



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PENGARUH LAJU PEMANASAN (*HEATING RATE*) TERHADAP  
KINETIKA PERTUMBUHAN BUTIR AUSTENIT AWAL  
(*PRIOR AUSTENITE*) PADA BAJA HSLA-NIOBIUM 0.183%**

**NOFRI HASANUDIN  
0806455843**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL  
DEPOK  
JUNI 2012**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PENGARUH LAJU PEMANASAN (*HEATING RATE*) TERHADAP  
KINETIKA PERTUMBUHAN BUTIR AUSTENIT AWAL  
(*PRIOR AUSTENITE*) PADA BAJA HSLA-NIOBIUM 0.183%**

**SKRIPSI**

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

**NOFRI HASANUDIN  
0806455843**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL  
DEPOK  
JUNI 2012**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

**Nama : Nofri Hasanudin**

**NPM : 0806455843**

**Tanda Tangan**

*Nofri Hasanudin*

**Tanggal : 19 Juni 2012**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh,

Nama : Nofri Hasanudin  
NPM : 0806455843  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul Skripsi : Pengaruh Laju Pemanasan (*Heating Rate*) Terhadap Kinetika Pertumbuhan Butir Austenit Awal (*Prior Austenite*) Pada Baja HSLA-Niobium 0.183%

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

### Dewan Penguji

Pembimbing : Dr. Ir. Myrna Ariati, M.S

(  )

Penguji 1 : Nofrijon Sofyan, Ph.D

(  )

Penguji 2 : Dwi Marta Nurjaya S.T., M.T.

(  )

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 3 Juli 2012

## UCAPAN TERIMA KASIH

Saya selaku penulis dari hasil penelitian ini mengucapkan terima kasih untuk segenap pihak yang mendukung hingga terselesaikannya skripsi ini. Saya mengucapkan terima kasih yang tulus kepada:

1. Orang tua; Ibu, dan Bapak, serta seluruh anggota keluarga saya yang selalu mendukung dengan tulus ikhlas atas studi saya di Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia. Berkat dukungan dan doa yang dilantunkan setiap hari di dalam sholat mereka, akhirnya saya bisa mencapai tahapan terakhir dalam studi saya di Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia.
2. Dr. Ir. Myrna Ariati, M.S selaku dosen pembimbing yang selalu memberikan dukungan pengetahuan, dana, dan moral selama proses penelitian ini berlangsung. Tanpa bantuan beliau, saya yakin skripsi ini hanyalah ide belaka yang tidak terealisasi sama sekali.
3. Dr. Ir. Richard A.M Napitupulu, MT yang telah memberikan pengetahuan tentang penurunan model persamaan pertumbuhan butir austenit awal.
4. Muhammad Mukhsin selaku *partner* penelitian saya mengenai topik pertumbuhan butir, beliau selalu tulus memberikan semangat, bantuan, dan dukungan yang kuat untuk terselesaikannya skripsi ini.
5. Seluruh teman-teman saya: teman-teman metalurgi 2008 dan teman-teman asrama Program Pembinaan SDM Strategis (PPSDMS) yang memberikan suntikan motivasi yang luar biasa untuk terselesaikannya skripsi ini.

Bantuan mereka merupakan suatu nikmat tersendiri yang diberikan Allah kepada saya. Meskipun sebutan ini kurang cukup untuk membalas jasa budi mereka, saya hanya bisa berdoa semoga pihak-pihak diatas diberikan keberkahan dan nikmat yang luar biasa dalam hidupnya oleh Allah, *Rabb Al-'Alamin*.

## KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah, Tuhan yang Maha Esa, yang atas karunia dan kasih sayang-Nya terciptalah skripsi yang berjudul **“Pengaruh Laju Pemanasan (*Heating Rate*) Terhadap Kinetika Pertumbuhan Butir Austenit Awal (*Prior Austenite*) Pada Baja HSLA-Niobium 0.183%”**. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik di Fakultas Teknik, Universitas Indonesia. Skripsi ini ditulis secara sistematis berdasarkan format yang ada, dengan rincian sebagai berikut:

1. Bab 1 yang merupakan bab tentang latar belakang penelitian, tujuan penelitian, ruang lingkup penelitian, dan sistematika penulisan.
2. Bab 2 yang merupakan bab tinjauan pustaka berupa teori singkat yang mendukung penelitian.
3. Bab 3 yang berisi tentang metodologi pelaksanaan penelitian.
4. Bab 4 yang berisi tentang hasil penelitian dan pembahasan dari hasil penelitian tersebut.
5. Bab 5 yang berisi tentang kesimpulan penelitian yang dilakukan, beserta saran untuk penelitian selanjutnya.

Saya berharap skripsi ini dapat berguna bagi siapa saja yang membutuhkan referensi mengenai pengaruh laju pemanasan terhadap kinetika pertumbuhan butir austenit awal. Selain itu, semoga skripsi ini dapat memberikan khazanah pengetahuan yang baru bagi saya dan bagi orang-orang yang membaca skripsi ini.

Saya masih sadar masih terdapat kekurangan dari penyusunan skripsi ini. Bagi yang ingin memberikan pertanyaan, saran, maupun komentar dari isi skripsi ini, dimohon untuk tidak ragu untuk menghubungi saya.

Depok, 19 Juni 2012

Nofri Hasanudin

## HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

### TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Nofri Hasanudin

NPM : 0806455843

Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material

Departemen : Teknik Metalurgi dan Material

Fakultas : Fakultas Teknik

Jenis Karya : Skripsi

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

**Pengaruh Laju Pemanasan (*Heating Rate*) Terhadap Kinetika Pertumbuhan Butir Austenit Awal (*Prior Austenite*) Pada Baja HSLA-Niobium 0.183%**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 19 Juni 2012

Yang Menyatakan



(Nofri Hasanudin)

## ABSTRAK

Nama : Nofri Hasanudin  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul : Pengaruh Laju Pemanasan (*Heating Rate*) Terhadap Kinetika  
Pertumbuhan Butir Austenit Awal (*Prior Austenite*) Pada Baja  
HSLA-Niobium 0.183%

Dalam penelitian ini dilakukan pengamatan pertumbuhan butir austenit awal pada proses pemanasan awal (*reheating*) di bawah pengaruh laju pemanasan (*heating rate*) dan waktu tahan austenisasi pada baja HSLA-Nb 0.183%. Parameter penelitian yang dipakai dalam penelitian ini berupa tiga laju pemanasan yang berbeda ( $10^{\circ}\text{C}/\text{menit}$ ,  $15^{\circ}\text{C}/\text{menit}$ ,  $20^{\circ}\text{C}/\text{menit}$ ) dan tiga waktu tahan austenisasi yang berbeda (20 menit, 50 menit, 80 menit). Dari hasil penelitian yang ada menunjukkan bahwa semakin besar laju pemanasan (cepat) maka akan dihasilkan butir austenit awal yang lebih besar dibandingkan dengan laju pemanasan yang rendah (lambat). Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa tingkat kenaikan pertumbuhan butir meningkat sebesar 45.14% dari laju pemanasan  $10^{\circ}\text{C}/\text{menit}$  ke  $15^{\circ}\text{C}/\text{menit}$  dan meningkat sebesar 200.98% dari laju pemanasan  $15^{\circ}\text{C}/\text{menit}$  ke  $20^{\circ}\text{C}/\text{menit}$  pada penahanan austenisasi 50 menit. Didapat persamaan empiris perhitungan besar butir austenit awal sebagai fungsi dari laju pemanasan dan waktu tahan austenisasi.

Kata Kunci: baja HSLA-Nb, pemanasan awal, pertumbuhan butir austenit awal.

## ABSTRACT

Name : Nofri Hasanudin  
Major : Metallurgy and Materials Engineering  
Title : The Effect of Heating Rate On Prior Austenite Grain Growth Kinetic In HSLA-Niobium Steel 0.183 (wt%)

This research investigated the prior austenite grain growth at reheating process under the influence of heating rate and soaking time on HSLA-Nb steel 0.183 (wt%). The parameter that have been used in this research are three different heating rate (10°C/minutes, 15°C/minutes, 20°C/minutes) and three different soaking time (20 minutes, 50 minutes, 80 minutes). The result of this research shows that the higher heating rate (fast) will produced the higher prior austenite grain size than the lower heating rate (slow). The result of this research also shows that the growth of grain increasing by 45.14% from heating rate 10°C/minutes to 15°C/minutes and increasing by 200.98% from heating rate 15°C/minutes to 20°C/minutes at 50 minutes of soaking time. Calculation empirical equation of prior austenite grain size is obtained as a function of heating rate and soaking time.

Keywords: HSLA-Nb steel, reheating, prior austenite grain growth.

## DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL	i
HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
UCAPAN TERIMA KASIH	v
KATA PENGANTAR	vi
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	vii
ABSTRAK	viii
ABSTRACT	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang Penelitian	1
1.2 Tujuan Penelitian	2
1.3 Ruang Lingkup Penelitian	3
1.4 Sistematika Penulisan	4
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA</b>	<b>5</b>
2.1 Baja <i>High Strength Low Alloy</i> (HSLA)	5
2.2 Mekanisme Peningkatan Kekuatan Baja HSLA	7
2.2.1 Penghalusan Butir Ferit	7
2.2.2 Penguatan Presipitat	8
2.2.3 Penambahan Unsur Paduan Mikro	10
2.3 Pertumbuhan Butir Austenit Dalam Kondisi Isotermal	13
2.3.1 Pengaruh Temperatur dan Waktu Tahan Terhadap Pertumbuhan Butir Austenit	14
2.3.2 Pengaruh Laju Pemanasan ( <i>Heating Rate</i> ) Terhadap Pertumbuhan Butir Austenit	15
2.4 Aplikasi Hubungan Pertumbuhan Butir Austenit Dalam Dunia Industri	16
<b>BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN</b>	<b>17</b>
3.1 Diagram Alir Penelitian	17
3.2 Preparasi Sampel	18
3.2.1 Alat	18
3.2.2 Bahan	19
3.3 Karakterisasi Awal Butir Ferit	19
3.4 Proses Perlakuan Panas	19
3.5 Pengujian	20
3.5.1 Pengamatan Struktur Mikro	20
3.5.2 Penghitungan Butir Austenit Awal	21

3.5.3 Permodelan Persamaan Pertumbuhan Diameter Butir Austenit	22
<b>BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN</b>	<b>23</b>
4.1 Hasil Karakterisasi Struktur Mikro Awal Sampel Sebelum Perlakuan Panas	23
4.2 Hasil Karakterisasi FESEM Pada Sampel Setelah Dilakukan Pemanasan	26
4.3 Analisa Pengaruh Waktu Tahan Terhadap Pertumbuhan Butir Austenit	27
4.3.1 Diameter Butir Austenit Pada Laju Pemanasan 10°C/menit	28
4.3.2 Grafik Pertumbuhan Butir Austenit Pada Laju Pemanasan 10°C/menit	30
4.3.3 Diameter Butir Austenit Pada Laju Pemanasan 15°C/menit	31
4.3.4 Grafik Pertumbuhan Butir Austenit Pada Laju Pemanasan 15°C/menit	33
4.3.4 Diameter Butir Austenit Pada Laju Pemanasan 20°C/menit	34
4.3.5 Grafik Pertumbuhan Butir Austenit Pada Laju Pemanasan 20°C/menit	36
4.4 Analisa Pengaruh Laju Pemanasan Terhadap Pertumbuhan Butir Austenit	37
4.4.1 Pengaruh Laju Pemanasan Terhadap Pertumbuhan Butir Austenit	38
4.5 Permodelan Persamaan Pertumbuhan Diameter Butir Austenit	40
4.5.1 Permodelan Persamaan Pertumbuhan Diameter Butir Austenit Terhadap Waktu Tahan	40
4.5.2 Permodelan Persamaan Pertumbuhan Diameter Butir Austenit Terhadap Laju Pemanasan	43
4.6 Permodelan Persamaan Diameter Butir Austenit Terhadap Laju Pemanasan dan Waktu Tahan	46
<b>BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN</b>	<b>49</b>
5.1 Kesimpulan	49
5.2 Saran	50
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	<b>51</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b>	<b>54</b>

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	Pengaruh Ukuran Butir Ferit Terhadap Kekuatan Luluh dan Ketangguhan <sup>[12]</sup>	8
<b>Gambar 2.2</b>	Mekanisme Penguatan Logam Dalam Skala Mikro (Terlihat Bahwa Presipitat Berkontribusi Dalam Menghalangi Pergerakan Dislokasi) <sup>[12]</sup>	9
<b>Gambar 2.3</b>	Pengaruh Paduan Niobium Terhadap Ukuran Butir <sup>[14]</sup>	10
<b>Gambar 2.4</b>	Fenomena Pertumbuhan Butir <sup>[17]</sup>	13
<b>Gambar 2.5</b>	Tahapan Proses Pembentukan Butir Austenit <sup>[18]</sup>	14
<b>Gambar 3.1</b>	Diagram Alir Penelitian	17
<b>Gambar 3.2</b>	Skema Perlakuan Panas Penelitian	20
<b>Gambar 4.1</b>	(A), (B), dan (C) Merupakan Hasil Karakterisasi Awal Dengan Etsa Asam Pikral Jenuh Pada Baja HSLA-Nb 0.183%Dengan Kandungan Karbon 0.124% Sebelum Perlakuan Panas Sedangkan (D) Merupakan Literatur Karakterisasi Awal Dengan Etsa Asam Pikral Jenuh Pada Baja HSLA-Nb Dengan Kandungan Karbon 0.15% Sebelum Perlakuan Panas <sup>[22]</sup>	24
<b>Gambar 4.2</b>	(A) Struktur Mikro Setelah Perlakuan Panas Selama 80 menit Pada Baja HSLA-Nb 0.183% Dengan Etsa Asam Pikral Jenuh, (B) Struktur Mikro Setelah Perlakuan Panas Selama 60 menit Pada Baja HSLA-Nb 0.1% Dengan Etsa Asam Pikral Jenuh (Literatur) <sup>[24]</sup>	25
<b>Gambar 4.3</b>	Hasil Karakterisasi FESEM Pada Baja HSLA-Nb 0.183% Setelah Pemanasan	27
<b>Gambar 4.4</b>	Butir Austenit Pada Laju Pemanasan 10 C/menit (Dietsa Dengan Campuran Larutan Asam Pikral, Alkohol, HCl dan <i>Dodecyl Benzenesulfonate</i> )	29
<b>Gambar 4.5</b>	Grafik Waktu Tahan VS Diameter Butir Austenit Pada Laju Pemanasan 10°C/Menit	30
<b>Gambar 4.6</b>	Butir Austenit Pada Laju Pemanasan 15 C/menit (Dietsa Dengan Campuran Larutan Asam Pikral, Alkohol, HCl dan <i>Dodecyl Benzenesulfonate</i> )	32
<b>Gambar 4.7</b>	Grafik Waktu Tahan VS Diameter Butir Austenit Pada Laju Pemanasan 15°C/Menit	33
<b>Gambar 4.8</b>	Butir Austenit Pada Laju Pemanasan 20 C/menit (Dietsa Dengan Campuran Larutan Asam Pikral, Alkohol, HCl dan <i>Dodecyl Benzenesulfonate</i> )	35

<b>Gambar 4.9</b>	Grafik Waktu Tahan VS Diameter Butir Austenit Pada Laju Pemanasan 20°C/Menit	36
<b>Gambar 4.10</b>	Grafik Diameter Butir Austenit VS Laju Pemanasan	38
<b>Gambar 4.11</b>	Permodelan Linear Diameter Butir Austenit Terhadap Waktu Tahan	42
<b>Gambar 4.12</b>	Permodelan Linear Diameter Butir Austenit Terhadap Laju Pemanasan	45
<b>Gambar 4.13</b>	Model Persamaan Diameter Butir (persamaan 4.10) Sebelum Dikurangi Variabel Konstanta Baru (ln C)	47
<b>Gambar 4.14</b>	Model Persamaan Diameter Butir (persamaan 4.10) Setelah Dikurangi Variabel Konstanta Baru (ln C)	48



## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 1.1</b>	Komposisi Paduan Sampel	3
<b>Tabel 3.1</b>	Komposisi Sampel Baja HSLA-Nb	18
<b>Tabel 4.1</b>	Penghitungan Diameter Butir Austenit Pada Laju Pemanasan 10°C/menit	28
<b>Tabel 4.2</b>	Penghitungan Diameter Butir Austenit Pada Laju Pemanasan 15°C/menit	31
<b>Tabel 4.3</b>	Penghitungan Diameter Butir Austenit Pada Laju Pemanasan 20°C/menit	34
<b>Tabel 4.4</b>	Data Perhitungan Diameter Butir Rata-Rata Terhadap Laju Pemanasan	37
<b>Tabel 4.5</b>	Hubungan Linear Diameter Butir Austenit Terhadap Waktu Tahan	41
<b>Tabel 4.6</b>	Hubungan Linear Diameter Butir Austenit Terhadap Laju Pemanasan	44
<b>Tabel 4.7</b>	Daftar Konstanta Persamaan (4.10)	46

## DAFTAR LAMPIRAN

<b>LAMPIRAN 1</b>	HASIL UJI KOMPOSISI SAMPEL SETELAH PENGECORAN	55
<b>LAMPIRAN 2</b>	HASIL KARAKTERISASI FESEM	56
<b>LAMPIRAN 3</b>	CONTOH PERHITUNGAN BUTIR	63
<b>LAMPIRAN 4</b>	HASIL PENGHITUNGAN BUTIR	65



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang Penelitian

Baja HSLA (*High Strength Low Alloy*) merupakan baja paduan rendah dengan kekuatan mekanis yang tinggi. Baja HSLA merupakan baja yang memiliki kandungan karbon rendah dan unsur paduan (*alloying element*) yang sangat rendah, umumnya kurang dari 1.5%, dimana komposisi paduan ini menghasilkan kekuatan luluh (*yield strength*) diatas 345 MPa (50 ksi) pada kondisi *hot rolled, cold rolled, anil, stress relieved, direct quenching*, atau normalisasi.<sup>[1]</sup> Baja HSLA umumnya diaplikasikan dalam bidang konstruksi, otomotif, bejana tekan, dan saluran pipa.<sup>[2]</sup> Aplikasi ini tidak terlepas dari keunggulan baja HSLA yang mempunyai sifat mudah untuk dibentuk, mempunyai sifat kemampulasan yang baik, mempunyai kekuatan yang tinggi, mempunyai ketangguhan yang baik, serta mempunyai bobot yang ringan.<sup>[3]</sup>

Di tengah krisis energi yang melanda dunia saat ini, kehadiran baja HSLA mempunyai pengaruh positif yang luas terhadap penghematan energi. Pernyataan ini didukung dari sifat baja HSLA yang dalam peningkatan kekuatannya dapat menggunakan proses pembentukan canai panas (*hot forming*). Dimana dari sisi penggunaan energi, proses pembentukan canai panas jelas memerlukan energi yang lebih sedikit dibandingkan dengan metode kuens dan temper.

Aplikasi proses canai panas secara umum terdiri dari tiga langkah proses, yaitu: pemanasan awal (*reheating*), canai panas, dan pendinginan.<sup>[4]</sup> Pada proses pemanasan awal, besar butir setelah pemanasan awal akan menjadi butir awal sebelum proses canai panas. Hal ini yang menjadi acuan untuk memprediksikan ukuran butir akhir yang terbentuk setelah proses pencanaian panas. Aplikasi metode ini disebut sebagai *Thermo Mechanical Control Process* (TMCP).<sup>[4]</sup>

Pada proses canai panas, bentuk struktur mikro akhir dari baja HSLA sangat menentukan sifat mekanis dari baja ini.<sup>[4]</sup> Dimana sifat mekanis baja HSLA

yang baik adalah didapatnya butir ferit yang halus dengan terbentuknya butir austenit awal yang berukuran kecil di akhir proses canai panas. Hal ini sesuai dengan persamaan (1.1) yang dikemukakan oleh Hall Petch, bahwa kekuatan material berbanding terbalik dengan ukuran diameter butir, dengan kata lain, semakin tinggi kekuatan suatu material maka semakin kecil ukuran diameter butirnya.<sup>[5]</sup>

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y \cdot d^{-1/2} \quad (1.1)$$

Prediksi ukuran butir ini sangat penting karena menyangkut karakteristik akhir baja yang dihasilkan dari proses pencanaian panas. Hal tersebut yang melatarbelakangi penelitian ini dalam pengamatan pertumbuhan butir austenit awal baja HSLA-Nb 0.183% pada proses pemanasan awal (*reheating*) dengan kondisi pemanasan isothermal. Penggunaan parameter laju pemanasan (*heating rate*) pada proses pemanasan awal (*reheating*) menjadi perhatian dalam penelitian ini. Pertumbuhan butir austenit awal diamati pada material baja HSLA dengan komposisi paduan Niobium sebesar 0.183% dengan laju pemanasan yang berbeda. Hasil yang diperoleh dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi yang berguna untuk industri manufaktur baja HSLA dalam memperoleh baja HSLA dengan kekuatan mekanis yang optimum tanpa melupakan efisiensi produksi.

## 1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Memahami proses pertumbuhan butir baja HSLA dengan komposisi Niobium 0.183% pada proses pemanasan awal (*reheating*).
2. Menganalisa karakteristik pertumbuhan butir yang terjadi setelah proses pemanasan awal (*reheating*) dengan parameter laju pemanasan dan waktu tahan yang berbeda.
3. Mendapatkan hubungan antara ukuran diameter butir austenit awal dengan laju pemanasan, dan waktu tahan pada proses pemanasan awal (*reheating*) baja HSLA-Nb 0.183%.

### 1.3 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup penelitian ini berupa:

#### 1. Material

Material yang dipakai dalam penelitian kali ini adalah baja HSLA-Nb 0.183% dengan dimensi ukuran material yang digunakan yaitu 1 cm x 1 cm x 1 cm. Dengan komposisi paduan material, sebagai berikut:

**Tabel 1.1** Komposisi Paduan Sampel

Komposisi	Jumlah (%)	Komposisi	Jumlah (%)
C	0.124	Nb	0.183
Ti	< 0.0005	Cu	0.020
Si	< 0.004	V	< 0.0010
Mn	0.130	Ni	0.025
P	0.030	Cr	0.065
S	0.011	N	0.022
Al	0.0048	W	0.013

#### 2. Proses Perlakuan Panas

- *Preheating*

*Preheating* dilakukan pada temperatur 800°C selama 5 menit

- Austenisasi

Penentuan temperatur austenisasi baja HSLA-Nb berdasarkan formulasi temperatur kelarutan paduan Niobium Irvine, yaitu: <sup>[6]</sup>

$$\log [\text{Nb}] \left[ \text{C} + \frac{12}{14} \text{N} \right] = 2.26 - \frac{6770}{T_s} \quad (1.1)$$

Dari formulasi tersebut, di dapat temperatur austenisasi untuk paduan Niobium tersebut pada temperatur 1489°C. Dari temperatur kelarutan tersebut disesuaikan sehingga temperatur austenisasi yang dipakai dalam penelitian ini adalah 1200°C. Proses austenisasi dilakukan dengan waktu tahan selama 20 menit, 50 menit, dan 80 menit. Parameter pembeda dalam penelitian berupa tiga laju pemanasan: 10°C/menit, 15°C/menit, dan 20°C/menit.

