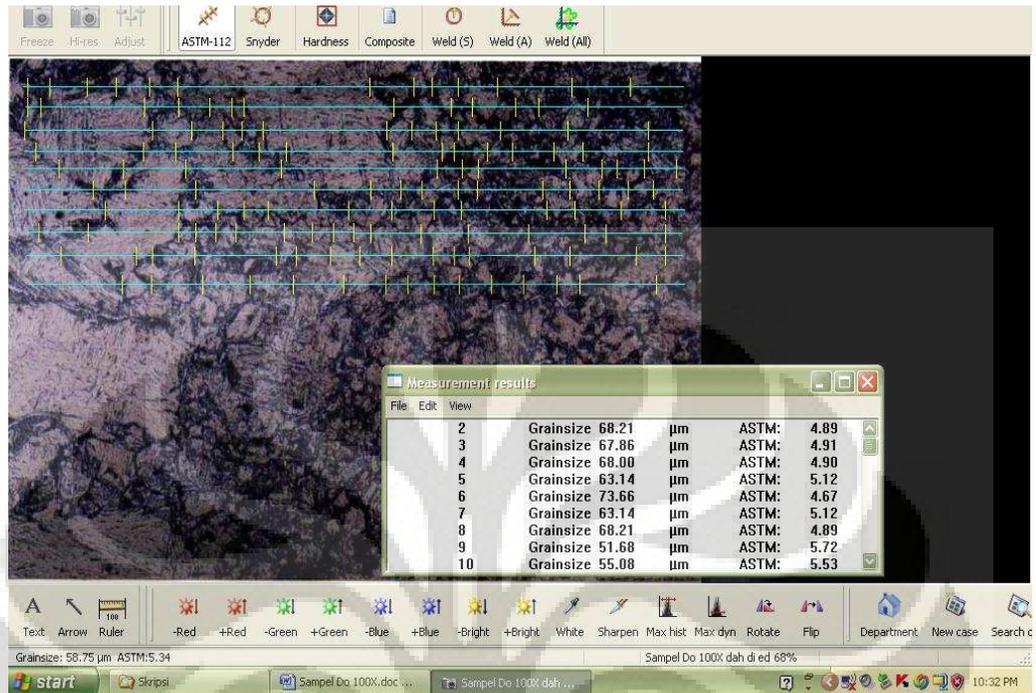
Setelah itu ditarik garis sebanyak 10 buah pada foto. Kemudian dari 10 garis tersebut diambil rata-ratanya, sehingga hasil pengukuran lebih akurat. Misalnya pada foto perbesaran 100X, garis kesatu jumlah batas butir yang

