

**PERMODELAN KINETIKA PERTUMBUHAN BUTIR BAJA
HSLA 0,037% Nb PADA KONDISI
NON-ISOTERMAL SETELAH PROSES CANAI PANAS**

TESIS

Oleh

WAHYUAJI NAROTTAMA PUTRA

06 06 00 38 84



**PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL
PROGRAM PASCASARJANA BIDANG ILMU TEKNIK
UNIVERSITAS INDONESIA
GENAP 2007/2008**

**PERMODELAN KINETIKA PERTUMBUHAN BUTIR BAJA
HSLA 0,037% Nb PADA KONDISI
NON-ISOTERMAL SETELAH PROSES CANAI PANAS**

TESIS

Oleh

WAHYUAJI NAROTTAMA PUTRA

06 06 00 38 84

**TESIS INI DIAJUKAN UNTUK MELENGKAPI SEBAGIAN
PERSYARATAN MENJADI MAGISTER TEKNIK**

**PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL
PROGRAM PASCASARJANA BIDANG ILMU TEKNIK
UNIVERSITAS INDONESIA
GENAP 2007/2008**

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa tesis dengan judul:

PERMODELAN KINETIKA PERTUMBUHAN BUTIR BAJA HSLA 0,037% Nb PADA KONDISI NON-ISOTHERMAL SETELAH PROSES CANAI PANAS

Yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Magister Teknik pada Kekhususan Desain Manufaktur Program Studi Teknik Metalurgi dan Material Program Pascasarjana Universitas Indonesia, sejauh yang saya ketahui bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari tesis yang sudah dipublikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun di Perguruan Tinggi atau Instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Depok 08 Juli 2008

Wahyuaji Narottama Putra

NPM. 0606003884

PENGESAHAN

Tesis dengan judul:

PERMODELAN KINETIKA PERTUMBUHAN BUTIR BAJA HSLA 0,037% Nb PADA KONDISI NON-ISOTHERMAL SETELAH PROSES CANAI PANAS

Dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Magister Teknik pada Kekhususan Desain Manufaktur Program Studi Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia. Tesis ini telah diujikan pada sidang ujian tesis pada tanggal 8 Juli 2008 dan dinyatakan memenuhi syarat / sah sebagai tesis pada Departemen Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Depok, 8 Juli 2008

Pembimbing I

Pembimbing II

Prof. Dr. Ir. Eddy S Siradj, M.Eng

Ir. Myrna Ariati, MS

NIP. 131 286 214

NIP. 131 671 540

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

Prof. Dr. Ir. Eddy S. Siradj, M.Eng

Ir. Myrna Ariati, MS

Selaku dosen pembimbing yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberi pengarahan, diskusi serta bimbingan serta persetujuan sehingga tesis ini dapat diselesaikan dengan baik.



Wahyuaji Narottama Putra
NPM 0606003884
Departemen Teknik Metalurgi dan Material

Dosen Pembimbing
I. Prof. Dr. Ir. Eddy S.S, M.Eng
II. Ir. Myrna Ariati, MS

**PERMODELAN KINETIKA PERTUMBUHAN BUTIR BAJA HSLA
0,037% Nb PADA KONDISI NON-ISOTERMAL SETELAH PROSES
CANAI PANAS**

ABSTRAK

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 0,037% Nb hasil coran kontinyu, yang dipanaskan pada temperatur 1150⁰C dengan variasi kecepatan pendinginan yang akan menghasilkan besar butir akhir yang berbeda. Data ukuran butir ini digunakan untuk memodifikasi persamaan kinetika pertumbuhan butir isothermal Sellars.

Persamaan Sellars, dimodifikasi dengan penambahan variabel kecepatan pendinginan dan penyesuaian konstanta, sehingga dihasilkan persamaan kinetika pertumbuhan butir dalam keadaan non-isothermal / kontinyu. Untuk baja HSLA 0,037% Nb, didapat penyesuaian konstanta B sebesar 1×10^{15} , dan nilai m untuk variabel kecepatan pendinginan sebesar 11.

**Kata kunci: Baja HSLA-Nb, Pertumbuhan Butir Non-Isotermal,
Kinetika Pertumbuhan Butir Sellars, Permodelan.**

Wahyuaji Narottama Putra
NPM 0606003884
Metallurgical & Material Engineering Dept.

Counsellors
I. Prof. Dr. Ir. Eddy S.S, M.Eng
II. Ir. Myrna Ariati, MS

**GRAIN GROWTH KINETIC MODELLING OF HSLA 0,037% Nb
STEEL ON NON-ISOTHERMAL CONDITION AFTER HOT ROLLING
PROCESS**

ABSTRACT

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 kinetics after rolling.

HSLA-Nb steels product of continuous casting is used for this research. The steel is reheated at 1150⁰C, 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 0,037% Nb steels, the adjustment of B constant is 1×10^{15} , and m value for cooling rate variable is 11.

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

DAFTAR ISI

| | |
|---|-----|
| PERNYATAAN KEASLIAN TESIS | ii |
| PENGESAHAN | iii |
| UCAPAN TERIMA KASIH | iv |
| ABSTRAK | v |
| ABSTRACT | vi |
| DAFTAR ISI | vii |
| DAFTAR GAMBAR | ix |
| DAFTAR TABEL | xi |
| | |
| BAB I PENDAHULUAN | 1 |
| I.1. LATAR BELAKANG | 1 |
| I.2. TUJUAN | 3 |
| I.3. RUANG LINGKUP | 4 |
| | |
| BAB II LANDASAN TEORI | 6 |
| II.1. MEKANISME PENGUATAN PADA MATERIAL LOGAM | 6 |
| II.2. MEKANISME PENGUATAN DENGAN PENGHALUSAN BUTIR | 6 |
| II.3. PROSES TERMOMEKANIK (<i>THERMOMECHANICAL PROCESS</i>) | 8 |
| II.4. PROSES CANAI PANAS | 9 |
| II.5. PROSES RECOVERY, REKRISTALISASI & PERTUMBUHAN BUTIR | 11 |
| II.5.1. Proses Recovery | 11 |
| II.5.2. Proses Rekristalisasi | 12 |
| II.5.3. Proses Pertumbuhan Butir | 14 |
| II.6. PERTUMBUHAN BUTIR AUSTENIT DALAM KONDISI ISOTERMAL | 14 |
| II.7. BAJA HSLA | 17 |
| II.8. BAJA HSLA-Nb | 21 |
| II.9 MEKANISME PENGUATAN BAJA HSLA-Nb | 22 |
| II.9.1. Penguatan Presipitat | 22 |
| II.9.2. Penghalusan Butir Ferit | 24 |
| II.10. PERBANDINGAN PENELITIAN | 26 |

| | |
|--|----|
| BAB III METODOLOGI PENELITIAN | 28 |
| III.1. BAHAN PENLITIAN | 28 |
| III.2. PROSEDUR PENELITIAN | 28 |
| III.2.1. Pembuatan Benda Uji | 29 |
| III.2.2. Proses Pemanasan | 29 |
| III.2.3. Proses Canai Panas | 30 |
| III.2.4. Proses Pendinginan | 30 |
| III.2.5. Preparasi, Pengujian Metalografi dan Pengamatan Mikrostruktur | 30 |
| III.2.6. Penghitungan Besar Butir Austenit | 31 |
| III.3. METODOLOGI PENELITIAN | 32 |
| | |
| BAB IV HASIL PENELITIAN | 33 |
| IV.1. EVALUASI SAMPEL UJI BAJA HSLA-Nb | 33 |
| IV.2. FOTO MIKRO DAN GRAFIK AKUISISI | 34 |
| IV.3. PERHITUNGAN UKURAN BUTIR AUSTENIT | 39 |
| IV.4. HUBUNGAN ANTARA KECEPATAN PENDINGINAN DAN UKURAN BUTIR AUSTENIT | 40 |
| | |
| BAB V PEMBAHASAN | 41 |
| V.1. PERBANDINGAN PERTUMBUHAN BUTIR AUSTENIT DALAM KEADAAN ISOTERMAL DENGAN NON-ISOTERMAL | 41 |
| V.2. PENYESUAIAN PERSAMAAN UNTUK KONDISI NON-ISOTERMAL | 43 |
| | |
| BAB VI KESIMPULAN | 46 |
| | |
| DAFTAR ACUAN | 47 |
| DAFTAR PUSTAKA | 49 |
| LAMPIRAN | 52 |

DAFTAR GAMBAR

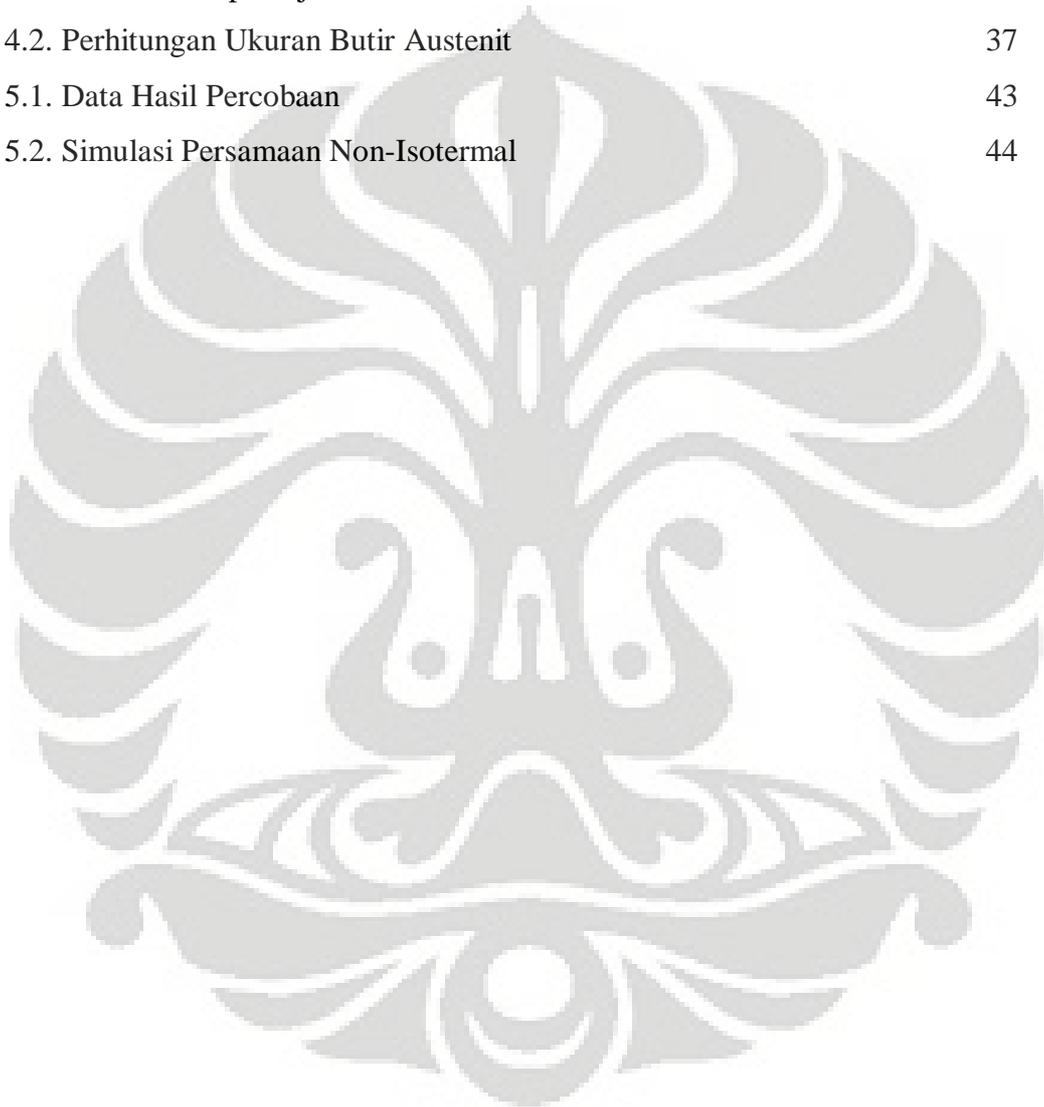
| | |
|--|----|
| Gambar 1.1. Thermomechanical Control Process | 3 |
| Gambar 2.1. Ilustrasi Batas Butir dan Pergerakan Dislokasi | 6 |
| Gambar 2.2. Perubahan Ukuran Butir Selama Proses Termomekanik | 7 |
| Gambar 2.3. Ilustrasi Tegangan Pada Proses Canai | 8 |
| Gambar 2.4. Ilustrasi Pertumbuhan Butir Saat Canai Panas | 9 |
| Gambar 2.5. Skematis Pengerolan Pada Thermomechanical Processing | 10 |
| Gambar 2.6. Skematis Proses Recovery, Rekrystalisasi dan Pertumbuhan Butir | 10 |
| Gambar 2.7. Pembentukan Sub-butir | 11 |
| Gambar 2.8. Perbandingan Antara Rekrystalisasi Dinamik dan Statik | 12 |
| Gambar 2.9. Pergerakan Batas Butir | 14 |
| Gambar 2.10. Pengaruh Partikel Fasa Kedua Pada Pertumbuhan Butir | 14 |
| Gambar 2.11. Pertumbuhan Butir Austenit Pada Temperatur Konstan | 15 |
| Gambar 2.12. Proses Pertumbuhan Butir Sejalan Peningkatan Waktu | 16 |
| Gambar 2.13. Kelarutan Beberapa Carbonitrida Pada Austenit | 19 |
| Gambar 2.14. Pengaruh Ukuran Partikel NbCN Terhadap Yield Strength | 21 |
| Gambar 2.15. Hubungan Dislokasi dan Partikel Presipitat | 21 |
| Gambar 2.16. Pengaruh Beberapa Unsur Paduan Terhadap Ukuran Butir Ferit | 22 |
| Gambar 2.17. Profil Time-Temperatur Untuk Pengerolan Terkendali | 24 |
| Gambar 2.18. Evolusi Ukuran Butir Selama Deformasi | 24 |
| Gambar 2.19. Pengendapan dan Kelarutan Vanadium dan NbCN Pada Austenit | 25 |
| Gambar 3.1. Ilustrasi Benda Uji dan Pemasangan Termokopel | 28 |
| Gambar 3.2. Diagram Alir Penelitian | 31 |
| Gambar 4.1. Foto Mikro dan Grafik Akuisisi Sampel 2 | 33 |
| Gambar 4.2. Foto Mikro dan Grafik Akuisisi Sampel 3 | 34 |
| Gambar 4.3. Foto Mikro dan Grafik Akuisisi Sampel 4 | 34 |
| Gambar 4.4. Foto Mikro dan Grafik Akuisisi Sampel 6 | 35 |
| Gambar 4.5. Foto Mikro dan Grafik Akuisisi Sampel 7 | 35 |
| Gambar 4.6. Foto Mikro dan Grafik Akuisisi Sampel 8 | 36 |
| Gambar 4.7. Foto Mikro dan Grafik Akuisisi Sampel 9 | 36 |
| Gambar 4.8. Hubungan Antara Kecepatan Pendinginan dan Ukuran Austenit | 39 |

| | |
|---|----|
| Gambar 5.1. Ilustrasi Variabel Untuk Pendinginan Dalam Keadaan Kontinyu | 42 |
| Gambar 5.2. Perbandingan Hasil Percobaan dengan Model Persamaan | 44 |
| Gambar 5.3. Hasil Penyesuaian Model Persamaan | 45 |



DAFTAR TABEL

| | |
|--|----|
| Tabel 1.1. Komposisi Kimia Baja HSLA-Nb Dalam Persen Berat | 4 |
| Tabel 2.1. Perbandingan Penelitian Tentang Penghalusan Butir | 25 |
| Tabel 3.1. Komposisi Kimia Baja HSLA-Nb Dalam Persen Berat | 27 |
| Tabel 4.1 Evaluasi Sampel Uji | 32 |
| Tabel 4.2. Perhitungan Ukuran Butir Austenit | 37 |
| Tabel 5.1. Data Hasil Percobaan | 43 |
| Tabel 5.2. Simulasi Persamaan Non-Isotermal | 44 |



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Hingga saat ini, masih diinginkan dan dibutuhkan suatu material yang memiliki kekuatan (*strength*) yang tinggi. Hal ini disebabkan karena apabila material tersebut memiliki kekuatan yang tinggi, maka spektrum penggunaannya akan sangat luas dalam kehidupan sehari – hari. Terlebih bila dikombinasikan dengan massa jenis yang ringan, kemudahan dalam pembuatan (*manufacturing*) dan perakitan (*assembly*). Untuk memenuhi kebutuhan tersebut, terutama dalam material logam, terdapat beberapa metode untuk meningkatkan kekuatannya. Salah satu metode yang banyak digunakan adalah metode penghalusan ukuran butir, dan material yang biasa digunakan untuk metode ini adalah baja HSLA (*High Strength Low Alloy*).

