



UNIVERSITAS INDONESIA

**MODEL EMPIRIS KINETIKA PERTUMBUHAN BUTIR BAJA
HSLA 0,111 %Nb PADA PEMANASAN *ISOTHERMAL*
DENGAN VARIABEL TEMPERATUR PEMANASAN DAN
WAKTU TAHAN**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

MUHAMAD MUKHSIN

0806455805

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL

DEPOK

JULI 2012

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya sendiri,

dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk

telah saya nyatakan dengan benar

Nama : Muhamad Mukhsin

NPM : 0806455805

Tanda Tangan : 

Tanggal : Depok, 3 Juli 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :


Nama : Muhamad Mukhsin
NPM : 0806455805
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi : Model Empiris Kinetika Pertumbuhan Butir Baja HSLA 0,111 % Nb Pada Pemanasan *Isothermal* dengan Variabel Temperatur Pemanasan dan Waktu Tahan

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 Moehtar M.S. ()

Penguji 1 : Nofrijon Sofyan, Ph.D ()

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

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 3 Juli 2012

KATA PENGANTAR

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

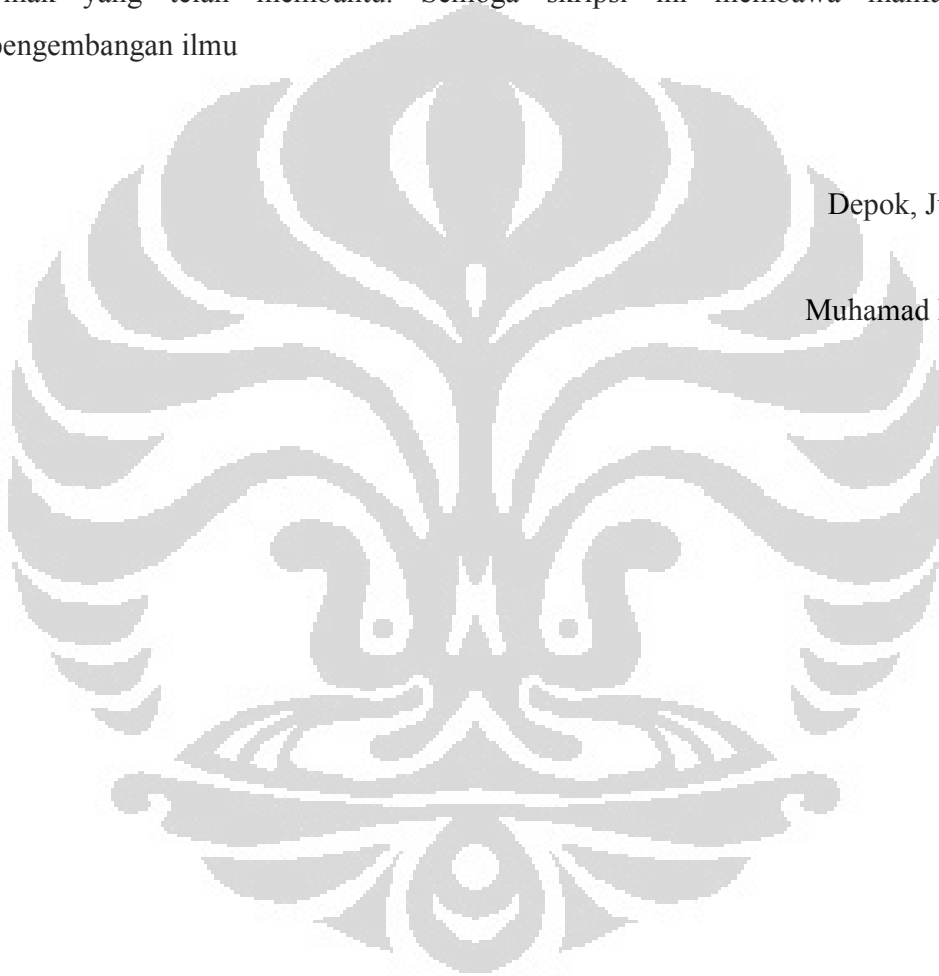
1. Dr. Ir. Myrna Ariati Mochtar M.S. Selaku pembimbing skripsi sekaligus juga pembimbing akademis penulis yang telah memberikan bimbingan, dukungan, dorongan, inspirasi dan motivasi kepada penulis baik selama menjalani pendidikan di Departemen Metalurgi dan Material FTUI maupun dalam penyelesaian skripsi ini.
2. Seluruh dosen dan staf pengajar Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI yang telah memberikan pengetahuan dan ilmu yang bermanfaat.
3. Bapak Richard A.M Napitupulu atas berbagai saran dan masukannya yang sangat membantu dalam penyelesaian skripsi ini.
4. Kedua Orangtua tercinta yang telah memberikan do'a, motivasi, inspirasi, dan teladan yang sangat luar biasa kepada penulis.
5. Bapak Ir. Bambang Sundjojo & Keluarga yang telah memberikan banyak bantuan untuk menopang keberlanjutan studi penulis

6. Rekan satu tim penelitian Nofri Hasanudin yang telah memberikan banyak bantuan dan suntikan semangat.
7. Serta semua pihak, baik secara langsung maupun tidak langsung yang telah membantu penulis namun tidak bisa penulis disebutkan satu persatu

Akhir kata, saya berharap Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu

Depok, Juli 2012

Muhamad Mukhsin



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

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

Nama : Muhamad Mukhsin
NPM : 0806455805
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Departemen : Teknik Metalurgi dan Material
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

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

Model Empiris Kinetika Pertumbuhan Butir Baja HSLA 0,111 % Nb Pada Pemanasan *Isothermal* dengan Variabel Temperatur Pemanasan dan Waktu Tahan

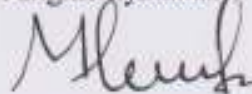
beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada Tanggal : 3 Juli 2012

Yang menyatakan



(Muhamad Mukhsin)

ABSTRAK

Nama : Muhamad Mukhsin
Program Studi : Teknik Metalurgi & Material
Judul : Model Empiris Kinetika Pertumbuhan Butir Baja HSLA 0,111 %
Nb Pada Pemanasan *Isothermal* dengan Variabel Temperatur
Pemanasan dan Waktu Tahan

Skripsi ini membahas pengaruh temperatur pemanasan dan waktu tahan terhadap pertumbuhan butir austenit prior baja HSLA 0,111% Nb setelah di-*reheating*. Benda uji yang digunakan yaitu baja HSLA 0,111%Nb hasil *sand casting* yang dipanaskan pada suhu 1000°C, 1100°C, dan 1200°C dengan waktu tahan 20 menit, 50menit, dan 80 menit. Hasil penelitian menunjukkan semakin tinggi suhu pemanasan dan semakin lamanya waktu tahan yang diberikan maka ukuran butir akan semakin besar dan tingkat kenaikan ukuran butirnya akan semakin tinggi. Selain itu juga didapatkan persamaan untuk memprediksi hubungan antara besar butir austenit prior terhadap temperatur pemanasan dan waktu tahan dengan bentuk $d = 9,398 \times 10^{-15} T^{5,0046} t^{0,0786}$

Kata kunci: *Reheating*, HSLA Nb, Pertumbuhan butir, Austenit Prior

ABSTRACT

Name : Muhamad Mukhsin
Study Program : Metallurgy and Material Engineering
Title : Grain Growth Kinetic Empirical Model of HSLA 0,111 %
Nb Steel on isothermal heating process with variable
heating temperature and holding time

This thesis discusses the influence of heating temperature and holding time through austenite prior grain growth of 0,111% Nb HSLA steel after reheating. The specimen was reheating at 1000°C, 1100°C, and 1200°C, then hold for 20 minutes, 50 minutes, and 80 minutes. The result showed that the higher temperature and the longer holding time, the austenite grain size is bigger and the increasing of grain size is higher. It is also obtained an equation to predict the relation between austenite prior grain size to heating temperature and holding time in the form of $d = 9,398 \times 10^{-15} T^{5,0046} t^{0,0786}$

Key words: Reheating, HSLA Nb, , Grain growth, Prior austenite

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Ruang lingkup Penelitian	3
1.5 Sistematika Penelitian	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Baja HSLA	6
2.2 Pengaruh Unsur Niobium	7
2.3 Proses Termo mekanik	9
2.4 Mekanisme Proses Reheating.....	10
2.5 Mekanisme dan Kinetika Pertumbuhan Butir	11
2.6. Temperatur Pengkasaran Butir	13
2.7 Mekanisme Penguatan Pada Baja HSLA-Nb.....	14
2.7.1 Mekanisme Penguatan Presipitat.....	15

2.7.2 Mekanisme Penguatan dengan Penghalusan Butir.....	16
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....	18
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	18
3.2 Peralatan dan Bahan	19
3.2.1 Peralatan	19
3.2.2 Bahan.....	19
3.3 Prosedur Penelitian.....	19
3.3.1 Preparasi Sampel	19
3.3.2 Proses Reheating	20
3.3.3 Pengamatan Struktur Mikro dan Distribusi Unsur Paduan dengan Mikroskop Optik dan FE SEM.....	21
3.3.4 Penghitungan besar butir austenit.....	22
3.3.5 Permodelan Kinetika Pertumbuhan Butir Austenit Prior	23
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	24
4.1 Pengamatan Struktur Mikro	24
4.1.1 Pengamatan Struktur Mikro Sebelum Proses Perlakuan Panas.....	25
4.1.2 Pengamatan Struktur Mikro Setelah Proses Perlakuan Panas.....	25
4.2 Data Pengamatan Besar Butir Austenit Prior	30
4.3 Hubungan Temperatur Pemanasan dengan Besar butir Austenit Prior	31
4.4 Hubungan Waktu Tahan dengan Besar Butir Austenit Prior	36
4.5 Pengaruh Temperatur Pemanasan terhadap Penampakan Batas Butir Austenit Prior	39
4.6 Permodelan Persamaan Pertumbuhan butir Austenit Pada kondisi Isothermal40	
4.6.1 Pengaruh Temperatur Pemanasan terhadap besar butir austenit Prior ...	41
4.6.2 Pengaruh Waktu Tahan Terhadap Besar Butir Austenit Prior	42
BAB 5 KESIMPULAN.....	48
DAFTAR REFERENSI	50
LAMPIRAN	52

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Komposisi Kimia Baja HSLA 0,111% Nb.....	4
Tabel 2.1 Konstanta Kelarutan dan Pengkasaran Butir.....	14
Tabel 3.1 Komposisi Kimia Baja HSLA 0,111% Nb.....	19
Tabel 4.1 Besar Butir Austenit Prior Baja HSLA 0,111% Nb	31
Tabel 4.2 Komposisi Kimia Endapan NbCN	36
Tabel 4.3 Berbagai Nilai Konstanta Yang Dihasilkan Dari Grafik.....	44
Tabel 4.4 Berbagai Kombinasi Konstanta Yang Dihasilkan Pada Percobaan	44
Tabel 4.5 Hasil Perhitungan Besar Butir Pada Kombinasi Konstanta Ke-4 Sebelum Penyesuaian	45
Tabel 4.6 Hasil Perhitungan Besar Butir Pada Kombinasi Konstanta Ke-4 Setelah Penyesuaian	46

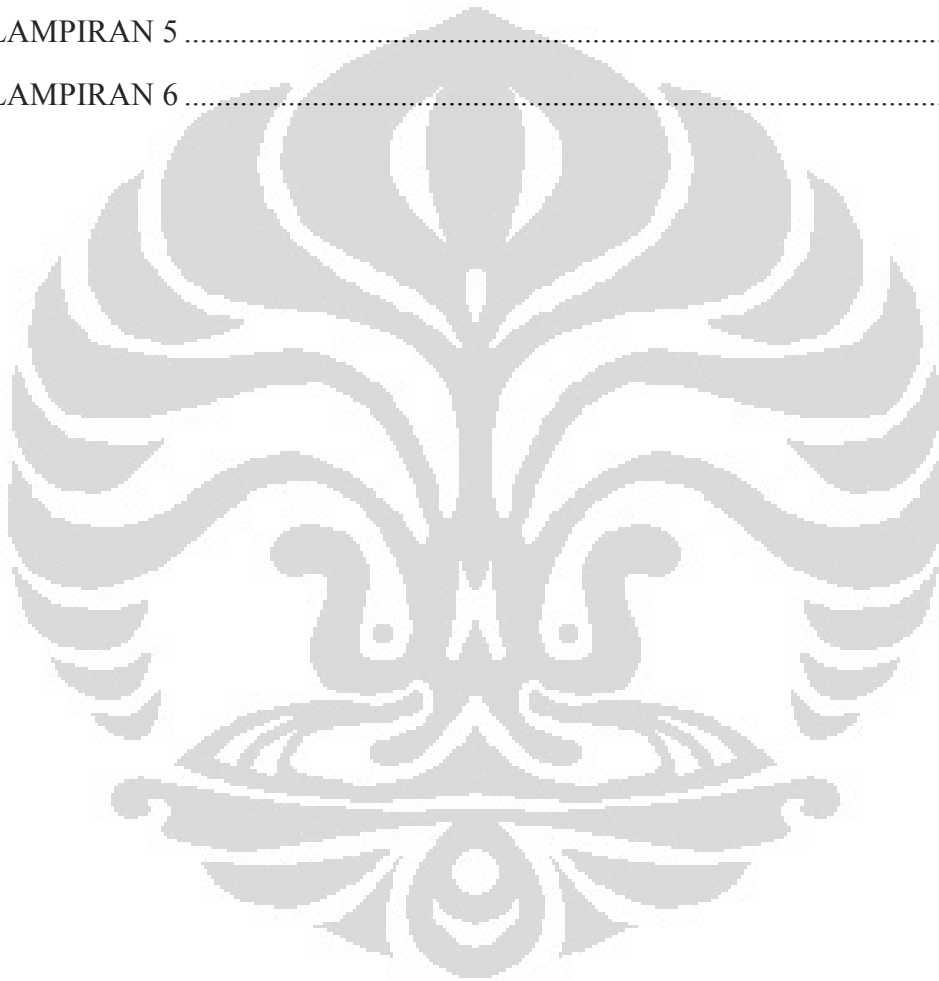
DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Korelasi d_0 dan d Akhir Pada Proses Termo Mekanik	3
Gambar 2. 1 Pengaruh Karbida Niobium Terhadap Nilai Yield Strength untuk Beberapa Ukuran Partikel Karbida Niobium	8
Gambar 2. 2 Pengaruh Unsur Paduan Niobium, Vanadium, dan Titanium Terhadap ukuran Butir Ferit	8
Gambar 2. 3 Perubahan mikrostruktur selama thermomechanical processing.....	9
Gambar 2. 4 Ilustrasi Sebaran Presipitat Pada Batas Butir	15
Gambar 2. 5 Ilustrasi Pergerakan Dislokasi antar butir.....	16
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian.....	18
Gambar 3. 2 Skematis Proses Reheating.....	21
Gambar 3. 3 Foto Skala Standar Untuk Perbesaran 200x Dan 500x	22
Gambar 4. 1 Struktur Mikro Baja HSLA 0,111% Nb Sebelum Dilakukan Proses Perlakuan Panas. Etsa Picral Jenuh, Perbesaran 500x.....	25
Gambar 4. 2 Foto Butir Austenit Prior Pada Baja HSLA 0,111% Nb. Temperatur Pemanasan 1000°C, Waktu Tahan 20 Menit, Perbesaran 500x.	26
Gambar 4. 3 Foto butir austenit prior pada Baja HSLA 0,111% Nb. Temperatur pemanasan 1000 °C, waktu tahan 50 menit, perbesaran 500x.	26
Gambar 4. 4 Foto butir austenit prior pada Baja HSLA 0,111% Nb. Temperatur pemanasan 1000 °C, waktu tahan 80 menit, perbesaran 500x.	27
Gambar 4. 5 Foto butir austenit prior pada Baja HSLA 0,111% Nb. Temperatur pemanasan 1000 °C, waktu tahan 80 menit, perbesaran 500x.	27
Gambar 4. 6 Foto butir austenit prior pada Baja HSLA 0,111% Nb. Temperatur pemanasan 1100 °C, waktu tahan 50 menit, perbesaran 500x	28
Gambar 4. 7 Foto butir austenit prior pada Baja HSLA 0,111% Nb. Temperatur pemanasan 1100 °C, waktu tahan 80 menit, perbesaran 500x.	28
Gambar 4. 1 Foto butir austenit prior pada Baja HSLA 0,111% Nb. Temperatur pemanasan 1200 °C, waktu tahan 20 menit, perbesaran 500x	29
Gambar 4. 9 Foto butir austenit prior pada Baja HSLA 0,111% Nb. Temperatur pemanasan 1200 °C, waktu tahan 50 menit, perbesaran 200x.	29

Gambar 4. 10 Foto butir austenit prior pada Baja HSLA 0,111% Nb. Temperatur pemanasan 1200 °C, waktu tahan 80 menit, perbesaran 200x	30
Gambar 4. 11 Grafik Pengaruh Temperatur Austenisasi terhadap Besar Butir pada Waktu Tahan 20 Menit.....	32
Gambar 4. 12 Grafik Pengaruh Temperatur Austenisasi terhadap Besar Butir pada Waktu Tahan 50 Menit.....	32
Gambar 4. 13 Grafik Pengaruh Temperatur Austenisasi terhadap Besar Butir pada Waktu Tahan 80 Menit.....	33
Gambar 4. 14 Grafik Pengaruh Temperatur Austenisasi terhadap Besar Butir pada Berbagai Waktu Tahan.....	33
Gambar 4. 2 Foto Hasil FE SEM pada Baja HSLA 0,111% Nb.....	35
Gambar 4. 16 Grafik Pengaruh Waktu Tahan terhadap Besar Butir Austenit Prior pada Suhu 1000°C.....	37
Gambar 4. 17 Grafik Pengaruh Waktu Tahan terhadap Besar Butir Austenit Prior Pada Suhu 1100°C.....	37
Gambar 4. 18 Grafik Pengaruh Waktu Tahan terhadap Besar Butir Austenit Prior pada Suhu 1200°C.....	38
Gambar 4. 19 Grafik Pengaruh Waktu Tahan terhadap Besar Butir Austenit Prior 3 pada Berbagai Suhu Pemanasan.....	38
Gambar 4. 20 Hubungan Suhu terhadap besar butir pada berbagai waktu tahan.....	42
Gambar 4. 21 Hubungan Waktu Tahan Terhadap Besar Butir Pada Berbagai Suhu Pemanasan.....	43
Gambar 4. 22 Perbandingan Hasil Eksperimen Dan Permodelan Sebelum Dilakukan Penyesuaian	45
Gambar 4. 23 Gambar 4.21 Perbandingan Grafik Hasil Eksperimen dan Permodelan Setelah Dilakukan Penyesuaian.....	47

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN 1	52
LAMPIRAN 2	53
LAMPIRAN 3	63
LAMPIRAN 4	64
LAMPIRAN 5	68
LAMPIRAN 6	81



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dewasa ini cadangan sumber energi fosil dunia semakin menipis sehingga memaksa orang untuk terus melakukan efisiensi pemakaian energi. Efisiensi itu juga terus dilakukan pada industri otomotif mengingat sektor transportasi adalah konsumen energi terbesar. Salah satu langkah efisiensi yang ditempuh misalnya pada industri otomotif adalah dengan mengurangi konsumsi energi dari kendaraan yang dihasilkan. Konsumsi energi dari sebuah kendaraan berkaitan erat dengan bobot kendaraan tersebut. Semakin ringan sebuah kendaraan, maka energi yang dikonsumsi akan semakin kecil. Kebutuhan akan komponen otomotif yang ringan, tetapi memiliki kekuatan yang tinggi dan memenuhi spesifikasi mendorong industri untuk melakukan rekayasa paduan dan struktur mikro material, termasuk pada baja. Antara lain digunakan baja paduan rendah, yang memiliki komposisi karbon dan paduan yang rendah namun berkekuatan tinggi atau *high strength low alloy (HSLA) steel*.

Baja HSLA menjadi pilihan pada industri konstruksi, perpipaan, dan transportasi karena mempunyai rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi. Baja ini memiliki kekuatan yang tinggi walaupun pada dimensi yang lebih tipis/ringan. Baja HSLA adalah salah satu kelompok baja karbon rendah yang memanfaatkan sebagian kecil elemen paduan untuk mencapai nilai *yield strength* lebih dari 275 MPa (40 ksi) pada kondisi *as-rolled*. Baja jenis ini mempunyai sifat mekanik dan ketahanan korosi yang lebih baik dibandingkan baja karbon lainnya pada kondisi yang sama. Dengan kadar karbon yang rendah, baja HSLA memiliki kemampuan las lebih baik dari *mild steel*^[1].

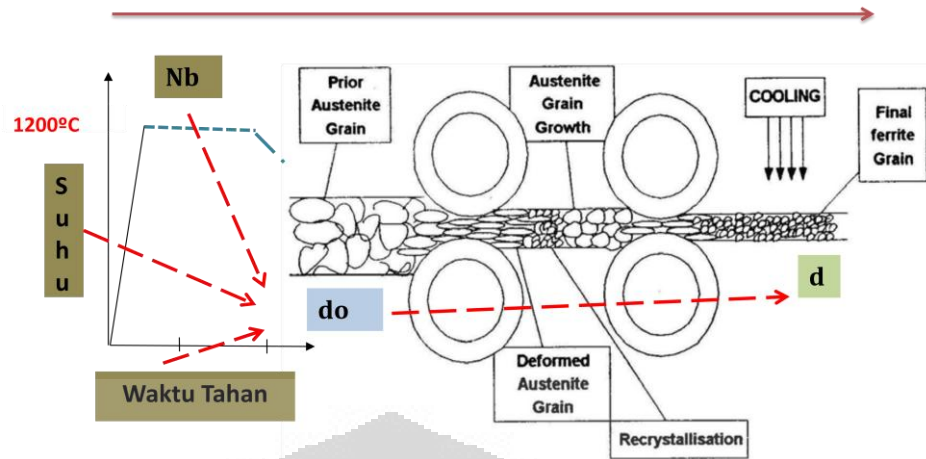
Baja HSLA biasanya diproduksi lewat proses canaipanas (*hot forming*)^[2]. Pada proses canai panas diameter butir austenit prior (*d₀*) sebelum canai memegang peranan yang sangat penting dalam menentukan ukuran butir akhir butir setelah rol panas. Diameter austenit prior akan menentukan diameter butir ferrit yang terbentuk. Semakin halus diameter austenite prior, semakin halus pula diameter ferrit yang terbentuk, dan dengan demikian baja HSLA akan semakin

meningkat kekuatannya. Pada proses canai panas, diameter butir menjadi perhatian karena akan menentukan kekuatan dan kekerasan baja setelah proses canai. Besar butir austenit prior akan menentukan besar butir akhir setelah proses canai. Oleh karena itu, penelitian tentang faktor faktor yang mempengaruhi besar butir austenit prior selama proses *reheating* sebelum pengerolan (d_o) menjadi sangat penting.

I.2 Perumusan Masalah

Proses canai panas (*hot rolling*) pada baja HSLA dilakukan dalam beberapa tahap. Tahapan proses canai panas terdiri dari proses, yaitu pemanasan awal (*reheating*), proses rol panas (*rolling*), dan pendinginan (*cooling*). Struktur butir akhir yang dihasilkan dari proses canai panas bergantung pada butir yang terbentuk selama proses *reheating*, di mana untuk mendapatkan butir ferit yang halus, maka harus terbentuk butir austenit yang berukuran kecil pada saat proses *reheating*^[2]. Untuk itu dibutuhkan penelitian yang dapat menggambarkan perhitungan besar butir austenit prior selama proses *reheating*.

Sementara itu, pengontrolan besar butir austenit prior pada baja hasil *reheating* dipengaruhi oleh berbagai faktor di antaranya adalah laju pemanasan, temperatur pemanasan, waktu tahan pemanasan, dan kandungan paduan. Temperatur pemanasan akan sangat menentukan mobilitas batas butir untuk pertumbuhan butir. Sementara itu waktu tahan pada *reheating* akan menentukan kehomogenan fasa austenit yang terbentuk. Keberadaan paduan mikro seperti Niobium juga akan mempengaruhi pertumbuhan butir austenit dengan cara membentuk endapan yang dapat menghalangi pertumbuhan butir austenit. Akibat adanya penghalangan ini pergerakan batas butir austenit menjadi terkunci sehingga tidak bisa terjadi difusi antar butir.



Gambar 1. 1 Korelasi d_0 dan d Akhir Pada Proses Termo Mekanik

Dengan demikian, dalam penelitian ini akan dikaji pengaruh dari temperatur dan waktu tahan terhadap ukuran butir austenit prior yang didapat setelah *reheating*.

I.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui pengaruh temperatur pemanasan terhadap besar butir austenit prior baja HSLA 0,111% Nb.
2. Mengetahui pengaruh waktu tahan austenisasi terhadap besar butir austenit prior baja HSLA 0,111% Nb
3. Mendapatkan persamaan empiris untuk menghitung besar butir austenit prior baja HSLA 0,111% Nb dengan variabel temperatur pemanasan dan waktu tahan.

I.4 Ruang lingkup Penelitian

Ruang lingkup penelitian ini berupa:

1. Material

Material yang dipakai dalam penelitian ini adalah material baja HSLA (*high strength low alloy*) hasil proses *sand casting* dengan komposisi kimia sebagai berikut:

Tabel 1 1 Komposisi Kimia Baja HSLA 0,111% Nb

C	Ti	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Nb	V	Ni	Cr	N
0.127	0.0028	0.189	0.233	0.032	0.0089	0.077	0.023	0.111	0.0012	0.019	0.134	0.031

Proses perlakuan panasnya meliputi:

- *Reheating*
- *Holding*
- *Quenching* dengan media air

2. Parameter penelitian

- Suhu Pemanasan: 1000°C, 1100°C, dan 1200°C
- Waktu Tahan: 20 menit , 50 menit , dan 80 menit.

3. Pengujian dan Pengamatan

- Pengamatan butir austenit prior dengan mikroskop optik.
- Penghitungan besar butir austenit prior menggunakan metode perbandingan.

I.5 Sistematika Penelitian

Untuk menunjang tujuan penelitian seperti yang sudah disebutkan pada subbab 1.3, diperlukan sistematika penulisan yang runtut dan teratur. Pada penelitian ini penulis membagi sistematika penulisan tugas akhir ini ke dalam beberapa bab sebagai berikut.

a) Bab 1 Pendahuluan

Bab ini terdiri atas latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, ruang lingkup penelitian, dan sistematika penulisan.

b) Bab 2 Tinjauan Pustaka

Pada bab ini dijelaskan mengenai teori-teori dasar yang berkaitan dan mendukung penelitian sehingga memudahkan pembaca untuk memahami isi dari tugas akhir ini.

c) Bab 3 Metodologi Penelitian

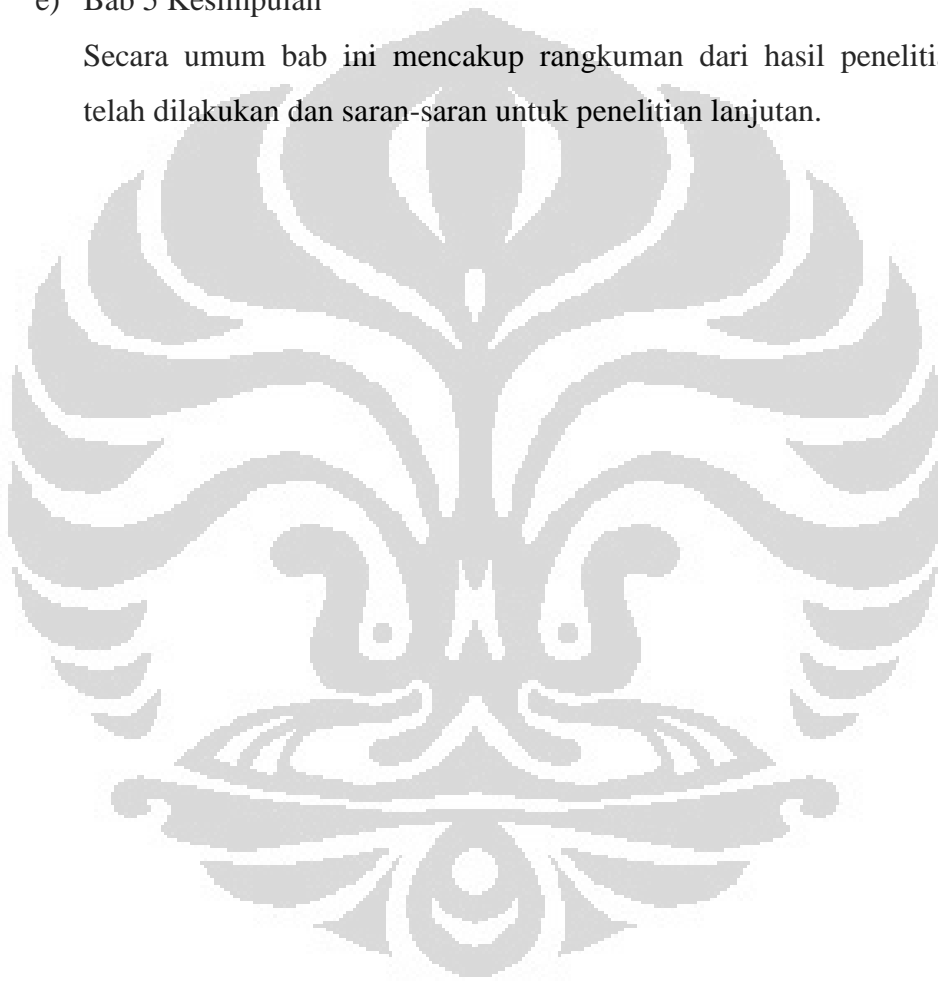
Bab ini memberikan penjelasan mengenai langkah kerja, prosedur penelitian, prinsip pengujian, serta daftar alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian.

d) Bab 4 Hasil dan Pembahasan

Bab ini terdiri atas seluruh data-data hasil penelitian dan analisis dari hasil penelitian tersebut untuk dibandingkan dengan studi literatur.

e) Bab 5 Kesimpulan

Secara umum bab ini mencakup rangkuman dari hasil penelitian yang telah dilakukan dan saran-saran untuk penelitian lanjutan.



BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Baja HSLA

Baja HSLA adalah salah satu kelompok baja karbon rendah yang memanfaatkan sebagian kecil elemen paduan untuk mencapai nilai *yield strength* lebih dari 275 MPa (40 ksi) pada kondisi *as-rolled*. Baja jenis ini mempunyai sifat mekanik dan ketahanan korosi yang lebih baik dibandingkan baja karbon lainnya pada kondisi yang sama. Dengan kekuatannya yang lebih tinggi tersebut, baja HSLA dapat dihasilkan dengan kadar karbon yang rendah sehingga kemampuan lasnya lebih baik dari *mild steel*^[1]. Komposisi kimia dari baja HSLA dapat bervariasi bergantung pada sifat yang ingin dicapai. Baja HSLA dalam bentuk lembaran biasanya memiliki kadar karbon yang rendah berkisar antara 0.05%C hingga 0.25%C dengan tujuan meningkatkan mampu bentuk dan mampu lasnya. unsur Mangan (Mn), Chromium (Cr), Nikel, Molybdenum, Nitrogen, Vanadium, Niobium, Titanium, dan Zirconium juga biasanya ditambahkan ke dalam baja jenis ini dalam perbandingan dan kombinasi yang beragam^[5].

Baja HSLA mempunyai beberapa tipe dan standar yang digunakan bergantung pada sifat-sifat yang dimilikinya seperti ketangguhan, mampu bentuk, mampu las, dan ketahanan korosinya. Baja ini tidak dapat digolongkan ke dalam baja paduan meskipun sifat-sifat yang diinginkan dapat tercapai dengan hanya penambahan sedikit paduan. Adapun penggolongan baja HSLA adalah sebagai berikut^[1].

- *Weathering steels*, baja yang ditambahkan sedikit Tembaga (Cu) dan Fosfor (P) untuk meningkatkan ketahanan terhadap korosi atmosferik dan kemampuan untuk dikuatkan melalui mekanisme penguatan larutan padat
- *Microalloyed ferrite-pearlite steels*, baja yang ditambahkan sedikit (kurang dari 0.10%) elemen pembentuk Karbida dan Karbonitrida seperti Niobium, Vanadium, dan atau Titanium untuk penguatan presipitat, penghalus butir, dan kontrol terhadap perubahan temperatur.

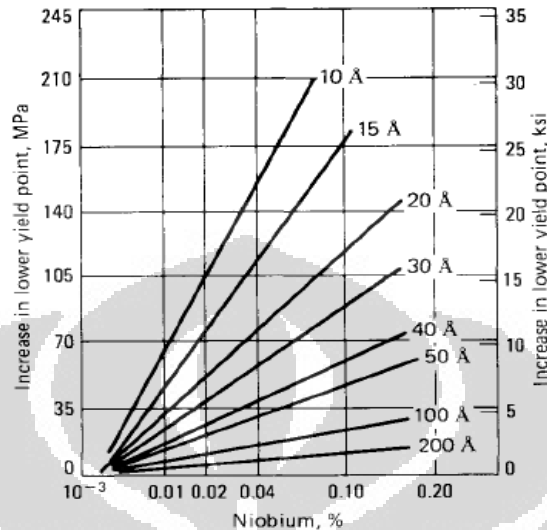
- *As-rolled pearlitic steels*, disebut juga baja C-Mn tetapi dengan penambahan elemen paduan lain untuk meningkatkan kekuatan, ketangguhan, mampu bentuk, dan kemampulan.
- *Acicular Ferrite (Low carbon bainite) steels*, baja dengan kandungan karbon di bawah 0.05%C dan memiliki kombinasi tegangan luluh, mampu bentuk, ketangguhan, kemampulan yang sangat baik.
- *Dual Phase Steels*, baja dengan mikrostruktur martensit yang tersebar di matriks ferrit dan memiliki kombinasi yang baik dari keuletan dan tegangan luluh yang tinggi.
- *Inclusion-shape-controlled steels*, penambahan Calcium, Zirconium, Titanium, dan logam-logam jarang sehingga bentuk dari inklusi sulfide berubah menjadi lebih kecil, tersebar, dan berbentuk globular yang akan meningkatkan keuletan.

Penggunaan baja HSLA sangat banyak diaplikasikan pada baja konstruksi, transmisi pipa minyak dan gas, kendaraan berat, peralatan industri, gerbong kereta api, jembatan, struktur lepas pantai, dan *part* otomotif^[2]. Sebagian besar aplikasi, faktor yang paling utama dalam pemilihan baja ini adalah perbandingan kekuatan dan berat (*weight*) yang sesuai, yaitu dengan massa yang ringan baja HSLA mampu menghasilkan kekuatan yang lebih tinggi dari baja karbon biasa. Selain itu, HSLA juga diaplikasikan pada kondisi aplikasi tegangan pada temperatur yang sangat rendah^[2]

2.2 Pengaruh Unsur Niobium

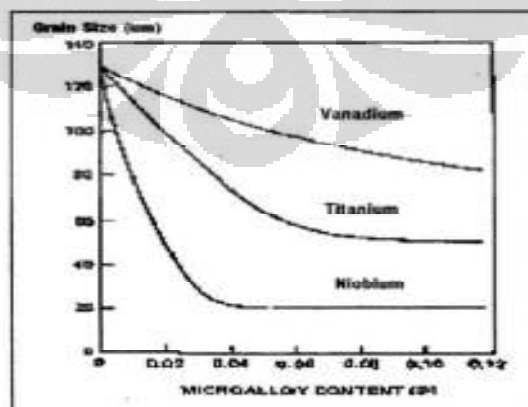
Niobium pada baja HSLA akan meningkatkan nilai tegangan luluh melalui mekanisme penguatan dengan pembentukan presipitat dalam bentuk karbida atau nitrida. Besarnya peningkatan dari *yield strength* suatu baja dengan paduan niobium ini di tentukan oleh besar dan jumlah dari karbida niobium yang mengendap. Selain membentuk presipitat Nb(CN) yang dapat menguatkan baja, niobium juga dapat memberikan pengaruh terhadap penghalusan butir ferit. Pengaruh ini jauh lebih efektif dibandingkan dengan vanadium, perbandingan pengaruh keduanya bisa dilihat pada gambar 2.2. Pengaruh niobium dalam baja

terhadap tegangan mulur dapat dilihat pada gambar 2.1 berikut. Sementara, peningkatan kekuatan yang dapat dicapai adalah 35 MPa hingga 40 MPa untuk setiap penambahan 0.01% niobium.



Gambar 2. 1 Pengaruh Karbida Niobium Terhadap Nilai Yield Strength untuk Beberapa Ukuran Partikel Karbida Niobium^[1]

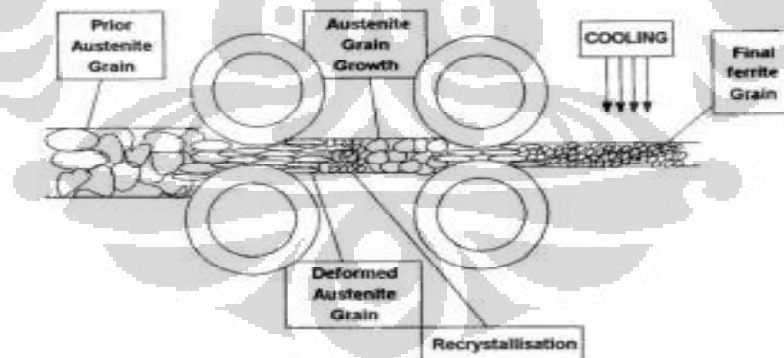
Niobium dalam bentuk presipitat Nb(CN) dapat mempengaruhi butir austenit. Jika presipitat Nb(CN) tidak larut selama pemanasan, maka pertumbuhan austenit berlangsung secara lambat. Hal itu terjadi karena partikel presipitat dalam matriks austenit akan mengunci pergerakan batas butir austenit. Larutnya partikel presipitat itu diawali dengan terjadinya pertumbuhan butir abnormal pada *solubility product temperature*. Niobium merupakan unsur yang paling efektif untuk mencegah pengasaran butir austenit.



Gambar 2. 2 Pengaruh Unsur Paduan Niobium, Vanadium, dan Titanium Terhadap ukuran Butir Ferit^[1]

2.3 Proses Termo mekanik

Thermomechanical processing adalah suatu proses yang dapat mengontrol mikrostruktur suatu material selama pemanasan awal (*reheating*), canai panas (*hot rolling*), serta transformasi akhir pada pendinginan di mana akhirnya akan menghasilkan sifat mekanis yang baik. Secara umum, *thermomechanical processing* terdiri atas pemanasan awal (*reheating*), canai panas (*hot rolling*), serta pendinginan (*cooling*). Proses pemanasan ini sangat penting dalam menghasilkan sifat mekanis benda jadi sebab dengan besar butir saat *reheating* diketahui. Dengan bergitu, dapat diprediksi besar butir mikrostruktur akhir yang terbentuk. Untuk menghasilkan butir ferit dengan ukuran yang halus pada akhir proses, butir austenit juga harus dibuat menjadi halus. Pengontrolan butir austenit itu terjadi pada saat proses pemanasan awal. Hal yang mempengaruhi pertumbuhan besar butir austenit yaitu temperatur reheating dan waktu tahan. Makin tinggi temperatur, maka ukuran butir menjadi semakin besar. Begitu juga halnya waktu tahan, makin lama waktu tahan, maka besar butir austenit menjadi semakin besar. Hal itu terjadi karena semakin tinggi temperatur dan waktu tahan, maka kemampuan butir untuk berdifusi ke butir lainnya menjadi semakin besar pula.



Gambar 2. 3 Perubahan mikrostruktur selama *thermomechanical processing*^[2]

Tahapan dalam proses termo mekanik adalah sebagai berikut.

- a) *Reheating*, yaitu pemanasan slab baja hingga temperatur austenit dengan tujuan untuk melarutkan berbagai paduan yang terdapat dalam baja dan untuk mencapai besar austenit yang optimum sehingga menghasilkan kekuatan yang optimum.

- b) *Roughing*, proses canai pertama yang dilakukan setelah *reheating*, baja akan mengalami penghalusan butir akibat proses rekristalisasi.
- c) *Finishing*, proses pembentukan akhir yang dilakukan pada temperatur tertentu untuk mendapatkan ketebalan terakhir dari baja. Dilakukan pada temperatur rendah pada daerah asutenit sehingga tidak terjadi rekristalisasi tetapi terjadi pengintian.
- d) *Cooling*, proses pendinginan setelah dilakukan pembentukan akhir.

2.4 Mekanisme Proses *Reheating*

Selama proses pemanasan untuk baja karbon rendah pada temperatur di bawah A_{c1} , strukturnya adalah ferit dan perlit. Semakin tinggi suhu melewati A_{c1} dan di bawah A_{c3} akan terjadi transformasi dari ferit menjadi austenit sehingga pada daerah ini fasa yang ada adalah ferit dan austenit. Di atas A_{c3} seluruh struktur mikro berubah menjadi asutenit.

Selama *reheating* juga akan terjadi pelarutan endapan seperti Nb, Ti, dan V dalam matriks austenit. Kelarutan dari setiap paduan berbeda tergantung pada temperatur kelarutannya. Temperatur *reheating* adalah di atas temperatur austenisasi sehingga diharapkan seluruh paduan dan senyawa larut pada saat *reheating* supaya dapat menghasilkan kekuatan yang optimum.

Sementara itu, pertumbuhan butir pada proses *reheating* tidak akan terjadi pada suhu rendah karena pergerakan dislokasi tertahan oleh karbida atau nitrida yang belum larut. Partikel karbida, nitrida, dan karbonitrida kelarutannya bergantung pada temperatur dan waktu. Pengasaran butir selama proses *reheating* merupakan faktor penting pada proses termomekanik. Dengan adanya partikel karbonitrida Nb akan menunda pengkasaran butir austenit ke temperatur yang lebih tinggi.

Pada baja paduan, pertumbuhan butir austenit dibagi menjadi 3 tahap sebagai berikut.

- a) Pertumbuhan butir normal

Pada tahap ini endapan yang belum larut akan menghambat pergerakan batas butir. Karbida dan nitrida yang tidak larut selama *reheating* dapat

menghambat laju pertumbuhan butir jika fraksi volume dan ukuran partikelnya sesuai dengan kondisi kritis untuk mengunci pergerakan batas butir.

b) Pertumbuhan butir abnormal

Terjadi ketika mulai adanya pengkasaran dan pengendapan partikel sehingga terbentuk struktur butir campuran. Pada tahap ini sebagian endapan sudah mulai larut sehingga sebagian butir akan tumbuh membesar, tetapi sebagian lagi masih kecil.

c) Pertumbuhan butir normal

Terjadi ketika sudah tidak ada lagi partikel yang menahan pertumbuhan butir akibat sudah larutnya semua endapan.

2.5 Mekanisme dan Kinetika Pertumbuhan Butir

Pertumbuhan butir terjadi karena adanya pembesaran butir tertentu dan terdifusinya butir yang lebih kecil. Batas butir memiliki atom-atom dengan energi bebas yang lebih tinggi daripada atom-atom yang terdapat dalam butir. Agar tercapai kondisi yang stabil, atom-atom pada batas butir mengurangi energi bebasnya yang tinggi dengan cara mengurangi luas permukaan batas butir sehingga terjadi migrasi batas butir. Migrasi batas butir pada dasarnya adalah difusi atom-atom pada batas butir. Energi minimum yang dibutuhkan agar atom-atom dapat berdifusi untuk memperoleh keadaan yang lebih stabil dinamakan energi aktivasi untuk pertumbuhan butir (Q)^[8]. Migrasi batas butir akan mengurangi energi bebas batas butir serta meningkatkan ukuran butir.

Jika butir berbentuk melengkung, atom cenderung stabil pada permukaan cekung daripada permukaan cembung. Dengan demikian, atom tersebut akan menarik atom pada permukaan cembung. Perpindahan panas pada temperatur yang tinggi akan memindahkan butir dengan permukaan cembung pada butir pada permukaan cekung. Butir yang mempunyai permukaan berbentuk cembung akan hilang menjadi butir yang besar^[10]. Butir austenit biasanya sangat kecil ($500-1000 \mu\text{m}^2$) saat pertama kali terbentuk, tetapi tumbuh secara cepat jika ditahan untuk beberapa lama pada temperatur isothermal atau dengan peningkatan temperatur.

Butir austenit tumbuh secara spontan dan karenanya menurunkan energi bebas dengan mengurangi permukaan butir.

Pada logam dengan fasa tunggal seperti pada baja dengan fasa austenit, laju pertumbuhan butir rata-rata (D) akan bertambah seiring dengan bertambahnya waktu, bergantung pada mobilitas batas butir (M) dan energi perpindahan batas butir (γ). Dengan asumsi radius rata-rata dari seluruh butir adalah diameter butir rata-rata dan energi pertumbuhan butir sebanding dengan $2\gamma/D$, dan α adalah konstanta proporsionalitas maka laju pertumbuhan butir rata-rata adalah^[2]:

$$V = \alpha M (2\gamma/D) (dD/dt) \quad (2.1)$$

Jika d rata-rata adalah d_0 pada saat $t=0$, maka nilai rata-rata ukuran butir pada $t=t_i$ adalah:

$$d^2 = d_0^2 + Kt \quad (2.2)$$

di mana $K=4\alpha M\gamma$

Secara eksperimen didapat bahwa pertumbuhan butir pada fasa tunggal akan mengikuti hubungan sebagai berikut^[2]:

$$d = K' t^n \quad (2.3)$$

di mana K' adalah konstanta kesetaraan bergantung pada temperatur, nilainya akan meningkat seiring naiknya temperatur.

Pertumbuhan butir terjadi akibat pembesaran butir tertentu dan terdifusinya butir yang lebih kecil yang secara termodinamik kurang stabil. Pada awalnya, dengan menahan butir austenit pada temperatur konstan tidak akan terlihat pertumbuhan butir secara signifikan. Tahap ini disebut sebagai tahap inkubasi. Semakin tinggi temperatur, semakin singkat waktu yang dibutuhkan untuk inkubasi. Tahap kedua akan terlihat adanya pertumbuhan ukuran butir yang tidak seragam (*non-uniform grain growth*). Setelah ini, pertumbuhan butir cenderung konstan dan penambahan waktu tahan lebih lanjut akan menyebabkan ukuran butir menjadi sama (*uniform grain growth*).

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

Kinetika pertumbuhan butir austenite selama proses reheating menurut C.M. Sellars dkk. adalah sesuai dengan persamaan berikut ini^[6]:

$$d^n - d_0^n = Ct \quad (2.4)$$

di mana n dan C adalah konstanta yang tergantung dari komposisi paduan, d menunjukkan diameter butir akhir, d_0 diameter butir awal, dan t adalah waktu anil material. Sellars kemudian merumuskan ulang persamaan tersebut menjadi:

$$d^n - d_0^n = Ae^{-Q/RT} t \quad (2.5)$$

di mana n dan A adalah konstanta tergantung pada komposisi material dan kondisi proses. Q adalah energi aktivasi pertumbuhan butir dan R adalah konstanta gas dan T adalah temperatur absolut.

Penambahan waktu tahan pada temperatur austenisasi akan meningkatkan jarak antar butir sesuai persamaan^[10]:

$$t = \frac{l^2}{D} \quad (2.6)$$

di mana l adalah jarak antar butir, D koefisien difusi, dan t adalah waktu. Nilai D ditentukan melalui persamaan Arrhenius berikut ini:^[10]

$$D = D_0 \exp(-Q/RT) \quad (2.7)$$

di mana D koefisien difusi, D_0 konstanta Arrhenius yang tergantung struktur kristal, Q energi aktivasi untuk difusi, R konstanta gas universal 8,314 J/mol K dan T merupakan temperatur. Semakin lama dilakukan penahanan waktu pada saat pemanasan isothermal, maka jarak antar butir akan meningkat dan butir semakin besar.

2.6. Temperatur Pengkasaran Butir

Pengkasaran butir dikenal juga dengan pertumbuhan butir tidak kontinu (*abnormal*), dimana ditandai dengan terjadinya pertumbuhan butir yang istimewa,

yaitu hanya beberapa butir yang bertambah besar diameternya, kemudian berkembang dan memakan butir disekitarnya sampai butir yang halus seluruhnya digantikan oleh butir yang besar. Temperatur pengkasaran butir adalah temperatur dimana presipitat yang tidak larut sudah tidak dapat lagi menahan pertumbuhan butir. L.J. Cuddy dkk^[12] telah menemukan persamaan untuk menghitung temperatur pengkasaran butir, yaitu:

$$T_{gc} = A + B (T_s - 273) \quad (2.8)$$

di mana T_{gc} temperatur pengkasaran butir ($^{\circ}\text{C}$), T_s temperatur kelarutan presipitat (K) yang nilainya dapat dihitung melalui persamaan (2.1), A dan B merupakan konstanta yang nilainya tergantung jenis presipitatnya, seperti yang dapat kita lihat pada tabel berikut.

Tabel 2. 1 Konstanta Kelarutan dan Pengkasaran Butir^[13]

Presipitat	Konstanta Pengkasaran Butir	
	A	B
AlN	385	0,535
VN	616	0,376
TiN	-279	0,899
NbCN	460	0,569

Informasi yang tepat terhadap temperatur pengkasaran butir dan temperatur kelarutan presipitat sangat penting untuk proses *reheating*. Perlakuan *reheating* di bawah temperatur pengkasaran butir dapat menghasilkan struktur butir austenit yang halus dan seragam. Semakin kecil ukuran butir austenit, maka akan menghasilkan ukuran butir ferit yang halus dan meningkatkan sifat mekanis baja HSLA.

2.7 Mekanisme Penguatan Pada Baja HSLA-Nb

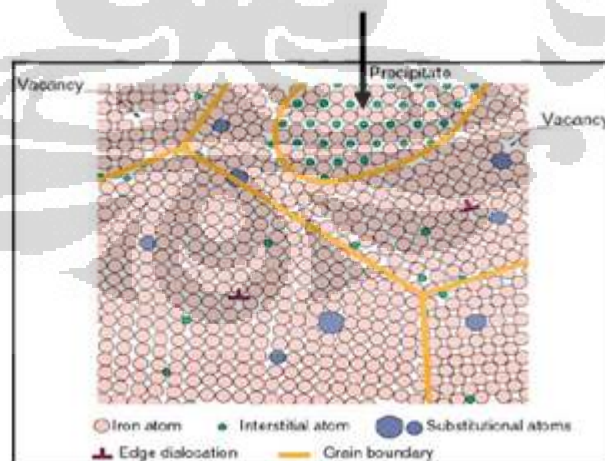
Mekanisme Penguatan pada Baja HSLA-Nb terbagi menjadi dua mekanisme yaitu mekanisme penguatan yang disebabkan oleh keberadaan presipitat dan mekanisme penguatan yang diakibatkan oleh berkurangnya ukuran butir.

2.7.1 Mekanisme Penguatan Presipitat

Penguatan presipitat (*precipitation hardening*) pada dasarnya terjadi pada unsur yang memiliki kelarutan yang tinggi pada temperatur tinggi dan unsur tersebut harus dapat membentuk endapan yang dapat menghalangi dislokasi sehingga akan terjadi mekanisme penguatan^[8]

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

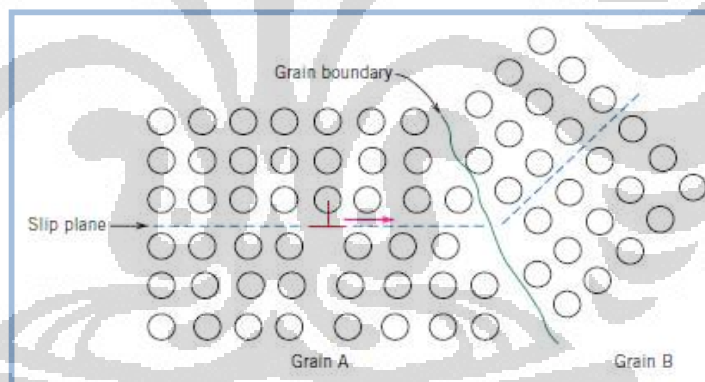
Presipitat $Nb(CN)$ akan larut seluruhnya kedalam fasa austenit apabila dipanaskan diatas temperatur kelarutannya sehingga tidak ada lagi yang menghambat pertumbuhan butir sehingga butir akan bertambah besar dengan cepat. Kontrol besar butir austenit bisa dilakukan dengan memanaskan material dibawah temperatur kelarutan carbonitridenya. Dengan kelarutan yang semakin rendah, maka akan semakin banyak presipitat yang tidak larut pada fasa austenit yang dapat mencegah pertumbuhan butir austenit sehingga akan semakin banyak pula dihasilkan butir ferrite yang halus.



Gambar 2. 4 Ilustrasi Sebaran Presipitat Pada Batas Butir (ditunjukkan panah hitam)

2.7.2 Mekanisme Penguatan dengan Penghalusan Butir

Ukuran butir atau biasa di kenal diameter rata-rata butir pada logam kristalin akan mempengaruhi sifat mekaniknya. Dua butir yang bertetangga akan mempunyai orientasi kristalografi yang berbeda, hal itulah yang memunculkan adanya batas butir. Ketika terjadi deformasi plastis, slip atau pergerakan dislokasi harus melewati batas butir ini sehingga pergerakan dislokasi menjadi terhalang. Batas butir mampu menghalangi pergerakan dislokasi karena ketika ingin melewati batas butir maka dislokasi harus merubah arah gerakannya, hal ini tentu akan sulit dilakukan. Selain itu ketidakteraturan atomik pada daerah batas butir juga akan menghasilkan diskontinuitas bidang slip dari satu butir ke butir lain sehingga dislokasi sulit berpindah antar butir. Material dengan ukuran butir kecil (halus) akan memiliki kekerasan dan kekuatan yang lebih baik dibandingkan dengan material berbutir kasar karena mempunyai batas butir yang lebih banyak untuk menghalangi pergerakan dislokasi^[11].



Gambar 2. 5 Ilustrasi Pergerakan Dislokasi antar butir[11]

Hubungan antara diameter butir dari sebuah baja dengan kekuatan *yield*-nya diperlihatkan pada persamaan Hall-Petch. Persamaan ini menunjukkan hubungan antara akar kuadrat diameter butir ferrite pada baja karbon rendah dengan fase ferrit.

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2} \quad (2.9)$$

di mana d adalah ukuran diameter butir rata-rata, σ_0 dan K_y adalah konstanta.

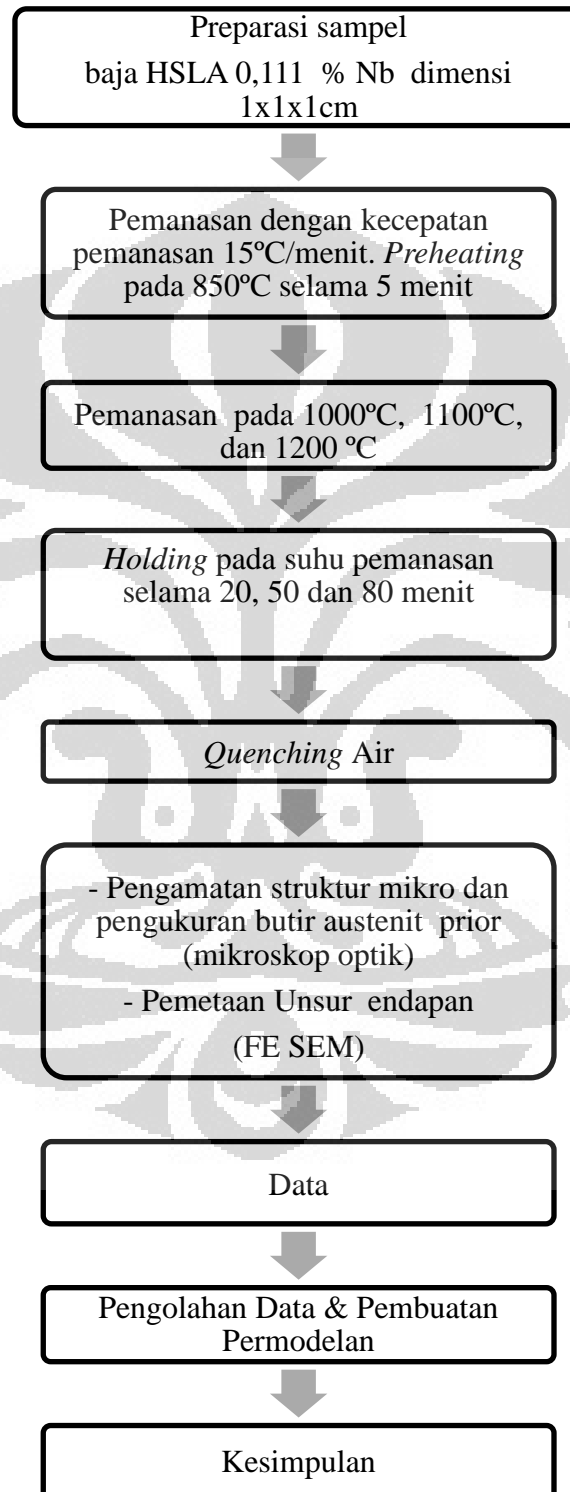
Persamaan Hall-Petch ini sangat penting dalam menjelaskan hubungan antara struktur mikro dan sifat-sifat baja. Hubungan ini dimanfaatkan di dalam

pemrosesan baja, yaitu dengan mengatur atau mengendalikan ukuran butir untuk meningkatkan kekuatan baja. Penguatan baja dengan cara ini dilakukan melalui proses termomekanika (*thermomechanical process*), proses perlakuan panas (*heat treatment*), dan pemberian paduan mikro (*micro alloying*).



BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Peralatan dan Bahan

3.2.1 Peralatan

- a) Carbolite Furnace
- b) *Thermocouple wire*
- c) Alat bantu proses *reheating*: masker, sarung tangan, penjepit benda uji, *stopwatch*
- d) Mesin ampelas
- e) Mesin poles
- f) Perangkat etsa
- g) Mikroskop optik
- h) Alat uji FE SEM (*Field Emission Scanning Electron Microscope*)

3.2.2 Bahan

- a) Baja HSLA 0,111% Nb berdimensi 1x1x1cm
- b) Kertas amplas 60#, 120#, 240#400#, 600#, 800#, 1200#, 1500#
- c) Cairan poles TiO₂
- d) Bahan Etsa Picral:
 - Asam piciric jenuh
 - HCl pekat
 - Dodecyl Benzenessulfonat (*Wetting agent*)

3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Preparasi Sampel

Sampel yang digunakan pada penelitian ini adalah baja HSLA 0.111 % Nb. Komposisi kimia dari sampel tersebut adalah sebagai berikut.

Tabel 3. 1 Komposisi Kimia Baja HSLA 0,111% Nb

C	Ti	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Nb	V	Ni	Cr	N
0.127	0.0028	0.189	0.233	0.032	0.0089	0.077	0.023	0.111	0.0012	0.019	0.134	0.031

Sampel berasal dari baja berbentuk billet yang kemudian di potong potong menjadi kubus berukuran 1x1x1 cm.

3.3.2 Proses *Reheating*

Proses *reheating* dilakukan pada temperatur 1000, 1100 dan 1200°C yaitu dibawah temperatur kelarutan paduan yang dihitung oleh rumus *solubility product* dari Irvine^[6]:

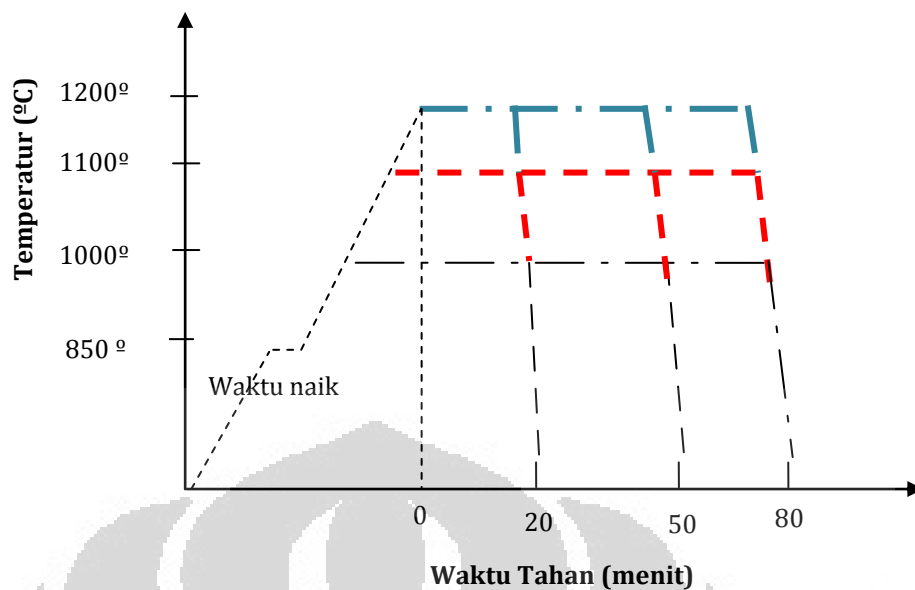
$$\text{Log}(\%Nb)\{(\%C) + 12/14(\%N)\} = 2,26 - 6770/T \quad (3.1)$$

dimana % Nb, % C, dan % N adalah % berat dari Nb, C, dan N

Persamaan di atas hanya dapat digunakan pada paduan dengan persentase kandungan N lebih rendah dari C. Proses *reheating* umumnya dilakukan disekitar temperatur *solubility product* untuk memudahkan proses canai panas dengan larutnya sebagian atau seluruh endapan karbida dan nitrida atau carbonitrida, namun terhindar dari *abnormal grain boundary*. Penjelasan lebih mendetail mengenai cara menghitung temperatur *solubility product* dapat dilihat pada lampiran 1.

Pada penelitian ini setelah dilakukan preparasi sampel, kemudian dilakukan pemanasan dengan laju pemanasan sebesar 15°C per menit. Sebelum mencapai suhu austenisasinya baja dilakukan *preheating* pada suhu 850°C selama 5 menit. Setelah itu, dilanjutkan hingga mencapai suhu austenisasinya. Pada penelitian ini akan dicoba suhu austenisasi pada 1000 °C, 1100 °C, dan 1200 °C. Pada suhu austenisasinya, sampel kemudian mengalami penahanan untuk mendapatkan fasa austenit yang stabil dan homogen. Pada penelitian ini dipilih waktu tahan selama 20 menit, 50 menit dan 80 menit.

Setelah selesai masa tahannya, sampel kemudian di-*quenching* dengan air hingga mencapai temperatur ruang sehingga menghasilkan struktur martensit. Struktur ini diharapkan dapat muncul sehingga pengamatan butir austenit prior akan terlihat dengan jelas.



Gambar 3. 2 Skematis Proses Reheating

3.3.3 Pengamatan Struktur Mikro dan Distribusi Unsur Paduan dengan Mikroskop Optik dan FE SEM

Pengamatan struktur mikro dilakukan melalui mikroskop optik. Pengamatan ini ditujukan terutama melihat ukuran butir austenit prior yang terbentuk. Untuk pengamatan dengan mikroskop optik, sampel mengalami persiapan, seperti *mounting*, pengampelasan pemolesan, dan pengetsaan.

a. *Mounting*

Sampel yang sudah mengalami proses *reheating* kemudian di-*mounting* dengan metode *castable mounting* sehingga memudahkan untuk penanganan sampel selanjutnya.

b. Pengampelasan

Sampel dilakukan pengampelasan dengan kertas grit 60#, 120#, 240#, 400#, 800#, 1000#, dan 1500# secara berurutan.

c. Pemolesan

Sampel yang sudah diampelas halus, kemudian dilakukan pemolesan dengan media kain beludru dan cairan TiO_2 sehingga didapat sampel yang sudah bebas gores dan siap untuk dietsa.

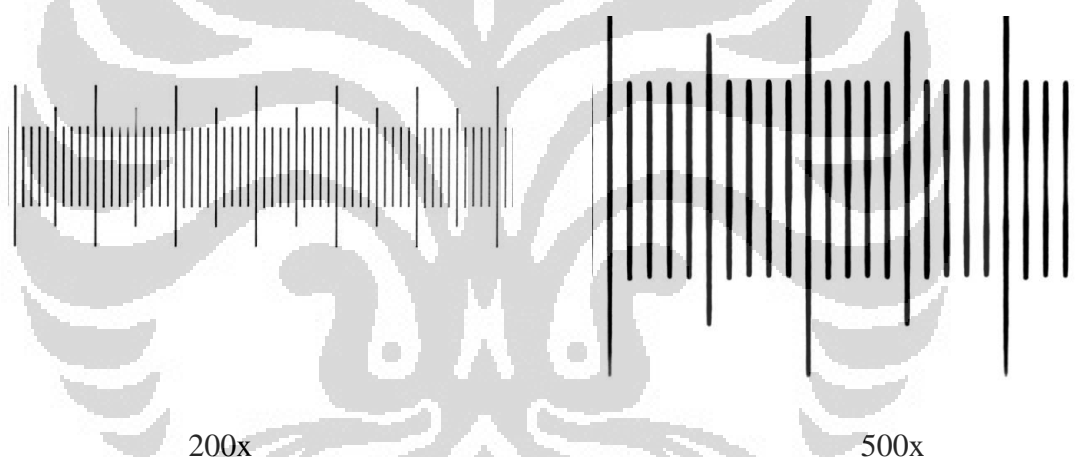
d. Etsa

Pengetsaan dilakukan untuk melihat struktur butir austenit prior dengan etsa yang dipakai adalah *picral* dengan komposisi sesuai dengan

penelitian sebelumnya^[2], yaitu larutan jenuh 30 gr asam pikrik dalam 100 ml alkohol 96% dengan penambahan *wetting agent* Dodecyl Benzenessulfonat (DBS) dan 1 tetes HCl pekat. Setelah dilakukan pengetsaan, dilakukan pengamatan struktur mikro dengan mikroskop optik Untuk mengamati penyebaran Niobium dan keberadaan endapan lain dilakukan pemetaan unsur dengan FE SEM (field emission scanning electron microscope). Dari pemetaan ini akan dilihat distribusi endapan mikro seperti karbon, nitrogen, dan niobium.

3.3.4 Penghitungan besar butir austenit

Perhitungan besar butir austenit dilakukan dengan menggunakan metode perbandingan. Perhitungan dilakukan dengan foto standar perbesaran tertentu yang berisi skala seperti terlihat pada gambar dibawah



Gambar 3. 3 Foto Skala Standar Untuk Perbesaran 200x Dan 500x^[7]

Setiap satu garis skala pada foto skala standar tersebut memiliki panjang 1 μm . Sehingga dengan menggunakan mistar, dapat diketahui perbandingan antara ukuran pada mistar sentimeter dengan ukuran μm pada foto. Sebagai contoh, pada foto standar perbesaran 50X, 10 sentimeter pada mistar ternyata adalah 7/10000 μm pada foto, sedangkan pada foto standar perbesaran 100X, 10 sentimeter pada mistar ternyata adalah 10000/14 μm pada foto. Setelah itu ditarik garis sebanyak 10 buah pada foto. Kemudian, dari 10 garis tersebut diambil rata-ratanya sehingga hasil pengukuran lebih akurat. Misalnya, pada foto perbesaran 100X, garis kesatu jumlah batas butir yang memotong garis sebanyak 8 buah, maka diameter

butirnya sama dengan $10000/14 \mu\text{m}/8 = 89,29 \mu\text{m}$. Begitu seterusnya sampai garis ke-10, kemudian diambil rata-ratanya^[7].

3.3.5 Permodelan Kinetika Pertumbuhan Butir Austenit Prior

Sesuai dengan persamaan kinetika pertumbuhan butir austenit prior yang di kemukakan Sellars dkk, pertumbuhan butir adalah sebuah fungsi eksponensial yang merupakan fungsi dari temperatur pemanasan dan waktu tahan. Selain dua variabel tersebut tentunya masih banyak faktor yang juga mempengaruhi besar butir austenit prior sehingga persamaan tersebut tidak berlaku untuk semua material dan semua kondisi pemanasan. Pada penelitian ini akan dibuat sebuah permodelan untuk dapat memprediksi besar butir austenite prior berdasarkan variabel temperatur pemanasan dan waktu tahan. Dari data besar butir yang didapat dari hasil eksperimen pada setiap kondisi pemanasan (temperatur pemanasan tertentu dan waktu tertentu) akan dibuat sebuah persamaan garis lurus dengan bantuan program Microsoft excel. Dengan menganalogikan persamaan garis lurus tersebut dengan persamaan permodelan akan didapat nilai dari konstanta konstanta yang ada pada persamaan permodelan. Setelah itu dipilih kombinasi konstanta yang menghasilkan prediksi besar butir yang paling mendekati hasil eksperimen. Kemudian konstanta tersebut di masukan kedalam persamaan permodelan dan akan menghasilkan sebuah persamaan akhir. Jika hasil permodelan belum mendekati hasil eksperimen maka dilakukan penyesuaian dengan penambahan konstanta baru. Setelah didapat persamaan permodelan yang paling mendekati hasil eksperimen maka akan dihasilkan persamaan akhir. Persamaan ini dapat digunakan untuk memprediksi besar butir austenit prior dengan variabel temperatur pemanasan dan waktu tahan.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengamatan Struktur Mikro

Proses *reheating* dilakukan pada temperatur 1000°C, 1100°C, dan 1200°C dengan waktu tahan masing masing 20, 50, dan 80 menit. Kemudian dilakukan *quenching* dengan media air. Dari hasil pengujian didapatkan bahwa suhu air saat *quenching* adalah 25°C. Proses *quenching* sendiri dilakukan secepat mungkin untuk menghindari drop temperatur yang berlebihan yang akan mengakibatkan tidak terbentuknya struktur martensit. Setelah *quenching*, dilakukan preparasi sampel untuk dapat diamati di bawah mikroskop. Preparasi sampel yang dilakukan meliputi *mounting*, pengampelasan, pemolesan, dan terakhir adalah etsa dengan zat kimia. Proses pengetsaan merupakan proses yang sangat penting dalam pengamatan butir austenit prior, hal itu karena zat etsa untuk memunculkan butir austenit prior sangat spesifik. Kombinasi antara komposisi etsa dan waktu etsa yang tepat akan mampu memunculkan butir austenit prior dengan baik.

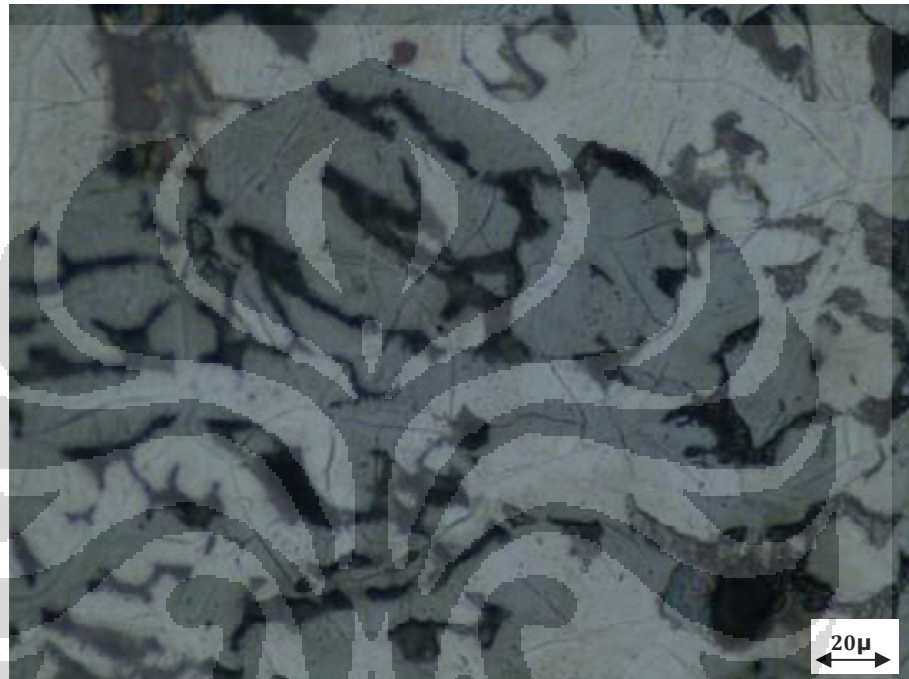
Pengamatan struktur mikro dilakukan dengan mikroskop optik di Departemen Metalurgi dan Material FTUI. Pemberian skala pada foto mikro merujuk pada penelitian terdahulu dengan menggunakan metode perbandingan terhadap foto standar. Jarak pada foto standar dibandingkan dengan jarak sesungguhnya hasil pengukuran dengan *measurement microscope*^[16]. Dari hasil pengukuran didapat data sebagai berikut.

- a. Foto dengan lensa perbesaran 100 x, diameter jejak sebenarnya pada *measuring microscope* sebesar 100 µm, sedangkan diameter jejak pada foto standar sebesar 1.3 cm. Dengan demikian, 1,3 cm pada foto mikro mewakili 100 µm pada kondisi sebenarnya.
- b. Foto dengan lensa perbesaran 200 x, diameter jejak sebenarnya pada *measuring microscope* sebesar 100 µm, sedangkan diameter jejak pada foto standar sebesar 1.8 cm. Dengan demikian, 1,3 cm pada foto mikro mewakili 50 µm pada kondisi sebenarnya.
- c. Foto dengan lensa perbesaran 500 x, diameter jejak sebenarnya pada *measuring microscope* sebesar 100 µm, sedangkan diameter jejak pada foto

standar sebesar 6.3 cm. Dengan demikian 1,3 cm pada foto mikro mewakili 20 μm pada kondisi sebenarnya.

4.1.1 Pengamatan Struktur Mikro Sebelum Proses Perlakuan Panas.

Sebelum dilakukan perlakuan panas dilakukan karakterisasi awal terhadap material awal sebelum dilakukan perlakuan panas. Berikut adalah foto struktur mikro dari Baja HSLA 0,111% Nb sebelum perlakuan panas.



Gambar 4. 1 Struktur Mikro Baja HSLA 0,111% Nb Sebelum Dilakukan Proses Perlakuan Panas. Etsa Picral Jenuh, Perbesaran 500x

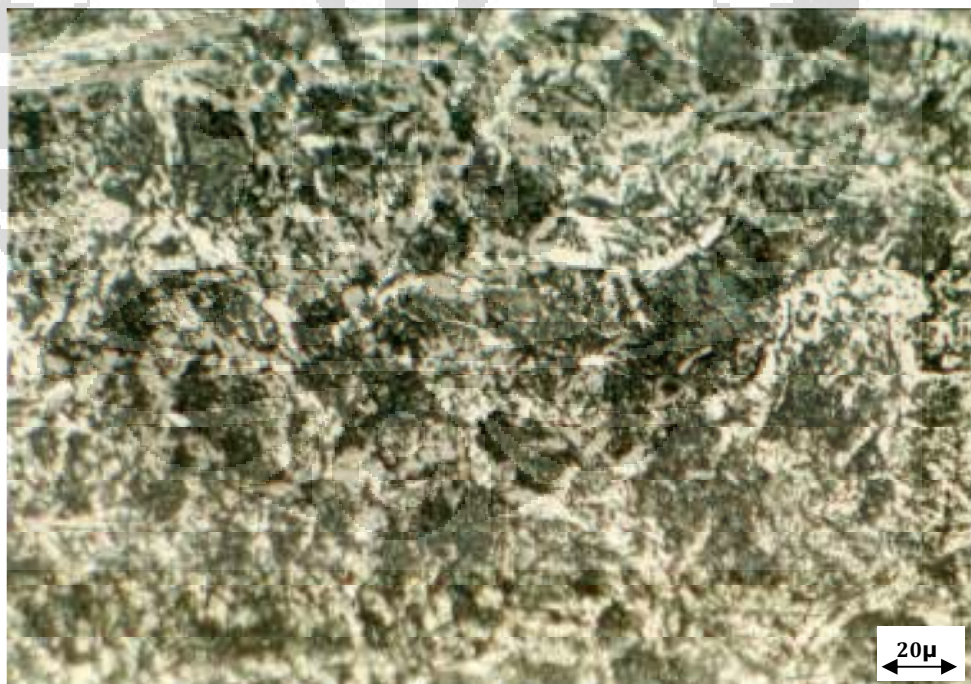
Dari gambar di atas kita dapat melihat bahwa struktur baja HSLA 0,111% Nb sebelum perlakuan panas (As Cast) didominasi oleh Ferrit-Pearlit.

4.1.2 Pengamatan Struktur Mikro Setelah Proses Perlakuan Panas.

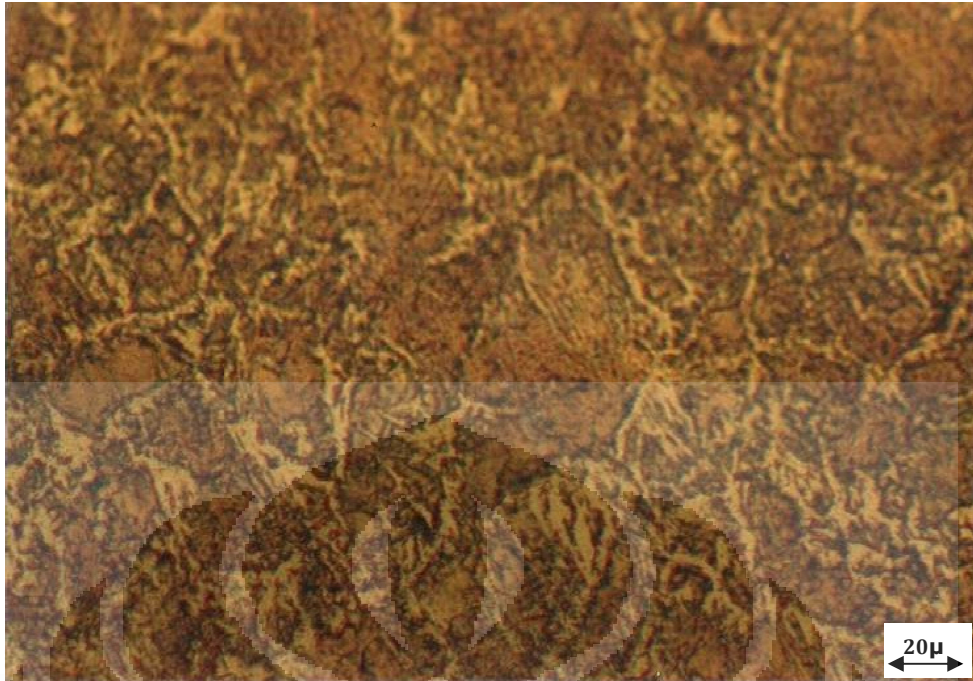
Berikut ini adalah foto mikro yang dihasilkan setelah sampel mengalami proses proses perlakuan panas *reheating*. Gambar yang ditampilkan merupakan perwakilan dari setiap kondisi percobaan.



Gambar 4. 2 Foto Butir Austenit Prior Pada Baja HSLA 0,111% Nb. Temperatur Pemanasan 1000°C, Waktu Tahan 20 Menit, Perbesaran 500x.



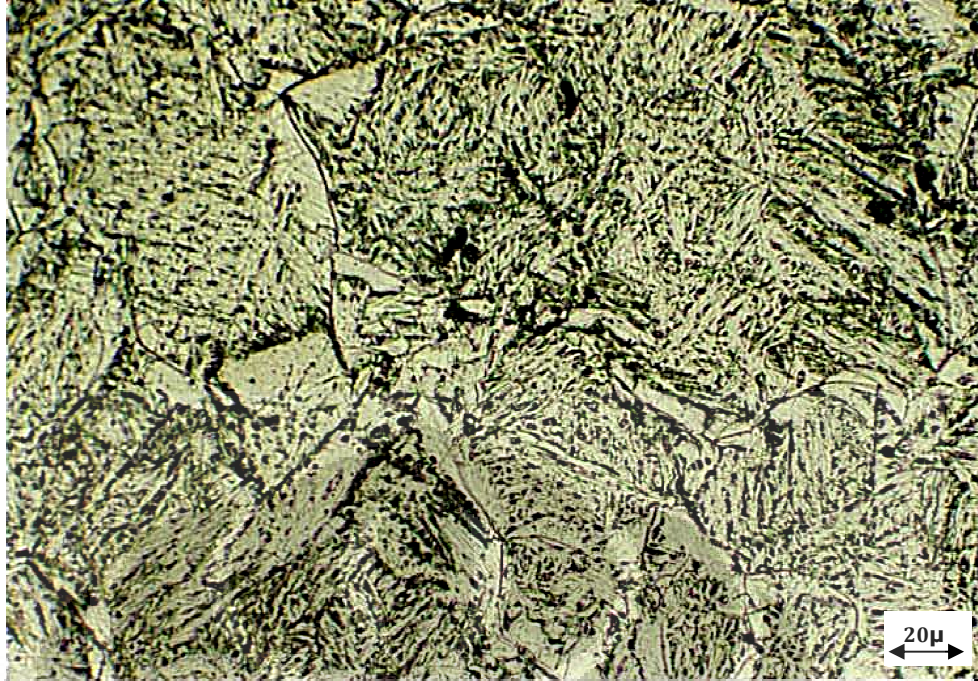
Gambar 4. 3 Foto butir austenit prior pada Baja HSLA 0,111% Nb. Temperatur pemanasan 1000 °C, waktu tahan 50 menit, perbesaran 500x.



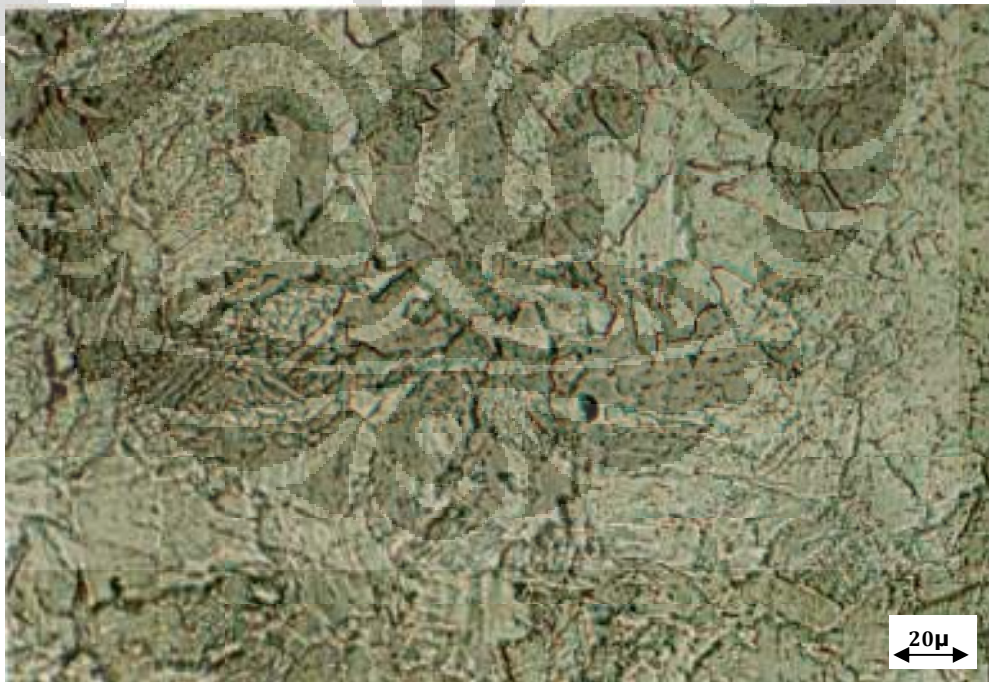
Gambar 4. 4 Foto butir austenit prior pada Baja HSLA 0,111% Nb. Temperatur pemanasan 1000 °C, waktu tahan 80 menit, perbesaran 500x.



Gambar 4. 5 Foto butir austenit prior pada Baja HSLA 0,111% Nb. Temperatur pemanasan 1100 °C, waktu tahan 20 menit, perbesaran 500x.