- Kuens  
Metode kuens yang digunakan adalah metode kuens cepat. Dalam penelitian ini, media kuens yang digunakan adalah air.

### 3. Pengujian

- Penghitungan ukuran butir dengan menggunakan metode grid ASTM E 112

## 1.4 Sistematika Penulisan

Hasil penelitian ini akan ditulis dengan sistematika penulisan sebagai berikut :

- Bab 1 Pendahuluan  
Bab ini terdiri atas latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, ruang lingkup penelitian, dan sistematika penulisan yang dilakukan.
- Bab 2 Tinjauan Pustaka  
Pada bab ini berisi tentang teori yang berkaitan dalam mendukung penelitian yang dilakukan.
- Bab 3 Metodologi Penelitian  
Bab ini memberikan penjelasan mengenai langkah kerja, prosedur penelitian, prinsip pengujian, serta daftar alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian.
- Bab 4 Hasil dan Pembahasan  
Bab ini terdiri atas seluruh data-data hasil penelitian dan analisa dari hasil penelitian tersebut untuk dibandingkan dengan studi literatur.
- Bab 5 Kesimpulan dan Saran  
Bab ini mencakup rangkuman dari hasil penelitian yang telah dilakukan beserta saran perbaikan untuk penelitian selanjutnya.

## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Baja *High Strength Low Alloy* (HSLA)

Baja HSLA merupakan baja *high strength low alloy*. Baja HSLA adalah tipe baja karbon rendah dengan paduan mikro di bawah 1%. Baja ini memiliki beberapa keunggulan sifat seperti: ketahanan terhadap korosi atmosferik yang baik dibandingkan dengan baja konvensional.<sup>[7]</sup> Selain itu, baja HSLA juga memiliki sifat kekuatan yang baik, memiliki sifat ketangguhan yang baik, mempunyai sifat kemampulasan yang baik, dan mudah untuk dideformasi.<sup>[3]</sup> Keunggulan sifat ini tidak terlepas dari pengaruh ukuran butir, paduan dan penguatan presipitat yang ada di dalam baja HSLA tersebut.<sup>[8]</sup>

Aplikasi baja HSLA biasa dipakai sebagai baja konstruksi, otomotif, bejana tekan, dan saluran pipa.<sup>[2]</sup> Baja HSLA dipakai dalam aplikasi tersebut karena didesain untuk aplikasi tegangan pada temperatur yang rendah. Aplikasi lain dari baja HSLA dipakai pada pipa *oil* dan gas dengan diameter besar, batang otomotif, baja struktur lepas pantai, dan bangunan kapal.<sup>[9]</sup>

Jenis-jenis baja HSLA yang biasa dipakai, yaitu:<sup>[7]</sup>

1. *Weathering Steel*

Baja HSLA jenis *weathering steel* merupakan baja HSLA yang mempunyai ketahanan korosi atmosferik yang baik

2. *Control-rolled Steel*

Tipe baja HSLA ini merupakan baja HSLA yang dilakukan proses *hot rolled* berdasarkan proses canai. Baja tipe ini didesain untuk mengembangkan struktur austenit yang terdeformasi ke struktur ferit halus pada proses pendinginan.

### 3. *Pearlite-reduced Steel*

Tipe baja HSLA ini diperkuat dengan butir ferit yang sangat halus dan mengalami pengerasan presipitat dengan kandungan karbon rendah dan sedikit perlit atau bahkan tanpa perlit dalam struktur mikronya.

### 4. *Microalloyed Steel*

Tipe baja ini merupakan baja HSLA dengan penambahan unsur paduan dalam jumlah mikro ( $< 0.10\%$ ). Paduan unsur mikro yang biasanya ditambahkan seperti Niobium, Vanadium, Titanium yang berfungsi sebagai penghalus butir dan pengerasan presipitat.

### 5. *Acicular Ferrite Steel*

Tipe baja HSLA ini adalah baja HSLA karbon rendah dengan kekerasan yang cukup ketika struktur bertransformasi pada saat pendinginan untuk mencapai *fine high-strength acicular ferrite (low carbon bainite)* dibanding dengan struktur *polygonal ferrite*.

### 6. *Dual-phase Steel*

Tipe baja HSLA ini merupakan baja HSLA yang diproses pada struktur mikro ferit yang mengandung *high-carbon* martensit yang terdistribusi. Baja ini mempunyai kekuatan luluh yang rendah dan laju pengerjaan dingin (*cold work*) yang tinggi sehingga menghasilkan kekuatan mekanis yang tinggi serta kemampubentukan yang baik.

Berdasarkan komposisi paduan penyusun, baja HSLA terbagi menjadi dua kategori kelompok komposisi:<sup>[10]</sup>

#### 1. Baja Vanadium dan atau Niobium

Baja kategori ini memiliki kandungan Mangan maksimum tidak lebih dari 1.35% dengan penambahan minimum 0.2% tembaga (Cu) apabila ingin mendapatkan baja yang spesifik.

#### 2. *High-strength Intermediate-manganese Steel*

Baja kategori ini mempunyai kandungan Mangan dalam kisaran 1.10 sampai 1.65% dan penambahan minimum 0.2% tembaga (Cu) ketika ingin dispesifikan.

## 2.2 Mekanisme Peningkatan Kekuatan Baja HSLA

Mekanisme peningkatan kekuatan pada baja HSLA umumnya sama seperti logam pada umumnya. Konsep peningkatan kekuatan pada baja HSLA ini dengan menghalangi pergerakan dislokasi pada baja HSLA tersebut.<sup>[11]</sup> Pergerakan dislokasi yang terhambat akan menghasilkan kekuatan mekanis yang baik dari baja HSLA tersebut karena terhambatnya pergerakan dislokasi kemungkinan terjadinya deformasi plastis menjadi minim. Mekanisme peningkatan kekuatan baja HSLA dapat dilakukan dengan penghalusan butir ferit, penguatan presipitat, dan penambahan unsur paduan mikro.

### 2.2.1 Penghalusan Butir Ferit

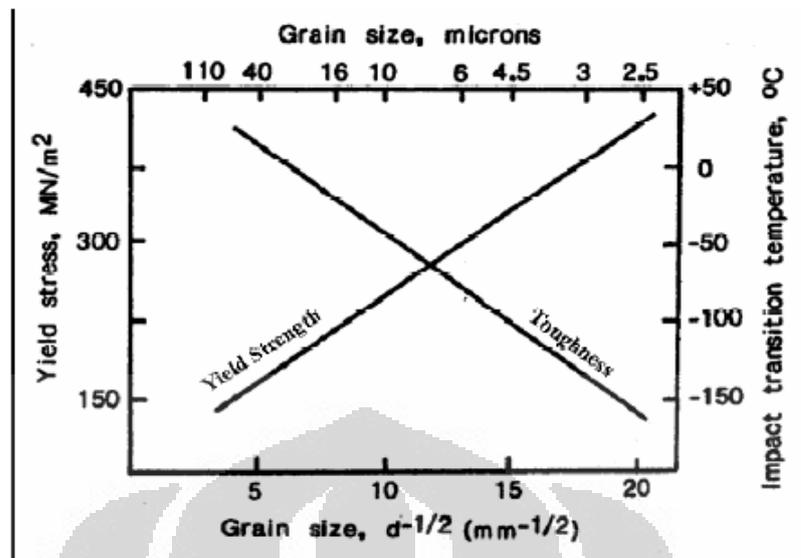
Penghalusan butir ferit merupakan salah satu mekanisme peningkatan kekuatan baja HSLA. Mekanisme ini sering digunakan untuk peningkatan kekuatan dan ketangguhan dari baja HSLA. Penghalusan butir ferit merupakan salah satu cara yang efektif untuk menghalangi pergerakan dislokasi di sekitar batas butir. Sebagai contoh, dalam proses canai panas yang terkontrol, proses pada baja paduan mikro ini mengkondisikan agar austenit dapat bertransformasi menjadi butir ferit yang halus agar produk baja HSLA yang dihasilkan mempunyai kekuatan dan ketangguhan yang baik.

Hubungan menghalusnya butir ferit dalam peningkatan kekuatan mekanis baja HSLA adalah mengecilnya ukuran dari butir yang akan meningkatkan batas butir per unit volume serta mengurangi garis edar bebas dari slip yang berkelanjutan.<sup>[12]</sup> Dengan meningkatnya jumlah batas butir akan menyulitkan dislokasi untuk menginisiasikan dislokasi baru. Efek dari ukuran butir ferit dapat diilustrasikan dari grafik gambar 2.1. Selanjutnya terdapat persamaan yang menjelaskan hubungan antara kekuatan tarik dengan ukuran batas butir yang didefinisikan oleh Hall Petch.<sup>[11]</sup>

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

Dengan  $\sigma_y$  = kekuatan luluh (MPa)                      d = ukuran butir

$\sigma_0$  dan  $k_y$  = konstanta

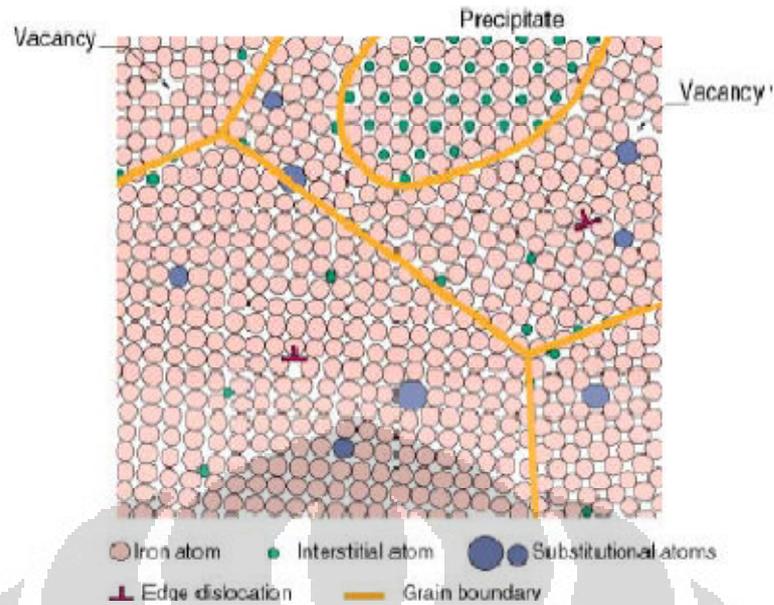


**Gambar 2.1** Pengaruh Ukuran Butir Ferit Terhadap Kekuatan Luluh dan Ketangguhan<sup>[12]</sup>

Persamaan Hall Petch tersebut menjelaskan tentang bagaimana bahwa semakin besar diameter butir maka kekuatan tarik yang dihasilkan akan menjadi rendah. Konsep ini yang digunakan dalam proses TMCP. Proses TMCP merupakan proses untuk memperoleh mikrostruktur austenit awal dari suatu material yang akan bertransformasi menjadi suatu mikrostruktur akhir ferit selama proses pembentukannya melalui pengontrolan proses rekristalisasi dan pertumbuhan butir.

### 2.2.2 Penguatan Presipitat

Penguatan presipitat (*precipitation hardening*) terjadi pada unsur yang memiliki kelarutan yang tinggi pada temperatur yang tinggi dan unsur tersebut harus dapat membentuk endapan yang akan menghalangi pergerakan dislokasi.<sup>[8]</sup> Mekanisme penguatan presipitat dapat digambarkan pada gambar 2.2. Dimana penguatan presipitat berkontribusi dalam meningkatkan kekuatan mekanis material melalui konsepsi penghalangan dislokasi. Dimana dengan adanya presipitat tersebut akan menyebabkan terhalangnya pergerakan dislokasi sehingga energi mekanik yang diperlukan untuk membuat deformasi plastis akan menjadi lebih besar.



**Gambar 2.2** Mekanisme Penguatan Logam Dalam Skala Mikro (Terlihat Bahwa Presipitat Berkontribusi Dalam Menghalangi Pergerakan Dislokasi)<sup>[12]</sup>

Pada baja HSLA penguatan presipitat dapat dilakukan dengan menambahkan unsur seperti Nb, V, dan Ti. Unsur-unsur tersebut mempunyai afinitas yang tinggi terhadap C dan N sehingga kelarutan padatnya dalam baja menjadi terbatas. Partikel yang tidak larut akan membatasi pertumbuhan austenit yang akan menghasilkan butir yang lebih halus. Sebagai contoh, pada baja HSLA-Nb pemanasan pada temperatur 1250°C, Nb pada baja HSLA tersebut akan larut.<sup>[8]</sup> Kemudian, pada saat pendinginan baja HSLA-Nb akan membentuk presipitat Nb(CN) pada bagian muka austenit-ferit selama transformasi yang menyebabkan terjadinya penguatan. Dari fenomena ini, Irvine dkk menemukan persamaan temperatur kelarutan Niobium pada baja HSLA-Nb, sebagai berikut:<sup>[13]</sup>

$$\log [\text{Nb}] \left[ \text{C} + \frac{12}{14} \text{N} \right] = 2.26 - \frac{6770}{T_s} \quad 2.2$$

Dengan:

$[\text{Nb}] \left[ \text{C} + \frac{12}{14} \text{N} \right]$  = konsentrasi keseimbangan dari Nb, C, dan N dalam larutan matriks (% berat) pada temperatur absolut.

$T_s$  = temperatur kelarutan Nb(CN) (K)

### 2.2.3 Penambahan Unsur Paduan Mikro

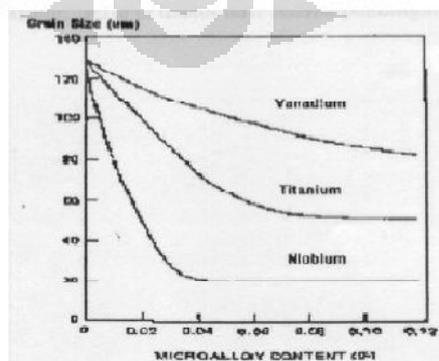
Baja HSLA mempunyai sifat mekanis yang unggul tidak terlepas dari pengaruh paduan penyusunnya. Paduan penyusun memberikan efek seperti ketahanan korosi yang baik, meningkatkan kekuatan mekanis dan ketangguhan dari baja HSLA tersebut. Efek perbaikan sifat ini membuat baja HSLA dapat didesain sesuai dengan kebutuhan yang diinginkan.

Efek penguatan dari penambahan unsur paduan mikro pada dasarnya diakibatkan terbentuknya produk butir yang halus dari baja HSLA tersebut. Sebagai contoh efek penghalusan butir terjadi akibat penambahan unsur paduan seperti Silikon, Tembaga, Nikel, dan Fosfor dalam jumlah mikro. Selain efek penghalusan butir, efek penguatan terjadi akibat fenomena penguatan larutan padat pada penambahan unsur seperti Mangan, dan Kromium.

Berikut dijabarkan pengaruh unsur paduan terhadap sifat mekanis baja HSLA.

#### 1. Niobium

Niobium merupakan salah satu paduan yang berkontribusi terhadap sifat unggul dari baja HSLA. Kandungan Niobium dalam baja HSLA memberikan efek peningkatan kekuatan luluh dan kekuatan tarik dari hasil canai panas baja HSLA. Kontribusi Niobium dalam peningkatan kekuatan luluh baja HSLA karena Niobium dapat membentuk karbida atau Nitrida dalam bentuk endapan atau presipitat. Partikel endapan ini akan membatasi pertumbuhan austenit sehingga dapat menghasilkan butir ferit yang halus. Hal ini dapat digambarkan pada gambar 2.3 berikut.



**Gambar 2.3** Pengaruh Paduan Niobium Terhadap Ukuran Butir<sup>[14]</sup>

## 2. Karbon

Karbon merupakan salah satu unsur paduan yang penting pada baja HSLA. Penambahan kadar karbon dapat meningkatkan penguatan larutan padat serta kekerasan. Selain itu, peningkatan kadar karbon dapat menurunkan sifat kemampulasan dan ketangguhan impak pada baja.

## 3. Nitrogen

Unsur paduan Nitrogen ditambahkan pada baja HSLA yang mengandung Vanadium. Efek penambahan Nitrogen dibatasi hingga 0.005%. Paduan Nitrogen sangat penting karena dapat meningkatkan kekerasan melalui pengerasan presipitat. Presipitat Vanadium-Nitrida (VN) dapat memberikan efek penghalusan butir karena kelarutan yang rendah dalam austenit. Efek pengerasan presipitat juga akan menghalangi dislokasi butir sehingga didapatkan butir ferit yang halus.

## 4. Mangan

Efek penambahan Mangan pada baja HSLA adalah sebagai penguat larutan padat dalam ferit serta menurunkan transformasi austenit-ferit. Mangan dapat meningkatkan efek penguatan presipitat pada baja Vanadium dan baja Niobium.

## 5. Silikon

Fungsi silikon adalah sebagai *deoxidizer* dalam baja cair.<sup>[8]</sup> Silikon mempunyai efek penguatan pada *low-alloy structural steels*. Silikon juga mempunyai pengaruh dalam peningkatan yield strength melalui penguatan larutan padat dan banyak digunakan pada baja HSLA aplikasi pembuatan *fasteners* (paku dan baut).

## 6. Tembaga

Efek penambahan unsur paduan Tembaga pada baja karbon rendah maupun sedang dapat meningkatkan kekuatan mekanis dengan sifatnya sebagai penguat ferit. Penambahan perpaduan Fosfor dan Tembaga dapat meningkatkan ketahanan korosi atmosferik yang lebih baik dibandingkan penambahan salah satu dari elemen tersebut.

#### 7. Kromium

Penambahan unsur Kromium dapat meningkatkan ketahanan korosi atmosferik pada baja karbon.

#### 8. Nikel

Penambahan paduan Nikel pada beberapa jenis baja HSLA ditambahkan hingga 1%. Pada baja HSLA unsur paduan Nikel dapat meningkatkan terhadap korosi atmosferik.<sup>[7]</sup> Perpaduan penambahan unsur paduan Nikel, Tembaga, dan atau fosfor dapat meningkatkan ketahanan korosi air laut.

#### 9. Aluminium

Fungsi penambahan Aluminium dalam paduan sebagai *deoxidizer* dan merupakan unsur yang digunakan untuk mengontrol pertumbuhan butir austenit selama *reheating*.

#### 10. Vanadium

Penambahan unsur Vanadium dapat memberikan efek penguatan pada baja HSLA dengan mekanisme penguatan presipitat serta penghalusan butir ferit.

#### 11. Titanium

Unsur paduan Titanium merupakan unsur paduan yang dapat memberikan efek penguatan presipitat sekaligus juga berguna dalam membatasi pertumbuhan butir austenit.<sup>[12]</sup> Penambahan Titanium juga dapat meningkatkan *impact toughness* dengan penghalusan butir ferit.

#### 12. Sulfur

Sulfur, umumnya merupakan unsur pengotor pada baja. Penambahan Sulfur pada baja dapat meningkatkan *machinability*.

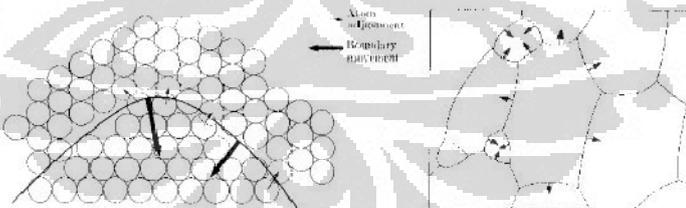
#### 13. Fosfor

Fosfor merupakan unsur yang berfungsi untuk meningkatkan kekuatan dan kekerasan pada baja karbon rendah. Selain itu, penambahan paduan unsur Fosfor dapat meningkatkan *machinability* pada *free-cutting steel*.<sup>[15]</sup>

### 2.3 Pertumbuhan Butir Austenit Dalam Kondisi Isotermal

Pertumbuhan butir pada dasarnya terjadi karena adanya fenomena pembesaran butir tertentu dan terdifusinya butir yang lebih kecil. Batas butir terdiri dari atom-atom dengan energi bebas yang lebih tinggi daripada atom-atom yang terdapat dalam butir. Agar tercapai kondisi yang stabil, 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 merupakan fenomena difusi atom-atom pada batas butir. Energi minimum yang dibutuhkan agar atom-atom dapat berdifusi untuk mencapai keadaan yang stabil disebut dengan energi aktivasi untuk pertumbuhan butir ( $Q$ ).<sup>[16]</sup> Migrasi batas butir akan mengurangi energi bebas butir sehingga ukuran butir menjadi semakin besar.

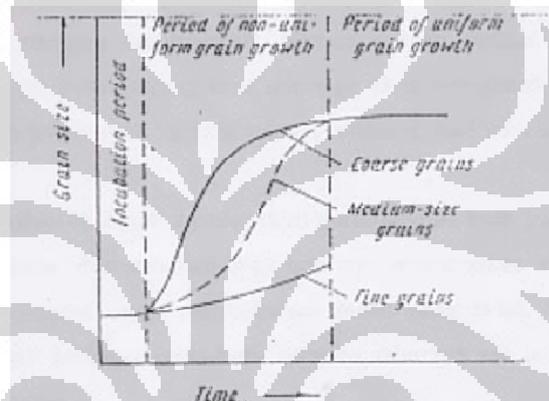
Fenomena pertumbuhan butir dapat dijelaskan pada gambar 2.4. Ketika butir berbentuk melengkung, atom cenderung stabil pada permukaan cekung daripada permukaan yang cembung sehingga terjadi penarikan atom pada permukaan tersebut. Perpindahan panas pada temperatur yang tinggi akan terjadi perpindahan butir dari permukaan cembung ke permukaan cekung. Butir yang berbentuk cembung akan hilang menjadi butir dengan ukuran yang lebih besar.<sup>[17]</sup>



**Gambar 2.4** Fenomena Pertumbuhan Butir<sup>[17]</sup>

Butir austenit biasanya sangat kecil saat pertama kali terbentuk tetapi butir austenit tumbuh secara cepat jika ditahan dalam beberapa waktu pada temperatur isothermal atau dengan peningkatan temperatur. Butir austenit tumbuh secara spontan akibat penurunan energi bebas dengan mengurangi luas permukaan butir. Pertumbuhan butir terjadi akibat fenomena membesarnya butir tertentu dan terdifusinya butir yang lebih kecil secara termodinamik yang kurang stabil.

