

DISERTASI

**KINETIKA PERTUMBUHAN BUTIR AUSTENIT
PADA KONDISI PENDINGINAN KONTINU PADA BAJA
HSLA- Nb SELAMA CANAI PANAS**



**MYRNA ARIATI
8405000061**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Doktor bidang
Metalurgi dan Material**

**PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL
PROGRAM PASCASARJANA FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS INDONESIA
2010**

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
KATA PENGANTAR	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	vi
ABSTRAK	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR LAMPIRAN	xviii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang masalah	1
1.2 Tujuan Umum Penelitian	3
1.3 Tujuan khusus Penelitian	4
1.4 Hipotesis	4
1.5 Perumusan Masalah	5
1.6 Ruang Lingkup	6
1.7 State of the Art Penelitian	7
1.8 Peta Penelitian dalam Skema Penelitian Thermo Mechanical Treatment (TMT) baja HSLA-Nb	16
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	17
2.1 Baja HSLA	17
2.2 Pengaruh Niobium Pada Baja HSLA	19
2.3 Pengaruh Unsur Paduan Lainnya	20
2.4 Tinjauan Dasar Proses Termomekanik	22
2.4.1 Prinsip dari Deformasi Panas (<i>Hot Deformation</i>)	22
2.4.1.1 Mekanisme Proses Reheating	25
2.4.2 Mekanisme dan Kinetika Pertumbuhan Butir Austenit Pada Proses Pemanasan awal (<i>Reheating</i>).	34
2.4.3 Kinetika Rekristalisasi	40
2.4.3.1 Rekristalisasi Statik	41
2.4.3.2 Rekristalisasi Dinamik	45
2.4.3.3 Perhitungan Besar Butir Rekristalisasi	46
2.4.4 Pertumbuhan Butir Austenit Setelah Deformasi pada Proses Canai Panas	47
2.4.5 Kontrol Proses Canai	52
2.4.5.1 Temperatur dan Waktu Pemanasan pada Proses Deformasi	52
2.4.5.2 Kecepatan Pendinginan (<i>Cooling Rate</i>)	54
2.4.6 Transformasi Austenit-Ferit	57
2.4.7 Hubungan Besar Butir Austenit Terhadap Partikel Fasa Kedua dan Kandungan Nb Dalam Baja	62
2.4.8 Mekanisme penguatan Ferit	65

2.5.	Pengamatan struktur Mikro Austenit Prior	66
2.5.1.	Etsa Untuk Menampakkan Batas Butir Austenit Prior	67
2.5.2	Pengamatan Partikel NbC pada Baja HSLA-Nb	69
BAB III	BAHAN DAN METODOLOGI PENELITIAN	73
3.1.	Bahan dan Bentuk Benda Uji	73
3.2.	Metodologi	74
3.2.1.	Peralatan	74
3.2.2.	Penetapan Temperatur Pemanasan Awal (<i>Reheating</i>)	74
3.2.3.	Diagram Alir Penelitian	77
3.2.3.1.	Diagram Alir Pengamatan Besar butir Awal Austenit Prior Dengan teknik Metalografi.	78
3.2.3.2.	Diagram alir Pengamatan Besar Butir Austenit Setelah Canai Panas Dengan Variabel Kecepatan Pendinginan.	79
3.2.4.	Penentuan Larutan dan Teknik Etsa batas Butir Austenit Prior	80
3.2.5	Pengamatan Besar Butir Austenit dengan Variabel Temperatur Pemanasan Awal	80
3.2.6.	Evaluasi Pencapaian Kondisi Penelitian	82
3.2.7.	Pengamatan Struktur Mikro	82
3.2.8	Metode Perhitungan Besar Butir Austenit Prior	83
3.2.9	Prosedur untuk Menentukan Jarak Rol gap pada Mesin Roll. ONO	85
3.2.10	Peralatan Pembantu yang digunakan	85
BAB IV	HASIL PENELITIAN	87
4.1.	Material	87
4.2.	Hasil Pengujian Pendahuluan	89
4.2.1.	Penetapan temperature pemanasan Awal	89
4.2.2	Penentuan Larutan Etsa Batas Butir Austenit	89
4.2.3	Hasil Evaluasi Pencapaian Kondisi Penelitian	90
4.2.4.	Pengamatan Besar Butir Austenit dengan Variabel Temperatur Pemanasan Awal .	91
4.2.5.	Pengaruh Waktu Tahan Terhadap Ukuran Butir Austenit Prior rata-rata pada Temperatur Pemanasan Awal 1200°C.	92
4.3.	Hubungan Kecepatan Pendinginan Dengan Besar Butir Austenit Setelah Proses Canai	93
4.3.1.	Pengamatan Strukturmikro Dengan Mikroskop Optik dan HRSEM (<i>High Resolution Scanning Electron Microscope</i>)	93
4.3.2.	Hasil Perhitungan Kecepatan Pendinginan dan Ukuran Butir Austenit	108
4.3.3	Hubungan Kecepatan Pendinginan dan Ukuran Butir Austenit .	108

BAB V	PEMBAHASAN	112
5.1.	Material	112
5.2.	Penetapan Temperatur Pemanasan awal	113
5.3.	Penentuan Larutan Etsa Batas butir Austenit	114
5.4.	Pengaruh Temperatur dan waktu Tahan Pemanasan Terhadap Besar Butir Austenit	115
5.5.	Perbandingan Hasil Eksperimen Dengan Model Isotermal	116
5.6.	Perbandingan Hasil Eksperimen Dengan Model Non-Isotermal	121
5.7	Perbandingan Hasil Eksperimen Dengan Model Non-Isotermal Dan Model Perhitungan Matematis	127
5.8	Pengaruh Komposisi Nb,C dan N Terhadap Hubungan Besar Butir Austenit Dengan Kecepatan Pendinginan	131
5.8.1.	Pengaruh Komposisi Nb Terhadap Besar Butir Austenit	131
5.8.2.	Pengaruh Perbandingan Komposisi Nb,C dan N Terhadap Besar Butir Austenit.	136
5.8.3.	Pengamatan Endapan NbC dengan <i>High Resolution Scanning Electron Microscope (HRSEM)</i>	145
BAB VI	KESIMPULAN DAN RENCANA PENELITIAN LANJUT.	147
6.1	Kesimpulan	147
6.2	Rencana Penelitian Lanjut	149
	DAFTAR ACUAN	150
	LAMPIRAN	155

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Peta Penelitian Bidang TMT Baja HSLA -Nb	16
Gambar 2.1	Pengaruh ukuran partikel <i>Niobium carbide</i> terhadap <i>yield strength</i>	19
Gambar 2.2	Pengaruh unsur paduan mikro terhadap ukuran butir ferit	20
Gambar 2.3	Tahapan pada Proses Pengerjaan Panas	24
Gambar 2.4	Pengaruh Proses Reheating pada perubahan struktur mikro baja HSLA	26
Gambar 2.5	Batas Kelarutan Untuk baja Nb(C+12/14 N) sesuai hubungan rumus Irvine dkk	29
Gambar 2.6	Kinetika pelarutan endapan	31
Gambar 2.7	Pengaruh Temperatur Reheating terhadap besar butir austenit pada baja C dan baja HSLA	32
Gambar 2.8	Perbedaan temperatur kelarutan endapan paduan V,Al,Nb, dan T Nitrida dan pengaruhnya terhadap pertumbuhan butir abnormal[1]	32
Gambar 2.9	Pertumbuhan butir abnormal pada baja dengan butir halus dengan 0,4%C. Butir yang halus tidak berkembang karena masih mengandung partikel karbida yang tidak larut pada saat reheating.[2]	33
Gambar 2.10	Pengaruh partikel fasa kedua pada pertumbuhan butir [2]	37
Gambar 2.11	Ilustrasi pengaruh ukuran butir austenit terhadap pertumbuhan butir ferit	39
Gambar 2.12	Kurva rekristalisasi untuk baja paduan rendah (AISI 5140) dari butir awal berukuran 110 μm di deformasi dan di anil pada temperatur yang ditunjukkan pada laju regangan 1 s^{-1} (5).Kurva ini mengikuti persamaan Avrami	41
Gambar 2.13	Waktu 50% pelunakan untuk baja 0,03 Nb pada berbagai tingkat deformasi.	44
Gambar 2.14	Hubungan antara besar butir austenit dengan temperatur pemanasan dan prosentase Nb dalam baja	49
Gambar 2.15	Pengaruh prosentase Niobium terhadap temperatur pengkasaran butir baja[67]	49
Gambar 2.16	Peningkatan temperatur pengkasaran butir dari 4 jenis Baja paduan mikro dengan peningkatan prosentase paduan mikro	50
Gambar 2.17	Ilustrasi modifikasi butir austenit selama <i>controlled rolling</i>	53
Gambar 2.18	Ilustrasi Variabel Untuk Pendinginan Dalam Keadaan Kontinyu	55
Gambar 2.19	Ilustrasi pengaruh laju pendinginan terhadap ukuran butir	56
Gambar 2.20	Hubungan antara besar butir ferit setelah deformasi , rekristalisasi dan transformasi sebagai fungsi kecepatan pendinginan	56
Gambar 2.21	Ukuran butir fasa Ferit sebagai fungsi dari C_{eq} untuk baja C-Mn	58
Gambar 2.22	Hubungan antara besar butir Ferit yang meningkat, dengan semakin meningkatnya besar butir Austenit	62

Gambar 2.23	Pengambilan gambar endapan NbC dengan TEM pada baja HSLA – Nb, perbesaran 200.000 kali. Endapan berbentuk bulatan hitam	70
Gambar 2.24	Pengambilan gambar endapan NbC dengan TEM pada baja HSLA – Nb, perbesaran 50.000 kali. Endapan berbentuk bulatan hitam.	70
Gambar 2.25	Pengambilan gambar endapan NbC dengan TEM pada baja HSLA – Nb, perbesaran 100.000 kali. Endapan berbentuk bulatan hitam	71
Gambar 2.26	Pengambilan gambar endapan NbC dengan TEM pada baja HSLA – Nb, Endapan berbentuk bulatan hitam.	71
Gambar 3.1	Ilustrasi Bentuk dan Ukuran benda uji	73
Gambar 3.2	Siklus Termal yang Dialami Benda Uji	75
Gambar 3.3	Ilustrasi Pelaksanaan Pengujian	75
Gambar 3.4	Diagram Alir Penelitian	77
Gambar 3.5	Diagram Alir Pengamatan Besar Butir awal Austenit Prior	78
Gambar 3.6	Diagram Alir modifikasi model Kinetika pertumbuhan butir austenit prior setelah canai panas.	79
Gambar 3.7	Empat Siklus Pemanasan dalam penelitian	81
Gambar 3.8	Metode Intercept, dengan menggunakan garis berbentuk lingkaran dengan total panjang garis 500 mm, dengan foto perbesaran 100X	84
Gambar 3.9	Hubungan waktu dengan penurunan temperatur saat pendinginan	86
Gambar 4.1.	Siklus penurunan panas setelah proses canai untuk benda uji dummy yang didapat dengan alat acquisition data.	90
Gambar 4.2	Hubungan besar butir austenite terhadap temperatur pemanasan baja komposisi B.	92
Gambar 4.3	Hubungan diameter prior austenit dengan waktu tahan pemanasan pada temperatur 1200°C	93
Gambar 4.4	Struktur Mikro Baja komposisi A, Pemanasan Awal 1200°C, Laju Pendinginan 7,5°C/dtk, kuens ke Temperatur Ruang tsa 30% asam pikral + 1 tetes HCl+ 1 tetes Dodecyl Benzenessulfonat.	94
Gambar 4.5.	Struktur Mikro Baja komposisi A, Pemanasan Awal 1200°C, Laju Pendinginan 7,7°C/dtk, kuens ke Temperatur Ruang Etsa 30% asam pikral + 1 tetes HCl+ 1 tetes Dodecyl Benzenessulfonat	94
Gambar 4.6.	Struktur Mikro Baja komposisi A, Pemanasan Awal 1200°C, Laju Pendinginan 7,8°C/dtk, kuens ke Temperatur Ruang Etsa 30% asam pikral + 1 tetes HCl+ 1 tetes Dodecyl Benzenessulfonat.	95
Gambar 4.7	Struktur Mikro Baja komposisi A, Pemanasan Awal 1200°C, Laju Pendinginan 8°C/dtk, kuens ke Temperatur Ruang Etsa 30% asam pikral + 1 tetes HCl+ 1 tetes Dodecyl Benzenessulfonat	95
Gambar 4.8	Struktur Mikro Baja komposisi A, Pemanasan Awal 1200°C, Laju Pendinginan 8,1°C/dtk, kuens ke Temperatur Ruang Etsa 30% asam pikral + 1 tetes HCl+ 1 tetes Dodecyl Benzenessulfonat	96

Gambar 4.9	Struktur Mikro Baja komposisi A, Pemanasan Awal 1200°C, Laju Pendinginan 9°C/dtk, kuens ke Temperatur Ruang Etsa 30% asam pikral + 1 tetes HCl+ 1 tetes Dodecyl Benzenessulfonat.	96
Gambar 4.10	Struktur Mikro Baja komposisi B, Pemanasan Awal 1200°C, Laju Pendinginan 8,3°C/dtk, kuens ke Temperatur Ruang Etsa 30% asam pikral + 1 tetes HCl+ 1 tetes Dodecyl Benzenessulfonat	97
Gambar 4.11	Struktur Mikro Baja komposisi B, Pemanasan Awal 1200°C, Laju Pendinginan 7,9°C/dtk, kuens ke Temperatur Ruang Etsa 30% asam pikral + 1 tetes HCl+ 1 tetes Dodecyl Benzenessulfonat	97
Gambar 4.12	Struktur Mikro Baja komposisi B, Pemanasan Awal 1200°C, Laju Pendinginan 8°C/dtk, kuens ke Temperatur Ruang Etsa 30% asam pikral + 1 tetes HCl+ 1 tetes Dodecyl Benzenessulfonat .	98
Gambar 4.13	Struktur Mikro Baja komposisi B, Pemanasan Awal 1200°C, Laju Pendinginan 8,8°C/dtk, kuens ke Temperatur Ruang Etsa 30% asam pikral + 1 tetes HCl+ 1 tetes Dodecyl Benzenessulfonat	98
Gambar 4.14	Struktur Mikro Baja komposisi B, Pemanasan Awal 1200°C, Laju Pendinginan 9,3°C/dtk, kuens ke Temperatur Ruang Etsa 30% asam pikral + 1 tetes HCl+ 1 tetes Dodecyl Benzenessulfonat	99
Gambar 4.15	Struktur Mikro Baja komposisi B, Pemanasan Awal 1200°C, Laju Pendinginan 10,5°C/dtk, kuens ke Temperatur Ruang Etsa 30% asam pikral + 1 tetes HCl+ 1 tetes Dodecyl Benzenessulfonat	99
Gambar 4.16	Struktur Mikro Baja komposisi B, Pemanasan Awal 1200°C, Laju Pendinginan 10,5°C/dtk, kuens ke Temperatur Ruang Etsa 30% asam pikral + 1 tetes HCl+ 1 tetes Dodecyl Benzenessulfonat	100
Gambar 4.17	Struktur Mikro Baja komposisi C, Pemanasan Awal 1200°C, Laju Pendinginan 7,6°C/dtk, kuens ke Temperatur Ruang Etsa 30% asam pikral + 1 tetes HCl+ 1 tetes Dodecyl Benzenessulfonat	100
Gambar 4.18	Struktur Mikro Baja komposisi C, Pemanasan Awal 1200°C, Laju Pendinginan 8,5°C/dtk, kuens ke Temperatur Ruang Etsa 30% asam pikral + 1 tetes HCl+ 1 tetes Dodecyl Benzenessulfonat	101
Gambar 4.19	Struktur Mikro Baja komposisi C, Pemanasan Awal 1200°C, Laju Pendinginan 9,47°C/dtk, kuens ke Temperatur Ruang Etsa 30% asam pikral + 1 tetes HCl+ 1 tetes Dodecyl Benzenessulfonat	101`
Gambar 4.20	Struktur Mikro Baja komposisi C, Pemanasan Awal 1200°C, Laju Pendinginan 10,24°C/dtk, kuens ke Temperatur Ruang Etsa 30% asam pikral + 1 tetes HCl+ 1 tetes Dodecyl Benzenessulfonat	102

Gambar 4.21	Struktur Mikro Baja komposisi C, Pemanasan Awal 1200°C, Laju Pendinginan 11,4°C/dtk, kuens ke Temperatur Ruang Etsa 30% asam pikral + 1 tetes HCl+ 1 tetes Dodecyl Benzenessulfonat	102
Gambar 4.22	Struktur Mikro Baja komposisi C, Pemanasan Awal 1200°C, Laju Pendinginan 11,17°C/dtk, kuens ke Temperatur Ruang Etsa 30% asam pikral + 1 tetes HCl+ 1 tetes Dodecyl Benzenessulfonat	103
Gambar 4.23	Struktur Mikro Baja komposisi C, Pemanasan Awal 1200°C, Laju Pendinginan 12°C/dtk, kuens ke Temperatur Ruang Etsa 30% asam pikral + 1 tetes HCl+ 1 tetes Dodecyl Benzenessulfonat	103
Gambar 4.24	Struktur mikro baja A dengan HRSEM ,perbesaran 100.000 kali, etsa Nital 5%.	104
Gambar 4.25	Struktur mikro baja A dengan HRSEM ,perbesaran 50.000 kali, etsa Nital dan pengambilan komposisi kimia pada dua lokas dengan EDS	104
Gambar 4.26	Hasil pengujian komposisi kimia dengan EDS baja A.	105
Gambar 4.27	Struktur mikro baja C dengan HRSEM ,perbesaran 100.000 kali, etsa Nital 5% .	106
Gambar 4.28	Struktur mikro baja C dengan HRSEM ,perbesaran 50.000 kali, etsa Nital dan pengambilan komposisi kimia pada dua lokasi dengan EDS	106
Gambar 4.29	Hasil pengujian komposisi kimia dengan EDS baja C	107
Gambar 4.30	Nilai Ukur Butir rata-rata terhadap Kecepatan Pendinginan Baja A	109
Gambar 4.31	Nilai Ukur Butir rata-rata terhadap Kecepatan Pendinginan Baja B	110
Gambar 4.32	Nilai Ukur Butir rata-rata terhadap Kecepatan Pendinginan Baja C	110
Gambar 5.1	Plot Modifikasi Model Persamaan Dengan Eksperimen Baja A	124
Gambar 5.2	Plot Modifikasi Model Persamaan Dengan Eksperimen Baja B	125
Gambar 5.3	Plot Modifikasi Model Persamaan Dengan Eksperimen Baja C	125
Gambar 5.4	Hubungan besar butir austenit terhadap kecepatan pendinginan baja A hasil eksperimen, model empiris dan model matematis	128
Gambar 5.5	Hubungan besar butir austenit terhadap kecepatan pendinginan baja B hasil eksperimen, model empiris dan model matematis	129
Gambar 5.6	Hubungan besar butir austenit terhadap kecepatan pendinginan baja C hasil eksperimen, model empiris dan model matematis.	129

Gambar 5.7	Hubungan besar butir austenit terhadap kecepatan pendinginan baja baja A dan C hasil eksperimen dan model modifikasi	132
Gambar 5.8	Hubungan besar butir austenit terhadap kecepatan pendinginan baja B dan C hasil eksperimen dan model modifikasi	137
Gambar 5.9	Hubungan besar butir austenit terhadap kecepatan pendinginan baja A dan B hasil eksperimen dan, model modifikasi	139
Gambar 5.10	Model non-isothermal dan hasil eksperimen hubungan antara besar butir austenit terhadap kecepatan pendinginan setelah canai panas untuk baja komposisi A,B dan C	142



DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	<i>Roadmap</i> Penelitian Rekristalisasi Statik dan Pertumbuhan Butir Austenite Prior HSLA-Nb Menurut Dari Beberapa Peneliti Terdahulu	9
Tabel 2.1	Nilai Konstanta <i>Solubility Product</i>	28
Tabel 2.2	Konstanta Persamaan Pertumbuhan Butir untuk Berbagai Jenis Baja.	48
Tabel 2.3	Konstanta untuk persamaan ukuran butir fasa Ferit untuk Baja C-Mn	59
Tabel 2.4	Berbagai Jenis Etsa Untuk Menampakkan Batas Butir Austenit Prior	68
Tabel 4.1	Komposisi Kimia Baja HSLA-Nb pada penelitian (% berat)	88
Tabel 4.2	Hasil perhitungan Diameter Butir Austenit Pengaruh Temperatur Reheating	91
Tabel 4.3	Hasil Uji komposisi kimia baja A dengan metode EDS	105
Tabel 4.4	Hasil Uji komposisi kimia baja C dengan metode EDS	107
Tabel 4.5	Besar Butir Rata-Rata Austenit Prior Hasil Eksperimen	108
Tabel 5.1.	Senyawa yang terbentuk pada baja paduan mikro dan temperatur kelarutannya	114
Tabel 5.2	Perhitungan Besar Butir Austenit dengan Persamaan Pertumbuhan Butir Isotermal, dibandingkan dengan Hasil Eksperimen, Baja A	118
Tabel 5.3	Perhitungan Besar Butir Austenit dengan Persamaan Pertumbuhan Butir Isotermal, dibandingkan dengan Hasil Eksperimen, Baja B	119
Tabel 5.4	Perhitungan Besar Butir Austenit dengan Persamaan Pertumbuhan Butir Isotermal, dibandingkan dengan Hasil Eksperimen, Baja C	119
Tabel 5.5	Nilai B dan m Model Pertumbuhan Butir Austenit non-Isothermal	126
Tabel 5.6	Nilai B dan m Model Pertumbuhan Butir Austenit non-Isothermal secara Empiris dan Perhitungan Matematis	130
Tabel 5.7	Perbandingan Komposisi Baja A dan C (% berat) terhadap nilai konstanta B dan m	132
Tabel 5.8	Perbandingan Komposisi Baja B dan C (% berat) terhadap nilai konstanta B dan m	136
Tabel 5.9	Perbandingan Komposisi Baja A dan B (% berat) terhadap nilai konstanta B dan m	138
Tabel 5.10	Komposisi Baja Pada Penelitian oleh M.Militzer	143

DAFTAR LAMPIRAN

- A** Hasil Uji Komposisi Baja A,B dan C
- B** Perhitungan Temperatur Kelarutan Endapan Baja A,B dan C
- C** Berbagai Variasi Larutan dan Teknik Etsa Austenit Prior alam Penelitian
- D**
1. Struktur Mikro Beberapa Teknik Etsa dan Temperatur Pemanasan Awal(*Reheating*)
 2. Struktur Mikro Austenit Prior dengan Variabel Pengaruh Waktu Tahan *Reheating* pada 1200°C
- E** Contoh Metode Perhitungan Ukuran Butir Austenit Dengan Metode Intercept ,ASTM E112.
- F** Hasil Perhitungan Diameter Butir Austenit Dengan Variabel Waktu *Reheating* pada Temperatur 1200°C.
- G** Hasil Perhitungan Deviasi Standar Perhitungan Besar Butir Austenit Variabel waktu Tahan *Reheating*.
- H**
1. Struktur Mikro Baja A
 2. Struktur Mikro Baja B
 3. Struktur Mikro baja C
- } Berbagai Kecepatan Pendinginan
- I** *Data Temperature Acquisition* Baja A B dan C
- J**
1. Perhitungan D_{rek}
 2. Perhitungan Besar Butir Austenit Prior hasil Eksperimen
 3. a. Perhitungan Besar Butir Austenit Prior Baja A , Persamaan Isotermal.
b. Perhitungan Besar Butir Austenit Prior Baja A , Persamaan non-Isotermal.
 4. a. Perhitungan Besar Butir Austenit Prior Baja B , Persamaan Isotermal
b. Perhitungan Besar Butir Austenit Prior Baja B , Persamaan non-Isotermal
 5. a. Perhitungan Besar Butir Austenit Prior Baja C , Persamaan Isotermal.
b. Perhitungan Besar Butir Austenit Prior Baja B , Persamaan non-Isotermal

- K** Simpangan Baku rata-rata Pada Pengukuran Besar Butir Austenit.
- L** Penyelesaian Model Matematis Non-Isotermal Wanjun dkk[89]
- M** Perbandingan Penyimpangan Perhitungan Besar Butir Austenit Isotermal dan Non-Isotermal
- N** Peralatan Canai Panas dan Kontrol Pendinginan dalam Pengujian



BAB I PENDAHULUAN

I.1. Latar Belakang Masalah

Baja paduan rendah berkekuatan tinggi (*high strength low alloy, HSLA steel*) merupakan baja paduan rendah dengan kekuatan tinggi. Baja ini memiliki sifat-sifat yang sangat dibutuhkan di industri manufaktur seperti mudah dibentuk, dilas, sangat ulet serta mempunyai kekuatan yang tinggi. Disamping itu yang sangat menguntungkan adalah karena baja HSLA memiliki bobot yang lebih ringan sehingga sangat sesuai untuk aplikasi transportasi dan disain struktur.

Untuk mencapai kekuatan tertentu umumnya baja dikeraskan dengan proses *quenching* dan *temper*. Didorong dengan adanya krisis energi global, upaya penghematan energi dalam proses produksi terus dilakukan. Untuk industri otomotif, penggunaan baja ini sangat membantu dalam konservasi energi, karena untuk mencapai kekuatan yang sama dapat dicapai dengan pemakaian konstruksi baja yang lebih tipis. Baja HSLA umumnya dibentuk melalui pembentukan canai panas (*Hot Forming*) dan saat ini telah diproduksi oleh industri-industri baja nasional. Tuntutan kebutuhan material berkekuatan tinggi ini mendorong untuk terus ditingkatkannya sifat mekanis baja HSLA yaitu antara lain dengan kontrol terhadap proses canai panas, sehingga didapat geometri dan struktur mikro yang dapat memenuhi kebutuhan tersebut.

Kualitas material baja HSLA hasil canai panas dipengaruhi oleh beberapa faktor internal dan eksternal. Faktor internal material antara lain:

- Komposisi kimia material
- Proses produksi material
- Ukuran butir awal material

Sedangkan faktor eksternal material antara lain:

- Temperatur pemanasan awal (*reheating*)
- Temperatur deformasi
- Laju deformasi
- Persentase deformasi

Sifat mekanis yang tinggi dari baja HSLA bergantung dari mikrostruktur akhir yang terbentuk. Pengontrolan mikrostruktur yang baik merupakan cara yang efektif untuk mendapatkan baja HSLA dengan sifat mekanis yang diharapkan. Struktur butir yang diinginkan pada mikrostruktur akhir bergantung pada butir yang terbentuk selama proses pemanasan awal (*reheating*), dimana untuk mendapatkan butir ferit yang halus, maka harus terbentuk butir austenit yang berukuran kecil saat proses pemanasan awal [1]. Untuk itu dibutuhkan suatu proses yang dapat merancang mikrostruktur baja HSLA selama proses pemanasan awal (*reheating*), canai panas (*hot rolling*), serta pendinginan (transformasi akhir). Proses tersebut dicapai dengan berbagai studi pembuatan model pada proses canai panas (*Modelling Study for Hot Rolling Process*) [2].

Beberapa parameter penting dalam mengontrol besar butir austenit pada saat proses canai panas adalah dengan mengontrol:

1. Temperatur dan waktu tahan *reheating*
2. Temperatur dan persentase deformasi canai panas
3. Waktu tahan sebelum pendinginan
4. Kecepatan pendinginan akhir

Kedua butir terakhir umumnya dilakukan untuk mengontrol pertumbuhan butir austenit setelah canai panas. Butir austenit yang terdeformasi setelah canai panas ini pertama kali akan mengalami proses pemulihan (*recovery*), rekristalisasi dan pertumbuhan butir (*grain growth*). Apabila butir austenit sempat tumbuh menjadi besar, maka butir ferit akhir yang dihasilkan setelah transformasi juga akan memiliki ukuran yang besar, dan sifat mekanisnya akan turun [1]. Oleh sebab itu, perlu dilakukan suatu penelitian komprehensif terhadap kinetika pertumbuhan butir austenit setelah canai panas, agar didapat sifat mekanis yang maksimal. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan masukan dalam produksi baja yang bernilai tambah (*added value steel*) HSLA sehingga dapat diprediksi kekuatan akhir dari produk canai panas. Dengan kemampuan ini maka diharapkan diperolehnya kekuatan yang optimum serta efisiensi produksi yang meningkat, yang pada akhirnya mampu memenuhi kebutuhan industri manufaktur.

Pada saat ini harga baja dunia cenderung menurun akibat intervensi dari produk baja China. Nilai jual produk baja *hot Rolled Coil (HRC)* China yang saat ini telah masuk ke Indonesia adalah dibawah US\$750 /matrix ton, sedangkan nilai jual produk baja dalam negeri saat ini masih berada pada nilai US\$750/matrix ton. Diperkirakan surplus produksi baja HRC dunia mencapai 15 juta ton. Jika Industri dalam negeri dapat mengambil langkah antisipasi dalam meningkatkan efisiensi produksi baja HSLA, maka diharapkan dapat lebih kompetitif terhadap baja produksi luar negeri yang saat ini menguasai pasar Indonesia.

Dalam penelitian ini akan diteliti pertumbuhan butir austenit awal (*prior austenit*) yang telah dilakukan oleh peneliti- peneliti sebelumnya seperti Beck [2, 3], Sellars [2], dan Manohar [3], Namun pada umumnya, pendekatan kinetika pertumbuhan butir dilakukan dengan asumsi bahwa pertumbuhan terjadi pada kondisi isothermal. Sedangkan kondisi nyata di industri, pendinginan terjadi secara kontinyu selama proses, sehingga persamaan tersebut kemungkinan tidak sesuai untuk aplikasi di lapangan, sehingga kualitas produk baja amat berfluktuasi, atau tidak konsisten. Oleh sebab itu penelitian ini juga bertujuan untuk mendapatkan model empiris non-isothermal yang lebih aplikatif untuk kondisi lapangan. Diharapkan model empiris kinetika pertumbuhan butir setelah canai panas yang dihasilkan dalam penelitian ini, dapat dipergunakan untuk pencapaian spesifikasi produk yang direncanakan.

I.2. Tujuan Umum Penelitian

Tujuan umum penelitian ini adalah untuk mendapatkan pendekatan teori metalurgi mekanik dan fisik dalam bentuk model empiris kinetika pertumbuhan butir austenit prior baja HSLA setelah proses canai panas pada kondisi pendinginan kontinyu yang terjadi setelah proses rekristalisasi statik.

Luaran penelitian ini memiliki manfaat untuk dapat digunakan untuk:

1. Mengevaluasi hubungan ukuran butir austenit yang terbentuk dengan waktu dan kecepatan pendinginan tertentu setelah proses canai panas baja HSLA-Nb.
2. Memprediksi kekuatan baja HSLA-Nb dalam proses canai panas.
3. Mengurangi *trial and error* dalam proses produksi praktis di lapangan.

4. Mengontrol kualitas (QC) proses pembuatan baja HSLA sehingga diperoleh produk dengan spesifikasi yang konsisten.

I.3. Tujuan Khusus Penelitian

Secara khusus, penelitian ini bertujuan untuk:

1. Mendapatkan model empirik kinetika pertumbuhan butir austenit baja jenis HSLA-Nb pada kondisi non-isothermal setelah proses canai panas dan rekristalisasi statik.
2. Memperbaiki proses rekayasa butir baja HSLA-Nb produk proses canai panas yang berasumsi bahwa kondisi selama proses pertumbuhan butir berada pada temperatur konstan (kondisi isothermal) menjadi lebih mendekati kondisi proses yang bersifat non-isothermal.
3. Mendapatkan hubungan empiris antara deformasi, kecepatan pendinginan dan waktu pendinginan kontinyu dengan besar butir austenit prior.

I. 4. Hipotesis

1. Pencapaian sifat mekanis tertentu pada baja HSLA ditentukan oleh komposisi, fasa/ struktur mikro baja dan ukuran butir dan kondisi proses.
2. Kinetika pertumbuhan butir austenit prior baja HSLA setelah canai panas dalam kondisi non-isothermal akan berbeda dibandingkan pertumbuhan butir dalam kondisi isothermal dan tanpa deformasi seperti yang dirumuskan oleh Sellars dkk [2] yang didasarkan rumus Avrami.
3. Besar Butir austenit awal yang lebih besar, memiliki kinetika pertumbuhan butir yang lebih rendah pada kondisi proses yang sama.
4. Dengan berdasarkan model pertumbuhan butir isothermal dan teori aditivitas (siklus penurunan temperatur dibagi menjadi tahap-tahap waktu beberapa temperatur isothermal), akan didapat suatu model untuk memprediksi ukuran butir austenit dari saat keluar dari proses canai hingga sesaat sebelum bertransformasi menjadi fasa ferit pada pendinginan kontinyu.

I.5. Perumusan Masalah

Kualitas dan kekuatan baja HSLA ditentukan, baik faktor intrinsik (komposisi kimia, riwayat manufakturnya, besar butir austenit prior sebelum dan beberapa waktu setelah canai), dan juga ditentukan faktor ekstrinsik (temperatur *reheating* dan deformasi, laju deformasi, persentase deformasi, kecepatan pemanasan dan pendinginan). Hal ini telah diteliti oleh Militzer [4] yang melakukan penelitian terhadap baja A 36 (0.17% C, 0,74% Mn) juga terhadap baja DQSK (0,038% C, 0,3% Mn) dengan kondisi pemanasan *reheating* terhadap kinetika pertumbuhan butirnya. Didapatkan hasil bahwa butir dengan laju pemanasan *reheating* yang lebih lambat akan menghasilkan ukuran butir austenit yang lebih besar .

Model kinetika pertumbuhan butir yang diajukan dari para peneliti *Thermo Mechanical Treatment* pada umumnya membahas pertumbuhan butir austenit prior dalam kondisi isothermal [3,5] dan sebagian besar mengamati proses rekristalisasi dan pertumbuhan butir setelah deformasi dengan metode yang bukan canai panas, seperti; kompresi [6], torsi [2, 7-8], tempa (*forging*) [9]. Pada Industri baja dalam bentuk lembaran maupun batang, proses deformasi yang dilakukan adalah proses canai panas, dan kondisi atmosfer setelah canai adalah atmosfer ruang yang bukan pada temperatur konstan, melainkan pendinginan kontinu hingga ke temperatur ruang. Sehingga model pertumbuhan butir yang telah ada perlu dikaji agar lebih sesuai untuk kondisi aplikasi. Konsep pada penelitian ini adalah mendapatkan model kinetika pertumbuhan butir setelah canai dan rekristalisasi statik pada kondisi non-isothermal.

