



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PERMODELAN KINETIKA PERTUMBUHAN BUTIR BAJA HSLA  
0,019 %Nb PADA KONDISI NON-ISOTERMAL SETELAH  
PROSES CANAI PANAS**

**SKRIPSI**

**TRI WAHYU SULISTYO  
0405040686**

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



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PERMODELAN KINETIKA PERTUMBUHAN BUTIR BAJA  
HSLA 0,019 % Nb PADA KONDISI NON-ISOTERMAL  
SETELAH PROSES CANAI PANAS**

**SKRIPSI**

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

**TRI WAHYU SULISTYO  
0405040686**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI METALURGI DAN MATERIAL  
KEKHUSUSAN LOGAM  
DEPOK  
JULI 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 : Tri Wahyu Sulistyo  
NPM : 0405040686  
Tanda Tangan :  
Tanggal : 7 Juli 2009



## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Tri Wahyu Sulistyو  
NPM : 0405040686  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul Skripsi : Permodelan Kinetika Pertumbuhan Butir Baja  
HSLA 0,019 % Nb pada Kondisi Non-Isotermal Setelah Proses Canai Panas

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

### DEWAN PENGUJI

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

Penguji 1 : Dr. Ir. Dedi Priadi, DEA (.....)

Penguji 2 : Ir. Rini Riastuti, M.S (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 7 Juli 2009

## KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Metalurgi dan Material pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai 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 yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- (2) orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan baik moral maupun material; dan
- (3) sahabat 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 metalurgi dan material ke depan.

Depok, Juli 2009

Penulis

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

---

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

Nama : Tri Wahyu Sulistyو  
NPM : 0405040686  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Departemen : Teknik Metalurgi dan Material  
Fakultas : Teknik  
Jenis Karya : Skripsi

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

Permodelan Kinetika Pertumbuhan Butir Baja HSLA 0,019 % Nb pada Kondisi  
Non-Isotermal Setelah Proses Canai Panas

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya tanpa meminta izin dari 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: 7 Juli 2009  
Yang menyatakan

(Tri Wahyu Sulistyو)

## ABSTRAK

Nama : Tri Wahyu Sulistyio  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul : Permodelan Kinetika Pertumbuhan Butir Baja HSLA 0,019 % Nb pada Kondisi Non-Isotermal Setelah Proses Canai Panas

Kebutuhan akan baja dengan kombinasi sifat mekanis yang baik, yaitu antara lain kekuatan yang tinggi, ketangguhan, mampu las, dan ketahanan korosi yang baik semakin meningkat. Untuk itu dikembangkan baja paduan ringan, yaitu dengan penambahan sejumlah kecil (0,15 %) unsur paduan tertentu yang menghasilkan sifat mekanis yang baik melalui penguatan presipitat dan penghalusan butir.

Penghalusan butir dapat diperoleh melalui proses canai, dengan memperhitungkan besar butir awal pada pemanasan sebelum canai dan kinetika rekristalisasi serta pertumbuhan butir setelah rekristalisasi, yang terjadi setelah proses canai.

Benda uji yang digunakan yaitu baja HSLA 0,019 %Nb hasil coran kontinu, yang dipanaskan pada temperatur 1200 °C dengan variasi kecepatan pendinginan yang akan menghasilkan besar butir akhir yang berbeda. Data ukuran butir ini digunakan untuk memodifikasi persamaan kinetika pertumbuhan butir isotermal Sellars.

Persamaan Sellars, dimodifikasi dengan penambahan variabel kecepatan pendinginan dan penyesuaian konstanta, sehingga dihasilkan persamaan kinetika pertumbuhan butir dalam keadaan non-isotermal / kontinu. Untuk baja HSLA 0,019 %Nb, didapat penyesuaian konstanta B sebesar  $1 \times 10^{14}$ , dan nilai m untuk variabel kecepatan pendinginan sebesar 14.

Kata kunci:

Baja HSLA-Nb, Pertumbuhan Butir Non-Isotermal, Kinetika Pertumbuhan Butir Sellars, Permodelan.

## ABSTRACT

Name : Tri Wahyu Sulistyio  
Major : Metallurgical and Materials Engineering  
Title : Grain Growth Kinetic Modelling of HSLA 0,019 %Nb Steel on Non-Isothermal Condition After Hot Rolling Process

The need of steel with good mechanical properties combination, i.e. strength, toughness, weldability and corrosion resistant, is increasing. For that reasons, microalloyed steels are developed by adding small number of alloying element. This alloying element improve mechanical properties by precipitation hardening and grain size reduction.

Grain size reduction can be achieved by rolling process. Attention needed on grain size when reheated before rolling, recrystallization and grain growth kinethics after rolling.

HSLA-Nb steels product of continuous casting is used for this research. The steel is reheated at 1200 °C, hot rolled and slowly cooled by variation of cooling rate, that will give different grain size. This grain size data can be used to modificate Sellars' equation on grain growth kinetic.

Sellars' equation modified by adding of cooling rate variable and adjustment of constant to make grain growth kinetic equation on non-isothermal condition. For HSLA 0,019 %Nb steels, the adjustment of B constant is  $1 \times 10^{14}$ , and m value for cooling rate variable is 14.

Key words :

HSLA-Nb Steel, Continuous Grain Growth, Sellars' Grain Growth Kinetic, Modelling.

## DAFTAR ISI

|  |      |
|--|------|
| HALAMAN JUDUL .....  | i    |
| LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN.....  | ii   |
| LEMBAR PENGESAHAN .....  | iii  |
| KATA PENGANTAR .....   | iv   |
| LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....                               | v    |
| ABSTRAK.....   | vi   |
| DAFTAR ISI.....  | viii |
| DAFTAR GAMBAR .....  | x    |
| DAFTAR TABEL.....  | xii  |
| DAFTAR LAMPIRAN.....   | xiii |
| BAB 1. PENDAHULUAN .....   | 1    |
| 1.1 Latar Belakang Penelitian .....  | 1    |
| 1.2 Tujuan Penelitian .....  | 2    |
| 1.3 Ruang Lingkup Penelitian.....  | 2    |
| 1.3.1 Material .....   | 2    |
| 1.3.2 Parameter Penelitian .....   | 3    |
| 1.3.3 Tempat Penelitian .....  | 3    |
| BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA .....  | 4    |
| 2.1 Baja HSLA.....   | 4    |
| 2.2 Baja HSLA-Nb.....  | 8    |
| 2.3 Mekanisme Penguatan Baja HSLA – Nb.....                                  | 9    |
| 2.3.1 Penguatan Presipitat.....  | 9    |
| 2.3.2 Penghalusan Butir Ferit.....   | 10   |
| 2.4 Proses Termomekanik.....   | 13   |
| 2.5 Proses Canai Panas .....   | 14   |
| 2.6 Pertumbuhan Butir Austenit pada Kondisi Isotermal .....                  | 17   |
| 2.7 Proses <i>Recovery</i> , Rekristalisasi, dan Pertumbuhan Butir .....     | 20   |
| 2.7.1 Proses <i>Recovery</i> .....   | 20   |
| 2.7.2 Rekristalisasi .....   | 22   |
| 2.7.3 Pertumbuhan Butir .....  | 23   |
| BAB 3. METODE PENELITIAN .....   | 25   |
| 3.1 Bahan Penelitian .....   | 25   |
| 3.2 Prosedur Penelitian .....  | 25   |
| 3.2.1 Pembuatan Benda Uji .....  | 26   |
| 3.2.2 Proses Pemanasan .....   | 26   |
| 3.2.3 Proses Canai Panas .....   | 27   |
| 3.2.4 Pendinginan .....  | 27   |
| 3.2.5 Preparasi, Pengujian Metalografi dan Pengamatan<br>Mikrostruktur ..... | 27   |
| 3.2.6 Penghitungan Besar Butir Austenit.....                                 | 28   |
| 3.3 Metodologi Penelitian .....  | 29   |
| BAB 4. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN .....                                 | 30   |
| 4.1 Foto Mikro dan Grafik Akuisisi.....                                      | 30   |
| 4.2 Penghitungan Ukuran Butir Austenit.....                                  | 33   |

|   |    |
|---|----|
| 4.3 Hubungan antara Kecepatan Pendinginan dan Uukuran Butir Austenit .....                    | 35 |
| 4.4 Perbandingan Pertumbuhan Butir Austenit dalam Keadaan Isotermal dengan Non-Isotermal..... | 35 |
| 4.5 Penyesuaian Persamaan untuk Kondisi Non-Isotermal .....                                   | 37 |
| 4.6 Perbandingan Model Persamaan dengan Penelitian Lain .....                                 | 40 |
| BAB 5. KESIMPULAN.....  | 42 |
| DAFTAR REFERENSI .....  | 43 |
| LAMPIRAN.....   | 45 |



## DAFTAR GAMBAR

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Gambar 1    | <i>Thermomechanical Control Process</i> .....   | 2  |
| Gambar 2.1  | Kelarutan beberapa <i>carbonitride</i> dalam austenit .....   | 6  |
| Gambar 2.2  | Pengaruh ukuran partikel niobium karbida terhadap <i>yield strength</i> .   | 8  |
| Gambar 2.3  | Hubungan dislokasi dan partikel presipitat. (a) Dislokasi meluncur pada slip plane dan memotong partikel. (b) Dislokasi mengelilingi partikel ..... | 9  |
| Gambar 2.4  | Pengaruh berbagai unsur paduan terhadap ukuran butir ferit .....  | 10 |
| Gambar 2.5  | Profil <i>time-temperature</i> untuk pengerolan terkendali .....  | 11 |
| Gambar 2.6  | Evolusi ukuran butir selama deformasi pada pengerolan terkendali konvensional dan rekristalisasi .....  | 12 |
| Gambar 2.7  | Pengendapan dan kelarutan <i>Vanadium</i> dan <i>Niobium Carbide</i> pada austenit .....  | 12 |
| Gambar 2.8  | Perubahan mikrostruktur selama <i>Thermomechanical Processing</i> ...   | 13 |
| Gambar 2.9  | Ilustrasi Tegangan Pada Proses Canai .....  | 15 |
| Gambar 2.10 | Ilustrasi Pertumbuhan Butir saat Canai Panas .....  | 16 |
| Gambar 2.11 | Skematis pengerolan pada <i>Thermomechanical Processing</i> .....   | 16 |
| Gambar 2.12 | Pergerakan batas butir .....  | 17 |
| Gambar 2.13 | Pengaruh partikel fasa kedua pada pertumbuhan butir .....   | 18 |
| Gambar 2.14 | Pertumbuhan butir austenit vs waktu pada temperatur konstan.....  | 18 |
| Gambar 2.15 | Proses Pertumbuhan butir sejalan peningkatan waktu (menit) .....  | 20 |
| Gambar 2.16 | Skematis Proses Recovery, Rekristalisasi dan Pertumbuhan Butir..  | 21 |
| Gambar 2.17 | Pembentukan Sub-butir.....  | 21 |
| Gambar 2.18 | Perbandingan Antara Rekristalisasi Dinamik dan Statik .....   | 23 |
| Gambar 3.1  | Ilustrasi benda uji dan pemasangan termokopel .....   | 26 |
| Gambar 3.2  | Diagram Alir Penelitian .....   | 29 |
| Gambar 4.1  | Foto Mikro dan Grafik Akuisisi Sampel A .....   | 30 |
| Gambar 4.2  | Foto Mikro dan Grafik Akuisisi Sampel B .....   | 31 |
| Gambar 4.3  | Foto Mikro dan Grafik Akuisisi Sampel C .....   | 31 |
| Gambar 4.4  | Foto Mikro dan Grafik Akuisisi Sampel D.....  | 32 |
| Gambar 4.5  | Foto Mikro dan Grafik Akuisisi Sampel E .....   | 32 |

|   |    |
|---|----|
| Gambar 4.6 Foto Mikro dan Grafik Akuisisi Sampel F .....                            | 33 |
| Gambar 4.7 Hubungan Antara Kecepatan Pendinginan dengan Ukuran Butir Austenit ..... | 34 |
| Gambar 4.8 Ilustrasi Variabel untuk Pendinginan dalam Keadaan Kontinu .....         | 35 |
| Gambar 4.9 Perbandingan Hasil Percobaan dengan Model Persamaan .....                | 38 |
| Gambar 4.10 Hasil Penyesuaian Model Persamaan .....                                 | 39 |
| Gambar 4.11 Perbandingan Model Persamaan dengan Penelitian Lain .....               | 40 |



## DAFTAR TABEL

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Tabel 1.1 | Komposisi kimia baja HSLA-Nb dalam persen berat .....             | 2  |
| Tabel 3.1 | Komposisi kimia baja HSLA-Nb dalam persen berat .....             | 25 |
| Tabel 4.1 | Penghitungan Ukuran Butir Austenit.....                           | 33 |
| Tabel 4.2 | Data Hasil Percobaan.....   | 37 |
| Tabel 4.3 | Simulasi Persamaan Non-Isotermal.....                             | 38 |
| Tabel 4.4 | Perbandingan Komposisi Baja dari Penelitian dalam Persen Berat... | 40 |



## DAFTAR LAMPIRAN

|            |                                       |    |
|------------|---------------------------------------|----|
| Lampiran 1 | CONTOH PENGHITUNGAN UKURAN BUTIR..... | 45 |
| Lampiran 2 | FOTO MIKRO .....                      | 48 |
| Lampiran 3 | PERALATAN PENDUKUNG .....             | 55 |



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang Penelitian

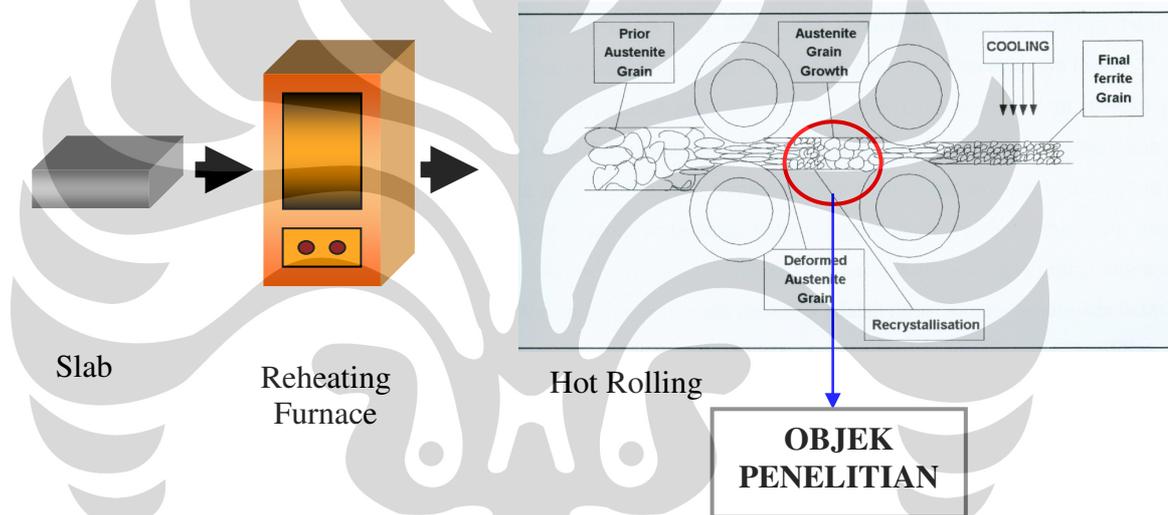
Selama beberapa dekade, material baja yang memiliki kekuatan tinggi masih menjadi kebutuhan. Seiring dengan berkembangnya teknologi, perkembangan industri baja di Indonesia juga cukup pesat. Dengan adanya kemajuan tersebut, produk baja diharapkan mampu bertahan dalam dunia industri serta berkompetisi dengan material rekayasa lain. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut, dikembangkan baja yang memiliki sifat mekanis yang baik dengan biaya produksi yang rendah.

Baja paduan rendah dengan kekuatan tinggi atau biasa disebut dengan HSLA (*High Strength Low Alloy*) dapat menjadi solusi dari permasalahan tersebut. Baja HSLA memiliki keunggulan seperti kekuatan luluh dan keuletan yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan baja karbon. Hal ini disebabkan oleh penambahan sejumlah kecil ( $<0,15\%$ ) unsur-unsur paduan tertentu pada baja menghasilkan sifat mekanik yang baik melalui penguatan presipitat dan penghalusan butir. Sifat-sifat inilah yang membuat baja ini biasa diaplikasikan pada bidang konstruksi maupun otomotif.

Keunggulan sifat yang dimiliki baja HSLA antara lain dipengaruhi oleh ukuran butir serta unsur-unsur paduan. Untuk mendapatkan baja HSLA dengan sifat mekanis yang baik, dikembangkan baja HSLA-Nb. Penambahan Niobium (Nb) pada baja mampu meningkatkan kekuatan luluh baja HSLA melalui mekanisme penguatan presipitat dan penghalusan butir ferit. Penambahan Cu bertujuan untuk meningkatkan ketahanan korosi atmosferik. Sedangkan penambahan Ni akan menurunkan kekerasan yang disebabkan karena terbentuknya fasa kedua akibat penambahan tembaga.

Mikrostruktur juga memengaruhi sifat mekanik dari baja. Oleh karena itu, biasanya dilakukan pengontrolan terhadap mikrostruktur pada saat proses pemanasan awal, canai panas, serta pendinginan yang dikenal dengan nama *Thermomechanical Control Process* (TMCP). Dengan proses ini diharapkan tercapai mikrostruktur yang diinginkan yaitu ukuran butir austenit yang halus.