Proses pembentukan butir austenit dijelaskan pada gambar 2.5. Tahapan permulaan pertumbuhan butir austenit dimulai dari tahapan inkubasi dimana pada tahapan ini penahanan butir austenit pada temperatur konstan tidak akan terlihat pertumbuhan butir austenit yang signifikan. Semakin meningkatnya temperatur serta diiringi meningkatnya waktu, waktu yang dibutuhkan dalam tahapan inkubasi menjadi lebih singkat. Pada tahapan ini terjadi pertumbuhan butir yang tidak seragam (*non-uniform grain growth*). Setelah terjadinya pertumbuhan butir yang tidak seragam, pertumbuhan butir cenderung menjadi konstan dan penambahan waktu tahan lebih lanjut akan menyebabkan ukuran butir menjadi seragam (*uniform grain growth*).



**Gambar 2.5** Tahapan Proses Pembentukan Butir Austenit<sup>[18]</sup>

### 2.3.1 Pengaruh Temperatur dan Waktu Tahan Terhadap Pertumbuhan Butir Austenit

Faktor temperatur dan waktu menjadi variabel yang penting dalam menentukan pertumbuhan butir austenit dalam kondisi isothermal. Hal ini didukung oleh percobaan Beck yang menghasilkan persamaan:<sup>[19]</sup>

$$d^n - d_0^n = c \cdot t \quad (2.3)$$

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

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

$t$  = waktu anil (detik)

$n$  dan  $c$  = konstanta

Selain Beck, Sellars juga menganalisa pertumbuhan butir austenit pada baja C-Mn yang menghasilkan persamaan:<sup>[4]</sup>

$$d^n - d_0^n = \left[ A \exp \left( -\frac{Q_{gg}}{RT} \right) \right] \cdot t \quad (2.4)$$

Dengan  $A$  = konstanta

$Q_{gg}$  = Energi aktivasi pertumbuhan butir (Kj/mol)

$R$  = Konstanta kesetimbangan gas (8,314 Kj/mol K<sup>-1</sup>)

$T$  = Temperatur absolute (K)

$d_0$  = Diameter butir ferit awal (dianggap konstan)

### 2.3.2 Pengaruh Laju Pemanasan (*Heating Rate*) Terhadap Pertumbuhan Butir Austenit

Pertumbuhan butir austenit dipengaruhi oleh temperatur dan waktu tahan seperti yang ditunjukkan oleh Beck dan Sellars dalam persamaannya. Dari persamaan tersebut didapatkan bahwa jika temperatur austenisasi semakin tinggi maka akan didapatkan butir austenit yang lebih besar. Demikian juga jika waktu tahan semakin lama maka akan didapatkan butir austenit yang lebih besar pula.

Dari kesimpulan-kesimpulan tersebut dapat dibuat suatu korelasi tentang pengaruh laju pemanasan (*heating rate*) terhadap pertumbuhan butir austenit. Laju pemanasan merupakan pemanasan dalam satuan waktu. Dari persamaan-persamaan Beck dan Sellars dapat ditarik suatu kesimpulan mengenai laju pemanasan. Jika laju pemanasan dalam proses pemanasan awal semakin besar maka akan didapatkan ukuran butir austenit yang kecil karena waktu tempuh untuk mencapai temperatur austenit menjadi lebih singkat sehingga waktu pertumbuhan butir austenit menjadi lebih singkat. Demikian juga sebaliknya dengan pengaruh laju pemanasan, jika laju pemanasan rendah maka akan didapatkan butir austenit yang lebih besar karena waktu tempuh untuk menempuh temperatur austenisasi menjadi lebih lama.

Persamaan-persamaan tersebut merupakan suatu acuan dalam menentukan pengaruh temperatur, waktu, dan laju pemanasan terhadap pertumbuhan butir austenit. Pada dasarnya proses pertumbuhan butir terhadap temperatur, waktu, dan laju pemanasan merupakan suatu hal yang kontradiktif tergantung faktor mana yang lebih dominan yang berpengaruh dalam penentuan sifat akhir pertumbuhan butir austenit tersebut.<sup>[20]</sup>

#### 2.4 Aplikasi Hubungan Pertumbuhan Butir Austenit Dalam Dunia Industri

Aplikasi riil pertumbuhan butir austenit dalam dunia industri terdapat dalam aplikasi proses canai panas. Pada proses canai panas, baja HSLA mengalami proses pemanasan awal sebelum dimasukkan kedalam mesin canai. Aplikasi ini dinamakan dengan *Thermo Mechanical Control Process* (TMCP), dimana butir yang terbentuk setelah proses pemanasan awal menjadi butir mula baja sebelum masuk kedalam mesin canai panas.<sup>[5]</sup> Hal ini dapat menjadi modal untuk memprediksikan ukuran butir yang terbentuk setelah proses pencanaian panas guna mendapatkan kekuatan mekanis yang diinginkan. Hubungan butir yang terbentuk dengan kekuatan mekanis baja HSLA terdapat pada persamaan *Hall-Petch* berikut ini:<sup>[11]</sup>

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y \cdot d^{-1/2} \quad (2.5)$$

Dengan  $\sigma_y$  = kekuatan luluh (MPa)

$\sigma_0$  dan  $k_y$  = konstanta

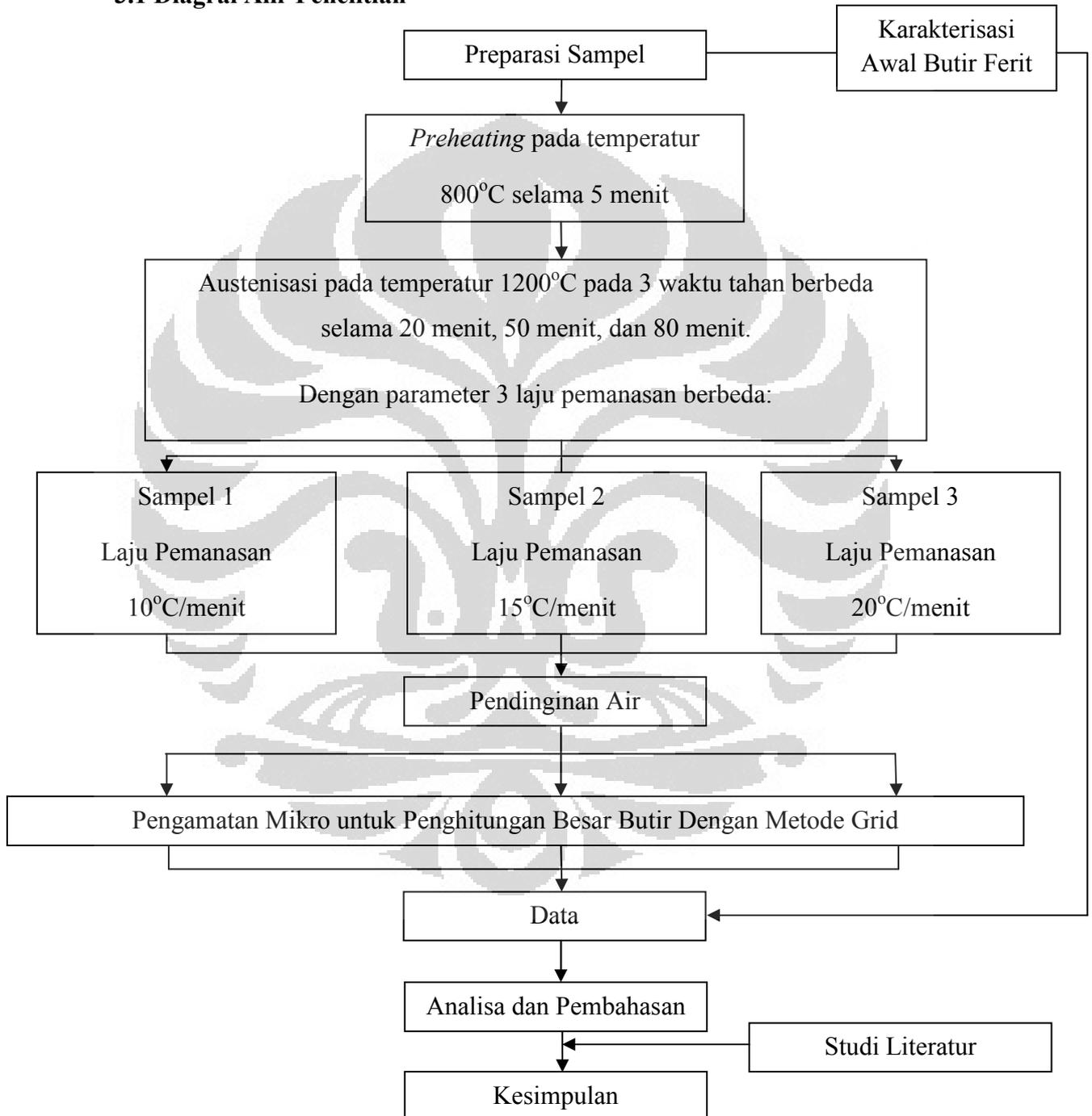
$d$  = ukuran butir

Dunia industri dapat memanfaatkan persamaan ini untuk memperoleh baja HSLA yang mempunyai kekuatan mekanis yang baik. Dari persamaan tersebut terdapat hubungan bahwa semakin kecil ukuran butir maka semakin besar kekuatan luluh material.<sup>[11]</sup> Dengan demikian pertumbuhan butir setelah pemanasan awal harus dihindari untuk mendapatkan butir berukuran kecil yang membuat baja HSLA mempunyai kekuatan mekanis yang tinggi.

## BAB 3

### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Diagram Alir Penelitian



**Gambar 3.1** Diagram Alir Penelitian

### 3.2 Preparasi Sampel

Sampel yang digunakan dalam penelitian ini merupakan baja HSLA-Nb. Sampel yang digunakan dalam penelitian ini berbentuk kubus dengan dimensi ukuran sampel sebesar 1 cm x 1 cm x 1 cm. Total sampel berjumlah 27 sampel yang disesuaikan dengan kebutuhan penelitian. Sampel penelitian terbagi menjadi tiga kelompok berdasarkan pembagian parameter laju pemanasan. Masing-masing laju pemanasan (10°C/menit, 15°C/menit, dan 20°C/menit) terdiri dari sembilan sampel. Kemudian dari masing-masing sembilan sampel tersebut dilakukan austenisasi pada tiga waktu tahan yang berbeda yaitu 20 menit, 50 menit, dan 80 menit, yang masing-masing waktu tahan terdiri dari tiga sampel uji yang diberi label A, B, dan C. Komposisi sampel penelitian terdapat dalam tabel berikut:

**Tabel 3.1** Komposisi Sampel Baja HSLA-Nb

Komposisi	Jumlah (%)	Komposisi	Jumlah (%)
C	0.124	Nb	0.183
Ti	< 0.0005	Cu	0.020
Si	< 0.004	V	< 0.0010
Mn	0.130	Ni	0.025
P	0.030	Cr	0.065
S	0.011	N	0.022
Al	0.0048	W	0.013

Dalam preparasi sampel ini juga diperlukan alat dan bahan yang mendukung penelitian ini. Alat dan bahan yang digunakan meliputi:

#### 3.2.1 Alat

1. Dapur pemanas
2. Termokopel
3. Gergaji logam.
4. Cetakan mounting

5. Mesin amplas.
6. Mesin poles.
7. Mikroskop optik digital.
8. Lain-lain : plastik sampel, pipet tetes, label, spidol, tang penjepit, sarung tangan, masker.

### 3.2.2 Bahan

1. Baja HSLA (dalam bentuk batang)
2. Resin
3. *Hardener*
4. Kertas amplas grid 60, 80, 120, 200, 400, 600, 800, 1000, 1200, dan 1500
5. Bahan Poles TiO<sub>2</sub>
6. Kain poles / beludru

### 3.3 Karakterisasi Awal Butir Ferit

Pada tahapan ini, akan dilakukan karakterisasi awal butir ferit. Karakterisasi awal dilakukan untuk melihat perbandingan butir sebelum dan sesudah dilakukannya perlakuan panas.

### 3.4 Proses Perlakuan Panas

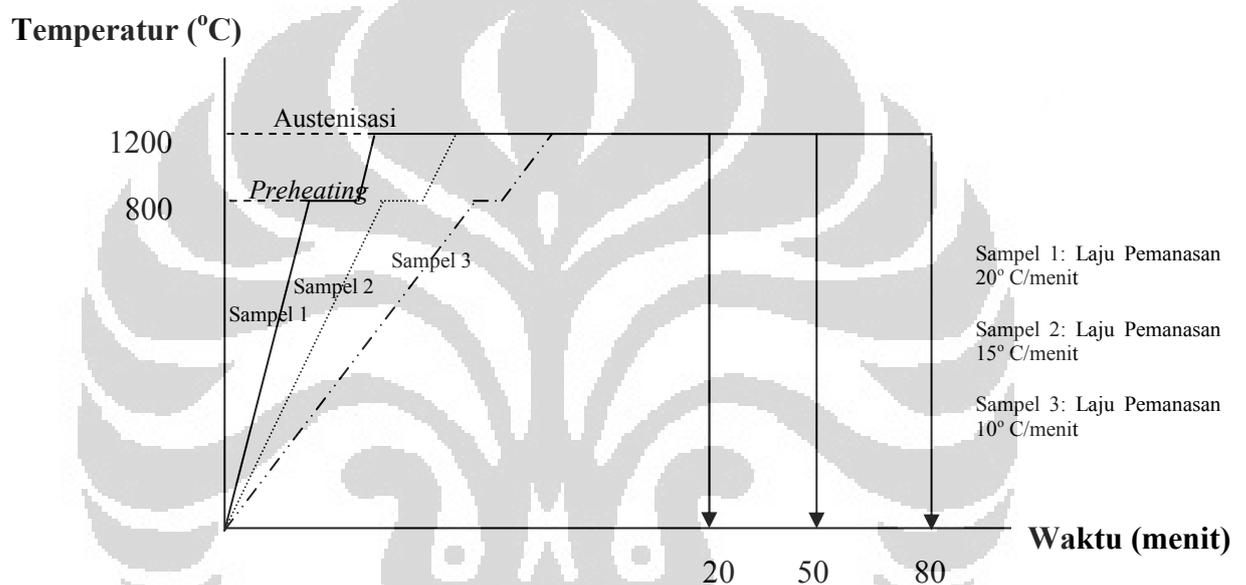
Temperatur pemanasan dipantau dengan menggunakan termokopel yang dikaitkan dengan sampel uji. Proses perlakuan panas yang dilakukan terdiri dari beberapa tahapan yaitu:

- *Preheating* (pemanasan awal)  
Pemanasan awal dilakukan untuk mengkondisikan sampel untuk menyesuaikan perlakuan panas. Pemanasan awal dilakukan selama 5 menit pada temperatur 800°C.
- Austenisasi  
Austenisasi dari kedua sampel dilakukan pada temperatur 1200°C. Pada proses austenisasi sampel mengalami tiga waktu tahan yang berbeda yaitu selama 20 menit, 50 menit, dan 80 menit. Selain perlakuan waktu tahan yang berbeda, pemanasan sampel dilakukan dengan tiga laju pemanasan

(*heating rate*) yang berbeda yaitu pada laju pemanasan 10°C/menit, 15°C/menit, dan 20°C/menit. Parameter tiga laju pemanasan yang berbeda dapat diprogram melalui panel kontrol yang sudah terintegrasi pada alat pemanas.

- Setelah dilakukan proses austenisasi, sampel dikuens secara cepat dengan menggunakan media air.

Proses perlakuan panas dalam penelitian ini dapat digambarkan dalam skema berikut:



**Gambar 3.2** Skema Perlakuan Panas Penelitian

### 3.5 Pengujian

#### 3.5.1 Pengamatan Struktur Mikro

Pengamatan struktur mikro dalam penelitian ini meliputi pengamatan struktur mikro dengan menggunakan mikroskop optik. Pengamatan optik dilakukan untuk melihat struktur butir hasil dari pemanasan yang dilakukan. Sebelum dilakukan pengamatan struktur mikro, diperlukan beberapa metode dari sampel uji untuk mendapatkan hasil yang diinginkan. Persiapan tersebut dilakukan melalui beberapa tahapan preparasi sebagai berikut:

### 1. Pengamplasan

Pengamplasan dilakukan agar lapisan oksida yang menutupi permukaan dapat hilang dan permukaan menjadi rata. Pengamplasan dilakukan dengan menggunakan kertas amplas yang ukuran butir abrasifnya dinyatakan dengan mesh. Urutan pengamplasan harus dilakukan dari nomor mesh yang rendah (60#) ke nomor mesh yang tinggi (1500#).

### 2. Pemolesan

Pemolesan dilakukan sebagai lanjutan dari pengamplasan yang telah menggunakan nomor mesh yang tinggi. Pemolesan berguna untuk menghasilkan permukaan yang halus dan bebas goresan. Pemolesan ini dilakukan agar permukaan material uji benar-benar rata. Apabila permukaan sampel kasar atau bergelombang, maka pengamatan struktur mikro akan sulit untuk dilakukan karena cahaya yang datang dari mikroskop dipantulkan secara acak oleh permukaan sampel. Pemolesan menggunakan bahan titanium oksida yang ditambahkan air.

### 3. Etsa

Etsa merupakan suatu proses penyerangan atau pengikisan batas butir secara selektif dan terkendali dengan pencelupan ke dalam larutan pengetsa baik menggunakan listrik maupun tidak ke permukaan sampel sehingga detail struktur yang akan diamati akan terlihat dengan jelas dan tajam. Untuk mengamati mikrostruktur austenit awal dalam penelitian ini, bahan etsa yang digunakan adalah 30 gr Asam Pikral yang dilarutkan sampai jenuh dalam larutan alkohol 96% dengan ditambahkan sedikit *Dodecyl Benzenesulfonate* dan satu tetes HCl.<sup>[21]</sup> Larutan etsa yang digunakan dalam penelitian ini berdasarkan metode yang telah dilakukan pada penelitian sebelumnya dengan modifikasi penyesuaian waktu etsa untuk mendapatkan gambar yang baik.

#### 3.5.2 Penghitungan Butir Austenit Awal

Penghitungan butir austenit awal dilakukan sebanyak tiga buah sampel uji pada setiap parameter penelitian. Penghitungan butir austenit awal dapat dilakukan dengan menggunakan metode *intersect* berdasarkan ASTM E-112 dengan menggunakan bantuan grid dua dimensi. Pada metode ASTM E-112, penghitungan ukuran butir berdasarkan jumlah titik potong antara total panjang

garis yang ditarik sepanjang 500 mm, tetapi dalam penghitungan butir penelitian ini panjang garis yang dipakai yaitu 100 mm. Garis 100 mm tersebut ditarik sebanyak 10 buah pada foto struktur mikro, kemudian dilakukan *grouping* pada foto mikro tersebut agar ukurannya menyesuaikan dengan perubahan ukuran gambar. Pengukuran diameter butir austenit awal dilakukan berdasarkan perbesaran yang dipakai pada masing-masing foto struktur mikro. Hasil perpotongan butir pada 10 buah garis 100 mm tersebut dimasukkan ke dalam tabel yang kemudian dihitung rata-ratanya agar didapat hasil yang akurat. Kemudian setelah didapat rata-rata, dilakukan penghitungan standar deviasi sesuai dengan persamaan (3.1).

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (3.1)$$

### 3.5.3 Permodelan Persamaan Pertumbuhan Diameter Butir Austenit

Fenomena pertumbuhan butir austenit merupakan suatu fungsi eksponensial.<sup>[4]</sup> Dari hubungan eksponensial ini dapat disederhanakan menjadi fungsi linear dengan metode pendekatan kuadrat terkecil (*least square*).<sup>[25]</sup> Dengan menggunakan formulasi dasar pertumbuhan diameter butir austenit terhadap variabel laju pemanasan dan waktu tahan.<sup>[20]</sup>

$$d = f(t) \cdot f(HR) \quad (3.2)$$

$$\ln d = \ln f(t) \cdot f(HR)$$

$$\ln d = \ln f(t) + \ln f(HR)$$

Dengan:

$$f(t) = a \cdot t^m \text{ dan } f(HR) = k \cdot HR^n \quad (3.3)$$

Maka akan didapat suatu persamaan permodelan pertumbuhan diameter butir austenit terhadap laju pemanasan dan waktu tahan sebagai berikut:

$$\ln d = \ln a + \ln t^m + \ln k + \ln HR^n$$

$$\ln d = \ln a + m \cdot \ln t + \ln k + n \cdot \ln HR \quad (3.4)$$

Model persamaan (3.4) ini yang nanti akan disesuaikan dengan hasil pengukuran diameter butir austenit yang didapat dari penelitian.

## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

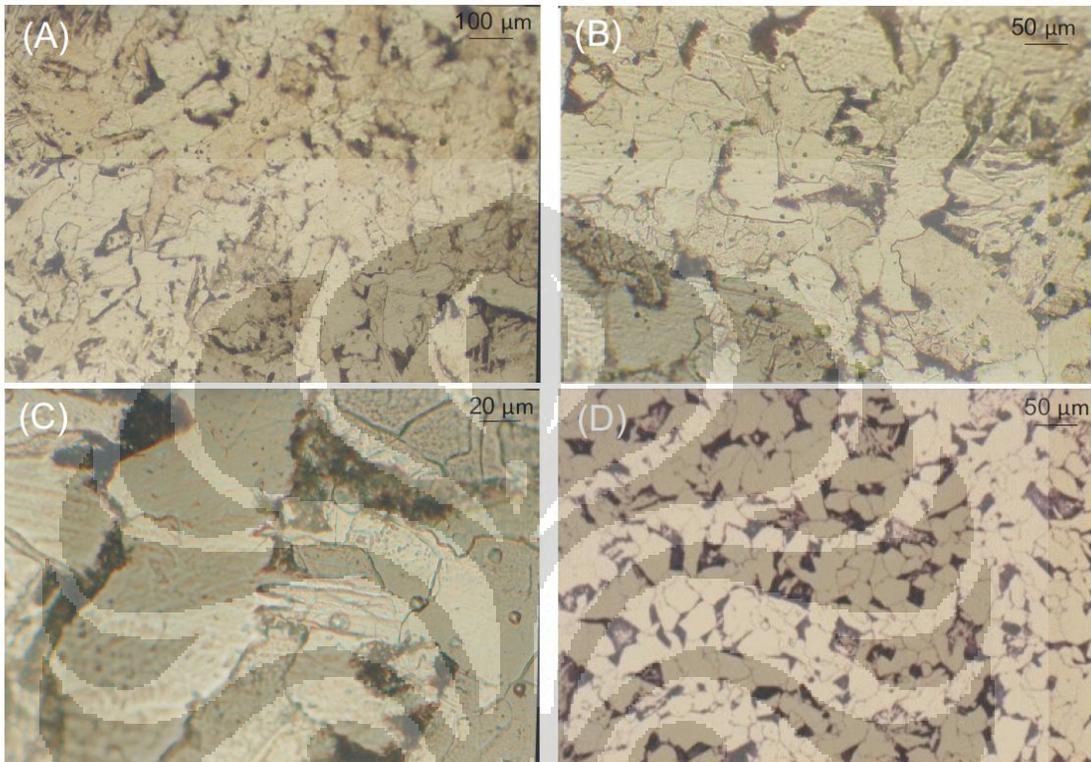
#### 4.1 Hasil Karakterisasi Struktur Mikro Awal Sampel Sebelum Perlakuan Panas

Karakterisasi awal sampel dilakukan untuk mengetahui perbandingan struktur mikro awal sebelum dan sesudah dilakukan pemanasan. Karakterisasi awal dilakukan untuk melihat fasa yang terdapat pada sampel sebelum dilakukan pemanasan. Berdasarkan diagram fasa Fe-Fe<sub>3</sub>C, material baja karbon rendah yang belum mengalami perlakuan panas mempunyai fasa berupa ferit dan perlit. Kemudian apabila baja karbon rendah tersebut mengalami pemanasan sampai pada temperatur A<sub>1</sub> maka fasanya akan berubah menjadi ferit dan austenit. Lebih jauh lagi, apabila baja karbon rendah tersebut dipanaskan hingga melebihi temperatur A<sub>3</sub> maka akan terbentuk fasa austenit yang menyuluruh pada baja karbon rendah tersebut.<sup>[11]</sup>

Hasil karakterisasi awal pada baja HSLA-Nb 0.183% yang belum mengalami perlakuan panas menunjukkan struktur mikro ferit dan perlit yang khas (gambar 4.1). Hasil karakterisasi awal ini sangat sesuai dengan apa yang dijelaskan sebelumnya berdasarkan diagram fasa Fe-Fe<sub>3</sub>C. Terlihat pada gambar 4.1, terdapat konstituen yang berbeda berupa bagian yang berwarna terang dengan bagian yang berwarna gelap dalam struktur mikro tersebut. Dengan membandingkan gambar yang didapat dari literatur, dapat ditentukan bahwa bagian yang berwarna terang merupakan fasa ferit, sedangkan bagian yang berwarna gelap merupakan fasa perlit.<sup>[22]</sup>

Pada umumnya, baja yang belum mendapatkan perlakuan panas mempunyai kekuatan yang lebih rendah dibandingkan dengan baja yang sudah mendapatkan perlakuan panas. Hal ini diakibatkan oleh fasa struktur mikro yang terdapat pada baja yang belum mendapatkan perlakuan panas berupa fasa ferit-perlit yang mempunyai kekerasan hanya sekitar 100 BHN. Jika dibandingkan dengan baja yang sudah

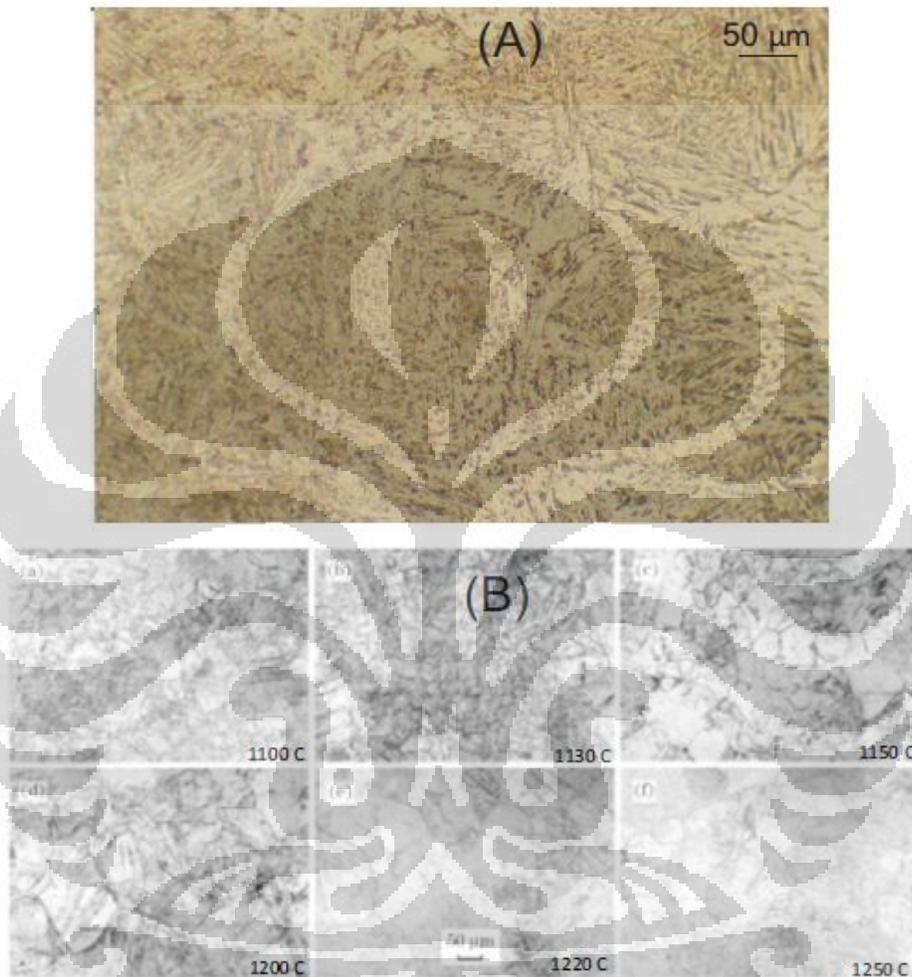
mengalami perlakuan panas kemudian dilakukan pendinginan cepat, akan terbentuk fasa martensit yang mempunyai kekerasan sekitar 550 BHN.<sup>[23]</sup>



**Gambar 4.1** (A), (B), dan (C) Merupakan Hasil Karakterisasi Awal Dengan Etsa Asam Pikral Jenuh Pada Baja HSLA-Nb 0.183% Dengan Kandungan Karbon 0.124% Sebelum Perlakuan Panas Sedangkan (D) Merupakan Literatur Karakterisasi Awal Dengan Etsa Asam Pikral Jenuh Pada Baja HSLA-Nb Dengan Kandungan Karbon 0.15% Sebelum Perlakuan Panas<sup>[22]</sup>

Berikut perbandingan hasil struktur mikro baja HSLA-Nb 0.183% setelah perlakuan panas kemudian dilakukan pendinginan cepat (gambar 4.2) dengan baja HSLA-Nb 0.1% literatur. Terlihat bahwa butir yang dihasilkan setelah pemanasan awal jauh lebih besar dibandingkan sebelum dilakukan pemanasan. Selain itu fasa yang terbentuk sebelum dilakukan pemanasan awal berbeda dengan fasa yang terbentuk setelah pemanasan dengan pendinginan cepat. Pada gambar 4.2 dapat dilihat bahwa terdapat fasa berbentuk jarum yang dikenal dengan fasa martensit.<sup>[11]</sup>

Jika dibandingkan dari segi kekuatan mekanis, baja HSLA-Nb 0.183% setelah perlakuan panas mempunyai kekerasan yang lebih tinggi sebesar 550 BHN dibandingkan dengan sebelum dilakukannya perlakuan panas pada baja tersebut.<sup>[23]</sup>



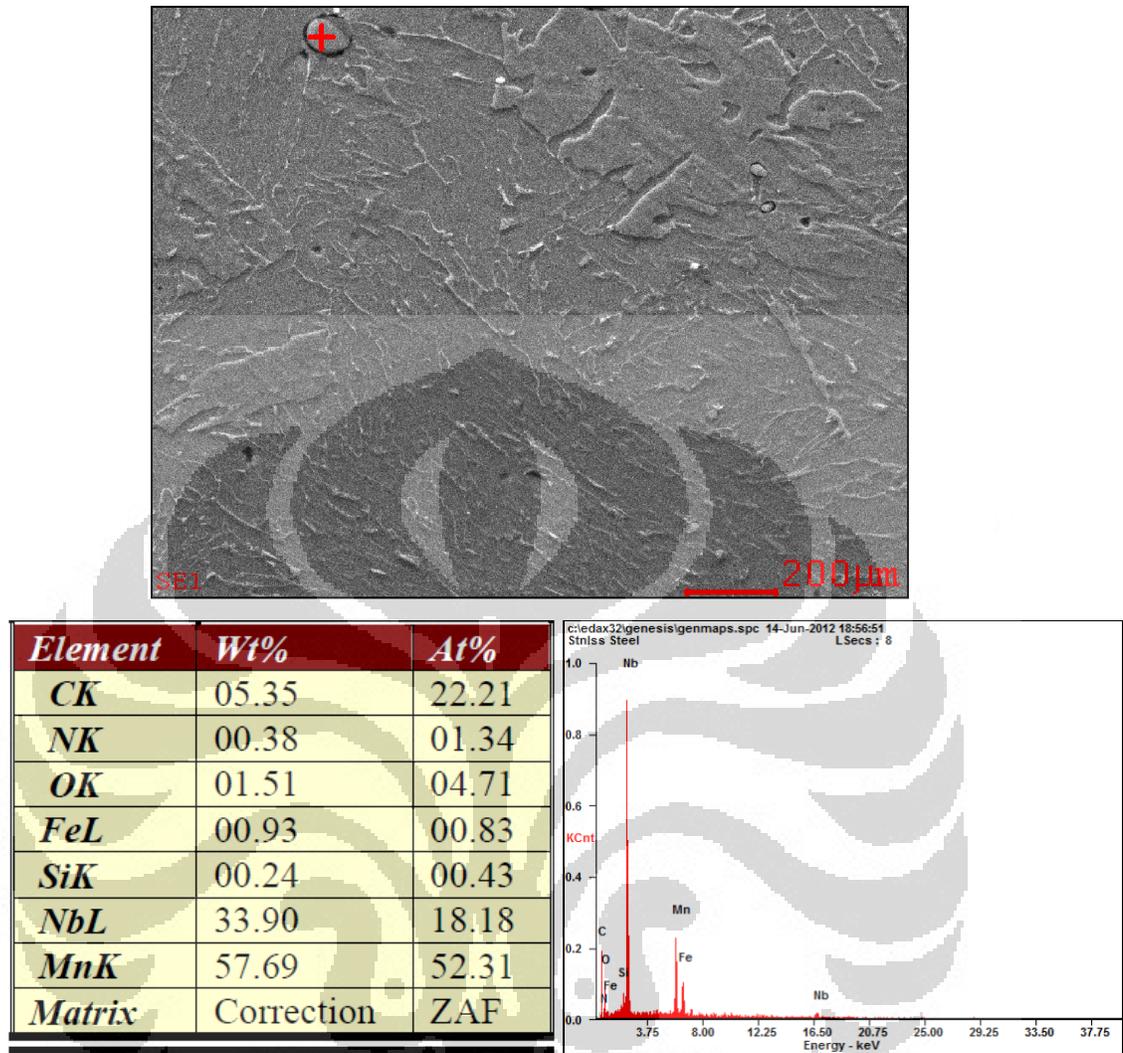
**Gambar 4.2** (A) Struktur Mikro Setelah Perlakuan Panas Selama 80 menit Pada Baja HSLA-Nb 0.183% Dengan Etsa Asam Pikral Jenuh, (B) Struktur Mikro Setelah Perlakuan Panas Selama 60 menit Pada Baja HSLA-Nb 0.1% Dengan Etsa Asam Pikral Jenuh (Literatur).<sup>[24]</sup>

#### 4.2 Hasil Karakterisasi FESEM Pada Sampel Setelah Dilakukan Pemanasan

Analisa pengamatan FESEM pada baja HSLA-Nb 0.183% setelah pemanasan dilakukan untuk melihat pengaruh pemanasan terhadap persebaran presipitat pada material uji. Pengaruh persebaran presipitat ini tidak terlepas dari penentuan temperatur austenisasi yang dipakai pada proses *reheating* dalam penelitian kali ini. Jika Irvine menyatakan persamaannya untuk temperatur kelarutan produk, ini berarti temperatur yang dimaksud adalah temperatur dimana presipitat Niobium telah melarut seluruhnya pada temperatur tersebut.<sup>[13]</sup> Sedangkan, pada penelitian kali ini, temperatur austenisasi yang digunakan dalam proses *reheating* adalah 1200°C, ini berarti bahwa temperatur yang dipakai dalam penelitian ini berada dibawah temperatur kelarutan produk Irvine sebesar 1489°C.

Hasil pengamatan FESEM yang didapat dari baja HSLA-Nb 0.183% setelah dilakukannya pemanasan menunjukkan suatu distribusi presipitat Niobium yang terdapat pada material uji (gambar 4.3). Presipitat Niobium yang terdapat pada gambar 4.3 diketahui berdasarkan hasil uji komposisi spektroskopi yang terdapat pada alat FESEM (lampiran 2). Dari hasil uji komposisi tersebut menunjukkan bahwa pada presipitat tersebut komposisi unsur Niobium lebih dominan dibandingkan dengan unsur lain.

Dengan adanya distribusi presipitat Niobium yang terdapat pada material uji, ini menunjukkan bahwa pada temperatur 1200°C presipitat Niobium belum terlarut seluruhnya akibat pemanasan melainkan melarut sebagian pada pemanasan temperatur 1200°C. Dengan masih adanya presipitat yang belum terlarut, ini menunjukkan bahwa akan terjadi penghalangan pertumbuhan butir oleh presipitat Niobium yang ada serta belum terjadinya suatu pertumbuhan butir yang tidak normal pada pemanasan austenisasi pada temperatur 1200°C.<sup>[13]</sup>



**Gambar 4.3** Hasil Karakterisasi FESEM  
Pada Baja HSLA-Nb 0.183% Setelah Pemanasan

#### 4.3 Analisa Pengaruh Waktu Tahan Terhadap Pertumbuhan Butir Austenit

Butir austenit awal adalah butir yang didapat dari hasil pemanasan pada temperatur austenisasi dengan metode pendinginan yang sangat cepat (air).<sup>[21]</sup> Setelah proses perlakuan panas dilakukan, selanjutnya dilakukan pengamatan struktur mikro berupa penghitungan besar diameter butir austenit sebanyak tiga buah sampel pada masing-masing variabel uji. Penghitungan butir austenit dilakukan berdasarkan metode ASTM E-112. Penghitungan diameter butir dilakukan sebanyak 10 kali dalam setiap sampel yang kemudian hasilnya dirata-rata. Setelah didapatkan hasil rata-rata

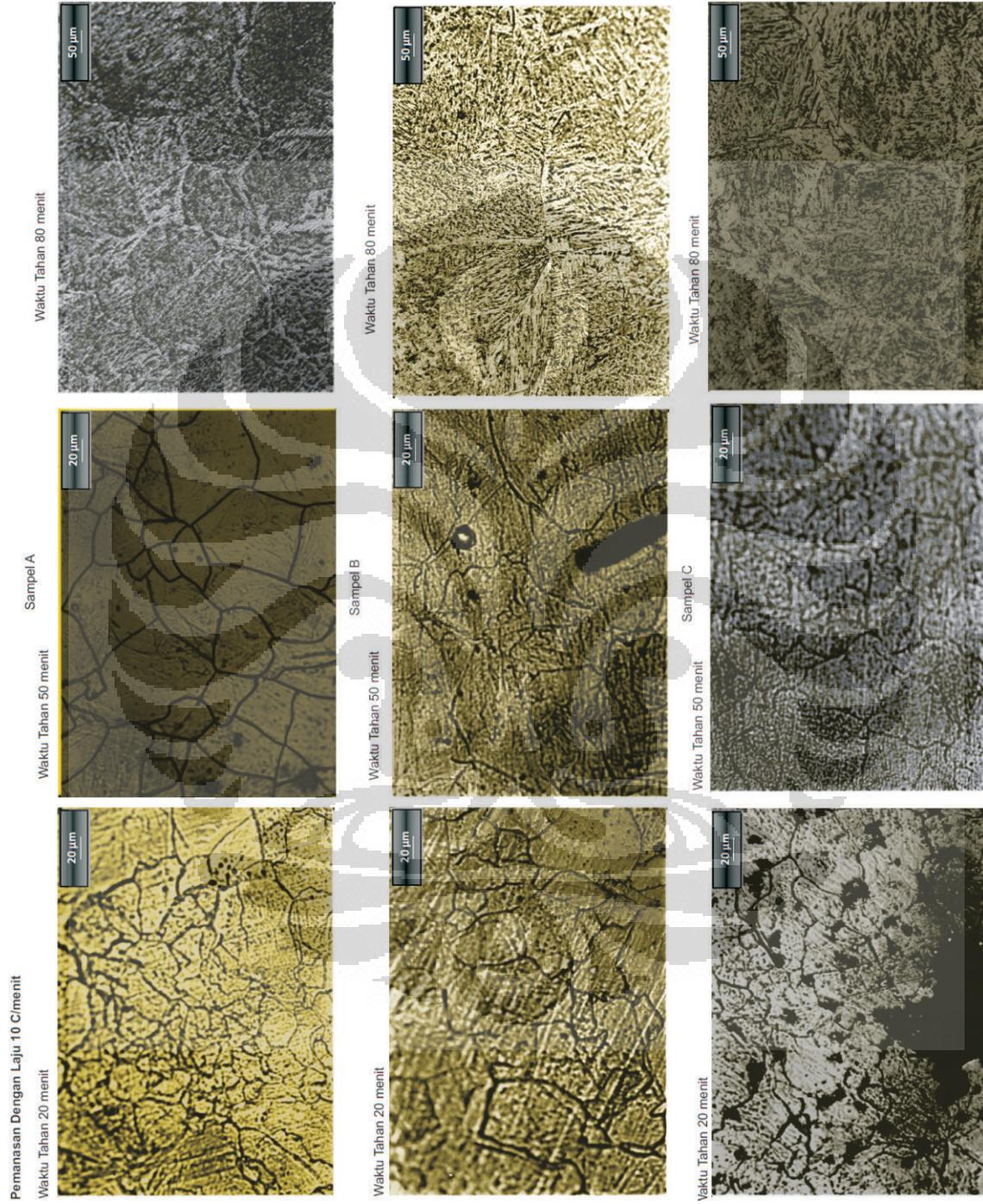
diameter tersebut, dilakukan penghitungan simpangan standarnya untuk menguji akurasi pengukuran tersebut (contoh penghitungan butir austenit awal dapat dilihat pada lampiran 3). Setelah didapat hasil penghitungan butir austenit awal pada masing-masing sampel, selanjutnya akan dilakukan suatu analisa kritis untuk mencari korelasi antara pengaruh waktu tahan austenisasi terhadap pertumbuhan butir austenit awal.

#### 4.3.1 Diameter Butir Austenit Pada Laju Pemanasan 10°C/menit

Berikut hasil penghitungan diameter butir austenit pada laju pemanasan 10°C/menit:

**Tabel 4.1** Penghitungan Diameter Butir Austenit Pada Laju Pemanasan 10°C/menit

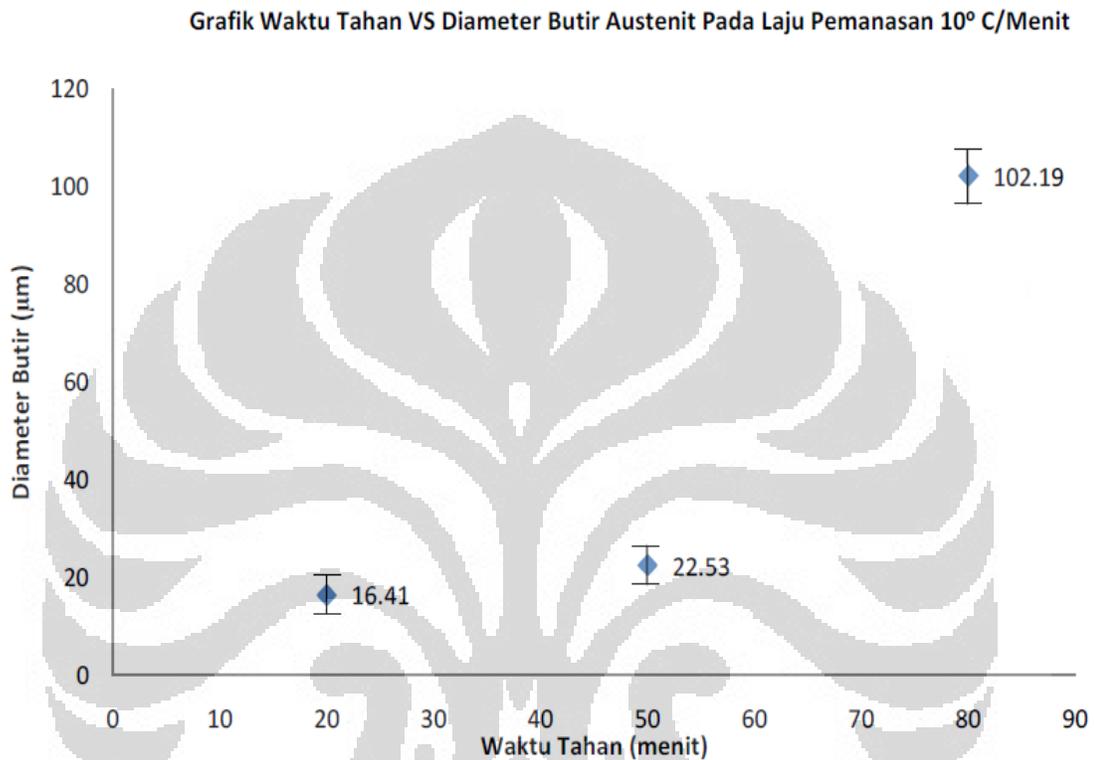
Waktu Tahan (menit)	Sampel	Diameter Butir ( $\mu\text{m}$ )	Diameter Butir Rata-Rata ( $\mu\text{m}$ )	Standar Deviasi
20	A	13.74	16.41	2.92
	B	19.52		
	C	15.96		
50	A	20.41	22.53	2.81
	B	25.71		
	C	21.46		
80	A	95.24	102.19	6.20
	B	107.15		
	C	104.17		



**Gambar 4.4** Butir Austenit Pada Laju Pemanasan 10 C/menit (Dietsa Dengan Campuran Larutan Asam Pikral, Alkohol, HCl dan *Dodecyl Benzenesulfonate*)

### 4.3.2 Grafik Pertumbuhan Butir Austenit Pada Laju Pemanasan 10°C/menit

Dari data dalam tabel 4.1 dapat dibuat grafik hubungan waktu tahan dengan diameter butir austenit pada laju pemanasan 10°C/menit.