Adanya unsur paduan mengakibatkan parameter proses deformasi canai panas sering mengalami perubahan untuk tercapainya komposisi struktur mikro akhir dan besar butir struktur mikro akhir tertentu setelah dilakukan proses deformasi panas. Besar butir struktur mikro akhir ditentukan oleh besar butir baja saat dilakukan pemanasan awal (*reheating*). Dengan diketahui besar diameter butir γ awal sebelum deformasi, didapat besar butir austenit setelah waktu tahan tertentu setelah deformasi dan pada pendinginan kontinu dari temperatur

deformasi. Juga akan dikaji kesesuaian antara model pertumbuhan butir yang ada dengan hasil eksperimen .

Untuk mendapatkan hasil yang baik, penelitian ini tetap berdasarkan penelitian pertumbuhan butir austenit terdahulu yang telah dilakukan, dan melakukan penyesuaian parameter kondisi yang belum diperhitungkan.

Dengan didapatnya model kinetika pertumbuhan butir austenit yang tepat, akan didapat prediksi hubungan antara parameter proses, komposisi kimia baja dengan struktur mikro dan sifat mekanis akhir yang sesuai kebutuhan, dan dapat menekan *trial and error* dalam produksi yang mengakibatkan tingginya biaya produksi..

I.6. Ruang Lingkup.

1. Bahan yang diteliti adalah baja HSLA-Nb dengan komposisi Nb yang berbeda antara 0,01-0,06% berat
2. Model kinetika pertumbuhan butir setelah rekristalisasi statik akibat regangan dibuat melalui deformasi jenis canai panas (*rolling mill*).
3. Model yang dimodifikasi dibuat oleh peneliti terdahulu melalui deformasi gaya tekan (*compression*) dan gaya torsi. (*torsion*) pada kondisi isothermal
4. Temperatur pemanasan awal pada proses canai panas menggunakan persamaan *solubility products* dari Irvine [10]: $\log [W_{Nb}] [W_C + 12/14 W_N] = 2,26 - 6770/T$
5. Proses deformasi dilakukan pada temperatur deformasi di atas 900°C, seperti pada temperatur *roughing* di industri baja.
6. Waktu penahanan setelah canai panas dilakukan pada rentang waktu dari 10–40 detik setelah canai untuk mendapatkan kecepatan pendinginan yang berbeda.
7. Pengamatan struktur mikro untuk mengukur besar butir austenit sebelum dan sesudah deformasi dilakukan dengan teknik metalografi mengikuti standar ASTM E112 (Metode Metalografi Kuantitatif *Intercept*). Batas butir austenit prior didapat dengan melakukan uji coba menggunakan berbagai teknik etsa. Pengamatan dengan *High Resolution Scanning*

Electron Microscope (HRSEM) berkapasitas hingga perbesaran 800.000 kali dilakukan untuk melihat konfirmasi adanya partikel endapan.

8. Uji canai dilakukan dengan mesin rol skala lab ONO-Japan , dengan kapasitas 20 ton.

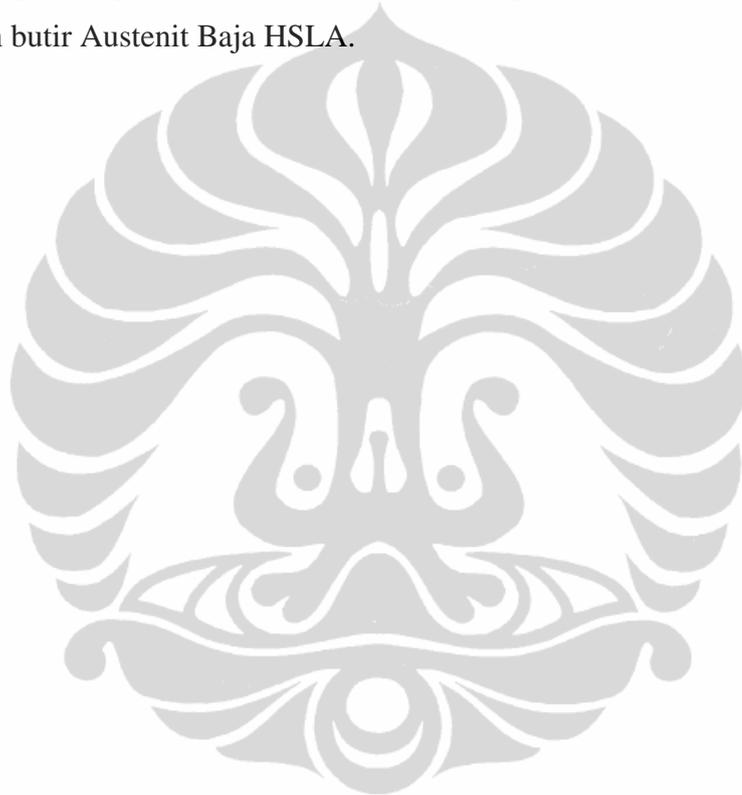
1.7. *State of The Art Penelitian*

Untuk memenuhi kebutuhan bahan dengan spesifikasi tinggi, diperlukan material dengan rasio tinggi antara sifat mekanik dan berat . Untuk itu berbagai penelitian untuk mengontrol struktur mikro selama proses pembentukan atau studi rekayasa butir pada proses *Thermo Mechanical Process* (TMT) terhadap logam terus dikembangkan. Penelitian bidang rekayasa butir pada proses TMT dilakukan dengan berbagai metode deformasi, seperti kompresi, tempa, torsi dan rolling, terhadap berbagai aspek TMT, seperti pengaruh variabel proses seperti temperatur pemanasan awal (*reheating*), deformasi , kecepatan pendinginan dan lain-lain. Penelitian juga dilakukan pada berbagai tahap deformasi, seperti tahap pemanasan awal (*reheating*), fraksi rekristalisasi, waktu dan temperatur statik atau dinamik rekristalisasi, atau pertumbuhan butir . Pada penelitian TMCP , porsi terbesar adalah studi rekristalisasi pada baja yang telah mengalami proses deformasi.

Dalam studi rekristalisasi, sebagian besar membahas proses rekristalisasi statik ,karena pada aplikasi proses deformasi dilakukan dalam beberapa tahap sehingga deformasi pada umumnya dilakukan pada $\epsilon < 0,3-0,4$. Studi rekristalisasi statik juga dibahas dalam penelitian mengenai perubahan struktur mikro selama proses deformasi.Tahapan dalam proses rekristalisasi berlanjut dengan pertumbuhan butir setelah terjadi proses rekristalisasi.

Penelitian pertumbuhan butir pada proses canai panas sebagian besar membahas pertumbuhan butir pada kondisi isothermal, yaitu yang terjadi selama proses *reheating*. Pertumbuhan butir yang terjadi pada tahap setelah deformasi banyak dilakukan dengan asumsi bahwa temperatur setelah canai sama dengan temperatur deformasi, sehingga persamaan yang digunakan tetap menggunakan persamaan yang didapat pada kondisi isothermal. Beberapa peneliti melakukan pengamatan pertumbuhan butir pada kondisi non-isothermal, untuk kondisi

reheating, dengan menggunakan perubahan konstanta pada persamaan pertumbuhan butir isothermal. Pada penelitian ini serangkaian eksperimen dilakukan terhadap baja HSLA-Nb untuk mendapatkan kinetika pertumbuhan butir dalam kondisi non-isothermal, berdasarkan persamaan pertumbuhan butir isothermal, dengan melibatkan faktor kecepatan pendinginan kedalamnya. Kinetika pertumbuhan butir austenit dalam kondisi non-isothermal diperkirakan akan berbeda dengan kondisi isothermal. Tabel 1.1. di bawah merupakan ringkasan tinjauan penelitian terdahulu terhadap rekristalisasi statik dan pertumbuhan butir Austenit Baja HSLA.



Tabel 1.1. Roadmap Penelitian Rekristalisasi Statik dan Pertumbuhan Butir Austenite Prior HSLA-Nb Menurut Dari Beberapa Peneliti Terdahulu

No	Peneliti	Material dan Metode	Hasil
1	LQ Ma, ZY Liu, S.H Jiao, XQ Yuan and D.Wu, 2006 [11]	C-Mn-Nb 0,01-0,038 Isothermal double hit compression test. Reheat, tahan 3 menit, temp 800-1000°C, tahan 30 detik, def 0,3, tahan pada temp deff 0,1-400 detik, def yang kedua dengan def sama. Softening dilihat dari stress-strain curve dan metalografi.	Didapat besaran Konstanta pada persamaan statik rekristalisasi.
2.	J.Wang, J.Chen, Z.Zhao and XY Ruan, 2006 [6]	Baja C-Mn-Si, Double hit compression test, untuk statik Rec, dan single Compression test untuk dynamic rec. Spesimen dipanaskan ke temp reheating 1050°C, tahan 3 menit, dinginkan ke temp def (900-1100), dicompress sekitar dg var regangan 0,2-0,5), ditahan pada temperatur deformasi antara 3-120 detik, kemudian dicompress kembali.	Didapat persamaan kinetika rekristalisasi statik empiris dan eksperimen
3	Yang H Bae, Jae sang Lee, Jong Kyo Choi, Wong Yong Choo and Soon H.Hong, 2004 [12]	Baja C—Mn-Si-Nb 0,004, simulasi thermomekanik dilakukan dengan mesin Gleeble 1500 dengan compressed def untuk mensimulasi rute proses rolling, besar regangan. Prosedur adalah austenisasi temp sekitar 1200°C, yang pertama langsung didinginkan, yang kedua didef pada temp rec, didinginkan dan yang ketiga didef pada temp nonrecrystallization, diamati transformasi menjadi ferit.	Didapat hubungan antara deformasi dengan luas permukaan butir austenite, transformasi akibat regangan (<i>strain induced transformation</i>), transformasi dengan pengintian pada batas antar fasa.
4	J.Kliber, I.Schindler, Dept of Materials Forming, 1996 [13]	Naja HSLA Nb,V,Ti antara 0,01 hingga 0,1 persen berat. Pengujian dengan deformasi torsi kontinyu dan interupsi dilakukan pada temp 850-900°C, setelah pemanasan 1150°C selama 1,5 menit. Didapat hubungan antara rekristalisasi dan presipitasi.	Didapat nilai eksponen deformasi yang sedikit berbeda dengan persamaan perhitungan. Didapat nilai temp stop rekristalisasi.
5	Z.Kedzierski, Mpadko, A Skolyszewsky, A Zielinska-Lipiec, H Kusiak, 1996 [14]	HSLA- Nb, reheating 1250°C, tahan 15 menit, dinginkan ke temperatur deformasi, kemudian dilakukan deformasi dengan deformasi antara 0,2-0,3, dilakukan drawing, kemudian diquench. Siklus deformasi drawing, suhu dan persentase deformasi dilakukan dengan siklus yang berbeda, dan dimasukkan dalam rumus Sellars dan	Didapat perbandingan nilai kinetika rekristalisasi antara hasil eksperimen dan model Dutta & Sellars dan Hodgson

		Hodgson yang dimasukkan dalam finit elemen. Hasil hitungan finit elemen dan hitungan hasil eksperimen dibandingkan.	
6	L.J.Cuddy, J.J.Brown, and J.C. Raley, 1980 [15]	Perbandingan baja C-Mn, V-N rendah, V-N tinggi., NbN, AlN, Metode yang digunakan untuk deformasi adalah kompresi.Sampel dipanaskan 1200°C 30 menit didinginkan terkontrol, digunakan starin rate tinggi (10 hingga 30/s) untuk simulasi rolling pass. Setelah dilakukan beberapa pass hingga 12 pass, didapat rekristalisasi austenit yang terjadi.	Didapat pendekatan hubungan variabel proses dan komposisi baja terhadap kondisi butir austenite pada beberapa titik prosedur canai panas.Didapat deviasi dalam percobaan cukup besar
7	J.N.Cordea and R.E.Hook, 1970 [16]	Baja HSLA V-Cb, dengan mesin gleeble strech., dengan variabel % deformasi, temperatur deformasi , dan waktu tahan rekristalisasi. Dilihat bahwa Coloumbium lebih besar pengaruhnya untuk menghalangi rekristalisasi.	Didapat laju rekristalisasi untuk baja vanadium dan coloumbium , lebih lambat disbanding baja karbon.
8	Sellars, 1981 [1]	Baja C-Mn, Low alloy dan HSLA-Nb, Didapat hubungan antara onzet rekristalisasi dinamik, kinetika rekristalisasi statik, besar butir hasil statik rekristalisasi dalam kondisi hot working. Model ini untuk memprediksi perubahan struktur mikro selama canai panas plat dan strip.	Didapat review dari perilaku struktur mikro baja selama canai panas.
9.	PA Manohar,DP Dunne, T Chandra and CR Killmore, 1996[4]	Validasi terhadap model prediksi pertumbuhan butir untuk baja HSLA-Ti-N. Pertumbuhan butir model yang ada tidak mengakomodasi pertumbuhan butir abnormal. Didapat model pertumbuhan butir yang dimodifikasi untuk HSLA Ti, Ti-Nb, Ti-Nb-Mo.	Didapat persamaan pertumbuhan butir yang mengakomodasi pertumbuhan butir abnormal, dengan kondisi yang isothermal.
10	D.C. Houghton,1993 [17]	Baja mikroalloy Ti,Nb,V , dianalisa dengan dasar termodinamik dan didapat antara lain tem kelarutan Carbide atau Carbonitride, yang gunanya untuk mengetahui pada temperatur atau waktu berapa endapan akan terbentuk dari austenite atau larut dalam austenite	Didapat persamaan kelarutan karbida atau karbonitrida, serta komposisi kirnia dari endapan yang terbentuk
11	E.V Pareloma, BR Crawford, PD Hodgson, 2001 [18]	Baja C,Mn,Si,Nb 0,037 dilihat efek strain Induced Precipitation baik secara eksperimen maupun model prediksi.Dilihat pengaruh waktu tahan dan temperatur isothermal, pengaruh temperatur deformasi pada laju pendinginan tinggi dan rendah, dilihat pengaruh multiple pancaking deformasi Metode deformasi digunakan kompresi dengan menggunakan mesin tekan.	Didapat model waktu mulainya pengendapan pada kondisi isothermal,dan dibandingkan dengan eksperimen.

12	P.D. Hodgson [19]	Baja HSLA –Nb 0,03, 0,013, 0,019, dipanaskan 1250°C selama 5 menit, dinginkan ke 1000°C yang merupakan temp roughing, lalu dilakukan deformasi dengan mesin torsi panas dengan 2 regangan, lalu diquench, didinginkan ke temp deformasi, ditahan 10 detik, dan kemudian dilakukan deformasi dengan dua tingkat regangan, untuk menentukan rekristalisasi yang terjadi saat penahanan pada temp diantara 2 deformasi	Didapat kinetika rekristalisasi pada kondisi isothermal
13	XG Zhou, ZY Liu and D Wu, Z Li, CM Li, 2006 [20]	Baja HSLA-Nb-C-Mn-Si diamati kinetika presipitasi dari austenite dengan variabel regangan dan komposisi kimia Si dan Mn pada temperatur yang berbeda,. Teory nukleasi dan solubility product Nb,C dan Nitrogen dalam austenit digunakan untuk mendpt waktu awal presipitasi sebagai fungsi dari temperatur dan komposisi. Nilai n dari Avrami dihitung dg data eksperimen dan dari data eksp peneliti terdahulu. Waktu awal dan akhir presipitasi prediksi dibandingkan dengan eksperimen. Teknik Def menggunakan kompresi	Didapat model untuk menghitung waktu mulai dan waktu berakhir terbentuknya presipitat, dan dibandingkan dengan hasil eksperimen, yang menunjukkan kesesuaian antara keduanya.
14	S.F. Medina, 1995 [21]	Baja HSLANb,C-Mn-Si dalam 2 komposisi berbeda % Nb diteliti kinetika static recrystallization dan strain induced Precipitation dengan menggunakan pengujian torsi. .	Didapat Temperatur kritis Statik rekristalisasi, atau temperatur dimana terjadi mulainya penghambatan rekristalisasi statik akibat terjadinya strain Induced Precipitat.
15	Martin C Mataya, Eric R Nilsson, Elliot L Brown and George Krauss [22]	Stainless Steel 316L dilakukan Deformasi dengan kompresi pada sampel silinder dengan berbagai temperature deformasi dan penahanan pada temperatur deformasi pada berbagai waktu.	Didapat kinetika rekristalisasi statik untuk berbagai siklus proses thermo mekanik.
16	Jose Enrique Garcia Gonzales, 2002 [23]	Beberapa jenis Baja HSLA dilakukan simulasi variabel proses thermomekanik, dan dievaluasi pengaruhnya terhadap struktur mikro,metalurgi fisik dan sifat mekaniknya.	Didapat hubungan variabel proses termomekanik dengan struktur mikro dan sifat mekanik baja.
17	M. Kazeminezhad, 2007 [24]	Sampel Copper yang dideformasi dengan butir awal yang berbeda diteliti rekristalisasi statik,. Model empiris ini dibandingkan dengan model interaksi ukuran butir-dislokasi dan simulasi monte Carlo.	Didapat hubungan antara ukuran butir awal dengan waktu 50% rekristalisasi dan ukuran butir rekristalisasi.

18	B. Dutta, E J Palmiere 2003 [25]	Penelitian dilakukan terhadap baja HSLA-Nb selama pengerjaan panas, diamati kinetika rekristalisasi statik dan terbentuknya endapan karbonitrida. Konsentrasi penelitian terletak pada pengaruh prestrain dan temperature deformasi terhadap statik rekristalisasi. Deformasi dilakukan dengan kompresi, pada beberapa temperatur deformasi dan % deformasi.	Didapat kinetika rekristalisasi statik pada rentang prestrain dan temperatur deformasi.
19	S. Mishra and T. DebRoy, 2006 [26].	Mengkaji berbagai teori pertumbuhan butir isothermal, juga teori dan eksperimen yang menyangkut unsur proses yang non-isothermal, teori numerik dan aplikasinya pada system yang non-isothermal.	Didapat progress pengertian pertumbuhan butir non-isothermal dan di simpulkan dalam bentuk rancangan riset dimasa yang akan datang, untuk para ilmuwan dan pelaku industri dalam berbagai operasi proses metal pada kondisi non-isothermal.
20	H.R. Wang and W. Wang, 2008 [27]	Baja yang direview adalah baja Nb, Nb-Ti dan Ti-V. Kondisi adalah dalam kondisi reheating, dilihat hubungan gaya penghalang dari endapan dengan pergerakan batas butir.	Didapat model untuk memprediksi hubungan waktu dan temperatur terhadap diameter partikel, yang akan mempengaruhi besar butir austenite, pada saat reheating. Pada baja dengan paduan mikro Ti.
21	S. Akta, G.J. Richardson and S.M Sellars, 2005 [28]	Bahan baja HSLA dg Si 3%, dilakukan roll 30% per pass, temperatur rolling 1100, 1000, 900 dan 800°C sebanyak dua pass, setelah canai dilakukan anil 1000 dan 1100°C dengan variabel waktu tahan.	Didapat model kinetika rekristalisasi statik butir austenite dalam kondisi isothermal, pengaruh temperature canai.
22	S. Akta, G.J. Richardson and S.M Sellars, 2005 [29]	Bahan baja HSLA dg Si 3%, deformasi canai, 0,35 deformasi. Rekristalisasi dilakukan pada kondisi isothermal.	Didapat kinetika rekristalisasi statik butir austenite dalam kondisi isothermal, dengan pengaruh regangan butir awal
23	S. Akta, G.J. Richardson and S.M Sellars, 2005 [30]	Didapat hubungan waktu dan % butir terekristalisasi, pada kondisi isothermal, yaitu anil 900°C setelah rolling, didapat pengaruh diameter awal terhadap waktu rekristalisasi 0,3 fraksi volume, juga pengaruh diameter awal terhadap fraksi rekristalisasi.	Didapat kinetika rekristalisasi statik butir austenite dalam kondisi isothermal, dengan pengaruh diameter butir awal terhadap waktu rekristalisasi.
24	T. Jia, Z.Y. Liu, X.Q. Yuan, X.H. Liu and G.D. Wang, 2007	Baja 0,1% C dg variabel % Nb, dilakukan pengukuran % transformasi austenit menjadi ferit, Baja direheating	Didapat hubungan antara persamaan transformasi isothermal dan non-

	[31]	1200°C, didinginkan ke 900°C dg Cr 5°C/s, ditahan 20 s dan didinginkan ke temperatur 200°C dengan Cr yang berbeda antara 0,5-5°C. Persamaan transformasi isothermal dibandingkan dengan hasil eksperimen.	isothermal dari austenite ke fasa ferit
25	A.R. Salehi, S. Serajzadeh, A Karimitaheri, 1925 [32]	Bahan HSLA, dual Phasa,dengan proses canai, variabel proses seperti temperatur awal,waktu tahan,kecepatan rol,kondisi pendinginan. Dilakukan pengukuran sifat mekanis dan mikrostruktur. Kesimpulan didapat kecepatan rol mempengaruhi struktur mikro akhir dan juga sifat mekanis.Didapat dual phase bisa didapat dengan temperatur awal 900°C, ditahan 30 menit, strain rate 3.8/s dan pendinginan 250°/s. Belum ada hubungan parameter proses denganbesar butir austenit prior.	Didapat kondisi proses optimum untuk mendapatkan dual phasa. Didapat hubungan antara kecepatan canai denga prosentase mikrostruktur akhir dan sifat mekanis.
26	E. Schmidt, Y. Wang, and S. Sridhar, 2006 [33]	Baja 0,38%C, dilakukan pengukuran transformasi austenit pada kondisi pemanasan isothermal. Studi menggunakan SEM.	Didapat kinetika transformasi austenite pada kondisi isothermal.
27	D. Liu, F. Fazeli, M. Militzer, W. J Poole, 2007[34]	Bahan Baja Mo-TRIP (Transformation Induced Pasticity), pada kondisi hot strip Rolling. Penelitian termasuk pertumbuhan austenite selama reheating, perilaku deformasi dan kinetika statik rekristalisasi dari austenit. Rumus JMAK (John,Mehl-Avrami,Kolgomogorov) digunakan untuk prediksi rekristalisasi statik . Alat yang digunakan adalah mesin Gleeble 3500, kekuatan mekanik yang diberikan adalah torsi.	Didapat persamaan kinetika rekristalisasi satatik Baja Mo-TRIP
28	S. Jiao, J. Penning, F. Leysen, Y. Houbaert and E. Aernoudt, 2000 [35]	Baja Karbon rendah Si-Mn,TRIP, dipanaskan dengan kontinyu sampai temperatur reheating dan di quench dan dilihat perubahan butir austenit	Didapatkan model pertumbuhan butir dalam kondisi reheating kontinyu, dengan berdasarkan model kinetika transformasi fasa pada kondisi pemanasan dan pendinginan kontinyu
29	A. ZUFIA and J. Manuel LLANOS, 2001 [36]	Dilakukan simulasi matematis untuk kawat baja yang dideformasi dan mengalami pendinginan setelah deformasi. Rumus dasar tetap menggunakan Sellars , dengan memasukkan unsur perubahan temperatur. Besar butir yang dimasukkan berdasarkan asumsi dengan menggunakan atlas diagram CCT.	Didapat pendekatan rekristalisasi statik berdasarkan persamaan avrami dan pertumbuhan butir berdasarkan Sellars .

Dari tabel 1.1 di atas, terdapat beberapa penelitian yang mengamati kinetika rekristalisasi antara lain dilakukan oleh; LQ Ma dkk[11], yang dilakukan terhadap baja C-Mn-Nb, dan J.Wang dkk[6], yang dilakukan terhadap baja C-Mn. Kedua peneliti ini melakukan deformasi dengan proses kompresi untuk mendapatkan persamaan kinetika rekristalisasi baja tersebut. Peneliti lain yang mendapatkan persamaan kinetika rekristalisasi dengan deformasi kompresi adalah L.J. Cuddy[15], yang membandingkan kinetika rekristalisasi baja C-Mn, V-N rendah, V-N tinggi, NbN, AlN, dan didapat persamaan kinetika rekristalisasi dari setiap tipe baja tersebut. Demikian juga Martin C Mataya dkk[22], juga meneliti kinetika rekristalisasi statik dari Stainless Steel 316 dengan deformasi menggunakan gaya kompresi. Dutta dkk[25], mendapatkan pengaruh regangan awal dan temperatur deformasi kompresi terhadap kinetika rekristalisasi statik baja HSLA-Nb.

Selain dengan pembebanan kompresi, studi rekristalisasi juga dilakukan dengan penerapan beban lain, yang dilakukan oleh J.N Cordeiro dkk[16], yang memberikan deformasi menggunakan alat Gleeble *stretch*, sehingga rekristalisasi dapat dihitung dari efek pelunakan yang ditimbulkan. Demikian juga dengan Dongsheng Liu [34] mendapatkan kinetika rekristalisasi baja Mo-TRIP dengan simulasi pembebanan dengan alat Gleeble.

Studi rekristalisasi statik yang menggunakan deformasi dengan proses roll panas adalah S.Akta dkk [28, 29, 30] yang ditinjau dari beberapa aspek yang berbeda, seperti kondisi tegangan, pengaruh parameter deformasi, pengaruh parameter struktur mikro. Namun dalam penelitian ini tidak dibahas tahapan pertumbuhan butir.

Penelitian rekristalisasi statik juga dilakukan dengan menggunakan deformasi dengan gaya torsi, seperti yang dilakukan oleh P.D. Hodgson[19], terhadap baja HSLA-Nb dan oleh SF Medina [21] yang membandingkan antara baja HSLA-Nb dengan baja C-Mn-Si. Perilaku rekristalisasi dengan metode deformasi drawing dilakukan oleh Z.Kedzierski[14]. Yang H Bae dkk [12] memberikan perhatian terhadap perilaku transformasi austenit-ferit sebagai variabel dari perlakuan terhadap austenit saat proses *reheating*.

Studi pertumbuhan butir dilakukan oleh beberapa peneliti seperti Manohar dkk[4] yang melakukan review peneliti sebelumnya terhadap pertumbuhan butir dalam kondisi isothermal. Dalam *review* di atas terdapat berbagai konstanta pertumbuhan butir

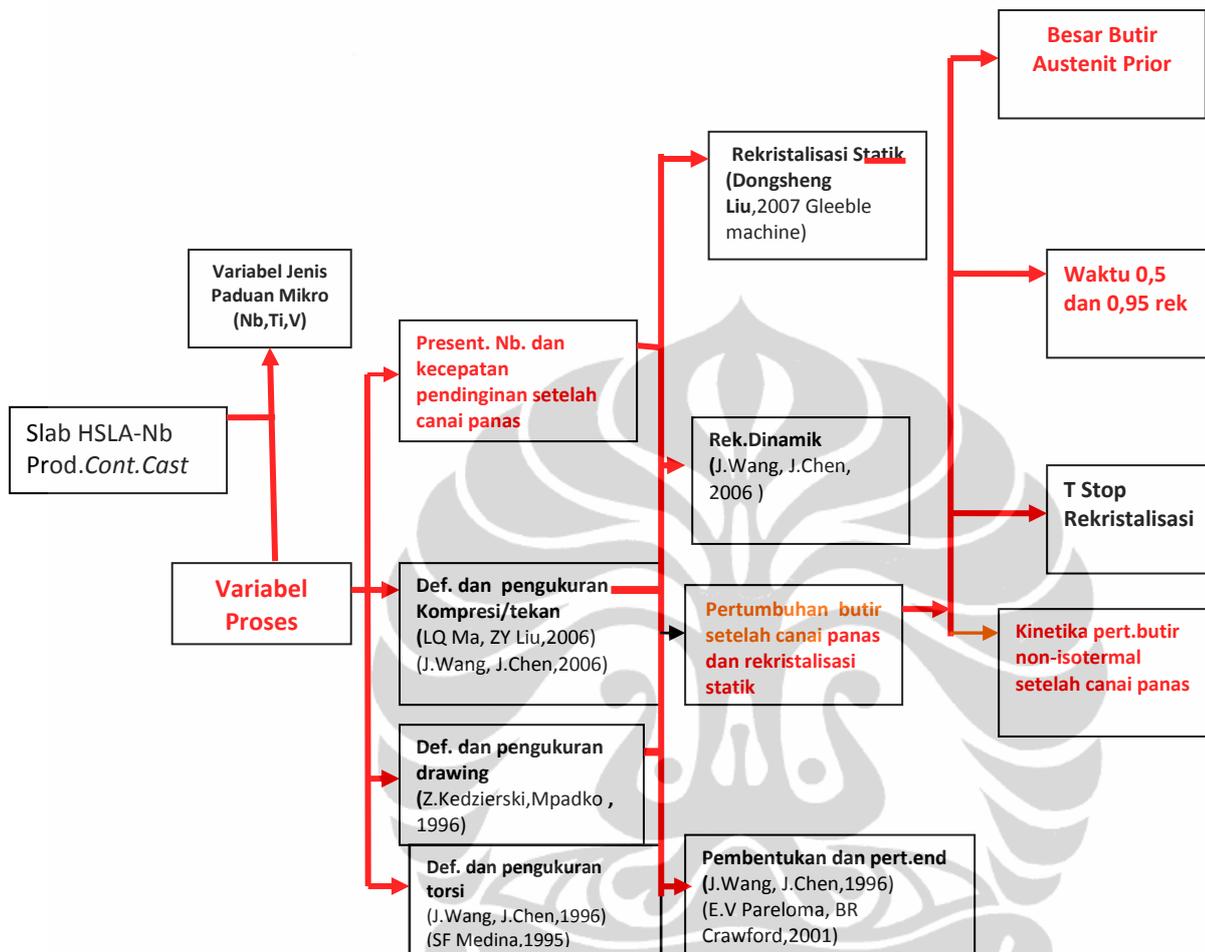
berbagai jenis baja paduan yang berbeda. Sellars [1] melakukan penelitian terhadap baja C-Mn-Nb pada kondisi anil isothermal. Penelitian lain mengenai pertumbuhan butir adalah HR Wang [27] yang mengamati pertumbuhan butir isothermal dari baja Nb-Nb-Ti, dan Ti-V, dan didapat persamaan kinetika pertumbuhan butir isothermal untuk masing-masing baja tersebut di atas. Selain itu, S.Mishra [26], S Jiao [35] dan Angel Zufia [36] mendapatkan kinetika pertumbuhan butir untuk material baja. Persamaan yang digunakan adalah persamaan Sellars dengan memasukkan unsur perubahan temperatur yang berupa waktu atau temperatur efektif. Model yang didapat umumnya mempunyai bentuk sama dengan persamaan Sellars dengan konstanta yang bervariasi.

Penelitian mengenai pengaruh presipitat terhadap besar butir austenit dilakukan oleh J.Kliber dkk [13], DC Houghton [17], EV Pereloma [18], XG Zhou [20]. Para peneliti ini meneliti baja HSLA dengan kandungan Nb, V atau Ti yang membentuk presipitat yang umumnya terbentuk pada temperatur dan waktu tahan isothermal. Selain itu temperatur kelarutan dan pembentukan endapan juga menjadi topik yang diteliti, disamping juga pengaruh besar deformasi terhadap pembentukan endapan.

Persamaan transformasi austenit-ferit merupakan hal yang menentukan sifat akhir baja. Penelitian mengenai transformasi austenit antara lain dilakukan oleh T.Jia dkk [31] yang meneliti konversi antara persamaan transformasi non-isothermal dan isothermal, sehingga dapat dihitung fraksi fasa yang terbentuk pada proses pendinginan. Dari penelitian rekristalisasi statik dan pertumbuhan butir austenit yang dilakukan pada penelitian tersebut di atas, dapat dilihat bahwa sebagian besar dilakukan deformasi beban kompresi, torsi, drawing dan stretching. Penelitian pertumbuhan butir dengan proses canai sebagai deformasi dalam penelitian umumnya berasumsi bahwa proses dalam kondisi isothermal, atau kondisi non-isothermal untuk mencapai temperatur *reheating*.

1.8. Peta Penelitian *Thermo Mechanical Treatment* (TMT) Baja HSLA-Nb

Peta penelitian yang telah dilakukan oleh studi-studi terdahulu dapat dilihat pada Gambar 1.1 di bawah ini.



Warna merah menunjukkan penelitian yang dijalankan

Warna hitam menunjuk hasil-hasil yang dicapai oleh para peneliti sebelumnya.

Gambar 1.1. Peta Penelitian bidang TMT baja HSLA-Nb

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Baja HSLA

Baja *High-Strength Low-Alloy* (HSLA), atau baja paduan mikro, di desain untuk menghasilkan sifat mekanis serta ketahanan terhadap korosi atmosferik yang lebih baik dibandingkan baja karbon konvensional.[37] Komposisi kimia baja HSLA dapat bervariasi, tergantung pada sifat mekanis yang ingin dihasilkan. Keunggulan baja ini dibandingkan dengan baja karbon konvensional diantaranya adalah memiliki kekuatan dan kekerasan yang lebih tinggi, serta memiliki sifat mampu bentuk, mampu las, dan ketahanan korosi yang lebih baik.[38] Kekuatan dihasilkan melalui kombinasi pengaruh[39] :

- Ukuran butir halus yang dihasilkan selama *controlled rolling*, serta pengaruh paduan mikro, khususnya Niobium
- Penguatan presipitat yang disebabkan kehadiran Vanadium, Niobium dan Titanium pada komposisinya

Baja HSLA merupakan kelompok dari baja karbon rendah yang secara umum menggunakan sejumlah kecil elemen paduan untuk menghasilkan *yield strength* diatas 345 Mpa (50 ksi) pada kondisi *hot rolled, cold rolled, anil, stress relieved, direct quenching* atau normalisasi[40] Pada kondisi *as-rolled*, baja ini mempunyai struktur ferit halus yang dihasilkan melalui mekanisme penguatan butir ferit pada proses pengerolan terkendali. Baja ini sering disebut dengan baja paduan mikro dikarenakan adanya sejumlah kecil Vanadium, Niobium, dan/atau Titanium yang ditambahkan untuk penguatan presipitat serta penghalus butir.

Baja HSLA dalam bentuk lembaran (*sheet*) atau pelat mempunyai kandungan karbon yang rendah (0.05-0.25%C) untuk menghasilkan mampu bentuk dan *weldability* yang baik, serta memiliki kandungan Mangan hingga 2%.[41] Baja HSLA dapat diklasifikasikan menjadi beberapa kategori :

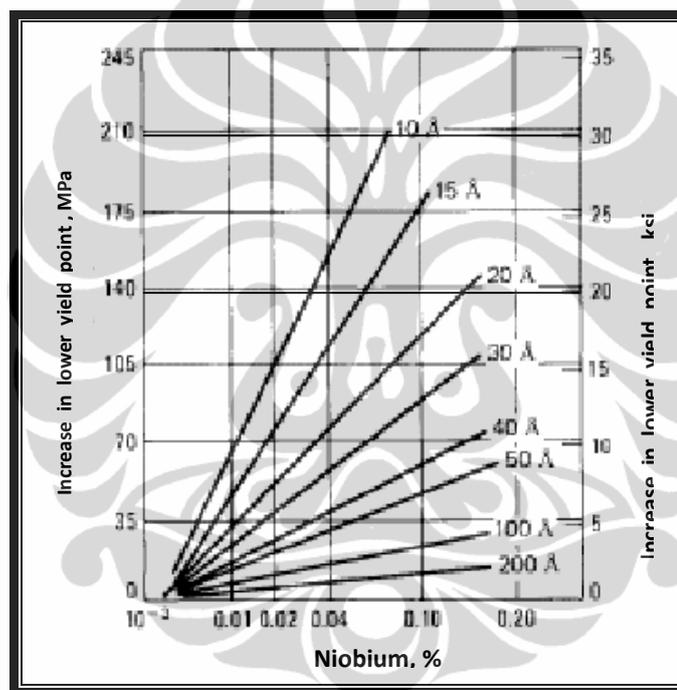
1. *Weathering Steel*. Baja HSLA ini mengandung sejumlah kecil elemen paduan seperti Tembaga dan Fosfor yang berfungsi untuk meningkatkan ketahanan korosi atmosferik serta berfungsi sebagai penguat butir dengan penguatan larutan padat (*solid solution strengthening*).