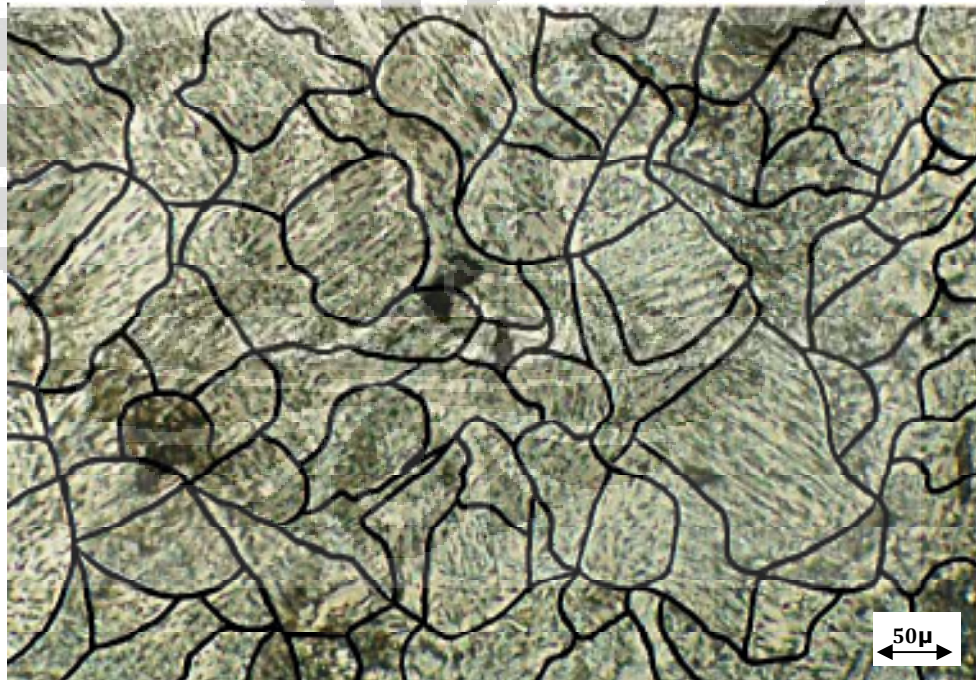
Gambar 4. 6 Foto butir austenit prior pada Baja HSLA 0,111% Nb. Temperatur pemanasan 1100 °C, waktu tahan 50 menit, perbesaran 500x



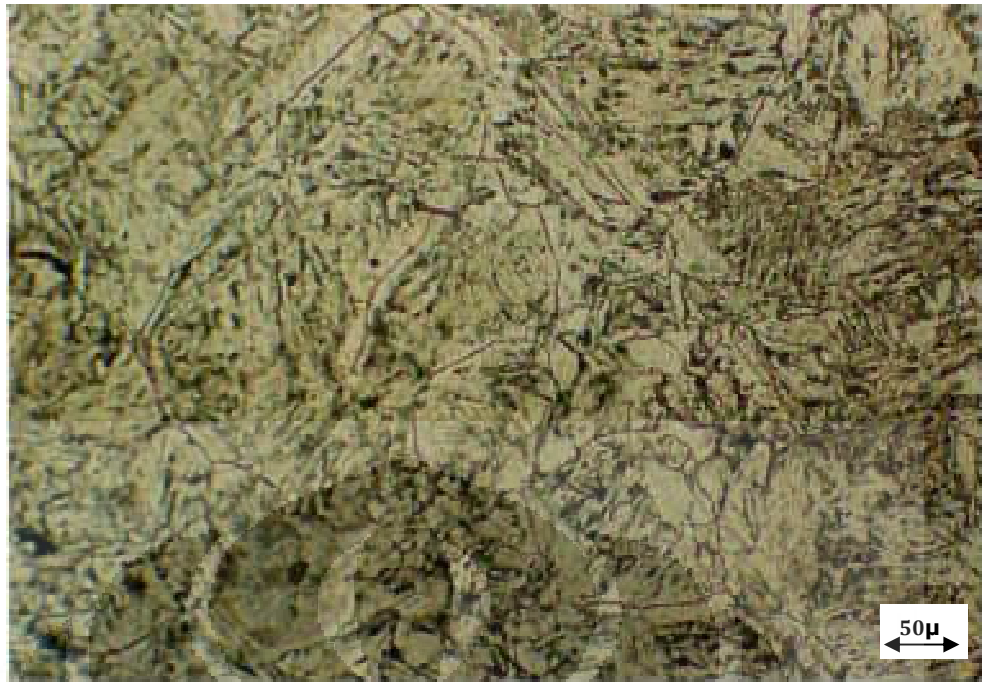
Gambar 4. 7 Foto butir austenit prior pada Baja HSLA 0,111% Nb. Temperatur pemanasan 1100 °C, waktu tahan 80 menit, perbesaran 500x.



Gambar 4. 8 Foto butir austenit prior pada Baja HSLA 0,111% Nb. Temperatur pemanasan 1200 °C, waktu tahan 20 menit, perbesaran 500x.



Gambar 4. 9 Foto butir austenit prior pada Baja HSLA 0,111% Nb. Temperatur pemanasan 1200 °C, waktu tahan 50 menit, perbesaran 200x.



Gambar 4. 10 Foto butir austenit prior pada Baja HSLA 0,111% Nb. Temperatur pemanasan 1200 °C, waktu tahan 80 menit, perbesaran 200x

4.2 Data Pengamatan Besar Butir Austenit Prior

Foto mikro yang sudah didapatkan dari setiap sampel kemudian dilakukan penghitungan besar butir austenit dengan metode perbandingan. Langkah detail tentang penghitungan besar butir akan dijelaskan lebih lanjut pada Lampiran 2. Setelah didapatkan data besar butir untuk setiap sampel, dilakukan penghitungan standar deviasi untuk mengetahui tingkat akurasi dari data yang dihasilkan. Perhitungan standar deviasi mengikuti rumus berikut.

$$d = \frac{\sum d_n}{N} \quad (4.1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (d_n - d)^2}{N - 1}} \quad (4.2)$$

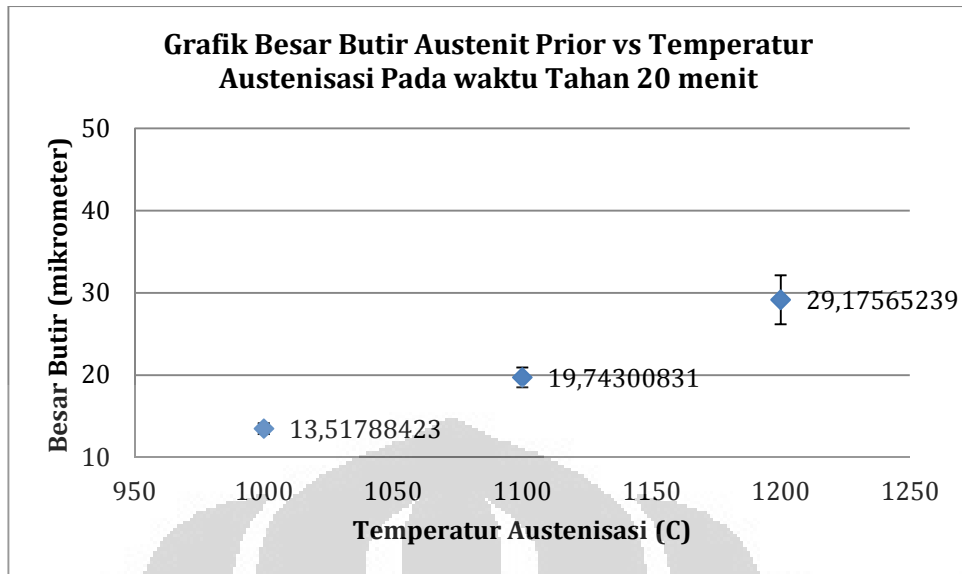
Cara perhitungan standar deviasi dapat dilihat pada lampiran 3. Berikut ini adalah data besar butir rata rata yang didapat dari setiap sampel:

Tabel 4. 1 Besar Butir Austenit Prior Baja HSLA 0,111% Nb

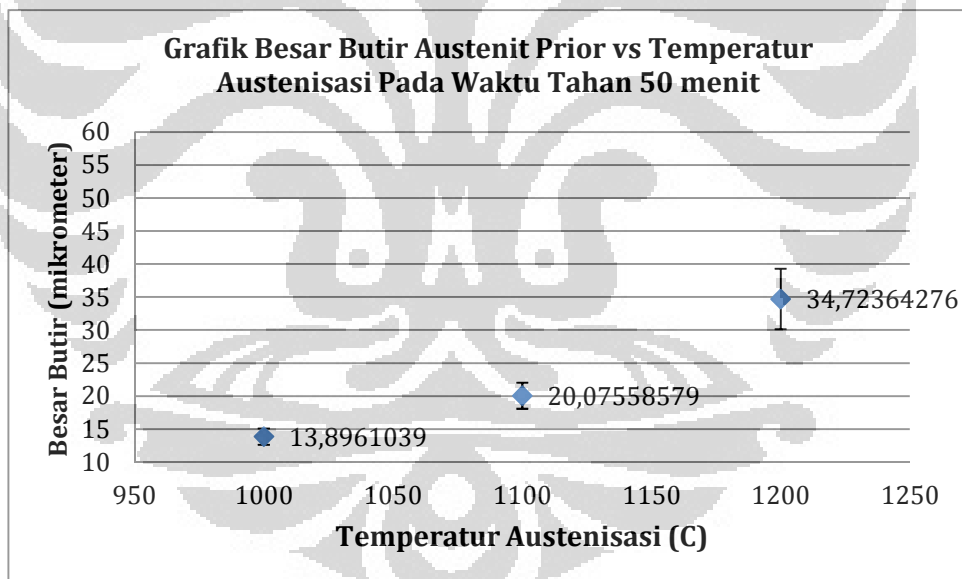
Temperatur	Waktu Tahan	Sampel	Ukuran Butir	Ukuran Butir Rata-Rata	Standar Deviasi	Ukuran Butir
1000 C	20 menit	A11	14,173882	13,51788423	0,66118423	13,518 ± 0,661
		A12	12,851632			
		A13	13,528139			
	50 menit	A21	14,650072	13,8961039	1,23781539	13,896 ± 1,237
		A22	14,570707			
		A23	12,467532			
	80 menit	A31	14,859307	15,23689274	0,71417942	15,237 ± 0,714
		A32	16,060606			
		A33	14,790765			
1100 C	20 menit	B11	20,260771	19,74300831	1,20343521	19,743 ± 1,203
		B12	20,600907			
		B13	18,367347			
	50 menit	B21	18,622449	20,07558579	1,97934582	20,075 ± 1,979
		B22	22,329932			
		B23	19,274376			
	80 menit	B31	20,663265	20,54988662	0,27334611	20,549 ± 0,273
		B32	20,238095			
		B33	20,748299			
1200 C	20 menit	C11	32,527195	29,17565239	2,96992198	29,175 ± 2,969
		C12	26,870748			
		C13	28,129014			
	50 menit	C21	39,980159	34,72364276	4,56896757	34,723 ± 4,568
		C22	32,48557			
		C23	31,7052			
	80 menit	C31	79,341888	65,75663094	11,7886818	65,756 ± 11,78
		C32	59,70805			
		C33	58,219955			

4.3 Hubungan Temperatur Pemanasan dengan Besar butir Austenit Prior

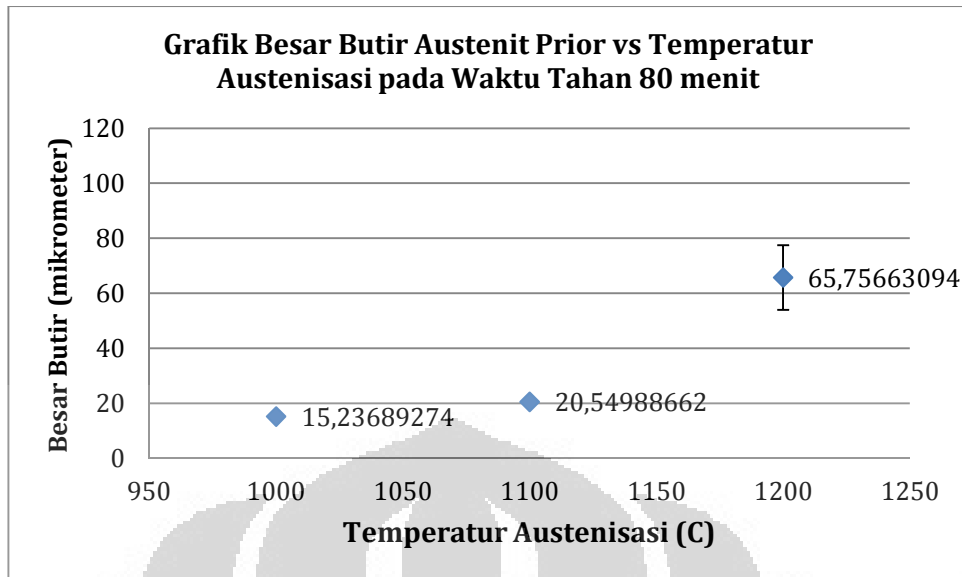
Temperatur pemanasan yang diberikan saat proses *reheating* mempunyai pengaruh yang sangat signifikan terhadap ukuran butir austenit prior. Pada penelitian ini dilakukan pemanasan dengan 3 temperatur pemanasan yang berbeda, yaitu 1000°C, 1100°C, dan 1200°C. Berikut ini adalah hubungan antara temperatur pemanasan dengan besar butir austenit prior.



Gambar 4. 11 Grafik Pengaruh Temperatur Austenisasi terhadap Besar Butir pada Waktu Tahan 20 Menit.

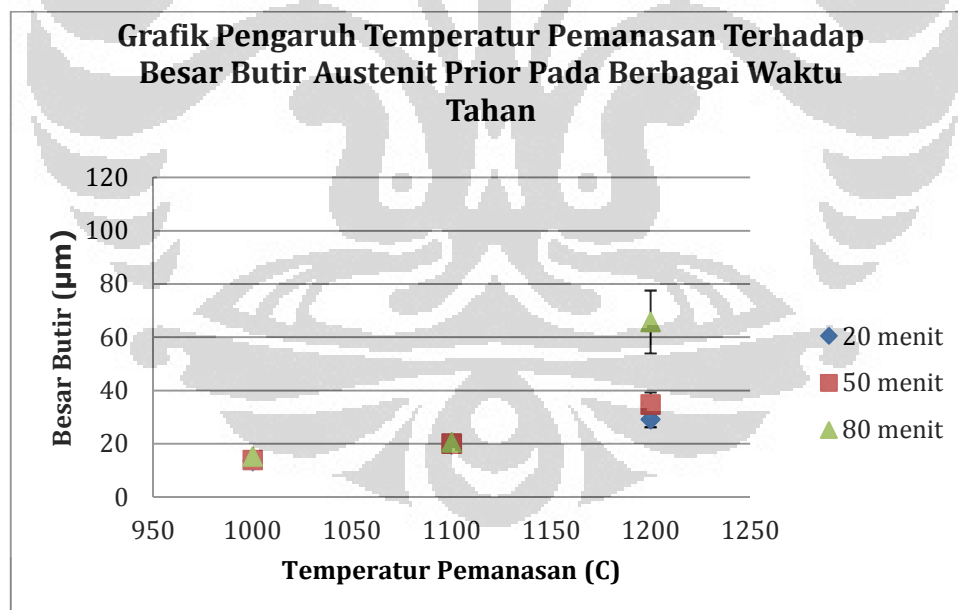


Gambar 4. 12 Grafik Pengaruh Temperatur Austenisasi terhadap Besar Butir pada Waktu Tahan 50 Menit.



Gambar 4. 13 Grafik Pengaruh Temperatur Austenisasi terhadap Besar Butir pada Waktu Tahan 80 Menit.

Untuk melihat perbandingan pengaruh temperatur terhadap besar butir dari berbagai waktu tahan kita bisa mengamati gambar 4.13 berikut:



Gambar 4. 14 Grafik Pengaruh Temperatur Austenisasi terhadap Besar Butir pada Berbagai Waktu Tahan.

Penelitian ini berhasil menunjukkan bahwa diameter butir austenit prior semakin meningkat seiring dengan naiknya temperatur pemanasan. Dari grafik dapat dilihat bahwa diameter butir austenit prior semakin besar ketika suhu

pemanasan yang diaplikasikan semakin tinggi. Hal itu terjadi pada semua waktu tahan yaitu pada waktu tahan 20, 50, dan 80 menit. Hal itu sesuai dengan penemuan Seok-Jae Lee dkk^[14] yang menyatakan bahwa butir austenit prior cenderung akan semakin mengasar ketika temperatur pemanasannya semakin tinggi. Tren dari ketiga grafik untuk waktu tahan yang berbeda menunjukkan hal yang sama, yaitu pada suhu 1000°C dan 1100°C menunjukkan nilai besar butir austenit prior yang hampir sama, tetapi nilainya meningkat tajam saat suhu pemanasannya 1200°C. Berdasarkan fakta tersebut dapat kita simpulkan bahwa tingkat kenaikan ukuran butir austenit prior jauh lebih tinggi pada suhu 1200°C dibandingkan suhu 1000°C dan 1100°C. Tingkat kenaikan ukuran butir austenit prior pada temperatur pemanasan 1000°C-1100°C untuk setiap waktu tahan adalah 31,5% (20 menit), 30,7 % (50 menit), dan 25,8% (80 menit). sementara itu tingkat kenaikan ukuran butir pada temperatur pemanasan 1100°C-1200°C adalah 32,3%(20 menit), 42,2%(50 menit) dan 68,7%(80 menit).

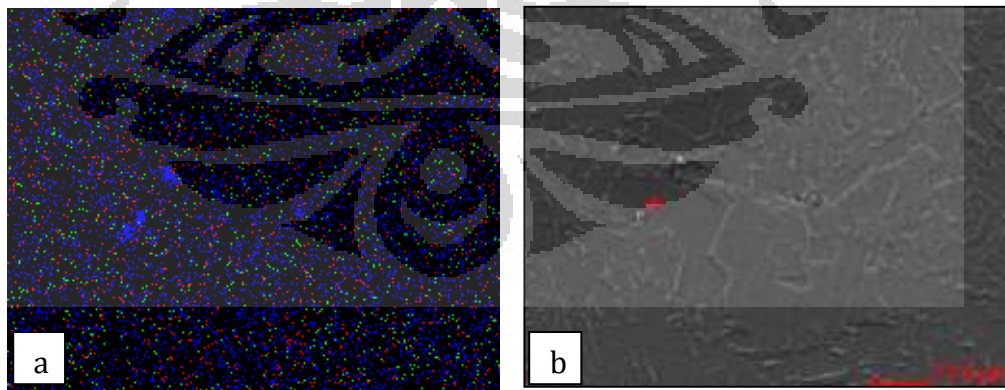
Data hasil penelitian menunjukkan diameter butir austenit prior pada suhu 1000°C dan 1100°C hanya sekitar 13—20 µm. Hal itu sesuai dengan hasil penelitian Duan Lin-na dkk yang menyatakan bahwa butir austenit prior pada suhu di bawah 1180°C berukuran sangat halus dan kurang dari 55 µm dan akan tumbuh secara perlahan dan semakin kasar ketika suhu pemanasannya melewati 1200°C^[15].

Fenomena lebih besarnya tingkat kenaikan ukuran butir pada temperatur 1000°C dan 1100°C dibandingkan dengan tingkat kenaikan ukuran butir pada temperatur 1200°C disebabkan oleh belum tercapainya temperatur pengasaran butir. Pada baja HSLA Nb pertumbuhan butir akan semakin membesar ketika sudah melewati temperatur pengasaran butir. Pada saat itu presipitat-presipitat karbonitrida sedikit demi sedikit mulai terlarut sehingga mengurangi kemampuannya untuk menahan pertumbuhan butir. Temperatur pengasaran butir untuk baja HSLA seperti yang dikemukakan L.J. Cuddy dkk.^[12] dihitung sesuai dengan persamaan berikut.

$$T_{gc} = A + B (T_s - 273) \quad (4.3)$$

Dari hasil perhitungan sesuai dengan nilai A dan B pada sub bab 2.6 didapatkan bahwa temperatur pengasaran butir untuk presipitat NbCN pada baja HSLA

0,111% Nb adalah sebesar $1255,8^{\circ}\text{C}$ sehingga bisa ditarik kesimpulan bahwa butir austenit prior akan mulai mengasar setelah melewati suhu 1255°C , hal itu dibuktikan dengan foto mikrostruktur pada baja yang mengalami pemanasan pada 1200°C (gambar 4.8 dan 4.9) di mana ukuran butir yang dihasilkan meningkat cukup besar dengan semakin mendekati ke temperatur pengasaran butir 1255°C . Hal ini disebabkan oleh semakin banyaknya endapan nitrida atau karbonitrida yang melarut. Untuk mengkonfirmasi hal ini penulis juga melakukan pengujian dengan FE SEM (*field emission scanning electron microscope*) pada sampel yang mengalami pemanasan pada 1200°C dan waktu tahan 80 menit. Hasilnya didapatkan bahwa masih adanya endapan endapan NbCN pada batas butir, tetapi sebagian lain sudah menyebar menandakan sudah mulai terjadi pelarutan endapan. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.15a dibawah ini, partikel berwarna biru menunjukkan unsur niobium yang menggerombol pada beberapa titik. Niobium yang menggerombol ini menunjukkan terbentuknya endapan NbCN. Sementara itu pada daerah lain unsur niobium tersebar merata menunjukkan bahwa sebagian niobium sudah melarut. Pada daerah tempat menggerombolnya niobium seperti yang ditunjukkan tanda silang merah pada gambar 4.15b, dilakukan uji komposisi dan hasilnya dapat dilihat pada tabel 4.2. Pemetaan dari unsur karbon, niobium dan nitrogen beserta komposisinya pada titik lain dapat dilihat pada lampiran 4.



Gambar 4. 15 Foto Hasil FE SEM pada Baja HSLA 0,111% Nb a) pemetaan unsur endapan niobium, karbon, dan nitrogen b) lokasi endapan Niobium.

Tabel 4. 2 Komposisi Kimia Endapan NbCN

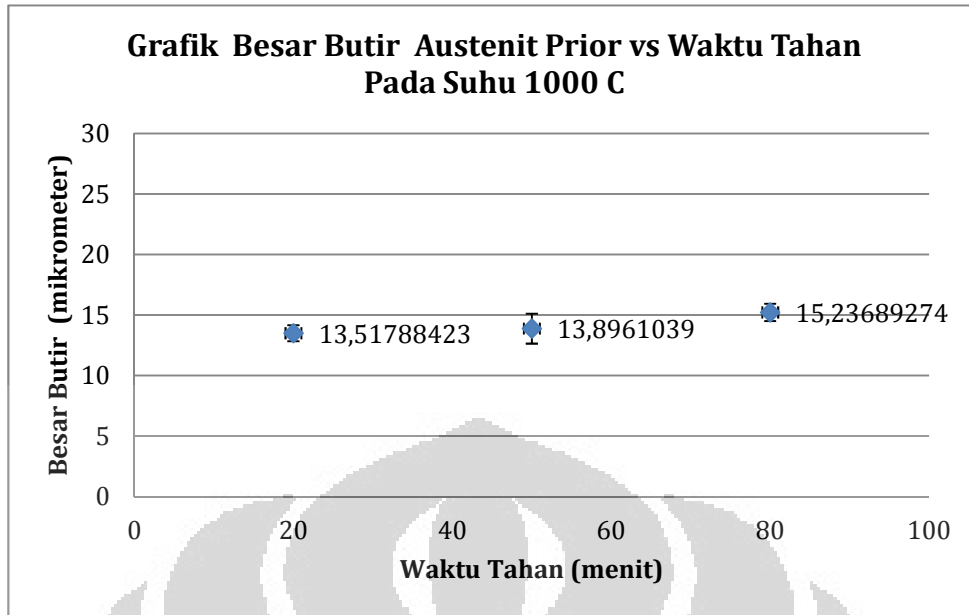
Element	Wt%	At%
CK	00.90	04.90
NK	01.11	05.18
FeL	29.63	34.75
AlK	00.09	00.21
NbL	56.77	40.01
TiK	06.24	08.54
CrK	02.08	02.62
MnK	03.18	03.79
Matrix	Correction	ZAF

Pada kondisi ini sebagian butir telah tumbuh membesar dan sebagian lagi belum tumbuh, butir yang besar juga cenderung akan menggantikan butir yang kecil. Kondisi ini terus berlanjut hingga presipitat-presipitat karbonitrida pada baja mencapai temperatur kelarutannya. Dari hasil perhitungan didapatkan nilai temperatur kelarutan (*solubility product*) untuk bahwa HSLA Nb 0,111% adalah sebesar 1398,6 °C. langkah detail perhitungan dapat dilihat pada lampiran 2.

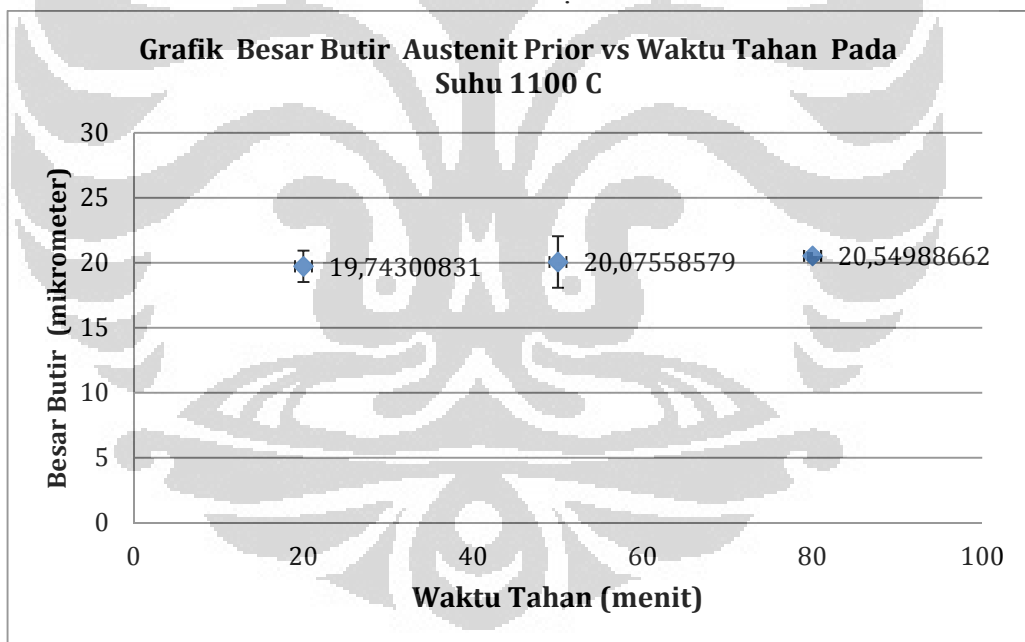
Pada suhu di bawah 1398,6°C endapan-endapan karbonitrida akan bersegregasi di batas butir austenit prior dan akan menimbulkan *solute dragging effect* sehingga akan menurunkan laju pertumbuhan butir^[14]. *Solute dragging effect* adalah efek penguatan yang ditimbulkan oleh perbedaan ukuran atom antara Fe dengan elemen paduan sehingga daerah batas butir menjadi sulit dilewati dislokasi^[14].

4.4 Hubungan Waktu Tahan dengan Besar Butir Austenit Prior

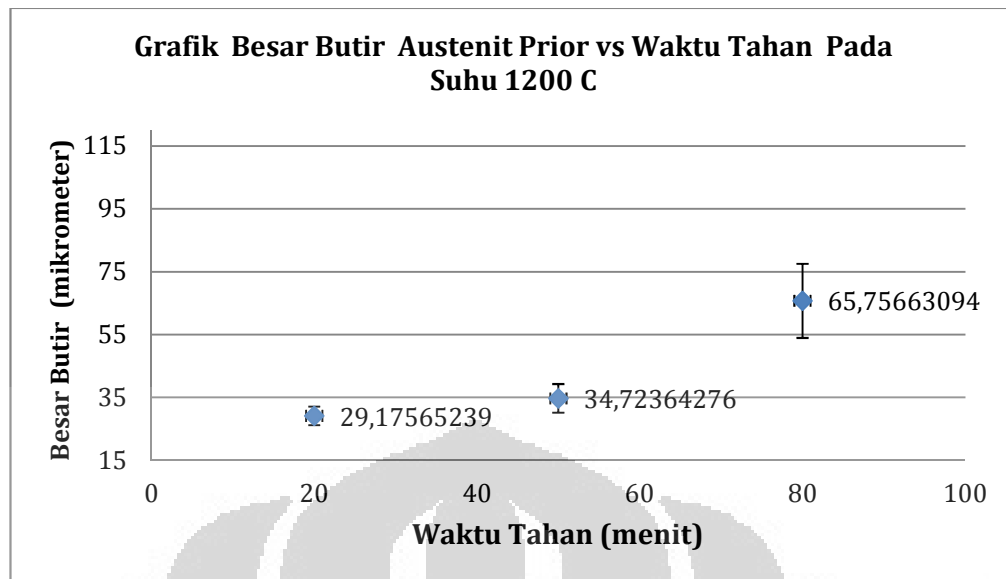
Waktu tahan adalah salah satu faktor yang dapat mempengaruhi pertumbuhan butir austenit. Besarnya waktu tahan menunjukkan seberapa lama material berada pada sebuah kondisi suhu tertentu dalam fasa austenitnya. Berikut ini adalah grafik yang menunjukkan hubungan antara waktu tahan dan besar butir austenit pada suhu pemanasan tertentu.



Gambar 4. 16 Grafik Pengaruh Waktu Tahan terhadap Besar Butir Austenit Prior pada Suhu 1000°C.

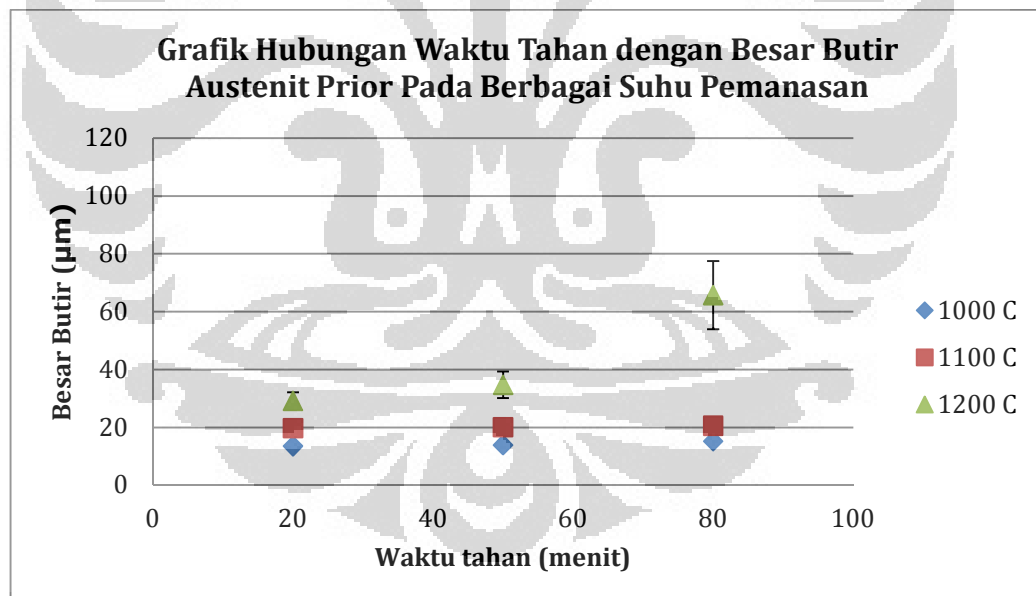


Gambar 4. 17 Grafik Pengaruh Waktu Tahan terhadap Besar Butir Austenit Prior Pada Suhu 1100°C



Gambar 4. 18 Grafik Pengaruh Waktu Tahan terhadap Besar Butir Austenit Prior pada Suhu 1200°C.