Baja HSLA, yaitu baja dengan penambahan unsur – unsur paduan tertentu dalam jumlah yang kecil (<0,15%) yang mampu menghasilkan sifat mekanis yang baik melalui penguatan presipitat dan penghalusan butir.⁽¹⁾ Baja ini merupakan baja dengan nilai tambah (*added value steel*) tinggi dan sudah bisa diproduksi di Indonesia. Tetapi jika dibandingkan dengan produk luar (China), harga jual produk dalam negeri masih sangat tinggi, sehingga masih diperlukan efisiensi proses produksi. Oleh karena itu, pengembangan-pengembangan dari produk yang sudah ada harus tetap dilakukan.

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.⁽¹⁾

Selain pengembangan *microalloy*, hal penting lain yang harus diperhatikan untuk mendapatkan baja HSLA dengan sifat mekanis yang baik yaitu pengontrolan terhadap proses pembentukan, salah satunya yaitu kontrol mikrostruktur. Sifat mekanis yang tinggi dari baja

HSLA bergantung dari mikrostruktur akhir yang terbentuk. Pengontrolan mikrostruktur yang baik merupakan cara yang efektif untuk mendapatkan baja HSLA dengan sifat mekanis yang baik. Struktur butir yang diinginkan pada mikrostruktur akhir bergantung pada butir yang terbentuk selama proses pemanasan awal (*reheating*), dimana untuk mendapatkan butir ferit yang halus, maka harus terbentuk butir austenit yang berukuran kecil saat proses pemanasan awal. Untuk itu dibutuhkan suatu proses yang dapat mengontrol mikrostruktur baja HSLA selama proses pemanasan awal (*reheating*), canai panas (*hot rolling*), serta pendinginan (transformasi akhir). Proses tersebut dikenal dengan nama *Thermomechanical Control Process* (TMCP).⁽²⁾

Salah satu parameter penting dalam mengontrol besar butir austenit pada saat proses TMCP adalah dengan mengontrol:

1. Temperatur
 2. Waktu tahan
 3. Besar deformasi canai panas
 4. Waktu tahan sebelum pendinginan
 5. Kecepatan pendinginan akhir
- } Saat reheating
- } Untuk mengontrol pertumbuhan butir austenit setelah canai panas

Butir austenit yang terdeformasi setelah canai panas ini mula – mula akan ter-recovery, ter-rekristalisasi dan akhirnya akan tumbuh. Apabila butir austenit sempat bertumbuh menjadi besar, maka butir ferit akhir juga akan memiliki ukuran yang besar, dan sifat mekanisnya akan menurun.⁽³⁾ Oleh sebab itu, perlu suatu perhatian khusus pada pertumbuhan butir austenit setelah canai panas, agar didapat sifat mekanis yang maksimal. Untuk mengamati kinetika pertumbuhan butir dalam keadaan isothermal, dapat digunakan persamaan dari Beck⁽⁴⁾ dan Sellars⁽⁵⁾.

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

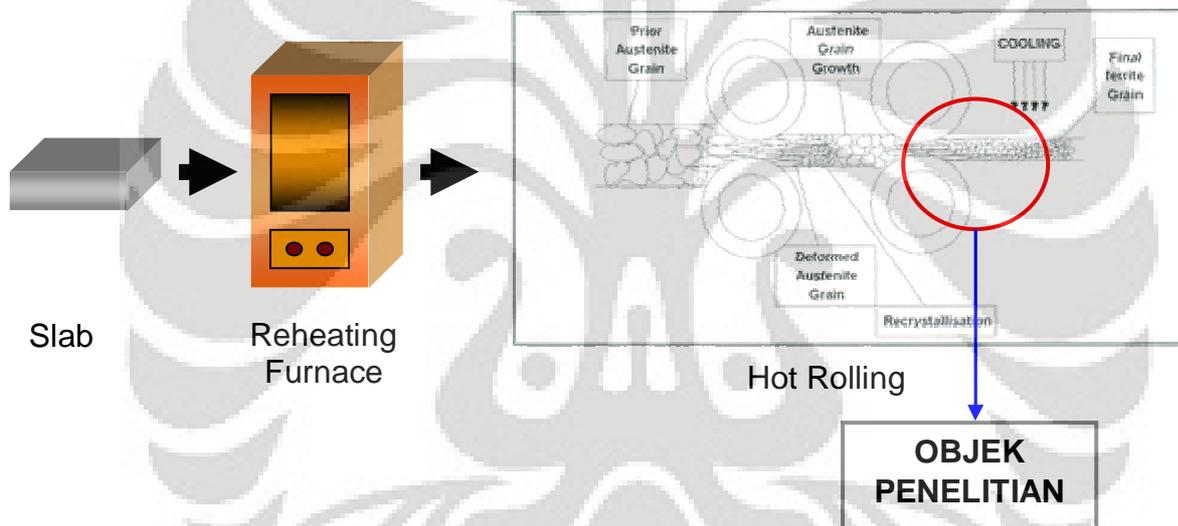
Dari permasalahan tersebut, maka penelitian ini dilakukan untuk mengamati kinetika pertumbuhan austenit pada baja HSLA-Nb dengan penambahan Cu dan Ni hasil coran kontinyu setelah dilakukan canai panas dengan pendekatan pendinginan non-isothermal. Kualitas material baja HSLA hasil canai panas ini dipengaruhi oleh beberapa faktor baik secara internal maupun eksternal. Faktor internal material antara lain :

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

Sedangkan faktor eksternal material antara lain:

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

Diharapkan dari pendekatan ini, dihasilkan suatu modifikasi persamaan kinetika pertumbuhan butir untuk keadaan non-isothermal, dan dapat membantu dalam aplikasinya di dunia industri.



Gambar 1.1. *Thermomechanical Control Process*

1.2 TUJUAN

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk:

1. Mengamati pertumbuhan butir austenit baja HSLA-Nb 0,037% Nb setelah canai panas, dalam keadaan pendinginan kontinyu
2. Mendapatkan data pertumbuhan butir selama pendinginan kontinyu
3. Membuat modifikasi persamaan kinetika pertumbuhan butir Sellars untuk keadaan pendinginan kontinyu.

1.3 RUANG LINGKUP

Ruang lingkup penelitian meliputi :

1. Menggunakan benda uji baja HSLA-Nb hasil coran kontinu, dengan komposisi seperti pada Tabel 1.1.

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

| Komposisi | 92397 U | Komposisi | 92397 U |
|-----------|---------|-----------|---------|
| Ti | 0.002 | Cu | 0.052 |
| C | 0.048 | Nb | 0.037 |
| Si | 0.266 | V | 0.003 |
| Mn | 0.706 | Ni | 0.022 |
| P | 0.010 | Cr | 0.018 |
| S | 0.007 | N | 0.004 |
| Al | 0.037 | Cu+Cr | 0.092 |

2. Melakukan pemanasan isothermal (*reheating*) pada temperatur 1150⁰C.
3. Melakukan canai panas dengan deformasi 30%
4. Proses pendinginan kontinyu dengan variabel kecepatan pendinginan
5. Pengamatan butir austenit menggunakan mikroskop optik
6. Pengukuran besar butir austenit menggunakan Metode Perbandingan dan merujuk pada standar ASTM E112.

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1. MEKANISME PENGUATAN PADA MATERIAL LOGAM

Bidang rekayasa metalurgi dan material, sering dibutuhkan mendesain suatu paduan yang memiliki kekuatan tinggi, keuletan dan ketangguhan. Biasanya, keuletan dikorbankan ketika suatu paduan diperkuat.

Penting untuk dimengerti bahwa mekanisme penguatan adalah hubungan antara pergerakan dislokasi dan sifat mekanik dari logam. Karena deformasi plastis makroskopis berhubungan dengan pergerakan dislokasi dalam jumlah besar, kemampuan logam untuk diubah secara plastis tergantung pada kemampuan dislokasi untuk dapat bergerak. Dengan mengurangi pergerakan dislokasi, kekuatan mekanik dapat ditingkatkan, dimana disebabkan energi mekanik yang dibutuhkan untuk membuat deformasi plastis akan semakin besar. Sebaliknya, apabila pergerakan dislokasi tidak ada yang menahan, logam akan lebih mudah untuk terdeformasi, dan akan menjadi semakin lunak dan lemah.

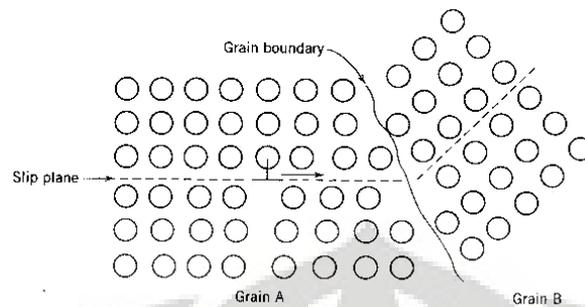
Kesimpulannya, seluruh mekanisme penguatan pada logam, berdasar pada prinsip sederhana yaitu: menahan atau menghalangi pergerakan dislokasi, akan membuat material menjadi lebih keras dan lebih kuat. Mekanisme penguatan yang sering digunakan saat ini adalah:⁽³⁾

- penggunaan paduan (*alloying*)
- melalui perlakuan panas (*heat treatment*)
- pengerasan regangan (*strain hardening*)
- penghalusan butir (*grain size reduction*)

2.2. MEKANISME PENGUATAN DENGAN PENGHALUSAN BUTIR

Ukuran dari butir, atau diameter butir rata – rata, dalam logam polikristal mempengaruhi sifat mekanisnya. Butir yang bersebelahan biasanya memiliki orientasi kristalografi yang berbeda dan tentunya menjadi batas butir seperti Gambar 2.1. 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. Karena dua butir tersebut memiliki orientasi yang berbeda, dislokasi yang menuju butir B harus merubah arah pergerakannya. Hal ini semakin sulit ketika misorientasi kristalografinya meningkat
2. Ketidaksamaan susunan atom dalam area batas butir akan menghasilkan berubahnya bidang slip dari butir satu ke butir lainnya.

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 sesuai dengan:

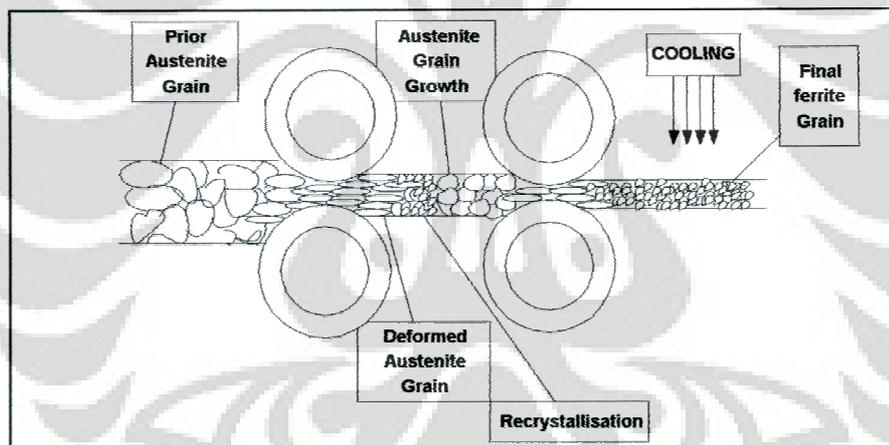
$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2} \quad (2.1)$$

Persamaan ini disebut dengan persamaan Hall Petch⁽³⁾, 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.

Ukuran butir dapat diatur oleh laju solidifikasi dari fasa cair, dan juga oleh deformasi plastis yang diikuti dengan perlakuan panas yang sesuai. Juga harus diperhatikan bahwa penghalusan butir meningkatkan tidak hanya kekuatan namun juga ketangguhan untuk banyak paduan.⁽³⁾

2.3. PROSES TERMOMEKANIK (*THERMOMECHANICAL PROCESS*)

Proses termomekanik merupakan suatu proses untuk mengontrol mikrostruktur suatu material selama proses pembentukannya untuk 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 ini sangat penting dalam menghasilkan sifat mekanis benda jadi sebab dengan pemanasan awal dapat diprediksi mikrostruktur akhir yang terbentuk. Ilustrasi 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 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 mobilitas akan meningkat sehingga kemampuan butir untuk berdifusi ke butir lainnya menjadi semakin besar pula.



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

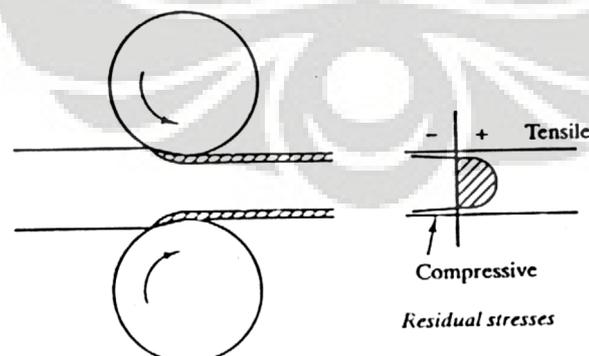
Pengontrolan butir austenit selanjutnya terjadi setelah proses canai panas, dimana jeda waktu antara canai panas pertama dan kedua, atau jeda waktu antara canai panas dengan pendinginan, akan memberikan kesempatan pada butir austenit untuk mengalami recovery, rekristalisasi dan bahkan pertumbuhan butir.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

2.4. 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 kontinyu. 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.⁽⁷⁾

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.⁽⁸⁾

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 2.3. Tegangan – tegangan inilah yang dikenal dengan tegangan sisa. Tegangan sisa sangat berpengaruh pada sifat – sifat material dan kinerja dari material itu sendiri.