2. *Microalloyed Ferrite-Pearlite Steel*. Baja HSLA ini mengandung elemen paduan pembentuk karbida atau karbon-nitrida (umumnya kurang dari 0,1%), seperti Niobium, Vanadium, dan/atau Titanium yang berfungsi sebagai penguat presipitat, penghalus butir, serta mengontrol temperatur transformasi.
3. *As Rolled Pearlitic Steel*, yang merupakan baja Karbon–Mangan (C-Mn) dengan penambahan sejumlah kecil elemen paduan lain untuk meningkatkan kekuatan, ketangguhan, mampu bentuk, serta mampu las.
4. *Acicular Ferrite (Low Carbon Bainite) Steel*. Baja HSLA ini mempunyai kandungan karbon yang rendah (kurang dari 0,05%C) dengan kombinasi sifat kekuatan luluh yang tinggi, mampu las, mampu bentuk, serta ketangguhan yang baik.
5. *Dual Phase Steel*. Ciri baja HSLA jenis ini memiliki mikrostruktur pulau-pulau martensit yang tersebar dalam matriks ferit serta mempunyai kombinasi sifat yang baik antara keuletan dan kekuatan tarik yang tinggi.
6. *Inclusion Shape Controlled Steel*. Baja HSLA ini mempunyai keuletan serta ketangguhan yang baik dengan adanya penambahan sejumlah kecil Kalsium (Ca), Zirkonium (Zr), Titanium (Ti) bahkan mungkin logam tanah jarang (*rare earth*) yang dapat mengubah bentuk inklusi sulfida dari bentuk balok pipih menjadi bentuk yang lebih kecil, tersebar, dan bulat (globular).

Aplikasi HSLA meliputi penggunaan sebagai baja konstruksi, otomotif, bejana tekan, dan saluran pipa.[42]. Baja HSLA banyak digunakan pada otomotif, jembatan, serta struktur lainnya yang di desain untuk aplikasi tegangan pada temperatur yang sangat rendah.[43] Penggunaan lainnya meliputi pembuatan saluran pipa *oil and gas* dengan diameter besar, *automotive beams*, struktur lepas pantai dan *ship building*. [44]

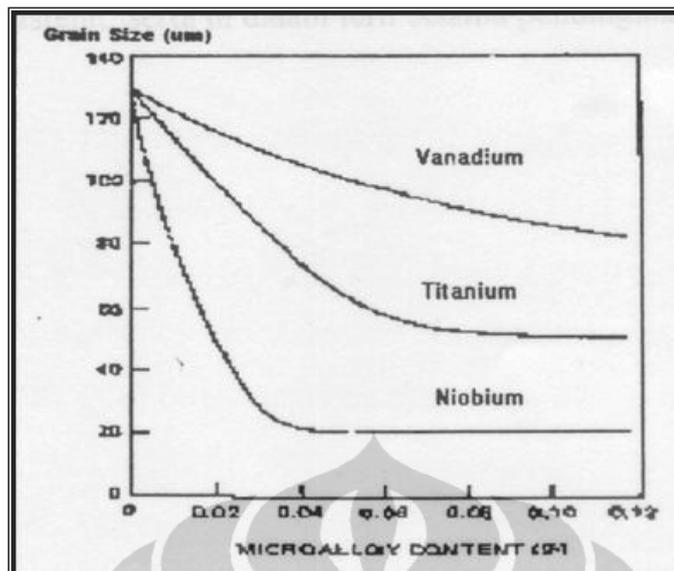
2.2. Pengaruh Niobium Pada Baja HSLA

Niobium meningkatkan *yield strength* melalui penguatan presipitat. Niobium dapat membentuk karbida atau nitrida dimana karbida Niobium memiliki kelarutan yang rendah pada baja dan ditemukan dalam bentuk endapan atau presipitat. Partikel yang tidak larut akan membatasi pertumbuhan austenit sehingga dapat menghasilkan butir ferit yang lebih halus[45]. Besarnya peningkatan kekuatan tergantung pada ukuran dan jumlah presipitat yang terbentuk. Gambar 2.1 menunjukkan bahwa semakin kecil ukuran presipitat, maka peningkatan kekuatan luluh semakin besar.



Gambar 2.1 Pengaruh ukuran partikel *Niobium carbide* terhadap *yield strength* [37]

Selain itu Niobium juga bersifat sebagai penghalus butir. Jika dibandingkan dengan Vanadium, Niobium lebih efektif dalam memperkecil butir. Gambar 2.2 menunjukkan bahwa Niobium mempunyai pengaruh yang lebih besar dibandingkan dengan Vanadium dan Titanium dalam menghaluskan butir. Kombinasi penguatan presipitat dan penghalus butir ferit membuat Niobium sangat efektif digunakan sebagai agen penguat.



Gambar 2.2 Pengaruh unsur paduan mikro terhadap ukuran butir ferit [46]

Umumnya Niobium ditambahkan sekitar 0.02 hingga 0.04%. Setiap penambahan 0.01% Nb akan meningkatkan kekuatan sekitar 35-40 Mpa (5-6 Ksi)[4]. Baja Niobium dihasilkan melalui pengerolan yang terkendali (*controlled rolling*), yang disertai dengan rekristalisasi, kontrol laju pendinginan, serta *direct quenching*.

2.3. Pengaruh Unsur Paduan Lainnya

Komposisi kimia baja HSLA dispesifikasikan sesuai dengan standar ASTM. Selain untuk meningkatkan ketahanan korosi, fungsi utama elemen paduan pada baja HSLA adalah sebagai penguat ferit melalui mekanisme penguatan presipitat, penghalus butir dan penguatan larutan padat (*solid-solution strengthening*). Penguatan larutan padat dipengaruhi oleh komposisi paduan, sementara penghalusan butir dan penguatan presipitat dipengaruhi oleh disain paduan serta perlakuan termo-mekanik.

Pemilihan elemen paduan juga didasarkan atas pengaruhnya terhadap temperatur transformasi, dimana transformasi dari autenit menjadi ferit terjadi pada temperatur yang rendah selama pendinginan [39]. Rendahnya temperatur transformasi akan menghasilkan produk butir yang lebih halus, yang merupakan pengaruh utama dalam menghasilkan efek penguatan. Pada baja HSLA dengan kadar karbon rendah, paduan-paduan seperti Silikon, Tembaga, Nikel, dan Fosfor

dapat membantu dalam menghasilkan butir halus. Paduan seperti Mangan dan Kromium, menguatkan ferit dengan penguatan larutan padat.

Berikut merupakan pengaruh beberapa unsur paduan pada baja HSLA :

1. *Karbon*, merupakan elemen paduan yang sangat penting pada berbagai jenis baja. Penambahan kadar karbon dapat meningkatkan penguatan larutan padat serta kekerasan. Peningkatan kadar karbon dapat menurunkan *weldability* dan ketangguhan impak pada baja.
2. *Nitrogen*, ditambahkan pada baja HSLA yang mengandung Vanadium. Penambahan Nitrogen dibatasi hingga 0.005%. Paduan ini sangat penting karena dapat meningkatkan kekerasan melalui pengerasan presipitat. Presipitat Vanadium-Nitrida (VN) dapat memberikan efek penghalusan butir karena mempunyai kelarutan yang rendah dalam austenit.
3. *Mangan*, merupakan elemen penguat yang cukup penting dalam *plain carbon high-strength structural steels*. Fungsi utamanya adalah sebagai penguat larutan padat dalam ferit serta menurunkan temperatur transformasi austenit-ferit. Mangan dapat meningkatkan efek penguatan presipitat pada baja Vanadium dan baja Niobium.
4. *Silikon*, digunakan sebagai *deoxidizer* dalam baja cair [39]. Silikon mempunyai efek penguatan pada *low-alloy structural steels*. Silikon mempunyai pengaruh yang cukup penting dalam peningkatan *yield strength* melalui penguatan larutan padat dan banyak digunakan pada baja HSLA untuk aplikasi pembuatan paku atau baut.
5. *Tembaga*, dapat meningkatkan kekuatan pada baja karbon rendah maupun sedang dengan sifatnya sebagai penguat ferit. Ketahanan korosi atmosferik dapat ditingkatkan dengan penambahan Fosfor, namun ketika sejumlah kecil Tembaga ditambahkan dalam baja, ketahanan terhadap korosi menjadi lebih besar. Dengan adanya Fosfor dan Tembaga, memberikan pengaruh yang lebih baik terhadap ketahanan korosi dibandingkan jika hanya memiliki salah satu dari elemen paduan tersebut.
6. *Kromium*, sering ditambahkan bersamaan dengan Tembaga untuk meningkatkan ketahanan terhadap korosi atmosferik.

7. *Nikel*, dapat ditambahkan hingga sekitar 1% pada beberapa jenis HSLA. Pada baja HSLA, paduan ini dapat meningkatkan ketahanan terhadap korosi atmosferik [37]. Ketika paduan ini dikombinasikan dengan Tembaga dan/atau Fosfor, dapat meningkatkan ketahanan baja terhadap korosi air laut.
8. *Alumunium*, sering digunakan sebagai *deoxidizer* dan merupakan unsur yang pertama kali digunakan untuk mengontrol pertumbuhan butir austenit selama *reheating*. Selama *controlled rolling*, Niobium dan Titanium lebih efektif digunakan sebagai *grain refiner* dibandingkan dengan Alumunium.
9. *Vanadium*, menguatkan baja HSLA dengan mekanisme penguatan presipitat serta penghalusan butir ferit.
10. *Titanium*, selain dapat memberikan penguatan presipitat, paduan ini dapat mengontrol bentuk sulfida. Sejumlah kecil Titanium (<0.025%) juga berguna dalam membatasi pertumbuhan butir austenit [47]. Penambahan Titanium meningkatkan *impact toughness* dengan penghalusan butir ferit.
11. *Sulfur*, umumnya merupakan pengotor pada baja. Penambahan pada baja dapat meningkatkan *machinability*.
12. *Fosfor*, meningkatkan kekuatan dan kekerasan pada baja karbon rendah, meningkatkan ketahanan korosi, serta meningkatkan *machinability* pada *free-cutting steel* [48].

2.4. Tinjauan Dasar Proses Termomekanik

2.4.1. Prinsip dari Deformasi Panas (Hot Deformation)

Proses deformasi panas dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan produk dengan bentuk dan dimensi tertentu, dengan kekuatan, kekerasan dan ketangguhan tertentu, sesuai dengan aplikasi komponen. Pada proses deformasi panas pada baja, kekuatan dan kekerasan produk akhir ditentukan oleh berbagai tahap perubahan struktur mikro selama dan setelah deformasi. Selama proses deformasi panas, misalnya pada proses canai panas, akan terjadi pengerasan regang, namun hal ini diimbangi dengan pelunakan yang terjadi dengan adanya proses pemulihan (*recovery*) dan rekristalisasi. Proses pengerjaan panas yang

dilakukan dalam temperatur tinggi ini mempunyai variabel atau ketergantungan pada laju regangan, temperatur, dan besarnya regangan. Proses ini menimbulkan perubahan struktur yang terjadi pada material yaitu dengan meningkatnya density dislokasi, sampai tercapai regangan mencapai ϵ_c atau regangan kritis[2].

Pada saat terjadi regangan kritis, energi yang tersimpan pada material cukup tinggi untuk memicu terjadinya rekristalisasi dinamik. Rekristalisasi dinamik ini terus terjadi, berulang-ulang, dimana butir baru hasil rekristalisasi mengalami pengerasan regang lagi hingga mencapai energi tersimpan kritis lagi.

Dengan perubahan struktur mikro dinamik ini, material dalam keadaan tidak stabil sehingga memiliki *driving force*/energi untuk terjadi *recovery* dan rekristalisasi statis setelah deformasi terjadi. Pada umumnya rekristalisasi statis diikuti dengan pertumbuhan butir.

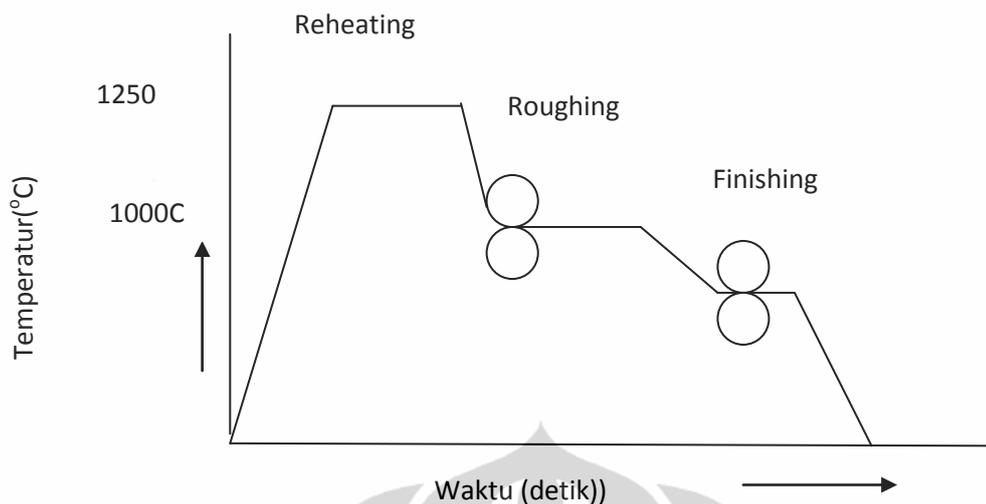
Untuk dapat melakukan pengerjaan panas dengan hasil yang memuaskan perlu diketahui beberapa faktor:

- Waktu untuk rekristalisasi pada saat setelah selesainya deformasi.
- Besar butir yang dihasilkan dari proses rekristalisasi dan pertumbuhan butir

Faktor di atas akan menentukan struktur material saat memasuki tahapan selanjutnya, sehingga akan mempengaruhi tegangan alir dari material, dan mempengaruhi gaya pengerjaan yang diperlukan. Faktor di atas juga mempengaruhi struktur dan sifat produk.

Berbagai penelitian dilakukan untuk mendapatkan hubungan antara waktu rekristalisasi, ukuran butir dan laju pertumbuhan butir pada pengerjaan panas dengan satu tahap, sehingga dapat diterapkan pada suatu pengerjaan panas, dengan menentukan struktur yang diharapkan pada akhir proses pengerjaan baja HSLA-Nb. Diharapkan dengan pendekatan ini dapat diterapkan pada operasi pengerjaan yang kompleks di lapangan ke validasi di laboratorium dengan kondisi yang lebih sederhana. Ketelitian pendekatan tergantung pada ketelitian data laboratorium.

Proses pengerjaan panas pada slab atau plat baja mempunyai tahapan sebagai berikut seperti dapat dilihat pada gambar 2.3 di bawah ini:



Gambar 2.3. Tahapan pada Proses Pengerjaan Panas

Pemanasan awal (*reheating*), yaitu slab baja dipanaskan hingga temperatur austenit dengan tujuan antara lain untuk melarutkan berbagai paduan yang terdapat dalam baja, dan untuk mencapai besar austenit yang optimum, sehingga dapat mencapai kekuatan baja yang optimum setelah pengerjaan panas. Baja ditahan untuk waktu tertentu pada temperatur ini untuk memperoleh struktur yang seragam. Tinggi temperatur proses reheating akan menentukan kelarutan paduan di dalam baja.

Roughing, adalah proses canai pertama yang dilakukan setelah dicapai proses reheating. Pada proses ini baja diberikan deformasi pada kondisi temperature telah turun dari temperatur reheating, namun masih di atas temperatur rekristalisasi. Pada proses roughing akan diperoleh penghalusan butir austenit dengan terjadinya rekristalisasi statik berulang-ulang antar pass. Setelah proses roughing, dilakukan penahanan pada temperatur intermediate dimana terjadi rekristalisasi parsial antar pass, yang akan menimbulkan struktur butir campuran jika proses rolling dilanjutkan

Finishing adalah proses pembentukan akhir yang dilakukan pada temperatur tertentu untuk mendapatkan ketebalan akhir dari baja. Proses *Finishing* dilakukan pada temperatur rendah dalam daerah austenit, sehingga proses rekristalisasi tertunda sehingga tidak terjadi pada seluruh pass pengerolan, sehingga terbentuk butir austenit yang sangat terdislokasi, mengalami peregangan

yang besar sehingga terjadi pengintian dalam jumlah yang besar pada pembentukan ferit selama pendinginan setelah rolling.

Cooling, adalah tahapan pendinginan setelah dilakukan pembentukan akhir. Pada tahapan ini baja didinginkan dari kondisi austenitik menjadi kondisi feritik.

Gambaran proses pengerjaan panas dapat digambarkan sebagai berikut:

Pada proses canai panas, baja mengalami rekristalisasi dan pertumbuhan butir. Disamping itu juga akan terbentuk endapan karbida atau nitrida atau carbonitrida dari paduan yang terbentuk selama proses canai panas. Unsur paduan yang telah larut selama proses pemanasan awal akan bereaksi membentuk senyawa Nitrida, Karbida atau Karbonitrida, yang terbentuk karena adanya energi regangan yang terbentuk selama proses deformasi. Endapan yang halus dan tersebar merata ini akan mempengaruhi kekuatan produk baja setelah pengerjaan panas, karena akan menghalangi pergerakan batas butir saat deformasi yang menyebabkan butir fasa α menjadi halus dan kekuatan meningkat [1, 2, 4, 8].

2.4.1. 1. Mekanisme Proses Reheating.

Proses reheating adalah proses pemanasan awal yang dilakukan sebelum baja diberikan proses deformasi panas. Selama proses reheating pada baja HSLA terjadi;

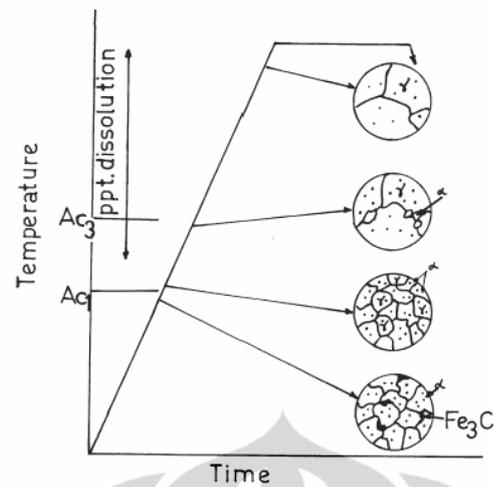
Transformasi dari fasa Ferit dan Perlit menjadi Austenite

Terjadi kelarutan endapan Mikro Nb, Ti, V dalam matriks Austenite

Terjadi pertumbuhan butir Austenit

a. Transformasi Fasa ferit + Perlit menjadi Austenite

Selama proses reheating untuk baja karbon rendah pada temperatur di bawah A_{c1} , strukturnya adalah ferit dan perlit. Semakin tinggi temperatur melewati A_{c1} , dibawah A_{c3} terjadi transformasi perlit menjadi austenit. Sehingga pada daerah tersebut fasa yang ada adalah austenit dan ferit. Pada temperatur di atas A_{c3} , seluruh struktur mikro baja bertransformasi menjadi austenit. Hal ini dapat dilihat pada gambar 2.4. di bawah ini



Gambar 2.4. Pengaruh Proses Reheating pada perubahan struktur mikro baja HSLA[49]

b. Kelarutan endapan Mikro Nb, Ti, V dalam matriks Austenit.

Pada proses pemanasan unsur paduan dan senyawa lain seperti karbida, nitrida dan karbonitrida yang ada pada baja akan larut dalam fasa austenit. Temperatur reheating adalah di atas temperatur austenisasi, atau diatas temperatur 900°C. Setiap paduan dan setiap senyawa memiliki temperatur kelarutan yang berbeda. Untuk mencapai kekuatan produk yang optimum maka sedapatnya pada proses reheating seluruh unsur paduan dan senyawa larut pada proses reheating. Kelarutan pada paduan terner Fe-C-M konsentrasi M dan C dalam Fe dalam kesetimbangan untuk membentuk M_mC_n , diberikan dalam hubungan [50],

$$[M]^m[C]^n = K \quad (2.1)$$

Dimana [M] dan [C] adalah prosentase atom atau fraksi mol M(logam paduan seperti Nb, V, Ti dll) dan C (carbida) dalam larutan dan K adalah produk kelarutan (*Solubility product*) dan K dapat dinyatakan dengan[50],

$$K = K_0 \exp(-\Delta H/RT) \quad (2.2)$$

Dimana K_0 adalah konstanta tak tergantung temperatur dan ΔH adalah enthalpy pembentukan larutan M_mC_n .

Dari persamaan 2.1 dan 2.2 di atas, dalam bentuk lain mengikuti persamaan 2.3 [50], dimana :

$$\text{Log } K_o = A \quad \text{dan} \quad \Delta H/R = B$$

Dengan demikian, nilai log dari hasil kali konsentrasi mol logam paduan dan karbida memiliki korelasi linier terhadap nilai $\frac{1}{T}$;

$$\text{Log } [M][C] = A - B/T \quad (2.3)$$

Dimana nilai A dan B pada persamaan (2.3) untuk beberapa jenis endapan dapat dilihat pada tabel.2.1.

Sebagai contoh untuk endapan NbC pada tabel 2.1 di bawah [51] , dapat dilihat nilai $A = 3,2 \pm 0.1$ dan nilai $B = 7690$. Maka *solubility product* dari NbC adalah ;

$$\text{Log } [Nb][C] = 3,2 - 7690/T. \quad (2.4)$$

Secara empiris, dinyatakan oleh Mandry dan Dornelas dan [51] dengan persamaan 2.5 ,dan Irvine dkk [10] dengan persamaan 2.6. dalam dua persamaan *solubility products*:

$$\text{Log}[(W_{Nb})(W_C)^{0,83}(W_N)^{0,14}] = -9800/T + 4,46 \quad (2.5)$$

dan

$$\text{Log } [(W_{Nb})(W_C + 12/14W_N)] = -6770/T + 2,26 \quad (2.6)$$

Dimana W_{Nb} , W_C dan W_N adalah % berat Nb, C dan N.

Tabel 2.1 Nilai Konstanta *Solubility Product* [51]

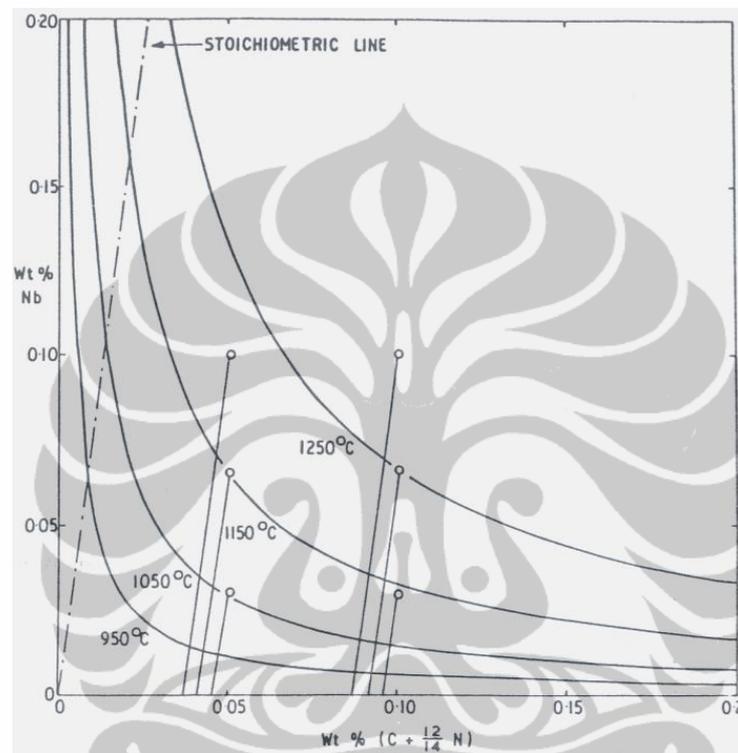
Senyawa	A	B
Austenite		
AlN	1,55± 0,3	7.060
BN	5,24	6.970
Cr ₂ C ₃	7,29	7.620
Cr ₂₃ C ₆	11,01	9.590
CrN	3,11	6.100
C ₂ N	5,49	6.290
NbC	3,2± 0,1	7.690
NbN	3,57± 0,15	9.600
Si ₃ N ₄	3,29	6.480
TaC	2,9	7.000
TaN	6,8	12.800
TiC	4,03± 0,3	8.720
TiN	3,82	15.020
VC	6,72	8500
VN	3,1± 0,2	8030
ZrC	4,26	8.460
ZrN	4,26	16.007
Fe Cair		
AlN	6,05	14.140
TiN	5,9	16.590
VN	6,01	9.110
ZrN	6,38	17.000

Pada persamaan 2.5. tampak jika baja tidak mengandung N, nilai *solubility product* NbC menjadi amat rendah.. Persamaan 2.6 didapatkan oleh Irvine dkk[9], dapat diterapkan hanya untuk paduan-paduan dimana prosentase N rendah dibandingkan dengan C dan koefisien 12/14 hanya sesuai dengan data eksperimen.

Jadi karena persamaan 2.5 dan 2.6 adalah persamaan empirik, maka rumus di atas tidak sesuai dilihat dari sudut teoritis.[2].

Dari persamaan 2.6. di atas, temperatur kelarutan endapan dapat diilustrasikan pada gambar 2.5 untuk berbagai temperatur yang berbeda pada austenit.

Dari gambar 2.5 di bawah terlihat bahwa garis Stoichiometri untuk Nb(C+12/14N) menunjukkan daerah komposisi austenit, dimana Nb(C+12/14N) masuk dalam larutan dengan bertambahnya temperatur atau akan mengendap kembali pada pendinginan. Baja dengan komposisi nonstoichiometry ditarik paralel, seperti untuk baja dengan Nb dan (C+12/14N) berbeda.



Gambar 2.5. Batas Kelarutan Untuk baja Nb(C+12/14 N) sesuai hubungan rumus Irvine, et al [3]

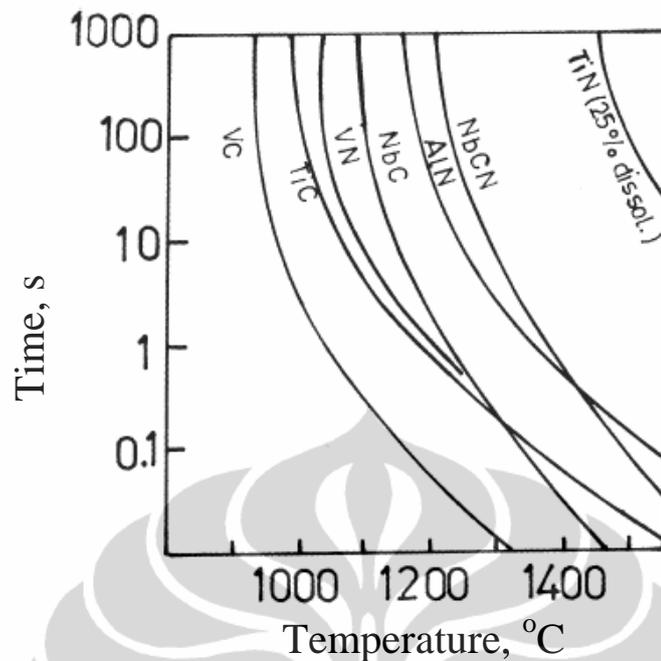
Dapat dilihat untuk baja dengan 0,1% (C+12/14N) dan 0,065 Nb , Niobium akan larut pada 1250°C, dan jika Nb naik jadi 0,1%, jumlah yang larut pada 1250°C hanya bertambah menjadi 0,068% . Kedua baja ini tampak memiliki kemampuan yang sama untuk mengalami pengendapan pada temperatur lebih rendah setelah reheating 1250°C. Jika (C+12/14N) berkurang jadi 0,05%, dengan 0,065% Nb, maka temperatur 1150°C dapat melarutkan Niobium ke dalam larutan dan potensial pengendapan pada temperatur rendah pada austenit hampir sama dengan baja dengan (C+12/14N) yang lebih tinggi dengan temperatur pemanasan awal (*reheating*) 1250°C.

Pada canai terkontrol, keuntungan baja dengan (C + 12/14 N) yang lebih rendah adalah pada temperatur pemanasan awal (*reheating*) sehingga besar butir setelah pemanasan awal dan temperatur canai awal (*roughing*) dapat dikurangi tanpa kehilangan potensial pengendapan. Hal ini dapat meningkatkan keuntungan secara komersial, khususnya pada plat-plat tebal, sehingga dapat merendahkan temperatur oven pemanasan.

c) Pertumbuhan Butir Austenit

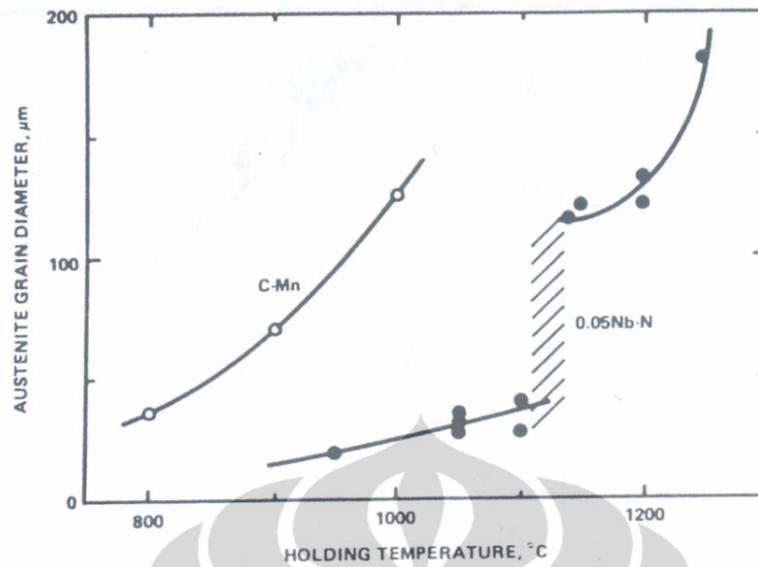
Lebih dari sepuluh tahun terakhir, rekayasa struktur mikro pada proses deformasi panas menjadi perhatian para peneliti dengan tujuan mendapatkan berbagai persamaan yang dapat dijadikan perangkat yang dapat dihubungkan dengan parameter proses pada industri, dengan sifat akhir dari produk baja. Salah satu proses deformasi panas yang perlu ditingkatkan efisiensinya adalah proses canai panas. Jika baja karbon atau baja paduan mikro mengalami proses canai panas pertumbuhan butir austenit adalah mekanisme yang utama terjadi dalam oven pemanasan awal (*reheating*), dan saat diantara dua tahapan proses canai setelah terjadi proses rekristalisasi. Struktur mikro austenit setelah proses canai dan pendinginan di atas ban berjalan (*run out table*) akan menentukan ukuran butir akhir ferit dan sifat mekanisnya. Berbagai penelitian dilakukan untuk mendapatkan hubungan parameter proses dan diameter butir akhir yang dihasilkan[3-5, 9].

Pada Pemanasan awal (*reheating*), pertumbuhan butir tidak terjadi pada suhu rendah karena pergerakan batas butir tertahan oleh partikel karbida atau nitrida yang belum larut. Partikel Karbida, Nitrida dan Karbonitrida kelarutannya tergantung pada temperatur dan waktu. Seperti terlihat pada gambar 2.6. Misalnya endapan VC, pada temperatur 1000°C membutuhkan waktu sekitar 2 detik untuk dapat larut dalam Austenit. Sedangkan pada endapan TiC, memerlukan waktu sekitar 100 detik untuk larut pada temperatur yang sama.

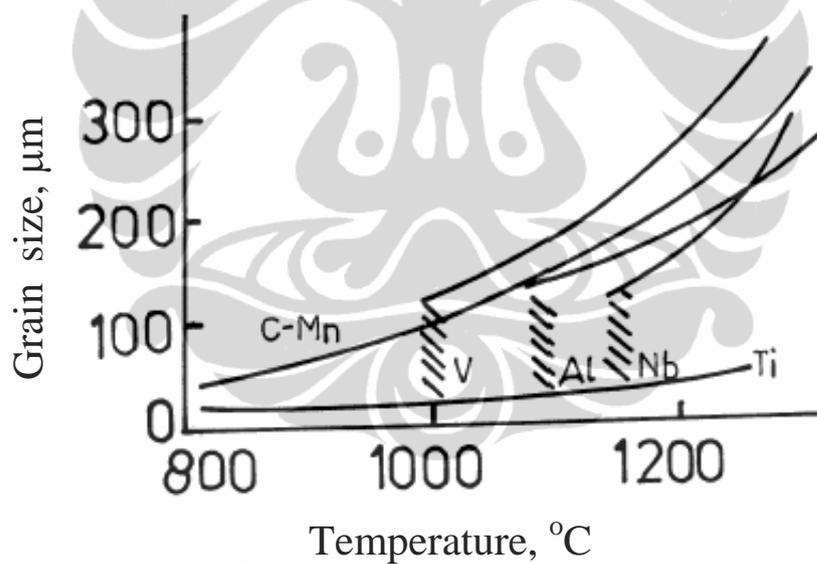


Gambar 2.6. Kinetika pelarutan endapan [49]

Pengkasaran butir baja selama proses pemanasan awal (*reheating*) untuk melakukan proses canai panas merupakan faktor penting pada proses termomekanik untuk mencapai produk dengan butir halus. C.M Sellars [2] menunjukkan bahwa baja karbon menunjukkan peningkatan ukuran butir austenit dengan meningkatnya temperatur, sedangkan pada baja Nb, adanya Nb partikel carbonitrida akan menunda pengkasaran butir austenit ke temperatur yang lebih tinggi, seperti tampak pada gambar 2.7 dan 2.8. Dari gambar 2.7 dan 2.8 juga tampak bahwa pertumbuhan butir austenit pada baja karbon berbeda dengan baja HSLA, dimana baja C-Mn mengalami pertumbuhan butir kontinyu, sedangkan baja- HSLA atau paduan, pada temperatur atau waktu pemanasan tertentu mengalami pertumbuhan butir abnormal.