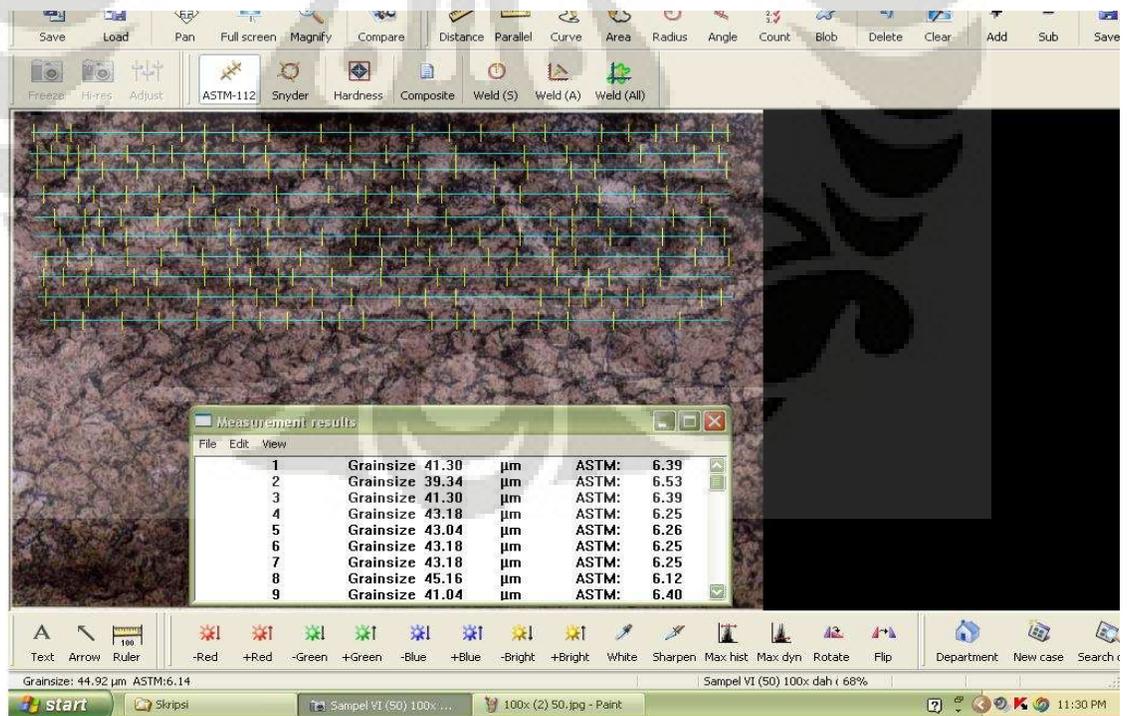
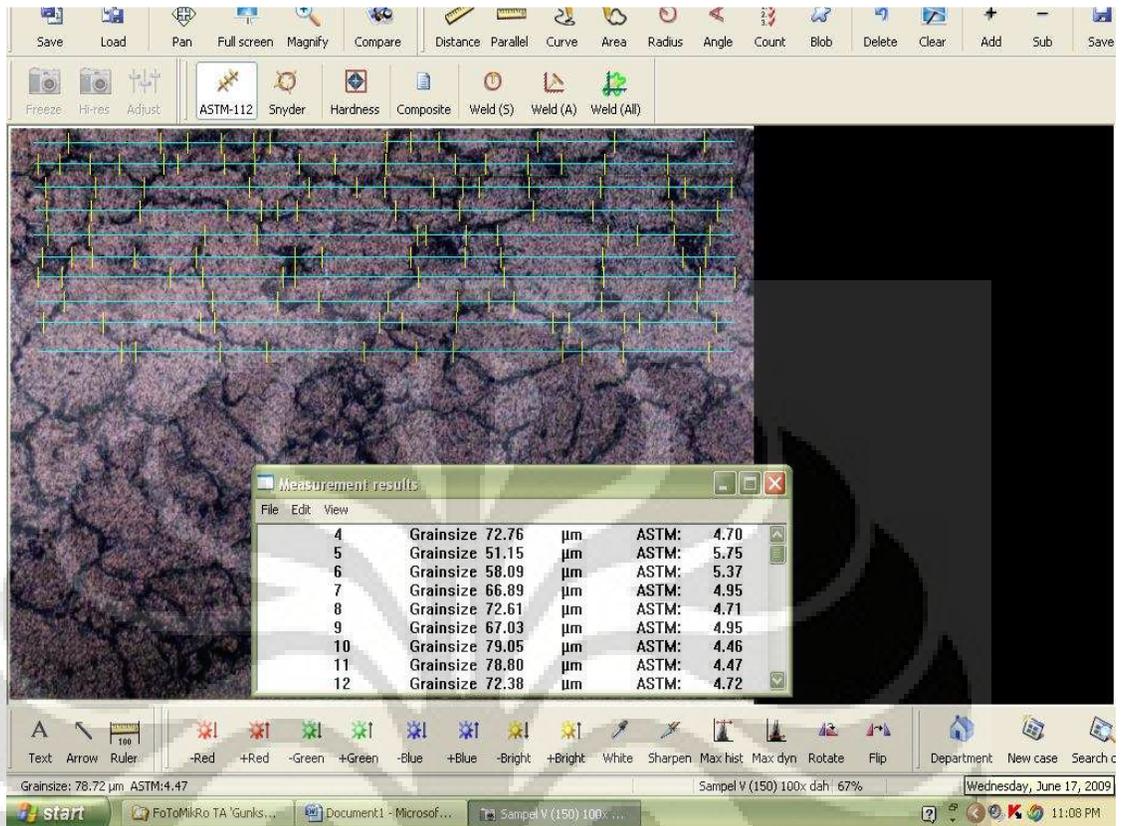
memotong garis sebanyak 9 buah, maka diameter butirnya sama dengan $720 \mu\text{m}/9 = 80 \mu\text{m}$. Begitu seterusnya sampai garis ke-10, kemudian diambil rata-ratanya.