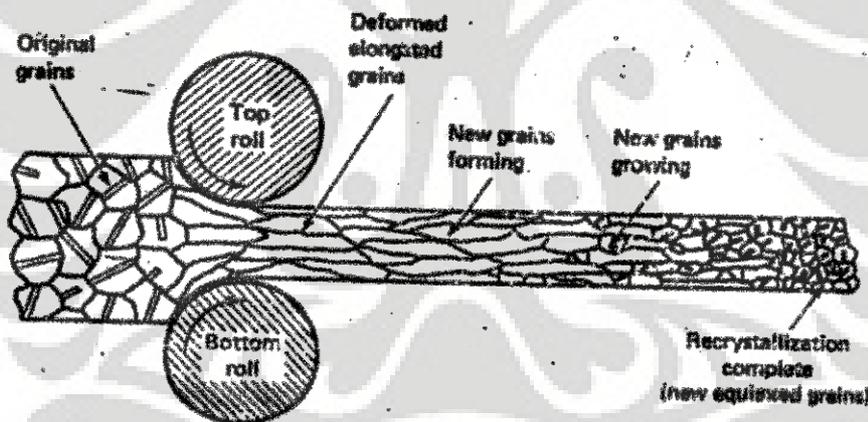
Gambar 2.3. Ilustrasi Tegangan Pada Proses Canai⁽⁸⁾

Secara umum, 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.⁽⁸⁾

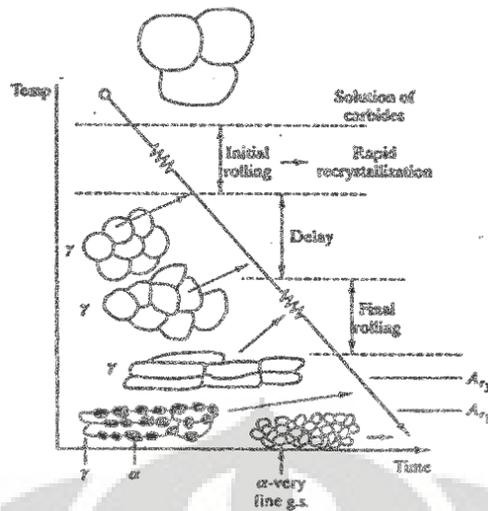
Proses canai panas merupakan suatu proses dimana proses deformasi langsung diimbangi dengan proses perlakuan panas, sehingga tidak terjadi tegangan sisa. Yang terjadi adalah proses pembentukan dislokasi dan rekristalisasi, sehingga akan didapat material dengan sifat dan kinerja yang relatif lebih baik.⁽⁹⁾

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 muncul. 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

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 themomechanical processing, biasanya canai panas merupakan tahap pertama yang nantinya akan diteruskan dengan proses canai dingin. Skematis dari thermomechanical processing dapat dilihat pada Gambar 2.5

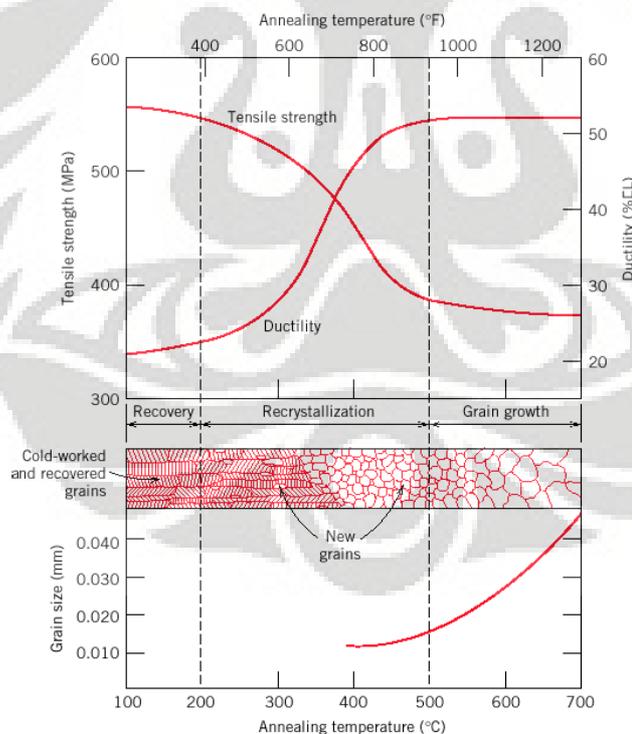


Gambar 2.5. Skematis pengerolan pada Thermomechanical Processing⁽⁸⁾

2.5. PROSES RECOVERY, REKRISTALISASI DAN PERTUMBUHAN BUTIR

2.5.1. Proses Recovery

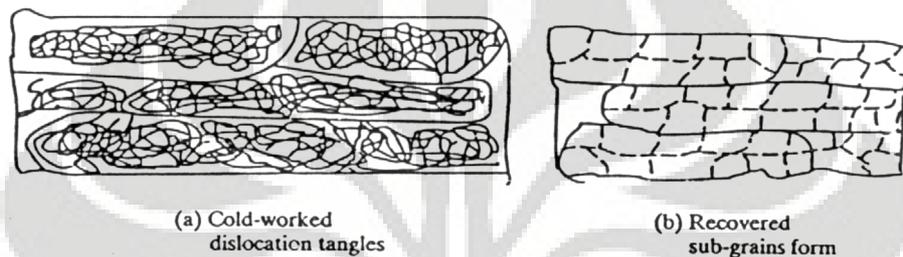
Proses recovery adalah proses pertama yang terjadi setelah deformasi. Pada tahapan ini tidak ada perubahan yang cukup berarti pada sifat mekanis dari material seperti yang terlihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6. Skematis Proses Recovery, Rekrystalisasi 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. ($2 - 3^0$ 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

2.5.2. Rekristalisasi

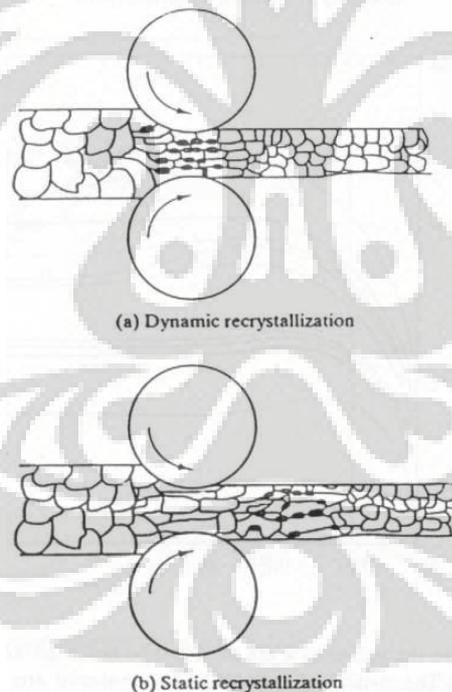
Ketika tahap recovery akan berakhir, pembentukan inti dari butir baru akan mulai terjadi. Sama seperti proses solidifikasi, rekristalisasi adalah proses transformasi nukleasi dan pertumbuhan butir. Inti dari butir baru terjadi dari bergabungnya sub-butir dan permukaan untuk nukleasi heterogen adalah cacat mikrostruktur seperti permukaan baats butir dan inklusi. Butir yang baru tumbuh merupakan butir yang bebas regangan (strain-free) dan terikat dengan batas butir bersudut besar yang memiliki moilitas 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 tahan dan komposisi dari material. Ini didasarkan pada hukum rekrsitalisasi⁽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

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.

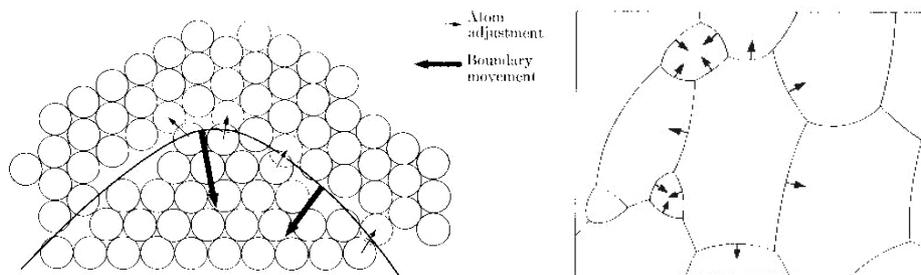
2.5.3. Pertumbuhan Butir

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⁾

2.6. PERTUMBUHAN BUTIR AUSTENIT DALAM KONDISI ISOTERMAL

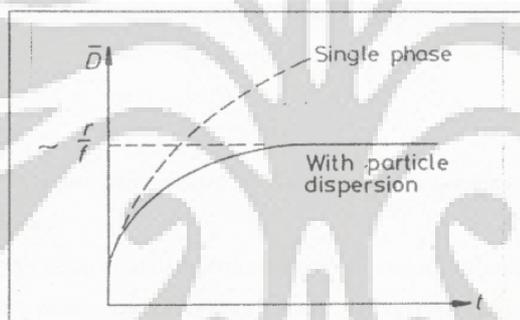
Pertumbuhan butir terjadi karena adanya pembesaran butir tertentu dan terdifusinya butir yang lebih kecil. Batas butir memiliki atom-atom dengan energi bebas yang lebih tinggi daripada atom-atom yang terdapat dalam butir. Agar tercapai kondisi yang stabil, maka atom-atom pada batas butir mengurangi energi 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



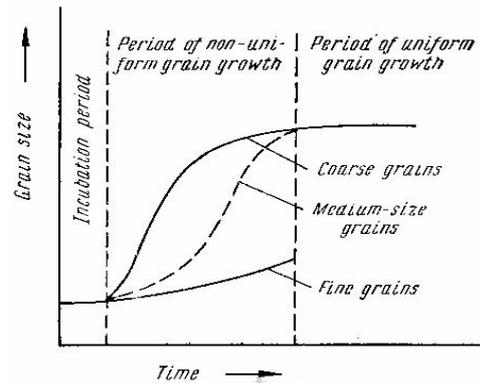
Gambar 2.9. Pergerakan Batas Butir⁽¹³⁾

Butir austenit muncul secara langsung begitu terjadi proses transformasi dari perlit ke austenit. Ukurannya tergantung pada jumlah inti yang terbentuk sesuai waktu dan kecepatan pertumbuhan. Semakin banyak fasa karbida yang tersebar semakin kecil ukuran austenit²⁾, hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.10.



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. Ilustrasinya dapat dilihat pada Gambar 2.11. 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 pada temperatur konstan⁽²⁾

Untuk menentukan ukuran butir austenit selama pertumbuhan normal dibawah kondisi anil isothermal dapat digunakan persamaan yang dihasilkan dari percobaan Beck⁽⁴⁾, 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 dkk⁽⁵⁾ telah menganalisa data pertumbuhan butir pada baja C-Mn dan dapat menemukan persamaan untuk menghitung nilai konstanta C diatas, yaitu:

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

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.⁽⁴⁾

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.

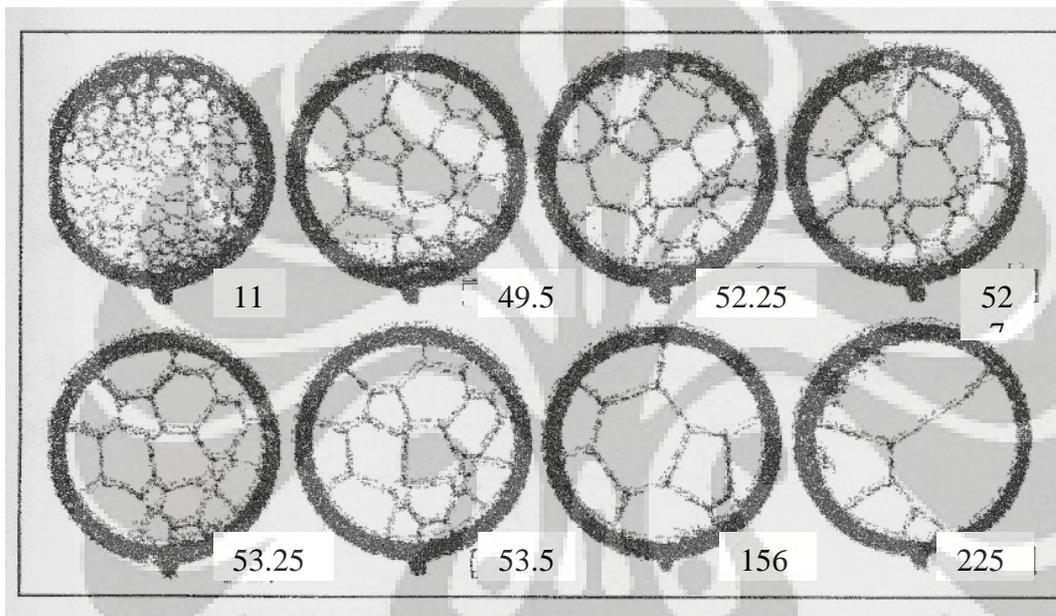
Penambahan waktu akan meningkatkan jarak antar butir sesuai persamaan⁽¹⁵⁾ :

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

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

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

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, terlihat pada Gambar 2.12.



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

2.7. 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 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 (*carbonitride*). 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:

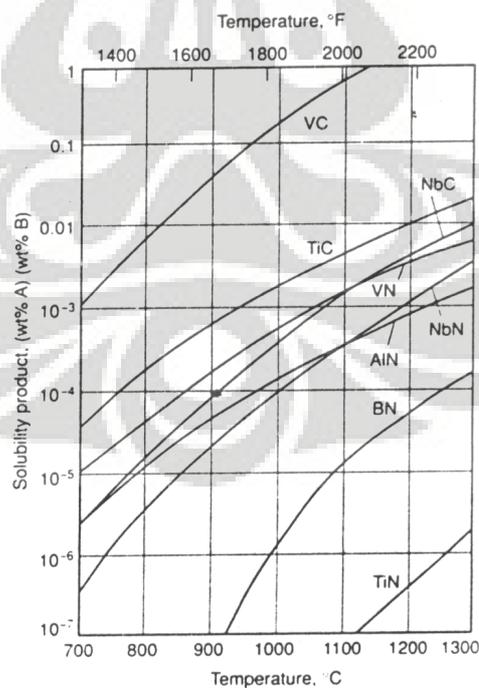
1. Karbon (C)

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 oleh¹⁾:

- 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. menunjukkan kelarutan dari beberapa presipitat dalam austenit terhadap tempepratur.



Gambar 2.13. Kelarutan beberapa *carbonitride* dalam austenit ⁽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 0,35%. 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)

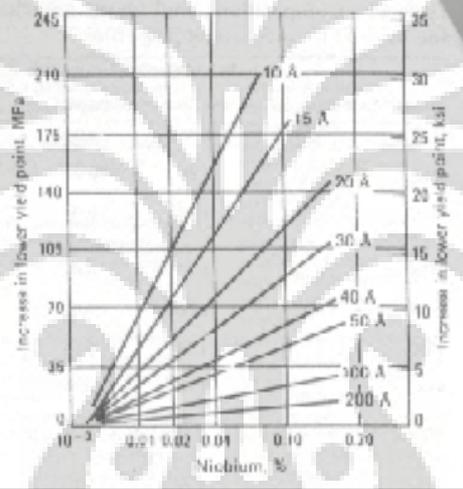
Vanadium berfungsi untuk meningkatkan kekuatan dari baja HSLA dengan mekanisme penguatan presipitat pada ferit serta memperhalus ukuran butir ferit.

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.

2.8. 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*. Pengaruh ukuran terhadap kekuatan dapat dilihat pada Gambar 2.14.



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

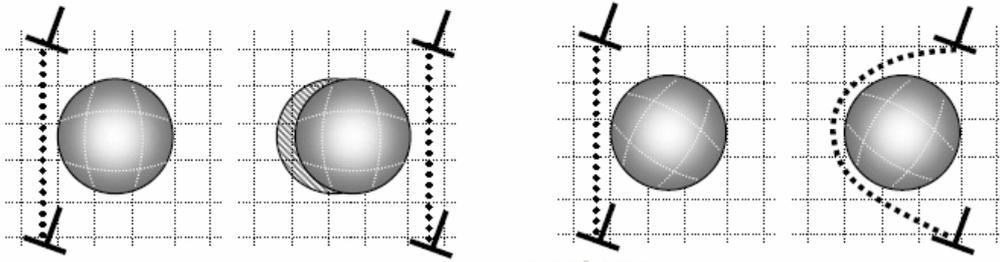
Penggunaan unsur paduan niobium dalam jumlah yang sangat kecil (*microalloyed*) lebih baik dibandingkan dengan vanadium sebab niobium dapat memberikan efek penguatan presipitat sekaligus penghalusan butir. Tiap penambahan 0,01% niobium akan meningkatkan kekuatan sebesar 35 - 40 MPa. Peningkatan kekuatan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

2.9. MEKANISME PENGUATAN BAJA HSLA-Nb

2.9.1. 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⁾, dapat dilihat pada Gambar 2.15



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.