Gambar 2.7. Pengaruh temperatur *reheating* terhadap besar butir austenit pada baja C dan baja HSLA [2]



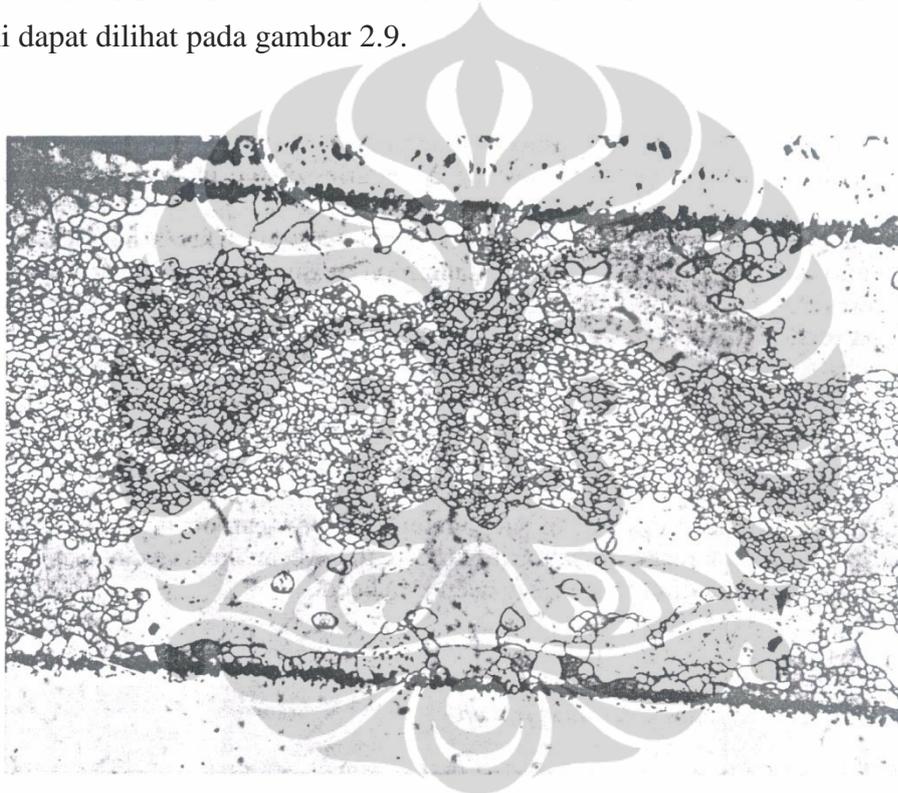
Gambar 2.8. Perbedaan temperatur kelarutan endapan paduan V, Al, Nb, dan Ti Nitrida dan pengaruhnya terhadap pertumbuhan butir abnormal [2]

Pada baja paduan, pertumbuhan butir austenit dapat di bagi menjadi 3 tahap;

- Pertumbuhan Butir normal
- Pertumbuhan Butir abnormal
- Pertumbuhan Butir normal

Pada pertumbuhan butir normal, endapan yang belum larut akan menghambat pergerakan batas butir austenit (*Solute drag*). Karbida atau Nitrida yang tidak larut selama reheating dapat menghambat pertumbuhan butir jika fraksi volume dan ukuran partikel sesuai kondisi kritis untuk mengunci pergerakan batas butir.

Tetapi, pada *reheating* temperatur pertumbuhan butir normal tercapai, jika terjadi pengkasaran dan pengendapan partikel, berarti kondisi kritis untuk pertumbuhan butir abnormal telah tercapai, sehingga terbentuk struktur butir campuran, yang pada pemanasan selanjutnya berjalan pertumbuhan yang normal. Hal ini dapat dilihat pada gambar 2.9.



Gambar 2.9. Pertumbuhan butir abnormal pada baja dengan butir halus dengan 0,4%C. Butir yang halus tidak berkembang karena masih mengandung partikel karbida yang tidak larut pada saat reheating.[50]

Pada pertumbuhan butir abnormal, sebagian endapan sudah mulai larut, sehingga sebagian butir akan tumbuh membesar dan sebagian lagi tetap tertahan, seperti tampak pada gambar 2.9.

Setelah itu terjadi pertumbuhan normal kembali, diakibatkan pertumbuhan butir austenit tumbuh tanpa adanya partikel yang menahan pergerakan batas butir (*pinning effect*)

Temperatur pengkasaran butir terdapat lebih rendah dari temperatur kelarutan partikel karena batas butir terbebaskan dengan larutnya partikel dan butir tumbuh..

Pernyataan untuk kelarutan Niobium Karbonitrida dalam austenit pada dasarnya dapat dibagi menjadi dua ; yaitu secara empiris dan secara dasar termodinamis. Pernyataan secara empiris didapat dari hasil penelitian berdasarkan eksperimen sedangkan pernyataan secara termodinamis didapat dari penurunan persamaan termodinamik sesuai dengan reaksi pengendapan dan pelarutan senyawa Nitrida atau karbonitrida paduan.

Ada hal yang perlu dicermati bahwa pada proses *reheating* di industri, waktu tahan relatif lama, sedangkan di laboratorium waktu *reheating* pendek, sehingga struktur mikro awal sebelum proses canai tidak representatif terhadap apa yang dilakukan di industri.

Pada percobaan canai satu tahap, mikrostruktur awal, khususnya besar butir, mempunyai pengaruh besar terhadap proses rekristalisasi. Sebaliknya endapan karbida, nitrida dalam jumlah kecil pada austenit hanya sedikit berpengaruh terhadap rekristalisasi statik atau dinamik.

2.4.2. Mekanisme dan Kinetika Pertumbuhan Butir Austenit Pada Proses Pemanasan awal (*Reheating*).

Pada logam dengan fasa tunggal seperti pada baja dengan fasa austenit , laju pertumbuhan butir rata-rata (\bar{D}) bertambah dengan bertambahnya waktu, akan tergantung mobilitas batas butir(M) dan energi perpindahan batas butir(γ). Jika diasumsikan radius rata-rata dari seluruh butir adalah sebanding dengan diameter butir rata-rata, dan energi rata-rata pertumbuhan butir sebanding dengan $2\gamma / D$, maka laju pertumbuhan butir \bar{v} rata-rata;

$$\bar{v} = \alpha M \frac{2\gamma}{D} \cdot \frac{d\bar{D}}{dt} \quad (2.7)$$

dimana α adalah konstanta proporsionalitas. Persamaan ini menunjukkan bahwa laju pertumbuhan butir adalah berbanding terbalik terhadap D dan akan meningkat cepat dengan meningkatnya temperatur karena meningkatnya mobilitas batas

butir M . Jika d rata-rata adalah d_0 pada saat waktu $t = 0$, maka nilai rata-rata ukuran butir pada $t=t_i$ diberikan pada persamaan 2.8 [50];

$$d^2 = d_0^2 + Kt \quad (2.8)$$

Dimana $K = 4 \alpha M \gamma$

Secara eksperimen didapat bahwa pertumbuhan butir pada fasa tunggal akan mengikuti hubungan sbb [50] ;

$$d = K' t^n \quad (2.9)$$

K' adalah konstanta kesetaraan tergantung temperatur. Nilai K' akan meningkat dengan meningkatnya temperatur. Hal ini setara dengan persamaan (2.8). dengan $n=0,5$ dan $d \geq d_0$. Tetapi pada banyak percobaan selalu didapat nilai n jauh lebih kecil dari 0,5. Nilai 0,5 hanya didapat pada logam yang amat murni atau pada temperatur yang amat tinggi[12]. Hal ini karena mobilitas atau kecepatan pergerakan batas butir bukan merupakan fungsi linear dari gaya pendorong, ΔG . Persamaan mobilitas batas butir adalah sebagai berikut [50] ,

$$v = M \Delta G / V_m \quad (2.10)$$

dimana M adalah mobilitas batas butir, dan v adalah kecepatan pergerakan batas butir. Jadi pergerakan batas butir akan berubah sesuai dengan ΔG dan juga dengan perubahan D yang dinyatakan oleh volume butir (V_m).

Selain pertumbuhan butir yang normal di atas, dapat pula terjadi pertumbuhan butir tidak normal. Pertumbuhan butir abnormal ini ditandai dengan pertumbuhan dari hanya beberapa butir sehingga memiliki diameter yang amat besar. Butir ini terus membesar memakan butir-butir disekitarnya, sampai butir halus digantikan oleh butir besar. Hal ini terjadi karena adanya efek penghalangan pergerakan batas butir oleh partikel endapan paduan mikro.

Dasar teori dari perilaku pertumbuhan butir untuk baja yang mengandung partikel fasa kedua (yaitu seperti pada baja paduan mikro) yang utama adalah besaran diameter partikel kritis (R_{kr}). Butir austenit dengan diameter sebesar R_{kr} tidak akan tumbuh ataupun mengecil, tetapi stabil secara termodinamik karena dorongan untuk pertumbuhan butir setimbang dengan gaya hambatan pergerakan batas butir dari partikel fasa kedua. Jadi, diameter kritis ini adalah batas ukuran untuk pertumbuhan butir dapat terjadi. Zener [52] adalah yang pertama kali menyatakan secara kuantitatif nilai dari R_{kr} dan dapat diterangkan sebagai berikut;

Jika pada baja terdapat suatu fraksi volume f partikel yang semuanya memiliki radius r , maka jumlah partikel yang memotong unit area bidang adalah $3f/2\pi r^2$ sehingga gaya tarik perunit area batas butir adalah seperti pada persamaan 2.11 sbb[50];

$$P = 3f/2\pi r^2 \cdot \pi \cdot r \gamma = 3f\gamma/2r \quad (2.11)$$

Dimana r adalah radius partikel rata-rata, f adalah fraksi volume partikel, γ tegangan permukaan. Gaya P ini akan melawan gaya pertumbuhan butir, yaitu $-2\gamma/R$, dimana R adalah diameter butir austenit. Jika R kecil P akan relatif tidak berarti, tapi jika R bertambah, gaya $2\gamma/R$ akan berkurang dan jika;

$$2\gamma/R = 3f\gamma/2r \quad (2.12)$$

Dimana R adalah diameter butir austenit. Gaya pertumbuhan butir tidak cukup untuk menggeser partikel sehingga pertumbuhan butir austenit terhambat. Ukuran butir austenit maksimum adalah [50],

$$R_{kr} = R_{max} = 4r/3f. \quad (2.13)$$

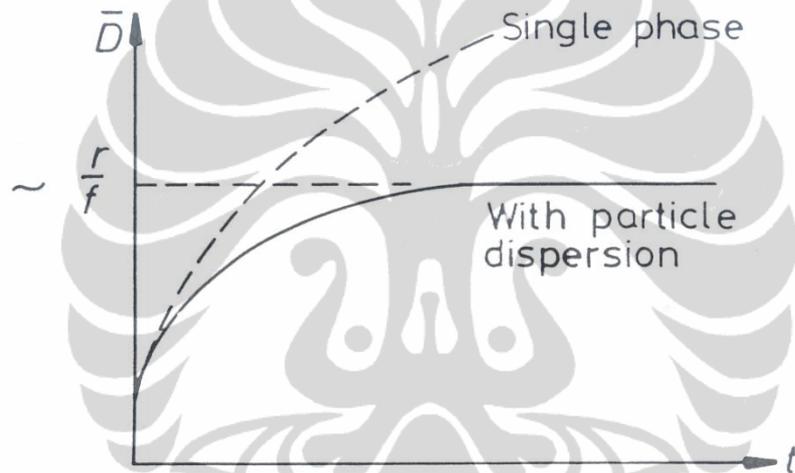
Persamaan 2.13 di atas pertamakali diperkenalkan oleh Zener [3,52].

Bentuk umum dari persamaan 2.13 di atas dapat juga dinyatakan sebagai berikut;

$$R_{kr} = R_{max} = A \cdot r / f. \quad (2.14)$$

Dimana R adalah radius kritis butir austenit (μm), A adalah konstanta, r adalah radius partikel rata-rata (μm), f adalah fraksi volume dari partikel.

Pengaruh dispersi partikel karbida dan nitrida dalam baja digambarkan pada gambar 2.10 di bawah ini.



Gambar 2.10. Pengaruh partikel fasa kedua pada pertumbuhan butir [50]

Hillert [55] dari hasil penelitiannya menyatakan ada dua nilai A untuk persamaan 2.14 di atas. Nilai A untuk batas bawah, $A = 4/9$ (0,44), dan untuk kondisi ini pertumbuhan butir normal akan terhenti. Pertumbuhan butir abnormal dapat mulai terjadi pada kondisi ini hingga nilai batas atas A tercapai, yang nilainya adalah $A = 2/3$ (0,67). Pada kondisi ini, jika seluruh butir memiliki radius $R = R_{kr} = 2r/3f$, maka pertumbuhan butir abnormal juga harus terhenti dan struktur mikro yang ada berada dalam kondisi setimbang. Tapi kalau kemudian terjadi setidaknya ada satu butir dengan radius $R > R_{kr}$, maka pertumbuhan butir abnormal dapat terjadi kembali, sampai batasan dimana struktur mikro terdiri dari kristal tunggal.

Gladman [4,53] menggunakan persamaan 2.14 di atas dengan menyatakan bahwa pertumbuhan butir abnormal yang terjadi dengan adanya partikel fasa kedua terjadi jika terjadi pengkasaran partikel. Saat ukuran partikel mencapai suatu nilai kritis, beberapa butir menjadi tidak terhalang lagi dan dapat tumbuh lagi lebih lanjut. Radius kritis butir saat sudah tidak terhalang lagi oleh partikel fasa kedua, adalah :

$$R = [\pi (1/4 - 1/3Z)] \cdot r/f \quad (2.15)$$

Dimana, Z adalah perbandingan radius butir yang tumbuh terhadap butir matriks. Teori Gladman menyatakan bahwa hambatan pertumbuhan butir terjadi jika nilai Z kurang dari atau sama dengan 4/3. Sebaliknya, kriteria pengkasaran butir menjadi tidak terpenuhi jika nilai Z besar. Bila nilai Z antara 1,41 dan 2 akan terjadi pengkasaran partikel sesuai dengan eksperimen, dan nilai A antara 0,05 hingga 0,26. Hannerz and Kazinezy[54] mendapatkan $Z = 1,7$ berdasarkan persamaan Hillert (persamaan 2.14) [3,55]. Dengan substitusi $Z = 1,7$ pada persamaan 2.14 di atas, didapat $A = 0,17$, jadi;

$$R = 0,17 \cdot r/f = 2 D/2, \text{ jadi } D = 0,34 r/f \quad (2.16)$$

Dimana, D adalah diameter butir kritis. Persamaan 2.16 di atas memungkinkan didapat ukuran butir austenit pada setiap kombinasi fraksi volume dan radius partikel endapan. Pengendapan kembali dan pengkasaran endapan paduan mikro mempengaruhi tercapainya ukuran butir austenit yang stabil.

Kinetika pertumbuhan butir austenit selama proses pemanasan awal (*reheating*) dapat digambarkan seperti pada persamaan 2.17 di bawah. Persamaan pertumbuhan butir hasil penelitian Beck dkk yang dikutip dalam penelitian Sellars [2] menunjukkan nilai besar butir selama pertumbuhan butir normal pada kondisi anil isothermal.

$$d^n - d_o^n = C \cdot t \quad (2.17)$$

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

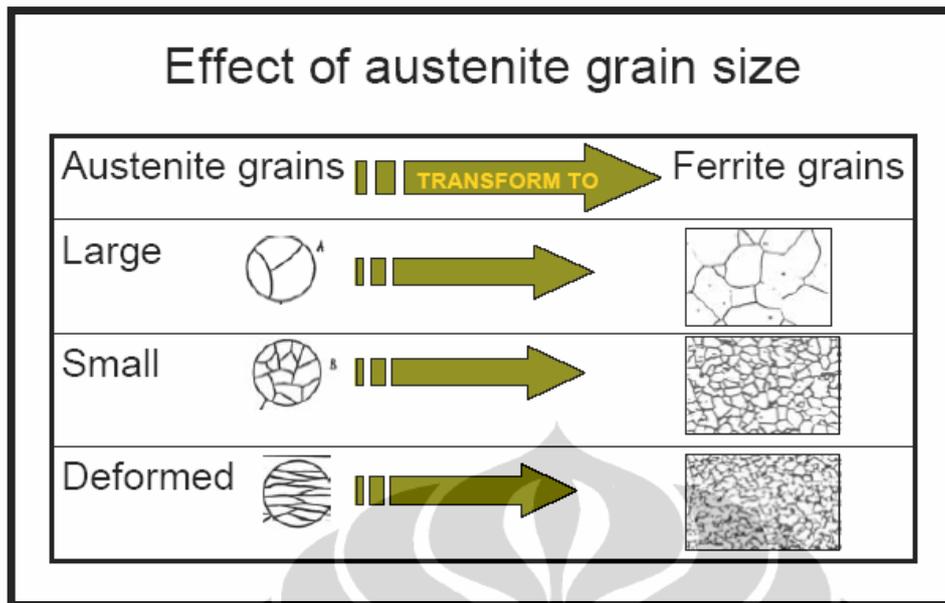
Dari persamaan 2.17 atas maka Sellars dkk [2] merumuskan secara umum mengenai pertumbuhan butir, dengan mengekspresikan konstanta C ;

$$d^n - d_0^n = A e^{-Q/RT} t \quad (2.18)$$

Dimana 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. Perhitungan pertumbuhan butir austenit secara umum menggunakan persamaan (2.18).

Informasi yang tepat terhadap temperatur pengkasaran butir dan temperatur kelarutan presipitat sangat penting dalam disain proses *reheating* karena perlakuan *reheating* dibawah temperatur pengkasaran butir dapat menghasilkan struktur butir austenit yang halus dan seragam. Ukuran butir austenit dalam proses *reheating* ini sangat mempengaruhi mikrostruktur akhir yang terbentuk setelah proses pengerolan terkendali. Semakin kecil ukuran butir austenit maka akan menghasilkan butir ferit yang halus yang dapat meningkatkan sifat mekanis baja HSLA. Ilustrasi tersebut dapat dilihat pada gambar 2.11 di bawah ini.

Berdasarkan ilustrasi yang terlihat pada gambar 2.11, dapat difahami bahwa ukuran butir ferit sangat ditentukan oleh ukuran butir austenit setelah proses canai dan rekristalisasi.



Gambar 2.11 Ilustrasi pengaruh ukuran butir austenit terhadap pertumbuhan butir ferit [56]

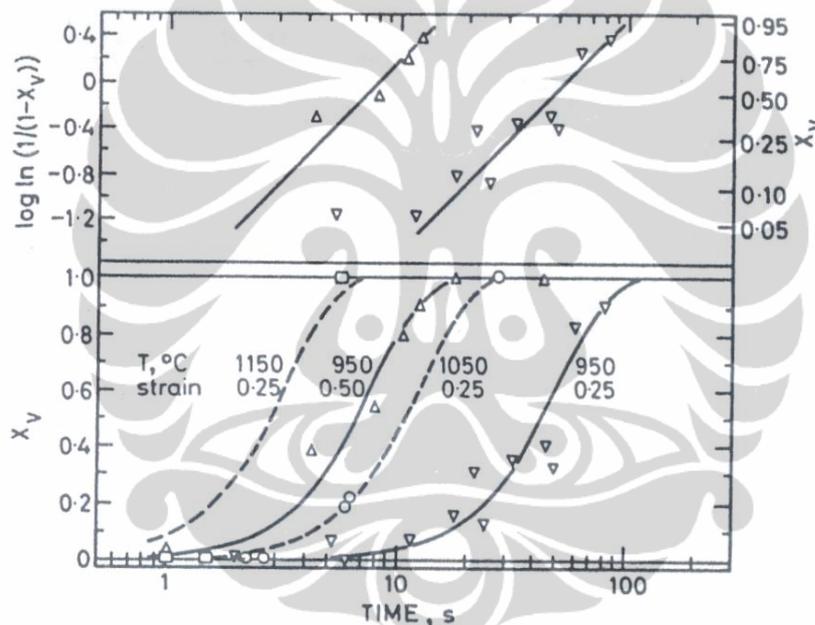
2.4.3. Kinetika Rekristalisasi

Rekristalisasi adalah perubahan struktur mikro yang ditimbulkan oleh pemanasan dimana terbentuk sejumlah butir baru yang bebas tegangan karena adanya suatu volume dari baja yang dideformasi, dan dengan waktu butir baru yang terbentuk tersebut bertambah ukurannya dengan adanya proses pergerakan batas butir, atau terjadi pertumbuhan butir. Secara termodinamik, logam yang mengalami deformasi memiliki tingkat energi bebas lebih tinggi, sehingga tidak stabil.

Pada pemanasan logam (anil), proses rekristalisasi adalah suatu mekanisme dimana material melepaskan energi bebas sisa dan bertransformasi ke keadaan dengan tingkat energi lebih rendah. Rekristalisasi selama pengerjaan panas dapat timbul baik secara dinamik, selama deformasi atau statik pada saat setelah deformasi. Dalam bab ini sesuai proses yang dialami material, diuraikan mengenai rekristalisasi statik, dinamik, juga pertumbuhan butir selama proses canai panas.

2.4.3.1. Rekrystalisasi Statik

Setelah deformasi, pelunakan akibat pemulihan (*recovery*) dan rekrystalisasi statik terjadi dengan waktu dan laju yang tergantung pada kondisi deformasi sebelumnya dan temperatur tahannya. Proses ini diikuti dengan perubahan tegangan mulur (*yield*) dan tegangan alir pada deformasi kedua yang diberikan setelah suatu waktu tahan yang berbeda untuk memperoleh indeks tegangan yang tersimpan, atau rekrystalisasi dapat diukur langsung dengan teknik metalografi sampel dengan melakukan proses quenching sampel uji. Hasil pengukuran/pengujian dengan metode ini dapat dilihat pada Gambar 2.12 di bawah ini.



Gambar 2.12. Kurva rekrystalisasi untuk baja paduan rendah (AISI 5140) dari butir awal berukuran $110 \mu\text{m}$ di deformasi dan di anil pada temperatur yang ditunjukkan pada laju regangan 1 s^{-1} [2].

Kurva pada gambar 2.12 mengikuti persamaan Avrami[1, 2] :

$$X_v = 1 - \exp\left[-C \left(\frac{t}{t_f}\right)^k\right] \quad (2.19)$$

Dimana X_v adalah fraksi butir terekristalisasi pada waktu t ; t_f adalah waktu untuk fraksi butir tertentu yang terekristalisasi (katakan 0,5), k adalah konstanta, $C = -\ln(1-f)$. Kurva pada gambar 2.12 di atas memiliki nilai $k = 2$, yaitu konsisten

dengan nilai yang diamati pada baja lain yang dideformasi sampai regangan $< \epsilon_c$ [4]. Dengan hubungan ini didapat $t_{0,05} = 0,27 t_{0,5}$ dan $t_{0,95} = 2,08 t_{0,5}$ (dimana $t_{0,05}$ dan $t_{0,95}$ adalah waktu terjadinya rekristalisasi 5% dan 95%), yang artinya rekristalisasi mencapai sekitar satu order besaran waktu.

Selama proses deformasi panas, baja berada dalam fasa austenit. *Flow stress* awalnya akan bertambah sesuai dengan bertambahnya regangan, dengan adanya pengerasan regang dan proses *recovery*.

Waktu tercapai regangan kritis ϵ_c , terjadi pelunakan akibat rekristalisasi dinamik dan *flow stress* menurun drastis hingga tercapai keadaan stabil setelah interval ϵ_x , dimana terjadi rekristalisasi dari sejumlah besar butir.

Puncak *flow stress* terjadi pada rekristalisasi sejumlah kecil butir, sehingga pada regangan puncak ϵ_p *flow stress* selalu lebih tinggi daripada kondisi regangan kritis ϵ_c . Pada penelitian ini deformasi yang dilakukan hanya sampai tingkat rekristalisasi statik.

Model rekristalisasi statik yang pernah diperkenalkan umumnya berasal dari persamaan Avrami yang dimodifikasi, seperti yang dilakukan oleh Sellars [1], melibatkan waktu konstan untuk rekristalisasi 50%, $t_{0,5}$, yang dapat ditulis:

$$X = 1 - \exp [-0,693(t/t_{0,5})^n] \quad (2.20)$$

$$t_{0,5} = A \epsilon^{-p} d_o^q Z^r \exp (Q_{rek}/RT) \quad (2.21)$$

Dimana :

X = fraksi butir terekristalisasi

t = Waktu (detik)

ϵ = regangan

d_o = besar butir awal (μm)

Z = Parameter Zenner Hollomon = $\dot{\epsilon} \exp Q_{def}/RT_{def}$ (det^{-1})

T = temperatur tahan (K)

T_{def} = Temperatur deformasi (K)

Q_{rek} = Energi aktivasi untuk rekristalisasi (J/mol)

Q_{def} = Energi aktivasi untuk deformasi (J/mol)

A,p,q, dan r = konstanta yang tergantung material

Beberapa data penelitian untuk baja C-Mn menunjukkan, model untuk memprediksi rekristalisasi 50% [50,51] dinyatakan dalam:

$$t_{0,5} = 2,5 \times 10^{-19} \varepsilon^{-4} d_0^2 \exp(300.000/RT) \text{ untuk } \varepsilon < 0,8 \varepsilon_p \quad (2.22)$$

$$t_{0,5} = 1,06 \times 10^{-5} Z^{-0,6} \exp(300.000/RT) \text{ untuk } \varepsilon > 0,8 \varepsilon_p \quad (2.23)$$

atau temperatur dimana penghambatan rekristalisasi statik dimulai akibat adanya endapan yang terbentuk akibat regangan deformasi dinyatakan oleh Madina dkk [21]. Baja HSLA (Nb) dengan kandungan Nb 0,093% digunakan sebagai model, didapat :

$$\text{Temp kritis rek statik (K)} = 1410 - 600 d_0^{-27} \varepsilon^{0,5} \quad (2.24)$$

Jadi jika $T > T$ kritis berlaku persamaan :

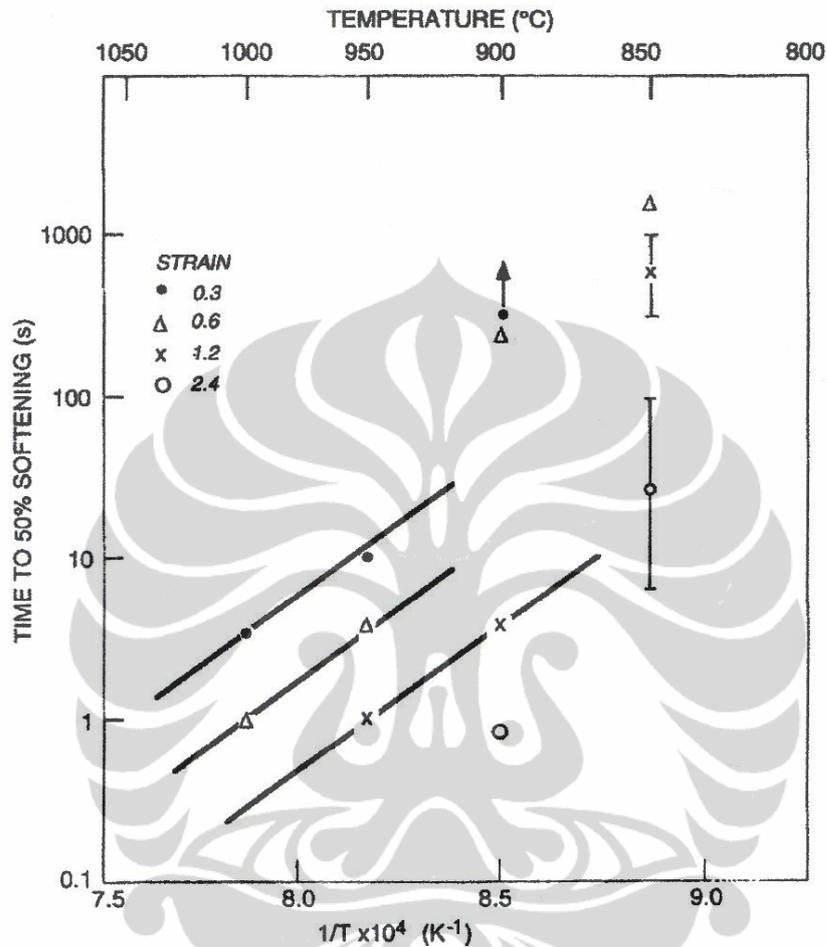
$$T_{0,5} = 1,374 \times 10^{-13} \varepsilon^{-19} \varepsilon \text{ rate}^{-0,44} d_0 \exp(272.000/RT) \quad (2.25)$$

Fraksi Volume endapan dapat diprediksi melalui uji kekerasan logam [58]. Tegangan deformasi erat hubungannya dengan besarnya pertumbuhan partikel endapan yang berdampak langsung terhadap beban canai .

Dutta dan Palmiere [25] telah melakukan penelitian tersebut tetapi hanya diteliti hubungan tegangan deformasi material terhadap prosentasi reduksi tiap tahapan canai, sehingga telah diambil kesimpulan bahwa tegangan deformasi lebih dipengaruhi oleh pengerasan regangan dibandingkan pertumbuhan butir.

Untuk baja, waktu pelunakan 50% sebagai fungsi dari $1/T$, seperti pada gambar 2.13 di bawah ini, menunjukkan perbedaan pada temperatur yang lebih rendah. Temperatur dimana perubahan ini terjadi, akan menurun dengan meningkatnya regangan dan berkurangnya prosentase Nb.

Pada temperatur tinggi, kinetika rekristalisasi dipengaruhi oleh *solute drag*, sementara penyimpangan waktu rekristalisasi yang lebih lama pada temperatur dibawah temperatur kritis disebabkan adanya efek *strain induced precipitation*



Gambar 2.13. Waktu 50% pelunakan untuk baja 0,03 Nb pada berbagai tingkat deformasi.[59]

Penambahan Nb pada baja C-Mn akan menambah penundaan waktu terjadinya sejumlah fraksi tertentu butir terekristalisasi pada regangan 0,3, karena adanya efek *solute drag*. Dari penelitian yang dilakukan oleh P.D Hodgson dan R.K.Gibbs [59], penambahan Nb pada baja tidak berpengaruh terhadap energi aktivasi rekristalisasi, yaitu sebesar 330kJ/mol. Namun prosentase Nb mempengaruhi ketergantungan $t_{0,5}$ terhadap deformasi. Pada regangan 0,3, belum tampak ada pengaruh dengan adanya penambahan Nb dari 0,013 hingga 0,03, sementara untuk regangan yang lebih tinggi, Nb yang lebih rendah mengalami rekristalisasi lebih cepat. Hal ini didapat dengan membuat p dan A pada

persamaan 2.21 merupakan fungsi prosentase Nb dalam larutan dalam baja. Untuk baja paduan mikro dengan 0,01 hingga 0,03 % berat Nb dengan regangan 0,3 atau lebih besar, model yang didapat untuk rekristalisasi statik temperatur tinggi yaitu:

$$t_{0,5} = (-5,24 + 550[Nb]) 10^{-18} \epsilon^{-4,0+77[Nb]} d_0^2 \cdot \exp 330.000/RT \quad (2.26)$$

Fungsi Nb pada bagian awal persamaan dibuat agar mendapatkan nilai yang sama untuk $t_{0,5}$ pada regangan 0,3.

Telah dijelaskan, perubahan perilaku rekristalisasi pada temperatur yang lebih rendah adalah akibat *strain induced precipitation*. Untuk memprediksi waktu awal precipitation pada baja paduan mikro Nb sebagai fungsi variabel proses dan komposisi, Dutta dan Sellars [60] mendapatkan persamaan:

$$T_{pr} = 3 \cdot 10^{-6} [Nb]^{-1} \epsilon^{-1} Z^{-0,5} \exp 270.000/RT \cdot \exp 2,5 \cdot 10^{10}/T^3 (\ln k_s)^2 \quad (2.27)$$

Dimana : k_s : Konstanta kelarutan = $[Nb][C+12N/14]/10^{2,26-6770/T}$

2.4.3.2 . Rekristalisasi Dinamik dan Post Dinamik.

Jika rekristalisasi statik adalah proses pelunakan yang dominan pada canai plat baja, semakin tinggi regangan dan semakin pendek waktu antara tahapan pada plat baja, maka semakin besar kemungkinan terjadinya rekristalisasi dinamik. Rekristalisasi dinamik belum diteliti secara detail dan model sellars telah digunakan untuk menghitung onset rekristalisasi dinamik. Q Penelitian menunjukkan [59,61] bahwa sekali terjadi rekristalisasi dinamik, akan timbul reaksi *post dynamic recrystallization* yang disebut rekristalisasi metadinamik, yang akan menghilangkan struktur mikro hasil rekristalisasi dinamik. Juga didapat, pada material yang dideformasi di atas temperatur *strain induced precipitation*, bahwa rekristalisasi metadinamik tidak dipengaruhi oleh komposisi. Fraksi volume rekristalisasi metadinamik yang mengikuti rekristalisasi dinamik sepenuhnya :

$$X = 1 - \exp \left[-0,693 \left\{ \frac{t}{t_{0,5}} \right\}^{1,5} \right] \quad (2.28)$$

Dimana
$$t_{0,5} = k_{md} Z^{r_{md}} \exp \frac{Q_{md}}{RT} \quad (2.29)$$

Untuk baja C-Mn, $n_{md} = -0,8$, $Q_{md} = 230$ kJ/mol dan $Q_{def} = 300$ kJ/mol.

Sensitivitas terhadap laju regangan yang tinggi pada persamaan ini dapat memungkinkan persamaan ini untuk memprediksi rekristalisasi sepenuhnya dalam kurang dari 0,1 s pada laju regangan 20 s^{-1} atau lebih. Oleh sebab itu pada proses canai yang memproduksi rekristalisasi dinamik, akan terjadi reaksi metadinamik yang akan menentukan ukuran butir austenit, dan oleh sebab itu amat rendah keperluan untuk suatu model rekristalisasi dinamik. Namun untuk proses rekristalisasi dinamik, model transformasi untuk rekristalisasi metadinamik dianggap perlu yang dapat menghitung rekristalisasi dinamik parsial selama proses deformasi.

2.4.3.3. Perhitungan Besar Butir Rekristalisasi.

Butir yang mengalami rekristalisasi statik (d_{rek}) untuk baja C-Mn diprediksi dengan persamaan Sellars, juga untuk baja Nb, sebagai berikut[59] :

$$d_{rek} = \varepsilon^{-0,5} d_o^{0,4} \exp \left(\frac{45.000}{RT} \right) \quad (2.30)$$

Untuk baja paduan mikro membutuhkan modifikasi terhadap persamaan ini, tergantung pada sensitivitas terhadap temperatur. Nilai $\exp \left(\frac{45.000}{RT} \right)$ disebut dengan D , dan Sellars mendapatkan batasan persamaan sebagai berikut[1]:

$$d_{rek} = \varepsilon^{-1} d_o^{0,67} D \quad (\text{Baja C-Mn, } \varepsilon < \varepsilon^*) \quad (2.31)$$

$$d_{rek} = \varepsilon^{-0,67} d_o^{0,67} D' \quad (\text{Baja Nb, } \varepsilon < \varepsilon^*, T > 950^\circ\text{C}) \quad (2.32)$$

Dari eksperimen berbagai peneliti didapat D sekitar 0,35 -0,83 [62,63,64] untuk baja C-Mn dan untuk baja Nb didapat D' adalah antara 0,66 - 1,86 [63, 64] .