Parameter yang digunakan untuk mengontrol besar butir austenit pada proses TMCP meliputi temperatur dan waktu tahan saat *reheating*, besar deformasi canai panas, waktu tahan sebelum pendinginan, serta kecepatan pendinginan akhir. Pada proses canai panas, setelah deformasi, material akan mengalami *recovery*, rekristalisasi dan akhirnya pertumbuhan butir. Prediksi pertumbuhan butir pada proses canai panas dilakukan oleh peneliti terdahulu dengan mengambil kondisi isothermal (kondisi *reheating*). Penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan persamaan pertumbuhan butir austenit selama canai panas pada kondisi yang sesungguhnya (kondisi non-isothermal).



**Gambar 1.** *Thermomechanical Control Process*

## 1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai melalui penelitian ini adalah untuk memperoleh hubungan antara besar butir austenit dengan laju pendinginan baja HSLA-Nb setelah canai panas sehingga didapatkan persamaan kinetika pertumbuhan butir austenit selama canai panas pada kondisi non-isothermal.

## 1.3 Ruang Lingkup

### 1.3.1 Material

Baja HSLA dengan komposisi sebagai berikut.

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

| Komposisi | 1A1808AN | Komposisi | 1A1808AN |
|-----------|----------|-----------|----------|
| Ti        | 0,001    | Cu        | 0,032    |
| C         | 0,165    | Nb        | 0,019    |
| Si        | 0,007    | V         | 0,005    |
| Mn        | 0,664    | Ni        | 0,021    |
| P         | 0,005    | Cr        | 0,013    |
| S         | 0,005    | N         | 0,033    |
| Al        | 0,037    |           |          |

### 1.3.2 Parameter Penelitian

1. Pemanasan isothermal (*reheating*) dengan variabel sebagai berikut :
  - a. Temperatur : 1200°C
  - b. Waktu tahan : 30 menit
2. Proses canai panas dengan deformasi 40%.
3. Kecepatan pendinginan kontinu 7,5; 7,7; 7,8; 8; 8,1; 9 °C/s.

### 1.3.3 Tempat Penelitian

1. Proses canai panas dilakukan di Laboratorium Metalurgi Mekanik Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
2. Pengamatan mikrostruktur dilakukan di Laboratorium Metalurgi Fisik dan Laboratorium Metalografi dan HST Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Baja HSLA

Menurut *American Society for Metals*<sup>[1]</sup>, baja HSLA merupakan jenis baja yang memiliki kandungan karbon rendah (*low carbon steel*) serta unsur paduan yang sangat rendah (umumnya 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 dibandingkan dengan 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 sifat kemampuan pembentukan dan kemampuan 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 pengendalian akan meningkatkan kekuatan luluh, ketangguhan, serta memperbaiki sifat mampu las. Proses termomekanik untuk material ini meliputi pemanasan slab hingga 1260 °C, dilanjutkan pengerjaan panas hingga 815 °C dan didinginkan hingga 650 °C.

Baja HSLA dapat dibagi menjadi 7 kategori sebagai berikut<sup>[1]</sup>:

1. *Weathering Steel*, yaitu baja HSLA yang mengandung sejumlah kecil unsur paduan seperti tembaga dan fosfor yang berfungsi untuk meningkatkan ketahanan korosi atmosferik 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 karbon–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 (Za), 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:

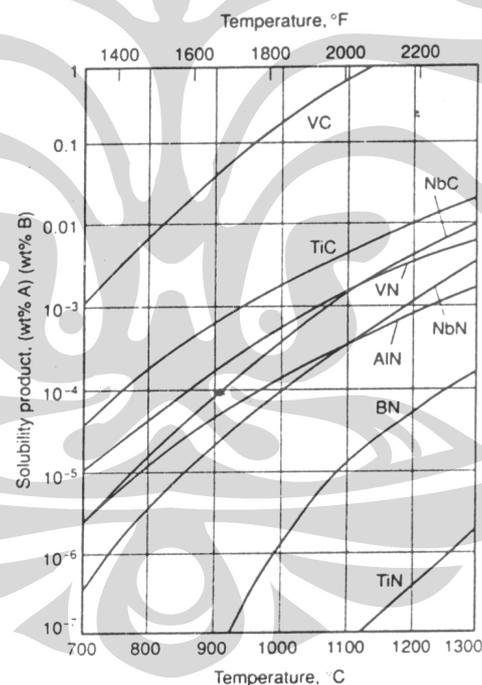
1. Karbon (C)

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 ukuran butir ferit yang halus hasil dari pengerolan terkendali (*controlled rolling*) serta adanya unsur paduan mikro (*microalloyed*) khususnya Niobium<sup>[1]</sup>. 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 2.1.** Kelarutan beberapa *carbonitride* dalam austenit<sup>[1]</sup>

## 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 0,35%. Silikon mempunyai pengaruh yang cukup signifikan dalam penguatan larutan padat (*solid solution strengthening*).

#### 5. Tembaga (Cu)

Penambahan tembaga lebih dari 0,5% 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)

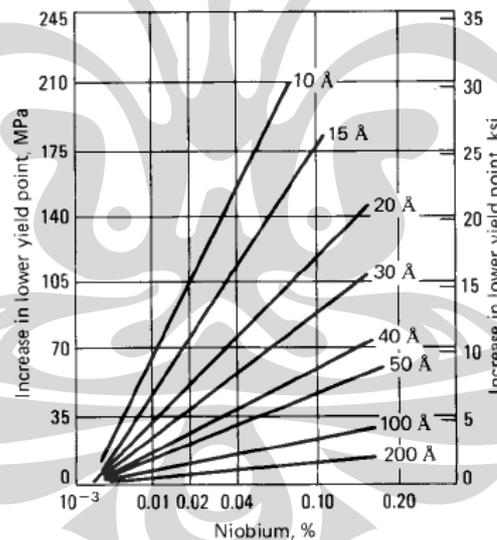
Vanadium berfungsi untuk meningkatkan kekuatan dari baja HSLA dengan mekanisme penguatan presipitat pada ferit serta memperhalus ukuran butir ferit.

## 11. Titanium (Ti)

Titanium berfungsi untuk penguatan presipitat serta mengontrol bentuk sulfida. Penambahan sejumlah kecil titanium (kurang dari 0,025%) dapat membatasi pertumbuhan butir austenit.

### 2.2 Baja HSLA – Nb

Baja HSLA-Nb termasuk 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*. Pengaruh ukuran terhadap kekuatan dapat dilihat pada Gambar 2.2.



**Gambar 2.2.** Pengaruh ukuran partikel niobium karbida terhadap *yield strength*<sup>[1]</sup>

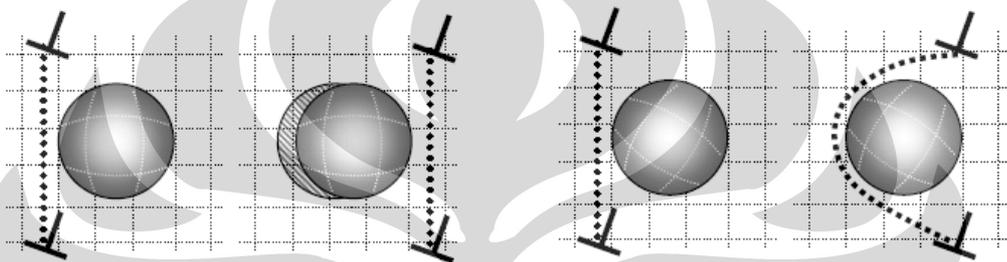
Penggunaan unsur paduan niobium dalam jumlah yang sangat kecil (*microalloyed*) lebih baik dibandingkan dengan vanadium sebab niobium dapat memberikan efek penguatan presipitat sekaligus penghalusan butir. Tiap penambahan 0,01% niobium akan meningkatkan kekuatan sebesar 35 - 40 MPa. Peningkatan kekuatan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

menghasilkan struktur *Widmanstätten ferrite*, yang akan mengurangi ketangguhan<sup>[1]</sup>.

## 2.3 Mekanisme Penguatan Baja HSLA – Nb

### 2.3.1 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<sup>[2]</sup>.



**Gambar 2.3.** Hubungan dislokasi dan partikel presipitat. (a) Dislokasi meluncur pada slip plane dan memotong partikel. (b) Dislokasi mengelilingi partikel<sup>[3]</sup>

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. Pada temperatur pemanasan  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Nb pada baja HSLA akan larut pada fasa austenit dan kemudian pada saat pendinginan akan membentuk presipitat  $Nb(CN)$ . Presipitat  $Nb(CN)$  inilah yang disebut *carbonitride*, sejenis karbida yang dapat menghalangi pergerakan dislokasi di batas butir sehingga akan terjadi penguatan pada baja HSLA.

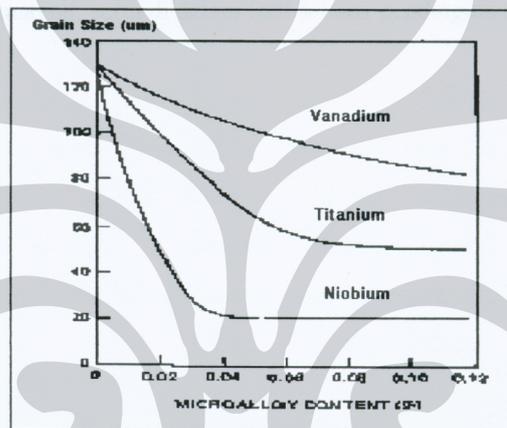
Irvine<sup>[4]</sup> menemukan temperatur kelarutan presipitat  $Nb(CN)$  melalui persamaan:

$$\log(Nb) \left( C + \frac{12}{14} N \right) = 2,26 - \frac{6770}{T} \quad (2.1)$$

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).

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 *carbonitride*-nya.

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 ferit yang halus.



**Gambar 2.4.** Pengaruh berbagai unsur paduan terhadap ukuran butir ferit<sup>[5]</sup>

### 2.3.2 Penghalusan Butir Ferit

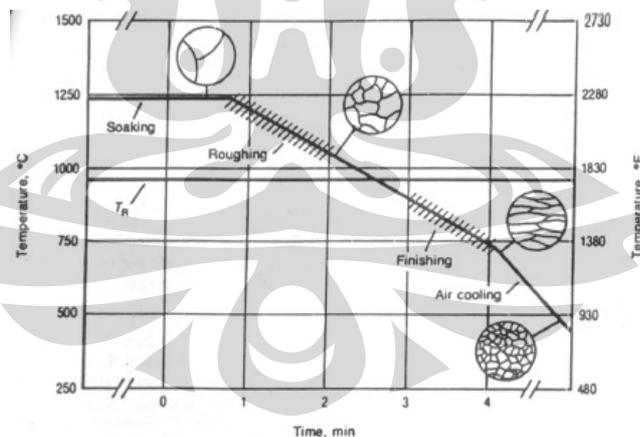
Ferit pada baja HSLA dapat ditingkatkan kekuatannya dengan penghalusan butir. Penghalusan butir ini didapat melalui tiga langkah yaitu pemanasan (*reheating*), canai panas, dan pendinginan (*cooling*), termasuk:

- 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 ferit dengan ukuran butir yang halus
- Menambahkan paduan atau pendinginan cepat untuk menurunkan temperatur transformasi austenit-ferit

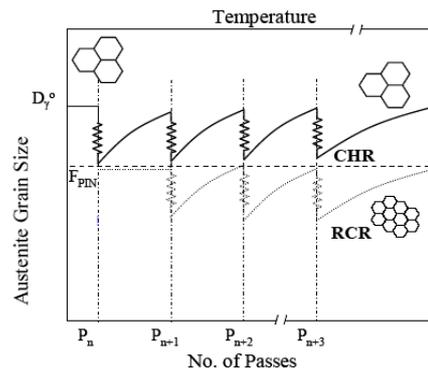
Pengerolan terkendali merupakan metode dimana pada masing-masing langkah pengerolan dilakukan kontrol temperatur, dengan jumlah reduksi pada masing-masing *pass* dan temperatur akhir telah diperhitungkan. Penggunaan pengerolan terkendali dapat meningkatkan kekuatan dan ketangguhan serta mengurangi kandungan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

- 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.

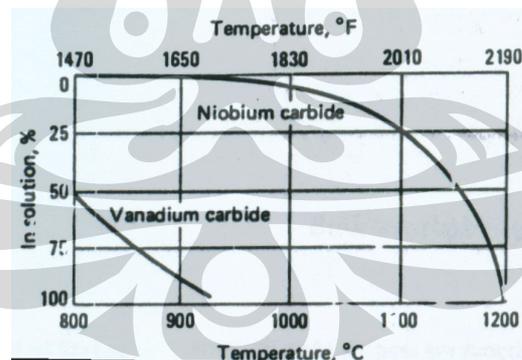


**Gambar 2.5.** Profil *time-temperature* untuk pengerolan terkendali<sup>[1]</sup>



**Gambar 2.6.** Evolusi ukuran butir selama deformasi pada pengerolan terkendali konvensional dan rekristalisasi<sup>[3]</sup>

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.



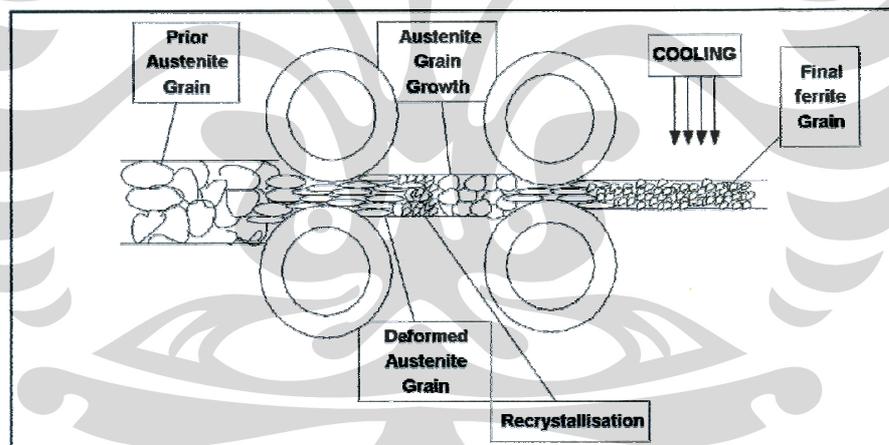
**Gambar 2.7.** Pengendapan dan kelarutan *Vanadium* dan *Niobium Carbide* pada austenit<sup>[1]</sup>

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<sup>[5]</sup>.

## 2.4 Proses Termomekanik

Proses termomekanik merupakan suatu proses untuk mengontrol mikrostruktur suatu material selama proses pembuatannya untuk menghasilkan sifat mekanis yang baik. Secara umum, proses termomekanik terdiri dari proses pemanasan awal (*reheating*), canai panas (*hot rolling*), serta pendinginan (*cooling*)<sup>[6]</sup>. Proses pemanasan ini sangat penting dalam menghasilkan sifat mekanis benda jadi sebab melalui pemanasan awal dapat diprediksi mikrostruktur akhir yang terbentuk.

Pengontrolan butir austenit terjadi saat proses pemanasan awal. Hal yang memengaruhi pertumbuhan besar butir austenit yaitu temperatur *reheating* dan waktu tahan. Makin tinggi temperatur, maka ukuran butir menjadi semakin besar. Begitu juga halnya waktu tahan, makin lama waktu tahan, maka besar butir austenit 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.



**Gambar 2.8.** Perubahan mikrostruktur selama *Thermomechanical Processing*<sup>[7]</sup>

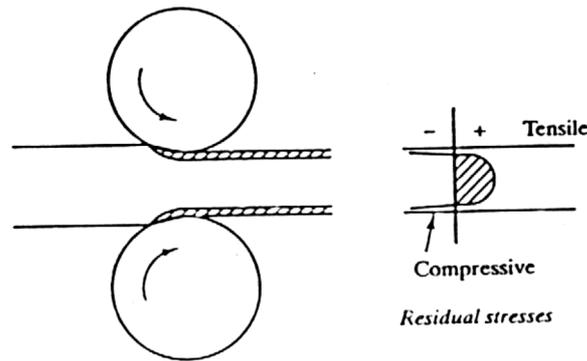
Pengontrolan butir austenit selanjutnya terjadi setelah proses canai panas, yaitu pada saat interval waktu antara canai panas pertama dan kedua, atau interval waktu antara canai panas dengan pendinginan, akan memberikan kesempatan pada butir austenit untuk mengalami *recovery*, rekristalisasi dan bahkan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

## 2.5 Proses Canai Panas

Proses canai adalah suatu proses kompresi tidak langsung. Gaya atau tegangan yang digunakan adalah tekanan radial dari canai itu sendiri. Tekanan ini akan mendeformasi material dan menarik material melalui celah (*gap*) canai. Proses ini dapat dibandingkan dengan proses kompresi atau tempa, hanya saja berlangsung secara kontinu. Proses canai ini paling banyak digunakan dan oleh karena itu banyak sekali variasi yang dipergunakan. Biasanya tergantung pada pengaturan dari canai pada *mills* atau pengaturan *stands* untuk canai<sup>[8]</sup>.

Proses canai panas sebenarnya adalah proses canai dengan temperatur diatas temperatur rekristalisasi dari material. Oleh karena itu, regangan yang terjadi karena proses deformasi material akan dihilangkan oleh proses rekristalisasi<sup>[9]</sup>.