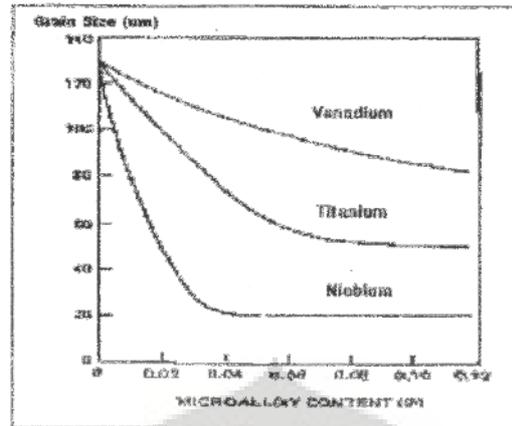
Irvine⁽⁵⁾ menemukan temperatur kelarutan presipitat $Nb(CN)$ melalui persamaan:

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

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 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 ferit⁽¹⁵⁾

2.9.2 Penghalusan Butir Ferit

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:

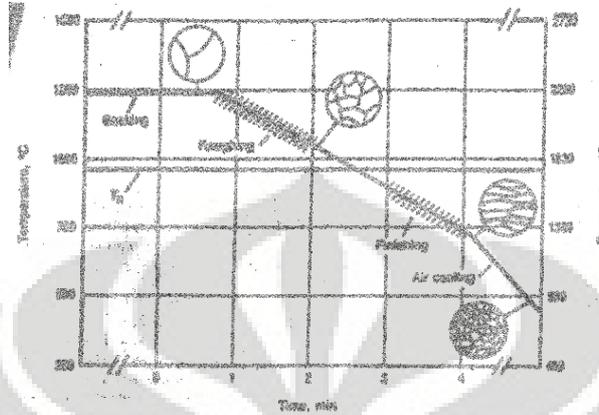
- Penambahan Titanium atau Aluminium untuk memperlambat pertumbuhan butir austenit ketika baja dipanaskan untuk deformasi panas atau perlakuan panas sesudahnya
- Pengerolan terkendali (*Controlled rolling*) dari *microalloyed steel* sehingga austenit bertransformasi menjadi ferit dengan ukuran butir 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*. Profil pengerolan terkendali dan evolusi ukuran butirnya dapat dilihat pada Gambar 2.17 dan 2.18.

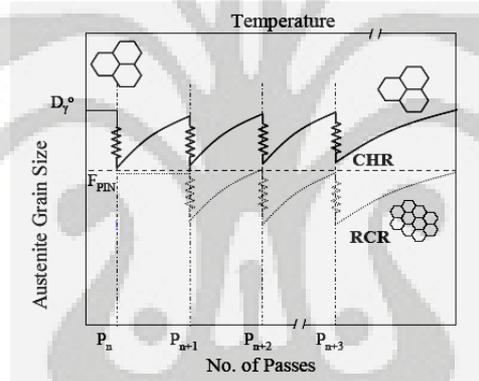
Pengurangan kadar karbon tidak hanya meningkatkan ketangguhan tetapi juga meningkatkan mampu las. Tiga metode pengerolan terkendali yaitu⁽¹⁾:

- 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.

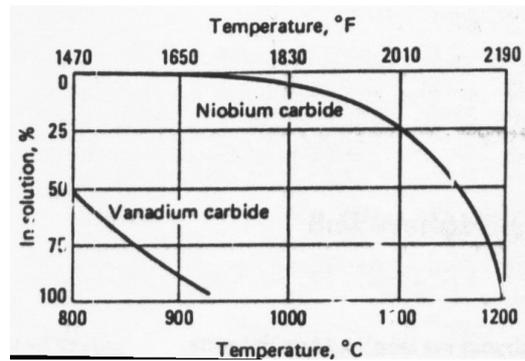


Gambar 2.17. Profil *time-temperature* untuk pengerolan terkendali⁽¹⁾



Gambar 2.18. Evolusi ukuran butir selama deformasi pada pengerolan terkendali konvensional dan rekristalisasi⁽¹⁶⁾

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, dapat dilihat pada Gambar 2.19. 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 austenit⁽¹⁾

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⁽¹⁵⁾.

2.10. PERBANDINGAN PENELITIAN

Banyak penelitian tentang peningkatan kekuatan material melalui mekanisme penghalusan butir dengan cara canai telah dilakukan. Beberapa penelitian dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Perbandingan Penelitian Tentang Penghalusan Butir

| Penelitian | Deskripsi | Peneliti |
|--|--|--------------------------|
| Effect of Hot Working on Austenite/Ferrite Transformations in HSLA Steels ⁽¹⁷⁾ | Meneliti efek pengerjaan panas pada ukuran butir ferit saat dilakukan perlakuan panas dengan temperatur isothermal | Yang H. Bae et al (2002) |
| Study on the Mechanism of Strengthening and Toughening Effect of Titanium Addition on HSLA Steel ⁽¹⁸⁾ | Meneliti efek penambahan titanium pada energi impak setelah ditahan isothermal | Fang Jian (2002) |

| | | |
|--|--|-------------------------|
| Local Austenite Grain Distribution in Hot Bar Rolling of AISI 4135 Steel ⁽¹⁹⁾ | Meneliti distribusi ukuran butir austenite setelah proses canai panas | Ho-Won Lee et al (2005) |
| Effect of Zirconium on Microstructures and Mechanical Properties of Microalloyed Steel ⁽²⁰⁾ | Meneliti efek penambahan Zr terhadap sifat mekanik setelah canai dan anil | T.H. Xi et al (2006) |
| Effect of TMCP Parameters on the Microstructure and Properties of an Nb-Ti Microalloyed Steels ⁽²¹⁾ | Meneliti efek temperatur canai dan temperatur pendinginan akhir terhadap mikrostruktur | Yanchun Liu (2005) |

Peneliti – peneliti tersebut menggunakan persamaan Sellars (persamaan 2.3) sebagai bagian dari penelitiannya, untuk memprediksi hubungan antara ukuran butir dengan sifat mekanis. Namun perlu diperhatikan bahwa ukuran butir akhir dalam penelitian tersebut adalah hasil pertumbuhan butir dalam keadaan isothermal.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. BAHAN PENELITIAN

Bahan yang digunakan sebagai benda uji dalam penelitian adalah baja HSLA-Nb hasil pengecoran kontinu Produksi PT Krakatau Steel dengan kode produksi 92397U yang memiliki komposisi terlihat pada Tabel 3.1. dibawah.

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

| Komposisi | 92397 U | Komposisi | 92397 U |
|-----------|---------|-----------|---------|
| Ti | 0.002 | Cu | 0.052 |
| C | 0.048 | Nb | 0.037 |
| Si | 0.266 | V | 0.003 |
| Mn | 0.706 | Ni | 0.022 |
| P | 0.010 | Cr | 0.018 |
| S | 0.007 | N | 0.004 |
| Al | 0.037 | Cu+Cr | 0.092 |

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

- Panjang : 100 mm
- Lebar : 50 mm
- Tebal : 10 mm

3.2. PROSEDUR PENELITIAN

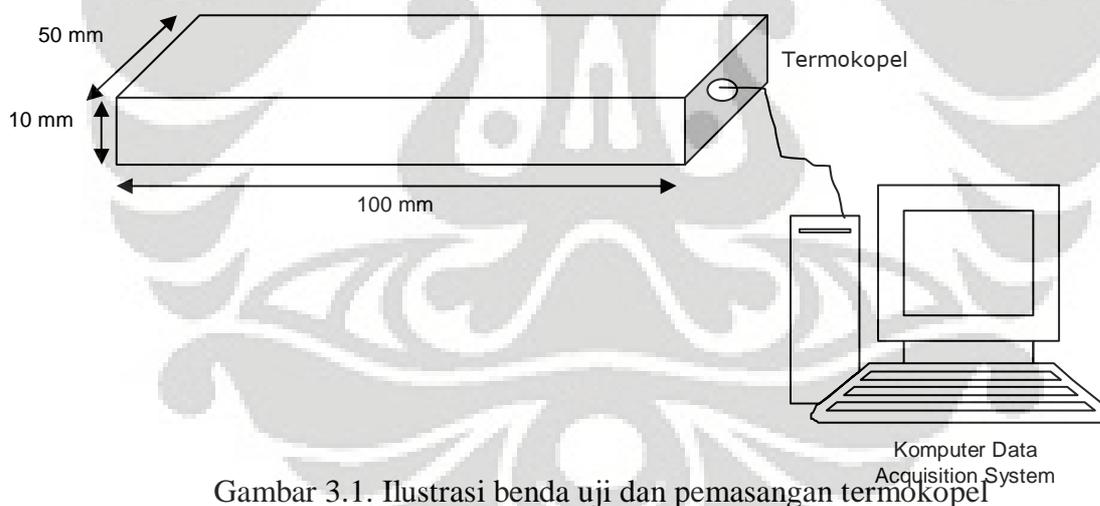
Prosedur yang dilakukan dalam penelitian ini antara lain adalah pembuatan benda uji, proses heating atau pemanasan benda uji, proses pencanaan panas, proses pendinginan udara

dan dilanjutkan dengan pendinginan menggunakan waterjet spray, preparasi uji metalografi dan pengamatan mikrostruktur, terakhir adalah penghitungan besar butir austenit.

3.2.1. 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

3.2.2. Proses Pemanasan

Proses pemanasan dilakukan dengan memasukkan benda uji ke dalam dapur Carbolite dengan temperatur 1150⁰C, kemudian ditunggu selama kurang lebih 5 – 10 menit supaya temperatur benda uji mencapai temperatur target secara homogen, yang dapat dilihat pada komputer. Temperatur 1150⁰C dipilih untuk meyakinkan seluruh presipitat telah larut, sesuai dengan persamaan Irvine⁽⁵⁾ yang telah dijelaskan pada bab landasan teori. 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 $\epsilon = 0,3$. 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 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 kipas angin dan kompresor udara. Pendinginan udara dilakukan selama sekitar 10 – 20 detik, 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.

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 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 jenuh asam pikrik (30 gram asam pikrik

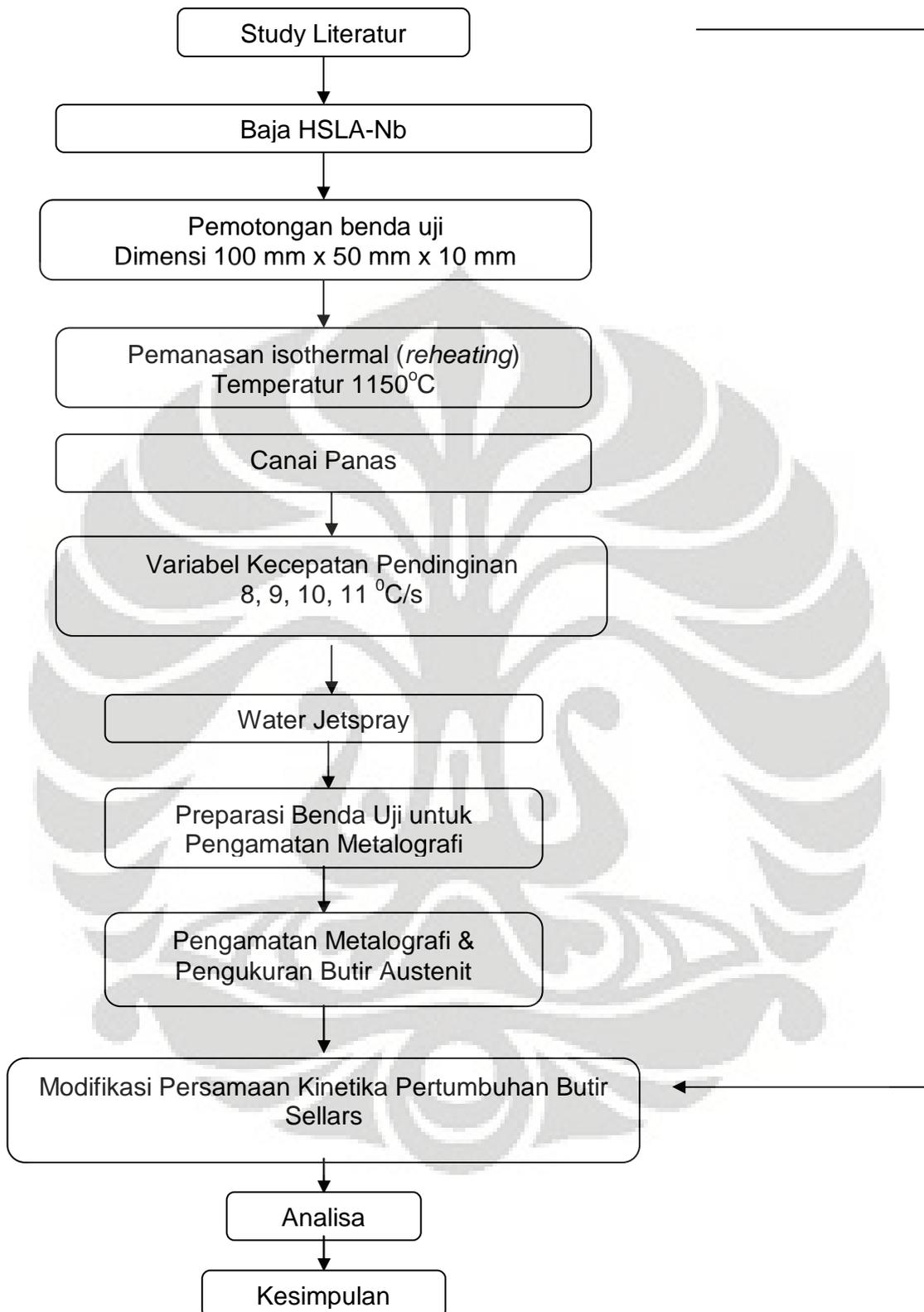
dalam 100 ml alkohol 96%) ditambah 2 tetes HCl dan pengetsaan dilakukan selama ± 2 menit⁽²¹⁾. Keseluruhan proses dilakukan di Laboratorium Metalografi dan HST di Departemen Metalurgi dan Material FTUI.

3.2.6. Penghitungan Besar Butir Austenit

Setelah didapat foto mikro dari benda uji, kemudian dilakukan penghitungan besar butir austenit. Penghitungan ini menggunakan Metode Perbandingan dan merujuk ke standar ASTM E112 secara manual. Hasil perhitungan juga diperiksa kembali dengan software Picsara.