2.4.4. Pertumbuhan Butir Austenit Setelah Deformasi Pada Proses Canai Panas

Pada proses canai panas, pertumbuhan butir dapat terjadi setelah deformasi dan proses rekristalisasi. Persamaan pertumbuhan butir setelah canai juga berdasarkan persamaan Beck, seperti pada pertumbuhan butir pada proses pemanasan awal (*reheating*) seperti dapat dilihat pada(persamaan (2.17):

$$d^n - d_o^n = C \cdot t$$

Dimana d adalah diameter butir akhir, d_o adalah diameter butir awal, t adalah waktu setelah proses rekristalisasi dan C adalah konstanta yang tergantung pada komposisi material. Sellars menganalisa data dari material baja karbon rendah – Mangan, mendapatkan persamaan berikut ini seperti pada persamaan (2.18) yang dapat ditulis sebagai berikut:

$$d^n - d_o^n = \left[A \exp\left(\frac{-Q_{gg}}{RT}\right) \right] \cdot t \quad (2.33)$$

Dimana

d	= besar butir akhir (μm)
d_o	= besar butir awal (μm)
n, A, Q_{gg}	= konstanta material dan proses[4]
T	= temperatur tahan isothermal (K)
t	= lama penahanan isothermal (detik)

Besar butir setelah canai panas juga berdasar pada persamaan 2.17 dan 2.33 di atas, namun untuk menggambarkan kondisi setelah canai panas yang tidak berada pada temperatur tetap, besar butir austenit selain fungsi waktu juga merupakan fungsi dari temperatur, dan d_o yang merupakan diameter butir setelah selesai rekristalisasi statis, yang merupakan besar butir awal austenit sebelum berlangsungnya pertumbuhan butir[65].

Pertumbuhan butir austenit setelah deformasi dan rekristalisasi statis pada saat baja keluar dari proses canai menjadi penting karena pada proses canai

beberapa tahap, besar butir akhir dari proses canai awal akan menjadi besar butir austenit awal pada proses canai berikutnya.

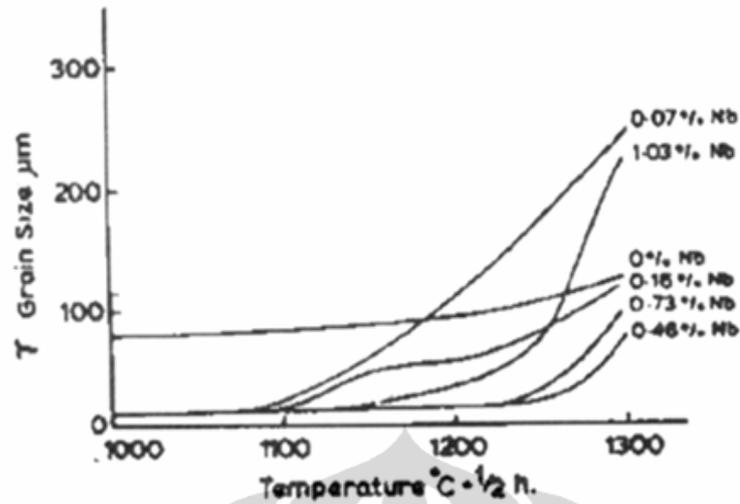
Menurut P.D. Hodgson dan R.K. Gibbs [59], Pertumbuhan butir yang terjadi setelah selesai rekristalisasi statik, masih berdasar pada persamaan 2.33, dengan asumsi sebagai pertumbuhan butir seragam, karena belum ada persamaan/model untuk pertumbuhan butir untuk kondisi non-isotermal. Sehingga dipakai persamaan yang berdasarkan kondisi isotermal.

Perbedaannya adalah adanya t yaitu waktu setelah rekristalisasi penuh(detik) dan Q adalah energi aktivasi pertumbuhan butir (kJ/mol) [59]. Konstanta yang digunakan dalam persamaan tersebut, untuk berbagai jenis baja adalah seperti pada tabel 2.2 di bawah ini, dimana benda uji dipanaskan (*reheating*) pada temperatur tinggi dan material telah mengalami rekristalisasi statis.

Tabel 2.2. Konstanta Persamaan Pertumbuhan Butir untuk Berbagai Jenis Baja.[59]

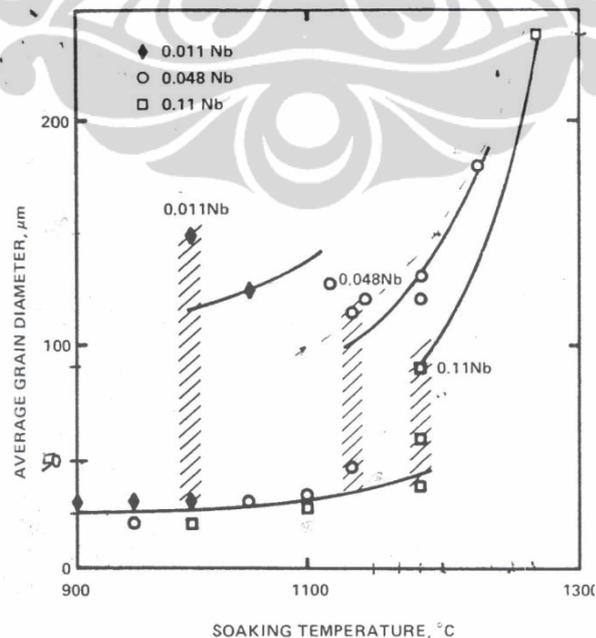
Baja	n	A	Q_{gg} (kJ/mol)
C-Mn-(V)	7	$1,45 \times 10^{27}$	-400
C-Mn-Ti	105	$2,6 \times 10^{28}$	-437
C-Mn-Nb	4,5	$4,1 \times 10^{23}$	-435

Persamaan pertumbuhan butir austenit 2.33 di atas dengan konstanta seperti pada tabel 2.2, dengan nilai n dan Q pertumbuhan butir menggunakan nilai yang digunakan berbagai peneliti [59]. Sedangkan untuk pengaruh prosentase Nb terhadap besar butir austenit dapat dilihat pada gambar 2.14 di bawah ini.



Gambar 2.14 Hubungan antara besar butir austenit dengan temperatur pemanasan dan prosentase Nb dalam baja.[66]

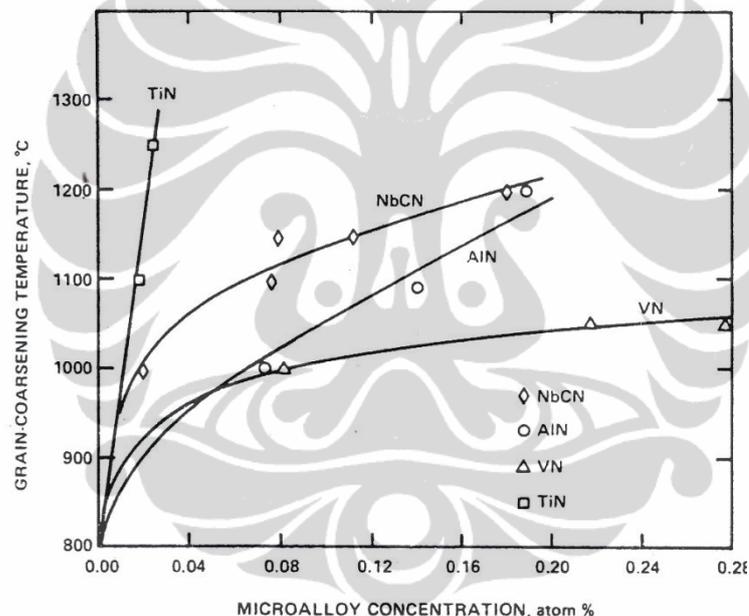
Dari gambar 2.14 , tampak bahwa semakin tinggi temperatur pemanasan dan maka besar butir austenit akan meningkat, sedangkan semakin besar prosentase Niobium dalam baja, maka besar butir austenit akan semakin halus. Menurut L.J.Cuddy,dkk,[67], variasi perilaku pertumbuhan butir pada setiap kelompok baja HSLA paduan mikro adalah disebabkan oleh perbedaan rentang konsentrasi paduan mikro. Hal ini apat ditunjukkan pada gambar 2.15 di bawah,



Gambar 2.15. Pengaruh prosentase Niobium terhadap temperatur pengkasaran butir baja[67]

Dari gambar 2.15 di atas tampak dengan meningkatnya prosentase Nb pada baja HSLA dari 0,01 hingga 0,11% berat, maka temperatur pengkasaran butir baja akan meningkat sebanyak 200°C. Artinya dengan naiknya prosentase Nb dalam baja, kestabilan partikel endapan NbC semakin tinggi, dan semakin efektif menghalangi pergerakan batas butir baja dan diperlukan temperatur lebih tinggi untuk melarutkan endapan untuk dapat terjadinya pertumbuhan butir baja.

Pengaruh konsentrasi paduan mikro terhadap besar butir austenit atau ferit dalam baja juga diterangkan oleh L.J. Cuddy dkk [67] seperti tampak pada gambar 2.16 di bawah ini, yaitu hubungan antara prosentase paduan mikro dengan temperatur pengkasaran butir baja.



Gambar 2.16. Peningkatan temperatur pengkasaran butir dari 4 jenis Baja paduan mikro dengan peningkatan prosentase paduan mikro[67]

Gambar 2.16 di atas menunjukkan bahwa peningkatan prosentase paduan mikro akan meningkatkan temperatur pengkasaran butir baja. Hal ini berarti dengan meningkatnya prosentase paduan mikro seperti Nb, efek penghalangan pergerakan batas butir menjadi semakin besar, sehingga dengan demikian, semakin tinggi prosentase Nb dalam baja, energi yang dibutuhkan untuk terjadinya pengkasaran butir menjadi semakin besar, sehingga seperti pada

gambar di atas tampak bahwa temperatur yang dibutuhkan untuk terjadinya pengkasaran butir akan semakin tinggi.

Untuk dapat menggambarkan kondisi pertumbuhan butir beberapa waktu setelah canai, maka digunakan persamaan pertumbuhan butir yang berlaku untuk temperatur tetap, dengan menghitung sebagai penjumlahan segmen-segmen kecil proses isothermal antara temperatur deformasi dalam waktu hingga sesaat sebelum benda uji dicelup cepat. Metode perhitungan ini disebut juga metode *additivity*, seperti yang dilakukan oleh Denis [69] yang menggunakan teori ini untuk analisa kinetika transformasi pada pendinginan dan pemanasan kontinyu dan Anelli [77], yang menggunakan teori ini untuk memprediksi besar butir austenit pada proses pemanasan kontinyu pada baja karbon rendah Si-Mn. Pertumbuhan butir austenit dengan memperhitungkan perubahan temperatur pada suatu rentang waktu tertentu dengan metode *additivity* seperti yang dilakukan oleh Angel Zufia dan Jose Manuel Llanos [36], mengikuti persamaan 2.34 dengan nilai T_i , temperatur pada waktu i , yang menurun atau naik dengan bertambahnya waktu

$$d^n = d_{rek}^n + A \sum_i \delta t_i \exp\left(-\frac{Q}{RT_i}\right) \quad (2.34)$$

Hampir seluruh proses canai terhadap slab baja dilakukan dalam dua tahapan deformasi, dengan deformasi setiap tahap adalah 30%, dengan temperatur awal canai sekitar 1100°C. Setelah canai panas, umumnya slab langsung didinginkan cepat dalam waktu sekitar 2 detik setelah keluar dari proses canai. Setelah keluar dari proses canai akhir (*finishing*) slab akan masuk ke proses *coiling*. Mulai dari keluar dari proses canai pertama hingga masuk ke proses canai kedua, dan saat keluar dari canai akhir hingga ke proses *coiling*, baja akan mengalami penurunan temperatur secara bertahap. Selama baja mengalami pemanasan awal (*reheating*), rentang waktu bertambahnya temperatur sampai temperatur pemanasan dapat dikonversikan menjadi suatu waktu equivalent isothermal [28].

Demikian juga pada saat pertumbuhan butir austenit saat baja keluar dari proses canai, selama baja mengalami pendinginan dari temperatur deformasi,

rentang waktu berkurangnya temperatur hingga temperatur memasuki tahap pendinginan cepat, dapat dikonversikan menjadi suatu waktu equivalent isothermal (t_{eq}) pada temperatur tertentu. Hal ini diterangkan oleh S.Akta dkk [28] dengan menggunakan nilai *equivalent*, bahwa reaksi yang berjalan dengan waktu dan temperatur yang berubah dapat analog dengan menetapkan suatu waktu *equivalent* atau temperatur efektif (T_{eff}). Secara umum persamaannya adalah sebagai berikut [28];

$$t_{eq} = \sum_{T_x}^{T_{def}} \frac{\exp\left(-\frac{Q_{gg}}{RT_x}\right) \delta t}{\exp\left(-\frac{Q_{gg}}{RT_{def}}\right)} \quad (2.35 a)$$

$$\text{atau } T_{eff} = \frac{-Q_{gg}}{R \ln \left(\frac{R}{Q_{gg}(T_f - T_i)} \left(T_f^2 \exp\left(-\frac{Q_{gg}}{RT_f}\right) - T_i^2 \exp\left(-\frac{Q_{gg}}{RT_i}\right) \right) \right)} \quad (2.35 b)$$

dimana t_{eq} adalah waktu (detik) mulai baja keluar dari proses canai dengan temperatur tertentu, menurun hingga sebelum didinginkan cepat. T_x adalah temperatur pada suatu rentang waktu tertentu δt_x , T adalah temperatur awal ($T_{deformasi}$) dan Q_{gg} adalah energi aktivasi untuk pertumbuhan butir, yang didapat untuk baja C-Mn-Nb adalah 435 kJ/mol [28]. T_{eff} adalah temperatur efektif, T_f adalah temperatur akhir sebelum didinginkan cepat, T_i adalah temperatur saat baja keluar dari proses canai.

2.4.5. Kontrol Proses Canai

2.4.5.1. Temperatur dan Waktu Pemanasan Pada Proses Deformasi

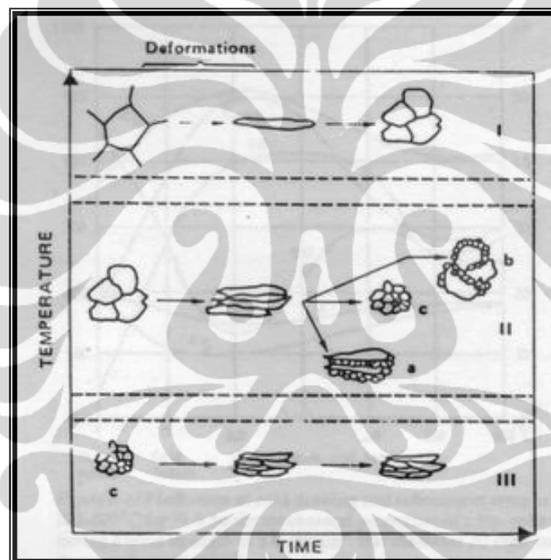
Proses Canai Panas merupakan tahapan dimana proses canai dilakukan pada temperatur yang terkontrol [39]. Proses ini digunakan untuk mendapatkan sifat mekanis yang tinggi pada baja untuk berbagai aplikasi teknik. Penggunaan canai panas terkontrol menghasilkan kombinasi yang baik antara peningkatan kekuatan dan ketangguhan. Gambar 2.17 menunjukkan tiga rangkaian canai panas

dan rekristalisasi, dimana austenit yang pertama kali terdeformasi kemudian mengalami rekristalisasi dengan berbagai cara.

Dari gambar 2.17 di bawah, terdapat tiga rangkaian proses canai panas dan rekristalisasi, adalah sebagai berikut;

Proses 1 : Proses pengerolan dilakukan dengan *finishing temperature* berada diatas 1000°C . Austenit yang terdeformasi terekristalisasi dengan sangat cepat dan mengalami pertumbuhan butir

Proses 2 : Pengembangan terhadap rekristalisasi dapat mengikuti satu dari alternatif berikut ketika *finishing temperature* diperkirakan sekitar 1000°C



Gambar 2.17 Ilustrasi modifikasi butir austenit selama *controlled rolling* [71]

- Alternatif (a) : Rekristalisasi belum sempurna dan hanya terjadi pada batas butir
- Alternatif (b) : Rekristalisasi terjadi dengan sempurna namun bersamaan dengan itu terjadi pertumbuhan butir pada beberapa bagian
- Alternatif (c) : Rekristalisasi terjadi dengan sempurna dan memberikan struktur butir halus. Transformasi dari austenit menjadi ferit menghasilkan ukuran butir yang lebih halus yang memberikan sifat yang baik pada material.

Proses 3 : Pada temperatur sekitar 900°C atau lebih rendah, tidak terjadi rekristalisasi dan menyebabkan struktur akhir berupa butir ferit halus dengan bentuk poligon yang memiliki kerapatan dislokasi yang rendah.

2.4.5.2. Kecepatan Pendinginan (*Cooling rate*)

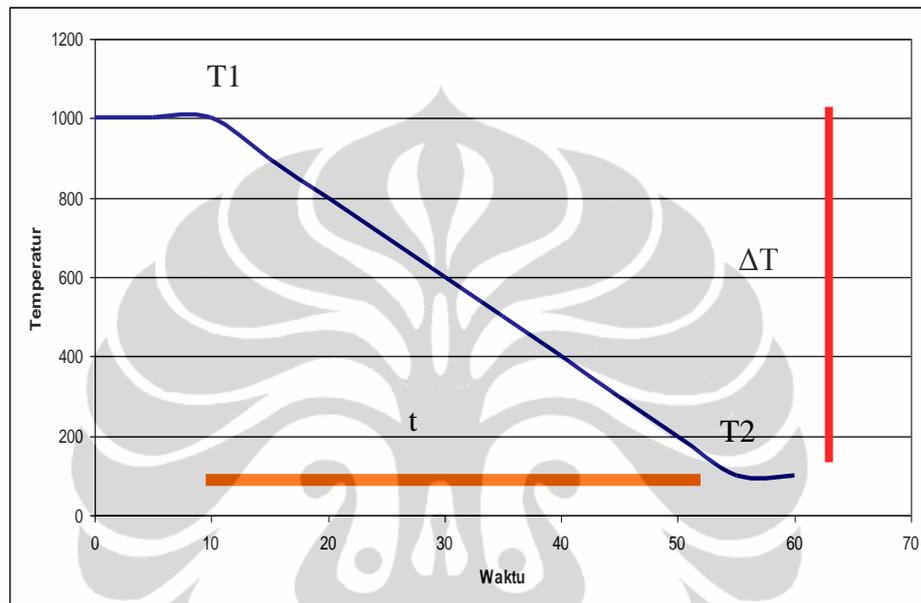
Dalam Praktek, proses canai dilakukan pada kondisi pendinginan kontinyu. Kecepatan pendinginan (*rate of Cooling*) merupakan laju penurunan temperatur, dari temperatur canai, hingga temperatur dimana bahan tak lagi mengalami transformasi fasa. Selama proses pendinginan, akan tetapi masih dalam rentang temperatur austenit, maka akan terjadi pertumbuhan butir austenit akibat adanya proses kinetika rekristalisasi

Laju pendinginan dirumuskan sebagai $T_1 - T_2 / \Delta t$, dimana T_1 adalah temperatur benda kerja pada waktu terjadi deformasi, dan T_2 adalah temperature benda kerja pada saat proses pendinginan cepat terjadi, dan Δt adalah waktu yang diperlukan untuk bahan pada temperatur T_1 menjadi T_2 , sehingga *rate of Cooling* $\approx \Delta T / \Delta t$, dapat dilihat pada gambar 2.18 di bawah ini.

Untuk keadaan non-isothermal, nilai T akan berubah mengikuti nilai t yang diberikan. Hal ini menyebabkan adanya variabel T_1 dan T_2 , yang akan menimbulkan adanya ΔT pada setiap nilai t yang diberikan. Untuk mempermudah perhitungan, maka nilai t yang digunakan pada penelitian ini dibatasi antara 10 – 30 detik. Ilustrasi dari variabel – variabel yang ada untuk pendinginan dalam keadaan kontinyu dapat dilihat pada Gambar 2.18 di bawah ini..

Dalam perhitungan temperatur equivalent, didapat temperatur yang mewakili kondisi selama temperatur mulai berubah dari T awal sampai ke T_i , dalam waktu t detik. Sedangkan pada perhitungan waktu equivalent, akan didapat waktu yang mewakili kondisi selama terjadi perubahan temperatur dari T awal ke T_i . Dari gambar 2.18. di bawah, terlihat bahwa kondisi penurunan temperatur persatu satuan waktu secara kontinyu adalah merupakan variabel yang penting dalam proses canai panas, karena dari persamaan 2.33 maupun persamaan 2.34 tampak dengan berubahnya faktor $\Delta T / \Delta t$, maka akan berpengaruh terhadap kinetika pertumbuhan butir untuk keadaan non-isothermal.

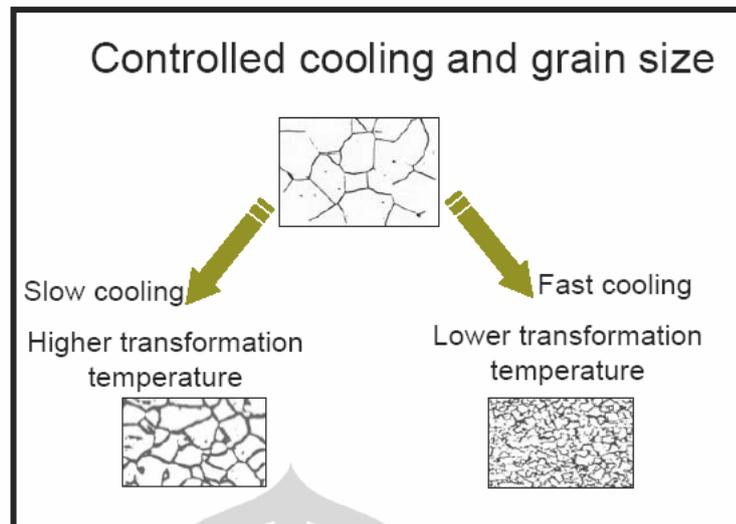
Setelah keluar dari proses canai panas, baja mengalami penurunan temperatur. Pengontrolan terhadap laju pendinginan setelah tahap akhir (*finishing*) juga mempengaruhi sifat mekanis yang dihasilkan. Transformasi dari austenit menjadi ferit terjadi pada temperatur yang lebih rendah dari temperatur deformasi selama proses pendinginan.



Gambar 2.18. Ilustrasi Variabel Untuk Pendinginan Dalam Keadaan Kontinyu

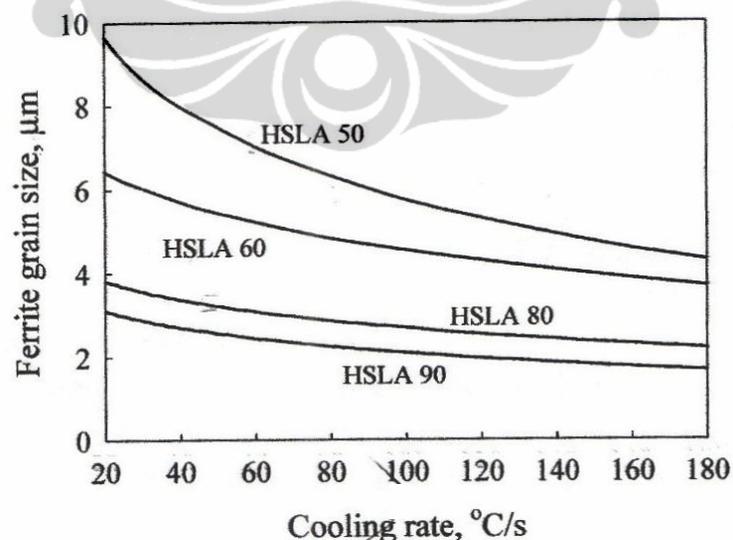
Rendahnya temperatur transformasi akan menghasilkan produk butir yang lebih halus. Ilustrasi tersebut dapat dijelaskan pada gambar 2.19. dibawah ini. Dari gambar 2.19 terlihat bahwa setelah baja dipanaskan, jika dilakukan pendinginan lambat, maka butir akhir fasa akan menjadi kasar, sedangkan dengan pendinginan cepat butir akhir fasa akan menjadi halus.

Hal ini kemungkinan karena pada temperatur yang lebih rendah, pengintian lebih cepat terbentuk sehingga pertumbuhan butir tidak besar, sehingga terbentuk butir yang halus. Sebaliknya pada pendinginan lambat, transformasi terjadi pada temperatur lebih tinggi, *driving force* pengintian butir baru kurang besar, sehingga jumlah butir sedikit, dan butir menjadi lebih kasar



Gambar 2.19. Ilustrasi pengaruh laju pendinginan terhadap ukuran butir [72]

Pengaruh kecepatan pendinginan terhadap besar butir austenit ditunjukkan oleh beberapa peneliti terdahulu, antara lain oleh Matthias Militzer[65] yang melakukan eksperimen terhadap beberapa jenis baja HSLA- Nb , HSLA 50(0,02% Nb, 01% Ti), HSLA 60 (0,035% Nb), HSLA 80 (0,08%Nb,0,05% Ti), HSLA 90(0,05Nb%, 0,14%Ti), yang hasilnya seperti tampak pada gambar di bawah ini, dimana besar butir ferit menurun atau menjadi lebih halus dengan meningkatnya kecepatan pendinginan, seperti tampak pada gambar 2.20. di bawah ini;



Gambar 2.20. Hubungan antara besar butir ferit setelah deformasi , rekristalisasi dan transformasi sebagai fungsi kecepatan pendinginan.[65]

2.4.6. Transformasi Austenit-Ferit

Setelah baja mengalami proses canai, kondisi austenit ditentukan oleh pengaruh parameter proses seperti temperatur pemanasan awal (*reheating*), prosentase deformasi dan temperatur deformasi, kecepatan pendinginan saat keluar dari proses canai. Pada saat baja mengalami penurunan temperatur secara kontinyu saat keluar dari proses canai panas, baja akan bertransformasi dari fasa austenit menjadi fasa-fasa temperatur rendah, seperti ferit dan pearlit. Namun struktur mikro yang dominan adalah ferit (untuk $C_{eq} < 0$, dimana $C_{eq} = C + Mn/6$). Parameter yang dijadikan acuan adalah besar butir ferit, dimana prosentasi pearlite yang rendah dan jarak antar lamellae perlit tidak banyak berpengaruh terhadap kekuatan pada komposisi ini.

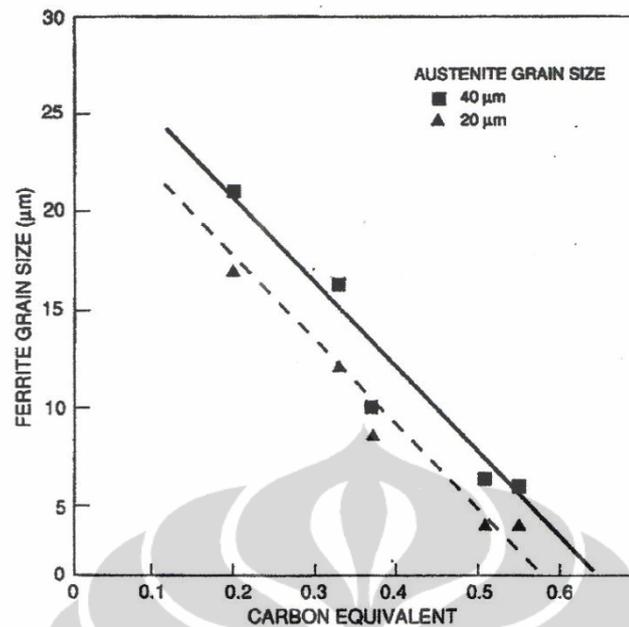
Faktor yang mempengaruhi ukuran butir ferit adalah ukuran butir austenit akhir dan sisa regangan deformasi, komposisi baja dan kecepatan pendinginan setelah deformasi [59]. Besar butir austenit akhir adalah ukuran butir austenit yang terekristalisasi penuh, sedangkan regangan sisa adalah regangan sisa deformasi yang tidak hilang setelah proses rekristalisasi selesai sesaat sebelum transformasi terjadi. Jika proses canai dilakukan dalam beberapa tahap, regangan sisa adalah akumulasi dari regangan deformasi beberapa tahap, setelah tahap terakhir dari rekristalisasi. Untuk baja C-Mn dan baja paduan mikro, komposisi baja besar pengaruhnya terhadap besar butir ferit. Ukuran butir ferit, $d\alpha_o$, pada transformasi dari austenit yang mengalami rekristalisasi penuh dinyatakan dengan persamaan yang merupakan pengembangan dari persamaan yang didapatkan oleh Sellars dan Beynon [73], yang dimodifikasi dengan pengaruh Carbon dan Mangan, seperti pada persamaan di bawah ini :

$$d\alpha_o = (\beta_0 + \beta_1 C_{eq}) + (\beta_2 + \beta_3 C_{eq}) CR^{-0.5} + \beta_4 (1 - \exp(-\beta_5 d\gamma)) \quad (2.36)$$

Dimana : $C_{eq} = C + Mn/6$

CR= Kecepatan Pendinginan(*Cooling rate*) dalam ($^{\circ}C/detik$)

$d\gamma$ = ukuran butir austenit (μm)



Gambar 2. 21. Ukuran butir fasa Ferit sebagai fungsi dari C_{eq} untuk baja C-Mn[59].

Dari gambar 2.21 di atas tampak bahwa dengan meningkatnya Carbon equivalent baja maka butir ferit akan semakin halus dan untuk carbon equivalent yang sama, butir austenit yang halus akan menghasilkan butir ferit yang halus, dan sebaliknya, butir austenit yang lebih kasar akan menghasilkan butir ferit yang kasar juga.

Seluruh sisa regangan deformasi yang ada pada austenit pada baja akan menghaluskan butir ferit. Untuk menyatakan hal tersebut dinyatakan dalam model yang disampaikan oleh Sellars dan Beynon [59, 73] seperti di bawah ini:

$$d_{\alpha} = d_{\alpha 0} (1 - 0,45 \sqrt{\epsilon_r}) \quad (2.37)$$

Dimana, $d_{\alpha 0}$ = Ukuran butir ferit tanpa adanya regangan sisa deformasi (μm).

ϵ_r = Regangan sisa deformasi

Konstanta untuk persamaan (2.36) di atas dapat dilihat pada tabel 2.3 di bawah ini:

Tabel 2.3 Konstanta untuk persamaan ukuran butir fasa Ferit untuk Baja C-Mn[59]

$C_{eq} < 0,35$	$C_{eq} > 0,35$
$\beta_0 = -0,4$	$\beta_0 = 22,6$
$\beta_1 = 6,37$	$\beta_1 = -57,0$
$\beta_2 = 24,2$	$\beta_2 = 3$
$\beta_3 = -59,0$	$\beta_3 = 0$
$\beta_4 = 22,0$	$\beta_3 = -59,0$
$\beta_5 = 0,015$	$\beta_5 = 0,015$

Pada umumnya, baja C-Mn-Nb dan baja C-Mn-Nb-Ti memiliki regangan sisa deformasi yang lebih tinggi. P.D Hodgson dan R.K.Gibbs [59] telah melakukan penelitian terhadap berbagai rentang komposisi baja paduan mikro Nb untuk mendapatkan model ukuran butir ferit. Untuk baja HSLA-Nb, ukuran butir ferit dipengaruhi baik oleh regangan sisa maupun oleh komposisi baja. Juga didapat bahwa efektifitas kecepatan pendinginan dalam menghaluskan ukuran butir ferit akan berkurang dengan meningkatnya regangan sisa. Juga didapat bahwa regangan sisa memiliki pengaruh yang lebih besar terhadap ukuran butir ferit pada baja HSLA-Nb dengan C_{eq} rendah. Oleh sebab itu terdapat interaksi yang kompleks antara komposisi, regangan sisa dan besar butir austenit untuk baja HSLA-Nb.

Persamaan yang didapat adalah untuk memprediksi ukuran butir ferit setelah proses canai baja plat dengan regangan sisa tertentu, ϵ_r , sebagai faktor integral.[59] Persamaan terdiri dari pendekatan ukuran butir ferit (d_{lim}) ditambah penjumlahan dari besaran kecepatan pendinginan dan suatu besaran besar butir austenit, sebagai berikut:

$$d\alpha = d\alpha_{lim} + A(1,6 - \epsilon_r) + B CR^{-0,5} \quad (2.38)$$

Dimana: CR = Cooling rate ($^{\circ}\text{C}/\text{detik}$)

ε_r = Regangan Deformasi Sisa.

A = $f(d\gamma)$

B = $f(\varepsilon_r)$

Pada regangan lebih besar dari 1,6, pengaruh dari regangan sisa berkurang dan konstanta B ini menjadi tidak berarti terhadap perubahan ukuran butir ferit. Persamaan ini telah di validasi dan memberikan hasil yang amat mendekati antara hasil perhitungan dengan hasil eksperimen dari P.D.Hodgson dan R.K.Gibbs [59].

Dari persamaan di atas tampak bahwa besar butir ferit akhir dipengaruhi oleh regangan sisa, faktor besar butir austenit dan kecepatan pendinginan. Dapat dilihat bahwa hubungan antara diameter butir ferit terhadap kecepatan pendinginan adalah $1/\text{CR}^x$, atau dengan kata lain kebalikan dari kecepatan pendinginan berpangkat sesuatu. Pengaruh kecepatan pendinginan selama proses transformasi Austenit-Ferit berlangsung juga dinyatakan oleh CM Sellars [1,68,70] yang melakukan eksperimen terhadap baja karbon rendah C-Mn. Hal ini dinyatakan pada persamaan hubungan besar butir austenit (20-100 μm) seperti di bawah ini:

$$d\alpha = 11,7 + 0,14d\gamma + 37,7 R^{-1/2} \quad (2.39)$$

dimana : $d\alpha$ = diameter butir ferit (μm),

$d\gamma$ = diameter butir austenit (μm)

R= Kecepatan pendinginan (*Cooling Rate*, $^{\circ}\text{C}/\text{menit}$).

Didapat dengan penelitian dengan kecepatan pendinginan antara 3,6-120 $^{\circ}\text{C}/\text{menit}$.