**Gambar 4.5** Grafik Waktu Tahan VS Diameter Butir Austenit Pada Laju Pemanasan 10°C/Menit

Terlihat dari grafik diatas, semakin lama waktu tahan maka didapat diameter butir austenit yang lebih besar. Hasil dari grafik ini sangat sesuai dengan persamaan yang digambarkan oleh Beck dan Sellars mengenai diameter butir akhir setelah proses pemanasan awal (*reheating*). Teori tentang pertumbuhan butir sangat jelas terbukti dari grafik 4.5 di atas.

Selain diameter butir yang semakin besar, terlihat pula bahwa selisih diameter antara waktu tahan juga meningkat, ini menunjukkan bahwa dengan semakin meningkatnya waktu tahan, tingkat kenaikan pertumbuhan butir semakin besar. Tingkat kenaikan pertumbuhan butir meningkat sebesar 37.29% dari waktu tahan 20

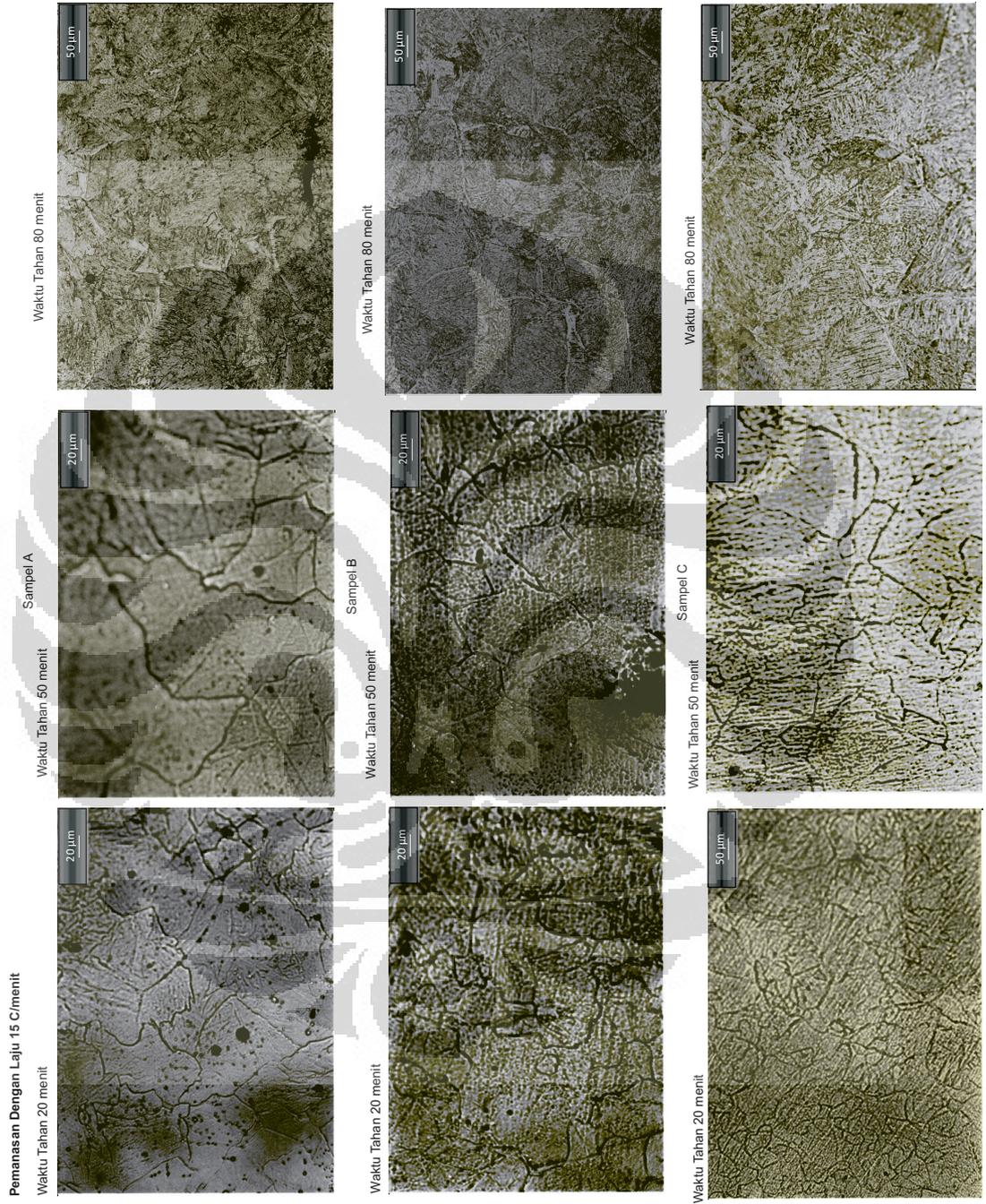
menit ke 50 menit dan meningkat sebesar 353.57% ini menunjukkan bahwa semakin lama waktu penahanan austenisasi maka semakin memberikan kesempatan butir untuk tumbuh, selain itu juga waktu tahan austenisasi yang lebih lama maka kalor yang diterima oleh material uji semakin banyak sehingga butir dapat bergerak bebas untuk tumbuh.

#### 4.3.3 Diameter Butir Austenit Pada Laju Pemanasan 15°C/menit

Berikut hasil penghitungan diameter butir austenit pada laju pemanasan 15°C/menit:

**Tabel 4.2** Penghitungan Diameter Butir Austenit Pada Laju Pemanasan 15°C/menit

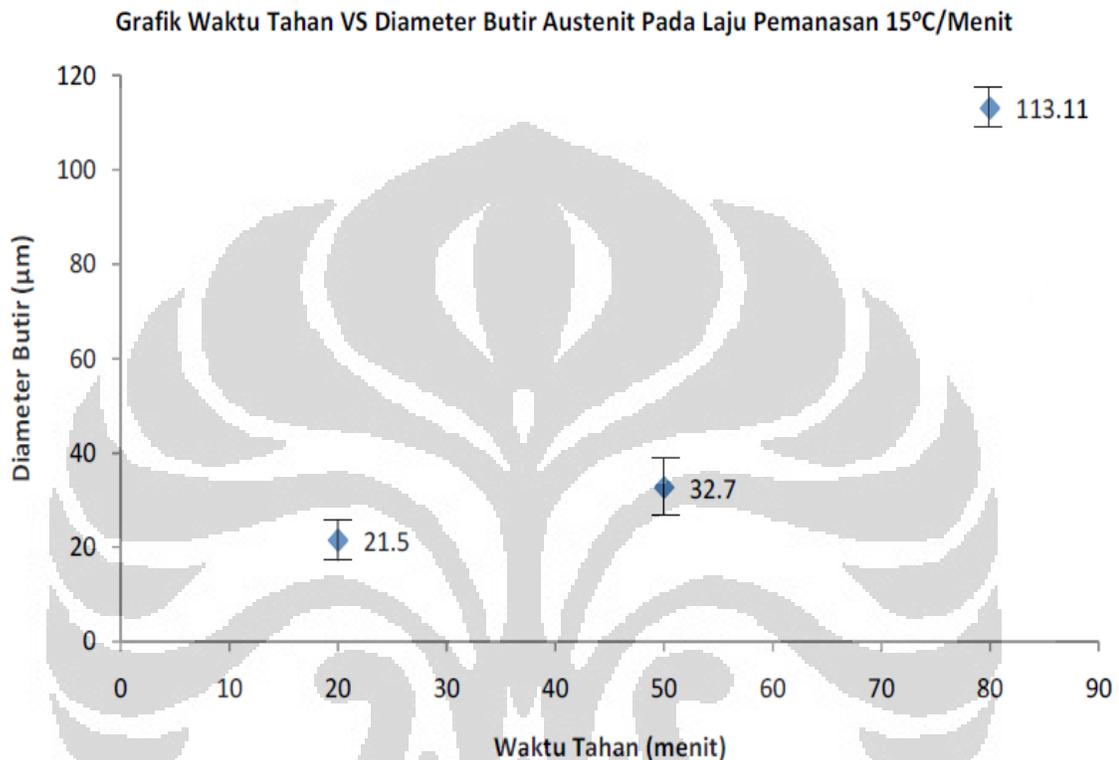
Waktu Tahan (menit)	Label Sampel	Diameter Butir ( $\mu\text{m}$ )	Diameter Butir Rata-Rata ( $\mu\text{m}$ )	Standar Deviasi
20	A	24.08	21.50	2.24
	B	20.31		
	C	20.10		
50	A	39.76	32.70	6.80
	B	32.14		
	C	26.19		
80	A	113.10	113.11	2.99
	B	110.12		
	C	116.10		



**Gambar 4.6** Butir Austenit Pada Laju Pemanasan 15 C/menit (Dietsa Dengan Campuran Larutan Asam Pikral, Alkohol, HCl dan *Dodecyl Benzenesulfonate*)

#### 4.3.4 Grafik Pertumbuhan Butir Austenit Pada Laju Pemanasan 15°C/menit

Dari data dalam tabel 4.2 dapat dibuat grafik hubungan waktu tahan dengan diameter butir austenit pada laju pemanasan 15°C/menit.



**Gambar 4.7** Grafik Waktu Tahan VS Diameter Butir Austenit Pada Laju Pemanasan 15°C/Menit

Terlihat dari grafik diatas, semakin lama waktu tahan maka didapat diameter butir austenit yang lebih besar. Hasil dari grafik ini sangat sesuai dengan persamaan yang digambarkan oleh Beck dan Sellars mengenai diameter butir akhir setelah proses pemanasan awal (*reheating*). Teori tentang pertumbuhan butir sangat jelas terbukti dari grafik 4.7 di atas.

Selain diameter butir yang semakin besar, terlihat pula bahwa selisih diameter antara waktu tahan juga meningkat, ini menunjukkan bahwa dengan semakin meningkatnya waktu tahan, tingkat kenaikan pertumbuhan butir semakin besar.

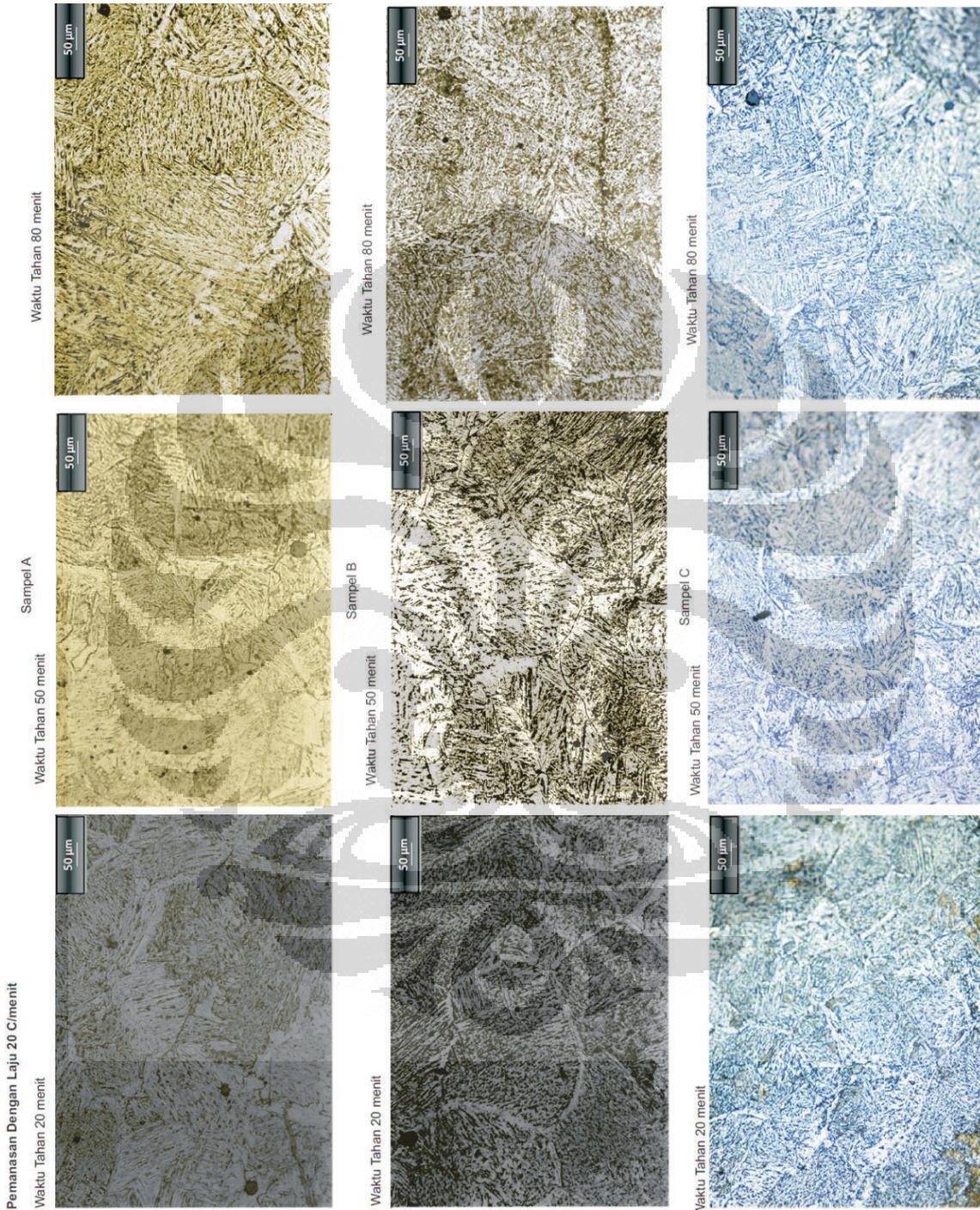
Tingkat kenaikan pertumbuhan butir meningkat sebesar 52.09% dari waktu tahan 20 menit ke 50 menit dan meningkat sebesar 245.90% ini menunjukkan bahwa semakin lama waktu penahanan austenisasi, kalor yang diterima oleh material uji semakin banyak sehingga butir tumbuh dengan cepat.

#### 4.3.4 Diameter Butir Austenit Pada Laju Pemanasan 20°C/menit

Berikut hasil penghitungan diameter butir austenit pada laju pemanasan 20°C/menit:

**Tabel 4.3** Penghitungan Diameter Butir Austenit Pada Laju Pemanasan 20°C/menit

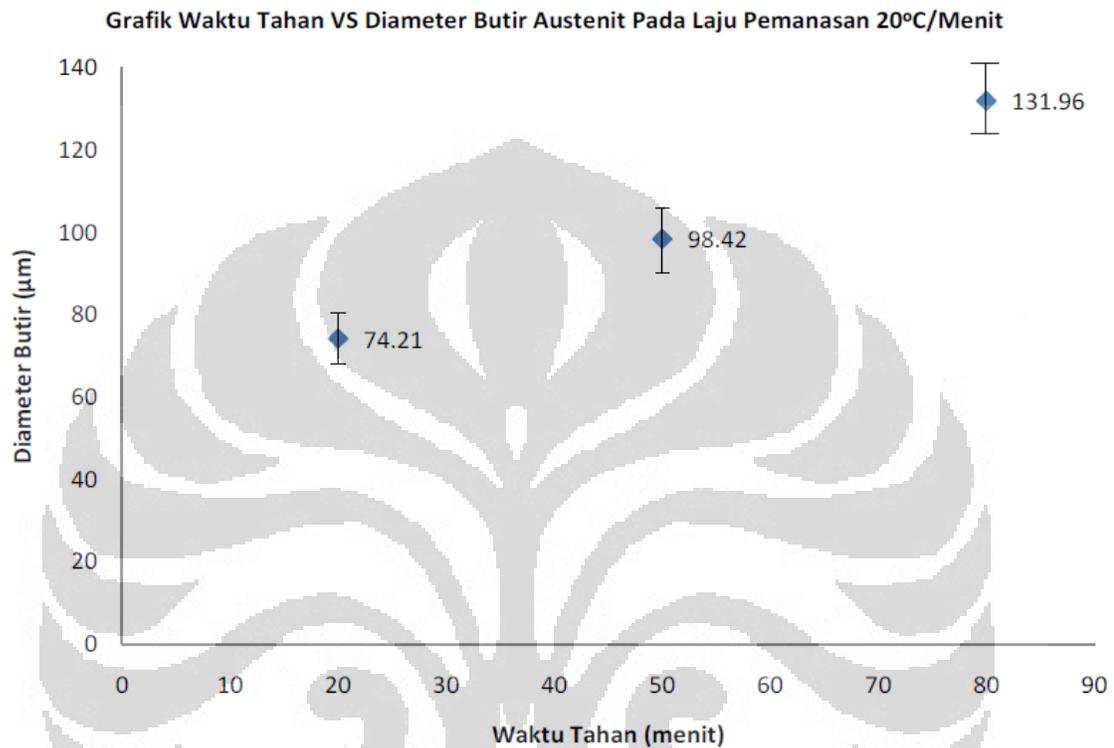
Waktu Tahan (menit)	Label Sampel	Diameter Butir ( $\mu\text{m}$ )	Diameter Butir Rata-Rata ( $\mu\text{m}$ )	Standar Deviasi
20	A	83.93	74.21	8.47
	B	70.24		
	C	68.45		
50	A	107.15	98.42	10.40
	B	101.19		
	C	86.91		
80	A	136.91	131.96	14.05
	B	142.86		
	C	116.10		



**Gambar 4.8** Butir Austenit Pada Laju Pemanasan 20 C/menit (Dietsa Dengan Campuran Larutan Asam Pikral, Alkohol, HCl dan *Dodecyl Benzenesulfonate*)

#### 4.3.5 Grafik Pertumbuhan Butir Austenit Pada Laju Pemanasan 20°C/menit

Dari data dalam tabel 4.3 dapat dibuat grafik hubungan waktu tahan dengan diameter butir austenit pada laju pemanasan 20°C/menit.



**Gambar 4.9** Grafik Waktu Tahan VS Diameter Butir Austenit Pada Laju Pemanasan 20°C/Menit

Terlihat dari grafik diatas, semakin lama waktu tahan maka didapat diameter butir austenit yang lebih besar. Hasil dari grafik ini sangat sesuai dengan persamaan yang digambarkan oleh Beck dan Sellars mengenai diameter butir akhir setelah proses pemanasan awal (*reheating*). Teori tentang pertumbuhan butir sangat jelas terbukti dari grafik 4.9 di atas. Terlihat pula dari grafik di atas, semakin meningkatnya waktu tahan, tingkat kenaikan pertumbuhan butir semakin besar. Tingkat kenaikan pertumbuhan butir meningkat sebesar 32.62% dari waktu tahan 20 menit ke 50 menit dan meningkat sebesar 34.08% ini menunjukkan bahwa semakin lama waktu penahanan austenisasi, kalor yang diterima oleh material uji semakin banyak sehingga butir tumbuh dengan cepat.

#### 4.4 Analisa Pengaruh Laju Pemanasan Terhadap Pertumbuhan Butir Austenit

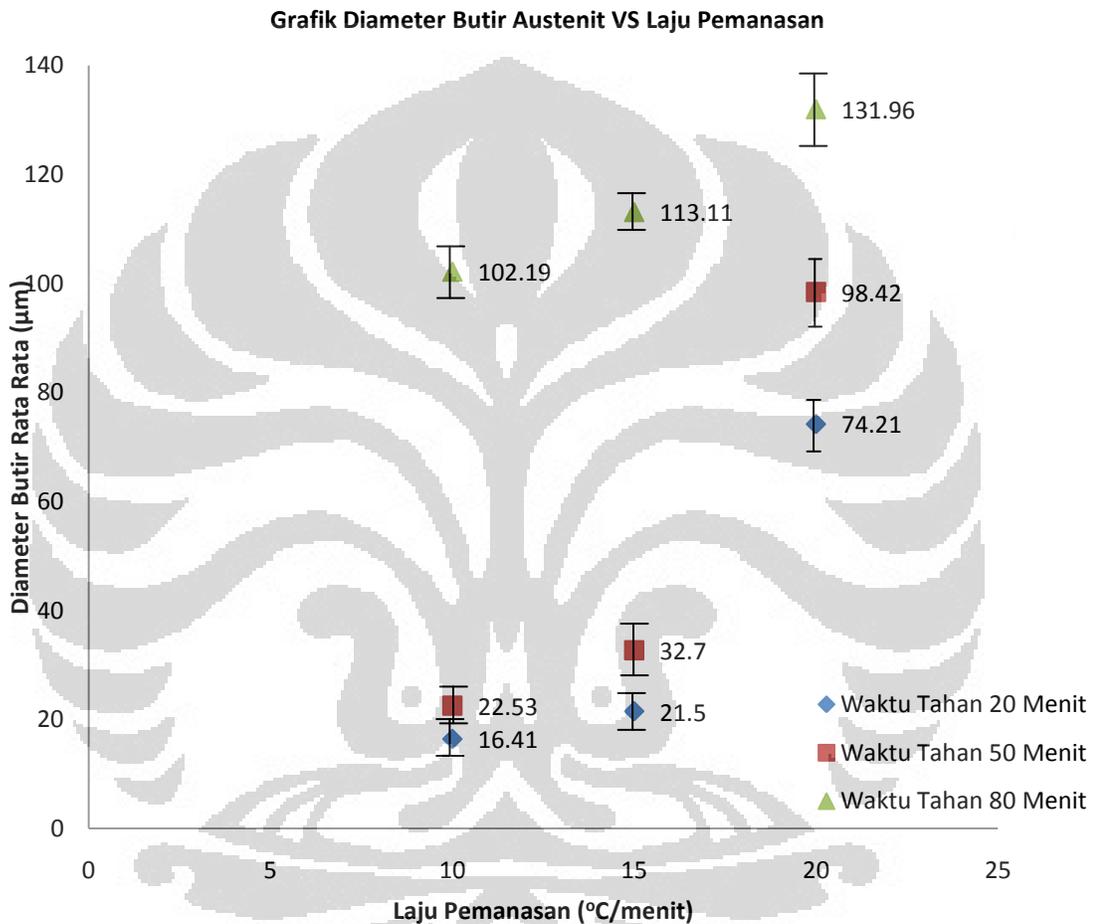
Dari semua data perhitungan butir austenit yang didapat, dapat dilakukan analisa yang mendalam terhadap pengaruh pertumbuhan butir terhadap laju pemanasan. Data-data yang dikumpulkan dari sampel A, B, dan C dikumpulkan dalam tabel 4.4 berikut.

**Tabel 4.4** Data Perhitungan Diameter Butir Rata-Rata Terhadap Laju Pemanasan

Waktu Tahan (menit)	Laju Pemanasan (°C/menit)	Diameter Butir Rata-Rata ( $\mu\text{m}$ )
20	10	16.41
	15	21.50
	20	74.21
Waktu Tahan (menit)	Laju Pemanasan (°C/menit)	Diameter Butir Rata-Rata ( $\mu\text{m}$ )
50	10	22.53
	15	32.70
	20	98.42
Waktu Tahan (menit)	Laju Pemanasan (°C/menit)	Diameter Butir Rata-Rata ( $\mu\text{m}$ )
80	10	102.19
	15	113.11
	20	131.96

Dari data yang tertuang dalam tabel 4.4 dapat dibuat suatu hubungan tentang pengaruh pertumbuhan butir terhadap laju pemanasan pada masing-masing waktu tahan.