3.3. METODOLOGI PENELITIAN



Gambar 3.2. Diagram Alir Penelitian

BAB IV

HASIL PENELITIAN

4.1. EVALUASI SAMPEL UJI BAJA HSLA-Nb

Dari prosedur penelitian, direncanakan penggunaan 10 buah sampel uji baja HSLA-Nb. Evaluasi sepuluh buah sampel uji dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1. Evaluasi Sampel Uji

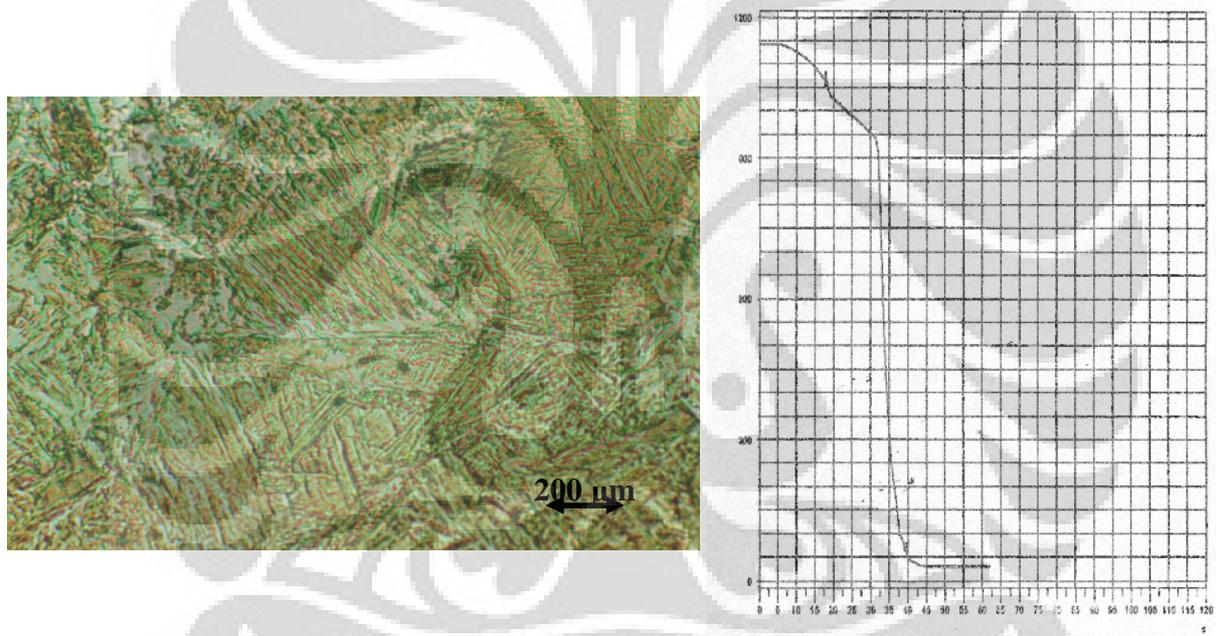
| Sampel No. | ΔT ($^{\circ}C$) | t (detik) | Kecepatan Pendinginan ($^{\circ}C/s$) | Keterangan |
|------------|----------------------------|-----------|---|------------|
| 1 | 70 | 5 | 14 | NG |
| 2 | 125 | 15 | 8,3 | OK |
| 3 | 215 | 27 | 7,9 | OK |
| 4 | 290 | 36 | 8 | OK |
| 5 | 350 | 60 | 6,8 | NG |
| 6 | 200 | 19 | 10,5 | OK |
| 7 | 240 | 22 | 10,9 | OK |
| 8 | 140 | 15 | 9,3 | OK |
| 9 | 150 | 17 | 8,8 | OK |
| 10 | 0 | 0 | - e - | NG |

Dari Tabel 4.1. diatas, terlihat ada tiga buah sampel yang tidak dapat dipakai untuk perhitungan selanjutnya. Sampel nomor satu tidak dapat dipakai karena memiliki jeda waktu (t) yang terlalu singkat (kurang lebih 5 detik), sehingga karakteristik kurva pendinginannya berbeda dengan sampel lainnya. Sampel nomor tiga tidak dapat dipakai karena jeda waktu (t) yang terlalu lama, sehingga temperatur turun melewati temperatur kritis dan terjadi perubahan fasa austenit menjadi ferit. Sedangkan pada sampel nomor sepuluh terjadi kesalahan teknis pada komputer sistem akuisisi data, sehingga tidak dapat mencatat perubahan temperatur dan waktu.

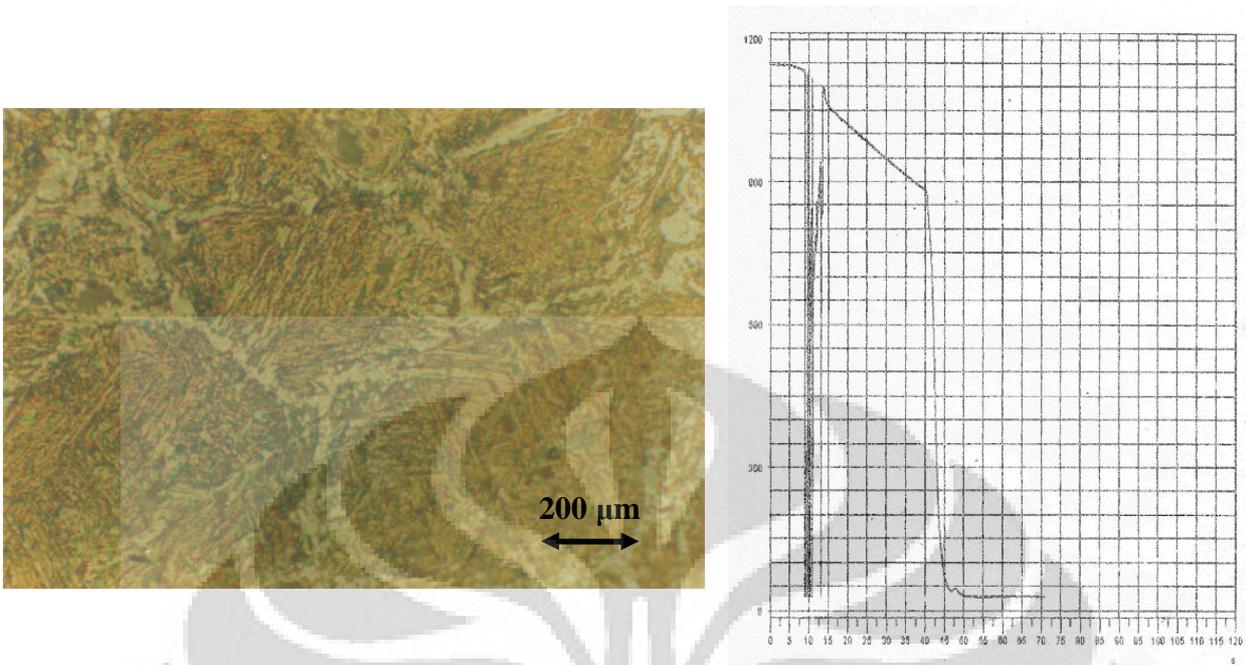
4.2. FOTO MIKRO DAN GRAFIK AKUISISI

Setelah sampel dilakukan canai panas, pendinginan udara dengan variasi kecepatan pendinginan dan pendinginan air, sampel dilakukan preparasi metalografi dan dietsa menggunakan larutan etsa asam pikrik jenuh. Kemudian dilakukan pengambilan foto mikro.

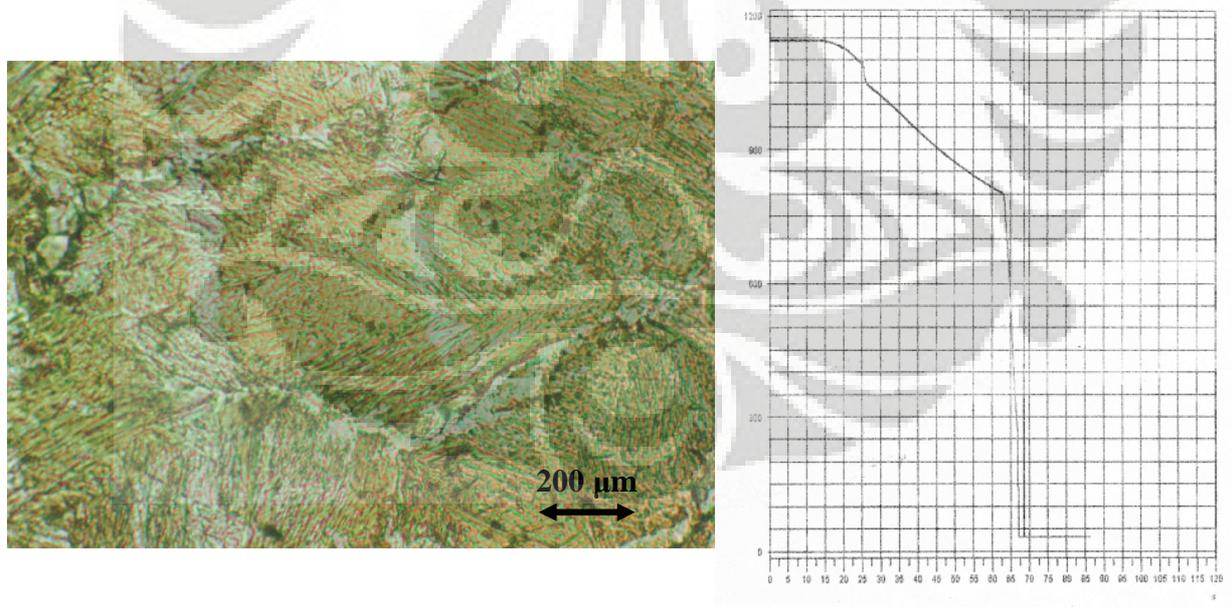
Contoh foto mikro dan grafik akuisisi masing – masing sampel dapat dilihat pada Gambar 4.1 – 4.7. Foto mikro yang ditampilkan disini seluruhnya memiliki perbesaran 500X. Untuk foto mikro masing – masing sampel dengan perbesaran lainnya dapat dilihat pada lampiran II.



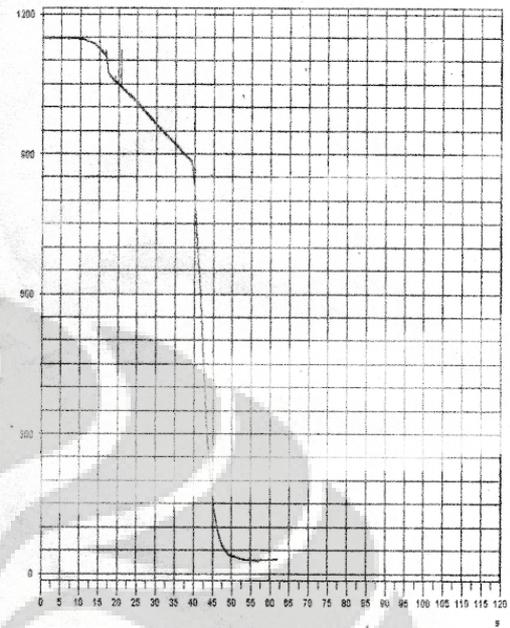
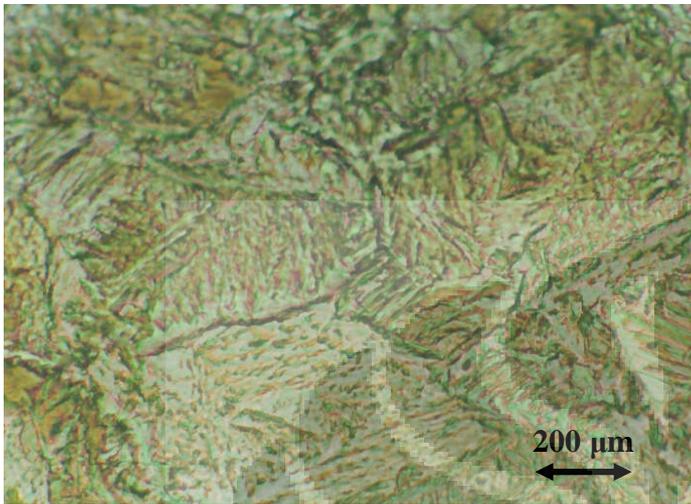
Gambar 4.1. Foto Mikro dan Grafik Akuisisi Sampel 2 (Laju Pendinginan $8,3^{\circ}\text{C/s}$)



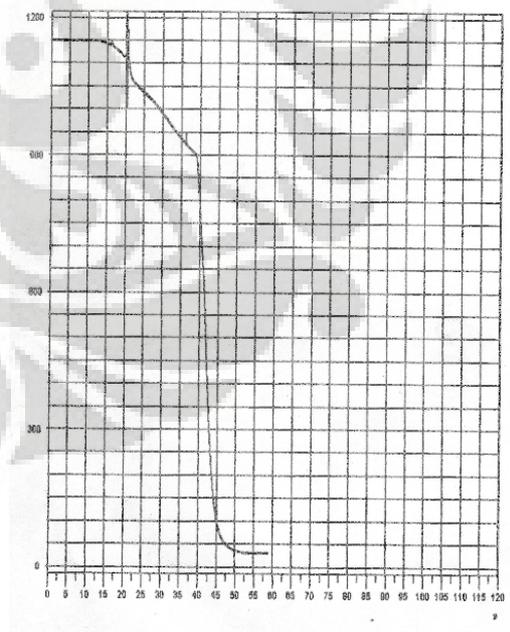
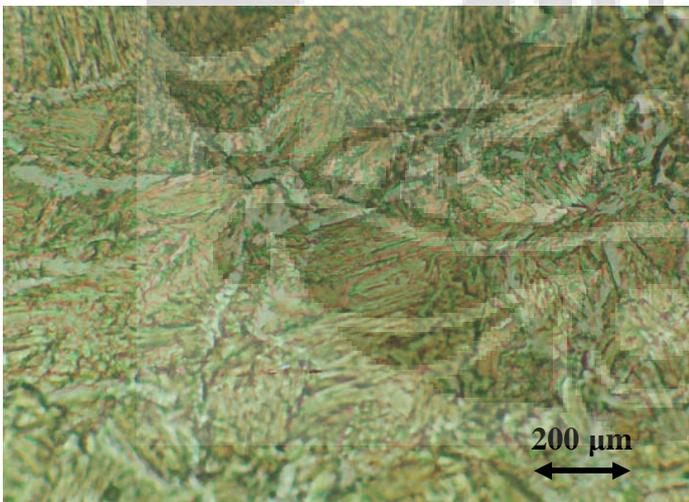
Gambar 4.2. Foto Mikro dan Grafik Akuisisi Sampel 3 (Laju Pendinginan $7,9^{\circ}\text{C/s}$)



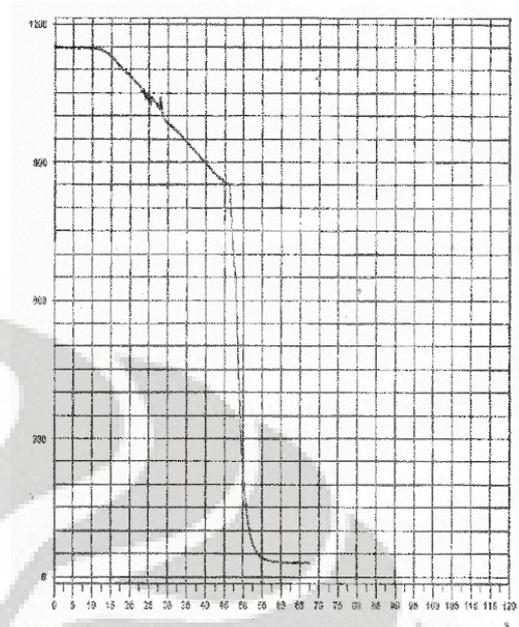
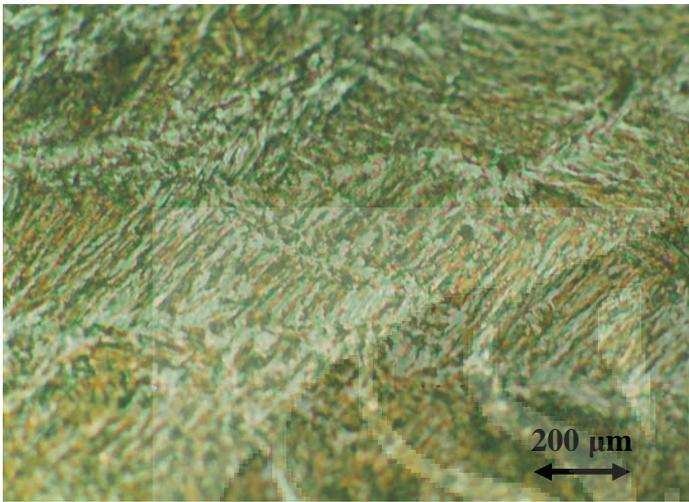
Gambar 4.3. Foto Mikro dan Grafik Akuisisi Sampel 4 (Laju Pendinginan 8°C/s)