B. Donnay dkk[74] juga mendapatkan hubungan antara besar butir ferit akhir dengan besar butir austenit sebelum transformasi. Rentang ukuran butir austenit pada penelitian B.Donnay dkk adalah antara 20-170 μm dan kecepatan pendinginan antara 0,01-70 $^{\circ}\text{C}/\text{detik}$. Persamaan yang didapat adalah sebagai berikut:

$$d\alpha = (13 - 0,73 C_{eq}^{0,45}) d\gamma^{0,3} \cdot CR^{-0,15} \quad (2.40)$$

Dimana : $d\alpha$ = ukuran butir ferit (μm)

$$C_{eq} (10^{-3}\%) = C + \text{Mn}/10$$

$d\gamma$ = Ukuran butir austenit (μm)

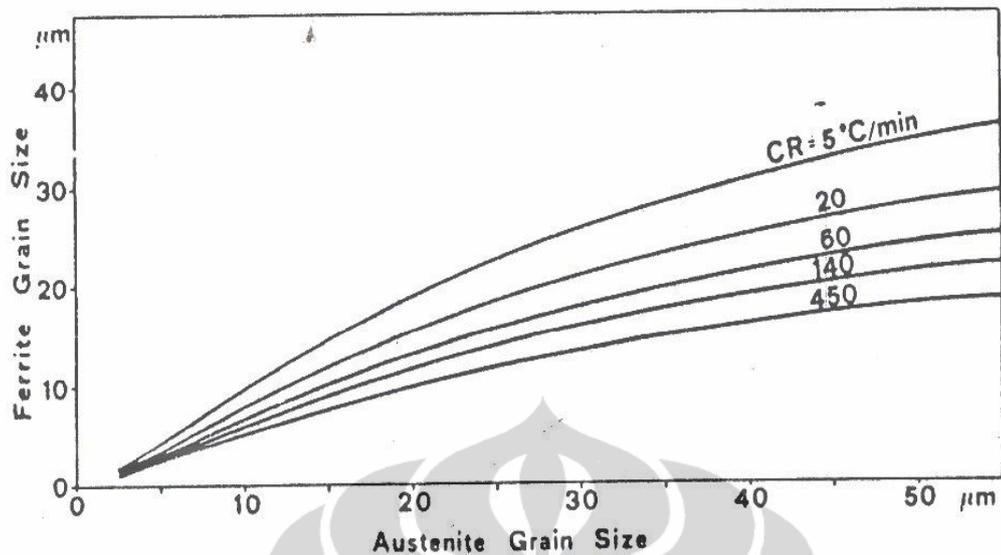
CR = Kecepatan Pendinginan ($^{\circ}\text{C}/\text{detik}$)

Dari ketiga persamaan di atas tampak bahwa diameter butir ferit merupakan fungsi dari diameter butir austenit dan kecepatan pendinginan selama proses transformasi (CR). Diameter butir ferit sebanding dengan diameter butir austenit sebelum bertransformasi dan berbanding terbalik dengan kecepatan pendinginan berpangkat suatu bilangan, ($1/CR^{0,5}$, $1/CR^{0,15}$) selama transformasi.

Dari ketiga persamaan di atas juga tampak, baik hubungan antara besar butir ferit selama sebelum dan setelah pertumbuhan butir, maupun hubungan antara butir austenit dan besar butir akhir ferit, memiliki kecenderungan hubungan yang sama. Hubungan yang didapat adalah:

- a. Pertumbuhan butir austenit maupun ferit mempunyai hubungan yang berbanding terbalik dengan kecepatan pendinginan transformasi berpangkat suatu bilangan.
- b. Dengan semakin besar butir austenite, maka besar butir akhir dari Ferit juga akan semakin besar. Artinya besar butir ferit akhir sebanding dengan diameter butir austenit sebelum bertransformasi.

Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh C.M. Sellars[75], Hiroshi Sekine[76] dan M. Anelli dkk [77], terhadap baja HSLA-Nb, seperti yang tampak pada gambar 2.22 di bawah ini.



Gambar 2.22. Hubungan antara besar butir Ferit yang meningkat, dengan semakin meningkatnya besar butir Austenit [77].

Dari gambar 2.22 di atas, tampak bahwa semakin besar ukuran butir austenit akhir sebelum transformasi, akan semakin besar pula ukuran butir fasa ferit setelah transformasi. Juga tampak semakin besar regangan deformasi pada baja, butir ferit akhir dan butir austenit akan semakin halus. Sehingga untuk mendapatkan besar butir ferit akhir yang halus, dilakukan perlakuan proses canai terkontrol untuk mendapatkan besar butir austenit akhir yang halus sebelum bertransformasi menjadi fasa ferit.

2.4.7. Hubungan Besar Butir Austenit Terhadap Ukuran Partikel Fasa Kedua dan Prosentase Nb Dalam Baja.

Pendekatan mendasar terhadap perilaku pertumbuhan butir austenit pada baja HSLA-Nb adalah adanya partikel fasa kedua. Fasa kedua umumnya merupakan senyawa antara paduan mikro dengan unsur karbon dan/atau Nitrogen. Hal yang penting dalam hubungan besar butir austenit dengan paduan mikro adalah diameter kritis dari partikel (R_{kr}), dimana partikel yang mencapai diameter ini tidak akan tumbuh ataupun menyusut. Partikel dengan radius R_{kr} secara

termodinamik stabil karena gaya dorong untuk pertumbuhan butir berimbang dengan gaya penghalang oleh partikel pada perpindahan batas butir. Jadi radius partikel kritis adalah batas ukuran dimana pertumbuhan butir normal dapat terjadi. Secara kuantitatif hal ini disampaikan oleh Zener [52], seperti telah dinyatakan dalam persamaan 2.13 sebelum ini., yang secara lebih umum juga dinyatakan pada persamaan 2.14.

Pada kondisi ini jika semua butir memiliki radius $R = R_{kr} = 2r/3f$, maka pertumbuhan butir abnormal juga harus terhenti, dan struktur mikro yang ada berada dalam keadaan seimbang. Jadi pertumbuhan butir abnormal terjadi, dimulai jika ada satu saja partikel yang $R > R_{kr}$, sampai suatu kondisi dimana struktur mikro terdiri dari kristal tunggal. Mengenai pertumbuhan butir abnormal, juga disampaikan oleh Gladman [53], yang menyatakan bahwa pertumbuhan butir abnormal terjadi jika partikel membesar karena penggabungan. Saat partikel mencapai suatu ukuran tertentu, beberapa butir menjadi tidak terhalang dari partikel yang mempunyai radius kritis dan dapat tumbuh lebih lanjut. Radius kritis partikel saat terjadi hilangnya penghalangan batas butir baja, dinyatakan dalam persamaan seperti dinyatakan pada persamaan 2.15 sebelum ini.

Persamaan 2.14, 2.15 dan 2.16 merupakan dasar perhitungan dari ukuran butir austenit stabil pada kombinasi antara fraksi volume dan radius partikel endapan. Pengendapan dan pengkasaran endapan paduan mikro merupakan faktor yang menentukan ukuran butir austenit yang stabil.

Menurut S.C Hong dkk[79], peranan Nb baik dalam larutan maupun dalam endapan dipengaruhi oleh temperatur pemanasan awal (*reheating*), pengaruhnya terhadap rekristalisasi, pertumbuhan butir austenit, perilaku transformasi γ menjadi α . Contoh peranan Nb adalah; membatasi terjadinya proses rekristalisasi austenit dengan terbentuknya endapan NbC sebelum terjadinya transformasi γ menjadi α . Sedangkan endapan NbC yang kasar yang tidak larut saat pemanasan awal (*reheating*), dapat menjadi lokasi yang sering menjadi tempat pengintian ferit, sehingga mempercepat transformasi, dan akan memperhalus butir austenit.

Peranan atom Nb terhadap penundaan transformasi dari γ menjadi α adalah sebagai berikut :

- a) Aktifitas karbon berkurang karena adanya interaksi yang kuat antara Carbon dan Niobium
- b) Atom Nb amat banyak jumlahnya yang tersegregasi pada batas butir γ/α , sehingga mengurangi kinetika pertumbuhan butir ferit
- c) Penambahan prosentase Nb dalam baja menurunkan temperatur Ar₃, dibandingkan baja tanpa Nb, sehingga transformasi terjadi pada temperatur yang lebih rendah, sehingga *driving force* terjadinya pengintian ferit lebih besar dibandingkan pertumbuhannya, sehingga butiran ferit menjadi lebih halus.

S.C Hong[79] mendapatkan bahwa ukuran butir pada baja C-Mn lebih besar dibandingkan dengan baja HSLA-Nb. Pada temperatur pemanasan awal 900°C dan 1250°C besar butir austenit baja C-Mn adalah 25 μ m dan 240 μ m, sedangkan untuk kedua temperatur pemanasan awal yang sama, baja HSLA-Nb memiliki besar butir austenit 20 μ m dan 200 μ m. Temperatur Ac₃ mengalami penurunan sebesar 20 °C pada kenaikan temperatur pemanasan dari 900 menjadi 1250°C, dengan meningkatnya ukuran butir austenit, sedangkan pada baja HSLA-Nb menalami penurunan lebih besar, yaitu sebesar 57°C, dengan meningkatnya ukuran butir austenit. Rendahnya temperatur Ac₃ pada baja HSLA-Nb adalah disebabkan adanya efek *solute drag* dari Nb dengan meningkatnya ukuran butir austenit..

Besar butir ferit pada baja HSLA-Nb lebih halus dibandingkan baja C-Mn. Hal ini kemungkinan disebabkan endapan NbC menjadi tempat tambahan bagi pengintian pembentukan fasa ferit.

Prosentase Nb pada endapan pada temperatur pemanasan 900°C adalah 0,044% berat, yang sama dengan komposisi baja produk tempa. Hal ini menunjukkan bahwa NbC tidak sepenuhnya larut selama pemanasan pada 900°C Endapan ini akan berlaku sebagai penghalang pergerakan batas butir sekaligus tempat pengintian butir ferit. Sedangkan prosentase Nb pada endapan pada pemanasan 1250°C berkurang menjadi 0,004%berat, karena Nb larut selama pemanasan.

Dengan larutnya Nb pada proses pemanasan akan menurunkan efek penghalangan batas butir austenit, sehingga pada temperatur yang lebih tinggi, akan terjadi pertumbuhan butir abnormal pada pada baja HSLA-Nb.

2.4.8. Mekanisme Penguatan Ferit

Kekuatan butir ferit pada baja HSLA umumnya diperoleh melalui mekanisme penguatan *grain refinement*, pengerasan presipitat, serta penguatan larutan padat. Penghalusan butir merupakan mekanisme penguatan yang paling sering digunakan karena dapat menghasilkan kombinasi yang baik antara kekuatan dan ketangguhan. Penguatan dengan *grain refinement* dipengaruhi oleh disain paduan serta metode proses [39]. Sebagai contoh, berbagai metode penghalusan butir digunakan pada tiga tahapan yang berbeda dalam proses perlakuan termomekanik, yaitu :

- Penambahan Titanium atau Alumunium untuk menghambat pertumbuhan austenit ketika baja dipanaskan (*reheating process*) untuk deformasi panas
- Canai terkontrol pada baja paduan mikro untuk mengkondisikan agar austenit dapat bertransformasi menjadi butir ferit yang halus
- Penggunaan paduan yang dapat mempercepat laju pendinginan untuk menurunkan temperatur transformasi austenit-ferit.

Proses canai terkontrol dapat dilakukan dengan melakukan pengaturan pendinginan setelah proses canai. M.Militzer dkk[8], mendapatkan dari penelitiannya bahwa semakin rendah temperatur transformasi menjadi ferit, maka akan didapat butir ferit yang halus.

Penguatan presipitat diperoleh melalui pembentukan karbonitrida yang halus dan terdispersi selama proses pemanasan dan pendinginan. Karena penguatan presipitat dapat menurunkan ketangguhan, maka penghalusan butir sering digunakan bersamaan dengan penguat presipitat untuk meningkatkan ketangguhannya. Penguatan presipitat dipengaruhi oleh jenis karbonitrida, ukuran presipitat serta jumlah presipitat. Pembentukan karbida logam merupakan penguat presipitat yang paling efektif digunakan pada baja paduan mikro Niobium, Vanadium, dan/atau Titanium. Jumlah partikel presipitat yang

terbentuk selama proses pemanasan dan pendinginan bergantung pada kelarutan karbida dalam austenit dan pada laju pendinginan[17, 51]

2.5. Pengamatan Struktur Mikro Austenit Prior

Metalografi atau mikroskopi bertujuan untuk mempelajari karakteristik struktur logam atau paduan. Hal tersebut memungkinkan dalam menentukan ukuran butir, bentuk, dan distribusi berbagai fasa atau inklusi yang dapat berpengaruh terhadap sifat mekanis logam. Struktur mikro dapat menggambarkan perlakuan panas atau perlakuan mekanis logam, dan memungkinkan dalam memprediksi sifat yang diharapkan pada kondisi tertentu. Prosedur metalografi meliputi preparasi spesimen yang terdiri dari amplas, poles dan etsa. Permukaan sampel uji dilakukan pengamplasan yang bertujuan untuk meratakan permukaan sampel. Setelah itu pemolesan dilakukan hingga didapatkan permukaan yang halus dan mengkilap seperti kaca tanpa gores. Setelah proses pemolesan, dilakukan proses etsa untuk mengamati struktur mikro pada spesimen.

Pada berbagai material, mikrostruktur dapat ditampakkan dengan aplikasi penggunaan etsa yang sesuai. Fasa austenit prior merupakan struktur mikro spesifik dalam teknik metalografi. Untuk dapat mengamati fasa austenit prior, baja dilakukan persiapan sampel metalografi seperti pada umumnya;

- Pengampelasan
- Pemolesan
- Etsa.

Pengampelasan dan pemolesan bertujuan untuk menghilangkan semua goresan di permukaan benda uji, agar tidak mengganggu dalam pengamatan struktur mikro. Hal yang spesifik adalah dalam proses etsa. Proses etsa dilakukan untuk menampilkan batas butir austenit prior, dimana fasa austenit pada saat pengamatan telah bertransformasi menjadi fasa Martensit. Etsa dilakukan dengan memasukkan benda uji ke dalam larutan kimia tertentu sehingga terjadi pengikisan batas butir secara terkendali.

2.5.1. Etsa Untuk Menampakkan Batas Butir Austenit Prior

Karena sifat baja yang mengalami pemanasan dipengaruhi oleh ukuran butir yang dihasilkan selama austenisasi, upaya untuk menampakkan batas butir austenit prior menjadi sangat penting dalam mengontrol kualitas baja. Banyak prosedur yang dapat digunakan untuk menampakkan batas butir austenit jika sampel dalam kondisi dapat dipanaskan, dikarburisasi atau dioksidasi. Namun dalam beberapa hal, seperti pada analisa kerusakan, sampel tidak dapat diperlakukan dengan proses lain dan struktur butir austenit prior harus ditampakkan dengan kondisi saat pertama diterima, yaitu hanya dengan proses etsa, atau dengan bantuan perlakuan temper untuk meningkatkan respon terhadap etsa tanpa mempengaruhi ukuran butirnya.

Berbagai larutan etsa telah digunakan untuk menampakkan batas butir austenit prior. Namun, tidak ada larutan etsa tunggal yang dapat menampakkan batas butir austenit prior untuk semua jenis sampel. Dalam prakteknya, *trial and error* dilakukan pada berbagai penelitian untuk mendapatkan batas butir austenit prior dengan baik sehingga memudahkan dalam pengukuran besar butir. Batas butir austenit prior pada struktur martensit penuh dapat ditampakkan dengan larutan etsa sederhana seperti nital. Namun etsa tersebut hanya dapat digunakan pada beberapa jenis baja, seperti pada baja perkakas yang memiliki paduan tinggi pada kondisi *as-quenched* atau kondisi temper.

Salah satu zat etsa yang paling banyak digunakan untuk menampakkan ukuran butir austenit prior adalah larutan yang dikembangkan oleh Vilella[81] yang terdiri dari 1 gram asam pikrik, 5 mL HCl, dan 100 ml etanol. Dalam menghasilkan kontras butir, beberapa siklus poles-etsa dapat diperlukan. Miller dan Day[81] menggunakan 5% larutan *aqueous* untuk baja karbon rendah dengan struktur martensitik. Untuk menampakkan batas butir austenit prior pada baja karbon rendah yang mengalami *hardening* digunakan *Marshall's Reagent*[81] Bechet dan Beujard [81] menggunakan larutan *saturated aqueous picric acid* yang mengandung 0,5% teepol sebagai *wetting agent*. Larutan tersebut sangat efektif untuk menampakkan batas butir austenit prior .

Aqueous picric acid tanpa *wetting agent* merupakan larutan etsa yang sangat baik untuk baja. Penambahan *sodium tridecylbenzene sulfonate* sangat baik

dalam menghasilkan batas butir, sementara *wetting agent* lainnya kurang efektif digunakan untuk menampakkan batas butir austenit prior. Penambahan sejumlah kecil HCl telah dikembangkan untuk etsa batas butir. Dengan adanya HCl dapat meningkatkan respon terhadap larutan etsa.

Pengamatan batas butir akan lebih mudah jika baja mengalami temper. Beberapa fosfor bersegregasi ke batas butir selama austenisasi, dan penambahan segregasi terjadi selama *aging* antara 350-575⁰C[81]. Kehadiran fosfor pada batas butir austenit akan mempermudah penampakan batas butir menggunakan *saturated aqueous picric acid*. Prosentase fosfor dijaga tetap tinggi untuk membantu teknik metalografi dalam menampakkan batas butir austenit [82]. Minimum kandungan fosfor yang harus dimiliki baja untuk memudahkan dalam penampakan batas butir austenit prior adalah sekitar 0,005%P [83]. Beberapa larutan etsa yang telah digunakan oleh para peneliti dalam menampakkan batas butir austenit prior dapat dilihat pada tabel 2.4.

Tabel 2.4. Berbagai Jenis Etsa Untuk Menampakkan Batas Butir Austenit Prior [40, 81]

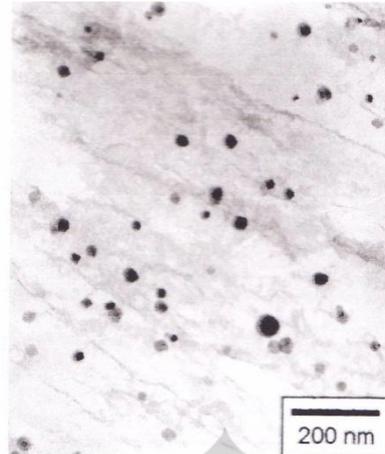
Jenis etsa	Komposisi etsa	Kegunaan
Miller & Day	5 gr FeCl ₃ , 100 ml air	Etsa untuk baja karbon rendah. Bekerja baik pada kondisi martensit temper.
Marshall's Reagent	<i>Part A</i> : 5 ml asam sulfur, 8 gr oksalat, 100 ml air <i>Part B</i> : 30% larutan H ₂ O ₂	Marshall's Reagent telah digunakan untuk menampakkan batas butir austenit prior pada baja karbon rendah yang mengalami deformasi. Pada beberapa baja karbon rendah dengan kondisi <i>as-quench</i> , batas butir austenit prior dapat ditampakan menggunakan etsa ini
Winstead's Reagent	<i>Part A</i> : 2 gr picric acid, 10 ml alkohol <i>Part B</i> : 200 ml air, 5 ml sodium tridecylbenzene sulfonate	Digunakan untuk menampakkan batas butir austenit prior pada baja paduan rendah pada kondisi <i>quench</i> dan temper.

Saturated aqueous picric acid	10 gr asam picric, 100 ml air, 1 gr sodium tridecylbenzene sulfonate	Untuk menampakkan batas butir austenit prior pada baja dengan mikrostruktur <i>fully martensitic</i>
Vilella's Reagent	1 gr picric acid, 5 ml HCl, 100 ml alkohol	Menampakkan batas butir austenit prior pada kondisi <i>martensitic quenched and tempered steel</i>

2.5.2. Pengamatan Partikel NbC Pada Baja HSLA-Nb.

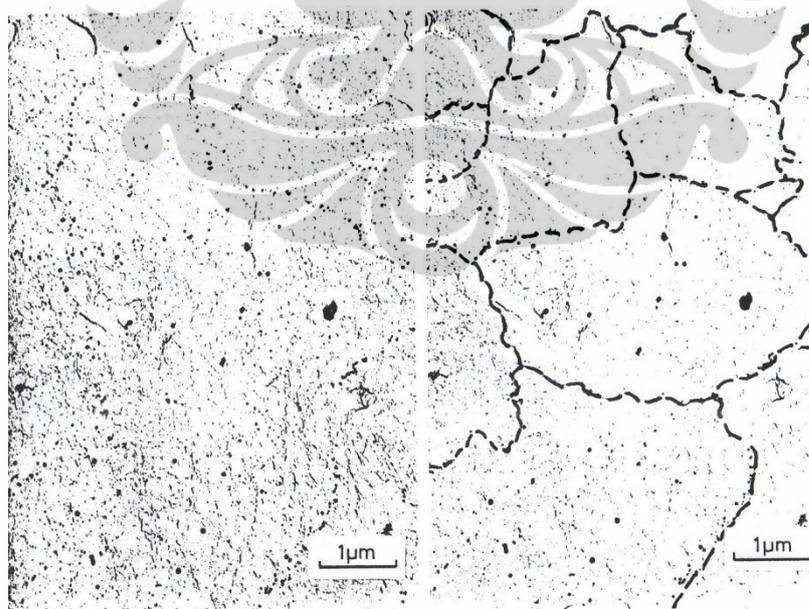
Dalam penelitian ini material yang diamati kinetika pertumbuhan butir austenit adalah baja HSLA-Nb dengan tiga komposisi Nb yang berbeda. Dasar pemilihan kandungan Nb yang berbeda adalah berdasarkan perilaku pertumbuhan butir austenit yang dipengaruhi oleh terbentuknya senyawa karbida atau nitrida atau karbonitrida dari paduan Nb dalam baja. Dalam penelitian terhadap perilaku perubahan struktur mikro baja HSLA-Nb selama proses deformasi, perlu dilakukan konfirmasi terbentuknya endapan NbC atau NbCN, sehingga teori metalurgi fisika yang mendasari fenomena yang terjadi pada butir austenit atau ferit akibat keberadaan endapan tersebut dapat dikonfirmasi.

Pada penelitian yang dilakukan oleh S.C Hong dkk [79] terhadap pengaruh Nb terhadap pertumbuhan butir ferit pada baja C-Mn, keberadaan partikel NbC diamati dengan Transmission Electron Microscope (TEM), terhadap benda uji berbentuk replika ekstraksi karbon. Perbesaran yang digunakan adalah 200.000 kali. Pada gambar yang diambil dengan TEM, tampak partikel NbC berbentuk bulatan-bulatan hitam seperti tampak pada gambar 2.23 di bawah ini,



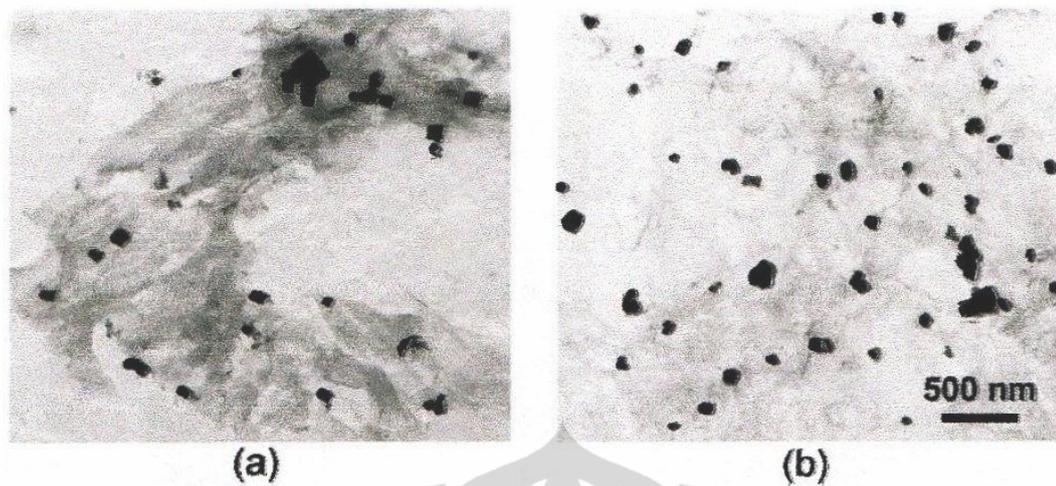
Gambar 2.23. Pengambilan gambar endapan NbC dengan TEM pada baja HSLA –Nb, perbesaran 200.000 kali. Endapan berbentuk bulatan hitam [79]

Beberapa peneliti lain seperti J.Irvine dkk [84], K.A. Alogab dkk[85] , Eddy S.Siradj [86] juga mengadakan pengamatan terhadap partikel NbC dan NbCN dengan menggunakan TEM , yang diambil dari benda uji replika ekstrak karbon baja HSLA-Nb, seperti tampak pada gambar 2.24, 2.25 dan 2.26 di bawah ini.



2 NbC particles quenched from austenite and outlining a network, possibly an austenite sub-boundary.

Gambar 2.24. Pengambilan gambar endapan NbC dengan TEM pada baja HSLA –Nb, perbesaran 50.000 kali. Endapan berbentuk bulatan hitam.[84]



Gambar 2.25. Pengambilan gambar endapan NbC dengan TEM pada baja HSLA –Nb, perbesaran 100.000 kali. Endapan berbentuk bulatan hitam.[85]

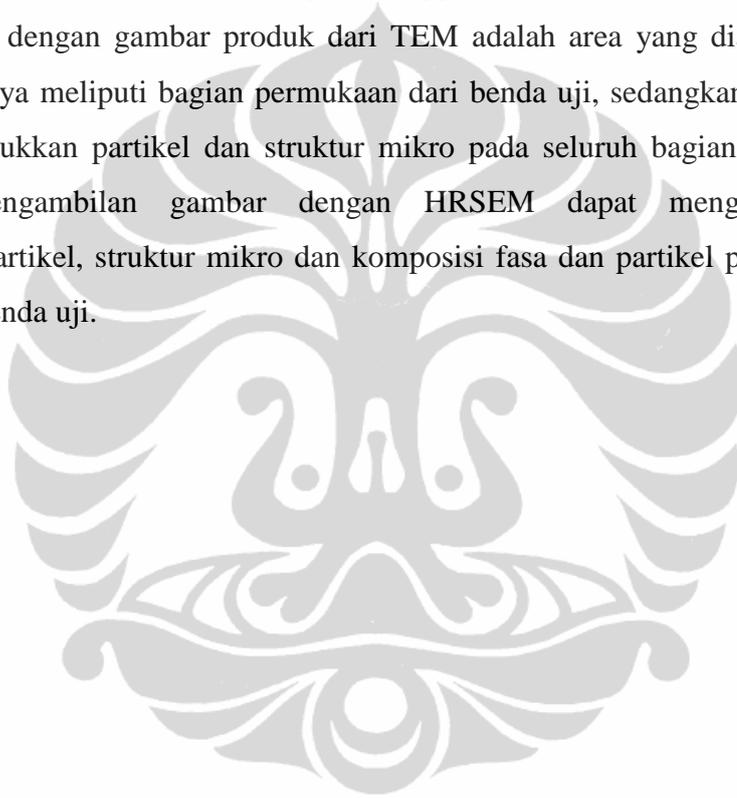


Gambar 2.26. Pengambilan gambar endapan NbC dengan TEM pada baja HSLA –Nb,. Endapan berbentuk bulatan hitam.[86]

Dari gambar 2.23 sampai dengan gambar 2.26 di atas, tampak bahwa untuk mengamati endapan NbC pada baja HSLA-Nb para peneliti umumnya menggunakan *Transmission Electron Microscope (TEM)* , dengan perbesaran antara 50.000 hingga 200.000 kali, dimana endapan dapat diamati dengan jelas.

Pada saat ini *Scanning electron Microscope* (SEM) telah mengalami kemajuan kemampuannya hingga mencapai perbesaran 800.000 kali, sehingga kemungkinan untuk dapat mengamati endapan Karbida yang berukuran sekitar 10 nanometer mulai terbuka.

Pengamatan terhadap bentuk partikel endapan dan analisa komposisi kimia terhadap partikel endapan, dapat mengkonfirmasi fenomena yang terjadi terhadap pertumbuhan butir austenit atau ferit selama proses deformasi. Perbedaan tampilan gambar struktur mikro dengan menggunakan HR SEM dibandingkan dengan gambar produk dari TEM adalah area yang diambil pada HR SEM hanya meliputi bagian permukaan dari benda uji, sedangkan alat TEM dapat menunjukkan partikel dan struktur mikro pada seluruh bagian benda uji. Sehingga pengambilan gambar dengan HRSEM dapat menggambarkan keberadaan partikel, struktur mikro dan komposisi fasa dan partikel pada bagian permukaan benda uji.



BAB III

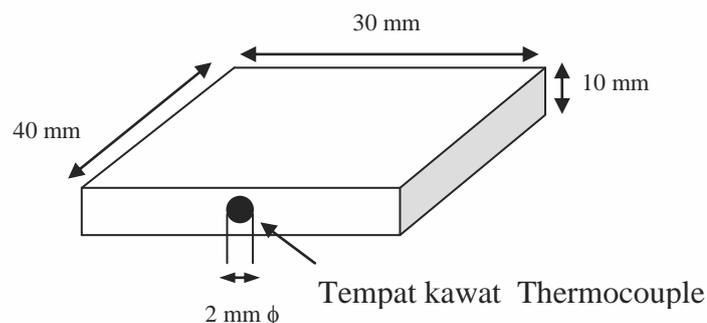
BAHAN DAN METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Bahan dan Bentuk Benda Uji .

Bahan yang diteliti adalah 3 jenis baja HSLA-Nb produksi industri baja nasional yang merupakan hasil proses pengecoran kontinu dengan komposisi kimia yang direncanakan memiliki perbedaan utama kandungan Nb. Perbedaan unsur Nb ini menjadi dasar pengambilan ketiga komposisi tersebut untuk dijadikan bahan didalam mengamati perilaku kinetika pertumbuhan butir austenit selama proses canai panas. Pengelompokan dan penamaan benda uji dilakukan berdasarkan perbedaan unsur Nb, sebagai berikut; baja A, dengan kandungan Nb terendah, baja B dengan kandungan Nb menengah, dan baja C dengan kandungan Nb tertinggi.

Bahan didapat dari beberapa peleburan baja yang memproduksi komposisi baja yang berbeda. Untuk memastikan komposisi dari baja yang digunakan sebagai benda uji, dilakukan uji komposisi dengan spektrometer emisi, dimana hasil uji komposisi dapat dilihat pada bab IV berikutnya.

Baja yang diterima dalam bentuk slab dengan tebal 40 mm. Bahan kemudian dilakukan preparasi dengan pemotongan dan gerinda dengan kondisi temperatur ruang, dengan bantuan media pendingin selama proses pemotongan. Pada gambar 3.1 di bawah ini dapat dilihat ilustrasi dari ukuran benda uji yang juga dibuat lubang dibagian tengahnya untuk tempat menanamkan kawat *thermocouple* untuk disambungkan ke komputer dan alat *temperature acquisition* untuk memonitor temperatur selama proses canai berlangsung.



Gambar 3.1. Ilustrasi Bentuk dan Ukuran Benda uji.

3.2. Metodologi

3.2.1. Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini ;

1. 2 buah muffle furnace: Masing-masing kapasitas hingga 1200°C dan 1600°C
2. *Rolling mill*-Uno –kapasitas – 20 ton, dilengkapi load cell, x-y recorder
3. Alat spray pendingin dengan media air, dengan sirkulasi terbuka (Dibuat khusus sesuai kebutuhan penelitian ini)
4. Acquisition data : - *Thermocouple wire*
-*Software dan Hardware computer*
5. Alat bantu proses canai panas; masker, sarung tangan asbes, penjepit benda uji, stop watch.
6. Perangkat Metalografi; Alat pemotong benda uji, Alat ampelas, Polishing, perangkat etsa (zat kimia, berbagai cawan, erlenmeyer, alat pemanas listrik, unit electrolytic polish dan etching, berbagai alat bantu penjepit, timbangan digital dsb),
7. Grit standar ASTM E112, sebagai alat penghitung butir.
8. *High Resolution Scanning electron Microscope(HRSEM)* berkemampuan hingga perbesaran 800.000. dilengkapi *Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)* .

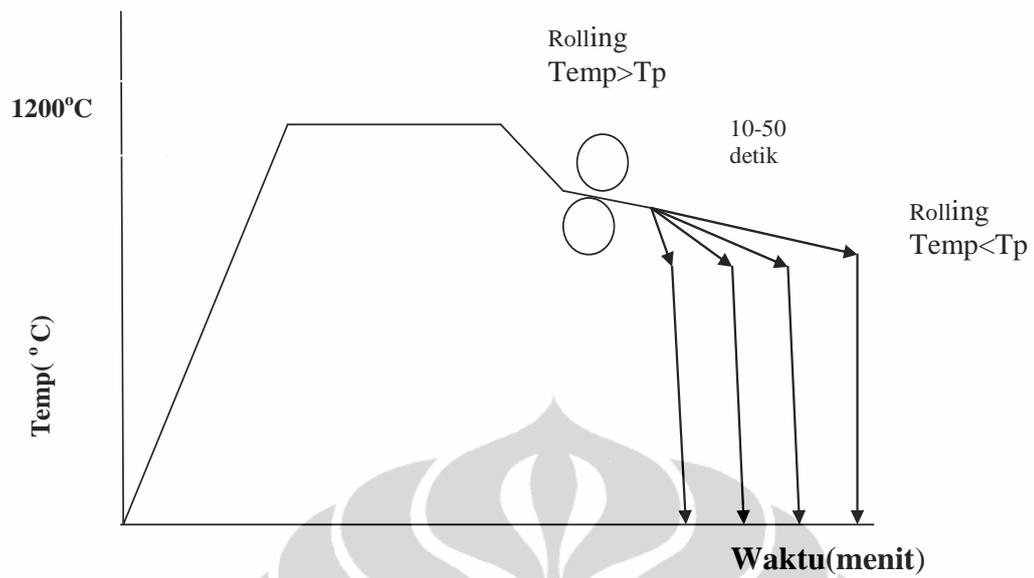
3.2.2. Penetapan Temperatur Pemanasan Awal (*Reheating*)

Penentuan temperatur reheating berdasarkan persamaan *solubility product* dari Irvine[10];

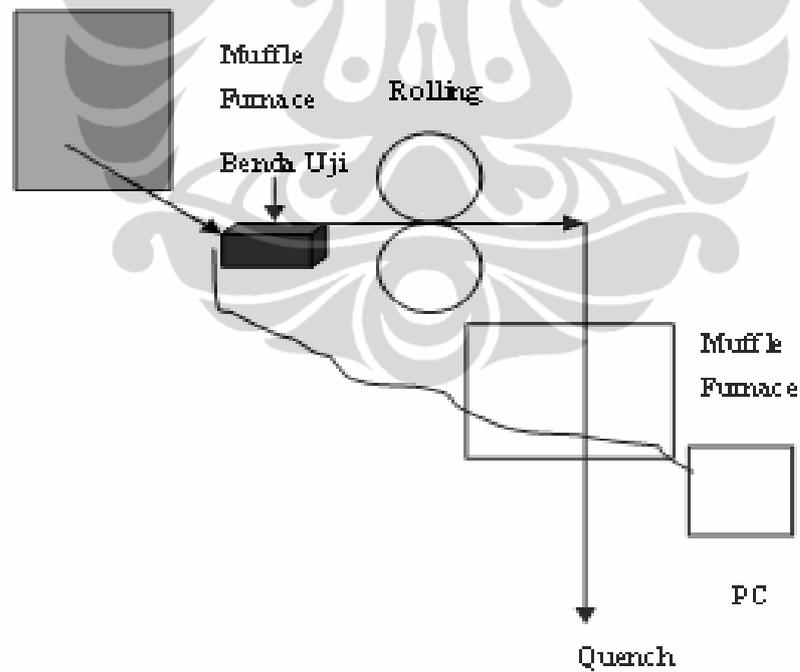
$$\text{Log}(\% \text{Nb})(\% \text{C}) + (12/14)(\% \text{N}) = -6770/T + 2,26 \quad (3.1)$$

Dimana % Nb, %C dan %N adalah % berat Nb,, C dan N.