Untuk melihat perbandingan pengaruh waktu tahan terhadap besar butir austenit pada berbagai suhu pemanasan dapat dilihat pada grafik berikut.



Gambar 4. 19 Grafik Pengaruh Waktu Tahan terhadap Besar Butir Austenit Prior pada Berbagai Suhu Pemanasan

Waktu tahan adalah salah satu faktor yang berkontribusi terhadap peningkatan besar butir austenit prior. Pada penelitian ini ditemukan bahwa semakin lama waktu tahan yang diberikan, maka ukuran butir austenit prior yang terbentuk semakin besar. Hal itu sesuai dengan penelitian Chongxiang Yue, dkk.

[18]. Kita juga dapat melihat dari gambar 4.17 bahwa pada saat waktu tahan meningkat dari 20 menit sampai dengan 50 menit, tingkat kenaikan ukuran butir untuk setiap temperatur pemanasan mengalami peningkatan. Akan tetapi peningkatan kenaikan ukuran butir butir itu meningkat lebih tajam lagi pada saat waktu tahan akan mencapai 80 menit. Pada kenaikan waktu tahan dari 20 menit sampai dengan 50 menit tingkat kenaikan ukuran butir untuk setiap temperatur pemanasan adalah 2,7 % (1000°C), 1,6% (1100°C) dan 15,9% (1200°C). Sementara itu untuk kenaikan waktu tahan dari 50 menit sampai dengan 80 menit tingkat keikannya adalah 8,7 % (1000°C), 2,3 % (1100°C) dan 47,1% (1200°C). Secara umum dapat kita lihat bahwa tingkat kenaikan ukuran butir yang lebih tinggi terdapat pada saat kenaikan waktu tahan dari 50 menit sampai dengan 80 menit. Hal itu menunjukkan bahwa semakin lama material mengalami penahanan di suhu austenisasinya, maka akan semakin banyak kalor yang diterima sehingga mobilitas batas butirnya meningkat. Peningkatan mobilitas batas butir akan memudahkan terjadinya difusi antar butir sehingga terjadi penggabungan beberapa butir menjadi butir yang lebih besar. Pengaruh waktu tahan terhadap pertumbuhan butir austenit terlihat pada proses nukleasi austenit. Pada saat pertumbuhan austenit membutuhkan waktu untuk nukleus pertama terbentuk. Nukleus tersebut kemudian berkembang dengan kecepatan lebih besar sejalan dengan terbentuknya nukleus austenit yang lebih banyak lagi^[19]

4.5 Pengaruh Temperatur Pemanasan terhadap Penampakan Batas Butir Austenit Prior

Selain mempengaruhi besar butir austenit prior, temperatur pemanasan yang diaplikasikan pada saat proses *reheating* juga mempengaruhi penampakan dari butir austenit prior. Seperti yang sudah dikemukakan pada penelitian sebelumnya bahwa struktur butir yang dihasilkan dari proses pengetsaan baja HSLA bukan struktur butir benda uji, melainkan jejak batas butir austenit prior, dimana sebenarnya struktur austenit ini tidak terdapat dalam struktur mikro yang terbentuk setelah proses pendinginan. Struktur akhir yang terbentuk pada benda uji sendiri adalah martensit dengan sedikit ferrit, bukan butir austenit yang stabil dalam temperatur ruang^[16]. Hal itu dapat dilihat dengan membandingkan foto

struktur mikro yang dihasilkan pada ketiga suhu yang berbeda (bandingkan gambar 4.2—4.4 dengan gambar 4.8—4.10). Pada suhu 1000°C dan 1100 °C struktur mikro baja HSLA 0,111% Nb didominasi oleh ferrit dengan sedikit martensit, sehingga batas butir austenit prior menjadi sangat sulit muncul. Hal itu sesuai dengan prinsip dasar perlakuan panas baja, semakin tinggi temperatur pemanasan maka prosentase austenit yang dihasilkan semakin tinggi. Dengan demikian, saat didinginkan cepat akan didapat persentase martensit yang tinggi yang akan mengakibatkan batas butir austenit prior menjadi lebih mudah diamati^[17].

4.6 Permodelan Persamaan Pertumbuhan butir Austenit Pada kondisi

Isothermal

Pengaruh variabel proses perlakuan panas terhadap besar butir austenit prior dirumuskan oleh Sellar dkk^[20] Mengikuti rumus sebagai berikut:

$$d^n - d_0^n = [A \cdot \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right)]t \quad (4.4)$$

di mana n dan A adalah konstanta tergantung pada komposisi material dan kondisi proses. Q adalah energi aktivasi pertumbuhan butir, R adalah konstanta gas, T adalah temperatur dalam derajat absolute dan t adalah waktu tahan. Dari persamaan yang dirumuskan Sellar diatas dapat kita simpulkan bahwa diameter butir austenit prior adalah gabungan fungsi dari fungsi temperatur dan fungsi waktu tahan.

$$d = f(T) \cdot f(t) \quad (4.5)$$

menurut Sellars dkk^[20] pertumbuhan butir adalah sebuah fungsi eksponensial sehingga kita dapat menjabarkan fungsi diatas menjadi :

$$d = aT^b \cdot kt^m \quad (4.6)$$

berikut ini adalah penurunan dari setiap fungsi yang mempengaruhi pertumbuhan butir austenit.

- **Fungsi waktu f(T)**

$$f(T) = d = a(T)^b$$

$$\ln d = \ln a + b \ln T$$

$$\ln d = b \ln T + \ln a \quad (4.7)$$

Jika persamaan diatas kita analogikan dengan persamaan garis lurus $y = mx + c$ maka:

$$Y = \ln d$$

$$m = b$$

$$x = \ln T$$

$$c = \ln a$$

- **Fungsi Waktu tahan $f(t)$**

$$F(t) = d = kt^m$$

$$\ln d = \ln k + m \ln t$$

$$\ln d = m \ln t + \ln k \quad (4.8)$$

Jika persamaan diatas kita analogikan dengan persamaan garis lurus $y = mx + c$ maka:

$$Y = \ln d$$

$$M=m$$

$$X= \ln t$$

$$C= \ln k$$

Sehingga akan didapat sebuah persamaan gabungan dari kedua fungsi di atas menjadi:

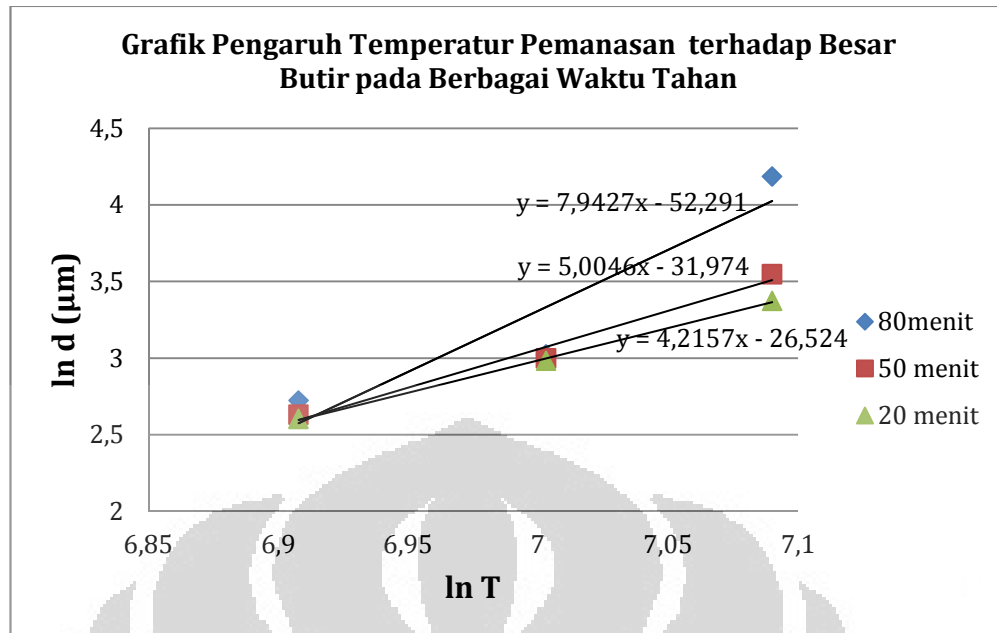
$$d = a T^b \times kt^m$$

$$\ln d = b \ln T + \ln a + m \ln t + \ln k \quad (4.9)$$

Persamaan inilah yang akan menjadi persamaan permodelan dalam menentukan besar butir austenit prior sebagai akibat dari pengaruh suhu pemanasan dan waktu tahan.

4.6.1 Pengaruh Temperatur Pemanasan terhadap besar butir austenit Prior

Persamaan yang didapatkan pada persamaan 4.7 adalah persamaan linear dengan sumbu-x $\ln T$ dan sumbu-y $\ln d$. Oleh karena itu perlu dibuat grafik baru dari data hasil penelitian dengan sumbu-x dan sumbu-y yang sesuai. Grafik tersebut adalah seperti yang terlihat pada gambar 4.20 dibawah ini.



Gambar 4. 20 Hubungan Suhu terhadap besar butir pada berbagai waktu tahan Berikut ini adalah penurunan rumus yang diperoleh pada grafik dengan mengambil pendekatan pada persamaan 4.7. Dari hasil pendekatan akan diperoleh nilai dari setiap konstanta.

- **Pada Waktu Tahan 20 Menit**

Dari hasil pengolahan grafik pada program microsoft excel didapat persamaan garis lurus sebagai berikut:

$$Y = 4,2157x - 26,524$$

Persamaan untuk pengaruh suhu austenisasi adalah: $\ln d = b \ln T + \ln a$ sehingga $b = 4,2157$ dan $\ln a = -26,524 \rightarrow a = 3,025 \times 10^{-12}$

- **Pada Waktu Tahan 50 Menit**

Dari hasil pengolahan grafik pada program microsoft excel didapat persamaan garis lurus sebagai berikut:

$$y = 5,0046x - 31,974$$

Persamaan untuk pengaruh suhu austenisasi adalah: $\ln d = b \ln T + \ln a$ sehingga $b = 5,0046$ dan $\ln a = -31,974 \rightarrow a = 1,3 \times 10^{-14}$

- **Pada Waktu Tahan 80 Menit**

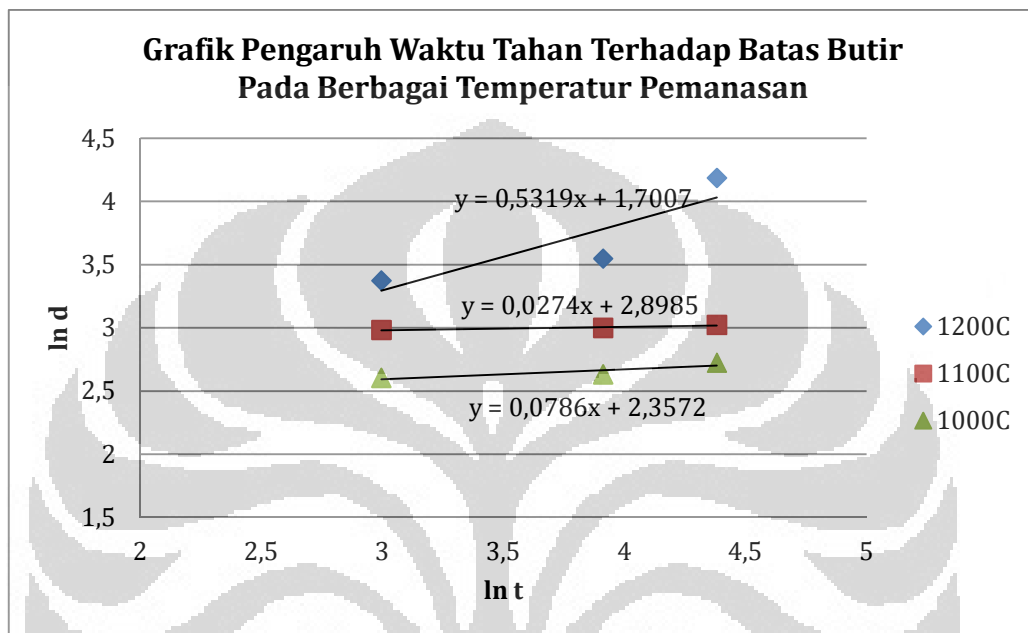
Dari hasil pengolahan grafik pada program microsoft excel didapat persamaan garis lurus sebagai berikut:

$$y = 7,9427x - 52,291$$

Persamaan untuk pengaruh suhu austenisasi adalah: $\ln d = b \ln T + \ln a$ sehingga $b_3 = 7,9427$ dan $\ln a = -52,291 \rightarrow a_3 = 1,95 \times 10^{-23}$

4.6.2 Pengaruh Waktu Tahan Terhadap Besar Butir Austenit Prior

Berikut ini adalah grafik yang diperoleh dari hasil eksperimen yang menunjukkan hubungan antara waktu tahan dengan besar butir.



Gambar 4. 21 Hubungan Waktu Tahan Terhadap Besar Butir Pada Berbagai Suhu Pemanasan

- **Pada suhu 1000°C**

Dari hasil pengolahan grafik pada program microsoft excel didapat persamaan garis lurus sebagai berikut:

$$y = 0,0786x + 2,3572$$

persamaan untuk pengaruh waktu tahan adalah : $\ln d = m \ln t + \ln k$

bisa kita dapatkan bahwa $m_1 = 0,0786$

$$\ln k_1 = 2,375 \rightarrow k_1 = 10,751$$

- **Pada suhu 1100°C**

Dari hasil pengolahan grafik pada program microsoft excel didapat persamaan garis lurus sebagai berikut:

$$y = 0,0274x + 2,8985$$

persamaan untuk pengaruh waktu tahan adalah : $\ln d = m \ln t + \ln k$

sehingga didapat nilai $m_2 = 0,0274$ dan $k_2 = 18,146$

- **Pada suhu 1200°C**

Dari hasil pengolahan grafik pada program microsoft excel didapat persamaan garis lurus sebagai berikut:

$$y = 0,5319x + 1,7007$$

persamaan untuk pengaruh aktu tahan adalah : $\ln d = m \ln t + \ln k$

sehingga didapat nilai $m = 0,5319$ dan $k = 5,477$.

Konstanta dari semua persamaan diatas kemudian dirangkum pada tabel berikut ini:

Tabel 4. 3 Berbagai Nilai Konstanta Yang Dihasilkan Dari Grafik

No	a	b	m	k
1	3,02E-12	4,2157	0,0786	10,75
2	1,30E-14	5,0046	0,0274	18,146
3	1,95E-23	7,9427	0,5319	5,477

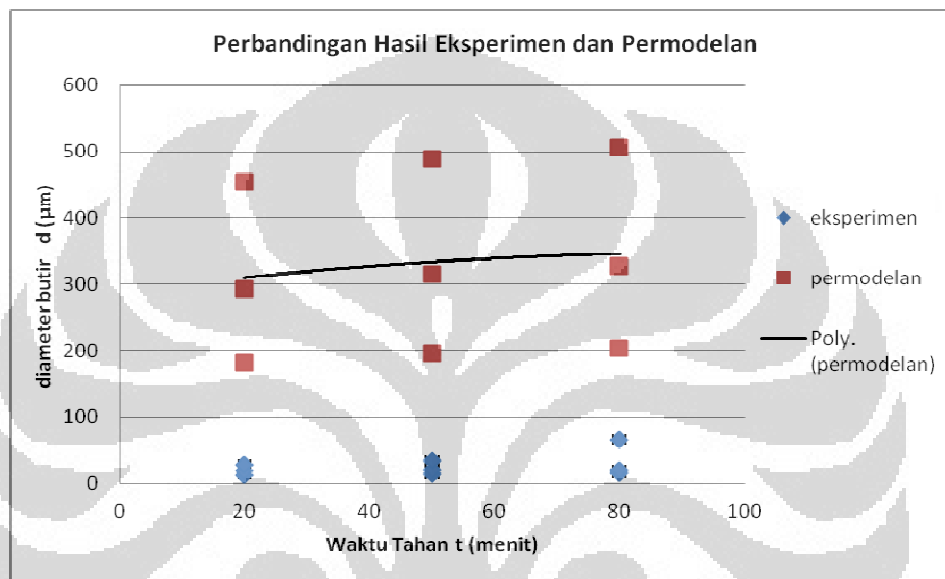
Dari konstanta diatas kemudian dimasukan kedalam persamaan besar butir $\ln d = b \ln T + \ln a + m \ln t + \ln k$. Akan tetapi jumlah dari setiap konstanta adalah tiga sehingga harus dicari kombinasi yang mana yang akan memunculkan nilai besar butir hasil permodelan yang paling mendekati nilai eksperimen.

Tabel 4. 4 Berbagai Kombinasi Konstanta Yang Dihasilkan Pada Percobaan

Kombinasi ke	a	b	m	k
1	3,02E-12	4,2157	0,0786	10,75
2	3,02E-12	4,2157	0,0274	18,146
3	3,02E-12	4,2157	0,5319	5,477
4	1,30E-14	5,0046	0,0786	10,75
5	1,30E-14	5,0046	0,0274	18,146
6	1,30E-14	5,0046	0,5319	5,477
7	1,95E-23	7,9427	0,0786	10,75
8	1,95E-23	7,9427	0,0274	18,146
9	1,95E-23	7,9427	0,5319	5,477

Dari setiap kombinasi dilakukan perhitungan besar butir (d) sesuai dengan rumus permodelan yang sudah didapat. Setelah dilakukan perhitungan kemudian dipilih satu kombinasi yang paling mendekati nilai besar butir hasil eksperimen

dan didapatkan bahwa kombinasi 4 adalah kombinasi yang paling mendekati. Hasil perhitungan besar butir pada semua kombinasi termasuk juga kombinasi 4 menghasilkan nilai yang sangat besar perbedaannya dengan nilai eksperimen sehingga harus dimasukan sebuah konstanta baru. Berikut ini adalah grafik dan hasil perhitungan besar butir untuk kombinasi 4 sedangkan untuk kombinasi lain dapat dilihat pada lampiran 5.



Gambar 4. 22 Perbandingan Hasil Eksperimen Dan Permodelan Sebelum Dilakukan Penyesuaian

Tabel 4. 5 Hasil Perhitungan Besar Butir Pada Kombinasi Konstanta Ke-4 Sebelum Penyesuaian

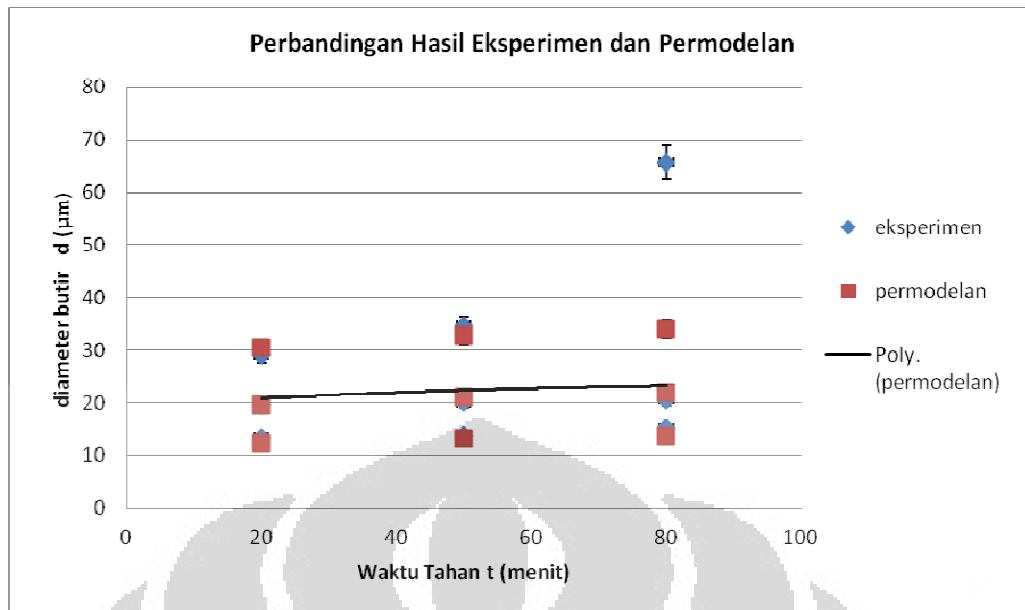
ln d = b ln T + ln a + m lnt + ln k								
	T	t	a	b	m	k	ln d	d
Persamaan dari ke 4	1000	20	1,30E-14	5,0046	0,0786	10,75	5,2071	182,563
	1000	50	1,3E-14	5,0046	0,0786	10,75	5,27912	196,19632
	1000	80	1,3E-14	5,0046	0,0786	10,75	5,31606	203,5798
	1100	20	1,3E-14	5,0046	0,0786	10,75	5,68408	294,14848
	1100	50	1,3E-14	5,0046	0,0786	10,75	5,75611	316,1147
	1100	80	1,3E-14	5,0046	0,0786	10,75	5,79305	328,01109
	1200	20	1,3E-14	5,0046	0,0786	10,75	6,11954	454,65633
	1200	50	1,3E-14	5,0046	0,0786	10,75	6,19156	488,60884
	1200	80	1,3E-14	5,0046	0,0786	10,75	6,2285	506,99672

Proses penyesuaian dilakukan dengan bantuan program Microsoft excel, yakni dengan cara *fitting* (mendekatkan) grafik permodelan terhadap data-data hasil eksperimen. *Fitting* grafik dilakukan dengan menambahkan sejumlah angka pada persamaan awal. Setelah dilakukan percobaan dengan penambahan berbagai angka akhirnya didapatlah grafik yang paling mendekati data hasil eksperimen yakni setelah penambahan konstanta senilai - 2,7. Setelah penyesuaian tersebut maka perhitungan berubah menjadi sebagai berikut:

Tabel 4. 6 Hasil Perhitungan Besar Butir Pada Kombinasi Konstanta Ke-4 Setelah Penyesuaian

$\ln d = b \ln T + \ln a + m \ln t + \ln k - 2,7$								
	T	t	a	b	m	k	$\ln d$	d
Persamaan ke 4	1000	20	1,30E-14	5,0046	0,0786	10,75	2,5071	12,26924
	1000	50	1,3E-14	5,0046	0,0786	10,75	2,57912	13,185474
	1000	80	1,3E-14	5,0046	0,0786	10,75	2,61606	13,681685
	1100	20	1,3E-14	5,0046	0,0786	10,75	2,98408	19,768399
	1100	50	1,3E-14	5,0046	0,0786	10,75	3,05611	21,24465
	1100	80	1,3E-14	5,0046	0,0786	10,75	3,09305	22,044153
	1200	20	1,3E-14	5,0046	0,0786	10,75	3,41954	30,555412
	1200	50	1,3E-14	5,0046	0,0786	10,75	3,49156	32,837208
	1200	80	1,3E-14	5,0046	0,0786	10,75	3,5285	34,072975

Pada grafik permodelan baru setelah penambahan konstanta terlihat bahwa titik titik data pada permodelan berhimpit dengan data hasil eksperimen yang menandakan bahwa formulasi tersebut sudah mendekati nilai eksperimen. Akan tetapi tidak semua titik hasil eksperimen berada pada deviasi yang ditetapkan yakni 5 %, ada sebuah data yang nilainya sangat jauh dari grafik permodelan. Namun hal ini masih dalam batas toleransi karena semua titik lain berada sangat dekat dengan grafik permodelan. Berikut adalah grafik hasil permodelan setelah dilakukan penambahan konstanta



Gambar 4. 23 Perbandingan Grafik Hasil Eksperimen dan Permodelan Setelah Dilakukan Penyesuaian

Dari hasil permodelan diatas didapat bahwa persamaan permodelan besar butir yang paling mendekati nilai eksperimen adalah

$$\ln d = 5,0046 \ln T + \ln 1,30 \times 10^{-14} + 0,0786 \ln t + \ln 10,75 - 2,7$$

$$\ln d = (5,0046 \ln T - 31,974) + (0,0786 \ln t + 2,374) - 2,7$$

$$\ln d = \frac{(T^{5,0046} \times 1,3 \cdot 10^{-14} \times t^{0,0786} \times 10,75)}{14,87}$$

$$d = \frac{1,3 \cdot 10^{-14} \times 10,75}{14,87} T^{5,0046} t^{0,0786}$$

$$d = 9,398 \times 10^{-15} T^{5,0046} t^{0,0786}$$

keterangan :

d = diameter butir austenit prior (μm)

T = temperatur pemanasan ($^{\circ}\text{C}$)

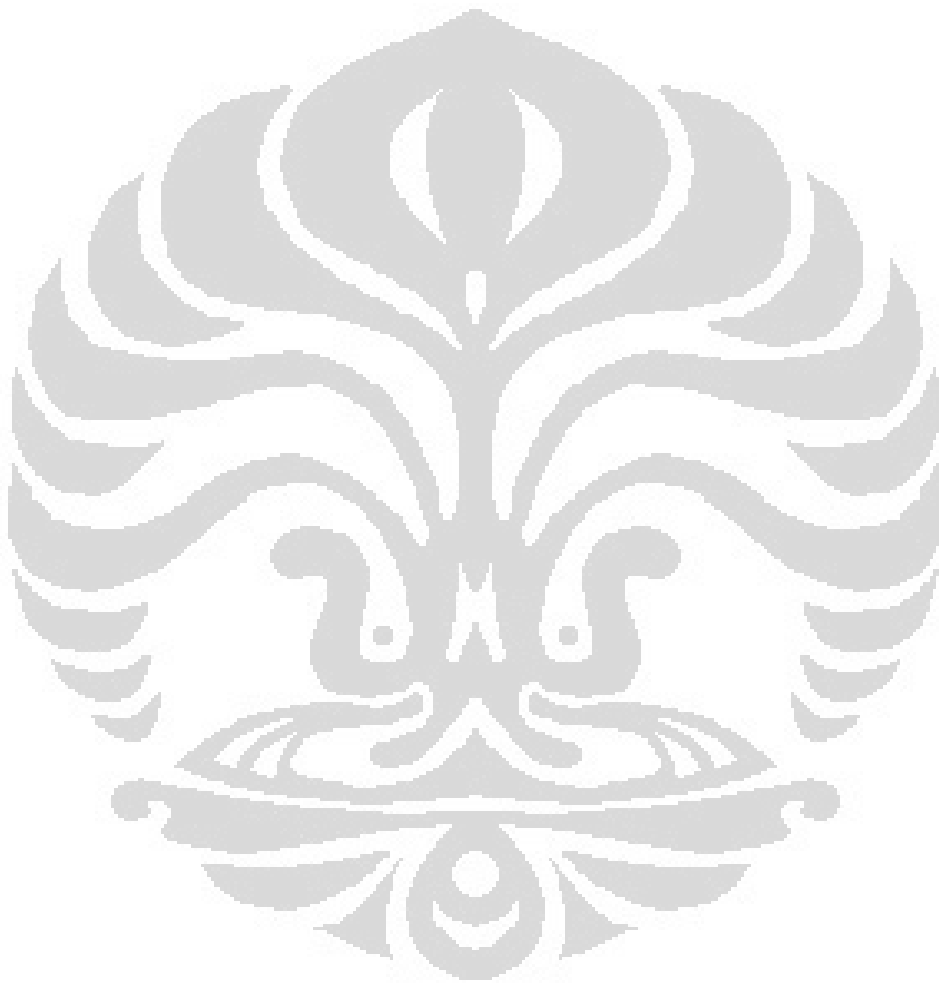
t = waktu tahan (menit)

BAB 5

KESIMPULAN

1. Besar butir austenit prior baja HSLA 0,111% Nb setelah proses *reheating* meningkat seiring dengan naiknya temperatur pemanasan. Hal ini ditandai dengan membesarnya tingkat kenaikan ukuran butir austenit. Pada temperatur 1000°C-1100°C tingkat kenaikan ukuran butir untuk setiap waktu tahan adalah 31,5% (20 menit), 30,7 % (50 menit), dan 25,8% (80 menit). Sementara itu tingkat kenaikan ukuran butir pada 1100°C-1200°C adalah 32,3%(20 menit), 42,2%(50 menit) dan 68,7%(80 menit). Hal ini disebabkan karena pada temperatur pemanasan 1000°C dan 1100°C belum banyak endapan NbCN yang terlarut sementara pada temperatur pemanasan 1200°C endapan NbCN yang terlarut semakin banyak sehingga kemampuannya untuk menghalangi pergerakan batas butir menjadi berkurang.
2. Besar butir austenit prior baja HSLA 0,111% Nb setelah proses *reheating* akan semakin meningkat seiring dengan semakin lamanya waktu tahan. Hal ini ditandai dengan membesarnya tingkat kenaikan ukuran butir akibat semakin meningkatnya waktu tahan. Pada kenaikan waktu tahan dari 20 menit - 50 menit tingkat kenaikan ukuran butir untuk setiap temperatur pemanasan adalah 2,7 % (1000°C), 1,6% (1100°C) dan 15,9% (1200°C). Sementara itu untuk kenaikan waktu tahan dari 50 menit - 80 menit tingkat kenaikan ukuran butirnya adalah 8,7 % (1000°C), 2,3 % (1100°C) dan 47,1% (1200°C). Hal ini disebabkan dengan semakin lamanya waktu tahan maka akan semakin banyak kalor yang diterima material sehingga akan semakin meningkatkan mobilitas batas butir.
3. Dari hasil pengolahan data eksperimen didapat sebuah persamaan empiris untuk memprediksi besar butir austenit prior pada baja HSLA 0,111% Nb dengan variabel temperatur dan waktu tahan. Persamaan empiris kinetika

pertumbuhan butir untuk baja HSLA 0,111% Nb yang paling mendekati data hasil eksperimen adalah $d = 9,398 \times 10^{-15} T^{5,0046} t^{0,0786}$



DAFTAR REFERENSI

1. ASM Handbook Volume 01. *Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys*, 2006. 262—264
2. Ariati, Myrna. “Kinetika Pertumbuhan Butir Austenite Pada Kondisi Pendinginan Kontinu Pada Baja HSLA-Nb Selama Canai Panas”. Disertasi tidak diterbitkan. 2010. 17—22
3. Krauss, George. *Steels: Heat Treatment and Processing Principles*. Ohio: ASM International, 1990.
4. M.Militzer, A.Giumelli, E.Bruce Hawbolt, and T.R. Meadowcroft. “*Metall and mater Trans, 27A*”. (1996), pg3399
5. Alpalmy, Nandyo. Analisa Ukuran Butir Ferrit dan Laju Korosi Baja HSLA 0,029 Nb Setelah Canai Panas. Skripsi tidak diterbitkan. 2008.
6. C.M Sellars (1982), “Static Recrystallization And Precipitation During Hot Rolling Of Microalloyed Steel”, *Mat Science Seminar*, Sheffield, England.
7. Sulistyio, Tri Wahyu. “Permodelan Kinetika Pertumbuhan Butir Baja HSLA 0,019 %Nb Pada Kondisi Non-Isotermal Setelah Proses Canai Panas.”. Skripsi tidak diterbitkan. 2009. 46—47
8. R.E Smallman, R.J Bishop, *Metals and Material*. UK : Butterworth – Heinemann, 1995.
9. Lawrence H. Van Vlack, *Elements of Materials Science*, London: Addison Wesley Publishing Company, Inc, 1960.
10. William C Leslie, *The Physical Metallurgy of Steel*, Michigan : McGraw Hill Company, 1982.
11. Callister, William D., Jr. *Materials Science and Engineering: An Introduction (7th ed.)*. New York : John Wiley & Sons, Inc. 2007. 188—189
12. D.C. Houghton, *Jf Metall Matter*, 141, 10,(1993),
13. Parihanti, Nira. “Pengaruh Temperatur terhadap Pertumbuhan Butir Austenit Prior pada Baja HSLA 0.029%Nb *as cast* Selama Pemanasan *Isothermal*.” Skripsi tidak diterbitkan. 2001.