Regangan yang terjadi pada proses deformasi material akan menghasilkan tegangan sisa atau *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 permukaan material benda kerja akan berusaha mengembang, sedangkan lapisan dalam material akan mencegah pengembangan lapisan diatasnya. 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 2.9. Tegangan–tegangan inilah yang dikenal dengan tegangan sisa. Tegangan sisa sangat berpengaruh pada sifat – sifat material dan kinerja dari material itu sendiri.

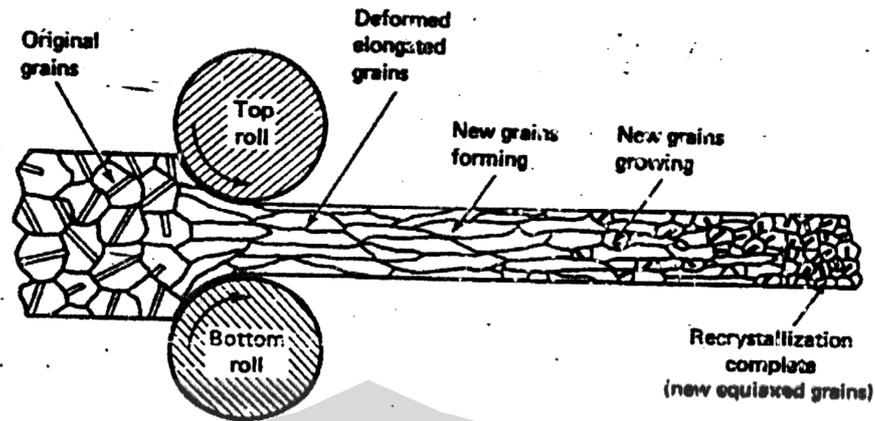


**Gambar 2.9.** Ilustrasi Tegangan Pada Proses Canai<sup>[9]</sup>

Secara umum, diperlukan 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*<sup>[9]</sup>.

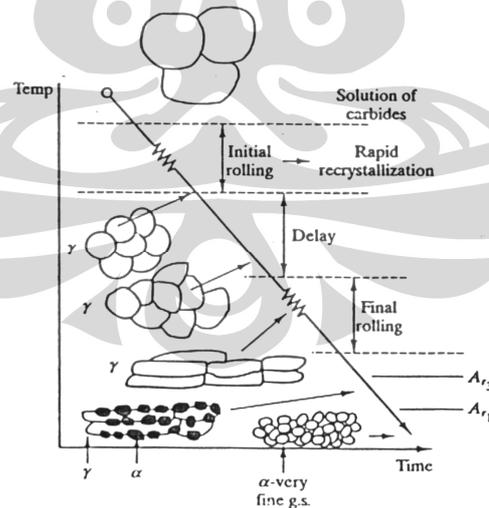
Proses canai panas merupakan suatu proses dimana proses deformasi langsung diimbangi dengan proses perlakuan panas, sehingga tidak terjadi tegangan sisa. Yang terjadi adalah proses pembentukan dislokasi dan rekristalisasi, sehingga akan didapat material dengan sifat dan kinerja yang relatif lebih baik<sup>[10]</sup>.

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 muncul. Sedangkan jika temperatur akhir dibawah temperatur rekristalisasi, akan terjadi pengerasan regangan (*strain hardening*). Gambar 2.10. menunjukkan ilustrasi dari pertumbuhan butir pada saat dilakukan proses canai panas.



**Gambar 2.10.** Ilustrasi Pertumbuhan Butir saat Canai Panas

Pada temperatur diatas temperatur rekristalisasi, material akan menjadi lebih lunak dan lebih ulet dibandingkan pada tempeatur 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 *thermomechanical processing*, biasanya canai panas merupakan tahap pertama yang nantinya akan diteruskan dengan proses canai dingin. Skematis dari *thermomechanical processing* dapat dilihat pada Gambar 2.11.

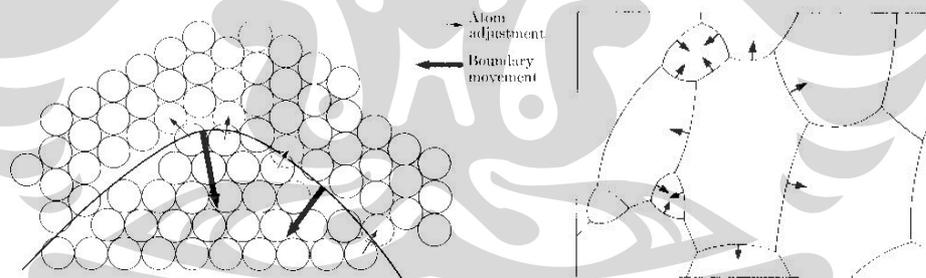


**Gambar 2.11.** Skematis pengerolan pada Thermomechanical Processing<sup>[9]</sup>

## 2.6 Pertumbuhan Butir Austenit pada Kondisi Isotermal

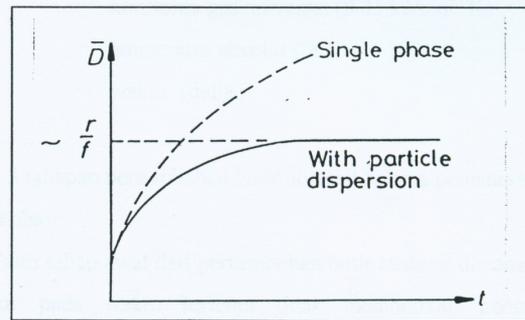
Pertumbuhan butir terjadi karena adanya pembesaran butir tertentu dan terdifusinya butir yang lebih kecil. Batas butir memiliki atom-atom dengan energi bebas yang lebih tinggi daripada atom-atom yang terdapat dalam butir. Agar tercapai kondisi yang stabil, maka atom-atom pada batas butir mengurangi energi 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 ( $Q$ )<sup>[2]</sup>. 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<sup>[11]</sup>.



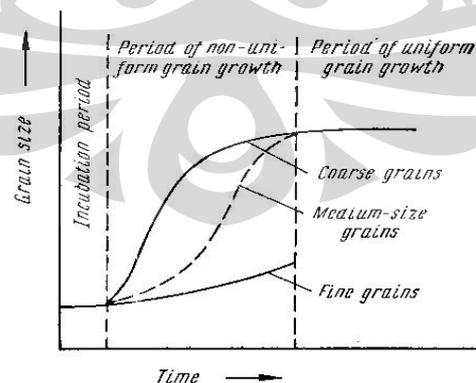
**Gambar 2.12.** Pergerakan batas butir<sup>[11]</sup>

Butir austenit muncul secara langsung begitu terjadi proses transformasi dari perlit ke austenit. Ukurannya tergantung pada jumlah inti yang terbentuk sesuai waktu dan kecepatan pertumbuhan. Semakin banyak fasa karbida yang tersebar semakin kecil ukuran austenit<sup>[6]</sup>.



**Gambar 2.13.** Pengaruh partikel fasa kedua pada pertumbuhan butir<sup>[12]</sup>

Butir austenit biasanya sangat kecil ( $500\text{-}1000\ \mu\text{m}^2$ ) 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 2.14.** Pertumbuhan butir austenit vs waktu pada temperatur konstan<sup>[6]</sup>

Untuk menentukan ukuran butir austenit selama pertumbuhan normal dibawah kondisi anil isothermal dapat digunakan persamaan yang dihasilkan dari percobaan Beck<sup>[13]</sup>, yaitu:

$$d^n - d_0^2 = C \cdot t \quad (2.2)$$

dimana  $d$  merupakan diameter butir akhir,  $d_0$  diameter butir awal,  $t$  waktu anil,  $n$  dan  $C$  konstanta yang tergantung dari komposisi paduan dan temperatur anil.

Sebelumnya Sellars dkk<sup>[13]</sup> telah menganalisa data pertumbuhan butir pada baja C-Mn dan dapat menemukan persamaan untuk menghitung nilai konstanta  $C$  diatas, yaitu:

$$d^n - d_0^n = \left[ A \exp\left(\frac{-Q_{gg}}{RT}\right) \right] \cdot t \quad (2.3)$$

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.

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<sup>[5]</sup>:

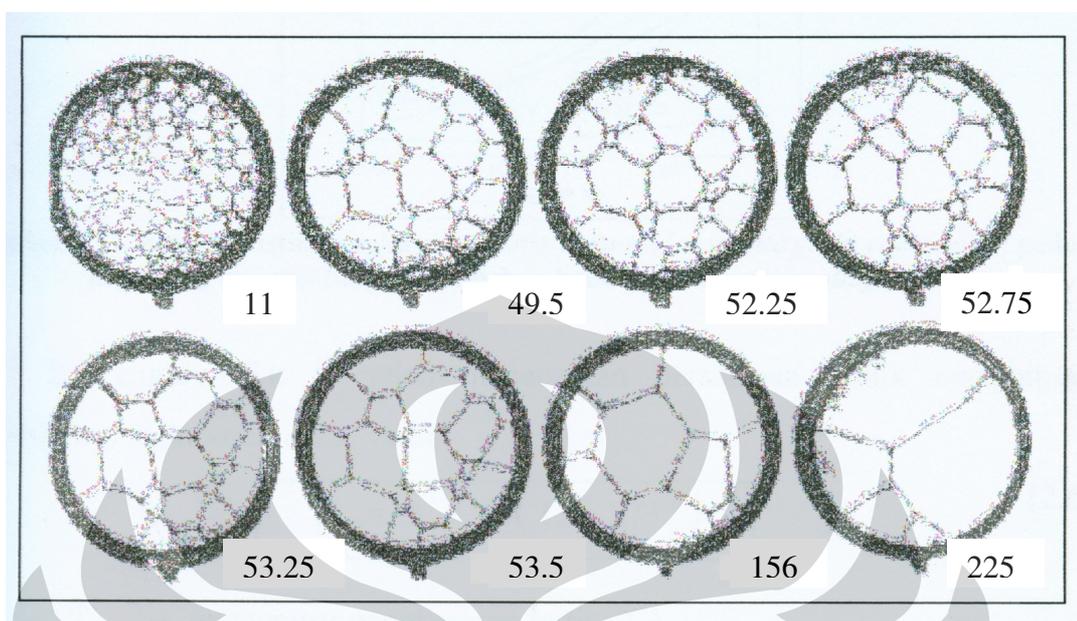
$$t = \frac{l^2}{D} \quad (2.4)$$

dimana  $l$  adalah jarak antar butir,  $D$  koefisien difusi, dan  $t$  adalah waktu. Nilai  $D$  ditentukan melalui persamaan Arrhenius<sup>[5]</sup>:

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (2.5)$$

dimana  $D$  koefisien difusi,  $D_0$  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.

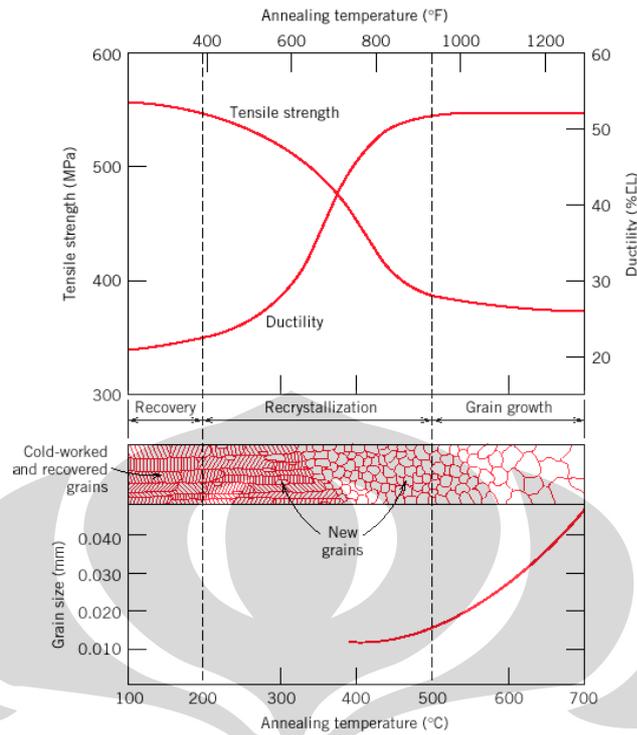


**Gambar 2.15.** Proses Pertumbuhan butir sejalan peningkatan waktu (menit)<sup>[12]</sup>

## 2.7 Proses *Recovery*, Rekrystalisasi, dan Pertumbuhan Butir

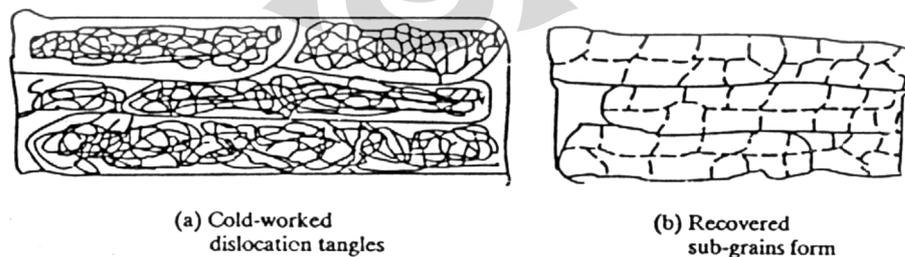
### 2.7.1. Proses *Recovery*

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 2.16. Perubahan mikrostruktur dari material selama *recovery* 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.



**Gambar 2.16.** Skematis Proses Recovery, Rekrystalisasi dan Pertumbuhan Butir<sup>[14]</sup>

Perubahan mikrostruktural ini akan melepas sebagian besar tegangan dalam dan tahapan *recovery* ini dipergunakan untuk proses *stress-relieving*. Hilangnya beberapa dislokasi mengakibatkan berkurangnya kekuatan dari material, tetapi hilangnya dislokasi ini diimbangi dengan pembentukan sub-butir, yaitu butir dengan batas butir bersudut kecil ( $2 - 3^\circ$  misorientasi). Proses ini dapat dilihat pada Gambar 2.17. Dari kedua efek yang dijelaskan tersebut didapat kekuatan material yang sama setelah dilakukan pengerjaan dingin<sup>[15]</sup>.



**Gambar 2.17.** Pembentukan Sub-butir

### 2.7.2. Rekrystalisasi

Ketika tahap *recovery* akan berakhir, pembentukan inti dari butir baru akan mulai terjadi. Seperti halnya proses solidifikasi, rekrystalisasi 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.

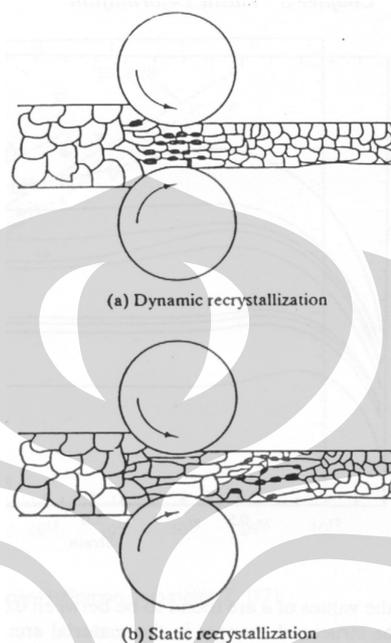
Ketika semua butir terdahulu yang telah digantikan oleh butir baru yang bebas regangan, maka dapat dikatakan material tersebut telah terekristalisasi dengan sempurna (*fully recrystallized*). Seperti telah dijelaskan bahwa gaya penggerak untuk proses rekrystalisasi adalah energi yang tersimpan saat pengerjaan dingin, maka jika pengerjaan dinginnya tinggi, semakin kecil energi termal yang digunakan, berarti semakin rendah temperatur dari rekrystalisasi. 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 rekrystalisasi 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 tahan dan komposisi dari material. Ini didasarkan pada hukum rekrystalisasi<sup>[9]</sup>:

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

Dalam pengerjaan panas, proses rekrystalisasi yang terjadi dapat dibagi menjadi dua, yaitu rekrystalisasi dinamis dan rekrystalisasi statis. Seperti telah dijelaskan bahwa canai panas adalah proses deformasi dan rekrystalisasi 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 2.18.



**Gambar 2.18.** Perbandingan Antara Rekristalisasi Dinamik dan Statik

Pada rekristalisasi dinamis, saat material mengalami deformasi, terjadi regangan di dalam material, dan apabila regangan tersebut adalah regangan kritis ( $\epsilon_0$ ) maka akan tersedia cukup energi untuk terbentuk nuklei pada batas butir yang terdeformasi. Proses ini dipengaruhi faktor-faktor antara lain regangan, kecepatan regangan dan temperatur, seperti yang telah diteliti oleh Zener-Hollomon<sup>[9]</sup>.

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

### 2.7.3. 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 2.16 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<sup>[2]</sup>.



## BAB 3 METODE PENELITIAN

### 3.1 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan sebagai benda uji dalam penelitian adalah baja HSLA-Nb hasil pengecoran kontinu dengan kode produksi 1A1808AN yang memiliki komposisi terlihat pada Tabel 3.1. dibawah.