Hasil dan metode perhitungan dapat dilihat pada lampiran B. Untuk mengantisipasi situasi dalam aplikasi yang memiliki jarak antara oven dengan mesin canai, maka diberikan temperatur *reheating* yang sama, sebesar 1200°C, pada kondisi mendekati temperatur kelarutan. Ilustrasi siklus termal dan canai panas pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.2 dan 3.3 di bawah ini.



Gambar 3.2. Siklus Termal yang Dialami Benda Uji



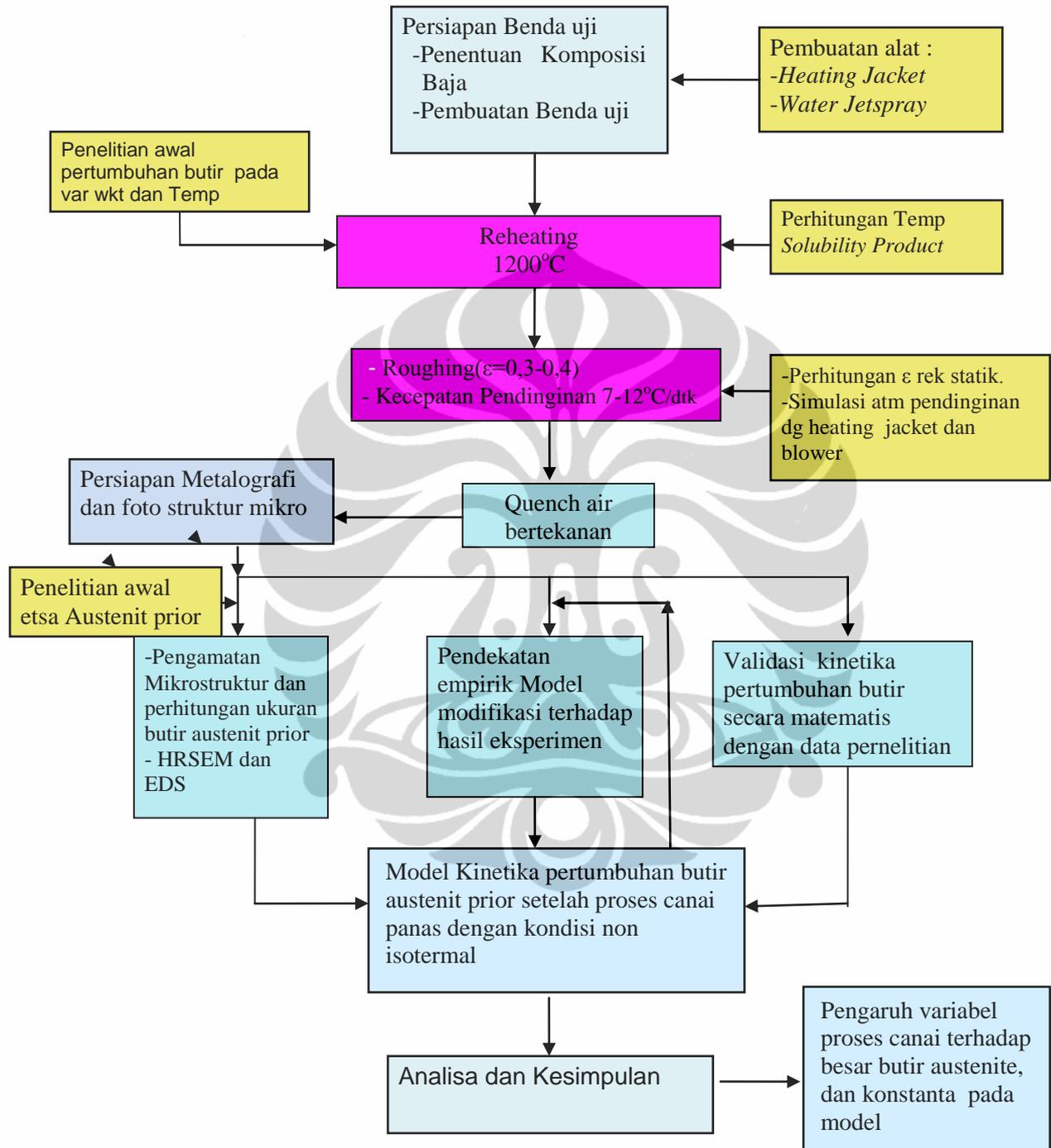
Gambar 3.3. Ilustrasi Pelaksanaan Pengujian.

Urutan siklus pengerjaan dalam penelitian:

1. Benda uji dipanaskan ke temperatur pemanasan awal (*reheating*) 1200°C (preheating dalam waktu 45 menit ke 800°C, tahan 5 menit, naikkan temperatur ke 1200°C dalam waktu 20, ditahan 30 menit.)
2. Dikeluarkan dari oven pemanasan awal, langsung dimasukkan ke mesin canai, dilakukan deformasi sebesar sekitar 0,3- 0,35 , ditahan pada temperatur ruang dengan variabel kecepatan angin atau dalam *heating Jacket* pada temperatur antara 50° -450° C selama 10-40 detik setelah canai pada sekitar 1000°C (untuk variasi kecepatan pendinginan), dan dilanjutkan pendinginan cepat dengan *water jet spray*.
3. Dilakukan persiapan benda uji Metalografi, diamati ukuran butir austenit priornya, dihitung penyimpangan setiap perhitungan, dibuat grafik kecenderungan hubungan kecepatan pendinginan dengan besar butir austenit prior.

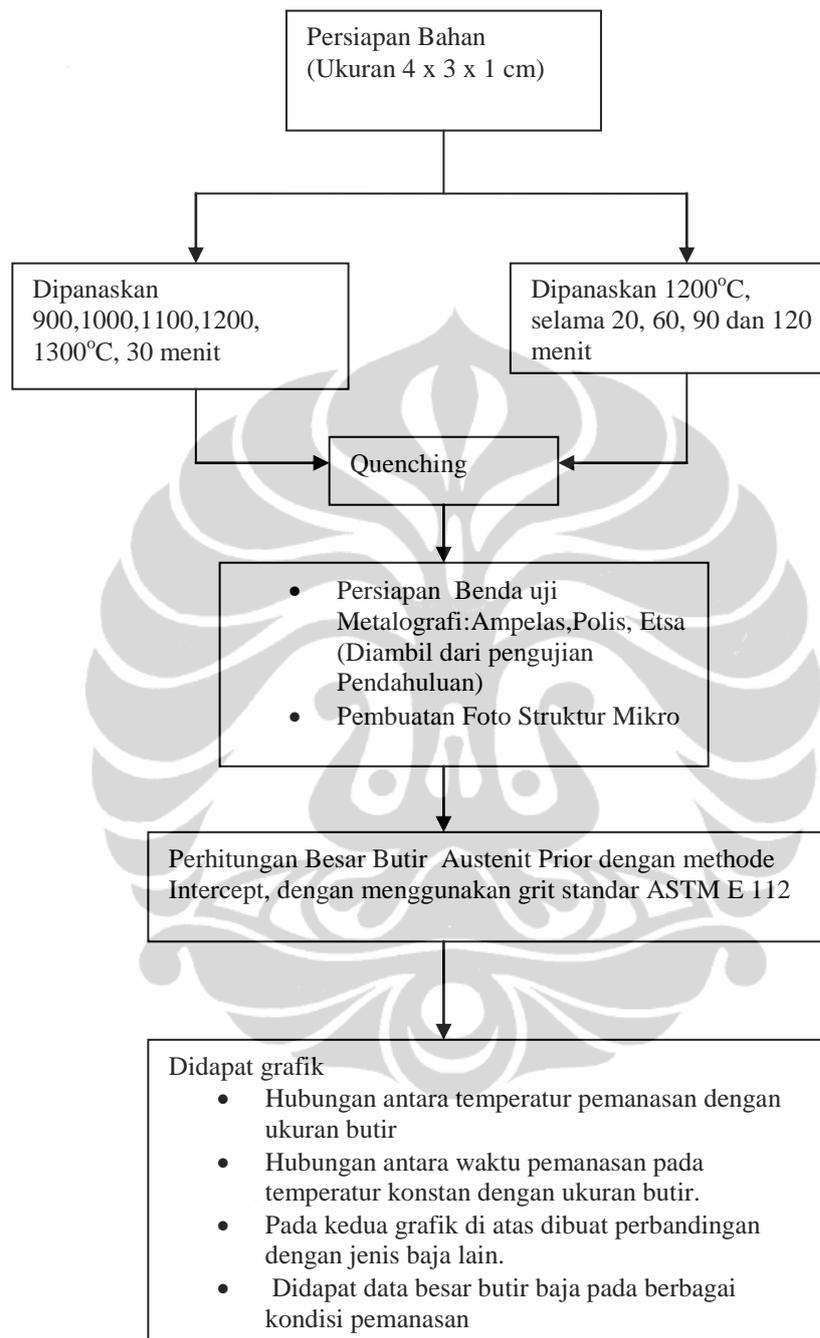
Ilustrasi diagram alir penelitian dapat dilihat pada gambar 3.4 yang menggambarkan alur penelitian secara keseluruhan, gambar 3.5 dan 3.6 yang menerangkan prosedur pengamatan besar butir austenit dan alur pelaksanaan penelitian secara lebih detail.

3.2.3. Diagram Alir Penelitian



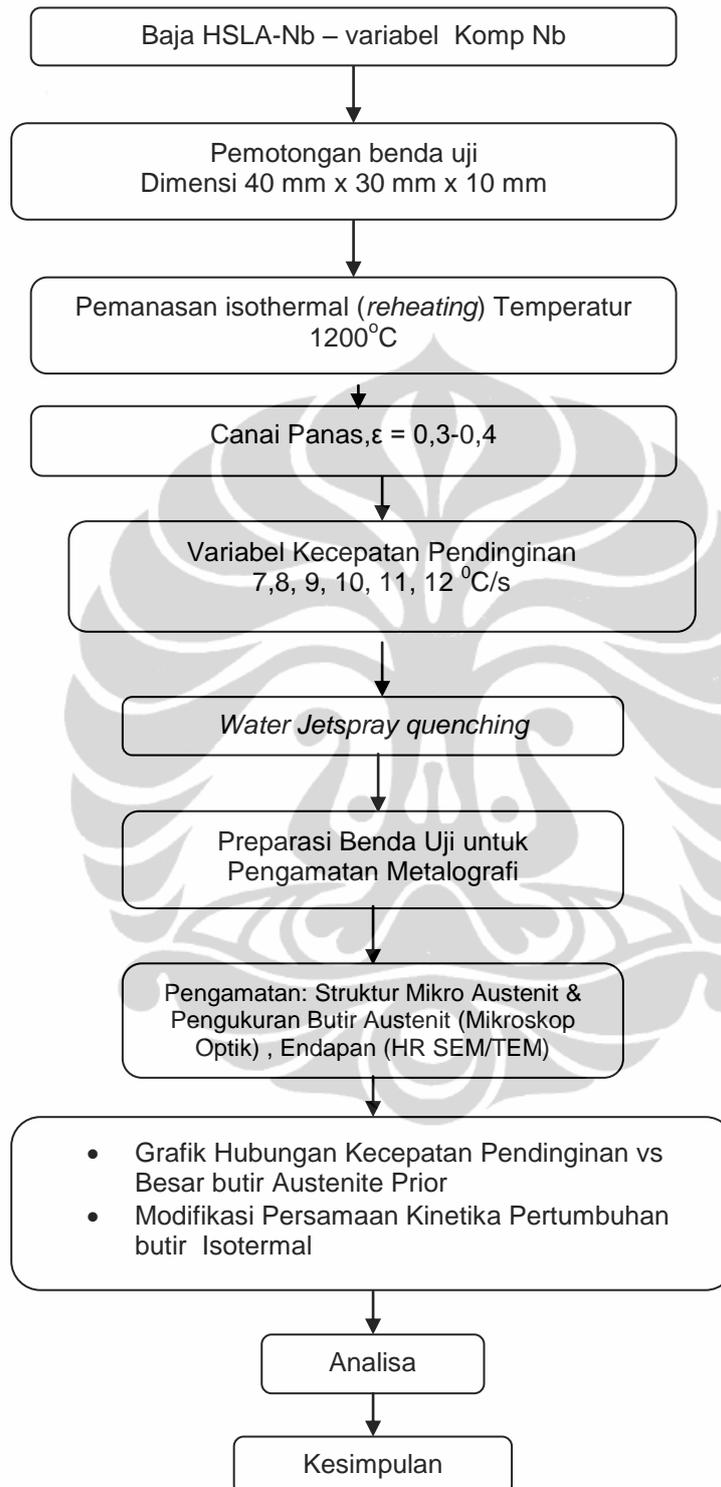
Gambar 3.4. Diagram Alir Penelitian

3.2.3.1. Diagram Alir Pengamatan Besar Butir Awal Austenit Prior Dengan Teknik Metalografi.



Gambar 3.5. Diagram Alir Pengamatan Besar Butir awal Austenit Prior

3.2.3 2 Diagram Alir Pengamatan Besar Butir Austenit setelah canai panas dengan variabel kecepatan pendinginan



Gambar 3.6. Diagram Alir modifikasi model Kinetika pertumbuhan butir austenit prior setelah canai panas.

Dari gambar 3.4, 3.5 dan 3.6 di atas, beberapa tahapan penelitian dan pengamatan dilakukan dalam tahap awal penelitian, antara lain adalah pengamatan besar butir prior γ sebelum deformasi pada beberapa temperatur dan waktu tahan, dan dievaluasi. Temperatur larut endapan, T , Nb(CN) dihitung dengan persamaan *Solubility Produk* yang dinyatakan oleh Irvine[10] untuk baja HSLA seperti pada persamaan (2.6), $\text{Log [Nb] (C + 12/14 N)} = 2,26 - 6770/T$. Hasil perhitungan temperatur kelarutan masing-masing baja A, B dan C dapat dilihat pada lampiran B. Pemanasan awal ketiga baja ini dilakukan pada temperatur 1200°C , dimana endapan telah dan mendekati kondisi larut.

3.2.4. Penentuan Larutan dan Teknik Etsa batas Butir Austenit Prior

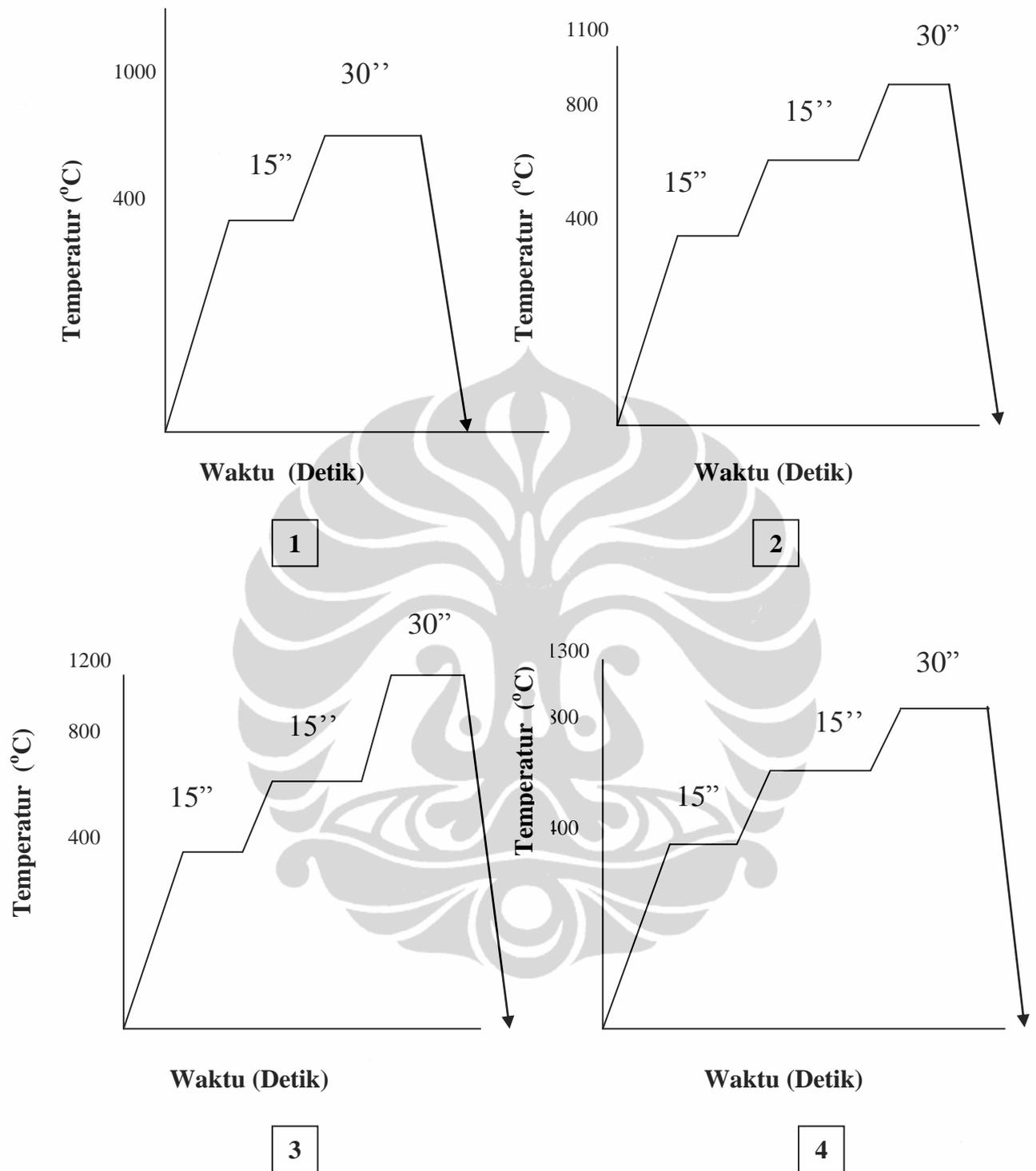
Evaluasi larutan etsa yang tepat dilakukan pada salah satu dari ketiga komposisi baja, yaitu terhadap baja B. Evaluasi etsa pada jenis baja ini diharapkan dapat mewakili larutan etsa untuk ketiga jenis baja ini. Perlakuan terhadap material yang diamati melalui evaluasi proses etsa adalah sebagai berikut;

- A. Benda uji 1 : dipanaskan pada 1000°C , pendinginan cepat ke suhu ruang
- B. Benda Uji 2 : dipanaskan pada 1100°C , pendinginan cepat ke suhu ruang
- C. Benda Uji 3 : dipanaskan pada 1200°C . Pendinginan cepat ke suhu ruang
- D. Benda Uji 4 : dipanaskan pada 1300°C , Pendinginan cepat ke suhu ruang

Untuk menghasilkan gambaran batas butir austenit prior yang jelas, maka dilakukan pencarian larutan etsa yang tepat, dengan mengacu pada referensi beberapa larutan etsa dari penelitian sebelumnya. Etsa dilakukan dengan variasi beberapa zat kimia yang dilakukan dengan berbagai komposisi dan metode termasuk dengan melakukan pemanasan larutan etsa dimana diperlukan. Berbagai kombinasi larutan dan prosedur etsa dapat dilihat pada lampiran C.

3.2.5 . Pengamatan Besar Butir Austenit dengan Variabel Temperatur Pemanasan Awal

Siklus pemanasan untuk temperatur pemanasan awal antara $1000-1300^{\circ}\text{C}$ dilakukan dengan siklus seperti pada gambar 3.7 di bawah terhadap baja B.



Gambar 3.7 Empat Siklus Pemanasan dalam penelitian

Kondisi pemanasan awal yang dilakukan pada penelitian ini tergambar pada tabel 3.1. di bawah ini.

Tabel 3.1. Kondisi Proses Pemanasan Awal

No	Temperatur Oven(°C)	Temperatur oven (°C)	Temperatur Thermocouple (°C)	Bahan Pendingin	Holding Time (Menit)	Kecepatan Pemanasan
1	1000	1110	987	Air	30	10°C/menit
2	1100	1115	1109	Air	30	10°C/menit
3	1200	1212	1201	Air	30	10°C/menit
4	1300	1305	1301	Air	30	10°C/menit

Kecepatan rata-rata pemanasan 10°C/menit

Setelah benda kerja melalui proses pemanasan awal pada berbagai temperatur, dilakukan pendinginan cepat dengan media celup air. Struktur Austenit Prior dapat diamati dengan larutan jenuh 30 gram Picric Acid ,100 ml Alkohol dan 2 tetes HCl pada berbagai temperatur reheating.

3.2.6. Evaluasi Pencapaian Kondisi Penelitian

Untuk memastikan kondisi percobaan yang sesuai dengan siklus pemanasan dan pendinginan yang direncanakan , dilakukan penelitian pendahuluan dengan menggunakan benda uji percobaan berbentuk plat dan alat pengukur *temperatur acquisition*. Siklus terdiri dari:

- a. Benda Uji dipanaskan hingga temperatur 1200°C
- b. Dilakukan Rolling dengan deformasi sekitar 0,3
- c. Dilakukan pendinginan cepat dengan pendinginan *water jet spray*

Hasil pengujian ini akan menghasilkan grafik yang menggambarkan kondisi temperatur yang dialami baja selama proses canai. Akan dievaluasi pencapaian ketelitian alat pengukuran dalam menggambarkan siklus temperatur selama proses canai.

3.2.7 Pengamatan Struktur Mikro

Pada penelitian ini, benda uji komposisi A,B dan C, dilakukan canai panas, dengan variasi kecepatan pendinginan sesaat setelah canai hingga saat

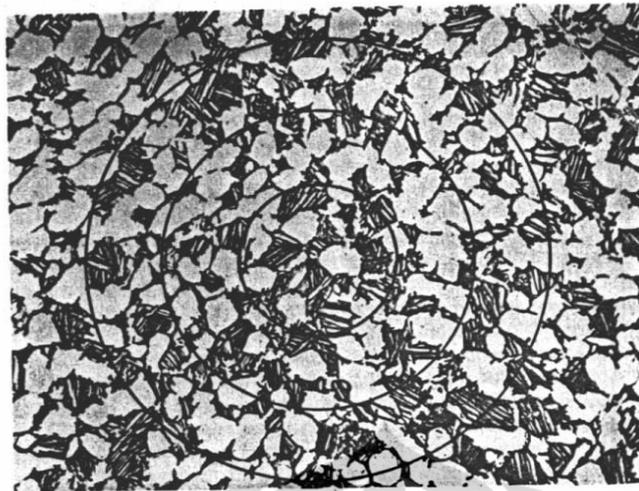
pendinginan cepat dengan air bertekanan tinggi. Benda kemudian dilakukan preparasi metalografi dan dietsa menggunakan larutan etsa 30% asam pikrik jenuh dengan penambahan HCl jenuh 2 tetes dan Dodecyl Benzenesulfonat, seperti didapat pada percobaan pendahuluan, dan dilakukan pengambilan foto struktur mikro untuk pengamatan batas butir austenit prior dengan mikroskop Optik. Pengamatan struktur mikro dengan mikroskop optik dilakukan untuk mengamati batas butir austenit, sehingga dapat dilakukan perhitungan besar butir austenit secara kuantitatif.

Untuk mengamati dan memastikan adanya partikel endapan NbC atau NbCN dalam baja, , dilakukan pengamatan struktur mikro dengan *HRSEM*. (*High Resolution Scanning Electron Micoscope*), untuk mengamati keberadaan senyawa endapan NbC atau NbCN

Untuk pengambilan gambar dengan HRSEM, benda uji dilakukan persiapan benda uji metalografi, dan dietsa dengan larutan etsa Nital. Benda uji kemudian dilakukan pengujian *Electron Dispersive Spectrometer* (EDS) untuk mengetahui adanya unsur paduan mikro pada bagian tertentu benda uji. Hasil pengujian dengan HR SEM dapata dilihat pada bab IV. Partikel endapan dalam baja, akan menghambat pergerakan batas butir austenit yang mengakibatkan baja HSLA-Nb memiliki besar butir yang lebih halus dibandingkan dengan baja C-Mn tanpa paduan mikro.

3.2.8. Metode Perhitungan Besar Butir Austenit Prior.

Setelah metode etsa dapat menampilkan batas butir Austenit Prior, maka besar butir dihitung dengan menggunakan metode Intercept, sesuai dengan standar perhitungan Metalografi kuantitatif ASTM E112. Teknik Penghitungan dilakukan sebagai berikut;



Gambar 3.8. Metode Intercept, dengan menggunakan garis berbentuk lingkaran dengan total panjang garis 500 mm, dengan foto perbesaran 100X [81]

Dari gambar 3.8 di atas, dihitung jumlah titik potong antara total panjang garis yang ditarik sepanjang 500mm dengan batas butir pada foto struktur mikro dengan perbesaran 100 kali. Jumlah titik potong persatuan panjang (P_L) dihitung dengan persamaan 3.2,

$$P_L = P / L_T / M. \quad (3.2)$$

Panjang garis Perpotongan (L_3); $L_3 = 1/P_L$

P = Jml titik potong batas butir dengan total panjang garis yang dalam hal ini berbentuk lingkaran.

L_T = Panjang Garis Total (Sesuai standar ASTM =500mm)

M = Perbesaran

Dari P_L atau L_3 , dapat dilihat di tabel besar butir ASTM E 112, atau dimasukkan ke dalam rumus Empiris ;

$$G = [6,646 \log (L_3) - 3,298] \quad (3.3)$$

Pada penelitian ini panjang garis perhitungan 500 mm dapat dibagi menjadi 10 buah garis lurus, misal 1 buah garis panjangnya 50 mm, maka L_T setiap pengukuran akan didapat, dan dilakukan perhitungan hingga 10 buah garis dan hasilnya kemudian diambil harga rata-rata. Hasil perhitungan besar butir ini

dimasukkan dalam tabel, untuk kemudian dihitung standar deviasi, dengan metode statistik. Dari gambar struktur mikro yang telah didapat, dihitung ukuran butir austenit masing – masing benda uji. Tiap benda uji dihitung sebanyak 10 kali, kemudian hasilnya dirata – rata.

3.2.9. Prosedur untuk Menentukan Jarak Rol gap pada Mesin Roll. ONO

1. Benda uji *dummy* dari bahan yang sama dibuat dengan ukuran yang sama (40 x 30 x 10), dan dipanaskan hingga suhu 1200°C, ditahan 30 menit, diturunkan ke temperatur 900°C, ditahan 1 menit, kemudian dilakukan canai dengan besar gap 0,7 mm. ,
2. Benda uji diukur ketebalan akhirnya, sehingga dapat diketahui besar deformasi yang sesungguhnya.
3. Benda uji juga dilakukan persiapan benda uji metalografi untuk dilakukan pengamatan dan penghitungan besar butir austenit prior.
4. Benda uji *dummy* lain dipanaskan lagi hingga temperatur deformasi, ditahan beberapa menit, dilakukan lagi pengerolan dengan besar deformasi 0,3, terhadap tebal akhir benda uji dan besar *springback* data awal setelah itu didinginkan cepat.
5. Benda uji dihitung ketebalan akhir, sehingga dapat diketahui besar deformasi dan besar butir akhir, dengan persamaan

:

$$\varepsilon = \ln \frac{h_1}{h_0} \quad (3.1)$$

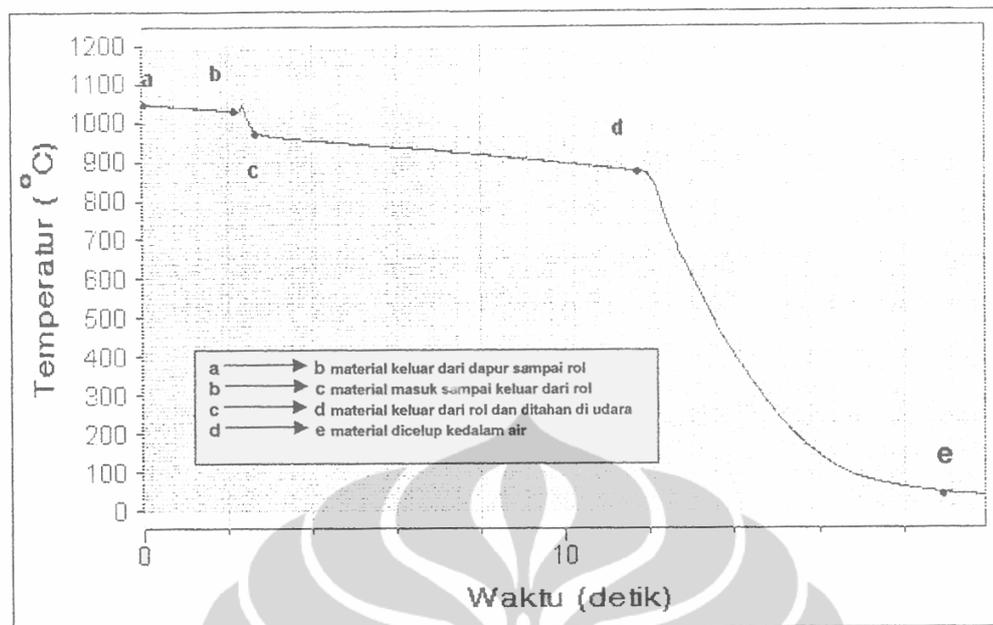
Dimana : ε = regangan

h_0 = Tebal awal benda uji.

h_1 = Tebal benda uji setelah deformasi

3.2.10. Peralatan Pembantu yang digunakan.

Dalam Penelitian, temperatur terus dimonitor dengan menggunakan *thermocouple* yang dihubungkan ke *data aquisition*. Contoh hasil data monitoring temperatur selama proses canai dapat dilihat seperti gambar 3.8 di bawah ini., terhadap proses canai panas yang dialami baja C-Mn.



Gambar 3.9. Hubungan waktu dengan penurunan temperatur saat pendinginan

Untuk menghasilkan struktur butir austenit prior, alat pendingin yang didesain berbentuk ruang segiempat serta dilengkapi alat *water jet spray* diletakkan didepan roll dimana benda uji keluar setelah deformasi. Gambaran peralatan tersebut serta peralatan pendukung dapat dilihat pada gambar di lampiran N.

BAB IV HASIL PENELITIAN

Hasil penelitian ini merupakan data yang didapat dan diukur sesuai prosedur penelitian yang ditetapkan sesuai dengan standar pengujian. Hasil penelitian yang didapat dan ditampilkan adalah terdiri dari ;

1. Uji komposisi material dan pengelompokan/penamaan benda uji.
2. Penelitian pendahuluan terdiri dari; penetapan temperatur reheating , evaluasi zat etsa untuk menampakkan batas butir austenit, simulasi metode penghitungan kecepatan pendinginan, simulasi penghitungan besar butir austenit sebagai fungsi temperatur reheating dan waktu tahan reheating.
3. Penelitian pengaruh kecepatan pendinginan terhadap besar butir austenit pada 3 (tiga) komposisi baja HSLA-Nb secara eksperimen.

4.1 . Material

Hasil uji komposisi benda uji dengan menggunakan spektrometer emisi dapat dilihat pada tabel 4.1 di bawah ini.

Lembar hasil pengujian spektrometer dapat dilihat pada lampiran A. Dari hasil pengujian tersebut tampak bahwa perbedaan mendasar dari ketiga komposisi baja HSLA adalah pada kandungan unsur Nb. Pengelompokan dan penamaan benda uji dilakukan berdasarkan perbedaan unsur Nb, sebagai berikut;

- Baja A, dengan 0,019% Nb (Nb terendah).
- Baja B dengan 0,037% Nb (Nb menengah)
- Baja C dengan 0,056%Nb (Nb tertinggi).

Perbedaan ini akan mewakili pengaruh prosentase Nb terhadap perilaku pertumbuhan butir austenit selama canai panas.

Tabel 4.1 Komposisi Kimia Baja HSLA-Nb pada penelitian (% berat)

Kode Benda Uji	Ti	C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Nb	V	Ni	Cr	N	Cu+Cr+Ni
A	0,001	0,165	0,007	0,664	0,005	0,005	0,037	0,032	0,019	0,005	0,021	0,013	0,033	
B	0,002	0,048	0,266	0,706	0,010	0,007	0,037	0,052	0,037	0,003	0,022	0,018	0,0040	0,092
C	0,004	0,172	0,259	1,048	0,014	0,033	0,044	0,042	0,056	0,004	0,263	0,020	0,031	0,062

4.2. Hasil Pengujian Pendahuluan

Untuk mendapatkan kondisi optimum dalam proses canai panas baja dan perhitungan besar butir austenit dalam penelitian, dilakukan pengujian awal untuk mendapatkan kondisi standar yang dapat dipergunakan dalam penelitian, seperti diterangkan dalam sub bab di bawah ini.

4.2.1 Penetapan Temperatur Pemanasan awal

Proses canai panas diawali dengan proses pemanasan awal pada temperatur diatas temperatur kelarutan endapan. Penentuan temperatur reheating berdasarkan dari persamaan *solubility product* dari Irvine[10], yaitu dapat dilihat pada persamaan 3.1, dari perhitungan tersebut didapat temperatur kelarutan endapan untuk masing-masing baja A,B dan C. Hasil perhitungan temperatur kelarutan dari ketiga jenis baja A,B dan C dapat dilihat pada lampiran B. Temperatur pemanasan awal dalam penelitian ini ditetapkan pada temperatur yang sama yaitu 1200°C dengan tujuan agar benda kerja mengalami kondisi temperatur yang sama .