14. Seok-Jae Lee, Young Kook Lee, Prediction of Austenite Grain Growth During Austenitization of Low Alloy Steel. *Material and Design* 29 (2008). 1840—1844 .
15. Duan Lin-na, Wang Ji-man, et al. Austenite Grain Growth of X80 Pipeline Steel in Heating Process. *Journal of Iron and Steel Research, international* (2010), 17(3):62—66
16. Puspawartiningdyah, Meilana. Pengaruh waktu tahan terhadap besar butir austenit prior pada baja hsla 0,037% Nb hasil coran kontinyu selama pemanasan isothermal. Skripsi tidak diterbitkan. 2006/2007. 36—38
17. Chris North, “*Etching to reveal boundaries*”, Expert Metalllography Forum, Diakses 11 Februari 2007 .
18. Chongxiang Yue, Liwen Zhang, Shulun Liao et al. Kinetic Analysis of the austenite grain growth in GCr15 Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance* .(2009).
19. Lakhtin.Y, *The iron Carbon-Carbon Equilibrium Diagram, Steels and Its Heat Treatment*, Moscow Publisher, 1997.
20. C. M. Sellars and J. A. Whiteman: *Metal Sci. J.*, 13 (1979), 187.



UNIVERSITAS INDONESIA

**MODEL EMPIRIS KINETIKA PERTUMBUHAN BUTIR BAJA
HSLA 0,111 %Nb PADA PEMANASAN *ISOTHERMAL*
DENGAN VARIABEL TEMPERATUR PEMANASAN DAN
WAKTU TAHAN**

SKRIPSI

MUHAMAD MUKHSIN

0806455805

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL

DEPOK

JULI 2012

LAMPIRAN 1

Perhitungan Temperatur Kelarutan (*solubility product*) dan Temperatur Pengkasaran Presipitat NbCN pada baja HSLA 0,111% Nb

Komposisi kimia dari baja HSLA 0,111% Nb yang digunakan pada penelitian ini adalah:

C	Ti	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Nb	V	Ni	Cr	N
0.127	0.0028	0.189	0.233	0.032	0.0089	0.077	0.023	0.111	0.0012	0.019	0.134	0.031

Rumus temperatur Kelarutan:

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

$$\begin{aligned} \text{Log}(0,111)(0,127 + 12/14(0,013)) &= 2,26 - 6770/T \\ \text{Log}(0,111)(0,127 + 0,0265) &= 2,26 - 6770/T \\ \text{Log} 0,017 &= 2,26 - 6770/T \\ T = 1671,6 \text{ K} = 1671,6 - 273 \text{ C} &= 1398,6 \text{ C} \end{aligned}$$

Perhitungan Temperatur Pengkasaran Butir

$$T_{gc} = A + B (T_s - 273)$$

dimana T_{gc} temperatur pengkasaran butir ($^{\circ}\text{C}$), T_s temperatur kelarutan presipitat (K)

Dari Literatur didapatkan nilai konstanta A dan B adalah sebagai berikut:

Tabel Konstanta Pengkasaran Butir

Presipitat	Konstanta Pengkasaran Butir	
	A	B
AlN	385	0,535
VN	616	0,376
TiN	-279	0,899
NbCN	460	0,569

$$T_{gc} = 460 + 0,569 (1671,6 - 273)$$

$$T_{gc} = 460 + 795,8$$

$$T_{gc} = 1255,8 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

LAMPIRAN 2

Perhitungan Besar Butir Austenit Prior

Berikut ini adalah foto struktur mikro dari sampel yang telah dihitung besar butirnya. Metode penghitungan besar butir menggunakan metode perbandingan seperti yang sudah dijelaskan pada sub bab 3.3.5. Dari hasil penelitian sebelumnya didapatkan perbandingan antara foto mikro dan mistar adalah sebagai berikut^[7]:

- Pada foto standar perbesaran 50X, 10 sentimeter pada mistar ternyata adalah $10000/7 \mu\text{m}$ pada foto
- pada foto standar perbesaran 100X, 10 sentimeter pada mistar ternyata adalah $10000/14 \mu\text{m}$ pada foto.
- Pada foto standar perbesaran 200x, 10 sentimeter pada mistar ternyata adalah $10000/28$
- Pada foto standar perbesaran 500x, 10 sentimeter pada mistar ternyata adalah $10000/70$

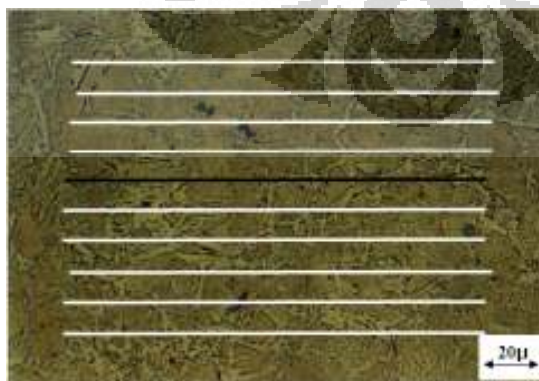
Rumus perhitungan besar butir adalah :

$$d = 10000/\text{bilangan perbesaran}/\text{jumlah butir pada garis}$$

Sebagai Contoh sebuah garis sepanjang 10 cm yang berisi 9 butir pada foto dengan perbesaran 500x, besar butirnya adalah $10000/70/9$ yaitu $15,87 \mu\text{m}$.

Berikut ini adalah fotomikro dan tabel penghitungan besar butir untuk setiap kondisi pemanasan.

- **Kondisi Pemanasan Suhu 1000°C waktu tahan 20 menit**



A11 500x



A12 500x



A13 500x

Tabel Perhitungan Besar Butir untuk Sampel A11-A13

A11 500x/ Garis Ke	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
jumlah Butir	8	10	10	9	11	11	11	10	10	12
Ukuran butir	17,857143	14,28571	14,29	15,9	13	13	13	14	14	11,9
ukuran Rata2	14,17388167									

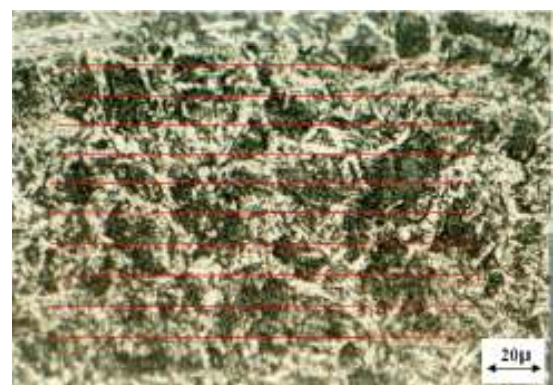
A12 500x/ Garis Ke	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
jumlah Butir	12	13	11	14	9	12	8	12	11	12
Ukuran butir	11,904762	10,989	12,99	10,2	16	12	18	12	13	11,9
ukuran Rata2	12,85163249									

A13 500x/ Garis Ke	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
jumlah Butir	11	11	10	10	12	11	11	10	10	10
Ukuran butir	12,9870	12,98701	14,29	14,3	12	13	13	14	14	14,3
ukuran Rata2	13,52813853									

• **Kondisi Pemanasan Suhu 1000°C waktu tahan 50 menit**



A21 500x



A22 500x



A23 500x

Tabel Perhitungan Besar Butir untuk Sampel A21-A23

A21 500x / Garis Ke	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
jumlah Butir	11	10	11	9	11	9	12	9	8	9
Ukuran butir	12,98	14,285714	12,987	15,87	13	15,9	11,9	16	18	15,87
ukuran Rata2	14,65007215									

A22 500x/ Garis Ke	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
jumlah Butir	10	11	8	11	10	10	10	9	11	9
Ukuran butir	14,28571429	12,987013	17,857	12,99	14,3	14,3	14,3	16	13	15,87
ukuran Rata2	14,57070707									

A23 500x/ Garis Ke	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
jumlah Butir	12	12	12	11	12	11	12	12	11	10
Ukuran butir	11,9047619	11,904762	11,905	12,99	11,9	13	11,9	12	13	14,29
ukuran Rata2	12,46753247									

- **Kondisi Pemanasan Suhu 1000°C waktu tahan 80 menit**



A31 500x



A32 500x



A33 500x

Tabel Perhitungan Besar Butir untuk Sampel A31-A33

Garis Ke A31 500x	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
jumlah Butir	10	11	11	9	10	9	10	9	8	10
Ukuran butir	14,28571429	12,987013	12,987	15,87	14,3	15,9	14,3	16	18	14,29
ukuran Rata2	14,85930736									

Garis Ke A33 500x	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
jumlah Butir	9	11	9	10	8	10	9	8	8	8
Ukuran butir	15,87301587	12,987013	15,873	14,29	17,9	14,3	15,9	18	18	17,86
ukuran Rata2	16,06060606									

Garis Ke A33 500x	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
jumlah Butir	10	10	10	10	9	10	11	9	9	9
Ukuran butir	14,28571429	14,285714	14,286	14,29	15,9	14,3	13	16	16	15,87
ukuran Rata2	14,79076479									

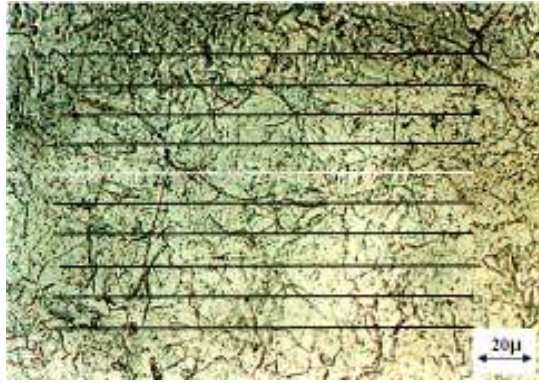
- **Kondisi Pemanasan Suhu 1100°C waktu tahan 20 menit**



B11 500x



B12 500x



B13 500x

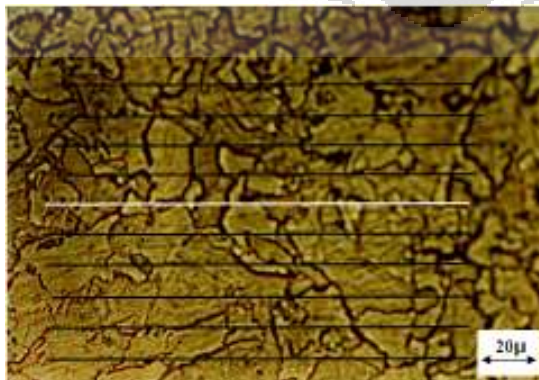
Tabel Perhitungan Besar Butir untuk Sampel B11-B13

B11 500x/ Garis Ke	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
jumlah Butir	9	7	5	7	7	7	8	8	7	7
Ukuran butir	15,87301587	20,408163	28,571	20,41	20,4	20,4	17,9	18	20	20,41
ukuran Rata2	20,26077098									

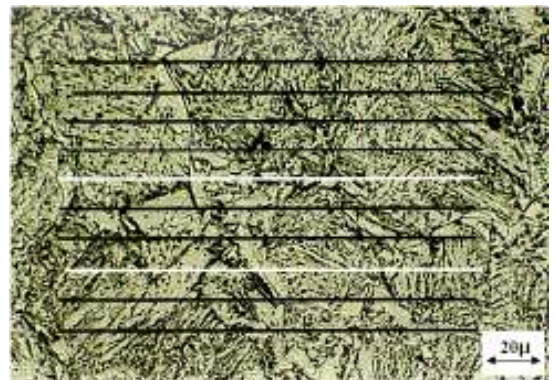
B12 500x / Garis Ke	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
jumlah Butir	8	7	7	7	7	5	6	7	9	8
Ukuran butir	17,85714286	20,408163	20,408	20,41	20,4	28,6	23,8	20	16	17,86
ukuran Rata2	20,60090703									

B13 500x/ Garis Ke	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
jumlah Butir	8	8	8	7	8	8	7	8	8	8
Ukuran butir	17,85714286	17,857143	17,857	20,41	17,9	17,9	20,4	18	18	17,86
ukuran Rata2	18,36734694									

- **Kondisi Pemanasan Suhu 1100°C waktu tahan 50 menit**



B21 500x



B22 500x



B23 500x

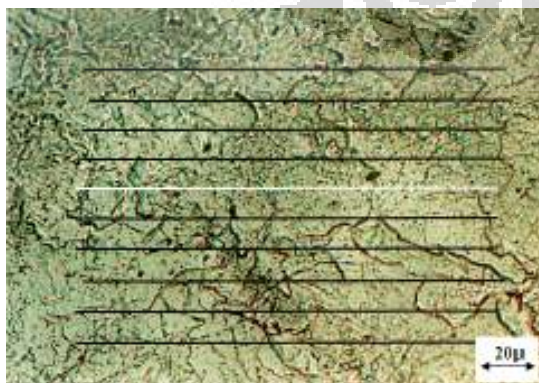
Tabel Perhitungan Besar Butir untuk Sampel B21-B23

Garis Ke B21 500x	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
jumlah Butir	8	8	7	8	8	8	7	7	8	8
Ukuran butir	17,857142	17,8571	20,40	17,86	17,9	17,9	20,4	20	18	17,86
ukuran Rata2	18,62244898									

Garis Ke B22 500x	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
jumlah Butir	5	6	8	7	6	7	7	7	6	6
Ukuran butir	28,57142857	23,809524	17,857	20,41	23,8	20,4	20,4	20	24	23,81
ukuran Rata2	22,32993197									

Garis Ke B23 500x	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
jumlah Butir	9	7	8	6	7	8	7	8	7	8
Ukuran butir	15,87301587	20,408163	17,857	23,81	20,4	17,9	20,4	18	20	17,86
ukuran Rata2	19,27437642									

- **Kondisi Pemanasan Suhu 1100°C waktu tahan 80 menit**



B31 500x



B32 500x



B33 500x

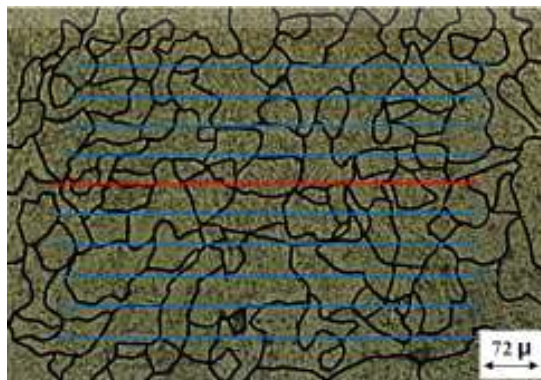
Tabel Perhitungan Besar Butir untuk Sampel B31-B33

B31 500x/ Garis Ke	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
jumlah Butir	6	7	8	7	7	6	8	6	8	7
Ukuran butir	23,80952	20,4081	17,857	20,41	20,4	23,8	17,9	24	18	20,41
ukuran Rata2	20,66326531									

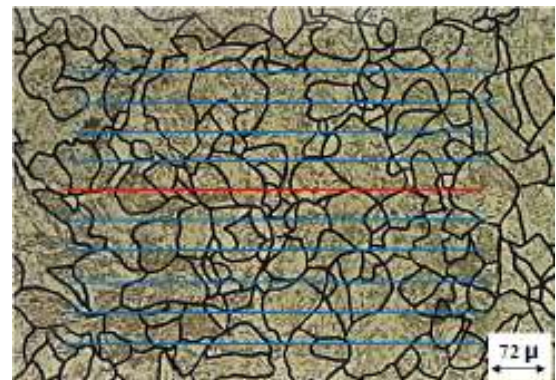
B32 500x/ Garis Ke	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
jumlah Butir	7	7	8	7	7	8	7	6	7	7
Ukuran butir	20,40816327	20,408163	17,857	20,41	20,4	17,9	20,4	24	20	20,41
ukuran Rata2	20,23809524									

B31 500x / Garis Ke	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
jumlah Butir	8	8	7	6	6	7	6	6	8	8
Ukuran butir	17,8	17,8	20,408	23,8	23,8	20,4	24	24	18	17,86
ukuran Rata2	20,74829932									

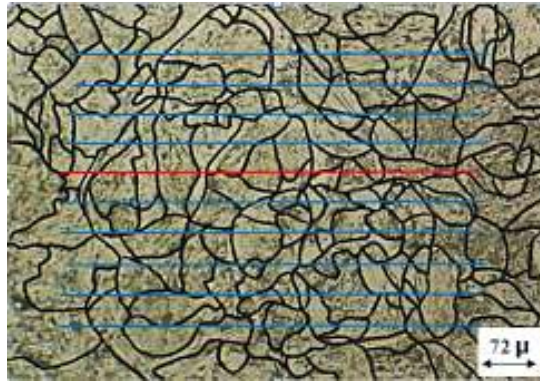
- **Kondisi Pemanasan Suhu 1200°C waktu tahan 20 menit**



C11 200x



C12 200x



C13 200x

Tabel Perhitungan Besar Butir untuk Sampel C11-C13

C11 200x / Garis Ke	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
jumlah Butir	11	12	13	10	12	12	11	9	10	11
Ukuran butir	32,467532	29,7619	27,47	35,7	30	30	32	40	36	32,5
ukuran Rata2	32,52719503									

C12 200x / Garis Ke	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
jumlah Butir	10	15	12	14	14	14	15	15	12	14
Ukuran butir	35,714286	23,80952	29,76	25,5	26	26	24	24	30	25,5
ukuran Rata2	26,8707483									

C13 200x / Garis Ke	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
jumlah Butir	13	14	12	12	13	15	12	14	12	11
Ukuran butir	27,472527	25,5102	29,76	29,8	27	24	30	26	30	32,5
ukuran Rata2	28,12901384									

- **Kondisi Pemanasan Suhu 1200°C waktu tahan 50 menit**



C21 200x



C22 200x



C23 200x

Tabel Perhitungan Besar Butir untuk Sampel C21-C23

Garis Ke C21 200x	1	2	3	4	5	7	8	9	10
jumlah Butir	10	9	9	8	8	8	9	9	10
Ukuran butir	35,714286	39,68254	39,68	44,6	45	45	40	40	36
ukuran Rata2	39,98015873								

Garis Ke C22 200x	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
jumlah Butir	11	12	12	12	12	12	10	9	11	10
Ukuran butir	32,467532	29,7619	29,76	29,8	30	30	36	40	32	35,7
ukuran Rata2	32,48556999									

Garis Ke C23 200x	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
jumlah Butir	12	10	12	11	10	11	14	11	13	10
Ukuran butir	29,761905	35,71429	29,76	32,5	36	32	26	32	27	35,7
ukuran Rata2	31,70519956									

- **Kondisi Pemanasan Suhu 1200°C waktu tahan 80 menit**



C31 100x



C32 200x



C33 200x

Tabel Perhitungan Besar Butir untuk Sampel C31-C33

C31 100x / Garis Ke	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
jumlah Butir	10	9	10	8	8	7	8	11	10	11
Ukuran butir	71,428571	79,36508	71,43	89,3	89	102	89	65	71	64,9
ukuran Rata2	79,34188827									

C32 200x / Garis Ke	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
jumlah Butir	5	6	5	4	6	6	9	7	8	7
Ukuran butir	71,428571	59,52381	71,43	89,3	60	60	40	51	45	51
ukuran Rata2	59,70804989									

C33 200x / Garis Ke	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
jumlah Butir	6	6	5	6	5	6	9	6	7	7
Ukuran butir	59,52381	59,52381	71,43	59,5	71	60	40	60	51	51
ukuran Rata2	58,21995465									

LAMPIRAN 3

Perhitungan Standar Deviasi

Sesuai dengan pembahasan pada sub bab 4.2 ukuran butir yang didapat untuk setiap waktu tahan adalah ukuran butir rata-rata dari beberapa ukuran butir. Untuk mengetahui tingkat penyimpangan dari data yang didapat maka dilakukan perhitungan Standar deviasi sesuai dengan rumus 4.2

Berikut ini adalah contoh perhitungan standar deviasi untuk semua data hasil percobaan.

Tabel Perhitungan Besar Butir dan Standar Deviasi

Temperatur	Waktu Tahan	Sampel	Ukuran Butir (dn)	Ukuran Butir Rata-Rata (d)	$(dn-d)^2$	$\Sigma(dn-d)^2$	Standar Deviasi
1000 C	20 menit	A11	14,173882	13,51788423	0,43033264	0,874329172	0,6611842
		A12	12,851632		0,44389138		
		A13	13,528139		0,00010515		
	50 menit	A21	14,650072	13,8961039	0,56846813	3,064373898	
		A22	14,570707		0,45508944		
		A23	12,467532		2,04081633		
	80 menit	A31	14,859307	15,23689274	0,14257072	1,020104501	
		A32	16,060606		0,67850364		
		A33	14,790765		0,19903014		
1100 C	20 menit	B11	20,260771	19,74300831	0,26807817	2,896512598	1,2034352
		B12	20,600907		0,73599021		
		B13	18,367347		1,89244422		
	50 menit	B21	18,622449	20,07558579	2,11160659	7,835619761	
		B22	22,329932		5,08207671		
		B23	19,274376		0,64193646		
	80 menit	B31	20,663265	20,54988662	0,01285473	0,149436192	
		B32	20,238095		0,09721387		
		B33	20,748299		0,0393676		
1200 C	20 menit	C11	32,527195	29,17565239	11,232838	17,64087316	2,969922
		C12	26,870748		5,31258287		
		C13	28,129014		1,09545225		
	50 menit	C21	39,980159	34,72364276	27,6309602	41,75092923	
		C22	32,48557		5,00896974		
		C23	31,7052		9,11099933		
	80 menit	C31	79,341888	65,75663094	184,559217	277,9460389	
			59,70805		36,5853327		
		C33	58,219955		56,8014895		

LAMPIRAN 4

Hasil Pemetaan Sampel Baja HSLA 0,111% Nb dengan FE SEM Setelah Mengalami *Reheating* Pada Suhu 1200°C dan Ditahan Selama 80 Menit

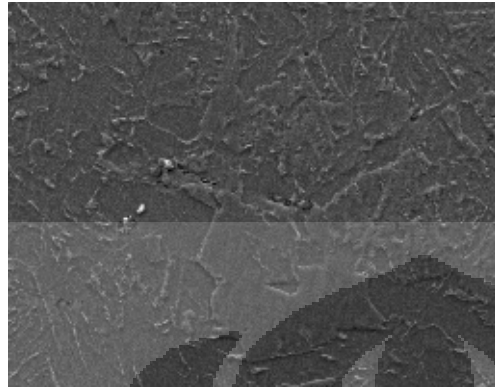
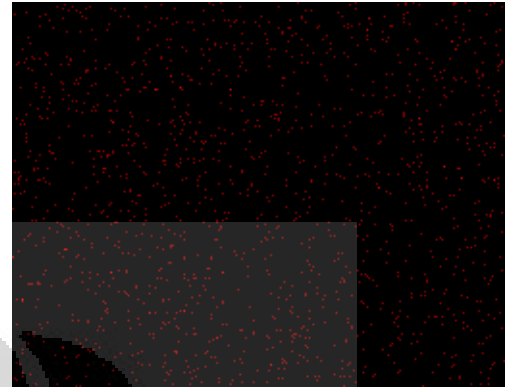
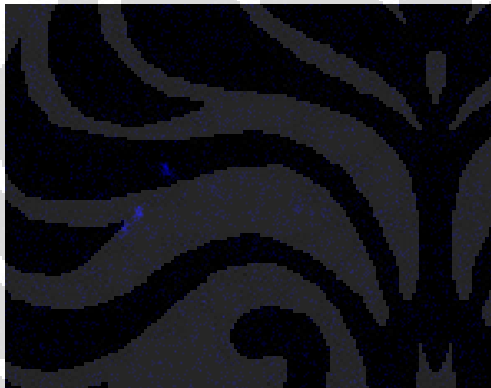


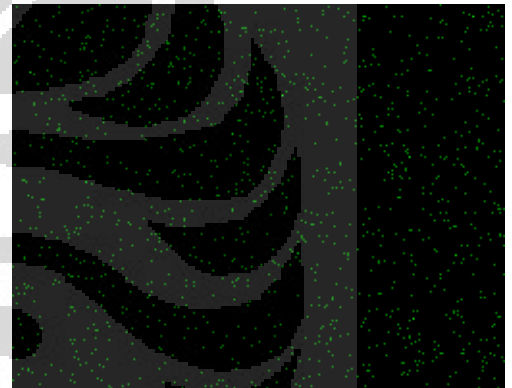
Foto asli



Karbon (merah)



Niobium (biru)



Nitrogen (Hijau)



Overlay dari C, Nb, N

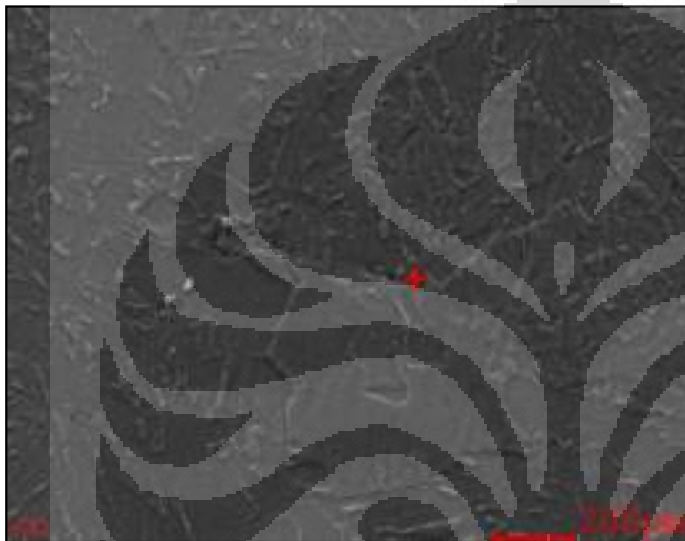
Dari gambar diatas terlihat bahwa ada daerah dengan konsentrasi Niobium yang sangat tinggi. Daerah tersebut merupakan tempat presipitat NbCN berada. Dapat disimpulkan bahwa pada suhu pemanasan 1200°C dan waktu tahan 80 menit

sebagian endapan NbCN sudah larut tetapi sebagian lagi masih bergerombol membentuk endapan.