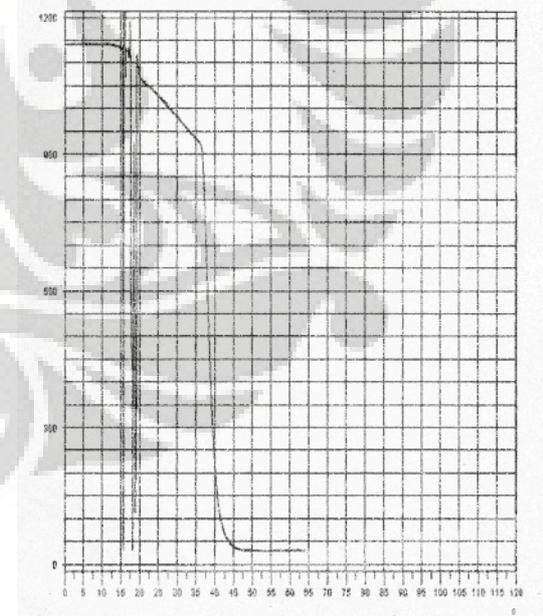
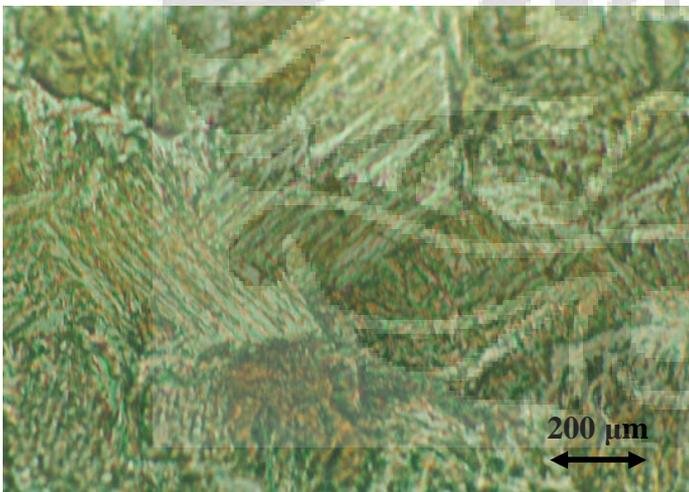
Gambar 4.4. Foto Mikro dan Grafik Akuisisi Sampel 6 (Laju Pendinginan 10,5°C/s)



Gambar 4.5. Foto Mikro dan Grafik Akuisisi Sampel 7 (Laju Pendinginan 10,9°C/s)



Gambar 4.6. Foto Mikro dan Grafik Akuisisi Sampel 8 (Laju Pendinginan $9,3^0\text{C/s}$)



Gambar 4.7. Foto Mikro dan Grafik Akuisisi Sampel 9 (Laju Pendinginan $8,8^0\text{C/s}$)

4.3. PERHITUNGAN UKURAN BUTIR AUSTENIT

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

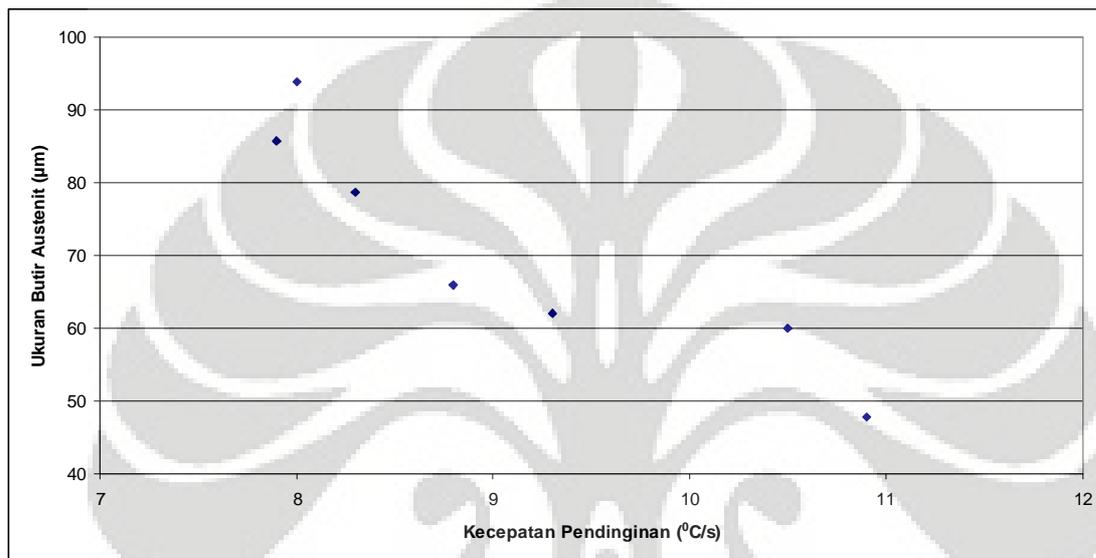
Tabel 4.2. Perhitungan Ukuran Butir Austenit

| Jeda Waktu (t) (detik) | Jumlah Butir | Ukuran Butir (μm) | Ukuran Butir Rata – rata (μm) |
|---------------------------|-----------------|-----------------------------------|---|
| 8,3 | 12 | 65 | 78,78 |
| | 9 | 86,67 | |
| | 10 | 78 | |
| | 11 | 70,91 | |
| | 10 | 78 | |
| | 10 | 78 | |
| | 9 | 86,67 | |
| | 8 | 97,5 | |
| | 10 | 78 | |
| | 10 | 78 | |
| 7,9 | 10 | 78 | 85,71 |
| | 8 | 97,5 | |
| | 11 | 70,91 | |
| | 8 | 97,5 | |
| | 10 | 78 | |
| | 9 | 86,67 | |
| | 7 | 111,42 | |
| | 9 | 86,67 | |
| | 9 | 86,67 | |
| | 10 | 78 | |
| 8 | 8 | 97,5 | 93,97 |
| | 9 | 86,67 | |
| | 8 | 97,5 | |
| | 8 | 97,5 | |
| | 10 | 78 | |
| | 8 | 97,5 | |
| | 7 | 111,42 | |
| | 8 | 97,5 | |
| | 9 | 86,67 | |
| | 8 | 97,5 | |

| Jeda Waktu (t) (detik) | Jumlah Butir | Ukuran Butir (μm) | Ukuran Butir Rata – rata (μm) |
|-----------------------------------|-------------------------|--|--|
| 10,5 | 10 | 36 | 60 |
| | 10 | 36 | |
| | 8 | 56,25 | |
| | 9 | 0 | |
| | 7 | 293,87 | |
| | 9 | 0 | |
| | 11 | 119,01 | |
| | 10 | 36 | |
| | 8 | 56,25 | |
| | 8 | 56,25 | |
| 10,9 | 9 | 60 | 47,8 |
| | 11 | 49,09 | |
| | 10 | 54 | |
| | 10 | 54 | |
| | 14 | 38,57 | |
| | 11 | 49,09 | |
| | 14 | 38,57 | |
| | 11 | 49,09 | |
| | 13 | 41,53 | |
| | 10 | 54 | |
| 9,3 | 8 | 67,5 | 62,07 |
| | 7 | 77,14 | |
| | 9 | 60 | |
| | 7 | 77,14 | |
| | 10 | 54 | |
| | 9 | 60 | |
| | 12 | 45 | |
| | 10 | 54 | |
| | 8 | 67,5 | |
| | 7 | 77,14 | |
| 8,8 | 7 | 77,14 | 65,85 |
| | 9 | 60 | |
| | 9 | 60 | |
| | 9 | 60 | |
| | 9 | 60 | |
| | 7 | 77,14 | |
| | 9 | 60 | |
| | 10 | 54 | |
| | 7 | 77,14 | |
| | 6 | 90 | |

4.4. HUBUNGAN ANTARA KECEPATAN PENDINGINAN DAN UKURAN BUTIR AUSTENIT

Dari hasil perhitungan ukuran butir yang telah dilakukan sebelumnya, maka dapat dicari hubungan antara kecepatan pendinginan dengan ukuran butir austenit. Hubungan tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8. 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.

BAB V

PEMBAHASAN

5.1. PERBANDINGAN PERTUMBUHAN BUTIR AUSTENIT DALAM KEADAAN ISOTERMAL DENGAN NON-ISOTERMAL

Apabila diasumsikan bahwa radius rata – rata dari kurva seluruh batas butir adalah proporsional dengan diameter butir rata – rata D , gaya dorong rata – rata untuk pertumbuhan butir akan proporsional terhadap $2\gamma/D$. Maka:

$$\bar{v} = \alpha M \frac{2\gamma}{D} \cong \frac{d\bar{D}}{dt} \quad (5.1)$$

Laju pertumbuhan butir secara isothermal adalah proporsional terbalik dengan D dan meningkat dengan cepat seiring pertambahan temperatur karena mobilitas batas butir, M . Mengintegrasikan dengan persamaan 5.1. dan dengan mengambil $D = D_0$ dan $t = 0$, memberikan

$$\bar{D}^2 = D_0^2 + Kt \quad (5.2)$$

Dimana $K = 4\alpha M\gamma$

Dalam keadaan isothermal, secara eksperimental diketahui bahwa pertumbuhan butir pada logam fasa tunggal mengikuti hubungan dalam bentuk:

$$\bar{D} = K' t^n \quad (5.3)$$

Dimana K' konstanta proporsional yang meningkat seiring dengan temperatur. Hal ini ekuivalen dengan persamaan 5.2 dengan $n = 0,5$ apabila $D \geq D_0$. Namun nilai n secara eksperimental biasanya kurang dari 0,5 dan hanya mendekati 0,5 pada logam yang sangat murni atau temperatur yang sangat tinggi.⁽¹⁴⁾

Lebih lanjut, Beck meneliti untuk pertumbuhan butir pada kondisi anil isothermal cocok dengan hubungan perpangkatan⁽⁴⁾

$$D^n - D_o^n = C.t \quad (5.4)$$

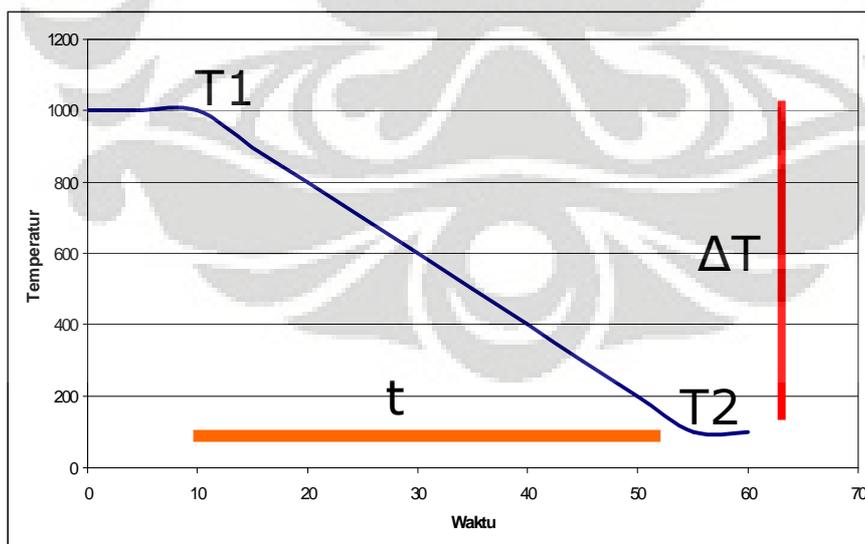
Dimana D adalah diameter butir akhir, D₀ adalah diameter butir awal, t adalah lama aniling dan n dan C adalah konstanta yang terganutng pada komposisi material. Sellars menganalisa data dari material baja karbon rendah – mangan, mendapatkan persamaan berikut ini

$$d^n - d_o^n = [A \exp\left(\frac{-Q_{gg}}{RT}\right)].t \quad (5.5)$$

Dimana

| | |
|-----------------------|-------------------------------------|
| d | = besar butir akhir (μm) |
| d ₀ | = besar butir awal (μm) |
| n, A, Q _{gg} | = konstanta material ⁽⁴⁾ |
| T | = temperatur tahan isothermal (K) |
| t | = lama penahanan isothermal (detik) |

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. Ilustrasi dari variabel – variabel yang ada untuk pendinginan dalam keadaan kontinyu dapat dilihat pada Gambar 5.1.



Gambar 5.1. Ilustrasi Variabel Untuk Pendinginan Dalam Keadaan Kontinyu

Dari gambar tersebut, terlihat bahwa variabel ΔT mempengaruhi kinetika pertumbuhan butir, untuk keadaan non-isotermal. Secara matematis, dapat dijelaskan sebagai berikut

$$\begin{aligned} d^n - d_o^n &= [A \exp\left(\frac{-Q_{gg}}{RT}\right)] \cdot t \\ (\Rightarrow) \quad d^n - d_o^n &= [A \exp\left(\frac{-Q_{gg}}{RT}\right)] \cdot t \cdot \frac{\Delta T}{\Delta T} \\ (\Rightarrow) \quad d^n - d_o^n &= [A \exp\left(\frac{-Q_{gg}}{RT}\right)] \cdot \Delta T \cdot \frac{t}{\Delta T} \\ (\Rightarrow) \quad d^n - d_o^n &= [A \exp\left(\frac{-Q_{gg}}{RT}\right)] \cdot \Delta T \cdot \frac{1}{Cr} \end{aligned} \quad 5.6$$

Dari persamaan diatas, terlihat bahwa untuk pertumbuhan butir non-isotermal, dipengaruhi oleh ΔT dan Cr (cooling rate / kecepatan pendinginan)

5.2. PENYESUAIAN PERSAMAAN UNTUK KONDISI NON-ISOTERMAL

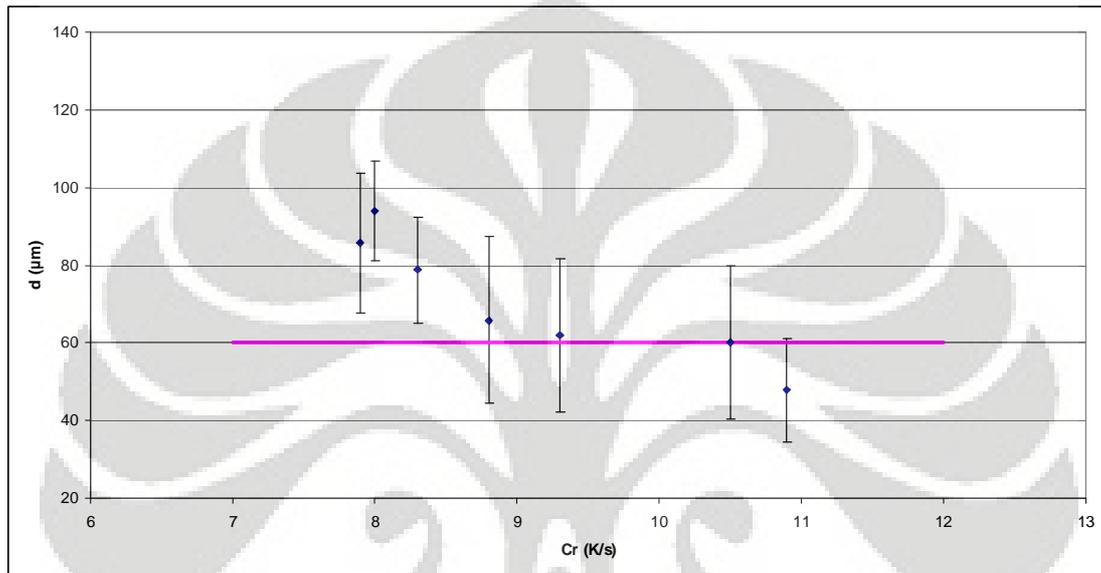
Persamaan 5.6 diatas, digunakan untuk mengolah data – data hasil percobaan untuk mengetahui kecocokannya.