Contoh penarikan garis dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Contoh perhitungan butir menggunakan picsara

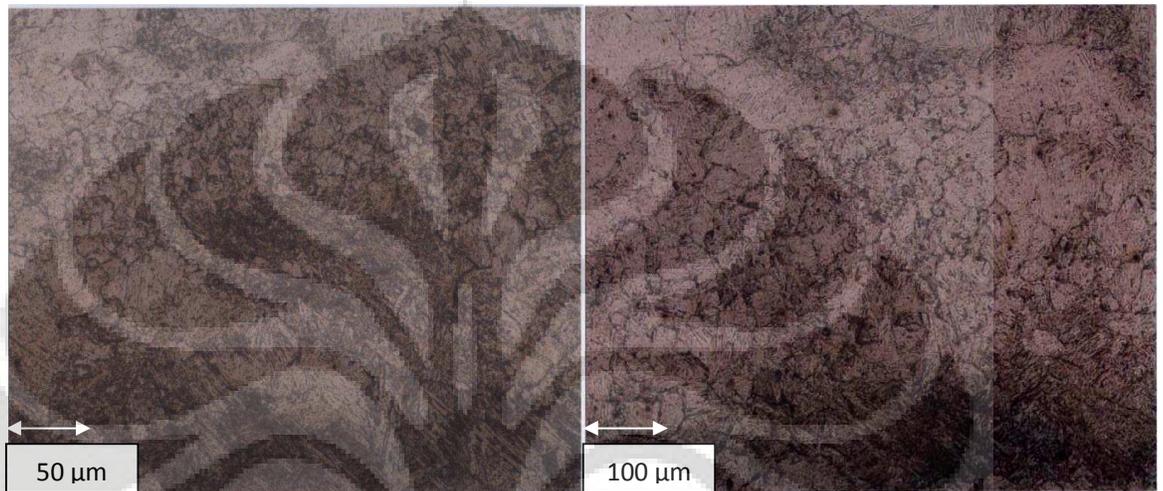




LAMPIRAN III