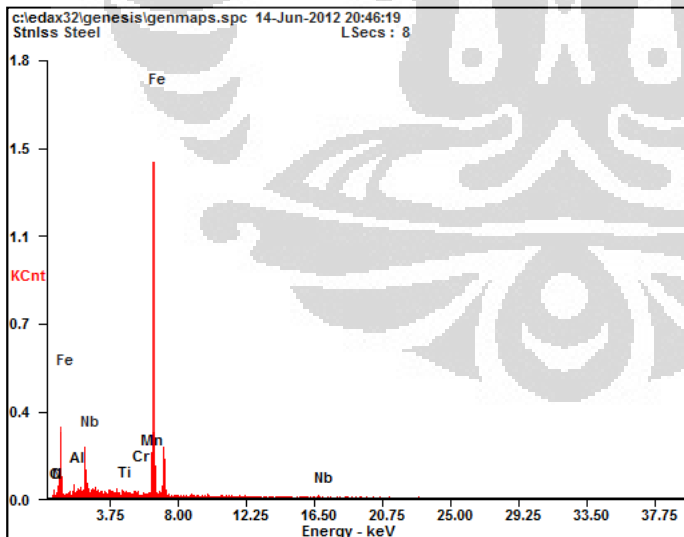
Untuk melihat sebaran endapan pada sampel maka dilakukan beberapa kali penembakan pada beberapa lokasi sehingga bisa diketahui komposisi elemen penyusunnya.

LOKASI 1 (DITUNJUKAN PANAH MERAH)

Berada Pada Daerah Marix Martensit

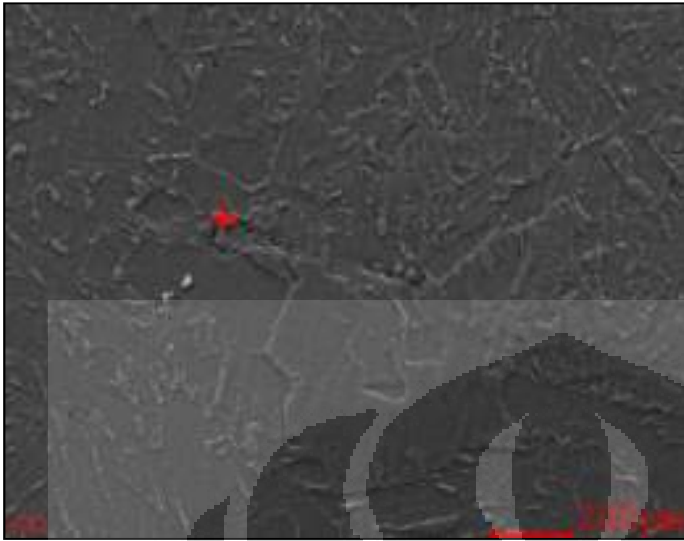


<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	01.11	03.48
<i>NK</i>	01.01	02.73
<i>FeL</i>	17.70	11.95
<i>AlK</i>	41.22	57.60
<i>NbL</i>	14.01	05.69
<i>TiK</i>	13.37	10.52
<i>CrK</i>	02.13	01.55
<i>MnK</i>	09.45	06.49
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

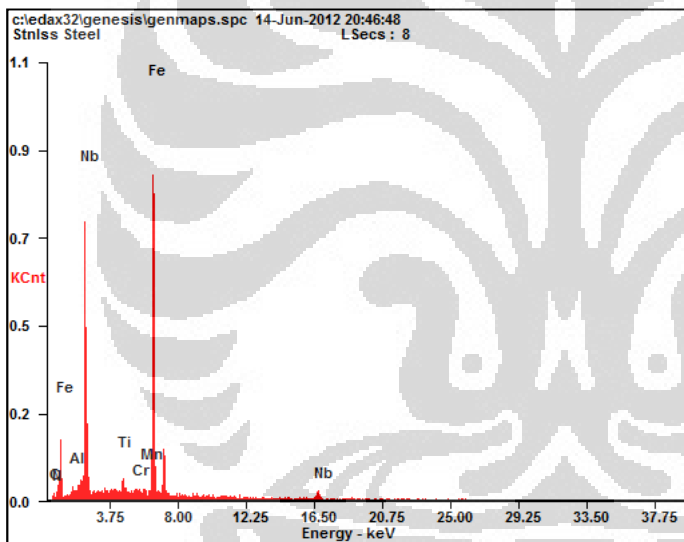


Pada Lokasi ini didapat kandungan niobium, karbon dan nitrogen yang sangat kecil. Hal ini terjadi karena lokasi tersebut merupakan daerah matriks martenite

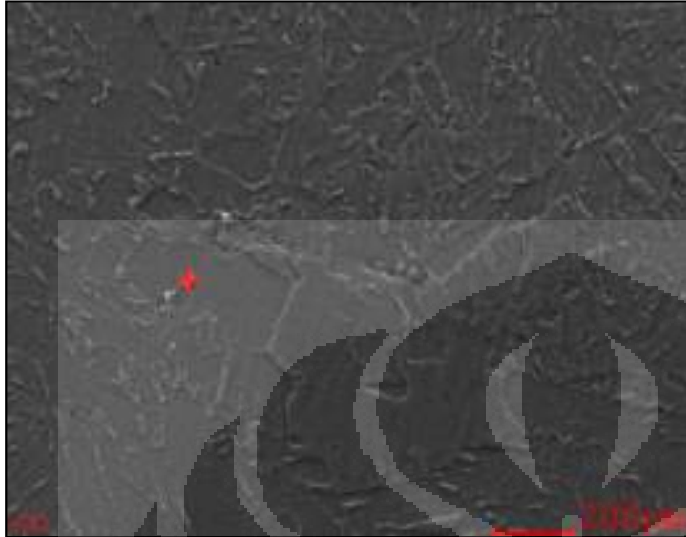
LOKASI 2 DITUNJUKAN PANAH MERAH)
 Berada Pada Daerah Endapan Putih



<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	01.56	07.00
<i>NK</i>	01.22	04.71
<i>FeL</i>	59.18	57.14
<i>AlK</i>	01.03	02.06
<i>NbL</i>	19.99	11.60
<i>TiK</i>	03.92	04.41
<i>CrK</i>	04.06	04.21
<i>MnK</i>	09.04	08.87
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF



LOKASI 3 (DITUNJUKAN PANAH MERAH)
Berada Pada Daerah Endapan Putih kedua



<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	00.90	04.90
<i>NK</i>	01.11	05.18
<i>FeL</i>	29.63	34.75
<i>AlK</i>	00.09	00.21
<i>NbL</i>	56.77	40.01
<i>TiK</i>	06.24	08.54
<i>CrK</i>	02.08	02.62
<i>MnK</i>	03.18	03.79
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

Pada Lokasi 2 dan 3 terlihat bahwa kandungan karbon, nitrogen dan Niobiumnya lebih banyak dari pada lokasi 1. Hal ini menunjukkan bahwa lokasi 2 dan 3 adalah tempat endapan karbonitrida mengendap. Dari pengamatan terhadap arah orientasi jarum jarum martenit dapat disimpulkan bahwa lokasi 2 dan 3 terletak pada batas butir.

LAMPIRAN 5

Permodelan Perhitungan Besar Butir Austenit Prior

Seperti yang sudah dibahas pada bab 4 persamaan diameter butir austenit prior adalah gabungan fungsi dari fungsi temperatur dan fungsi waktu tahan.

$$D = f(T) \times f(t)$$

menurut Sellars dkk^[20] pertumbuhan butir adalah sebuah fungsi eksponensial sehingga kita dapat menjabarkan fungsi diatas menjadi :

$$d = aT^b \times kt^m$$

$$\ln d = b \ln T + \ln a + m \ln t + \ln k$$

Dari hasil permodelan seperti yang sudah dibahas pada bab 4 akhirnya ditemukan sebuah persamaan yang paling mendekati kondisi eksperimen. Persamaan tersebut adalah:

$$d = 9,398 \times 10^{-15} T^{5,0046} t^{0,0786}$$

sebelum menemukan persamaan diatas penulis mengadakan percobaan terhadap 9 kombinasi konstanta yang mungkin dan akhirnya ditemukan kombinasi ke-4 yang memberikan nilai besar butir paling mendekati nilai eksperimen. Berikut ini adalah 9 kombinasi tersebut:

Tabel Berbagai Kombinasi Konstanta yang Mungkin Muncul

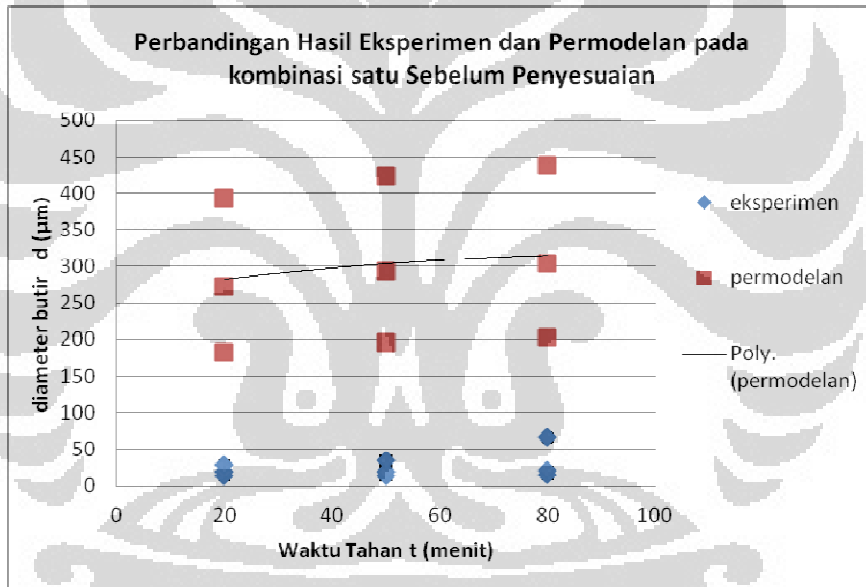
Kombinasi ke	a	b	m	k
1	3,02E-12	4,2157	0,0786	10,75
2	3,02E-12	4,2157	0,0274	18,146
3	3,02E-12	4,2157	0,5319	5,477
4	1,30E-14	5,0046	0,0786	10,75
5	1,30E-14	5,0046	0,0274	18,146
6	1,30E-14	5,0046	0,5319	5,477
7	1,95E-23	7,9427	0,0786	10,75
8	1,95E-23	7,9427	0,0274	18,146
9	1,95E-23	7,9427	0,5319	5,477

Dari sembilan kombinasi diatas akan dihasilkan sembilan persamaan yang berbeda sehingga harus dipilih satu yang paling mendekati. Berikut ini adalah grafik dan hasil perhitungan dari sembilan kombinasi konstanta diatas:

Kombinasi 1

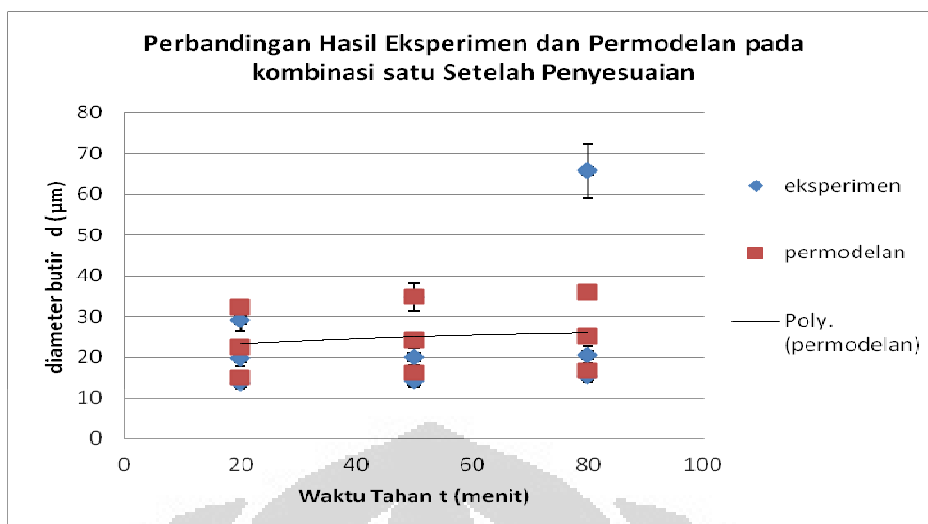
Tabel Hasil Perhitungan Persamaan 1 Sebelum penyesuaian

ln d = b ln T + ln a + m lnt + ln k								
Persamaan ke 1.	T	t	a	b	m	k	ln d	d
	1000	20	3,02E-12	4,2157	0,0786	10,75	5,205629956	182,29567
	1000	50	3E-12	4,2157	0,0786	10,75	5,277650408	195,90903
	1000	80	3E-12	4,2157	0,0786	10,75	5,314592693	203,2817
	1100	20	3E-12	4,2157	0,0786	10,75	5,607429081	272,44291
	1100	50	3E-12	4,2157	0,0786	10,75	5,679449533	292,78822
	1100	80	3E-12	4,2157	0,0786	10,75	5,716391818	303,80675
	1200	20	3E-12	4,2157	0,0786	10,75	5,974242943	393,17034
	1200	50	3E-12	4,2157	0,0786	10,75	6,046263395	422,53124
	1200	80	3E-12	4,2157	0,0786	10,75	6,08320568	438,43242



Tabel Hasil Perhitungan Persamaan 1 Setelah penyesuaian

ln d = b ln T + ln a + m lnt + ln k-2,5								
Persamaan ke 1.	T	t	a	b	m	k	ln d	d
	1000	20	3,02E-12	4,2157	0,0786	10,75	2,705629956	14,96374
	1000	50	3E-12	4,2157	0,0786	10,75	2,777650408	16,081192
	1000	80	3E-12	4,2157	0,0786	10,75	2,814592693	16,686378
	1100	20	3E-12	4,2157	0,0786	10,75	3,107429081	22,363476
	1100	50	3E-12	4,2157	0,0786	10,75	3,179449533	24,03352
	1100	80	3E-12	4,2157	0,0786	10,75	3,216391818	24,937977
	1200	20	3E-12	4,2157	0,0786	10,75	3,474242943	32,273387
	1200	50	3E-12	4,2157	0,0786	10,75	3,546263395	34,683477
	1200	80	3E-12	4,2157	0,0786	10,75	3,58320568	35,988724

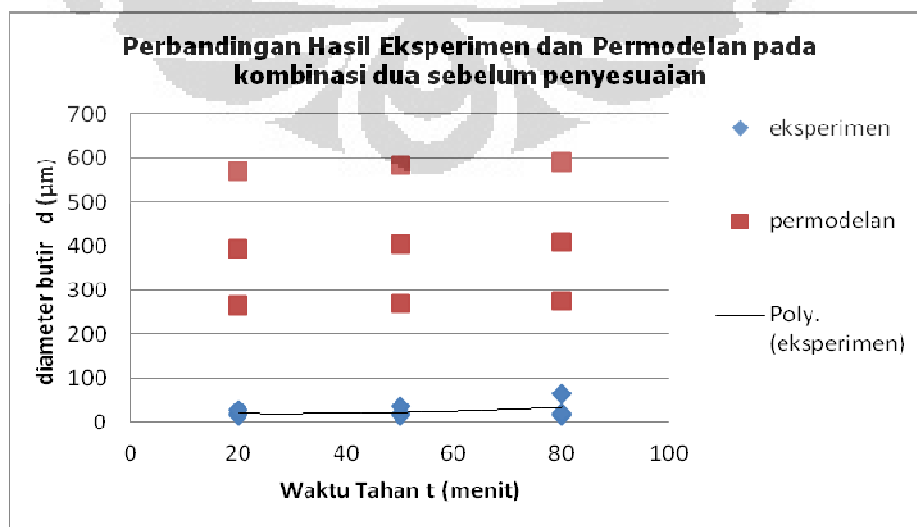


Kombinasi 2

Tabel Hasil Perhitungan Persamaan 2 Sebelum penyesuaian

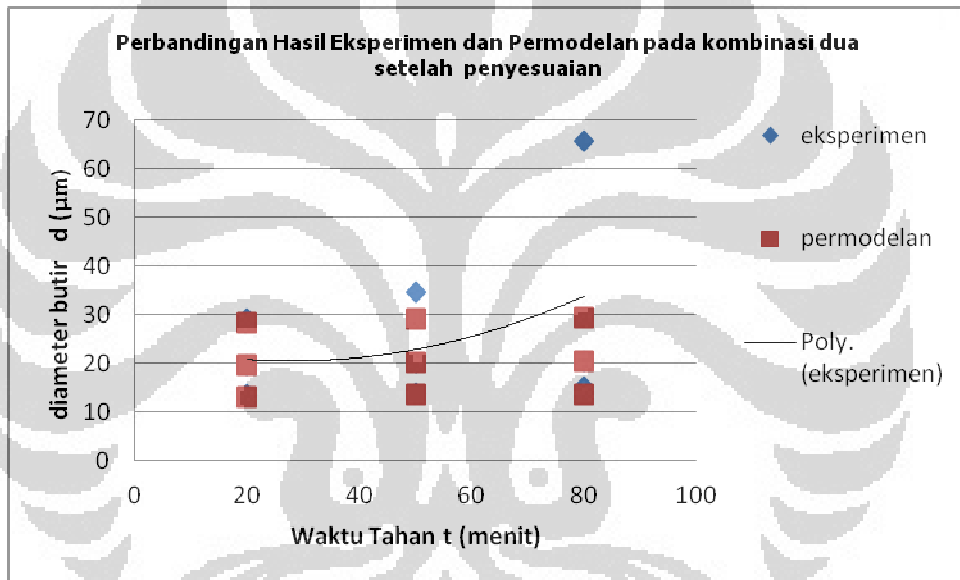
$\ln d = b \ln T + \ln a + m \ln t + \ln k$

	T	t	a	b	m	k	$\ln d$	d
persamaan ke 2.	1000	20	3E-12	4,2157	0,0274	18,146	5,57579286	263,95876
	1000	50	3,02E-12	4,2157	0,0274	18,146	5,600899226	270,66969
	1000	80	3E-12	4,2157	0,0274	18,146	5,613777326	274,17794
	1100	20	3E-12	4,2157	0,0274	18,146	5,977591985	394,48929
	1100	50	3E-12	4,2157	0,0274	18,146	6,002698351	404,51886
	1100	80	3E-12	4,2157	0,0274	18,146	6,015576451	409,76198
	1200	20	3E-12	4,2157	0,0274	18,146	6,344405847	569,29904
	1200	50	3E-12	4,2157	0,0274	18,146	6,369512213	583,773
	1200	80	3E-12	4,2157	0,0274	18,146	6,382390313	591,33951



Tabel Hasil Perhitungan Persamaan 2 Setelah Penyesuaian

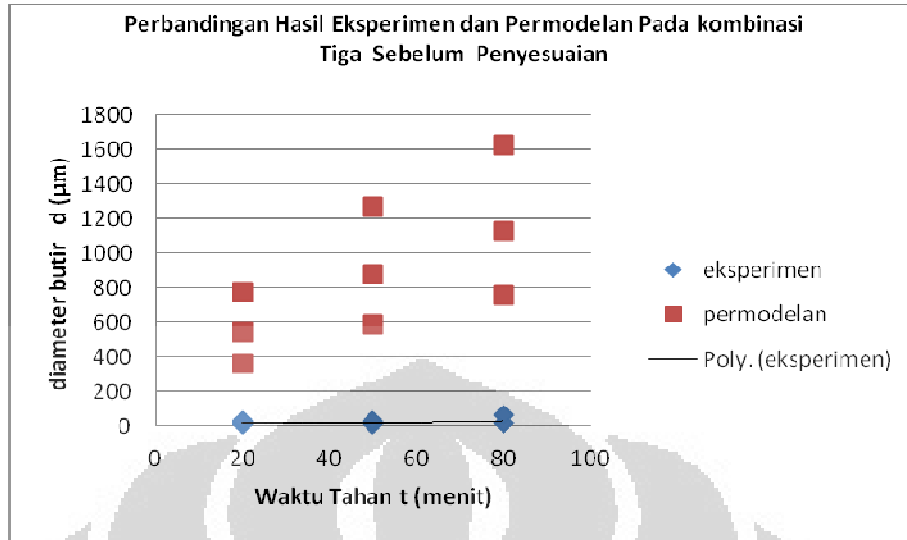
ln d = b ln T + ln a + m lnt + ln k-3								
	T	t	a	b	m	k	ln d	d
Persamaan ke 2.	1000	20	3E-12	4,2157	0,0274	18,146	2,57579286	13,141733
	1000	50	3,02E-12	4,2157	0,0274	18,146	2,600899226	13,47585
	1000	80	3E-12	4,2157	0,0274	18,146	2,613777326	13,650516
	1100	20	3E-12	4,2157	0,0274	18,146	2,977591985	19,640465
	1100	50	3E-12	4,2157	0,0274	18,146	3,002698351	20,139808
	1100	80	3E-12	4,2157	0,0274	18,146	3,015576451	20,400848
	1200	20	3E-12	4,2157	0,0274	18,146	3,344405847	28,34373
	1200	50	3E-12	4,2157	0,0274	18,146	3,369512213	29,064346
	1200	80	3E-12	4,2157	0,0274	18,146	3,382390313	29,44106



Kombinasi 3

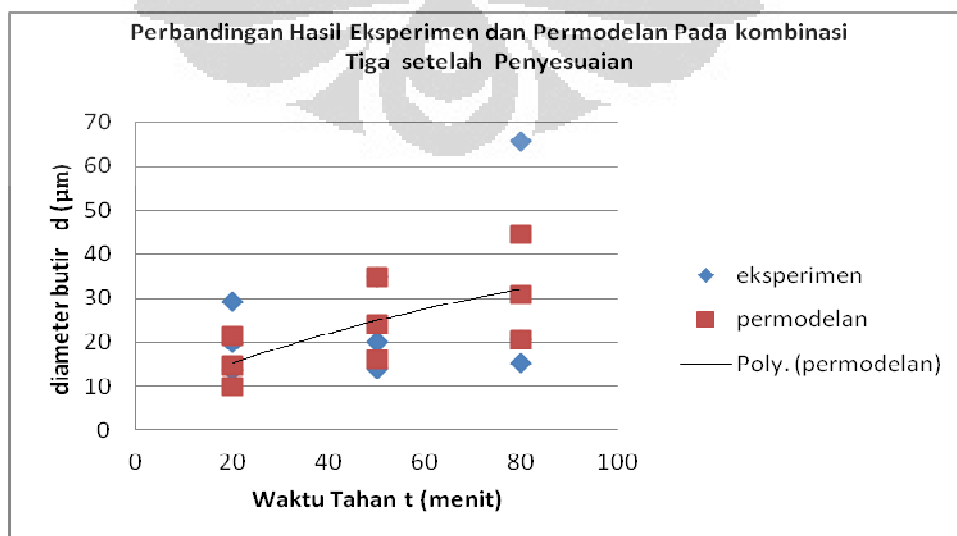
Tabel Hasil Perhitungan Persamaan 3 Sebelum penyesuaian

ln d = b ln T + ln a + m lnt + ln k								
	T	t	a	b	m	k	ln d	d
persamaan ke 3	1000	20	3,02E-12	4,2157	0,5319	5,477	5,889247147	361,1333
	1000	50	3E-12	4,2157	0,5319	5,477	6,376622187	587,9384
	1000	80	3E-12	4,2157	0,5319	5,477	6,626617118	754,92403
	1100	20	3E-12	4,2157	0,5319	5,477	6,291046272	539,71773
	1100	50	3E-12	4,2157	0,5319	5,477	6,778421312	878,68047
	1100	80	3E-12	4,2157	0,5319	5,477	7,028416243	1128,2423
	1200	20	3E-12	4,2157	0,5319	5,477	6,657860134	778,88245
	1200	50	3E-12	4,2157	0,5319	5,477	7,145235174	1268,0495
	1200	80	3E-12	4,2157	0,5319	5,477	7,395230105	1628,1995



Tabel Hasil Perhitungan Persamaan 3 Setelah penyesuaian

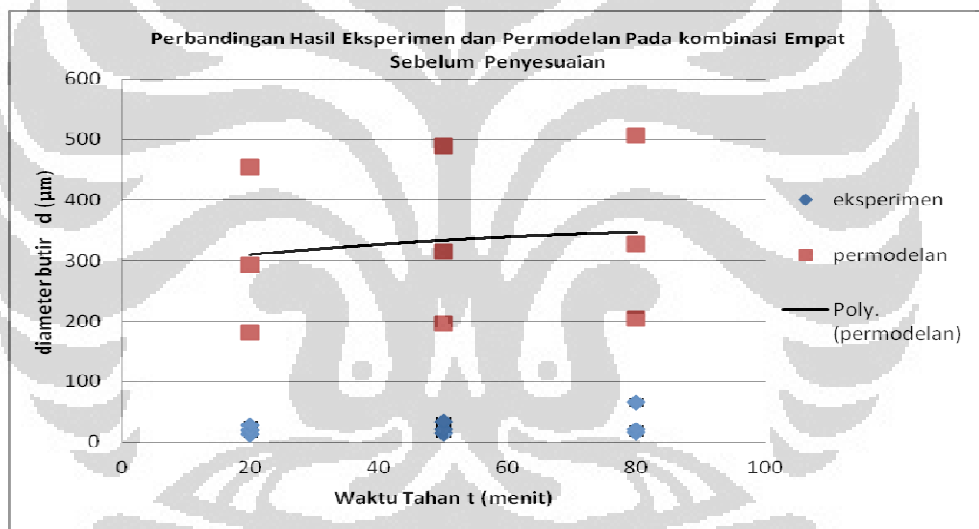
$\ln d = b \ln T + \ln a + m \ln t + \ln k - 3,6$								
	T	t	a	b	m	k	$\ln d$	d
persamaan ke 3	1000	20	3,02E-12	4,2157	0,5319	5,477	2,289247147	9,8675061
	1000	50	3E-12	4,2157	0,5319	5,477	2,776622187	16,064666
	1000	80	3E-12	4,2157	0,5319	5,477	3,026617118	20,627335
	1100	20	3E-12	4,2157	0,5319	5,477	2,691046272	14,747097
	1100	50	3E-12	4,2157	0,5319	5,477	3,178421312	24,008821
	1100	80	3E-12	4,2157	0,5319	5,477	3,428416243	30,82778
	1200	20	3E-12	4,2157	0,5319	5,477	3,057860134	21,281968
	1200	50	3E-12	4,2157	0,5319	5,477	3,545235174	34,647833
	1200	80	3E-12	4,2157	0,5319	5,477	3,795230105	44,488472



Kombinasi 4

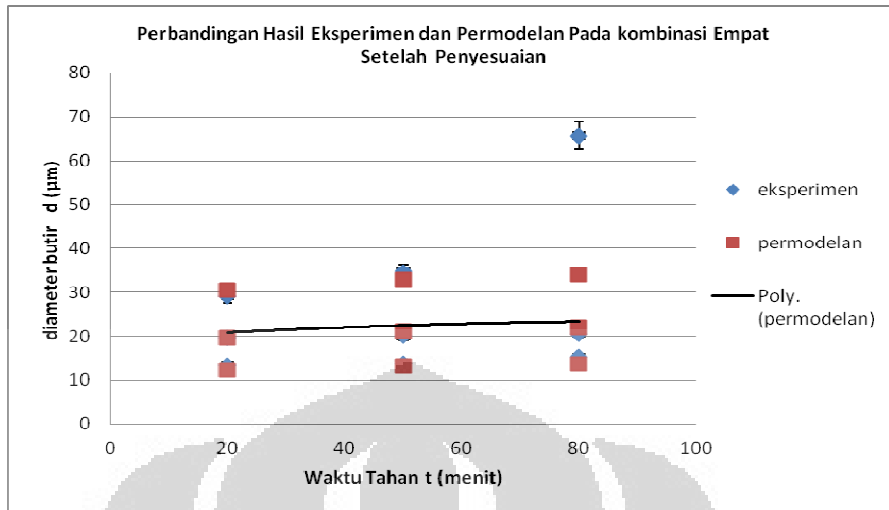
Tabel Hasil Perhitungan Persamaan 4 Sebelum penyesuaian