#### 4.4.1 Pengaruh Laju Pemanasan Terhadap Pertumbuhan Butir Austenit



**Gambar 4.10** Grafik Diameter Butir Austenit VS Laju Pemanasan

Fenomena pertumbuhan butir terhadap faktor laju pemanasan pada gambar grafik 4.10 menunjukkan bahwa semakin besar laju pemanasan (cepat) maka akan dihasilkan butir austenit yang lebih besar. Begitu juga sebaliknya, dengan laju pemanasan yang rendah (lambat) maka akan dihasilkan butir austenit yang lebih kecil. Dari grafik juga dapat dideduksikan bahwa semakin lama waktu tahan akan membuat diameter butir austenit menjadi lebih besar. Dari grafik dapat diamati juga

bahwa semakin besar laju pemanasan, selisih besar butir semakin besar pula, yang menandakan tingkat kenaikan pertumbuhan butir austenit semakin cepat. Sebagai contoh, pada waktu penahanan 50 menit, tingkat kenaikan pertumbuhan butir austenit meningkat sebesar 45.14% dari laju pemanasan 10°C/menit ke 15°C/menit dan meningkat sebesar 200.98% dari laju pemanasan 15°C/menit ke 20°C/menit.

Fenomena pertumbuhan butir dengan variabel laju pemanasan sebenarnya tidak jauh berbeda dengan fenomena pertumbuhan butir dengan variabel penahanan waktu austenisasi. Pada fenomena pertumbuhan butir dengan variabel penahanan waktu austenisasi, sangat terlihat jelas bahwa faktor waktu ( $t$ ) merupakan faktor yang sangat dominan dalam menentukan pertumbuhan diameter butir austenit. Sedangkan dalam laju pemanasan, terdapat dua faktor dominan yang menentukan dalam pertumbuhan diameter butir austenit, yaitu faktor waktu ( $t$ ) dan faktor temperatur ( $T$ ).

Jika dikaitkan dengan teori pertumbuhan butir yang dikemukakan oleh Beck dan Sellars tentang laju pertumbuhan butir, diameter butir austenit yang dihasilkan dengan variabel laju pemanasan yang cepat maka akan dihasilkan diameter butir austenit yang lebih kecil daripada laju pemanasan yang lambat, ini disebabkan oleh waktu tempuh yang lebih cepat sehingga kesempatan butir untuk tumbuh menjadi terhambat.<sup>[4,19]</sup> Dalam penelitian lain yang serupa didapat bahwa dengan laju pemanasan yang cepat maka akan dihasilkan ukuran butir yang lebih besar dibandingkan dengan laju pemanasan yang lambat, yaitu dengan kondisi pemanasan pada temperatur di atas temperatur kelarutan produk, atau pada kondisi yang disebut dengan pertumbuhan butir tidak normal (*abnormal grain growth*).<sup>[26]</sup> Dalam penelitian ini temperatur austenisasi yang diberikan tidak mencapai temperatur kelarutan produk, sehingga kemungkinan besar presipitat belum melarut. Hasil karakterisasi FESEM (pada gambar 4.3 dan hasil karakterisasi spektroskopi pada lampiran 2) juga menunjukkan konsentrasi unsur Nb, C, dan N pada lokasi tertentu yang menandakan masih terdapat presipitat dalam material uji. Namun pada bagian lain juga tampak persebaran unsur Nb, C, dan N dalam material uji, hal ini menunjukkan bahwa pada pemanasan dengan temperatur penelitian ini telah mendekati temperatur kelarutan produk. Dengan masih belum terlarut seluruhnya

presipitat dalam material uji, hal ini semakin menguatkan bahwa teori tentang pertumbuhan butir yang tidak normal (*abnormal grain growth*) tidak tepat untuk menjelaskan fenomena pertumbuhan butir yang terjadi pada penelitian kali ini. Teori lain yang menjelaskan fenomena pertumbuhan butir yang terjadi dalam penelitian ini adalah teori perubahan kalor persatuan waktu.<sup>[20]</sup> Fenomena perubahan kalor persatuan waktu yang besar dapat menyebabkan *driving force* yang ada menyebabkan penurunan laju pengintian dan meningkatkan laju pertumbuhan butir sehingga dengan laju pemanasan yang besar akan membentuk butir yang lebih besar.<sup>[11,20]</sup> Teori ini merupakan teori yang tepat dalam menjelaskan fenomena pertumbuhan butir dengan variabel laju pemanasan pada penelitian kali ini. Hal ini menunjukkan bahwa memperhatikan faktor yang dominan menjadi hal yang penting pada fenomena pertumbuhan butir.

#### 4.5 Permodelan Persamaan Pertumbuhan Diameter Butir Austenit

Fenomena pertumbuhan butir austenit merupakan suatu fungsi eksponensial.<sup>[4]</sup> Dari fungsi eksponensial tersebut dapat dibuat suatu hubungan antara fenomena pertumbuhan diameter butir austenit ( $d$ ) terhadap variabel laju pemanasan ( $HR$ ) dan waktu tahan ( $t$ ) menjadi:

$$d = f(t) \cdot f(HR) \quad (4.1)$$

Sehingga apabila kita ingin mengaitkan fungsi tersebut dari data yang diperoleh, fungsi eksponensial tersebut dapat kita ubah menjadi fungsi linear menjadi:

$$\ln d = \ln f(t) \cdot f(HR) \quad (4.2)$$

$$\ln d = \ln f(t) + \ln f(HR)$$

Dengan:

$$f(t) = a \cdot t^m \text{ dan } f(HR) = k \cdot HR^n \quad (4.3)$$

##### 4.5.1 Permodelan Persamaan Pertumbuhan Diameter Butir Austenit Terhadap Waktu Tahan

Permodelan persamaan pertumbuhan diameter butir austenit terhadap waktu tahan dapat ditentukan dengan memisahkan variabel laju pemanasan. Pemisahan ini

bertujuan untuk memudahkan penentuan fungsi persamaan diameter pertumbuhan butir austenit terhadap waktu tahan. Dari asumsi seperti ini maka akan didapat:

$$\ln d = \ln f(t)$$

$$\ln d = \ln a \cdot t^m$$

Sehingga:

$$\ln d = \ln t^m + \ln a$$

$$\ln d = m \cdot \ln t + \ln a$$

Dengan mengacu pada formulasi umum persamaan linear  $y = n \cdot x + c$ , maka dapat diasumsikan:

$$\ln d = y \text{ dan } m = n$$

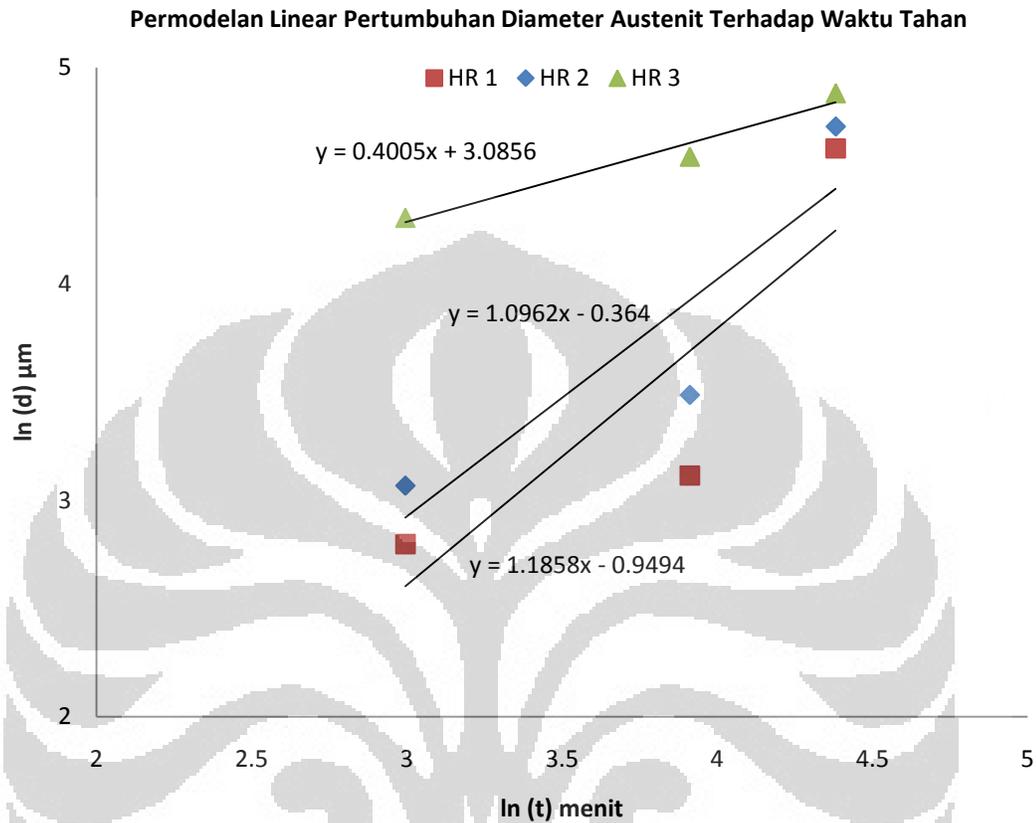
$$\ln t = x \text{ serta } \ln a = c$$

Maka kita dapat membuat hubungan linear dari persamaan ini, yaitu:

**Tabel 4.5** Hubungan Linear Diameter Butir Austenit Terhadap Waktu Tahan

No	Laju Pemanasan (HR) (°C/menit)	Waktu Tahan (t) (menit)	Diameter Butir (d) Rata-Rata (µm)	ln (t)	ln (d)
1	10	20	16.41	2.995732	2.797891
		50	22.53	3.912023	3.114848
		80	102.19	4.382027	4.626834
2	15	20	21.50	2.995732	3.068053
		50	32.70	3.912023	3.487375
		80	113.11	4.382027	4.728361
3	20	20	74.21	2.995732	4.306899
		50	98.42	3.912023	4.589244
		80	131.96	4.382027	4.882499

## Permodelan Linear Diameter Butir Austenit Terhadap Waktu Tahan



**Gambar 4.11** Permodelan Linear Diameter Butir Austenit Terhadap Waktu Tahan

Dari grafik gambar 4.11 didapat permodelan persamaan linear butir austenit terhadap waktu tahan, berupa:

$$\text{Pada laju pemanasan 1 (HR1), } 10^{\circ}\text{C/menit: } y = 1.1858x - 0.9494 \quad (4.4)$$

$$\text{Pada laju pemanasan 2 (HR2), } 15^{\circ}\text{C/menit: } y = 1.0962x - 0.364 \quad (4.5)$$

$$\text{Pada laju pemanasan 3 (HR3), } 20^{\circ}\text{C/menit: } y = 0.4005x + 3.0856 \quad (4.6)$$

#### 4.5.2 Permodelan Persamaan Pertumbuhan Diameter Butir Austenit Terhadap Laju Pemanasan

Sama halnya dengan permodelan persamaan pertumbuhan diameter butir austenit pada waktu tahan, permodelan pertumbuhan diameter butir austenit terhadap laju pemanasan dapat ditentukan dengan memisahkan variabel waktu tahan untuk memudahkan penghitungan. Dari asumsi seperti ini maka akan didapat:

$$\ln d = \ln f(HR)$$

Sehingga:

$$\ln d = \ln k \cdot HR^n$$

$$\ln d = \ln HR^n + \ln k$$

$$\ln d = n \cdot \ln HR + \ln k$$

Dengan mengacu pada formulasi umum persamaan linear  $y = m \cdot x + c$ , maka dapat diasumsikan: menganggap:

$$\ln d = y \text{ dan } n = m$$

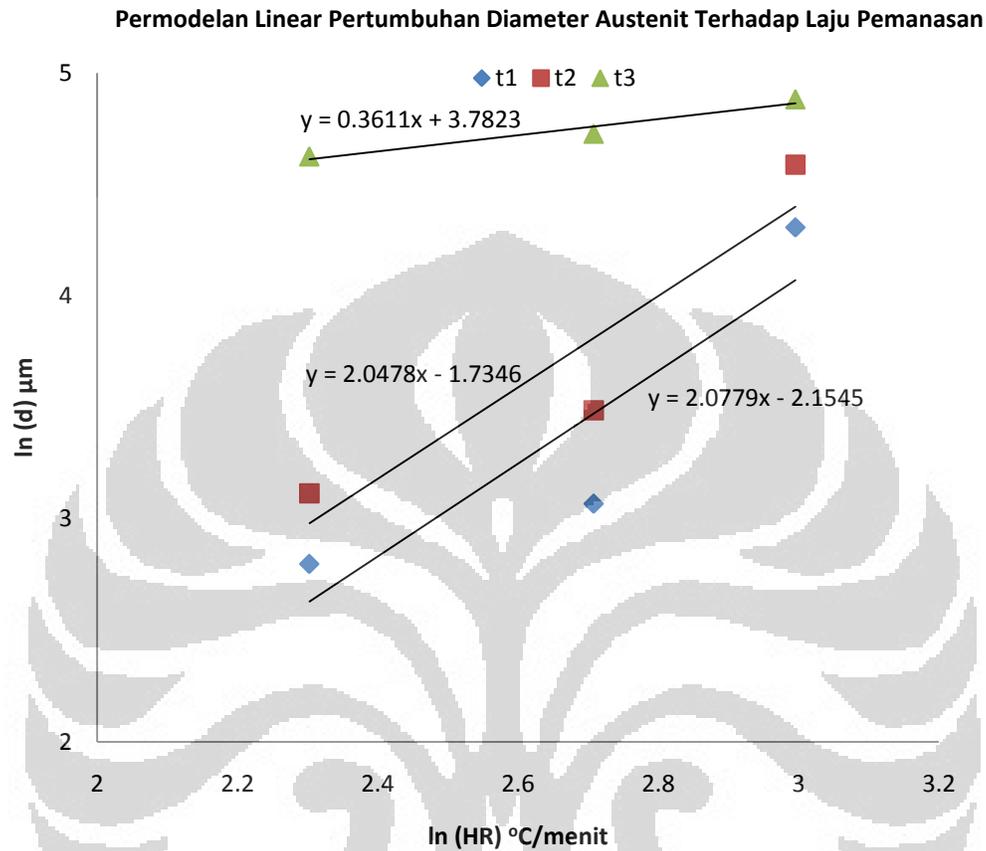
$$\ln HR = x \text{ serta } \ln k = c$$

Maka kita dapat membuat hubungan linear dari persamaan ini, yaitu:

**Tabel 4.6** Hubungan Linear Diameter Butir Austenit Terhadap Laju Pemanasan

No	Waktu Tahan (t) (menit)	Laju Pemanasan (HR) (°C/menit)	Diameter Butir (d) Rata-Rata (µm)	ln (HR)	ln (d)
1	20	10	16.41	2.302585	2.797891
		15	21.50	2.70805	3.068053
		20	74.21	2.995732	4.306899
2	50	10	22.53	2.302585	3.114848
		15	32.70	2.70805	3.487375
		20	98.42	2.995732	4.589244
3	80	10	102.19	2.302585	4.626834
		15	113.11	2.70805	4.728361
		20	131.96	2.995732	4.882499

## Permodelan Linear Diameter Butir Austenit Terhadap Laju Pemanasan



**Gambar 4.12** Permodelan Linear Diameter Butir Austenit  
Terhadap Laju Pemanasan

Dari gambar grafik 4.12 didapat permodelan persamaan linear butir austenit terhadap waktu tahan, berupa:

$$\text{Pada waktu tahan 1 (t1), 20 menit: } y = 2.0779x - 2.1545 \quad (4.7)$$

$$\text{Pada waktu tahan 2 (t2), 50 menit: } y = 2.0478x - 1.7346 \quad (4.8)$$

$$\text{Pada waktu tahan 3 (t3), 80 menit: } y = 0.3611x + 3.7823 \quad (4.9)$$

#### 4.6 Permodelan Persamaan Diameter Butir Austenit Terhadap Laju Pemanasan dan Waktu Tahan

Pada persamaan (4.2) disebutkan bahwa:

$$\ln d = \ln f(t) \cdot f(HR)$$

$$\ln d = \ln f(t) + \ln f(HR)$$

Diketahui dari persamaan (4.3), bahwa:

$$f(t) = a \cdot t^m \text{ dan } f(HR) = k \cdot HR^n$$

Sehingga:

$$\ln d = \ln a \cdot t^m + \ln k \cdot HR^n$$

$$\ln d = \ln a + \ln t^m + \ln k + \ln HR^n$$

$$\ln d = \ln a + m \cdot \ln t + \ln k + n \cdot \ln HR \quad (4.10)$$

Semua konstanta  $a$ ,  $m$ ,  $k$ , dan  $n$  telah didapat dari persamaan (4.4), (4.5), (4.6), (4.7), (4.8), dan (4.9) yang dikumpulkan dalam tabel berikut:

**Tabel 4.7** Daftar Konstanta Persamaan (4.10)

No	a	m	k	n
1	0.387	1.1858	0.116	2.0779
2	0.695	1.0962	0.176	2.0478
3	21.88	0.4005	43.917	0.3611

Untuk mendapatkan persamaan gabungan dari persamaan (4.10), perlu dilakukan suatu kombinasi konstanta yang sesuai terhadap variabel terkait.<sup>[20]</sup>

[20] Catatan: untuk mencari persamaan yang paling sesuai dari persamaan (4.10), perlu dilakukan kombinasi dari konstanta ( $a$ ), dan ( $m$ ) dengan ( $k$ ), dan ( $n$ ). Terdapat sembilan kombinasi yang valid untuk mendapatkan persamaan (4.10) yaitu: kombinasi ( $a_1$ ), dan ( $m_1$ ) dengan ( $k_1$ ), dan ( $n_1$ ); kombinasi ( $a_1$ ), dan ( $m_1$ ) dengan ( $k_2$ ), dan ( $n_2$ ); kombinasi ( $a_1$ ), dan ( $m_1$ ) dengan ( $k_3$ ), dan ( $n_3$ ); kombinasi ( $a_2$ ), dan ( $m_2$ ) dengan ( $k_1$ ), dan ( $n_1$ ); kombinasi ( $a_2$ ), dan ( $m_2$ ) dengan ( $k_2$ ), dan ( $n_2$ ); kombinasi ( $a_2$ ), dan ( $m_2$ ) dengan ( $k_3$ ), dan ( $n_3$ ); kombinasi ( $a_3$ ), dan ( $m_3$ ) dengan ( $k_1$ ), dan ( $n_1$ ); kombinasi ( $a_3$ ), dan ( $m_3$ ) dengan ( $k_2$ ), dan ( $n_2$ ); kombinasi ( $a_3$ ), dan ( $m_3$ ) dengan ( $k_3$ ), dan ( $n_3$ ).

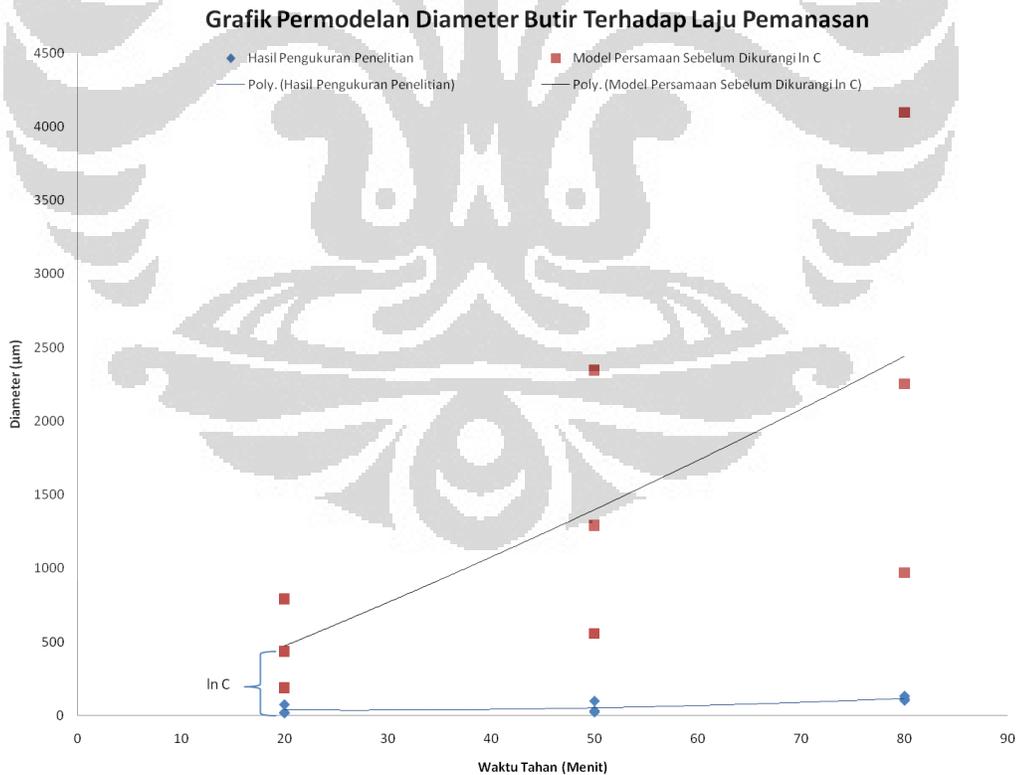
Dalam mendapatkan model persamaan butir yang paling mendekati dengan hasil penghitungan penelitian, perlu dilakukan suatu penyesuaian dengan penambahan atau pengurangan suatu variabel konstanta baru. Dari seluruh penghitungan kombinasi konstanta yang ada, ternyata model persamaan pertumbuhan diameter butir austenit yang paling mendekati hasil penghitungan penelitian adalah hasil kombinasi konstanta ( $a_1$ ), dan ( $m_1$ ) dengan ( $k_1$ ), dan ( $n_1$ ) dengan pengurangan suatu nilai konstanta baru,  $\ln C$  (gambar 4.13) sehingga hasil akhir dari permodelan persamaan yang paling mendekati dengan penghitungan penelitian ditunjukkan pada gambar 4.14 dengan penurunan perhitungan sebagai berikut:

$$\ln d = \ln a + m \cdot \ln t + \ln k + n \cdot \ln HR - \ln C \quad (4.11)$$

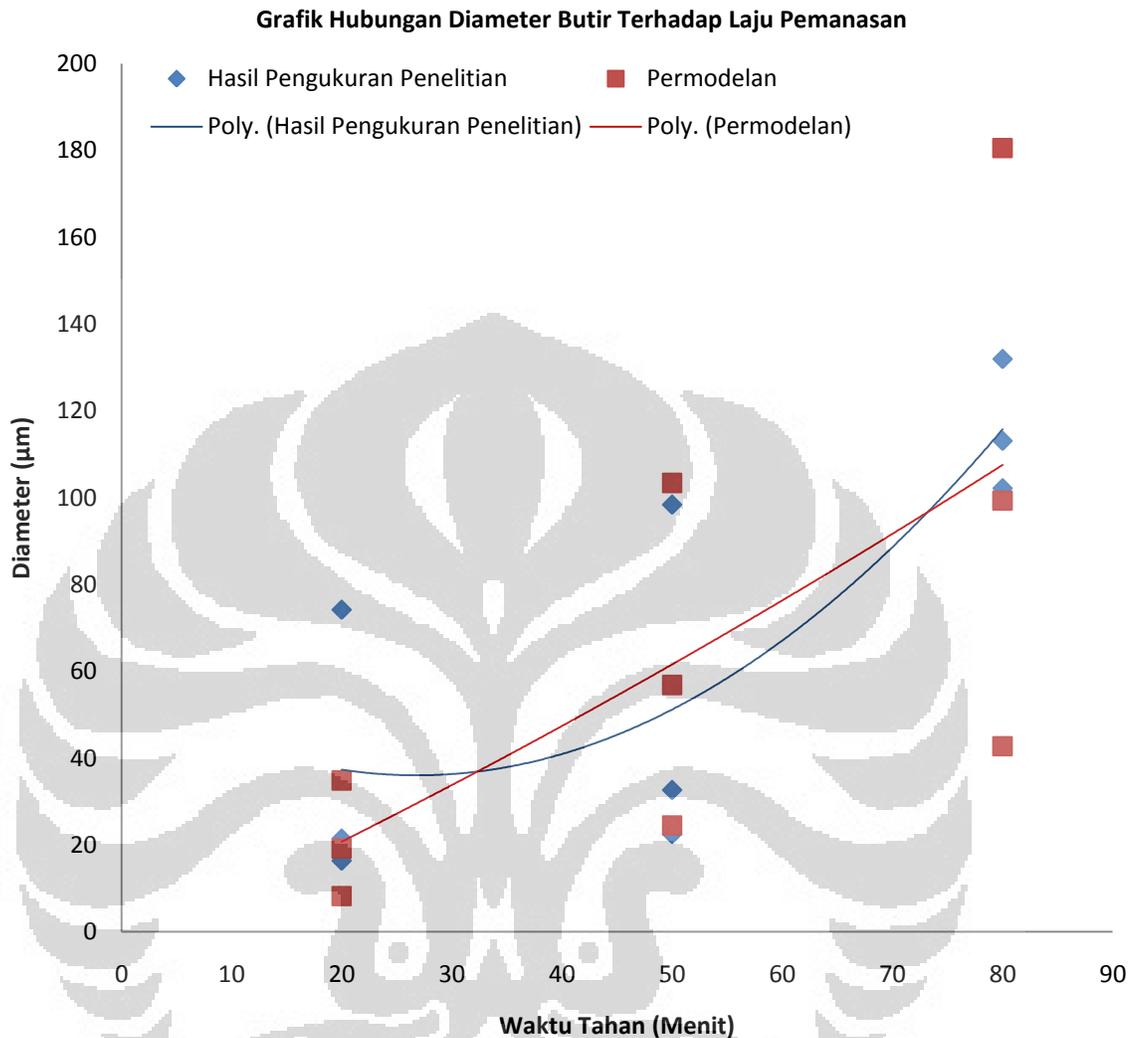
$$\ln d = \ln 0.387 + 1.1858 \cdot \ln t + \ln 0.116 + 2.0779 \cdot \ln HR - \ln 22.6769$$

$$\ln d = \ln \frac{(0.387) \cdot t^{1.1858} \cdot (0.116) \cdot HR^{2.0779}}{22.6769}$$

$$d = 1.979 \times 10^{-3} \cdot t^{1.1858} \cdot HR^{2.0779} \quad (4.12)$$



**Gambar 4.13** Model Persamaan Diameter Butir (persamaan 4.10) Sebelum Dikurangi Variabel Konstanta Baru ( $\ln C$ )



**Gambar 4.14** Model Persamaan Diameter Butir (persamaan 4.10)  
Setelah Dikurangi Variabel Konstanta Baru ( $\ln C$ )

Gambar 4.14 di atas menunjukkan bahwa setelah dikurangi suatu konstanta baru sebesar  $\ln 22.6769$  maka persamaan (4.12) menjadi persamaan yang paling mendekati dengan hasil pengukuran penelitian.

## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

1. Terdapat kecenderungan hubungan eksponensial antara laju pemanasan dengan besar butir austenit awal pada baja HSLA-Nb 0,183%. Ini ditunjukkan dengan meningkatnya ukuran butir austenit awal pada pemanasan dengan laju pemanasan 10°C/menit, 15°C/menit, dan 20°C/menit pada proses *reheating* temperatur 1200°C. Selain itu, hubungan eksponensial ini ditunjukkan juga dengan terjadinya peningkatan tingkat kenaikan pertumbuhan butir dengan meningkatnya laju pemanasan. Sebagai contoh, pada waktu penahanan austenisasi selama 50 menit tingkat kenaikan pertumbuhan butir meningkat sebesar 45.14% dari 10°C/menit ke 15°C/menit, dan meningkat sebesar 200.98% dari laju pemanasan 15°C/menit ke 20°C/menit. Hal ini disebabkan bahwa pada laju pemanasan tinggi, lebih banyak presipitat NbCN yang telah melarut yang memungkinkan butir austenit awal tumbuh lebih cepat.
2. Kecenderungan hubungan eksponensial juga ditunjukkan antara waktu tahan austenisasi dengan besar butir austenit awal pada baja HSLA-Nb 0.183%. Ini ditunjukkan dengan meningkatnya ukuran butir austenit awal pada penahanan waktu austenisasi selama 20 menit, 50 menit, dan 80 menit pada proses *reheating* temperatur 1200°C. Selain itu, hubungan eksponensial ini ditunjukkan juga dengan adanya tingkat kenaikan pertumbuhan butir dengan meningkatnya waktu tahan austenisasi. Sebagai contoh, pada laju pemanasan 15°C/menit, tingkat kenaikan pertumbuhan butir meningkat sebesar 40.67% dari waktu tahan 20 menit ke 50 menit dan meningkat sebesar 211.18% dari waktu tahan dari 50 menit ke 80 menit. Hal ini menunjukkan bahwa semakin lama waktu tahan, maka semakin banyak kalor yang diterima material, dan semakin banyak juga presipitat NbCN yang melarut sehingga efek penghalangan batas butir

menjadi semakin kecil yang menyebabkan pertumbuhan butir austenit semakin cepat. Apabila kita menginginkan butir yang berukuran kecil (halus), waktu penahanan austenisasi pada proses *reheating* harus dilakukan pada waktu yang singkat untuk mencegah terjadinya pertumbuhan butir pada material.

3. Hubungan pertumbuhan diameter butir austenit ( $d$ ), laju pemanasan ( $HR$ ), dan waktu tahan ( $t$ ) dalam penelitian ini dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$d = 1.979 \times 10^{-3} \cdot t^{1.1858} \cdot HR^{2.0779} \quad (5.1)$$

## 5.2 Saran

1. Penelitian tentang pertumbuhan butir austenit awal merupakan bidang yang sangat berguna dalam aplikasi *Thermo Mechanical Control Process*, aplikasi TMCP ini yang nantinya akan menentukan sifat kekuatan mekanis material. Dalam kesempatan ini, saya menyarankan perlu dilakukan penelitian yang lebih lanjut mengenai pertumbuhan butir austenit awal dengan variabel laju pemanasan. Hal ini disebabkan karena telah banyak para peneliti yang telah melakukan penelitian serupa pada variabel temperatur saja dan/atau variabel waktu saja. Tetapi masih sangat sedikit peneliti yang melakukan penelitian dengan variabel laju pemanasan pada proses pemanasan awal. Semoga penelitian pertumbuhan butir dengan variabel laju pemanasan dapat menjelaskan fenomena pertumbuhan butir yang lebih komprehensif berdasarkan teori-teori yang ada.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Bruce L. Brafitt, Arlan O. Benscoler. (2002). *Metallographers Guide, Practices and Procedures for Iron and Steels*. ASM International, pp7-8
- [2] Krakatau Steel. “Baja HSLA Aplikasi”. 23 Mei 2012.  
[http://krakatausteel.com/product/bhsIndonesia/hslasteel/hslaIna\\_applGenStruc.asp](http://krakatausteel.com/product/bhsIndonesia/hslasteel/hslaIna_applGenStruc.asp)
- [3] Krakatau Steel. “Baja HSLA”. 23 Mei 2012.  
<http://krakatausteel.com/product/bhsIndonesia/hslasteel/index.asp>
- [4] Sellars, C.M. (1980). *The Physical Metallurgy of Hot Working. Proc. Int. Conf. on Hot Working and Forming Processes. Sheffield, England*, pg 3-15.
- [5] Umemoto, M., et.al. (1987). *Ferrite Formation work-Hardened Austenite in an HSLA Steel*. Dept of Metal Science and Technology, Kyoto University.
- [6] Rios, P. R. (1988). *Expression for Solubility Product of Niobium Carbonitride in Austenite. Materials Science and Technology Vol 4*.
- [7] Cubberly, et al. (1998). *Properties and Selection: Iron and Steels*. Metals Handbook Vol 1, 10th Edition (Ohio: ASM International).
- [8] Key To Steel’s Data Base. 23 Mei 2012. “*Control of High Strength Low Alloy (HSLA) Steel Properties*”.  
<http://www.key-to-steel.com/default.aspx?ID=CheckArticle&NM=182>
- [9] Azom’s Data Base. 23 Mei 2012. “*Steels-Selected Special Steels*”.  
<http://azom.com/details.asp?ArticleID=290>
- [10] ASM Handbook Volume 01. *Irons, Steels, and High-Performance Alloys, High Strength Structural and High Strength Low Alloy Steel*.

- [11] William D Callister. (1997). *Material Science and Engineering an Introduction*. New York, John Wiley & Son.
- [12] C.M Sellars. (1982). "Static Recrystallization and Precipitation During Hot Rolling of Microalloyed Steels". *Mat Science Seminar, Sheffield, England*
- [13] K.J. Irvine, F.B.Pickering and T .Gladman, J. (1967).  
*Iron Steel Inst*, 205, pg 161.
- [14] Cubberly, *et al.* (1998). *Properties and Selection: Iron and Steels*. Metals Handbook Vol 1, 10th Edition. Ohio: ASM International, pg 389-423.
- [15] M.Militzer, A.Giumelli, E.Bruce Hawbolt, and T.R. Meadowcroft. (1996).  
*Metall .and mater. Trans*, 27A, pg3399.
- [16] R.E Smallman, R.J Bishop. (1995). *Metals and Material*.  
*UK : Butterworth –Heinemann*.
- [17] Lawrence H. Van Vlack. (1960). *Elements of Materials Science*.  
*London: Addison-Wesley Publishing Company, Inc*.
- [18] Y Lakhtin. *Engineering Physical Metallurgy*.  
*Moscow : Foreign Language Publishing House*
- [19] P. A. Beck, J. C. Kremer, L. J. Demer and M. L. Holzworth. (1948).  
*Trans. AIME*, 175, 372
- [20] Ariati, Myrna. (21 Mei 2012). *Personal Interview*
- [21] Ariati, Myrna. (2010). *Kinetika Pertumbuhan Butir Austenit Pada Kondisi Pendinginan Kontinu Pada Baja HSLA-Nb Selama Canai Panas*.  
Departemen Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia

- [22] Knott, J. F. (1981). *“The relationship between microstructure and fracture toughness’ in ‘Steels for line pipe and pipeline fittings”*. *The Metals Society, London.*
- [23] Ariati, Myrna. (2009). *Sifat Mekanik Material. Departemen Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia*
- [24] Lin-na, Duan, et.al. (2010). *Austenite Grain Growth Behavior of X80 Pipeline Steel in Heating Process. Science Direct, Journal of Iron and Steel Research International, pp 62-66.*
- [25] Modul Praktikum Fisika Dasar. (2009). *Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Indonesia.*
- [26] Alogab, K. A et al. (2007). *The Effect of Heating Rate on Austenite Grain Growth in a Ti-Modified SAE 8620 Steel With Controlled Niobium Additions. ISIJ International, Vol 47, 1034-1041*



**DAFTAR LAMPIRAN**

## LAMPIRAN 1

## HASIL UJI KOMPOSISI SAMPEL SETELAH PENGECORAN

Program: Fe-30-M  
 Comment: Cr-Cr/Ni-steel -M  
 Single spark(s)

04/14/2012 10:44:11 AM  
 120838/06  
 Elements: Concentration

Customer: UI  
 Sample Id:

Quality:  
 Product: SAMPLE TEST

No	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	
	%	%	%	%	%	%	%	%	
①	0.127	0.189	0.233	0.032	0.0089	0.134	0.019	0.0054	A
2	0.075	0.114	0.043	0.037	0.013	0.147	0.055	0.029	C
③	0.124	<0.0040	0.130	0.030	0.011	0.065	0.025	0.0093	D
4	0.327	0.148	0.235	0.050	0.013	0.190	0.032	0.0074	B

No	Al	Cu	Co	Ti	Nb	V	W	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.077	0.023	<0.0020	0.0028	0.111	0.0012	<0.0070	<0.0020
2	0.012	0.019	<0.0020	0.0049	0.030	<0.0010	0.066	<0.0020
3	0.0048	0.020	<0.0020	<0.0005	0.183	<0.0010	0.013	<0.0020
4	0.096	0.024	<0.0020	<0.0005	0.365	0.0019	<0.0070	<0.0020

No	B	Sb	Sn	As	Bi	Ta	Ca	Se
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0007	0.017	0.0027	<0.0015	<0.0010	<0.010	0.0003	<0.0025
2	0.0004	<0.0020	0.0030	<0.0015	0.0029	<0.010	0.0011	<0.0025
3	0.0003	0.0050	0.0033	<0.0015	<0.0010	<0.010	0.0003	<0.0025
4	0.0010	0.013	0.0032	<0.0015	<0.0010	<0.010	0.0003	<0.0025

No	N	Fe
	%	%
1	0.031	99.0
2	0.024	<99.3
3	0.022	<99.4
4	0.019	98.5

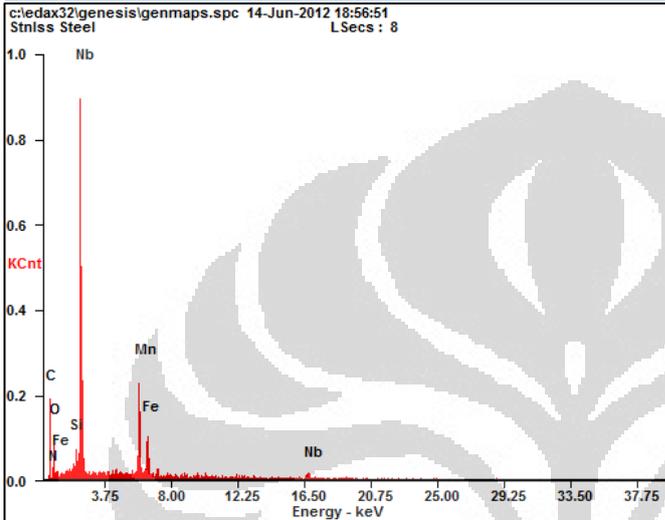


# Microanalysis Report

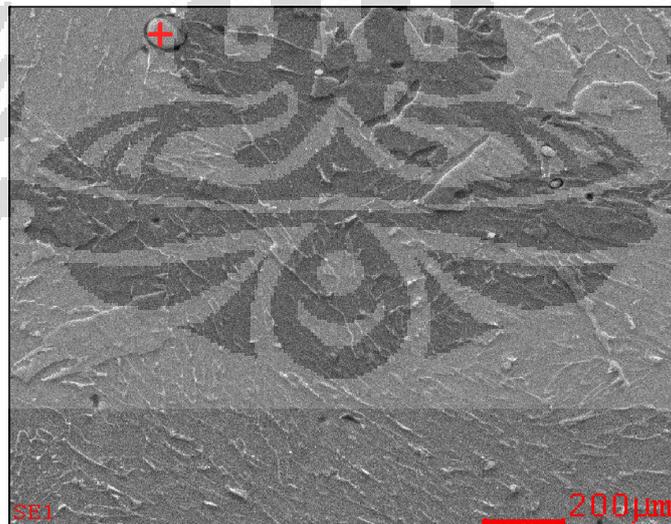
Prepared for: *Company Name Here*

Prepared by: *Your Name Here*

6/14/2012



Element	Wt%	At%
CK	05.35	22.21
NK	00.38	01.34
OK	01.51	04.71
FeL	00.93	00.83
SiK	00.24	00.43
NbL	33.90	18.18
MnK	57.69	52.31
Matrix	Correction	ZAF

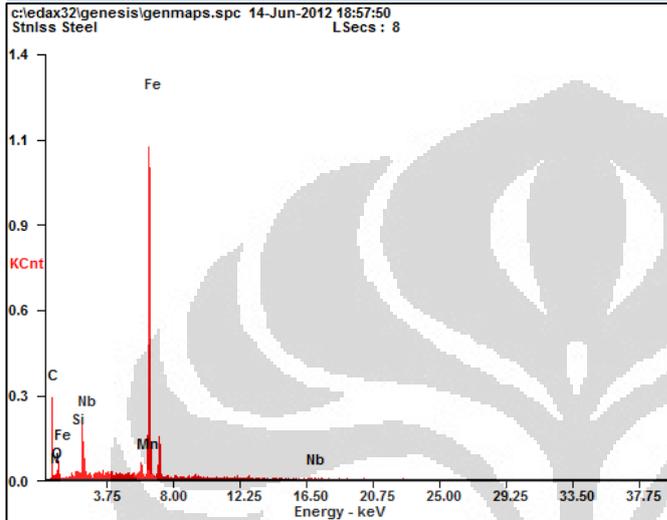


# Microanalysis Report

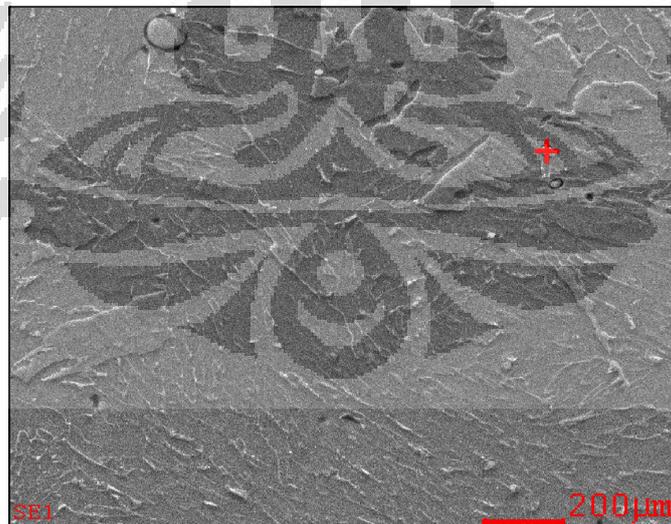
Prepared for: *Company Name Here*

Prepared by: *Your Name Here*

6/14/2012



Element	Wt%	At%
CK	17.03	49.82
NK	00.43	01.09
OK	00.96	02.11
FeL	19.15	12.05
SiK	00.51	00.64
NbL	20.28	07.67
MnK	41.64	26.63
Matrix	Correction	ZAF

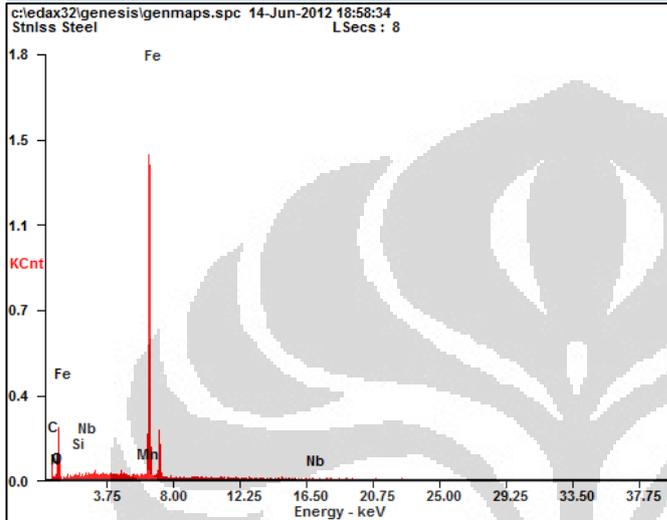


# Microanalysis Report

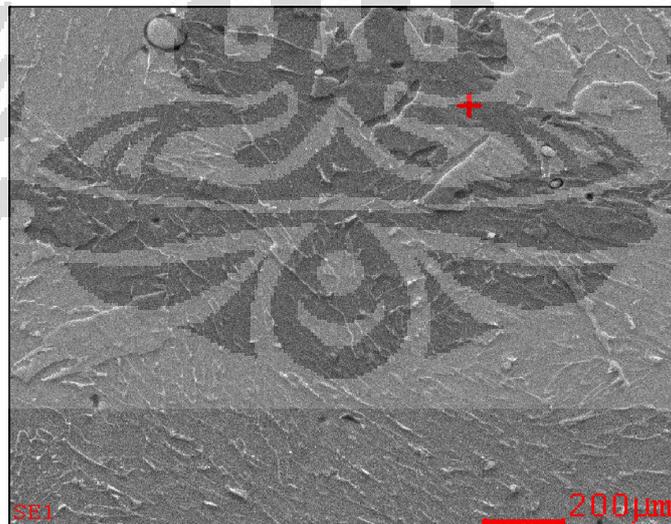
Prepared for: *Company Name Here*

Prepared by: *Your Name Here*

6/14/2012



<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	10.08	33.09
<i>NK</i>	00.68	01.92
<i>OK</i>	01.10	02.70
<i>FeL</i>	73.88	52.17
<i>SiK</i>	00.51	00.72
<i>NbL</i>	01.63	00.69
<i>MnK</i>	12.12	08.70
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