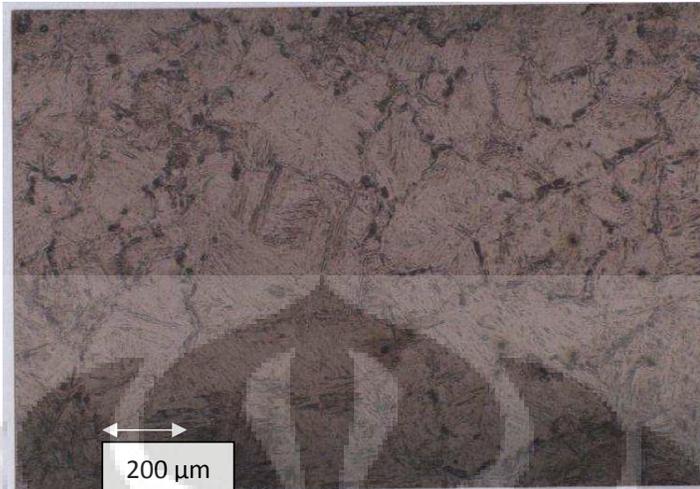
FOTO MIKRO

Kecepatan Pendinginan 7,6 K/S



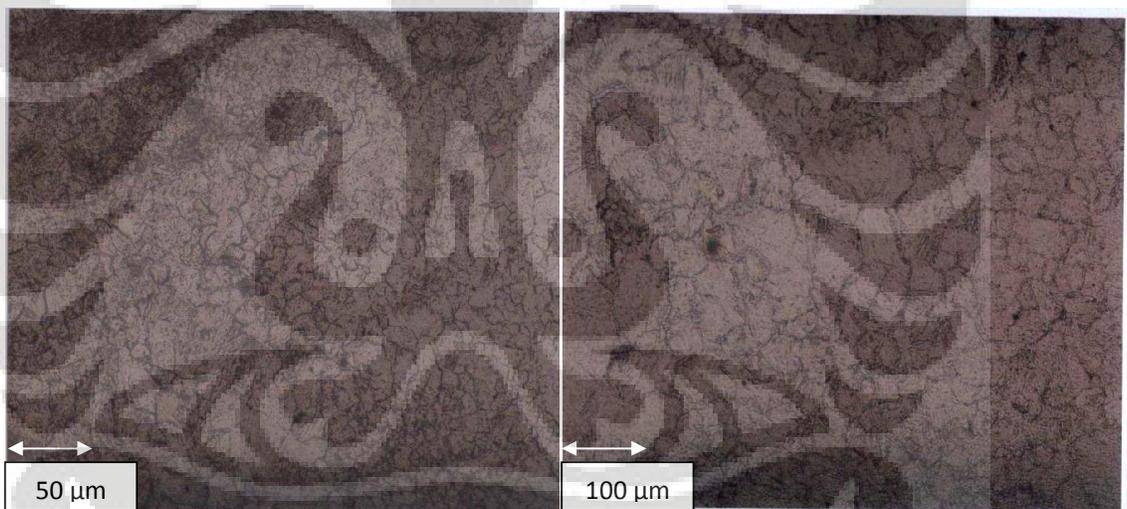
50 X

100 X



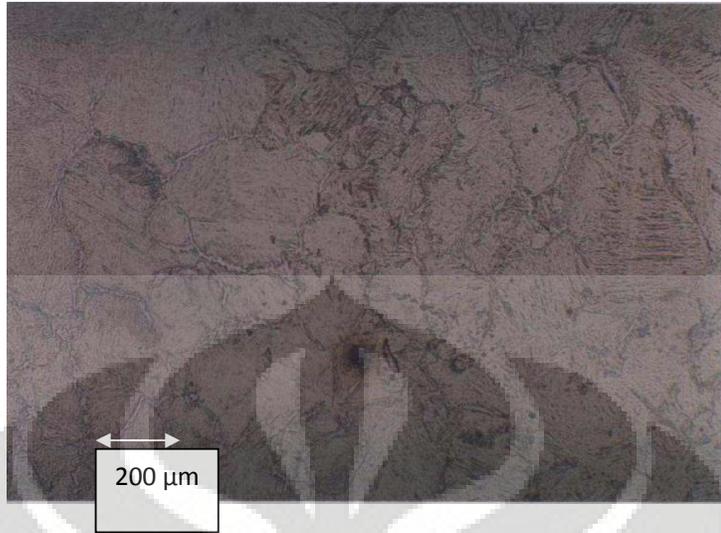
200 X