Tabel 5.1. Data Hasil Percobaan

| ΔT | Cr | A | Q | R | T | $d^n - d_o^n$ | d | d_o |
|------------|------|---------|--------|------|------|---------------|-------|-------------|
| 125 | 8,3 | 4,1E+23 | 510000 | 8,31 | 1348 | 2572278,814 | 78,78 | 78,6478935 |
| 215 | 7,9 | 4,1E+23 | 510000 | 8,31 | 1378 | 13824908,75 | 85,71 | 85,17719876 |
| 290 | 8 | 4,1E+23 | 510000 | 8,31 | 1363 | 10999435,15 | 93,97 | 93,66438995 |
| 200 | 10,5 | 4,1E+23 | 510000 | 8,31 | 1363 | 3355092,091 | 60 | 59,54847296 |
| 240 | 10,9 | 4,1E+23 | 510000 | 8,31 | 1413 | 17706845,63 | 47,8 | 41,14645511 |
| 140 | 9,3 | 4,1E+23 | 510000 | 8,31 | 1263 | 95636,70184 | 62,07 | 62,05871597 |
| 150 | 8,8 | 4,1E+23 | 510000 | 8,31 | 1348 | 2589915,218 | 65,85 | 65,59995731 |

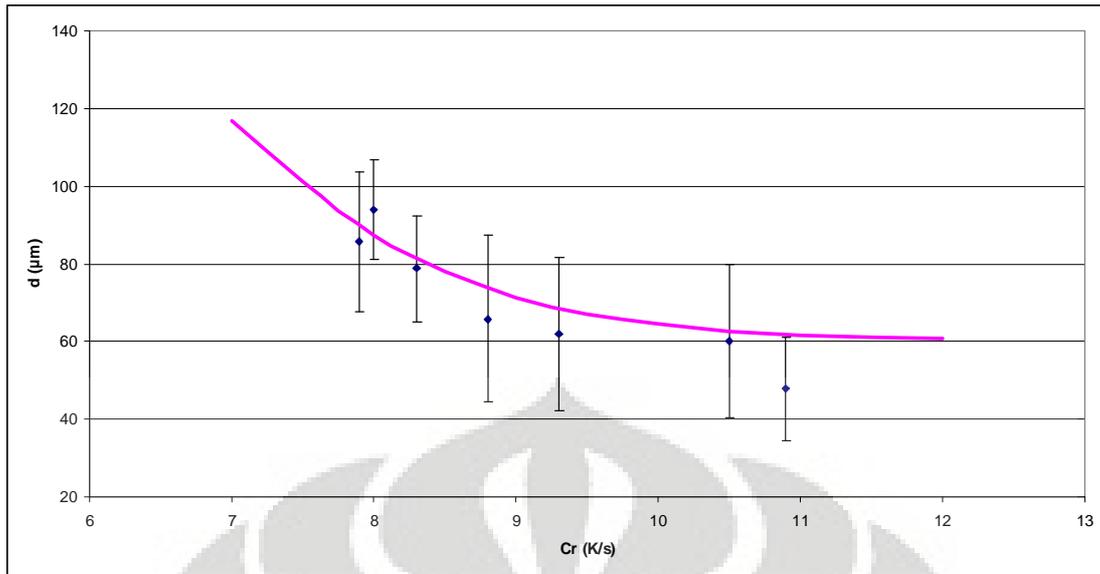
Tabel 5.2. Simulasi Persamaan Non-Isotermal

| ΔT | Cr | A | Q | R | T | $d^n - d_0^n$ | d | d_0 |
|------------|----|---------|---------|------|------|---------------|----------|-------|
| 150 | 7 | 4,1E+23 | -510000 | 8,31 | 1200 | 540,2155869 | 60,00007 | 60 |
| 150 | 8 | 4,1E+23 | -510000 | 8,31 | 1200 | 472,6886386 | 60,00006 | 60 |
| 150 | 9 | 4,1E+23 | -510000 | 8,31 | 1200 | 420,1676787 | 60,00006 | 60 |
| 150 | 10 | 4,1E+23 | -510000 | 8,31 | 1200 | 378,1509108 | 60,00005 | 60 |
| 150 | 11 | 4,1E+23 | -510000 | 8,31 | 1200 | 343,7735553 | 60,00005 | 60 |
| 150 | 12 | 4,1E+23 | -510000 | 8,31 | 1200 | 315,125759 | 60,00004 | 60 |



Gambar 5.2. Perbandingan Hasil Percobaan Dengan Model Persamaan

Terlihat bahwa Gambar 5.2. bahwa model persamaan belum mendekati grafik hasil percobaan. Oleh sebab itu, perlu dilakukan suatu penyesuaian dengan penambahan suatu konstanta pada model. Setelah beberapa kali pengujian, didapat konstanta yang dapat membuat grafik model mendekati grafik hasil percobaan seperti pada Gambar 5.3.



Gambar 5.3. Hasil Penyesuaian Model Persamaan

Konstanta yang digunakan adalah 1×10^{15} dan penyesuaian variabel Cr pada persamaan hipotesa 4 menjadi $1/Cr^{11}$. Maka modifikasi persamaan akhir menjadi

$$d^n - d_o^n = \left[A \exp \left(\frac{-Q_{gg}}{RT} \right) \right] \cdot \left[B \cdot \Delta T \cdot \frac{1}{Cr^m} \right] \quad (5.7)$$

Dimana

- d = besar butir akhir (μm)
- d_0 = besar butir awal (μm)
- n, A, Q_{gg} = konstanta material ⁽⁴⁾
- T = temperatur deformasi (K)
- ΔT = perubahan temperatur selama kondisi non-isotermal (detik)
- Cr = kecepatan pendinginan (K/s)
- B, m = konstanta material hasil percobaan

Persamaan (5.7) tersebut adalah persamaan kinetika pertumbuhan butir untuk keadaan non-isotermal / kontinyu.

BAB VI

KESIMPULAN

1. Ukuran butir austenit baja HSLA 0.037% 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 bertumbuh.
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 $1/Cr^{11}$ konstanta yang digunakan adalah 1×10^{15} . Maka modifikasi persamaan akhir 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_o | = besar butir awal (μm) |
| | n, A, Q_{gg} | = konstanta material |
| | T | = temperatur deformasi (K) |
| | ΔT | = perubahan temperatur selama kondisi non-isothermal (detik) |
| | Cr | = kecepatan pendinginan (K/s) |
| | B, m | = konstanta material hasil percobaan |

DAFTAR ACUAN

- [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] P. A Manohar, *et al.*, "Grain Growth Predictions in Microalloyed Steels," *ISI International*, Vol. 36 No. 2. (1996)
- [5] C.M Sellars, "Static Recrystallization and Precipitation During Hot Rolling of Microalloyed Steels," *Mat Science Seminar* 23-24 (Oct 1982)
- [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.etsd.library.pitt.edu/ETD/available/etd-04082005-082222/ - 10k](http://www.etsd.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)

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Hajeri, Khaled F., "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
- Amin, R.K, F. B Pickering, "Austenite Grain Coarsening and The Effect of Thermomechanical Processing on Austenite Recrystallisation," (The Metallurgical Society of AIME)
- Amin, R.K, F. B Pickering, "Ferrite Formation from Thermo-mechanically Processed Austenite," (The Metallurgical Society of AIME)
- Ariati, Myrna, 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)
- ASM Speciality Handbook, *Carbon and Alloy Steel*, (ASM International, 1996)
- Charleux, M., *et al.*, "Precipitation Behavior and Its Effect on Strengthening of an HSLA-Nb/Ti Steel," Diakses 1 Desember 2006 dari Springerlink
www.springerlink.com/index/E4718RQ50765U5QL.pdf
- Cubberly, William H, and friends, *Properties and Selection: Iron and Steels*, Metal Handbook Vol 1. 9th Edition, (Ohio : American Society for Metals, 1998)
- Gunawan, Shianto, "Studi Perilaku Butir Austenit pada Baja HSLA selama Pemanasan Ulang," Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 1998.
- Harris, John Noel, *Mechanical Working of Metals*, (UK: Pergamon Press)
- Houghton D. C., "Equilibrium Solubility and Composition of Mixed Carbonitrides in Microalloyed Austenite," (Canada : Pergamon Press Ltd, 1992)
- Juliawatri, Anita. "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.
- Krauss, G., *Heat Treatment and Processing Principles*, ASM International. (USA, 1995)
- Kristiawan, Agung, "Hubungan Besar Butir Austenit dengan Besar Butir Ferit yang Dihasilkan Baja 0,0231Ti dan Baja C-Mn Pada Pendinginan Lambat," Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 1999.
- Lakhtin, Y, *Engineering Physical Metallurgy*, (Moscow : Foreign Language Publishing House)

- Leslie, William C, *The Physical Metallurgy of Steel*, (Michigan : McGraw Hill Company, 1982)
- Manohar, P. A, *et al.*, "Grain Growth Predictions in Microalloyed Steels," *ISIJ International*, Vol. 36 No. 2. (1996)
- Nakata, Naoki, Matthias Miltzer, "Modelling of Microstructure Evolution During Hot Rolling of a 780 MPa High Strength Steel," *ISIJ International* Vol. 45. No. 1. (2005).
Diakses 1 Desember 2006 dari *ISIJ International*
<http://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational/45/1/85/pdf>
- Norman, Anton, E. S. Siradj, "Studi Transformasi Austenit Abnormal menjadi Ferit pada Baja HSLA-Nb pada Proses Canai Panas," *Proceeding of the 2000 FTUI Seminar Quality in Research*, Vol. V (Agustus, 2000)
- Nurman, "Pertumbuhan Butir Austenit selama Pemanasan Isothermal pada Baja 0,0231Ti dan Baja C-Mn," Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 1999.
- Parihanti, Nira. "Pengaruh Temperatur terhadap Pertumbuhan Butir Austenit Prior pada Baja HSLA 0.029%Nb *as cast* Selama Pemanasan *Isothermal*." Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2001.
- Porter, D.A, K.E Easterling, *Phase Transformations in Metal and Alloys*. (UK: Van Nostrand Reinhold, Co, 1981)
- Russell, K. C., "Precipitate Coarsening and Grain Growth in Steels," (Cambridge: Massachusetts Institute of Technology). Diakses 1 Desember 2006.
ocw.mit.edu/.../3-40JSpring2004/1C728A16-2B14-4483-843E-A8B69AAC96E3/0/coars_kcr_2003.pdf
- Sellers, C.M, "Static Recrystallization and Precipitation During Hot Rolling of Microalloyed Steels," *Mat Science Seminar* 23-24 (Oct 1982)
- Sellers, C.M, "The Physical Metallurgy of Hot Working," Department of Metallurgy, University of Sheffield
- Siradj, E.S., "Modifikasi Model Presipitasi Kinetik Partikel Nb(CN) dalam Baja Nb-HSLA setelah Deformasi Panas," *Proceeding of the 2000 FTUI Seminar Quality in Research*, Vol. V (Agustus, 2000)
- Smallman, R.E, *Modern Physical Metallurgy*, (UK : Butterworth Ltd, 1970)
- Smallman, R.E, R.J Bishop, *Metals and Material*, (UK : Butterworth – Heinemann, 1995)
- Vlack, Lawrence H. Van, *Elements of Materials Science*, (London: Addison-Wesley Publishing Company, Inc, 1960)
- Voort, Van der, *Metallography Principles and Practice*, (McGraw Hill Book Co. 1984)

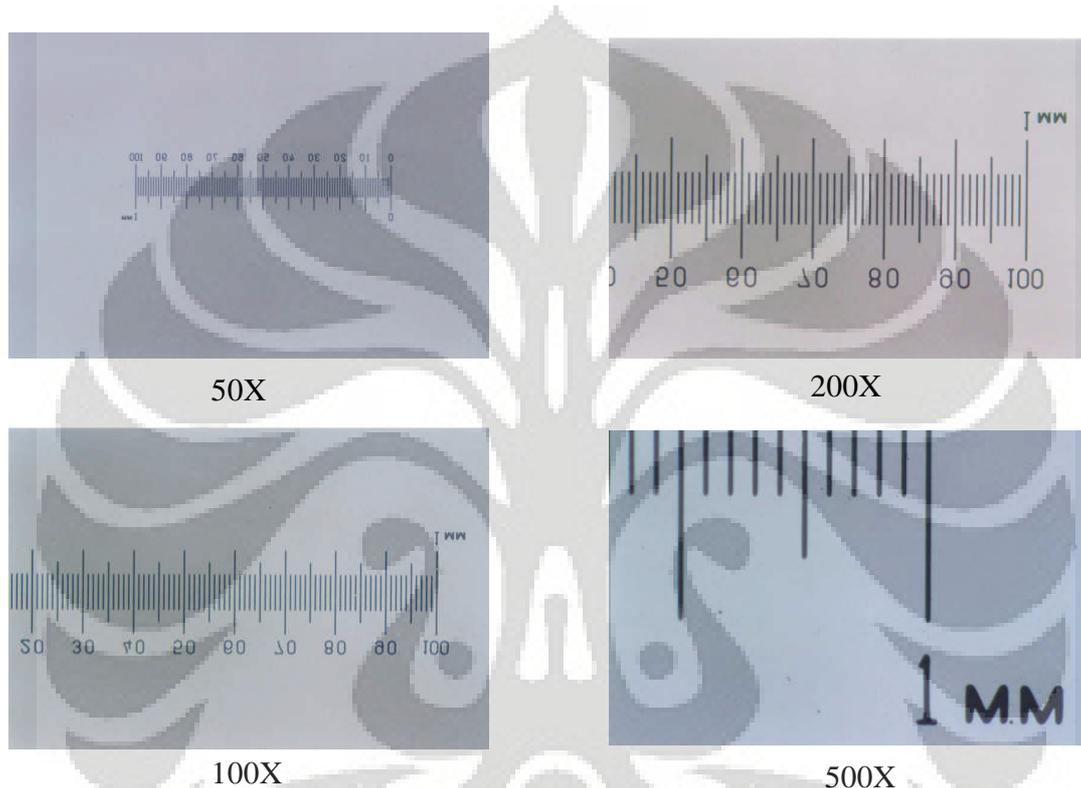
Wang, J., *et al.*, “Modeling of Microstructural Evolution in Microalloyed Steel During Hot Forging Process,” (China: Acta Metallurgica Sinica, 2006)



LAMPIRAN I

CONTOH PERHITUNGAN UKURAN BUTIR

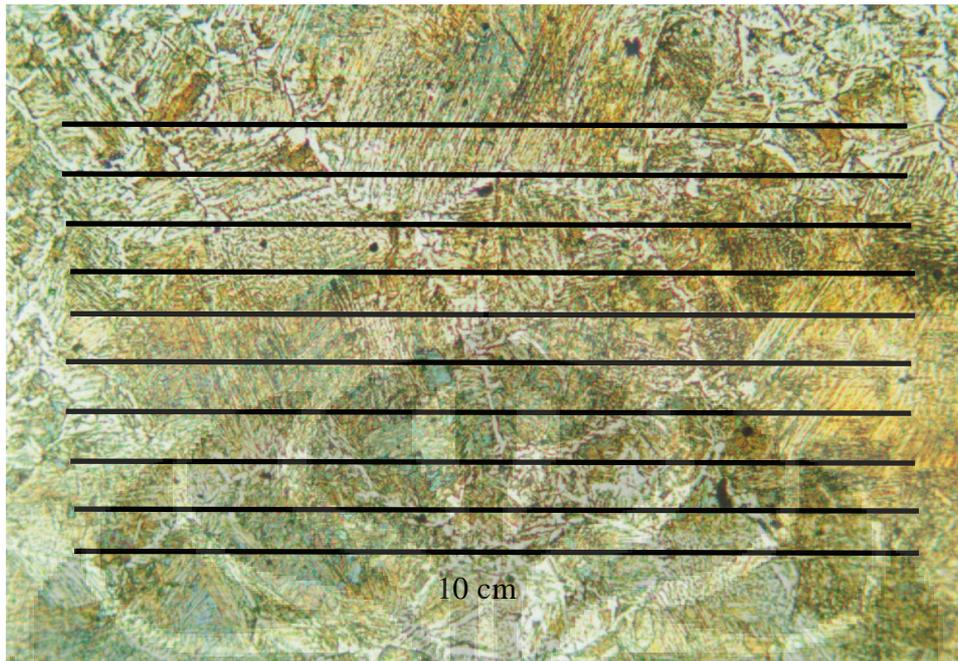
Setelah didapat foto mikro dari benda uji, selanjutnya diukur besar butir austenit dengan menggunakan metode perbandingan. Perhitungan dilakukan dengan bantuan foto standar perbesaran tertentu yang berisi skala seperti terlihat pada gambar dibawah.