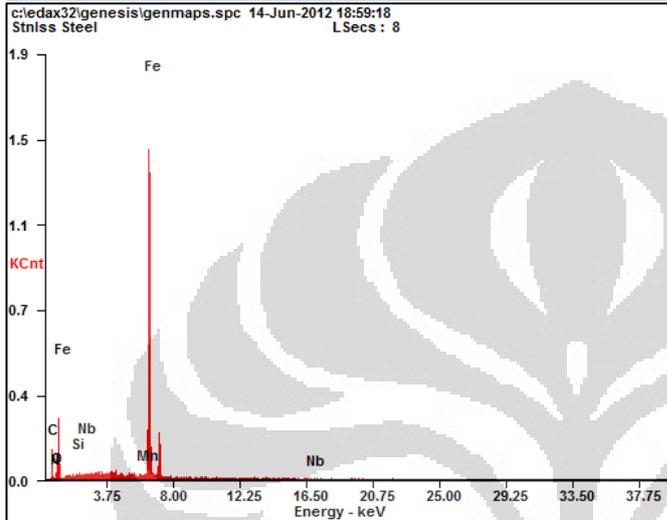


# Microanalysis Report

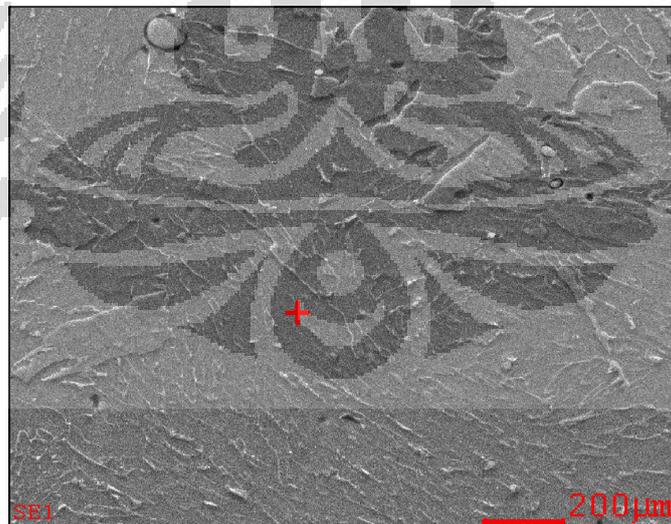
Prepared for: *Company Name Here*

Prepared by: *Your Name Here*

6/14/2012



<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	11.73	36.96
<i>NK</i>	00.74	01.99
<i>OK</i>	01.03	02.43
<i>FeL</i>	75.09	50.89
<i>SiK</i>	00.20	00.27
<i>NbL</i>	00.95	00.39
<i>MnK</i>	10.27	07.07
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

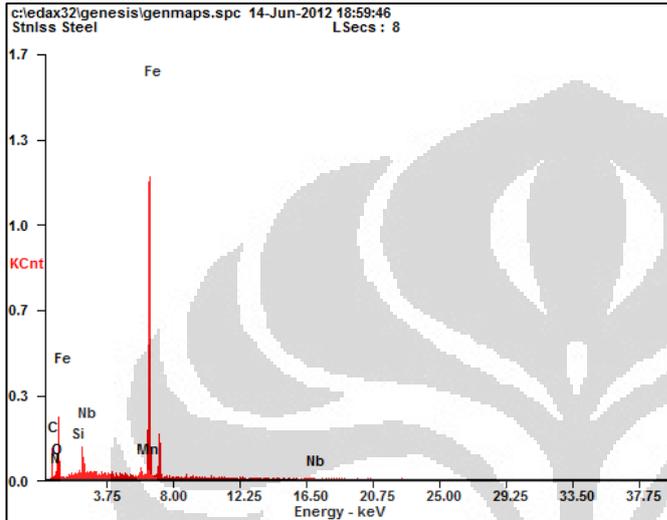


# Microanalysis Report

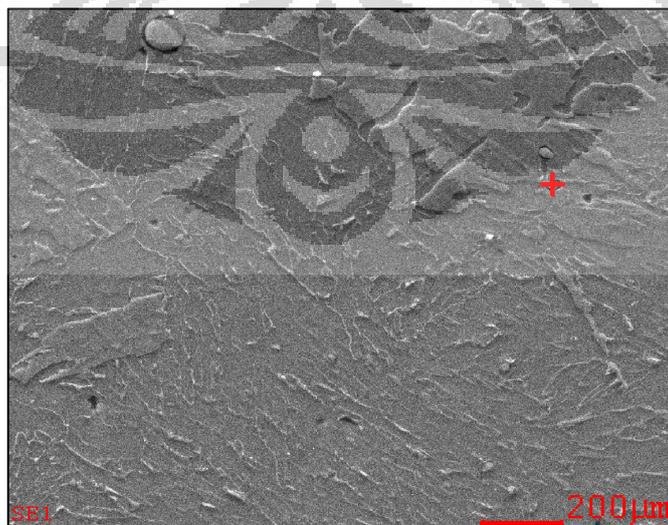
Prepared for: *Company Name Here*

Prepared by: *Your Name Here*

6/14/2012



Element	Wt%	At%
CK	06.85	25.33
NK	00.59	01.86
OK	01.10	03.06
FeL	55.15	43.88
SiK	00.43	00.68
NbL	11.56	05.53
MnK	24.32	19.67
Matrix	Correction	ZAF



# Microanalysis Report

Prepared for: *Company Name Here*

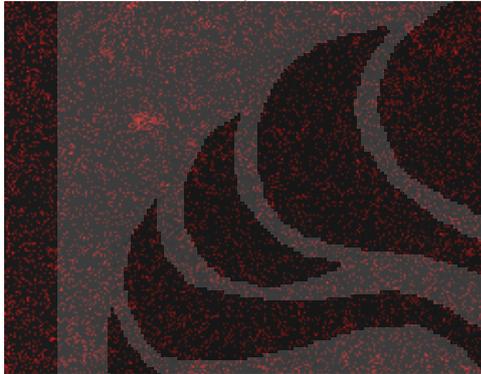
Prepared by: *Your Name Here*

6/14/2012

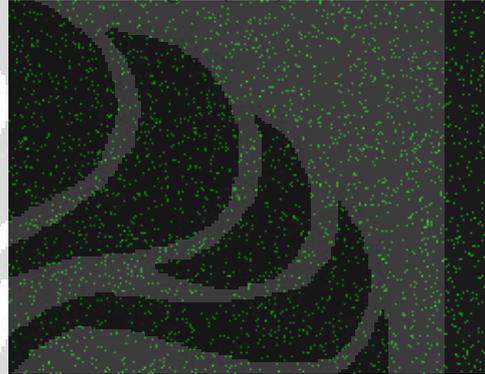


## Pemetaan Distribusi Unsur Paduan

Unsur Karbon (CK)



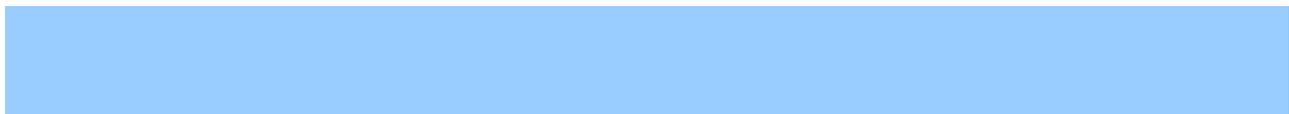
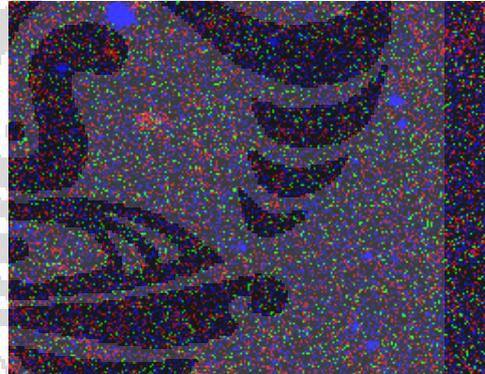
Unsur Nitrogen (NK)



Unsur Nb (NbL)



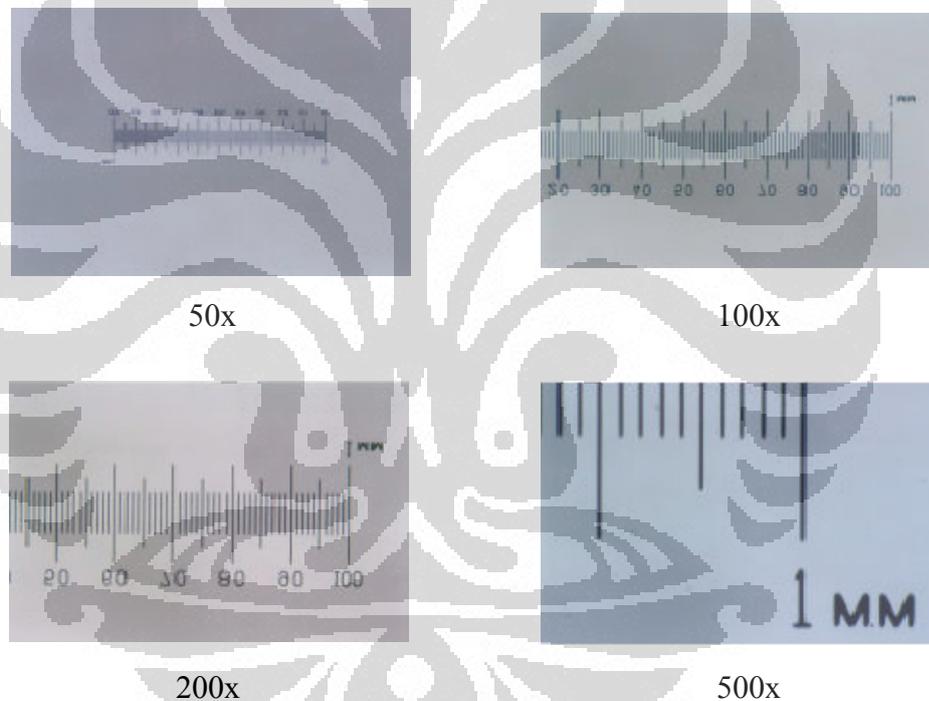
Kombinasi Unsur CNbN



### LAMPIRAN 3

#### CONTOH PERHITUNGAN BUTIR

Perhitungan butir dilakukan pada foto mikro yang sudah didapat melalui pengamatan mikroskop optik dengan berbagai varian perbesaran. Penghitungan besar butir dilakukan dengan metode perbandingan. Metode perbandingan yang dilakukan kali ini diderivasikan berdasarkan standar ASTM E112. Penghitungan dilakukan dengan bantuan grid dua dimensi yang disesuaikan dengan perbesaran foto. Contoh gambar grid dua dimensi digambarkan sebagai berikut.



Setiap satu garis pada skala gambar grid dua dimensi di atas memiliki panjang 1  $\mu\text{m}$ . Dengan bantuan mistar, dapat diketahui perbandingan antara ukuran pada mistar dengan ukuran  $\mu\text{m}$  pada foto. Sebagai contoh, pada foto standar perbesaran 50x, 10 sentimeter pada mistar setara dengan  $\frac{10000}{7}$   $\mu\text{m}$  pada foto. Sedangkan pada foto standar perbesaran 100x, 10 sentimeter pada mistar setara dengan  $\frac{10000}{14}$   $\mu\text{m}$  pada foto, begitu juga seterusnya pada perbesaran 200x dan 500x.

Berdasarkan skala gambar grid di atas, selanjutnya penghitungan butir austenit dilakukan dengan menarik garis 10 sentimeter sebanyak 10 buah garis pada foto. Dari 10 buah garis tersebut dilakukan penghitungan rata-rata agar didapatkan penghitungan yang akurat. Sebagai contoh, berikut penghitungan butir austenit prior pada pemanasan austenisasi 1200°C dengan laju pemanasan 10°C/menit pada penahanan waktu austenisasi selama 80 menit dengan perbesaran foto 200x. Pada garis kesatu jumlah batas butir yang memotong garis sebanyak tiga buah, pada perbesaran 200x maka diameter butirnya sama dengan  $\frac{10000}{28} \mu\text{m} : 3 = 119.05 \mu\text{m}$  (contoh tabel berikut menunjukkan perhitungan yang lebih lengkap).



Contoh Tabel Perhitungan Butir

Garis Ke-	Jumlah Butir Yang Berpotongan	Konversi Ukuran Diameter ( $\mu\text{m}$ )	Diameter Butir Rata-Rata ( $\mu\text{m}$ )
1	3	119.05	95.24
2	4	89.29	
3	3	1119.05	
4	4	89.29	
5	4	89.29	
6	4	89.29	
7	4	89.29	
8	4	89.29	
9	4	89.29	
10	4	89.29	

**LAMPIRAN 4**  
**HASIL PENGHITUNGAN BUTIR**

**Hasil Penghitungan Butir Pada Laju Pemanasan 10<sup>0</sup>C/menit**

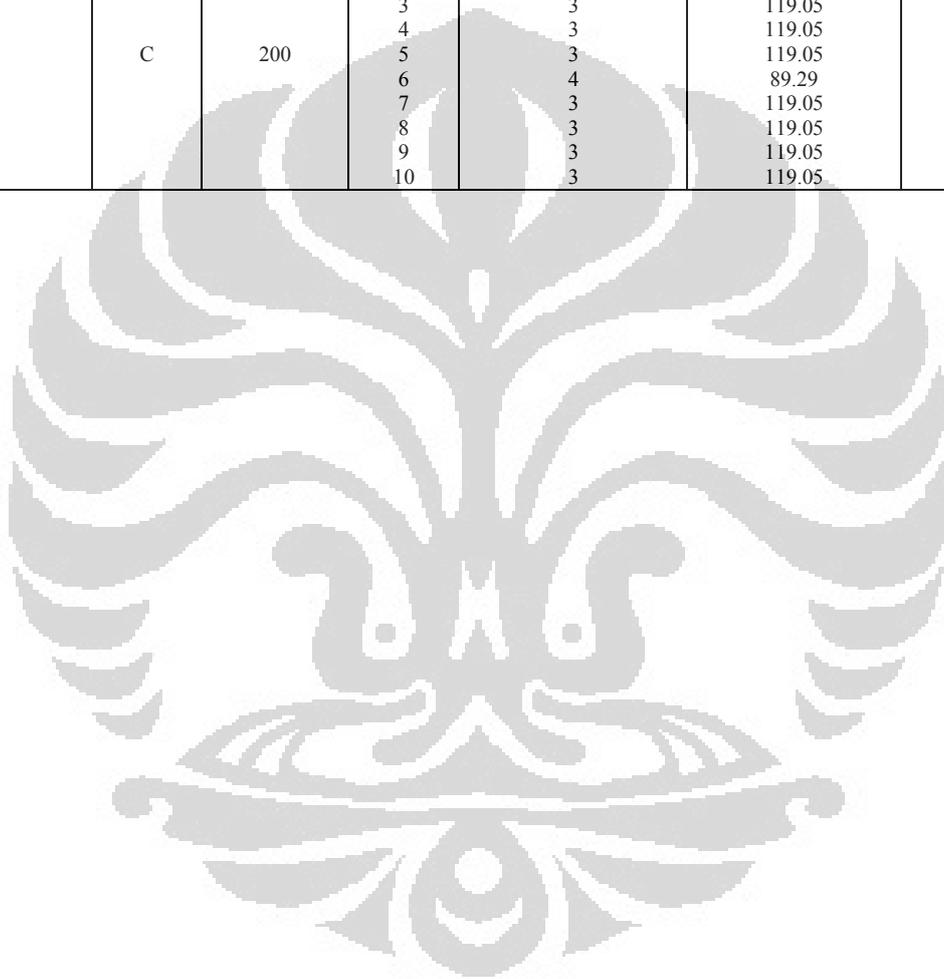
Waktu Tahan (menit)	Notasi Sampel	Perbesaran (kali)	Garis Ke-	Jumlah Butir Yang Berpotongan	Konversi Ukuran Diameter (μm)	Diameter Butir Rata-Rata (μm)
20	A	500	1	10	14.29	13.74
			2	10	14.29	
			3	11	12.99	
			4	12	11.90	
			5	13	10.99	
			6	13	10.99	
			7	12	11.90	
			8	10	14.29	
			9	8	17.86	
20	B	500	1	8	17.86	19.52
			2	9	15.87	
			3	9	15.87	
			4	8	17.86	
			5	8	17.86	
			6	8	17.86	
			7	6	23.81	
			8	6	23.81	
			9	6	23.81	
20	C	500	1	8	17.86	15.96
			2	9	15.87	
			3	10	14.29	
			4	10	14.29	
			5	7	20.41	
			6	8	17.86	
			7	9	15.87	
			8	11	12.99	
			9	10	14.29	
50	A	500	1	9	15.87	20.41
			2	8	17.86	
			3	8	17.86	
			4	9	15.87	
			5	9	15.87	
			6	6	23.81	
			7	6	23.81	
			8	6	23.81	
			9	6	23.81	
50	B	500	1	5	28.57	25.71
			2	6	23.81	
			3	6	23.81	
			4	6	23.81	
			5	6	23.81	
			6	5	28.57	
			7	6	23.81	
			8	5	28.57	
			9	5	28.57	
50			10	6	23.81	

			1	6	23.81	
			2	8	17.86	
			3	8	17.86	
			4	9	15.87	
	C	500	5	7	20.41	21.46
			6	6	23.81	
			7	6	23.81	
			8	6	23.81	
			9	5	28.57	
			10	7	20.41	
			1	3	109.05	
			2	4	89.29	
			3	3	109.05	
	A	200	4	4	89.29	95.24
			5	4	89.29	
			6	4	89.29	
			7	4	89.29	
			8	4	89.29	
			9	4	89.29	
			10	4	89.29	
80			1	4	89.29	
	B	200	2	4	89.29	107.15
			3	4	89.29	
			4	4	89.29	
			5	3	109.05	
			6	3	109.05	
			7	3	109.05	
			8	3	109.05	
			9	3	109.05	
			10	3	109.05	
			1	4	89.29	
			2	3	109.05	
			3	3	109.05	
	C	200	4	3	109.05	104.17
			5	4	89.29	
			6	3	109.05	
			7	3	109.05	
			8	4	89.29	
			9	4	89.29	
			10	4	89.29	

### Hasil Penghitungan Butir Pada Laju Pemanasan 15°C/menit

Waktu Tahan (menit)	Notasi Sampel	Perbesaran (kali)	Garis Ke-	Jumlah Butir Yang Berpotongan	Konversi Ukuran Diameter (µm)	Diameter Butir Rata-Rata (µm)
20	A	500	1	7	20.41	24.08
			2	6	23.81	
			3	6	23.81	
			4	6	23.81	
			5	6	23.81	
			6	5	28.57	
			7	5	28.57	
			8	6	23.81	
			9	7	20.41	
			10	6	23.81	
	B	200	1	17	20.01	20.31
			2	17	20.01	
			3	18	19.84	
			4	18	19.84	
			5	18	19.84	
			6	17	20.01	
			7	17	20.01	
			8	18	19.84	
			9	18	19.84	
			10	18	19.84	
	C	500	1	10	14.29	20.10
			2	9	15.87	
			3	9	15.87	
			4	7	20.41	
			5	7	20.41	
			6	6	23.81	
			7	6	23.81	
			8	7	20.41	
			9	6	23.81	
			10	7	20.41	
50	A	500	1	3	47.62	39.76
			2	4	35.71	
			3	4	35.71	
			4	3	47.62	
			5	3	47.62	
			6	3	47.62	
			7	4	35.71	
			8	4	35.71	
			9	4	35.71	
			10	5	28.57	
	B	500	1	5	28.57	32.14
			2	5	28.57	
			3	5	28.57	
			4	5	28.57	
			5	4	35.71	
			6	4	35.71	
			7	4	35.71	
			8	5	28.57	
			9	4	35.71	
			10	4	35.71	
	C	500	1	5	28.57	26.19
			2	5	28.57	
			3	5	28.57	
			4	5	28.57	
			5	6	23.81	
			6	6	23.81	
			7	6	23.81	
			8	6	23.81	
			9	6	23.81	
			10	5	28.57	
80	A	200	1	4	89.29	113.10
			2	4	89.29	
			3	3	119.05	
			4	3	119.05	
			5	3	119.05	
			6	3	119.05	

			7	3	119.05	
			8	3	119.05	
			9	3	119.05	
			10	3	119.05	
	B	200	1	3	119.05	110.12
			2	3	119.05	
			3	3	119.05	
			4	3	119.05	
			5	3	119.05	
			6	3	119.05	
			7	3	119.05	
			8	4	89.29	
			9	4	89.29	
			10	4	89.29	
	C	200	1	3	119.05	116.10
			2	3	119.05	
			3	3	119.05	
			4	3	119.05	
			5	3	119.05	
			6	4	89.29	
			7	3	119.05	
			8	3	119.05	
			9	3	119.05	
			10	3	119.05	



### Hasil Penghitungan Butir Pada Laju Pemanasan 20°C/menit

Waktu Tahan (menit)	Notasi Sampel	Perbesaran (kali)	Garis Ke-	Jumlah Butir Yang Berpotongan	Konversi Ukuran Diameter (µm)	Diameter Butir Rata-Rata (µm)
20	A	200	1	4	89.29	83.93
			2	5	71.43	
			3	5	71.43	
			4	5	71.43	
			5	4	89.29	
			6	4	89.29	
			7	4	89.29	
			8	4	89.29	
			9	4	89.29	
			10	4	89.29	
	B	200	1	6	59.52	70.24
			2	5	71.43	
			3	5	71.43	
			4	5	71.43	
			5	5	71.43	
			6	5	71.43	
			7	5	71.43	
			8	5	71.43	
			9	5	71.43	
			10	5	71.43	
	C	200	1	4	89.29	68.45
			2	5	71.43	
			3	5	71.43	
			4	6	59.52	
			5	5	71.43	
			6	6	59.52	
			7	5	71.43	
			8	5	71.43	
			9	6	59.52	
			10	6	59.52	
50	A	200	1	3	119.05	107.15
			2	3	119.05	
			3	3	119.05	
			4	3	119.05	
			5	4	89.29	
			6	4	89.29	
			7	4	89.29	
			8	4	89.29	
			9	3	119.05	
			10	3	119.05	
	B	200	1	3	119.05	101.19
			2	4	89.29	
			3	4	89.29	
			4	4	89.29	
			5	4	89.29	
			6	4	89.29	
			7	4	89.29	
			8	3	119.05	
			9	3	119.05	
			10	3	119.05	
	C	200	1	4	89.29	86.91
			2	4	89.29	
			3	4	89.29	
			4	3	119.19	
			5	5	71.43	
			6	4	89.29	
			7	4	89.29	
			8	4	89.29	
			9	5	71.43	
			10	5	71.43	
80	A	200	1	3	119.05	136.91
			2	3	119.05	
			3	3	119.05	
			4	3	119.05	
			5	2	178.57	
			6	2	178.57	

			7	2	178.57	
			8	3	119.05	
			9	3	119.05	
			10	3	119.05	
	B	200	1	2	178.57	142.86
			2	2	178.57	
			3	2	178.57	
			4	2	178.57	
			5	3	119.05	
			6	3	119.05	
			7	3	119.05	
			8	3	119.05	
			9	3	119.05	
			10	3	119.05	
	C	200	1	3	119.05	116.10
			2	3	119.05	
			3	3	119.05	
			4	3	119.05	
			5	3	119.05	
			6	3	119.05	
			7	3	119.05	
			8	3	119.05	
			9	4	89.29	
			10	3	119.05	