Kecepatan Pendinginan 8,5 K/S



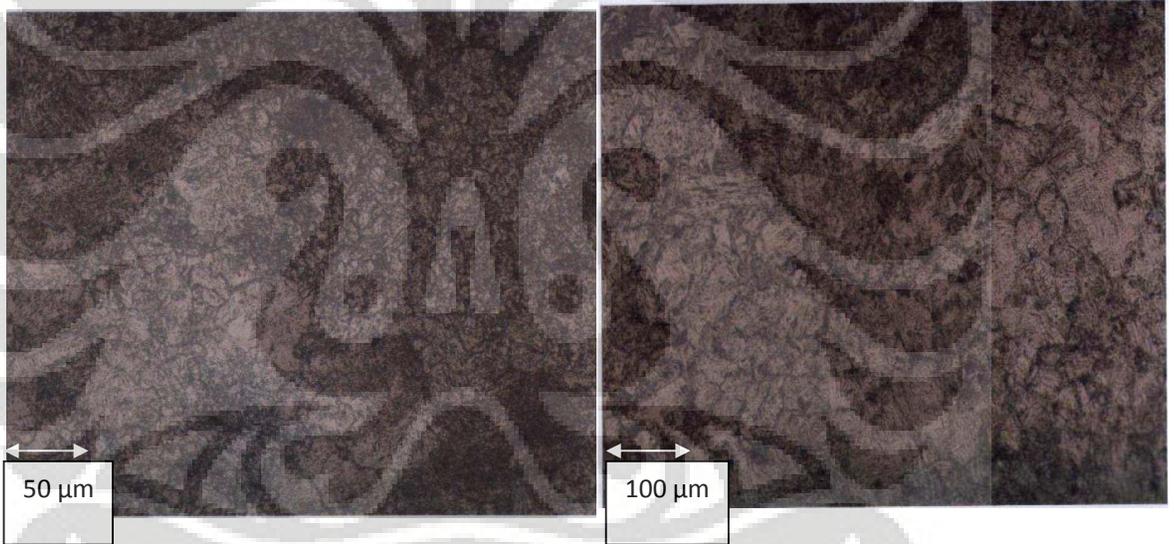
50 X

100 X



200 X

Kecepatan Pendinginan 9,47 K/S

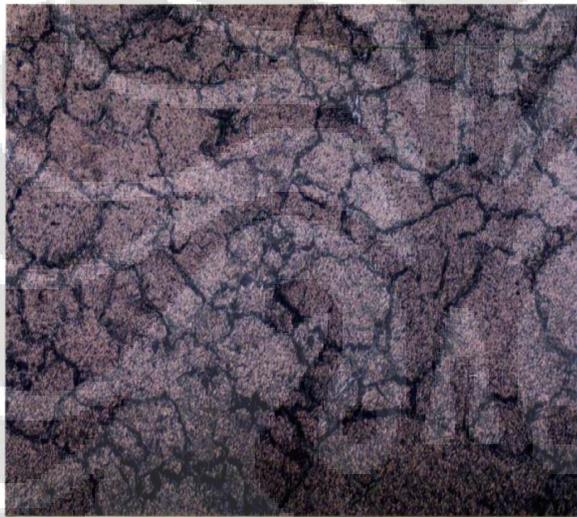


50 μm

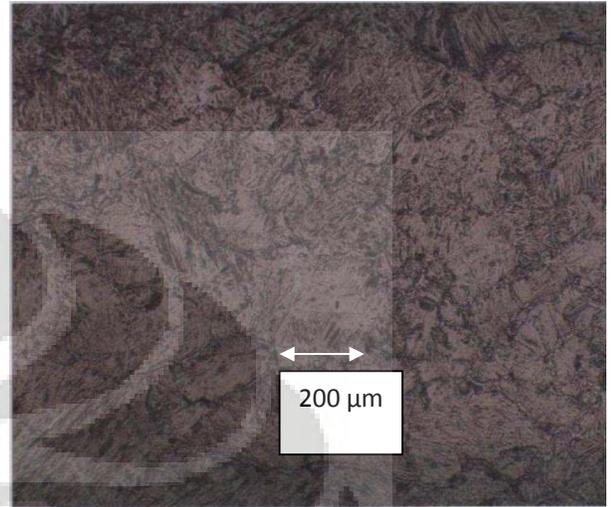