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



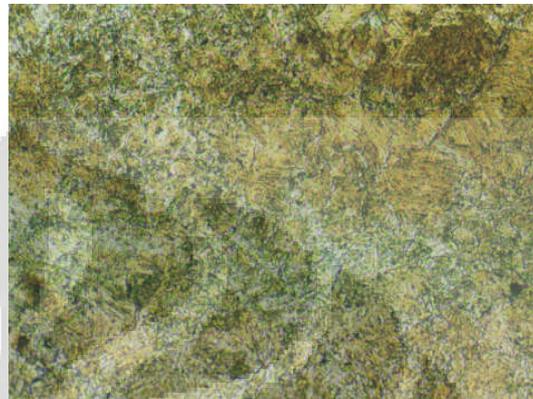
LAMPIRAN II

FOTO MIKRO

Sampel 2, Kecepatan Pendinginan $8,3\text{ }^{\circ}\text{C/s}$



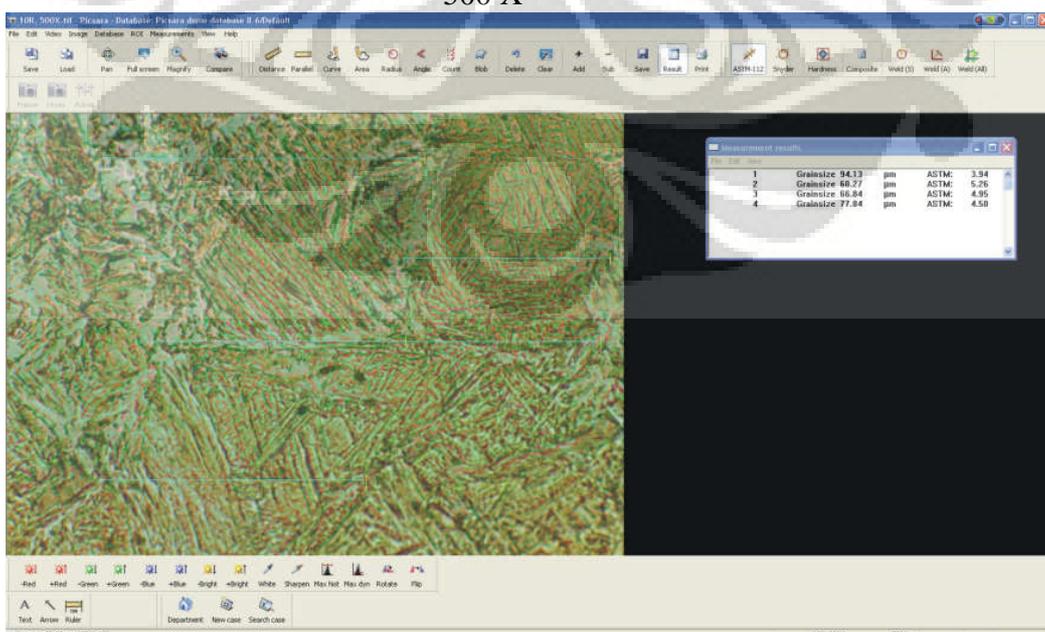
100 X



200 X



500 X



Perhitungan Ukuran Butir

Sampel 3, Kecepatan Pendinginan 7,9 °C/s



100 X



200 X



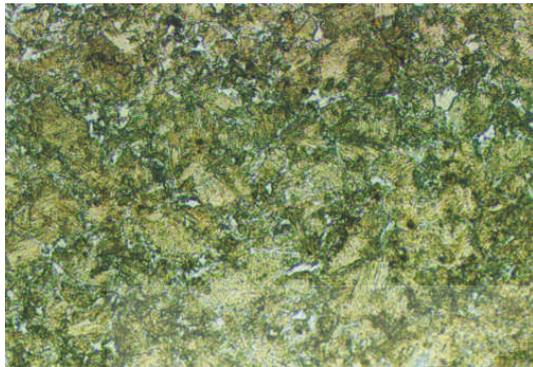
500 X

Screenshot of a software interface for grain size analysis. The main window shows a micrograph with a grid overlay. A small window titled "Mean grain size results" is open, displaying a table of results.

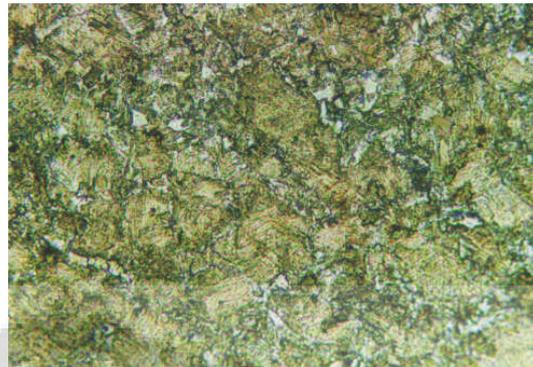
| Grain Size | Grain Size (µm) | ASTM |
|------------|-----------------|------|
| 1 | 69.52 | 5.25 |
| 2 | 71.93 | 4.74 |
| 3 | 85.56 | 4.22 |
| 4 | 92.38 | 3.90 |
| 5 | 86.35 | 4.19 |

Perhitungan Ukuran Butir

Sampel 4, Kecepatan Pendinginan $8^{\circ}C/s$



100 X



200 X

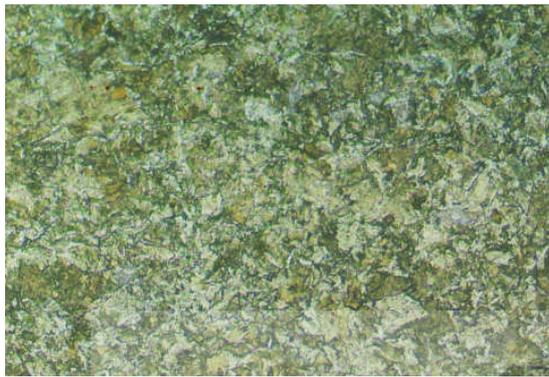


500 X

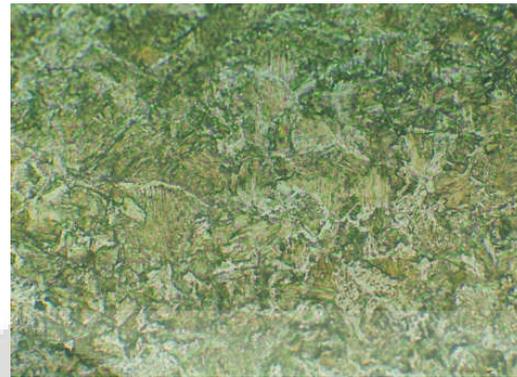
Screenshot of a software interface for grain size analysis. The main window displays a micrograph of the metal microstructure at 500X magnification. A small window titled "Micrograph results" is open, showing a table of grain size measurements. The table has four rows of data, each with a grain size in micrometers (µm) and the corresponding ASTM grain size number. The software interface includes a menu bar, a toolbar with various analysis tools, and a status bar at the bottom.

Perhitungan Ukuran Butir

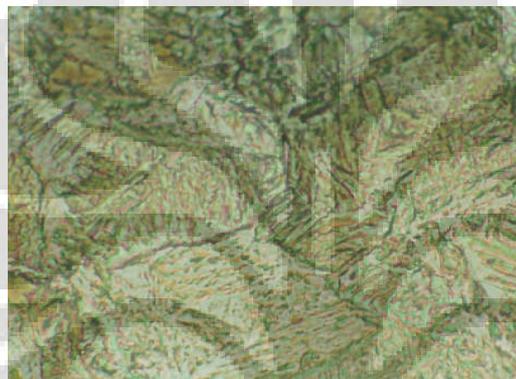
Sampel 6, Kecepatan Pendinginan 10,5 °C/s



100 X



200 X

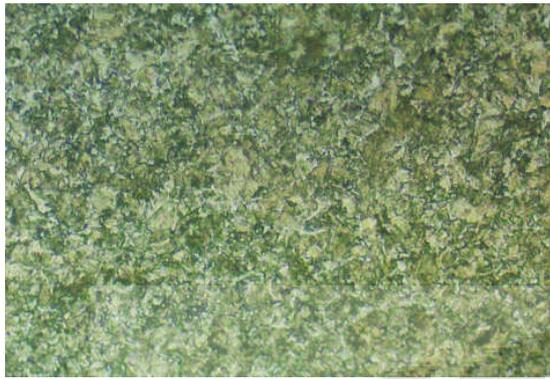


500 X

| No | Grainsize | µm | ASTM |
|----|-----------|----|------|
| 1 | 90.31 | µm | 4.86 |
| 2 | 76.40 | µm | 4.56 |
| 3 | 46.97 | µm | 6.00 |
| 4 | 48.68 | µm | 5.98 |

Perhitungan Ukuran Butir

Sampel 7, Kecepatan Pendinginan $10,9^{\circ}\text{C/s}$



100 X



200 X

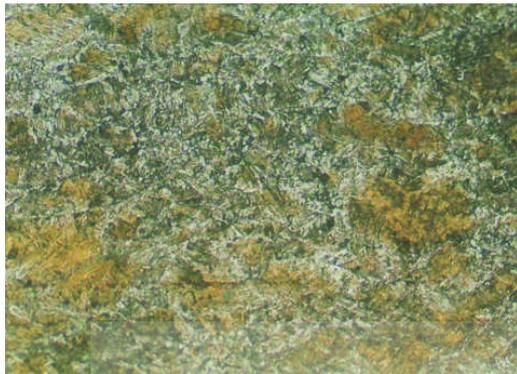


500 X

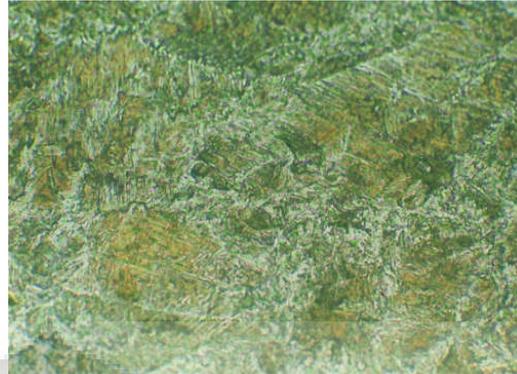
| No | Grain size | µm | ASTM | |
|----|------------|-------|------|------------|
| 1 | Grain size | 5,74 | µm | ASTM: 5,39 |
| 2 | Grain size | 58,84 | µm | ASTM: 5,81 |
| 3 | Grain size | 51,28 | µm | ASTM: 5,74 |
| 4 | Grain size | 50,16 | µm | ASTM: 5,81 |

Perhitungan Ukuran Butir

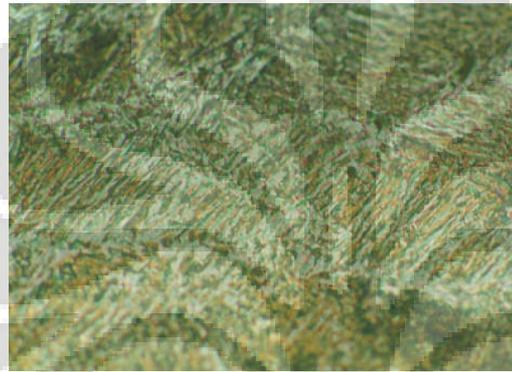
Sampel 8, Kecepatan Pendinginan 9,3 °C/s



100 X



200 X

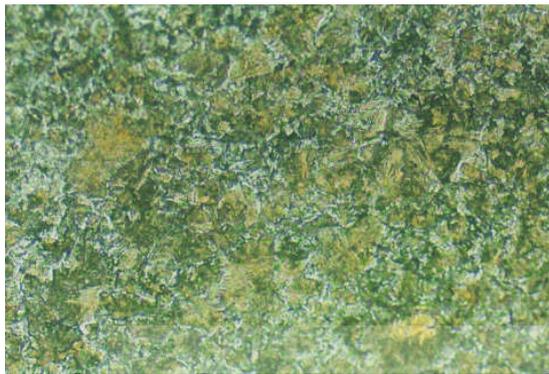


500 X

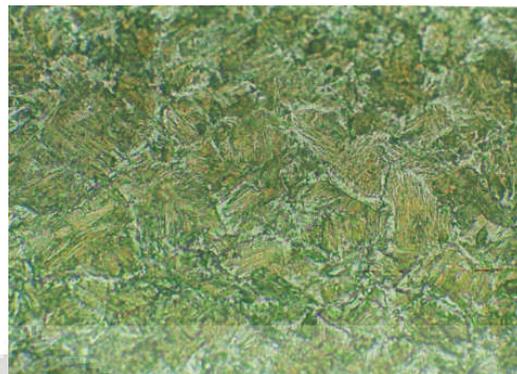
| Grain Size | Grain Size (μm) | ASTM |
|------------|-----------------|------|
| 1 | 95.80 | 4.18 |
| 2 | 64.32 | 5.87 |
| 3 | 57.46 | 4.93 |
| 4 | 68.92 | 5.23 |

Perhitungan Ukuran Butir

Sampel 9, Kecepatan Pendinginan 8,8 °C/s



100 X



200 X



500 X

The screenshot shows a software interface with a micrograph on the left and a table of grain size measurements on the right. The table is titled "Measurement of Area" and contains the following data:

| No | Grain Size | µm | ASTM |
|----|------------|-------|------|
| 1 | Grain Size | 64.82 | 5.05 |
| 2 | Grain Size | 66.86 | 4.95 |
| 3 | Grain Size | 58.58 | 5.35 |
| 4 | Grain Size | 58.33 | 5.35 |
| 5 | Grain Size | 71.37 | 4.75 |

Perhitungan Ukuran Butir

LAMPIRAN III

PERALATAN PENDUKUNG

Gambar sampel uji



Gambar sampel uji setelah canai panas



Gambar sampel uji setelah preparasi metalografi



Mesin canai



Waterjet Spray



Susunan peralatan kerja



Komputer Data Akuisisi