In d = b ln T + ln a + m lnt + ln k								
persamaan ke 4	T	t	a	b	m	k	ln d	d
	1000	20	1,30E-14	5,0046	0,0786	10,75	5,207095343	182,563
	1000	50	1,3E-14	5,0046	0,0786	10,75	5,279115795	196,19632
	1000	80	1,3E-14	5,0046	0,0786	10,75	5,31605808	203,5798
	1100	20	1,3E-14	5,0046	0,0786	10,75	5,684084669	294,14848
	1100	50	1,3E-14	5,0046	0,0786	10,75	5,75610512	316,1147
	1100	80	1,3E-14	5,0046	0,0786	10,75	5,793047406	328,01109
	1200	20	1,3E-14	5,0046	0,0786	10,75	6,119541806	454,65633
	1200	50	1,3E-14	5,0046	0,0786	10,75	6,191562258	488,60884
	1200	80	1,3E-14	5,0046	0,0786	10,75	6,228504543	506,99672



Tabel Hasil Perhitungan Persamaan 4 Setelah Penyesuaian

In d = b ln T + ln a + m lnt + ln k-2,7								
persamaan ke 4	T	t	a	b	m	k	ln d	d
	1000	20	1,30E-14	5,0046	0,0786	10,75	2,507095343	12,26924
	1000	50	1,3E-14	5,0046	0,0786	10,75	2,579115795	13,185474
	1000	80	1,3E-14	5,0046	0,0786	10,75	2,61605808	13,681685
	1100	20	1,3E-14	5,0046	0,0786	10,75	2,984084669	19,768399
	1100	50	1,3E-14	5,0046	0,0786	10,75	3,05610512	21,24465
	1100	80	1,3E-14	5,0046	0,0786	10,75	3,093047406	22,044153
	1200	20	1,3E-14	5,0046	0,0786	10,75	3,419541806	30,555412
	1200	50	1,3E-14	5,0046	0,0786	10,75	3,491562258	32,837208
	1200	80	1,3E-14	5,0046	0,0786	10,75	3,528504543	34,072975

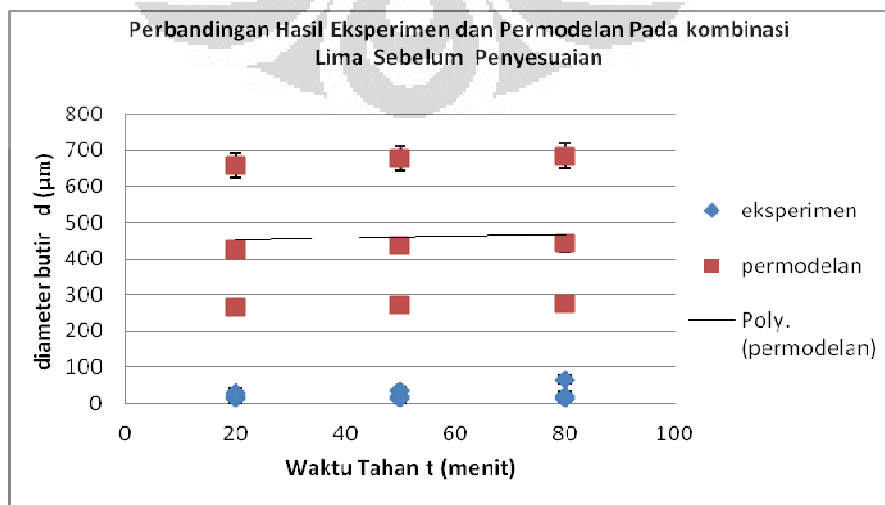


Kombinasi 5

Tabel Hasil Perhitungan Persamaan 5 Sebelum penyesuaian

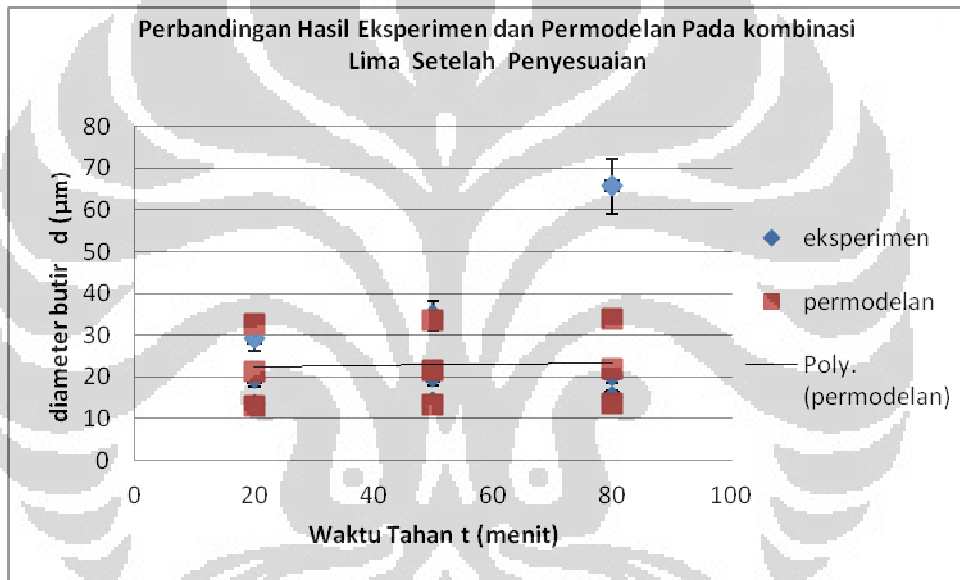
$$\ln d = b \ln T + \ln a + m \ln t + \ln k$$

	T	t	a	b	m	k	ln d	d
persamaan ke 5	1000	20	1,30E-14	5,0046	0,0274	18,146	5,577258247	264,34584
	1000	50	1,3E-14	5,0046	0,0274	18,146	5,602364613	271,06662
	1000	80	1,3E-14	5,0046	0,0274	18,146	5,615242712	274,58002
	1100	20	1,3E-14	5,0046	0,0274	18,146	6,054247573	425,91831
	1100	50	1,3E-14	5,0046	0,0274	18,146	6,079353939	436,74694
	1100	80	1,3E-14	5,0046	0,0274	18,146	6,092232038	442,40778
	1200	20	1,3E-14	5,0046	0,0274	18,146	6,48970471	658,32894
	1200	50	1,3E-14	5,0046	0,0274	18,146	6,514811076	675,06641
1200	80	1,3E-14	5,0046	0,0274	18,146	6,527689175	683,81621	



Tabel Hasil Perhitungan Persamaan 5 Setelah Penyesuaian

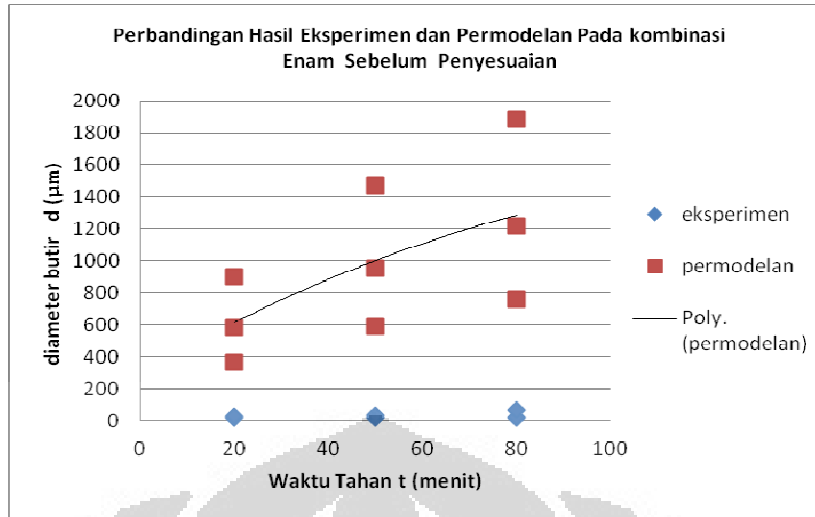
ln d = b ln T + ln a + m lnt + ln k-3								
	T	t	a	b	m	k	ln d	d
persamaan ke 5	1000	20	1,30E-14	5,0046	0,0274	18,146	2,577258247	13,161004
	1000	50	1,3E-14	5,0046	0,0274	18,146	2,602364613	13,495612
	1000	80	1,3E-14	5,0046	0,0274	18,146	2,615242712	13,670534
	1100	20	1,3E-14	5,0046	0,0274	18,146	3,054247573	21,205224
	1100	50	1,3E-14	5,0046	0,0274	18,146	3,079353939	21,74435
	1100	80	1,3E-14	5,0046	0,0274	18,146	3,092232038	22,026186
	1200	20	1,3E-14	5,0046	0,0274	18,146	3,48970471	32,776268
	1200	50	1,3E-14	5,0046	0,0274	18,146	3,514811076	33,609578
	1200	80	1,3E-14	5,0046	0,0274	18,146	3,527689175	34,045204



Kombinasi 6

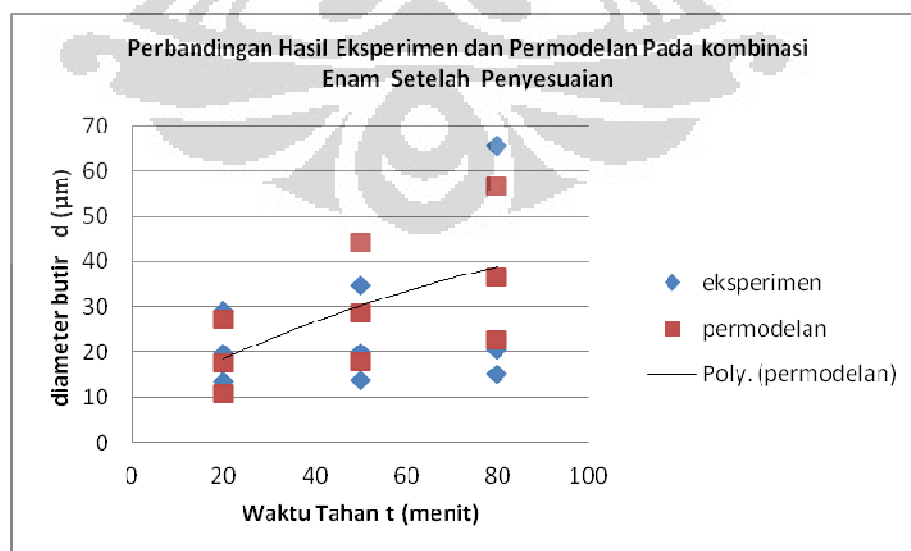
Tabel Hasil Perhitungan Persamaan 6 Sebelum Penyesuaian

ln d = b ln T + ln a + m lnt + ln k								
	T	t	a	b	m	k	ln d	d
Persamaan ke 6	1000	20	1,30E-14	5,0046	0,5319	5,477	5,890712534	361,66289
	1000	50	1,3E-14	5,0046	0,5319	5,477	6,378087574	588,80059
	1000	80	1,3E-14	5,0046	0,5319	5,477	6,628082505	756,03109
	1100	20	1,3E-14	5,0046	0,5319	5,477	6,36770186	582,71712
	1100	50	1,3E-14	5,0046	0,5319	5,477	6,8550769	948,68508
	1100	80	1,3E-14	5,0046	0,5319	5,477	7,10507183	1218,1296
	1200	20	1,3E-14	5,0046	0,5319	5,477	6,803158997	900,68807
	1200	50	1,3E-14	5,0046	0,5319	5,477	7,290534037	1466,3536
	1200	80	1,3E-14	5,0046	0,5319	5,477	7,540528968	1882,8257



Tabel Hasil Perhitungan Persamaan 6 Setelah Penyesuaian

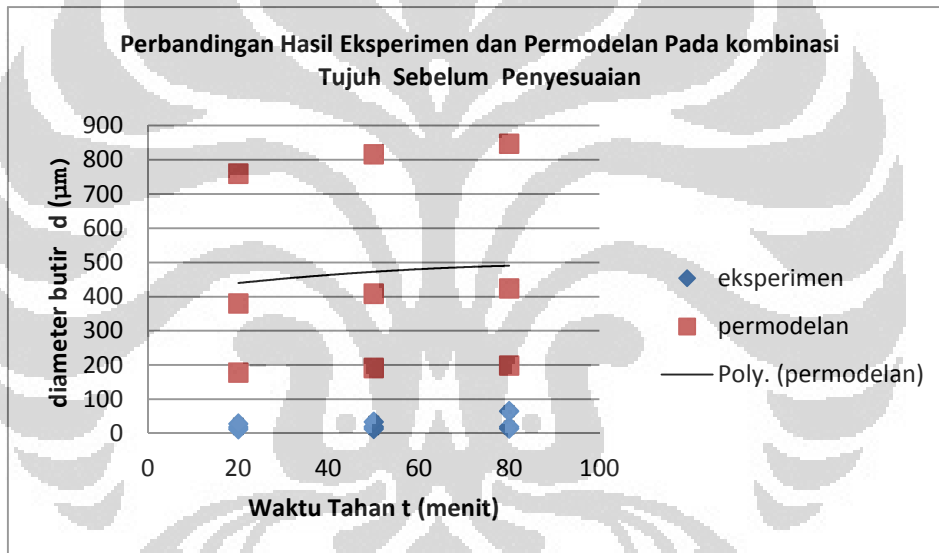
In d = b ln T + ln a + m lnt + ln k-3,5								
	T	t	a	b	m	k	ln d	d
Persamaan ke 6	1000	20	1,30E-14	5,0046	0,5319	5,477	2,390712534	10,921273
	1000	50	1,3E-14	5,0046	0,5319	5,477	2,878087574	17,780237
	1000	80	1,3E-14	5,0046	0,5319	5,477	3,128082505	22,830161
	1100	20	1,3E-14	5,0046	0,5319	5,477	2,86770186	17,596532
	1100	50	1,3E-14	5,0046	0,5319	5,477	3,3550769	28,647807
	1100	80	1,3E-14	5,0046	0,5319	5,477	3,60507183	36,784326
	1200	20	1,3E-14	5,0046	0,5319	5,477	3,303158997	27,198423
	1200	50	1,3E-14	5,0046	0,5319	5,477	3,790534037	44,280041
	1200	80	1,3E-14	5,0046	0,5319	5,477	4,040528968	56,85641



Kombinasi 7

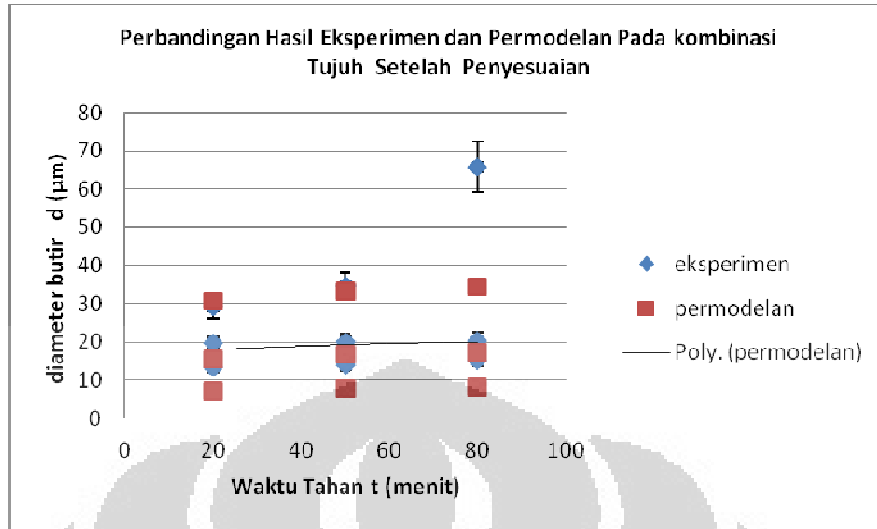
Tabel Hasil Perhitungan Persamaan 7 Sebelum Penyesuaian

In d = b ln T + ln a + m lnt + ln k								
Persamaan ke 7	T	t	a	b	m	k	ln d	d
	1000	20	1,95E-23	7,9427	0,0786	10,75	5,184970399	178,56816
	1000	50	2E-23	7,9427	0,0786	10,75	5,256990851	191,90316
	1000	80	2E-23	7,9427	0,0786	10,75	5,293933136	199,12507
	1100	20	2E-23	7,9427	0,0786	10,75	5,941990564	380,69197
	1100	50	2E-23	7,9427	0,0786	10,75	6,014011016	409,12102
	1100	80	2E-23	7,9427	0,0786	10,75	6,050953301	424,51753
	1200	20	2E-23	7,9427	0,0786	10,75	6,633095829	759,83084
	1200	50	2E-23	7,9427	0,0786	10,75	6,70511628	816,57297
	1200	80	2E-23	7,9427	0,0786	10,75	6,742058565	847,30317



Tabel Hasil Perhitungan Persamaan 7 Setelah Penyesuaian

In d = b ln T + ln a + m lnt + ln k-3,2								
Persamaan ke 7	T	t	a	b	m	k	ln d	d
	1000	20	1,95E-23	7,9427	0,0786	10,75	1,984970399	7,2788319
	1000	50	2E-23	7,9427	0,0786	10,75	2,056990851	7,8223956
	1000	80	2E-23	7,9427	0,0786	10,75	2,093933136	8,1167769
	1100	20	2E-23	7,9427	0,0786	10,75	2,741990564	15,517844
	1100	50	2E-23	7,9427	0,0786	10,75	2,814011016	16,676675
	1100	80	2E-23	7,9427	0,0786	10,75	2,850953301	17,30427
	1200	20	2E-23	7,9427	0,0786	10,75	3,433095829	30,97238
	1200	50	2E-23	7,9427	0,0786	10,75	3,50511628	33,285314
	1200	80	2E-23	7,9427	0,0786	10,75	3,542058565	34,537945

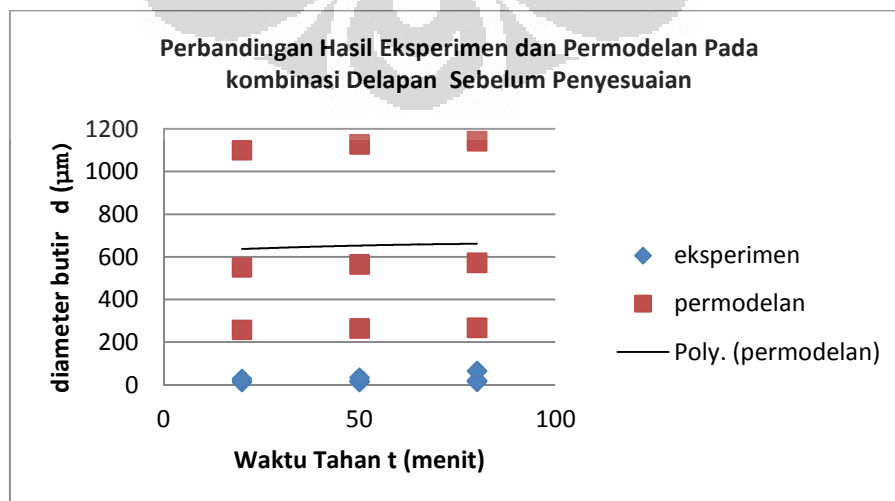


Kombinasi 8

Tabel Hasil Perhitungan Persamaan 8 Sebelum Penyesuaian

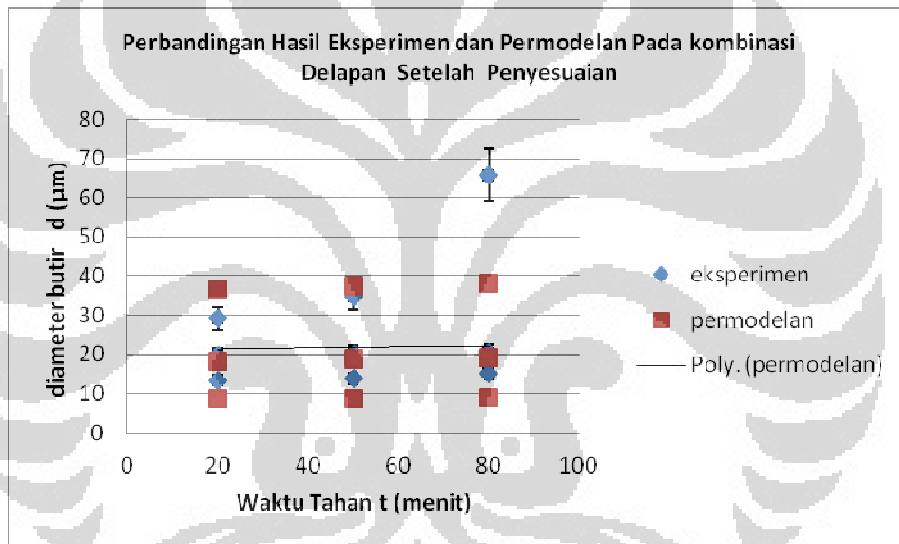
$\ln d = b \ln T + \ln a + m \ln t + \ln k$

	T	t	a	b	m	k	$\ln d$	d
Persamaan ke 8	1000	20	2E-23	7,9427	0,0274	18,146	5,555133303	258,56143
	1000	50	2E-23	7,9427	0,0274	18,146	5,580239669	265,13514
	1000	80	2E-23	7,9427	0,0274	18,146	5,593117769	268,57166
	1100	20	2E-23	7,9427	0,0274	18,146	6,312153468	551,23073
	1100	50	2E-23	7,9427	0,0274	18,146	6,337259834	565,24532
	1100	80	2E-23	7,9427	0,0274	18,146	6,350137934	572,57168
	1200	20	2E-23	7,9427	0,0274	18,146	7,003258732	1100,2126
	1200	50	2E-23	7,9427	0,0274	18,146	7,028365098	1128,1846
	1200	80	2E-23	7,9427	0,0274	18,146	7,041243198	1142,8075



Tabel Hasil Perhitungan Persamaan 8 Setelah Penyesuaian

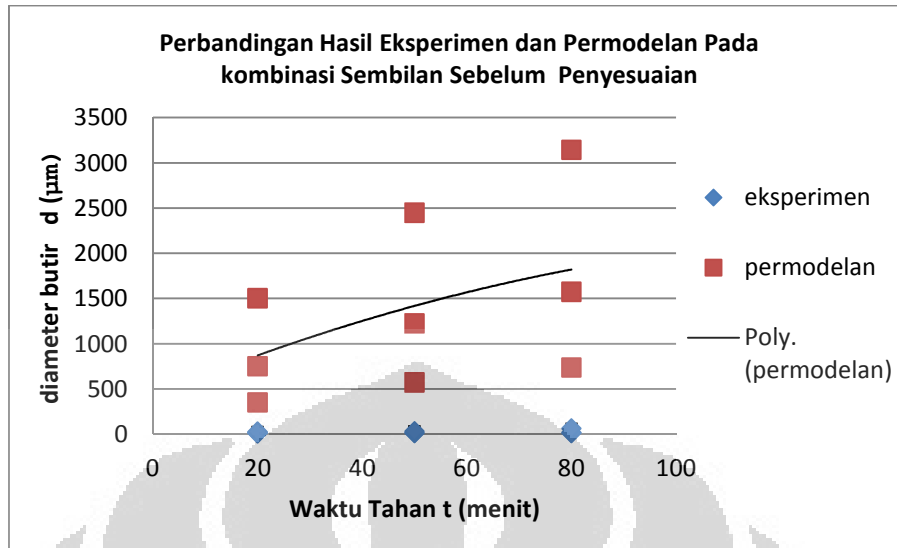
ln d = b ln T + ln a + m ln t + ln k-3,4								
Persamaan ke 8	T	t	a	b	m	k	ln d	d
	1000	20	2E-23	7,9427	0,0274	18,146	2,155133303	8,6290404
	1000	50	1,95E-23	7,9427	0,0274	18,146	2,180239669	8,8484267
	1000	80	2E-23	7,9427	0,0274	18,146	2,193117769	8,9631145
	1100	20	2E-23	7,9427	0,0274	18,146	2,912153468	18,396372
	1100	50	2E-23	7,9427	0,0274	18,146	2,937259834	18,864085
	1100	80	2E-23	7,9427	0,0274	18,146	2,950137934	19,108589
	1200	20	2E-23	7,9427	0,0274	18,146	3,603258732	36,717693
	1200	50	2E-23	7,9427	0,0274	18,146	3,628365098	37,65121
	1200	80	2E-23	7,9427	0,0274	18,146	3,641243198	38,139222



Kombinasi 9

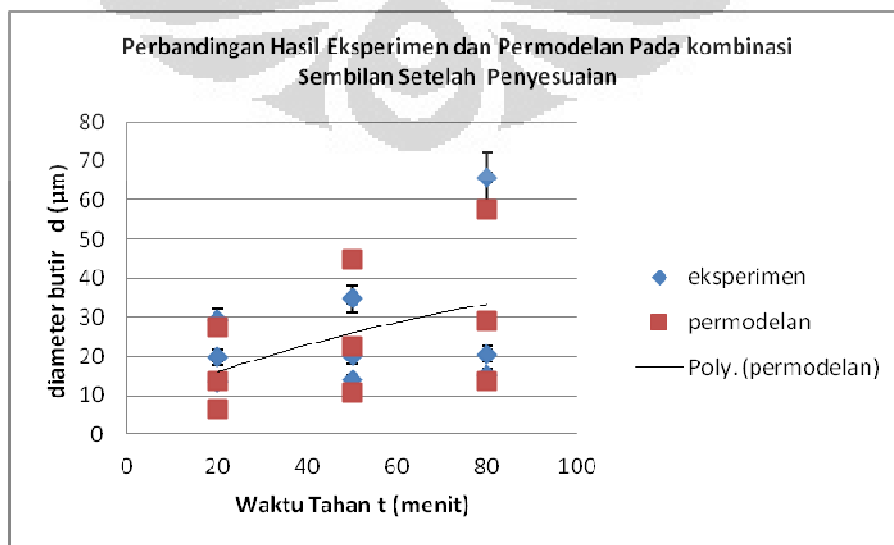
Tabel Hasil Perhitungan Persamaan 9 Sebelum Penyesuaian

ln d = b ln T + ln a + m ln t + ln k								
Persamaan ke 9	T	t	a	b	m	k	ln d	d
	1000	20	2E-23	7,9427	0,5319	5,477	5,86858759	353,74899
	1000	50	2E-23	7,9427	0,5319	5,477	6,35596263	575,91647
	1000	80	2E-23	7,9427	0,5319	5,477	6,605957561	739,48763
	1100	20	2E-23	7,9427	0,5319	5,477	6,625607755	754,16242
	1100	50	2E-23	7,9427	0,5319	5,477	7,112982796	1227,8044
	1100	80	2E-23	7,9427	0,5319	5,477	7,362977726	1576,524
	1200	20	2E-23	7,9427	0,5319	5,477	7,316713019	1505,2481
	1200	50	2E-23	7,9427	0,5319	5,477	7,80408806	2450,5997
	1200	80	2E-23	7,9427	0,5319	5,477	8,05408299	3146,6164



Tabel Hasil Perhitungan Persamaan 9 Setelah Penyesuaian

$\ln d = b \ln T + \ln a + m \ln t + \ln k - 4$								
	T	t	a	b	m	k	$\ln d$	d
Persamaan ke 9	1000	20	2E-23	7,9427	0,5319	5,477	1,86858759	6,4791387
	1000	50	2E-23	7,9427	0,5319	5,477	2,35596263	10,548278
	1000	80	2E-23	7,9427	0,5319	5,477	2,605957561	13,544188
	1100	20	2E-23	7,9427	0,5319	5,477	2,625607755	13,812967
	1100	50	2E-23	7,9427	0,5319	5,477	3,112982796	22,488022
	1100	80	2E-23	7,9427	0,5319	5,477	3,362977726	28,875045
	1200	20	2E-23	7,9427	0,5319	5,477	3,316713019	27,569581
	1200	50	2E-23	7,9427	0,5319	5,477	3,80408806	44,8843
	1200	80	2E-23	7,9427	0,5319	5,477	4,05408299	57,632289



LAMPIRAN 6

Hasil Uji Spektroskopi

Beirkut ini adalah hasil uji spektroskopi dari sampel yang digunakan dalam penelitian. Pada tabel berikut hasil uji spektroskopi sampel ditunjukkan pada sampel bernomor urut satu (ditandai kotak berwarna hitam)

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

120836/06

04/14/2012 10:44:11 AM
 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	0.0069	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	0.0041	<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