100 μm

50 X

100 X

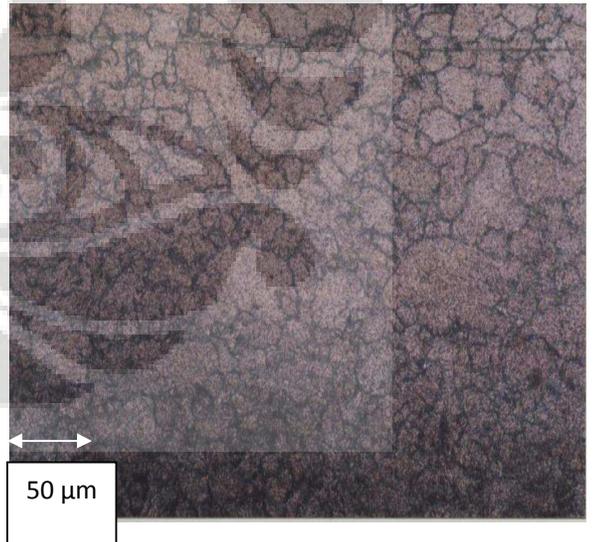


50 X



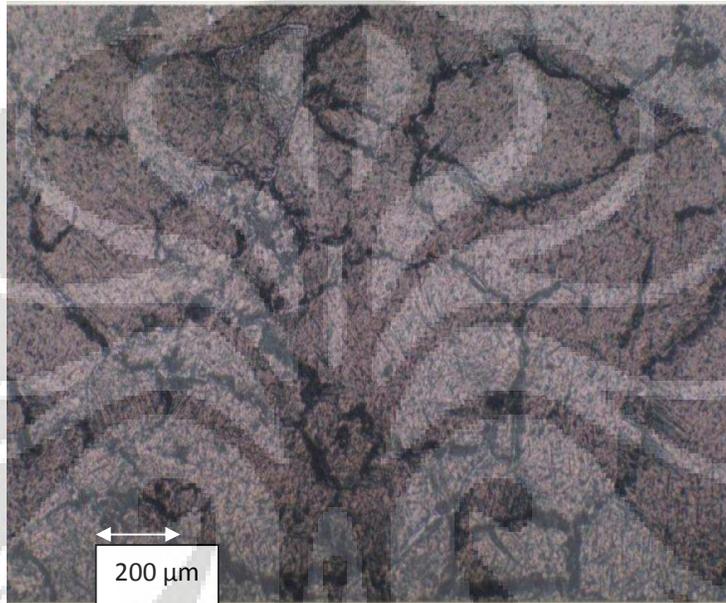
200 X

Kecepatan Pendinginan 10,24
K/S