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

| Komposisi | 1A1808AN | Komposisi | 1A1808AN |
|-----------|----------|-----------|----------|
| Ti        | 0,001    | Cu        | 0,032    |
| C         | 0,165    | Nb        | 0,019    |
| Si        | 0,007    | V         | 0,005    |
| Mn        | 0,664    | Ni        | 0,021    |
| P         | 0,005    | Cr        | 0,013    |
| S         | 0,005    | N         | 0,033    |
| Al        | 0,037    |           |          |

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

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

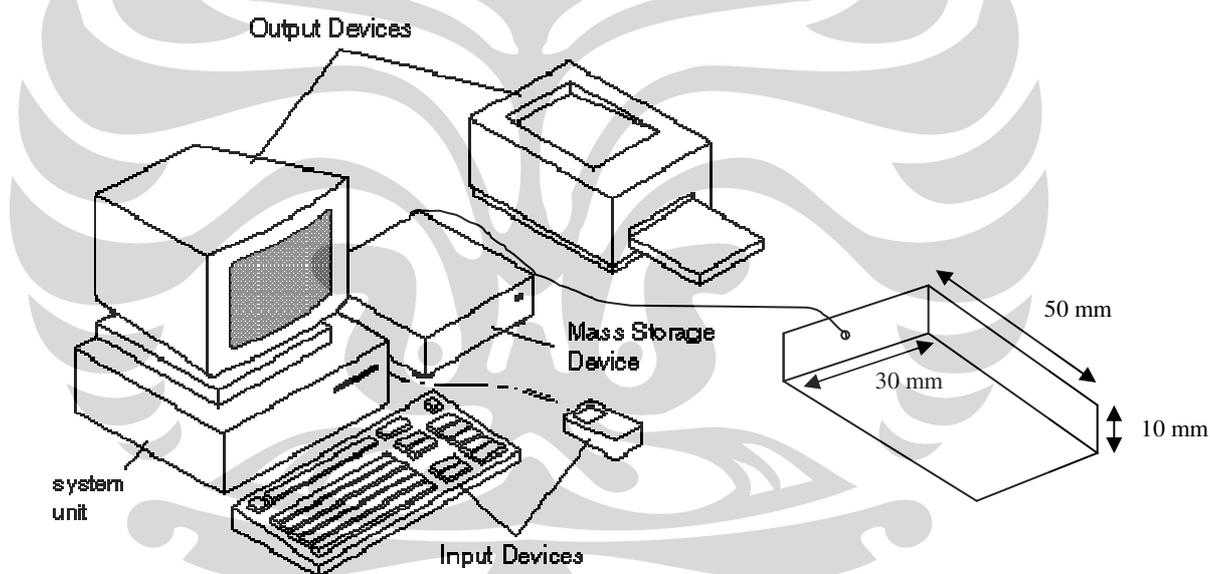
### 3.2 Prosedur Penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahap yang meliputi pembuatan benda uji, proses *heating* atau pemanasan benda uji, proses pencanaan panas, proses pendinginan udara yang dilanjutkan dengan pendinginan menggunakan *waterjet spray*, preparasi uji metalografi, pengamatan mikrostruktur, dan penghitungan besar butir austenit.

### 3.2.1. Pembuatan Benda Uji

Benda uji dihasilkan dengan memotong *slab* baja HSLA-Nb menggunakan alat potong sesuai dengan dimensi yang tertulis di atas. Pada saat pemotongan dialirkan air agar tidak menimbulkan panas pada benda uji.

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

### 3.2.2. Proses Pemanasan

Proses pemanasan dilakukan dengan memasukkan benda uji ke dalam dapur Carbolite dengan temperatur 1200 °C, kemudian ditunggu sekitar 5 – 10 menit agar temperatur benda uji mencapai temperatur target secara homogen, sesuai dengan yang terlihat pada layar komputer. Proses pemanasan dilakukan di Laboratorium Metalurgi Mekanik Departemen Metalurgi dan Material FTUI.

### 3.2.3. Proses Canai Panas

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

### 3.2.4. Pendinginan

Proses pendinginan dilakukan melalui dua tahap, pendinginan lambat dan cepat. Pendinginan dilakukan dengan menggunakan bantuan *heating jacket* atau kipas angin dan *waterjet spray*. Untuk menghasilkan kecepatan pendinginan yang lambat, benda uji dimasukkan ke dalam *heating jacket* dengan variasi temperatur 450, 350, 250, 150, 50 °C. Selain itu, digunakan kipas angin dengan kecepatan terendah dan pendinginan pada temperatur kamar selama kurang lebih 20 detik sebelum didinginkan cepat dengan *waterjet spray*. Pendinginan dengan *waterjet spray* dimaksudkan supaya benda memiliki struktur akhir martensit, yang diperlukan untuk pengamatan struktur mikro austenit prior.

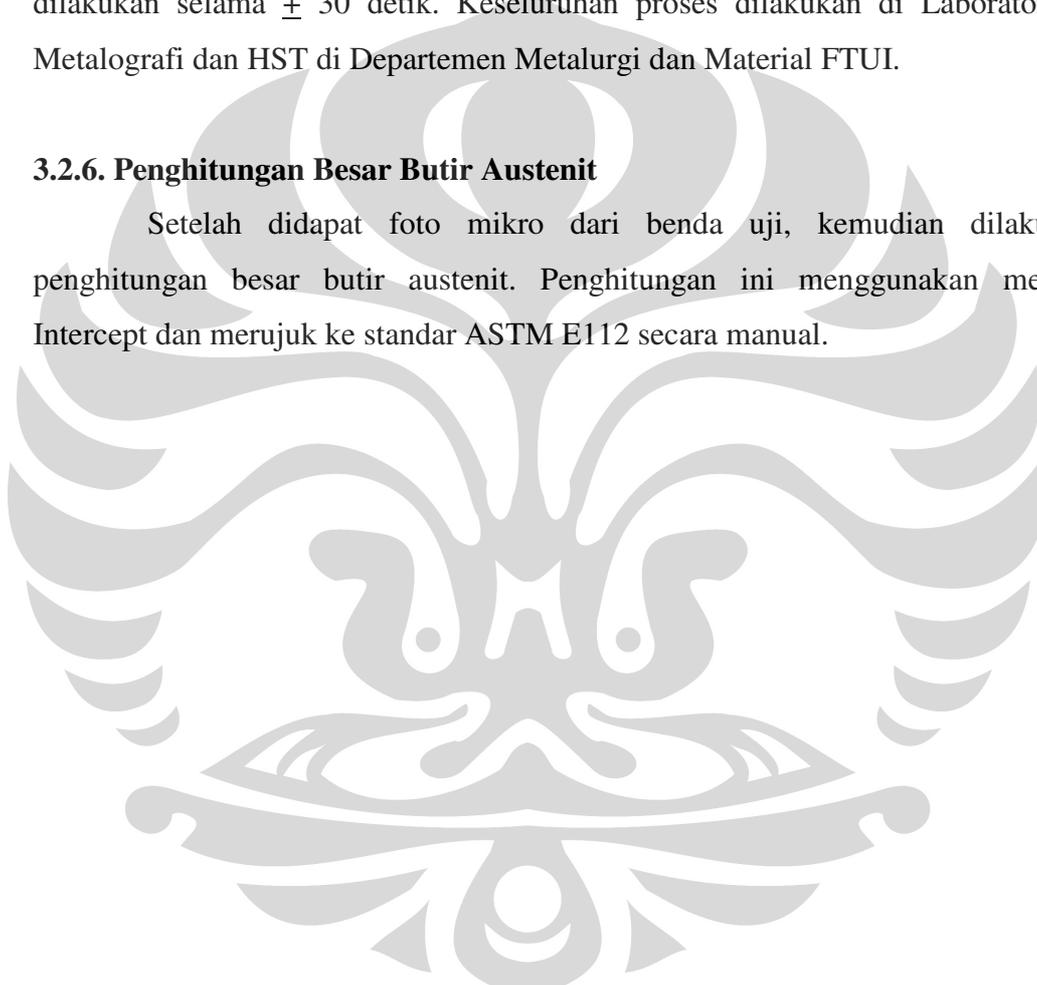
### 3.2.5. Preparasi, Pengujian Metalografi dan Pengamatan Mikrostruktur

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 pada benda uji 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 mengubah arah pengamplasan setiap pergantian tingkat kekasaran kertas amplas untuk meniadakan sisa pengamplasan sebelumnya. Setelah itu benda uji dipoles untuk mendapatkan permukaan yang lebih halus dan mengkilap serta menghilangkan

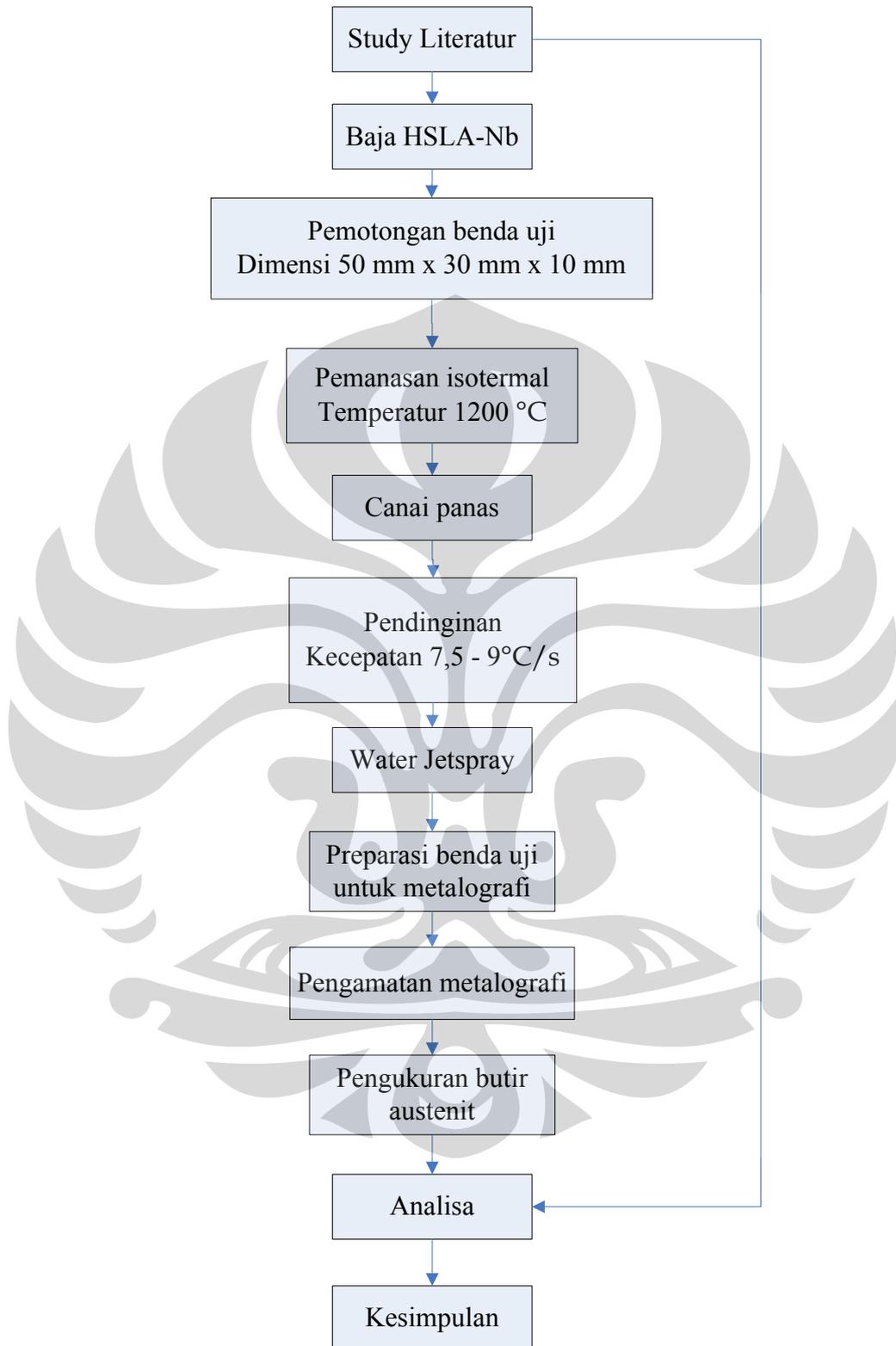
bekas goresan akibat pengamplasan. Proses pemolesan dilakukan dengan menggunakan kain poles dan bahan poles berupa alumina. Proses selanjutnya yaitu etsa yang bertujuan untuk memunculkan jejak batas butir austenit prior dalam struktur akhir dari benda uji. Untuk mendapatkan jejak batas butir austenit prior, penggunaan zat etsa dan waktu etsa harus tepat. Proses etsa dilakukan melalui etsa kimia dengan menggunakan larutan jenuh asam pikrik (30 gram asam pikrik dalam 100 ml alkohol 96%) ditambah 1 tetes HCl dan pengetsaan dilakukan selama  $\pm$  30 detik. Keseluruhan proses dilakukan di Laboratorium Metalografi dan HST di Departemen Metalurgi dan Material FTUI.

### **3.2.6. Penghitungan Besar Butir Austenit**

Setelah didapat foto mikro dari benda uji, kemudian dilakukan penghitungan besar butir austenit. Penghitungan ini menggunakan metode Intercept dan merujuk ke standar ASTM E112 secara manual.



### 3.3 Metodologi Penelitian



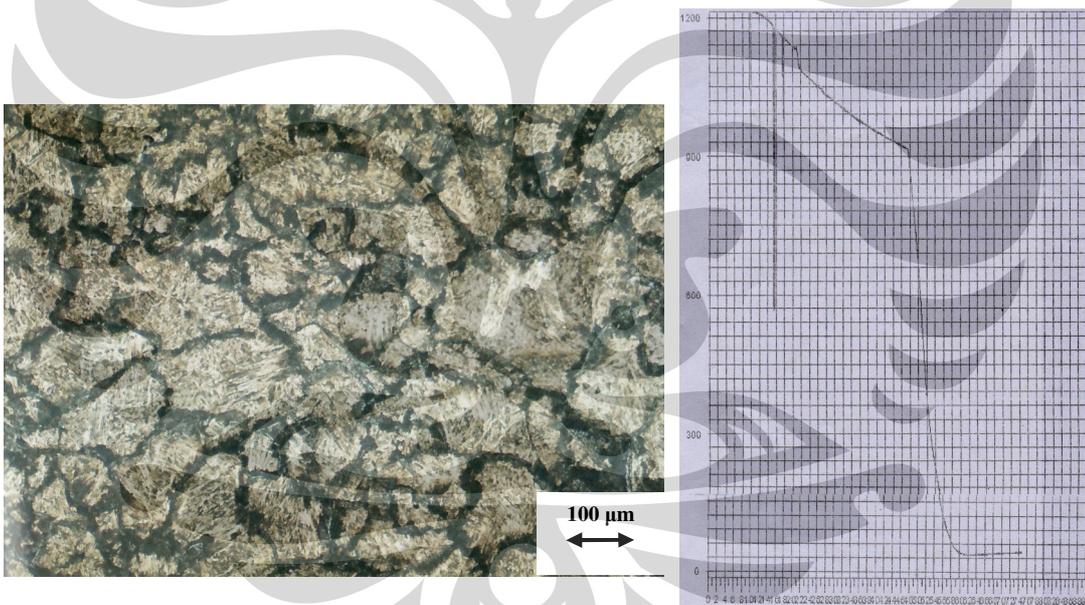
**Gambar 3.2.** Diagram Alir Penelitian

## BAB 4 HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

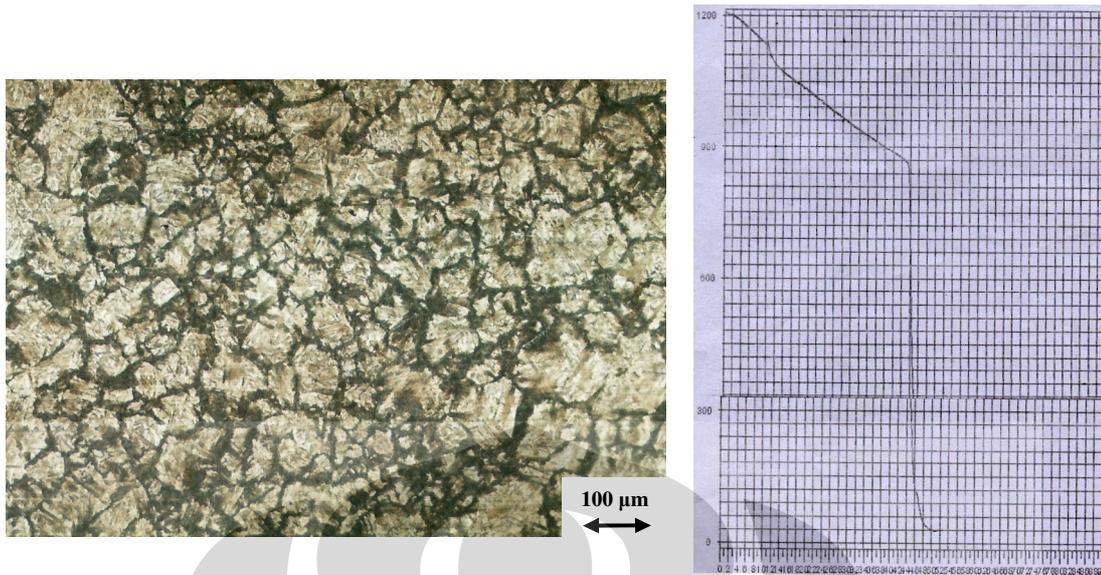
### 4.1 Foto Mikro dan Grafik Akuisisi

Setelah sampel melalui tahap canai panas, pendinginan udara dengan variasi kecepatan pendinginan, yang dilanjutkan pendinginan cepat menggunakan air, sampel dilakukan preparasi metalografi. Etsa menggunakan larutan etsa asam pikrik jenuh. Kemudian dilakukan pengambilan foto mikro.