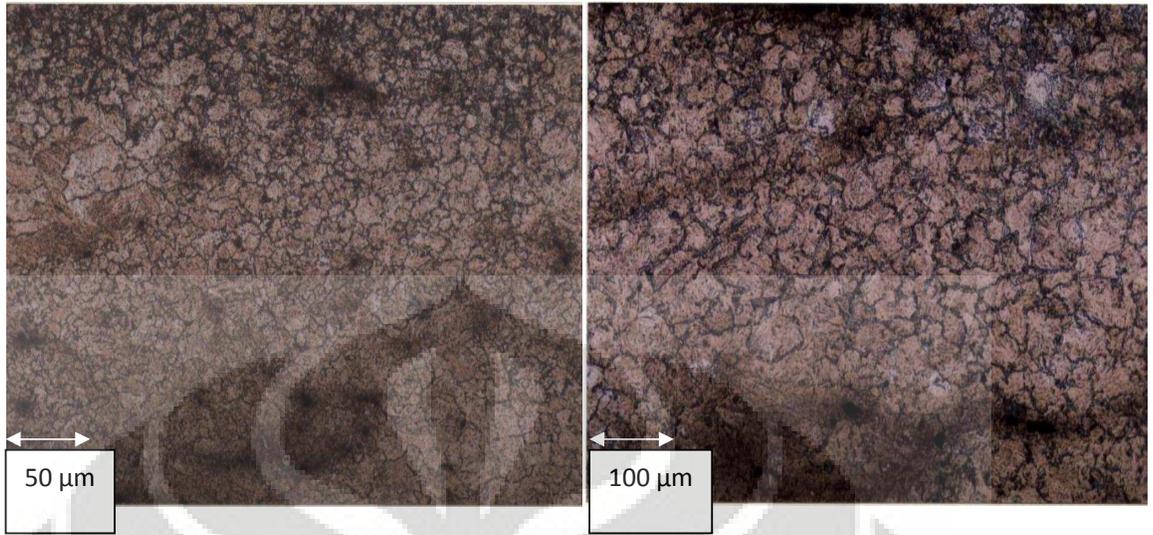
100

100 X



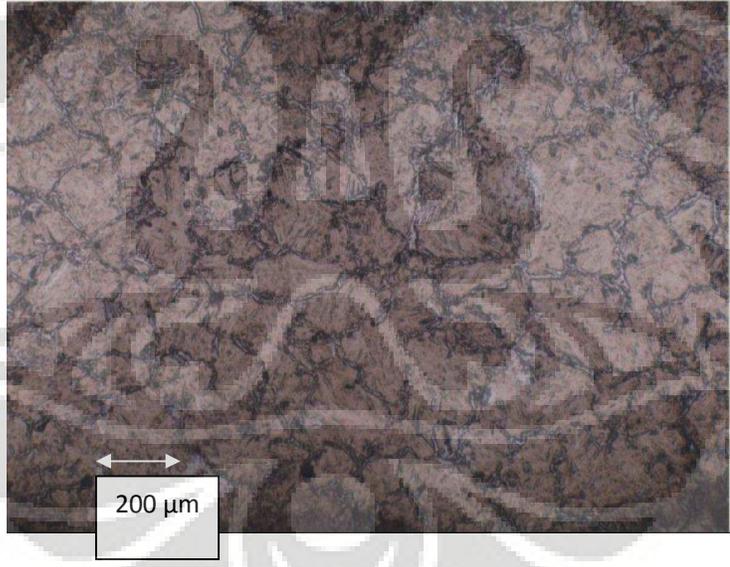
200 X

Kecepatan Pendinginan 11,4 K/S



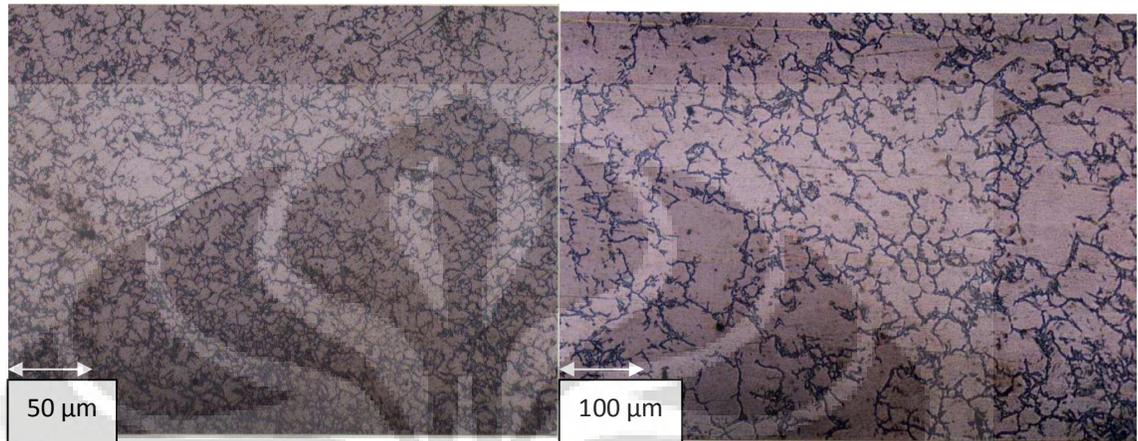
50 X

100 X



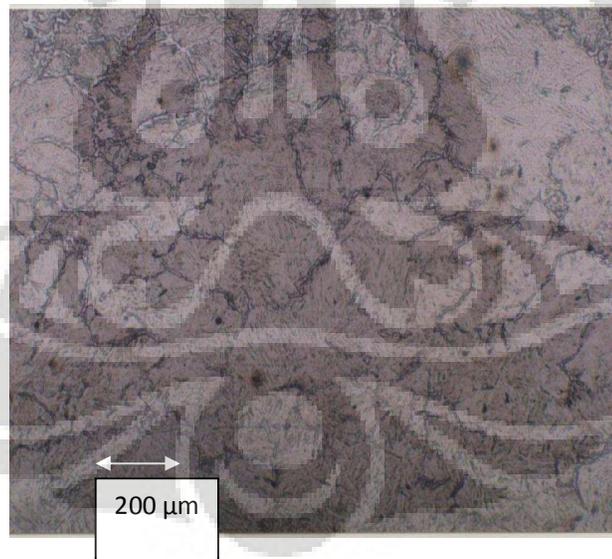
200 X

Kecepatan Pendinginan 11,176 K/S



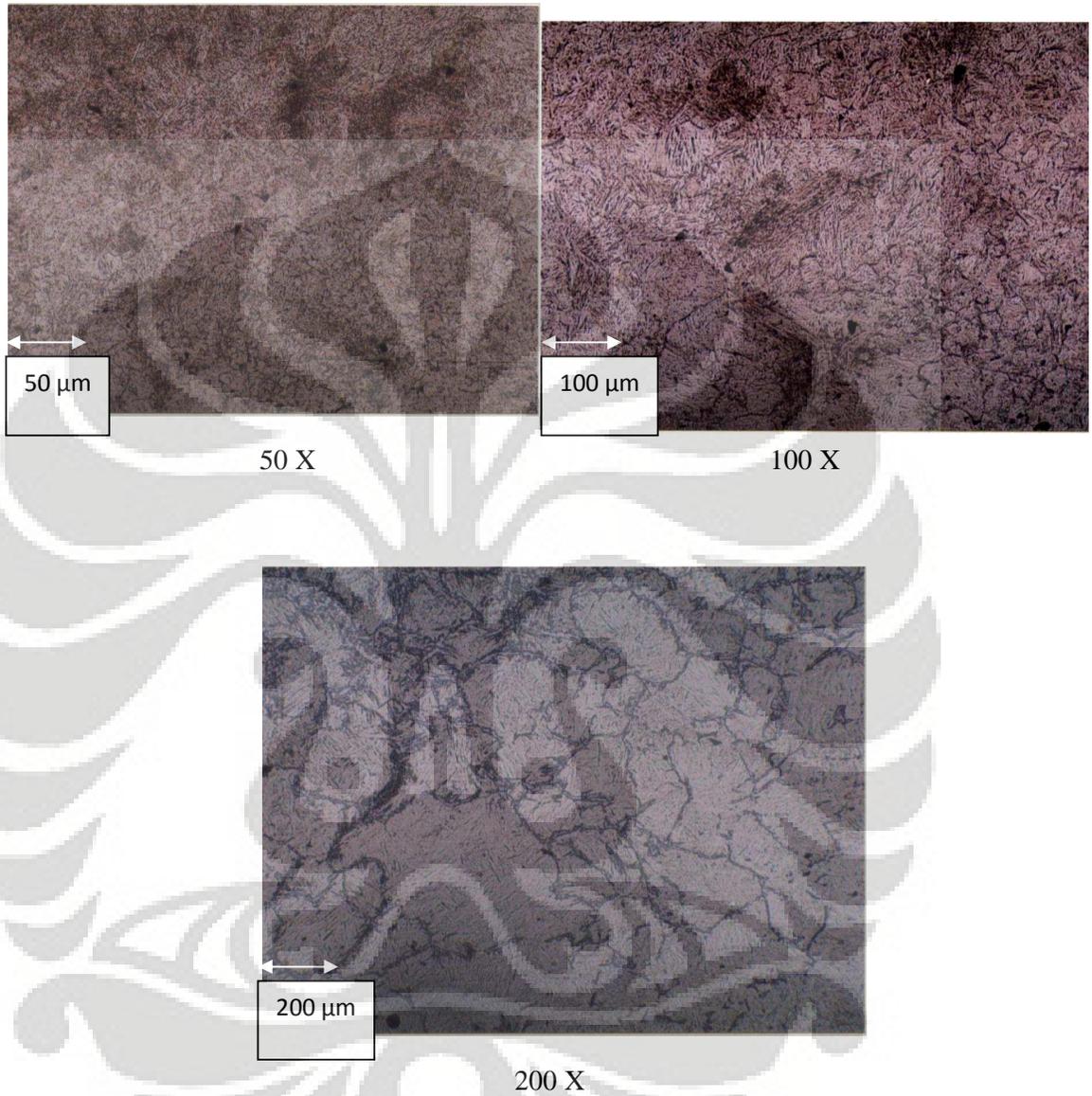
50 X

100 X



200 X

Kecepatan Pendinginan 12 K/S



Kecepatan Pendinginan 9,5 K/S