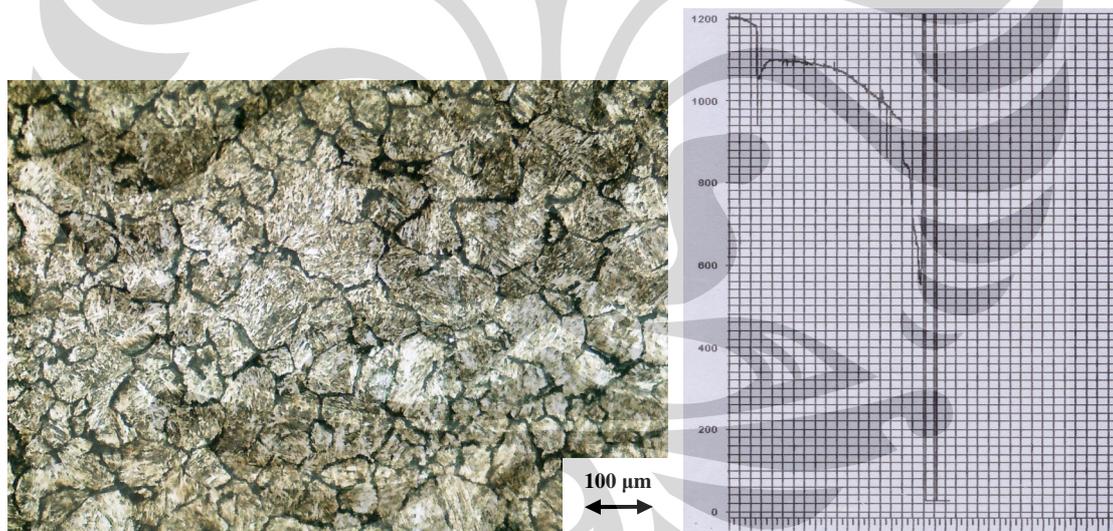
Contoh foto mikro dan grafik akuisisi masing – masing sampel dapat dilihat pada Gambar 4.1 – 4.6. Foto mikro yang ditampilkan disini seluruhnya memiliki perbesaran 100X. Untuk foto mikro masing – masing sampel dengan perbesaran lainnya dapat dilihat pada lampiran II.



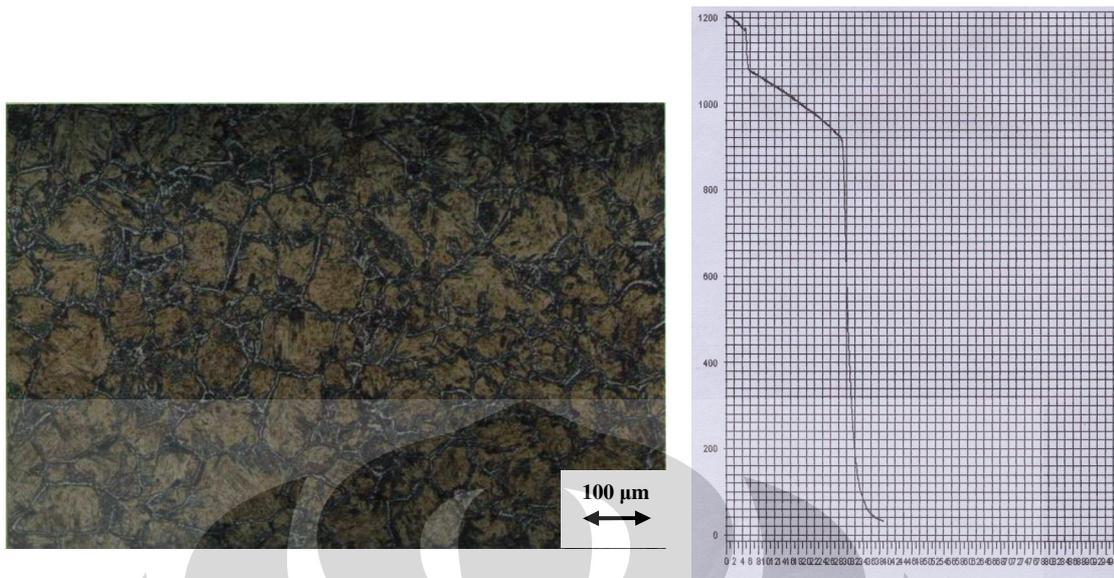
**Gambar 4.1.** Foto Mikro dan Grafik Akuisisi Sampel A  
(Laju Pendinginan 7,5 °C/s)



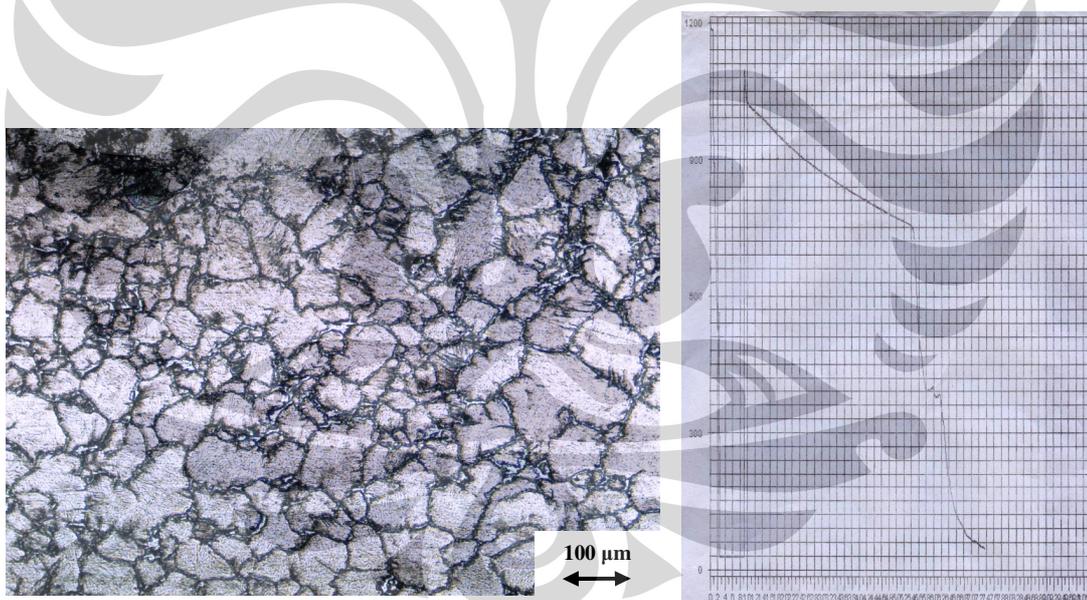
**Gambar 4.2.** Foto Mikro dan Grafik Akuisisi Sampel B  
(Laju Pendinginan 8 °C/s)



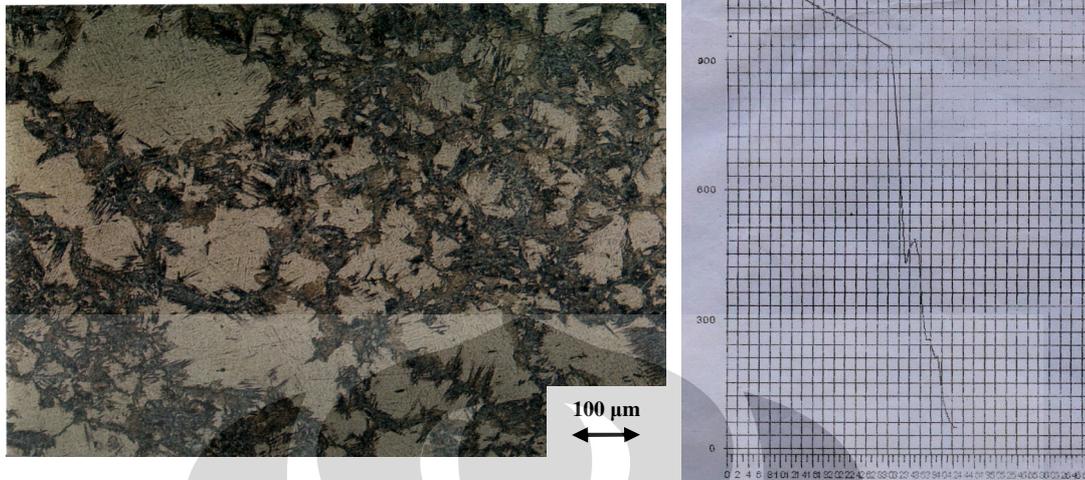
**Gambar 4.3.** Foto Mikro dan Grafik Akuisisi Sampel C  
(Laju Pendinginan 7,8 °C/s)



**Gambar 4.4.** Foto Mikro dan Grafik Akuisisi Sampel D  
(Laju Pendinginan 8,1 °C/s)



**Gambar 4.5.** Foto Mikro dan Grafik Akuisisi Sampel E  
(Laju Pendinginan 9 °C/s)



**Gambar 4.6.** Foto Mikro dan Grafik Akuisisi Sampel F  
(Laju Pendinginan 7,7 °C/s)

#### 4.2 Penghitungan Ukuran Butir Austenit

Dari foto mikro yang telah didapat sebelumnya, dihitung ukuran butir austenit masing – masing sampel. Tiap sampel dihitung hingga 10 kali, kemudian hasilnya dirata – rata. Penghitungan ukuran butir austenit dapat dilihat pada Tabel 4.2. Contoh penghitungan butir dapat dilihat pada lampiran.

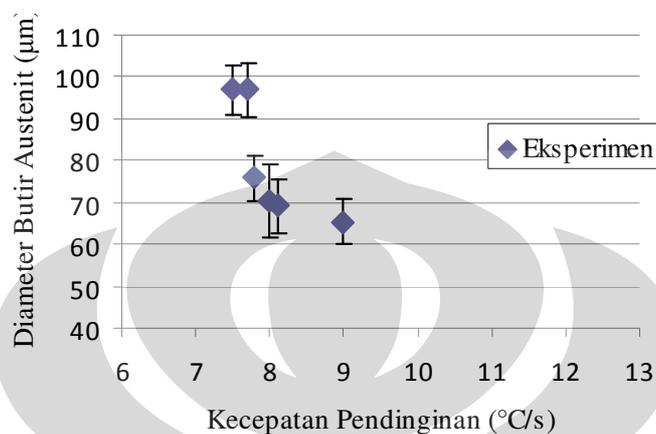
**Tabel 4.1.** Penghitungan Ukuran Butir Austenit

| Kecepatan Pendinginan (°C/s) | Jumlah Butir | Ukuran Butir (μm) | Ukuran Butir Rata – rata (μm) |
|------------------------------|--------------|-------------------|-------------------------------|
| 7,5                          | 8            | 90,20             | 97                            |
|                              | 9            | 80,18             |                               |
|                              | 7            | 103,09            |                               |
|                              | 7            | 103,09            |                               |
|                              | 7            | 103,09            |                               |
|                              | 7            | 103,09            |                               |
|                              | 6            | 120,27            |                               |
|                              | 6            | 120,27            |                               |
|                              | 7            | 103,09            |                               |
|                              | 8            | 90,20             |                               |
| 7,7                          | 8            | 89,28             | 96,94                         |
|                              | 7            | 102,04            |                               |
|                              | 7            | 102,04            |                               |
|                              | 7            | 102,04            |                               |

|     |    |        |       |
|-----|----|--------|-------|
|     | 7  | 102,04 |       |
|     | 7  | 102,04 |       |
|     | 8  | 89,28  |       |
|     | 8  | 89,28  |       |
|     | 7  | 102,04 |       |
|     | 8  | 89,28  |       |
| 8   | 13 | 54,94  | 70,47 |
|     | 11 | 64,94  |       |
|     | 9  | 76,36  |       |
|     | 9  | 76,36  |       |
|     | 11 | 64,94  |       |
|     | 11 | 64,94  |       |
|     | 11 | 64,94  |       |
|     | 10 | 71,43  |       |
|     | 9  | 76,36  |       |
|     | 11 | 64,94  |       |
| 8,1 | 12 | 66,67  | 69,18 |
|     | 12 | 66,67  |       |
|     | 12 | 66,67  |       |
|     | 11 | 72,72  |       |
|     | 11 | 72,72  |       |
|     | 11 | 72,72  |       |
|     | 11 | 72,72  |       |
|     | 11 | 72,72  |       |
|     | 13 | 61,54  |       |
|     | 12 | 66,67  |       |
| 7,8 | 9  | 80,18  | 75,86 |
|     | 11 | 65,60  |       |
|     | 11 | 65,60  |       |
|     | 10 | 72,16  |       |
|     | 9  | 80,18  |       |
|     | 10 | 72,16  |       |
|     | 10 | 72,16  |       |
|     | 9  | 80,18  |       |
|     | 9  | 80,18  |       |
|     | 8  | 90,20  |       |
| 9   | 10 | 71,43  | 69,18 |
|     | 13 | 54,94  |       |
|     | 9  | 79,36  |       |
|     | 11 | 64,94  |       |
|     | 13 | 54,94  |       |
|     | 12 | 59,52  |       |
|     | 12 | 59,52  |       |
|     | 15 | 47,62  |       |
|     | 11 | 64,94  |       |
|     | 10 | 71,43  |       |

### 4.3 Hubungan antara Kecepatan Pendinginan dan Ukuran Butir Austenit

Dari hasil penghitungan ukuran butir yang telah dilakukan sebelumnya, maka dapat diketahui hubungan antara kecepatan pendinginan dengan ukuran butir austenit. Hubungan tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.7.



**Gambar 4.7.** Hubungan antara Kecepatan Pendinginan dengan Ukuran Butir Austenit

Grafik tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi kecepatan pendinginan, maka ukuran butir austenit akan semakin kecil. Hal ini sesuai dengan teori pertumbuhan butir, dimana semakin tinggi kecepatan pendinginan, maka butir tidak akan sempat tumbuh, sehingga akan memiliki ukuran yang kecil.

### 4.4 Perbandingan Pertumbuhan Butir Austenit dalam Keadaan Isotermal dengan Non-Isotermal

Beck melakukan penelitian untuk menentukan nilai dari ukuran butir dalam keadaan anil isotermal sesuai dengan hubungan perpangkatan<sup>[13]</sup>:

$$D^n - D_0^n = C \cdot t \quad (4.1)$$

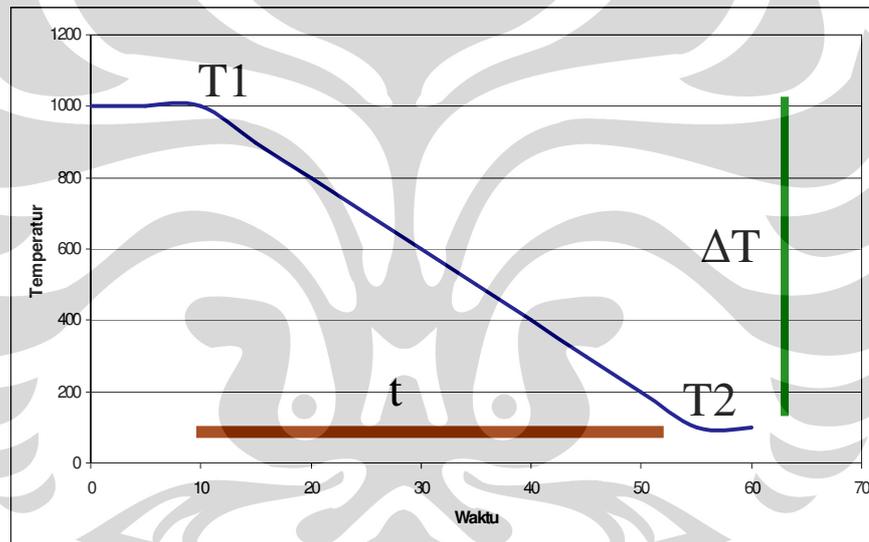
dengan D adalah diameter butir akhir,  $D_0$  adalah diameter butir awal, t adalah waktu anil, serta n dan C adalah konstanta yang bergantung pada komposisi paduan.

Selanjutnya, Sellars menganalisis data dari baja karbon rendah dengan paduan mangan untuk mendapatkan persamaan berikut<sup>[13]</sup> :

$$d^n - d_0^n = \left[ A \exp\left(\frac{-Q_{gg}}{RT}\right) \right] \cdot t \quad (4.2)$$

dimana  $n$  (4,5) dan  $A$  ( $4,1 \times 10^{23}$ ) merupakan konstanta yang tergantung pada komposisi material dan kondisi proses,  $Q_{gg}$  energi aktivasi untuk pertumbuhan butir,  $R$  konstanta gas universal  $8,314 \text{ J/mol K}$ ,  $T$  temperatur absolut, dan  $t$  adalah waktu.

Untuk keadaan non-isotermal / kontinu, nilai  $T$  akan berubah mengikuti nilai  $t$  yang diberikan. Hal ini menyebabkan adanya variabel  $T_1$  dan  $T_2$ , yang akan menimbulkan adanya  $\Delta T$  pada setiap nilai  $t$  yang diberikan. Ilustrasi dari variabel – variabel yang ada untuk pendinginan dalam keadaan kontinu dapat dilihat pada Gambar 4.8.



**Gambar 4.8.** Ilustrasi Variabel untuk Pendinginan dalam Keadaan Kontinu

Dari gambar tersebut, terlihat bahwa variabel  $\Delta T$  memengaruhi kinetika pertumbuhan butir, untuk keadaan non-isotermal. Secara matematis, dapat dijelaskan sebagai berikut.

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

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

$$\begin{aligned}
 (=) \quad d^n - d_o^n &= [A \exp\left(\frac{-Q_{ss}}{RT}\right)] \cdot \Delta T \cdot \frac{t}{\Delta T} \\
 (=) \quad d^n - d_o^n &= [A \exp\left(\frac{-Q_{ss}}{RT}\right)] \cdot \Delta T \cdot \frac{1}{Cr} \quad (4.3)
 \end{aligned}$$

Dari persamaan diatas, terlihat bahwa untuk pertumbuhan butir non-isotermal, dipengaruhi oleh  $\Delta T$  dan  $Cr$  (*cooling rate / kecepatan pendinginan*)

#### 4.5 Penyesuaian Persamaan untuk Kondisi Non-Isotermal

Data-data hasil percobaan dimasukkan ke dalam persamaan 4.3 untuk mendapatkan kesesuaian.

**Tabel 4.2.** Data Hasil Percobaan

| $\Delta T$<br>(K) | Cr<br>(K/s) | A       | Q<br>(kJ/mol) | R<br>(J/mol K) | T<br>(K) | $d^n - d_0^n$ | d ( $\mu\text{m}$ ) |
|-------------------|-------------|---------|---------------|----------------|----------|---------------|---------------------|
| 195               | 280,5       | 4,1E+23 | -435000       | 8,31           | 1398     | 17636199724   | 97,00               |
| 170               | 280,7       | 4,1E+23 | -435000       | 8,31           | 1383     | 9465792472    | 96,93               |
| 156               | 280,8       | 4,1E+23 | -435000       | 8,31           | 1369     | 203075955,5   | 75,86               |
| 270               | 281         | 4,1E+23 | -435000       | 8,31           | 1407     | 25566263251   | 70,46               |
| 180               | 281,1       | 4,1E+23 | -435000       | 8,31           | 1323     | 1547062182    | 69,18               |
| 135               | 282         | 4,1E+23 | -435000       | 8,31           | 1308     | 537325669,6   | 65,29               |
| 135               | 282,1       | 4,1E+23 | -435000       | 8,31           | 1338     | 1275089072    | 87,63               |

Berdasarkan data tersebut, berdasarkan penghitungan menggunakan persamaan 4.3 diperoleh rata-rata diameter butir pada saat rekristalisasi adalah 72  $\mu\text{m}$ . Selanjutnya dibandingkan dengan penghitungan menggunakan persamaan Sellars<sup>[15]</sup> :

$$d_{rex} = Dd_0^{0,67} \epsilon^{-0,67} \quad (4.4)$$

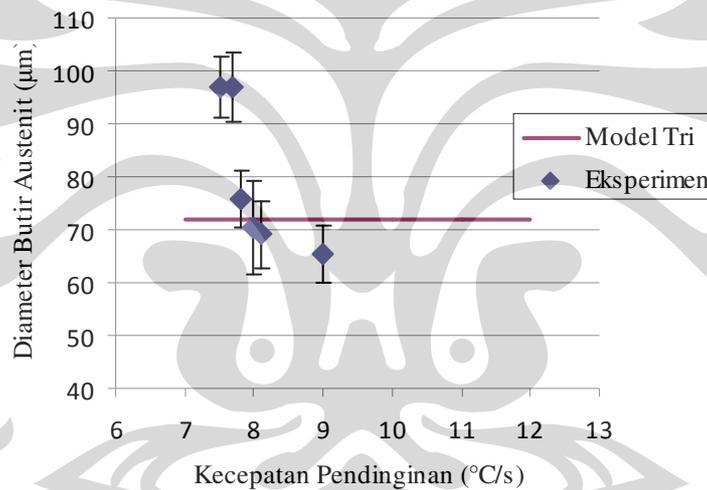
dimana :

- $d_{rex}$  = diameter butir rekristalisasi ( $\mu\text{m}$ )
- D = konstanta material (0,66)
- $d_0$  = diameter butir awal ( $\mu\text{m}$ )
- $\epsilon$  = besar regangan

Dari persamaan 4.4 diperoleh diameter butir rekristalisasi sebesar 40  $\mu\text{m}$ . Nilai ini dimasukkan ke dalam tabel berikut untuk mensimulasikan persamaan non-isotermal dari baja ini.

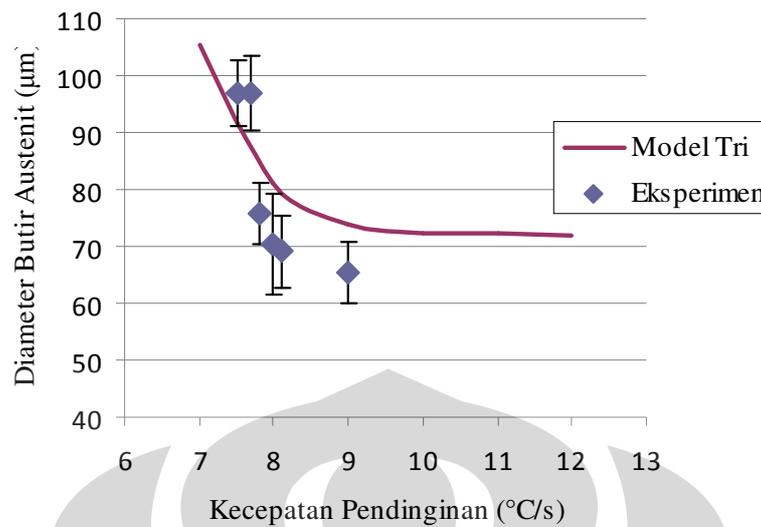
**Tabel 4.3.** Simulasi Persamaan Non-Isotermal

| $\Delta T$ (K) | Cr (K/s) | A       | Q (kJ/mol) | R (J/mol K) | T (K) | $d^n - d_0^n$ | d ( $\mu\text{m}$ ) | $d_0$ ( $\mu\text{m}$ ) |
|----------------|----------|---------|------------|-------------|-------|---------------|---------------------|-------------------------|
| 150            | 280      | 4,1E+23 | -435000    | 8,31        | 1200  | 997519,7829   | 72,07               | 72                      |
| 150            | 281      | 4,1E+23 | -435000    | 8,31        | 1200  | 872829,81     | 72,06               | 72                      |
| 150            | 282      | 4,1E+23 | -435000    | 8,31        | 1200  | 775848,72     | 72,55               | 72                      |
| 150            | 283      | 4,1E+23 | -435000    | 8,31        | 1200  | 698263,848    | 72,55               | 72                      |
| 150            | 284      | 4,1E+23 | -435000    | 8,31        | 1200  | 634785,3164   | 72,54               | 72                      |
| 150            | 285      | 4,1E+23 | -435000    | 8,31        | 1200  | 581886,54     | 72,54               | 72                      |



**Gambar 4.9.** Perbandingan Hasil Percobaan dengan Model Persamaan

Terlihat pada Gambar 4.9, bahwa model persamaan belum mendekati grafik hasil percobaan. Oleh sebab itu, perlu dilakukan suatu penyesuaian dengan penambahan suatu konstanta pada model persamaan 4.3. Setelah beberapa kali simulasi menggunakan program Microsoft Excel, didapat konstanta yang dapat membuat grafik model mendekati grafik hasil percobaan seperti pada Gambar 4.10.



**Gambar 4.10.** Hasil Penyesuaian Model Persamaan

Dari gambar di atas, persamaan 4.3 menjadi :

$$d^n - d_0^n = \left[ A \cdot \exp\left(\frac{-Q_{gg}}{RT}\right) \right] \cdot \left[ B \cdot \Delta T \cdot \frac{1}{Cr^m} \right] \quad (4.5)$$

dimana

- d = besar butir akhir (µm)
- d<sub>0</sub> = besar butir awal (µm)
- n, A, Q<sub>gg</sub> = konstanta material (4,5; 4,1 x 10<sup>21</sup>; 435 kJ/mol) <sup>[4]</sup>
- T = temperatur deformasi (K)
- ΔT = perubahan temperatur selama kondisi non-isotermal (K)
- Cr = kecepatan pendinginan (K/s)
- B, m = konstanta material hasil percobaan (1 x 10<sup>14</sup>, 14)

Persamaan (4.5) tersebut adalah persamaan kinetika pertumbuhan butir untuk keadaan non-isotermal / kontinu untuk baja HSLA 0,019 % Nb.

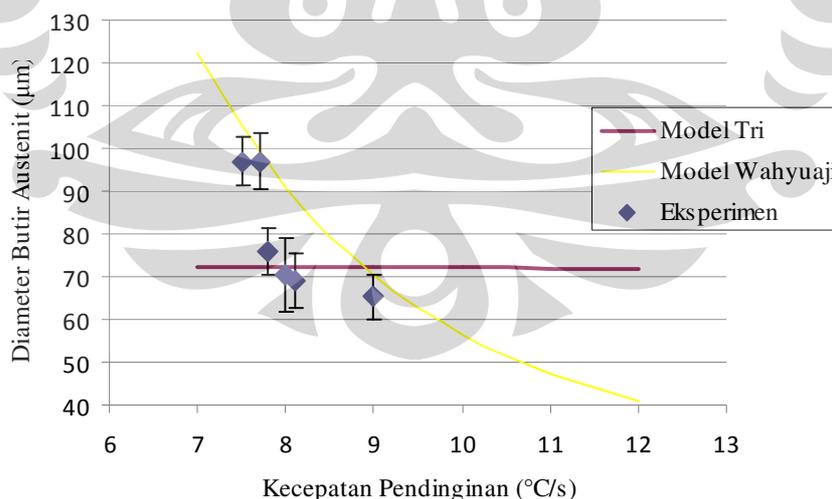
#### 4.6 Perbandingan Model Persamaan dengan Penelitian Lain

Persamaan kinetika pertumbuhan butir untuk keadaan non-isotermal yang diperoleh untuk baja ini kemudian dibandingkan dengan penelitian lain, dalam hal ini dibandingkan dengan penelitian Saudara Wahyuaji N. P. yang menggunakan material baja HSLA dengan kode produksi 92397U.

**Tabel 4.4.** Perbandingan Komposisi Baja dari Penelitian dalam Persen Berat

| Komposisi | 1A1808AN | 92397U | Komposisi | 1A1808AN | 92397U |
|-----------|----------|--------|-----------|----------|--------|
| Ti        | 0,001    | 0,002  | Cu        | 0,032    | 0,052  |
| C         | 0,165    | 0,048  | Nb        | 0,019    | 0,037  |
| Si        | 0,007    | 0,266  | V         | 0,005    | 0,003  |
| Mn        | 0,664    | 0,706  | Ni        | 0,021    | 0,022  |
| P         | 0,005    | 0,010  | Cr        | 0,013    | 0,018  |
| S         | 0,005    | 0,007  | N         | 0,033    | 0,004  |
| Al        | 0,037    | 0,037  |           |          |        |

Grafik model hasil penelitian dapat dilihat pada gambar berikut.



**Gambar 4.11.** Perbandingan Model Persamaan dengan Penelitian Lain

Grafik permodelan antara kedua penelitian menunjukkan bahwa letak permodelan 1 berada sedikit di bawah permodelan Wahyuaji. Dari persamaan 4.5, material dengan kode produksi 1A1808AN memiliki nilai konstanta material (B) yaitu  $1 \times 10^{14}$  dan penyesuaian variabel kecepatan pendinginan menjadi  $1/Cr^{14}$  sedangkan material dengan kode produksi 92397U menghasilkan nilai B sebesar  $1 \times 10^{14}$  dan variabel kecepatan pendinginan menjadi  $1/Cr^{10}$ .

Jika dilihat komposisi dari kedua material tersebut, terdapat perbedaan yang cukup signifikan pada kadar karbon dan niobium. Kedua unsur ini bersama dengan unsur nitrogen memengaruhi temperatur kelarutan presipitat sehingga memengaruhi temperatur *reheating* dari kedua baja. Adanya perbedaan temperatur tersebut akan menghasilkan perbedaan diameter butir awal sebelum dilakukan proses canai panas. Berdasarkan persamaan 4.4 akan diperoleh diameter butir pada saat terjadi rekristalisasi. Dengan temperatur *reheating* yang lebih tinggi ( $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ ) dibandingkan dengan penelitian Wahyuaji ( $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ ), dihasilkan diameter butir awal yang lebih besar sehingga memperbesar diameter butir pada saat terjadi rekristalisasi.

Baja pada penelitian yang penulis lakukan memiliki kadar niobium yang lebih rendah dibandingkan dengan baja penelitian Wahyuaji. Semakin rendah kadar niobium akan memperbesar nilai pangkat dari kecepatan pendinginan (m).

## BAB 5

### KESIMPULAN

1. Ukuran butir austenit baja HSLA 0,019% Nb setelah canai panas akan menurun seiring dengan peningkatan kecepatan pendinginan. Hal ini disebabkan ketika peningkatan kecepatan pendinginan, energi yang diperlukan untuk pertumbuhan butir akan semakin berkurang sehingga butir tidak sempat bertumbuh.
2. Persamaan kinetika pertumbuhan butir Sellars hanya berlaku untuk pertumbuhan butir dalam kondisi isothermal. Untuk kondisi yang berbeda (pendinginan kontinu), diperlukan modifikasi persamaan Sellars dengan penambahan variabel dan penyesuaian konstanta.
3. Untuk pertumbuhan butir setelah canai panas dengan kondisi non-isothermal, variabel yang ditambahkan adalah *cooling rate* (Cr) dan disesuaikan menjadi  $1/Cr^{14}$  konstanta yang digunakan adalah  $1 \times 10^{14}$ .

Maka modifikasi persamaan akhir menjadi

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

dimana

d = besar butir akhir ( $\mu\text{m}$ )

$d_0$  = besar butir awal ( $\mu\text{m}$ )

n, A,  $Q_{gg}$  = konstanta material (4,5;  $4,1 \times 10^{21}$ ; 435 kJ/mol)

T = temperatur deformasi (K)

$\Delta T$  = perubahan temperatur selama kondisi non-isothermal (K)

Cr = kecepatan pendinginan (K/s)

B, m = konstanta material hasil percobaan ( $1 \times 10^{14}$ , 14)

## DAFTAR REFERENSI

- [1] William H Cubberly and friends, *Properties and Selection: Iron and Steels*, Metal Handbook Vol 1. 10<sup>th</sup> Edition, (Ohio : American Society for Metals, 1998)
- [2] R.E Smallman, R.J Bishop, *Metals and Material*, (UK : Butterworth – Heinemann, 1995)
- [3] 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.etsd.library.pitt.edu/ETD/available/etd-04082005-082222/-10k](http://www.etsd.library.pitt.edu/ETD/available/etd-04082005-082222/-10k)
- [4] C.M Sellars, “Static Recrystallization and Precipitation During Hot Rolling of Microalloyed Steels,” Mat Science Seminar 23-24 (Oct 1982)
- [5] William C Leslie, *The Physical Metallurgy of Steel*, (Michigan : McGraw Hill Company, 1982)
- [6] Y Lakhtin, *Engineering Physical Metallurgy*, (Moscow : Foreign Language Publishing House)
- [7] 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.
- [8] J.N. Harris, *Mechanical Working of Metal*, (UK: Pergamon Press, 1983)
- [9] P.L. Mangonon, *The Principles of Material Selection for Engineering Design*, (Prentice Hall, Inc, 1999)

[10] Brooks. R. Charlie, *Heat Treatment Structure & Properties of Non Ferrous Alloy*, (Ohio : American Society for Metals, 1998)

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

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

[13] P. A Manohar, *et al.*, "Grain Growth Predictions in Microalloyed Steels," ISIJ International, Vol. 36 No. 2, 1996.

[14] William D Callister, *Material Science and Engineering an Introduction*, (New York, John Wiley & Son, 1997)

[15] 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.

[16] C.M Sellars, "The Physical Metallurgy of Hot Working," Department of Metallurgy, University of Sheffield.



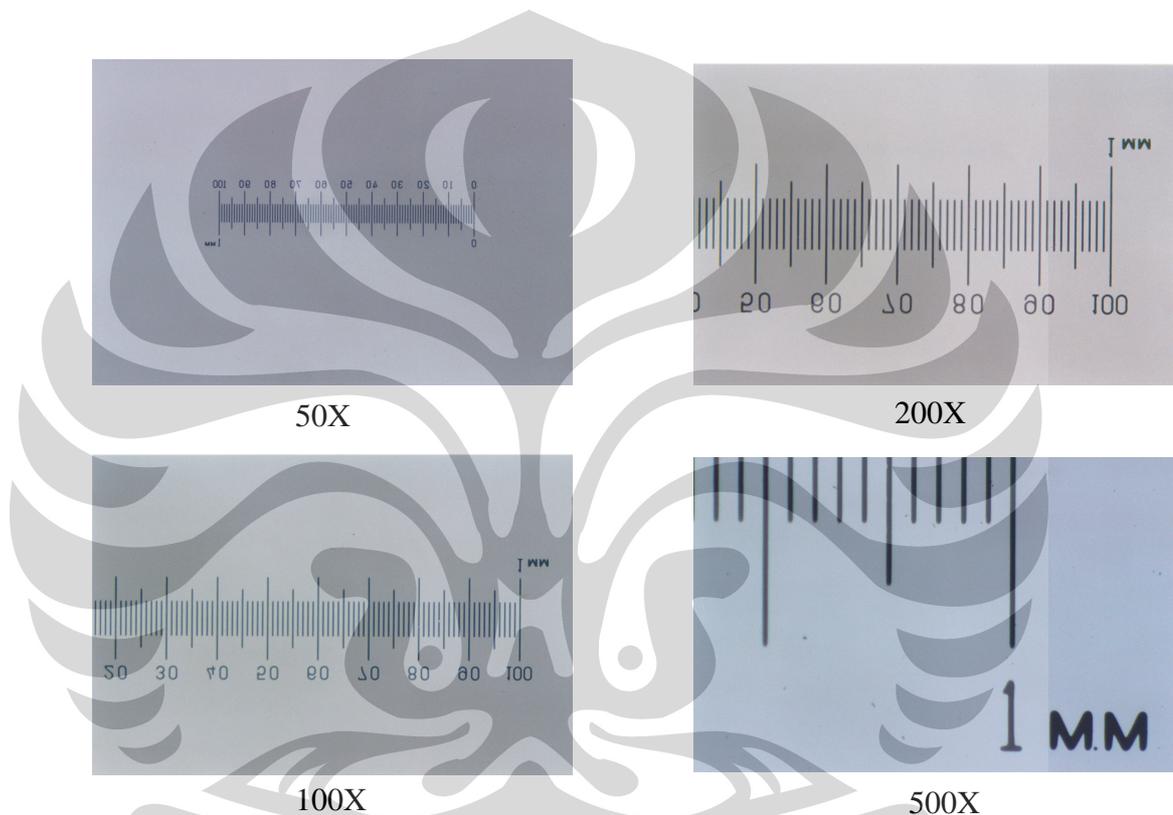
**LAMPIRAN 1**

**CONTOH PENGHITUNGAN UKURAN BUTIR**

## LAMPIRAN I

### CONTOH PERHITUNGAN UKURAN BUTIR

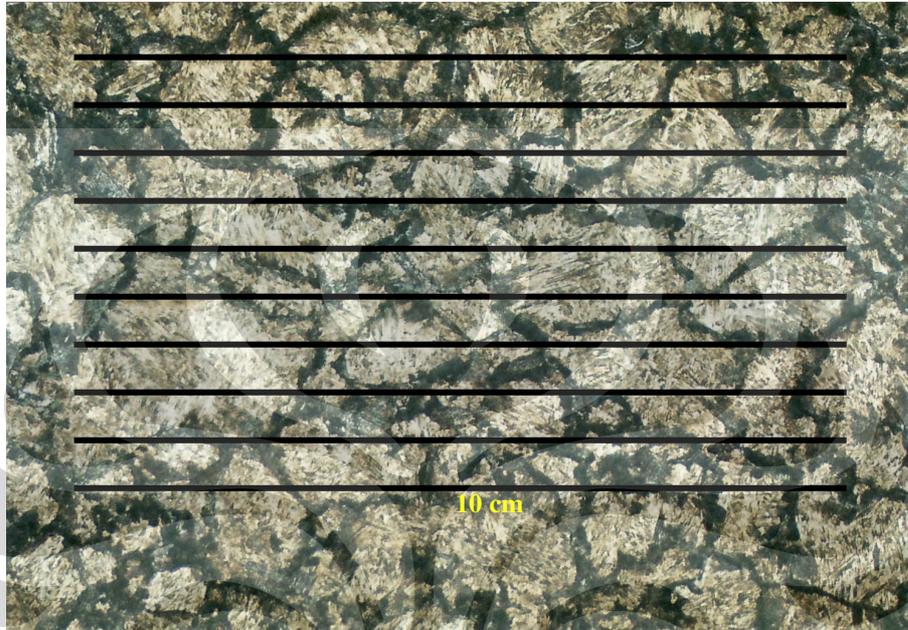
Setelah didapat foto mikro dari benda uji, selanjutnya diukur besar butir austenit dengan menggunakan metode perbandingan. Perhitungan dilakukan dengan bantuan foto standar perbesaran tertentu yang berisi skala seperti terlihat pada gambar dibawah.

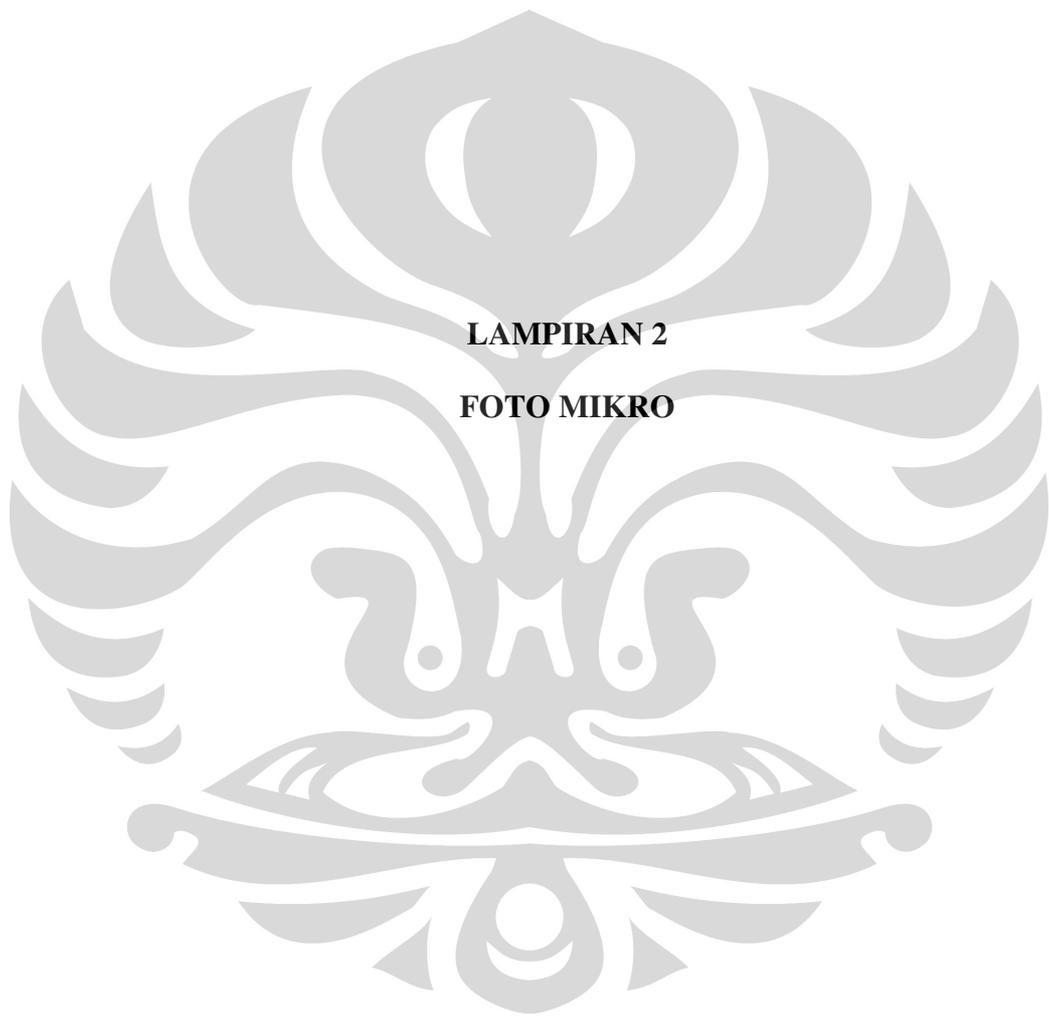


Setiap satu garis skala pada foto skala standar tersebut memiliki panjang 1  $\mu\text{m}$ . Sehingga dengan menggunakan mistar, dapat diketahui perbandingan antara ukuran pada mistar sentimeter dengan ukuran  $\mu\text{m}$  pada foto. Sebagai contoh, pada foto standar perbesaran 50X, 10 sentimeter pada mistar ternyata adalah  $\frac{10000}{7} \mu\text{m}$  pada foto, sedangkan pada foto standar perbesaran 100X, 10 sentimeter pada mistar ternyata adalah  $\frac{10000}{14} \mu\text{m}$  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 8 buah, maka diameter butirnya sama dengan  $\frac{10000}{14}$   $\mu\text{m}/10 = 89,29 \mu\text{m}$ . Begitu seterusnya sampai garis ke-10, kemudian diambil rata-ratanya.



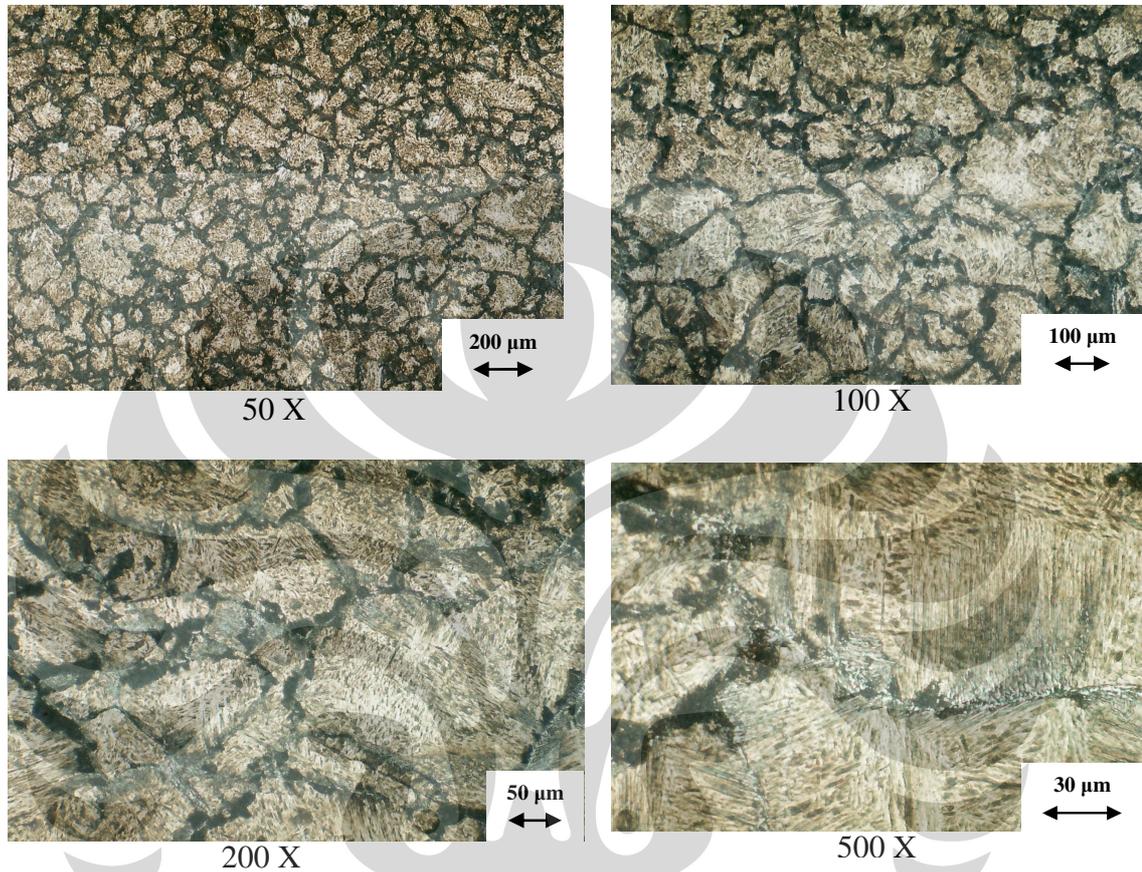


**LAMPIRAN 2**

**FOTO MIKRO**

## LAMPIRAN II FOTO MIKRO

Sampel A, Kecepatan Pendinginan 7,5 °C/s

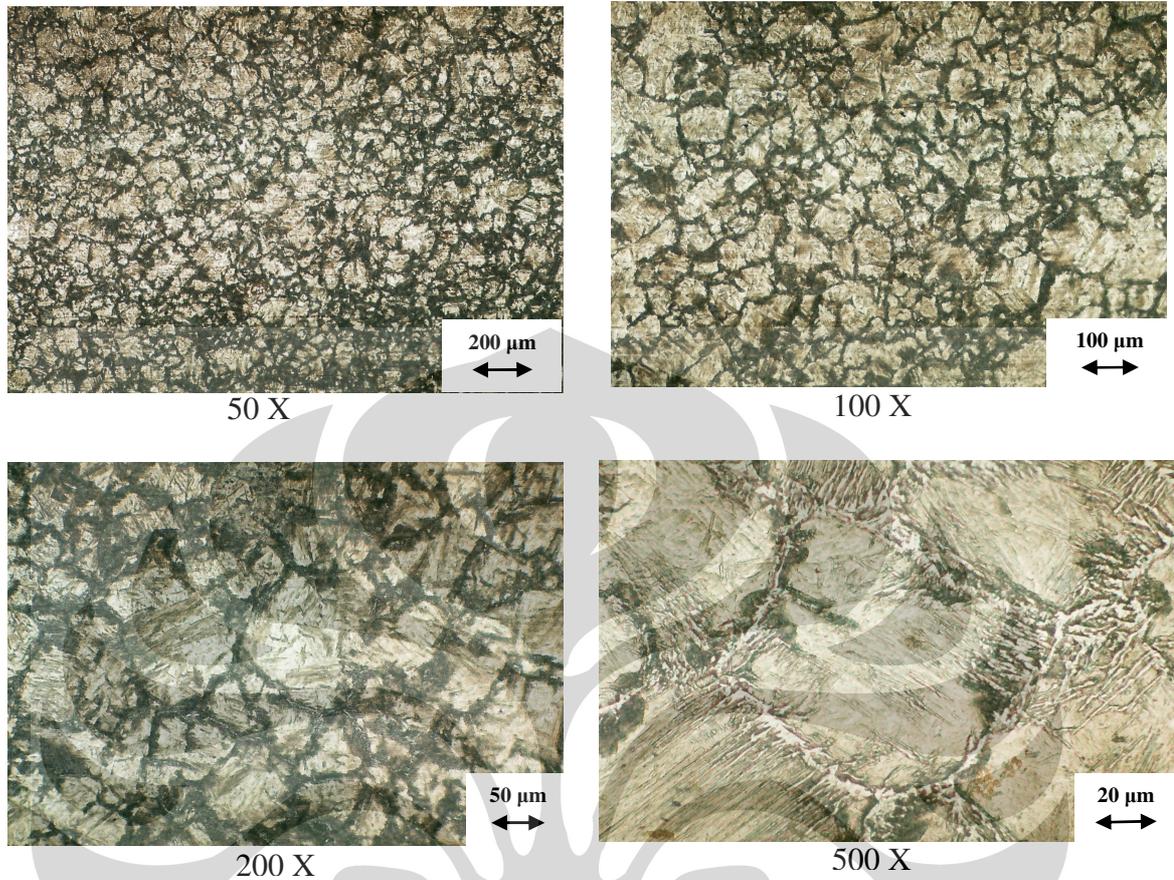


Measurement Results:

| Measurement | Grainsize ( $\mu\text{m}$ ) | ASTM |
|-------------|-----------------------------|------|
| 2           | 72,58                       | 4,71 |
| 3           | 78,68                       | 4,47 |
| 4           | 76,62                       | 4,55 |
| 5           | 106,72                      | 3,56 |
| 6           | 94,66                       | 3,92 |
| 7           | 91,93                       | 4,01 |
| 8           | 70,01                       | 4,82 |
| 9           | 77,45                       | 4,52 |
| 10          | 77,28                       | 4,52 |

Penghitungan Ukuran Butir

Sampel B, Kecepatan Pendinginan 8 °C/s



Unnamed.dad - Picsara

File Edit Video Image Database ROI Measurements View Help

Save Load Pan Full screen Magnify Compare Distance Parallel Curve Area Radius Angle Count Blob Delete Clear Add Sub Save Result Print Freeze Hi-res Adjust

ASTM-112 Snyder Hardness Composite Weld (S) Weld (A) Weld (All)

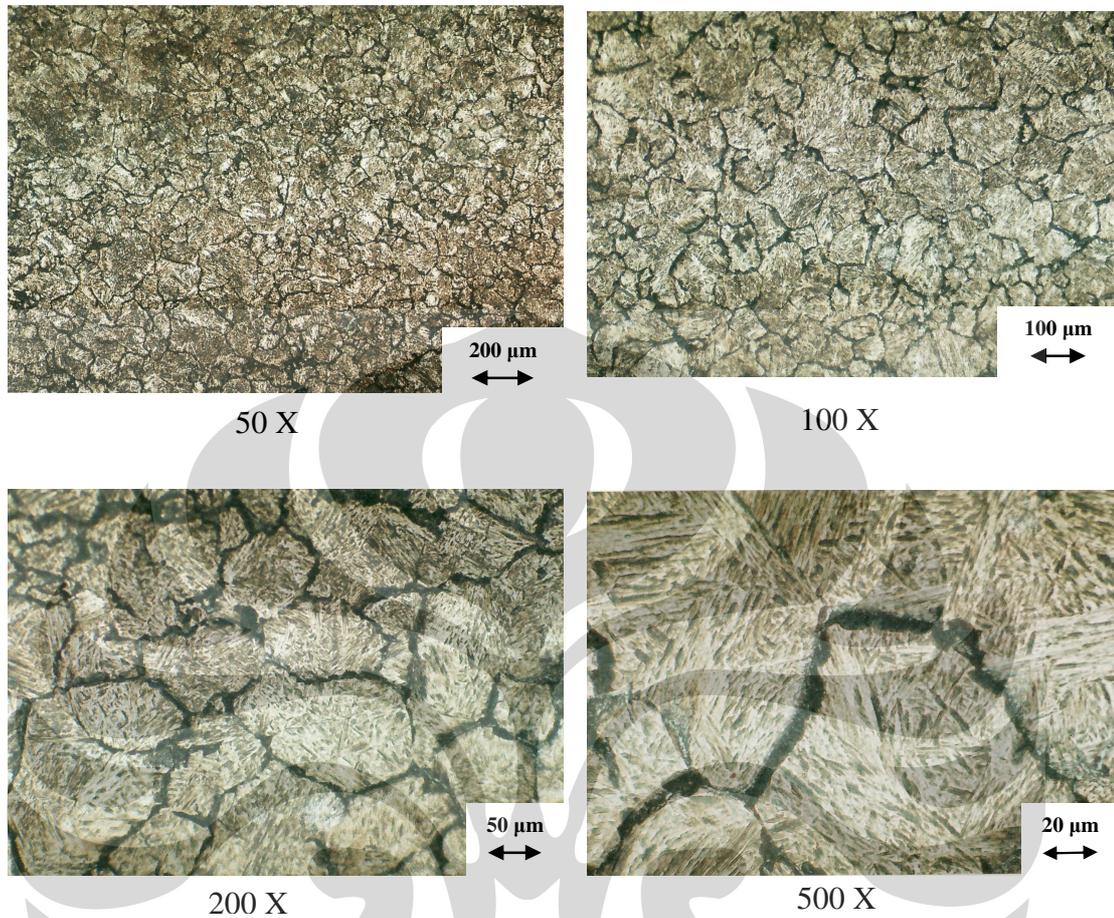
Measurements Results

| No | Grainsize | μm | ASTM |
|----|-----------|----|------|
| 1  | 70,36     | μm | 4,80 |
| 2  | 65,00     | μm | 5,04 |
| 3  | 69,71     | μm | 4,83 |
| 4  | 64,87     | μm | 5,04 |
| 5  | 70,29     | μm | 4,80 |
| 6  | 64,47     | μm | 5,06 |
| 7  | 62,66     | μm | 5,15 |
| 8  | 67,27     | μm | 4,94 |
| 9  | 68,85     | μm | 4,87 |
| 10 | 67,56     | μm | 4,92 |

Text Arrow Ruler Department New case Search case -Red +Red -Green +Green -Blue +Blue -Bright +Bright White Sharpen Max hist Max dyn Rotate Flip

Penghitungan Ukuran Butir

Sampel C, Kecepatan Pendinginan 7,8 °C/s



Unamedia - Pictura

File Edit Video Image Database ROI Measurements View Help

Save Load Pan Full screen Magnify Compare Distance Parallel Curve Area Radius Angle Count Blob Delete Clear Add Sub Save Result Print Freeze Hires Adjust

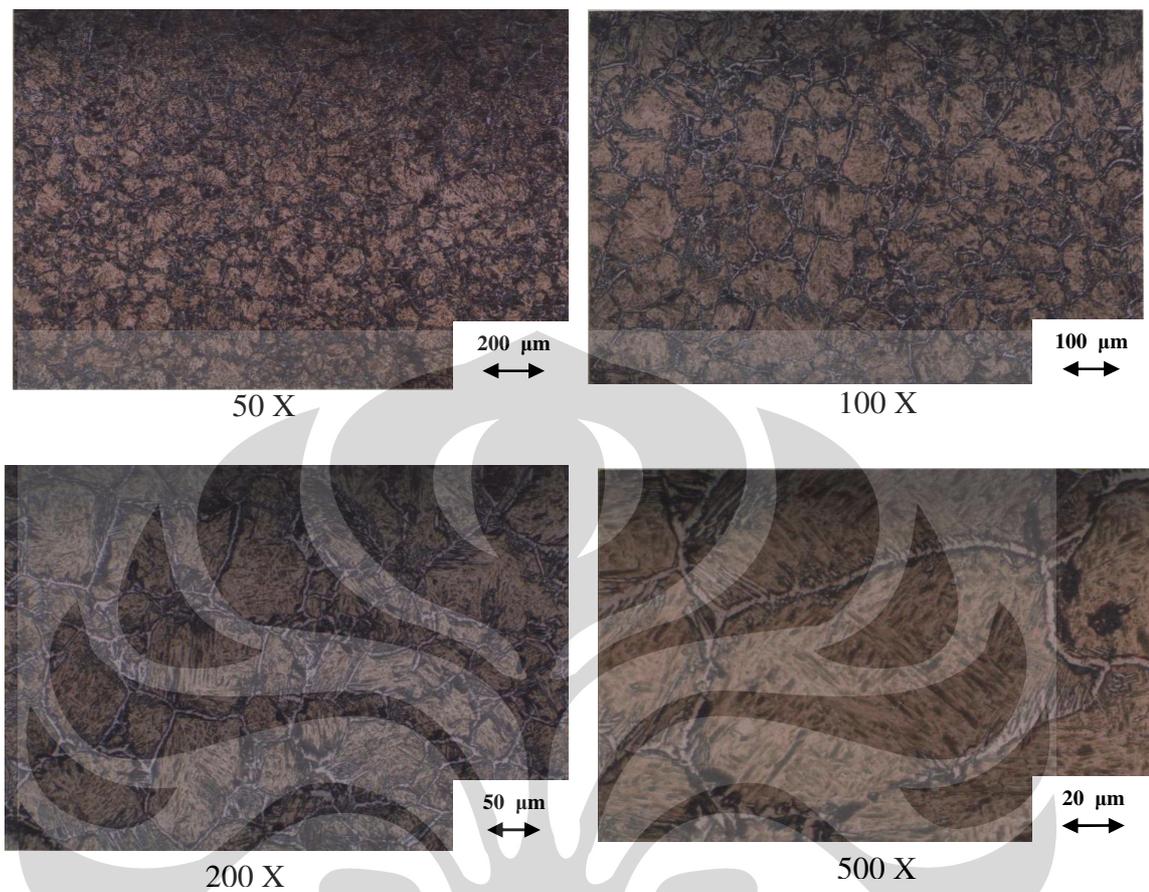
ASTM-112 Snyder Hardness Composite Weld (S) Weld (A) Weld (All)

| No | Grainsize | µm    | ASTM       |
|----|-----------|-------|------------|
| 2  | Grainsize | 79,56 | ASTM: 4,44 |
| 3  | Grainsize | 78,96 | ASTM: 4,46 |
| 4  | Grainsize | 79,22 | ASTM: 4,45 |
| 5  | Grainsize | 78,79 | ASTM: 4,47 |
| 6  | Grainsize | 78,53 | ASTM: 4,48 |
| 7  | Grainsize | 78,19 | ASTM: 4,49 |
| 8  | Grainsize | 74,26 | ASTM: 4,64 |
| 9  | Grainsize | 68,26 | ASTM: 4,89 |
| 10 | Grainsize | 71,83 | ASTM: 4,74 |

A Text Arrow Ruler Department New case Search case -Red +Red -Green +Green -Blue +Blue -Bright +Bright White Sharpen Max hist Max dyn Rotate Flip

Penghitungan Ukuran Butir

Sampel D, Kecepatan Pendinginan 8,1 °C/s



D 150 - 100 (baru)(resize).jpg - Picsara - Database: Picsara demo database 8.6/Default

File Edit Video Image Database ROI Measurements View Help

Save Load Pan Full screen Magnify Compare Distance Parallel Curve Area Radius Angle Count Blob Delete Clear Add Sub Save Result Print Freeze Hires Adjust

ASTM-112 Snyder Hardness Composite Weld (S) Weld (A) Weld (All)

| Line | Grainsize (μm) | ASTM |
|------|----------------|------|
| 1    | 65,77          | 5,00 |
| 2    | 50,21          | 5,37 |
| 3    | 65,98          | 4,99 |
| 4    | 67,08          | 4,94 |
| 5    | 65,98          | 4,99 |
| 6    | 66,11          | 4,99 |
| 7    | 67,28          | 4,93 |
| 8    | 63,38          | 5,11 |
| 9    | 71,94          | 4,74 |
| 10   | 66,39          | 4,97 |

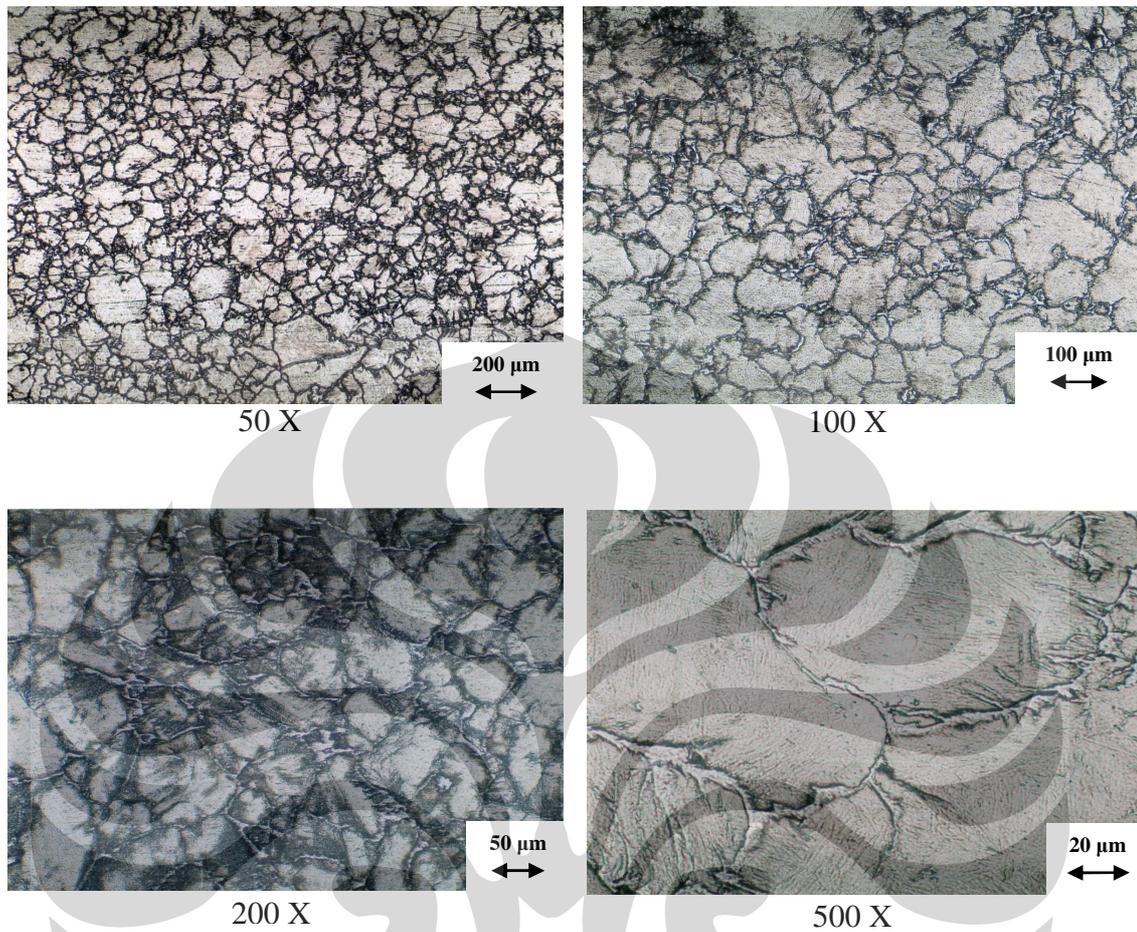
Measurement results

File Edit View

A Text Arrow Ruler Department New case Search case -Red +Red -Green +Green -Blue +Blue -Bright +Bright White Sharpen Max hist Max dyn Rotate Flip

Penghitungan Ukuran Butir

## Sampel E, Kecepatan Pendinginan 9 °C/s



E-50-50-Bdtk(resize).jpg - Picsara - Database: Picsara demo database 8.6/Default

File Edit Video Image Database ROI Measurements View Help

Save Load Pan Full screen Magnify Compare

Freeze Hi-res Adjust

Distance Parallel Curve Area Radius Angle Count Blob Delete Clear Add Sub Save Result Print

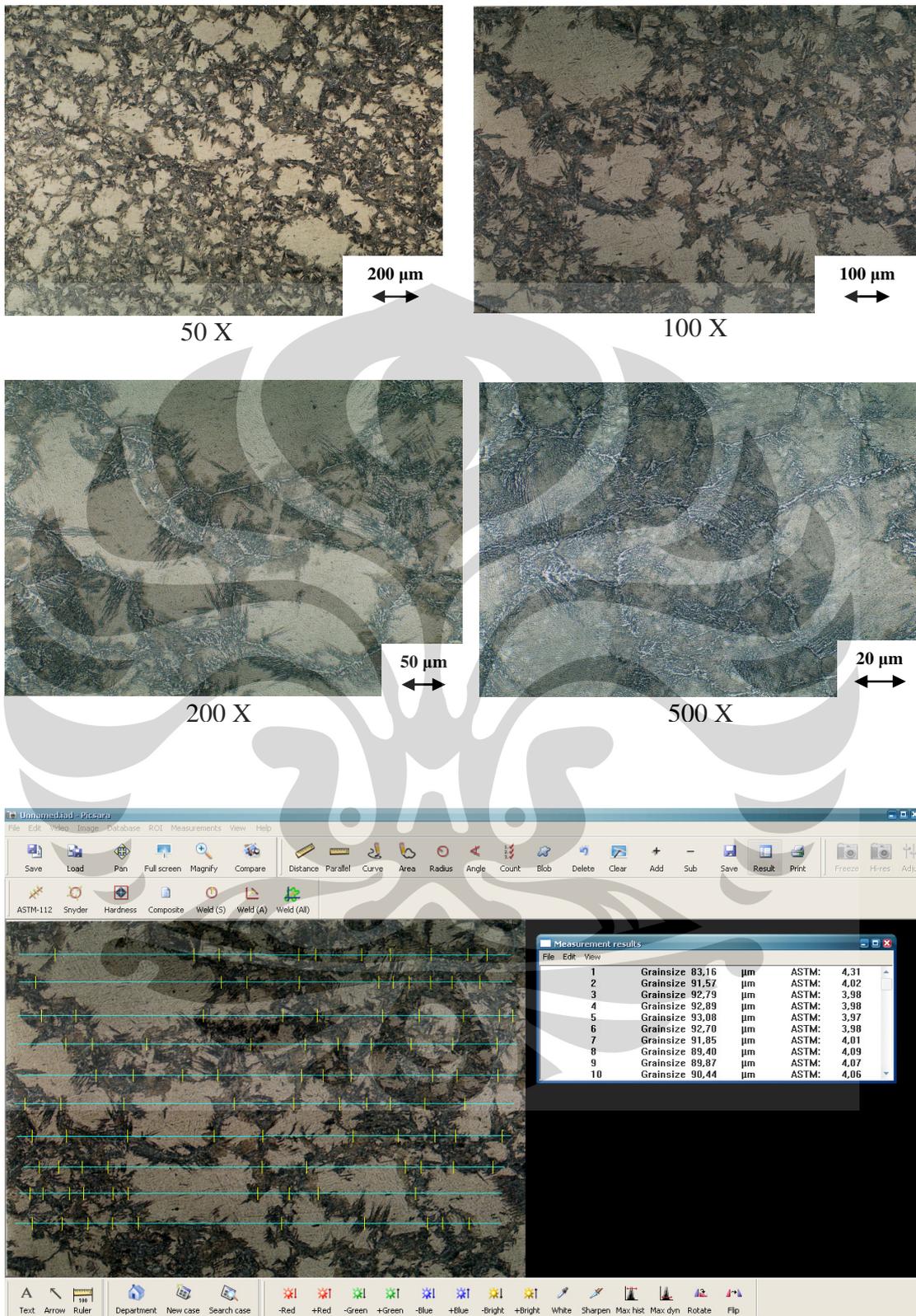
ASTM-112 Snyder Hardness Composite Weld (S) Weld (A) Weld (All)

Department New case Search case

| Measurement results |           |        |                  |
|---------------------|-----------|--------|------------------|
| File                | Edit      | View   |                  |
| 1                   | Grainsize | 108,25 | µm    ASTM: 3,52 |
| 2                   | Grainsize | 85,46  | µm    ASTM: 4,22 |
| 3                   | Grainsize | 87,83  | µm    ASTM: 4,14 |
| 4                   | Grainsize | 108,37 | µm    ASTM: 3,52 |
| 5                   | Grainsize | 74,54  | µm    ASTM: 4,63 |
| 7                   | Grainsize | 101,82 | µm    ASTM: 3,70 |
| 8                   | Grainsize | 97,32  | µm    ASTM: 3,84 |
| 9                   | Grainsize | 92,21  | µm    ASTM: 4,00 |
| 10                  | Grainsize | 86,96  | µm    ASTM: 4,17 |

## Penghitungan Ukuran Butir

## Sampel F, Kecepatan Pendinginan 7,7 °C/s



## Penghitungan Ukuran Butir



**LAMPIRAN 3**  
**PERALATAN PENDUKUNG**

### LAMPIRAN III PERALATAN PENDUKUNG

Gambar sampel uji



Gambar sampel uji setelah canai panas



Gambar sampel uji setelah preparasi metalografi



Mesin canai



*Waterjet Spray*



*Heating Jacket*



### Susunan peralatan kerja



### Komputer Data Akuisisi