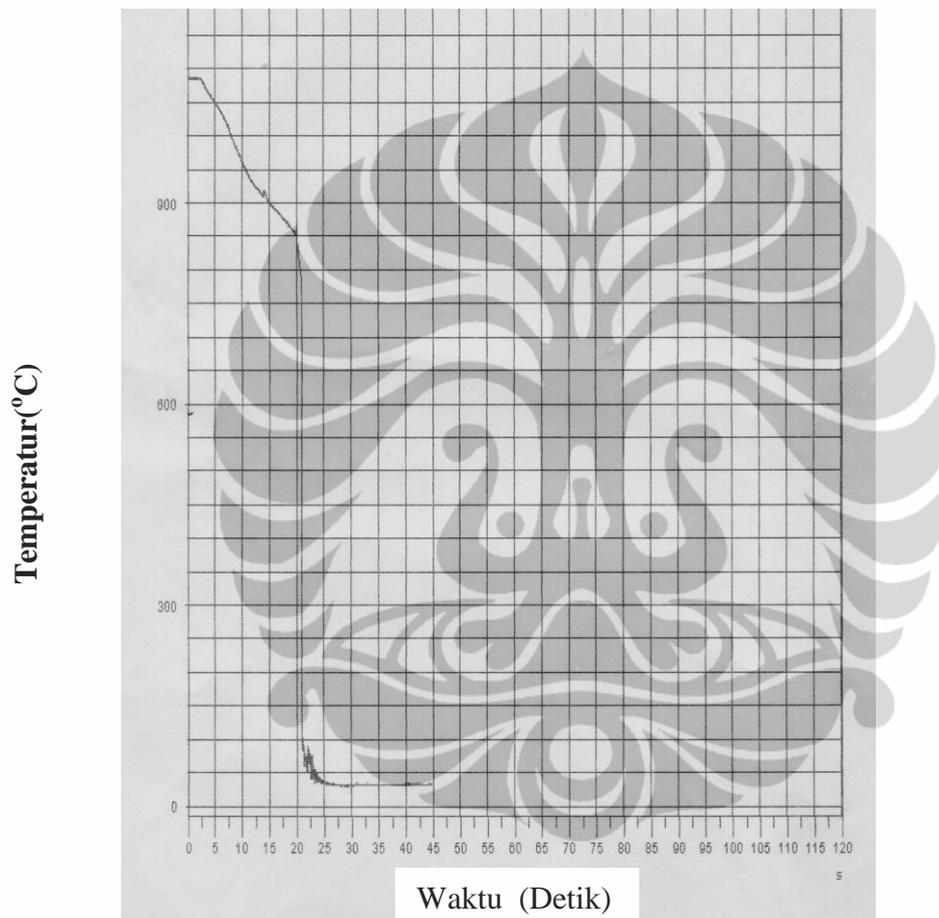
4.2.2 Penentuan Larutan Etsa Batas Butir Austenit.

Berbagai kombinasi larutan dan prosedur etsa yang dilakukan dalam penelitian ini dapat dilihat pada lampiran C. Struktur mikro hasil evaluasi zat etsa baja HSLA-Nb dapat dilihat pada lampiran D1. Dari 14 (empat belas) variasi larutan etsa , didapat bahwa larutan jenuh 30 gr asam picric dalam 100 ml alkohol dan penambahan 1-2 tetes HCl merupakan etsa optimal yang dapat dilakukan untuk menampakkan batas butir austenit prior dengan cukup jelas pada pemanasan isothermal terhadap baja HSLA pada temperatur *reheating* antara 1000-1300°C , kecuali untuk benda uji pada temperatur 1100°C , dimana batas butir γ tidak dapat tampak dengan jelas. Dari hasil evaluasi etsa yang dilakukan, tampak bahwa benda uji dengan temperatur *reheating* yang lebih tinggi, dapat menampilkan batas butir austenit prior yang lebih jelas.

Batas butir austenit diharapkan nampak dengan jelas sehingga batas butir dapat dihitung dengan cukup teliti.

4.2.3. Hasil Evaluasi Pencapaian Kondisi Penelitian.

Dalam penelitian pendahuluan ini, dilakukan evaluasi sistem monitor kondisi penelitian yang didapat dari melakukan proses canai terhadap benda uji plat baja dan dimonitor alat temperatur *acquisition*. Hasilnya didapat grafik seperti pada gambar 4.1 di bawah ini,



Gambar 4.1. Siklus penurunan panas setelah proses canai untuk benda uji dummy Yang didapat dengan alat acquisition data.

Gambar 4.1 adalah siklus pemanasan dan pendinginan yang diukur dengan kawat *thermocouple* yang dihubungkan ke alat monitor *Temperatur Acquisition*

Gambar menunjukkan grafik penurunan temperatur persatuan waktu sejak benda kerja keluar dari oven hingga masuk ke mesin canai hingga proses pendinginan cepat. Grafik ini memungkinkan penentuan laju penurunan temperatur persatuan waktu untuk setiap tahapan proses.

Proses canai terjadi pada temperatur sekitar 950-1000°C, dan dalam 1-2 detik turun ke temperatur ruang pada proses pendinginan cepat. Berdasarkan ini dipastikan bahwa kondisi temperatur deformasi dengan canai panas sudah tercapai sehingga proses yang sama dapat diterapkan pada benda uji lain pada penelitian ini.

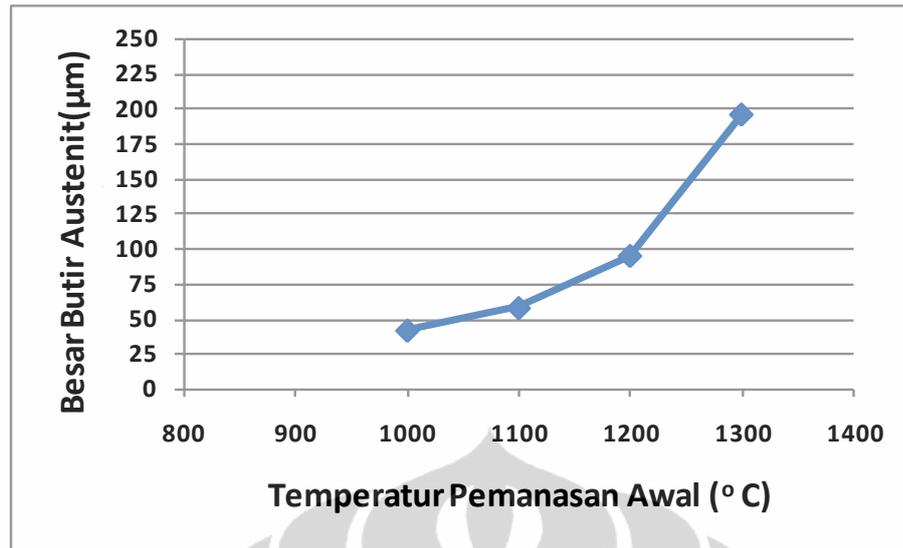
4.2. 4. Pengamatan Besar Butir Austenit dengan Variabel Temperatur Pemanasan Awal.

Struktur mikro benda uji komposisi B dengan variabel temperatur reheating dan berbagai larutan etsa dapat dilihat pada lampiran D1. Dari foto struktur mikro tersebut dihitung besar butir austenit dengan metode *intercept* sesuai ASTM E112, dan hasilnya dapat dilihat pada tabel 4.2. di bawah. Contoh metode perhitungan ukuran butir dengan metode *intercept* dapat dilihat pada lampiran E.

Tabel 4.2 menunjukkan pengaruh temperatur reheating terhadap ukuran butir austenit baja HSLA-Nb untuk benda uji B. Hubungan nilai ukuran butir austenit terhadap temperatur *reheating* disajikan pada gambar 4.2. tampak bahwa ukuran butir austenit meningkat dengan meningkatnya temperatur *reheating*.

Tabel 4.2 Hasil perhitungan Diameter Butir Austenit Pengaruh Temperatur Reheating

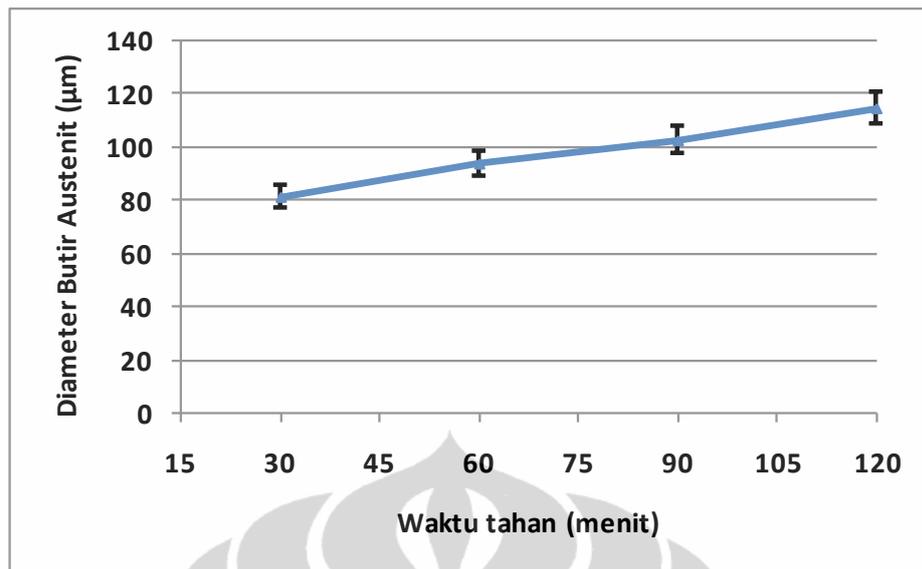
Temperatur (°C)	Diameter Butir Baja Komposisi B (µm)
1000	41.8
1100	58.0
1200	95.4
1300	196.8



Gambar 4.2 Hubungan besar butir austenit terhadap temperatur pemanasan baja komposisi B.

4.2.5. Pengaruh Waktu Tahan Terhadap Ukuran Butir Austenit Prior rata-rata pada Temperatur Pemanasan Awal 1200°C.

Untuk mengetahui pengaruh waktu tahan terhadap diameter rata-rata butir austenit, dilakukan pemanasan pada baja B pada temperatur *reheating* 1200°C, dengan waktu tahan 30, 60, 90 dan 120 menit. Foto struktur mikro untuk hasil masing-masing perlakuan dapat dilihat pada lampiran D 2. Hasil perhitungan diameter rata-rata butir austenit berikut standar deviasinya disajikan masing-masing pada lampiran F dan G. Hubungan ini digambarkan pada gambar 4.3, yaitu hubungan antara diameter butir Austenit prior dengan waktu tahan *reheating*.



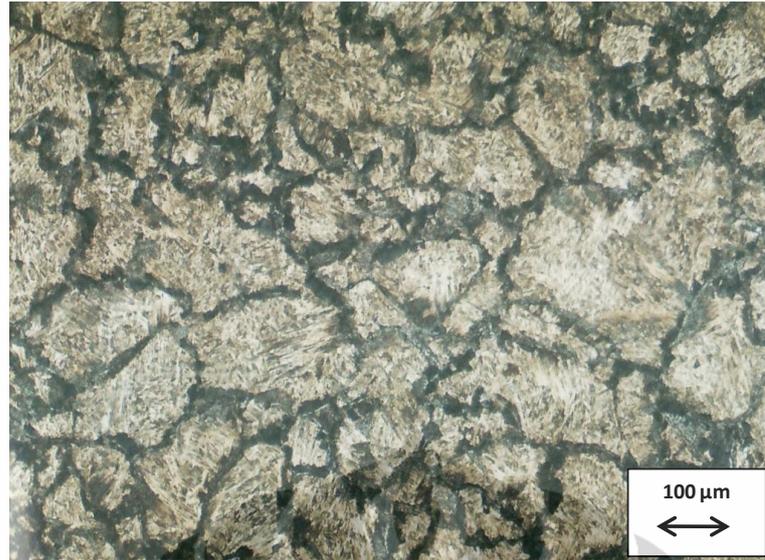
Gambar 4.3. Hubungan diameter prior austenit dengan waktu tahan pemanasan pada temperatur 1200°C

Dari gambar 4.3 tampak bahwa diameter butir austenit memiliki hubungan linier terhadap waktu tahan *reheating*.

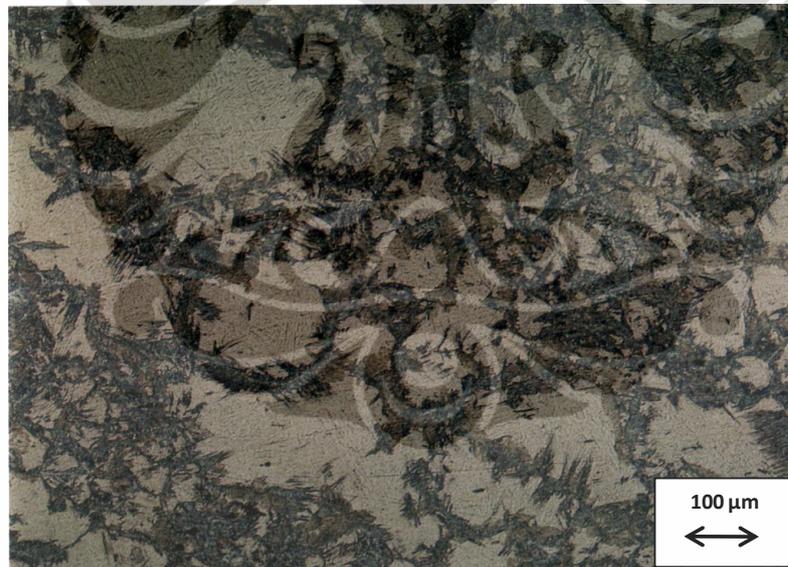
4.3. Hubungan Kecepatan Pendinginan Dengan Besar Butir Austenit Setelah Proses Canai

4.3. 1. Pengamatan Strukturmikro Dengan Mikroskop Optik dan HRSEM (*High Resolution Scanning Electron Microscope*)

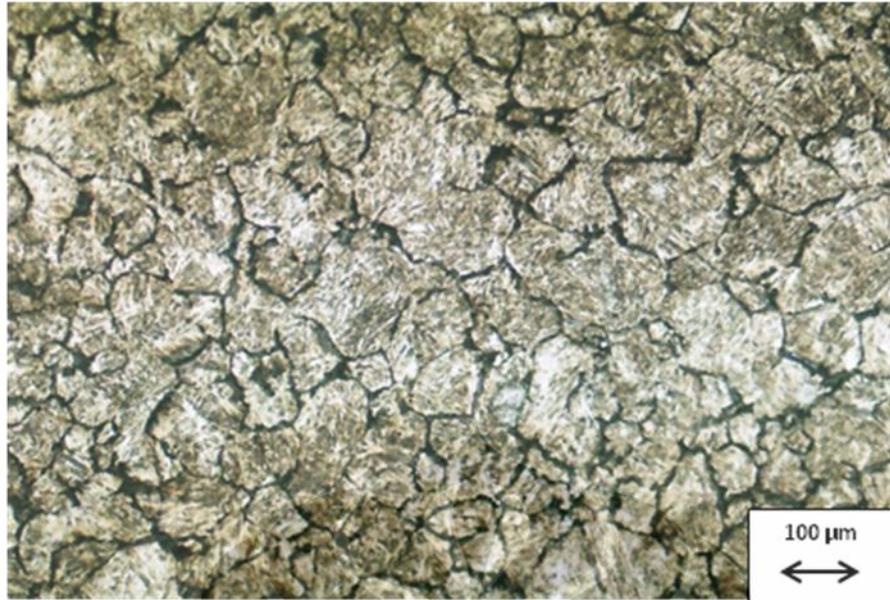
Berturut-turut pada gambar 4.4 sampai dengan gambar 4.23 disajikan foto struktur mikro dari benda uji A, B dan C setelah pendinginan pasca canai panas. ini. Foto struktur mikro ketiga baja ini untuk perbesaran yang lain dapat dilihat pada lampiran H.



Gambar 4.4. Struktur Mikro Baja komposisi A, Pemanasan Awal 1200°C, Laju Pendinginan 7,5°C/dtk, kuens ke Temperatur Ruang Etsa 30% asam pikral + 1 tetes HCl+ 1 tetes Dodecyl Benzenessulfonat.



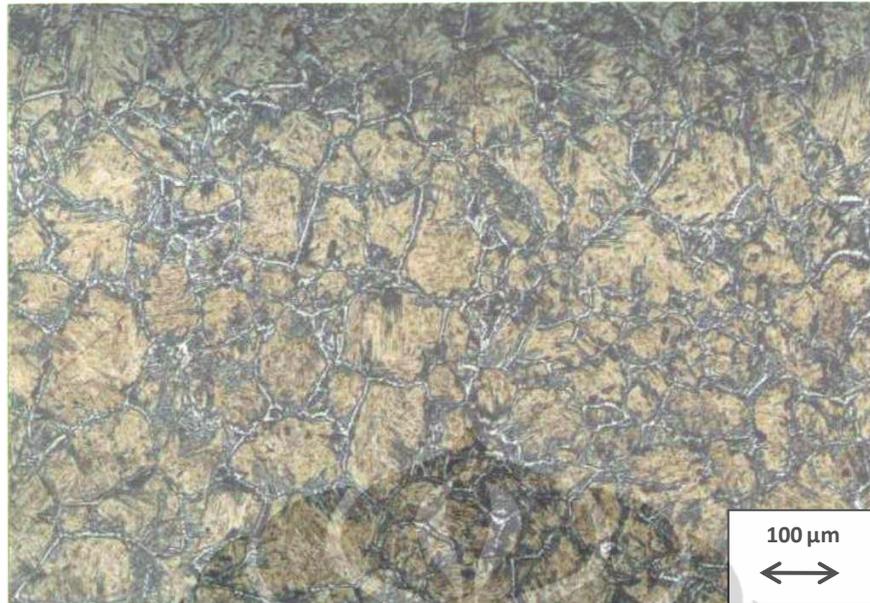
Gambar 4.5. Struktur Mikro Baja komposisi A, Pemanasan Awal 1200°C, Laju Pendinginan 7,7°C/dtk, kuens ke Temperatur Ruang Etsa 30% asam pikral + 1 tetes HCl+ 1 tetes Dodecyl Benzenessulfonat.



Gambar 4.6. Struktur Mikro Baja komposisi A, Pemanasan Awal 1200°C, Laju Pendinginan 7,8°C/dtk, kuens ke Temperatur Ruang Etsa 30% asam pikral + 1 tetes HCl+ 1 tetes Dodecyl Benzenessulfonat.



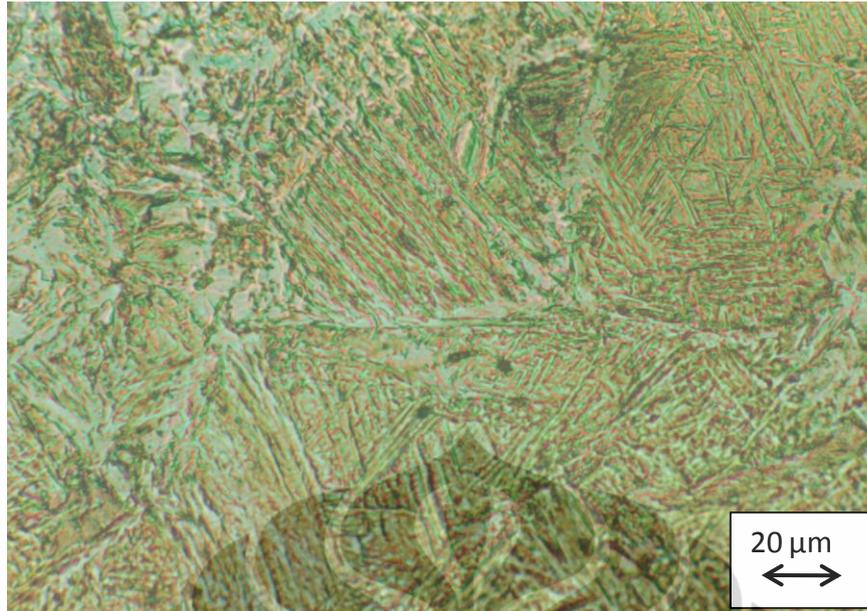
Gambar 4.7 Struktur Mikro Baja komposisi A, Pemanasan Awal 1200°C, Laju Pendinginan 8°C/dtk, kuens ke Temperatur Ruang Etsa 30% asam pikral + 1 tetes HCl+ 1 tetes Dodecyl Benzenessulfonat.



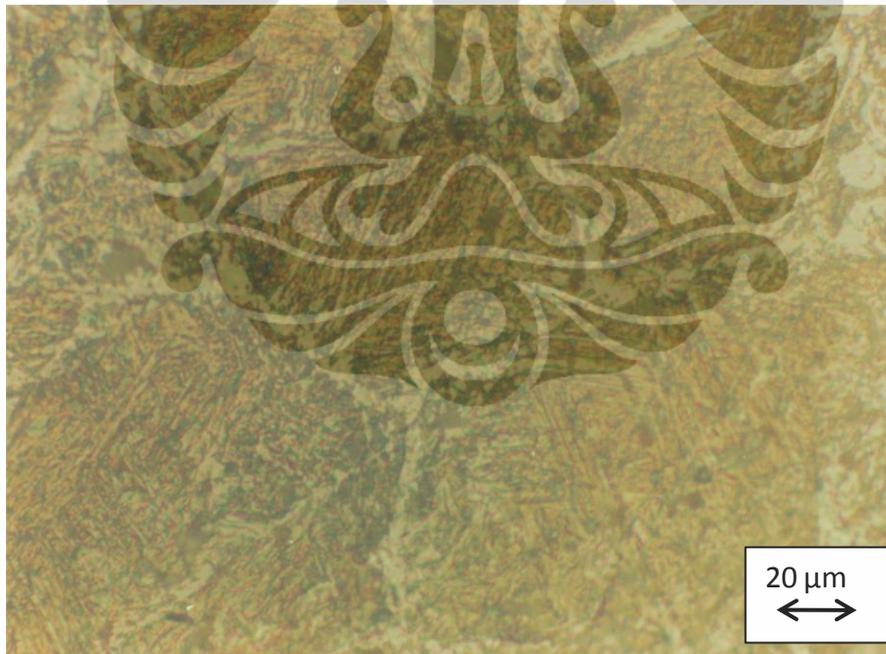
Gambar 4.8. Struktur Mikro Baja komposisi A, Pemanasan Awal 1200°C, Laju Pendinginan 8,1°C/dtk, kuens ke Temperatur Ruang Etsa 30% asam pikral + 1 tetes HCl+ 1 tetes Dodecyl Benzenessulfonat.



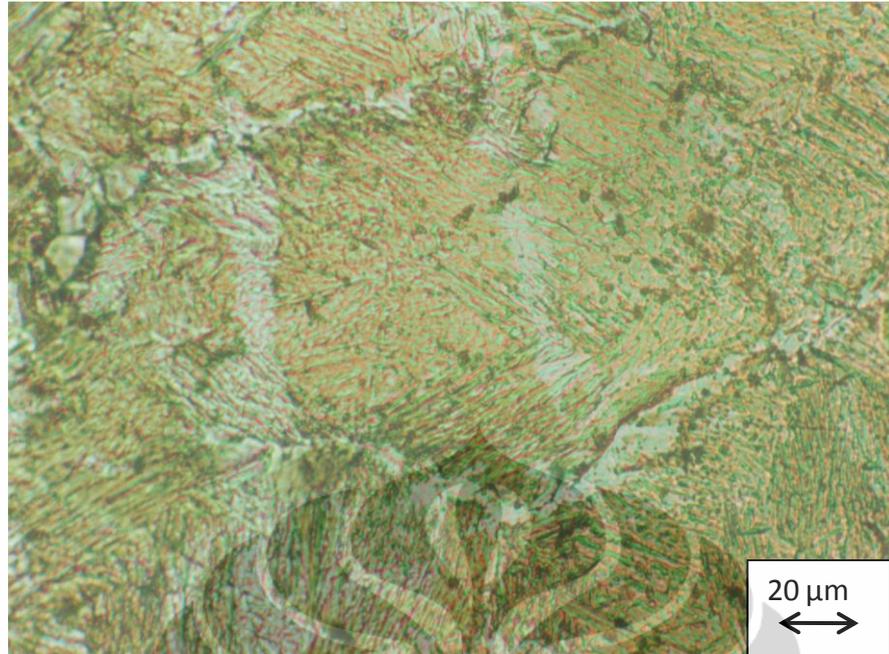
Gambar 4.9. Struktur Mikro Baja komposisi A, Pemanasan Awal 1200°C, Laju Pendinginan 9°C/dtk, kuens ke Temperatur Ruang Etsa 30% asam pikral + 1 tetes HCl+ 1 tetes Dodecyl Benzenessulfonat.



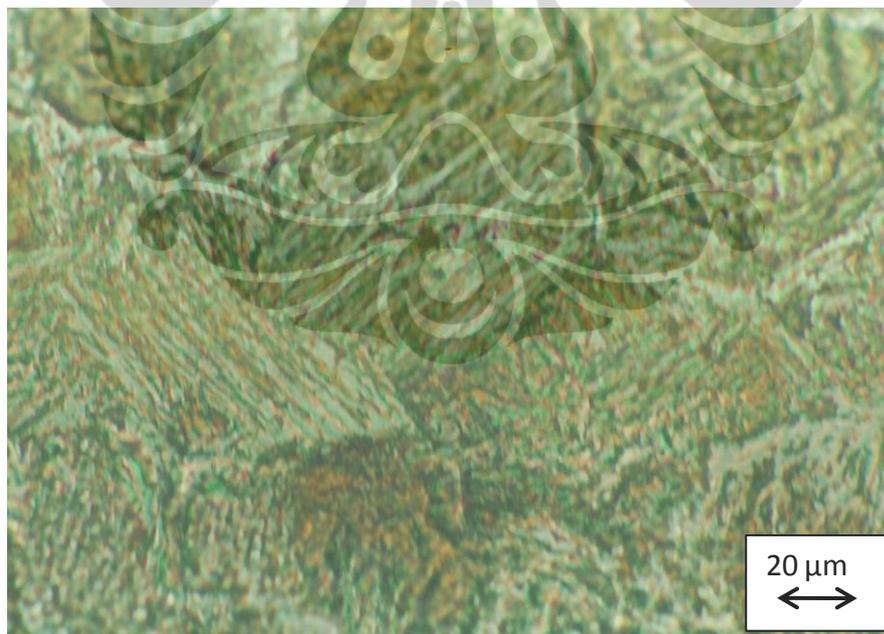
Gambar 4.10. Struktur Mikro Baja komposisi B, Pemanasan Awal 1200°C, Laju Pendinginan 8,3°C/dtk, kuens ke Temperatur Ruang Etsa 30% asam pikral + 1 tetes HCl+ 1 tetes Dodecyl Benzenessulfonat.



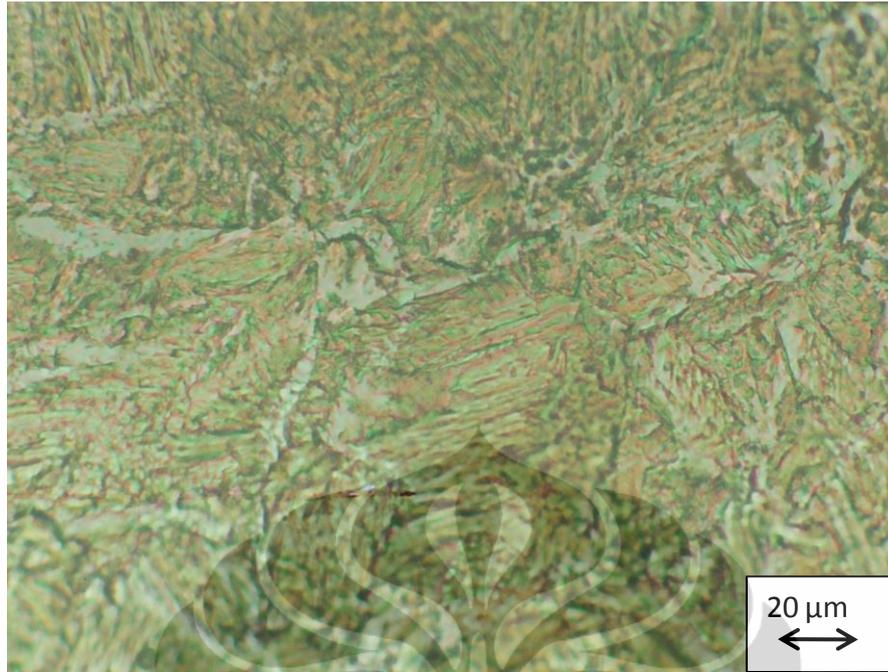
Gambar 4.11. Struktur Mikro Baja komposisi B, Pemanasan Awal 1200°C, Laju Pendinginan 7,9°C/dtk, kuens ke Temperatur Ruang Etsa 30% asam pikral + 1 tetes HCl+ 1 tetes Dodecyl Benzenessulfonat .



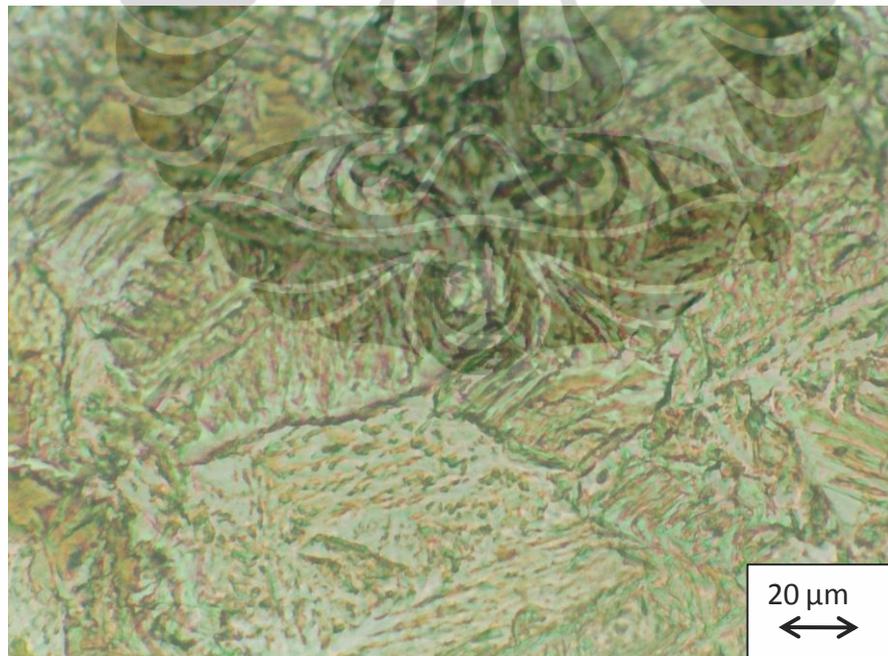
Gambar 4.12. Struktur Mikro Baja komposisi B, Pemanasan Awal 1200°C, Laju Pendinginan 8°C/dtk, kuens ke Temperatur Ruang Etsa 30% asam pikral + 1 tetes HCl+ 1 tetes Dodecyl Benzenessulfonat .



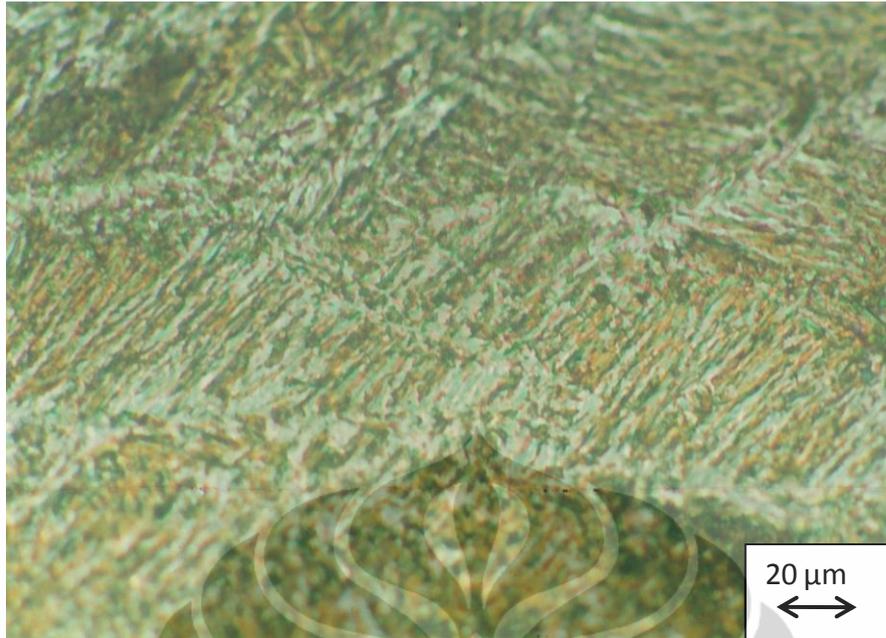
Gambar 4.13. Struktur Mikro Baja komposisi B, Pemanasan Awal 1200°C, Laju Pendinginan 8,8°C/dtk, kuens ke Temperatur Ruang Etsa 30% asam pikral + 1 tetes HCl+ 1 tetes Dodecyl Benzenessulfonat



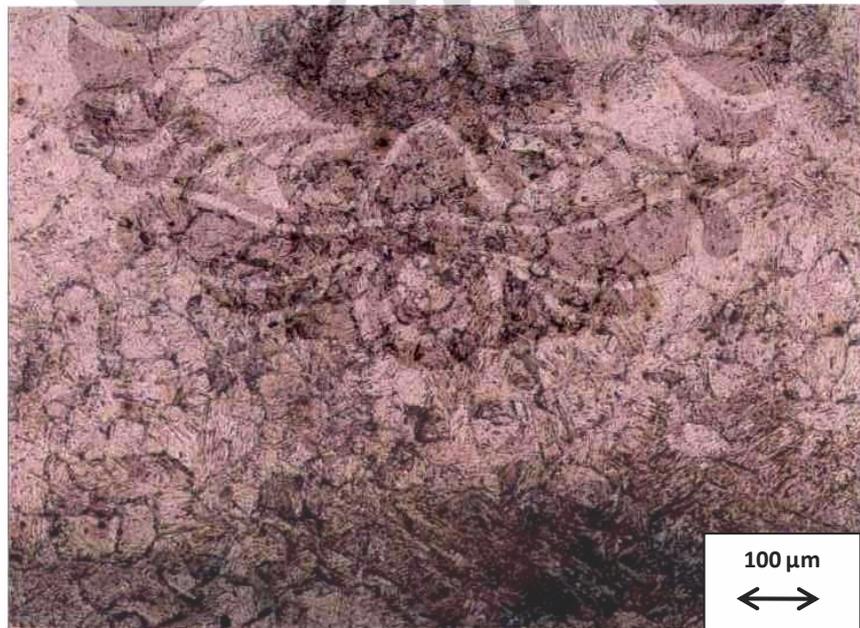
Gambar 4.14. Struktur Mikro Baja komposisi B, Pemanasan Awal 1200°C, Laju Pendinginan 9,3°C/dtk, kuens ke Temperatur Ruang Etsa 30% asam pikral + 1 tetes HCl+ 1 tetes Dodecyl Benzenessulfonat



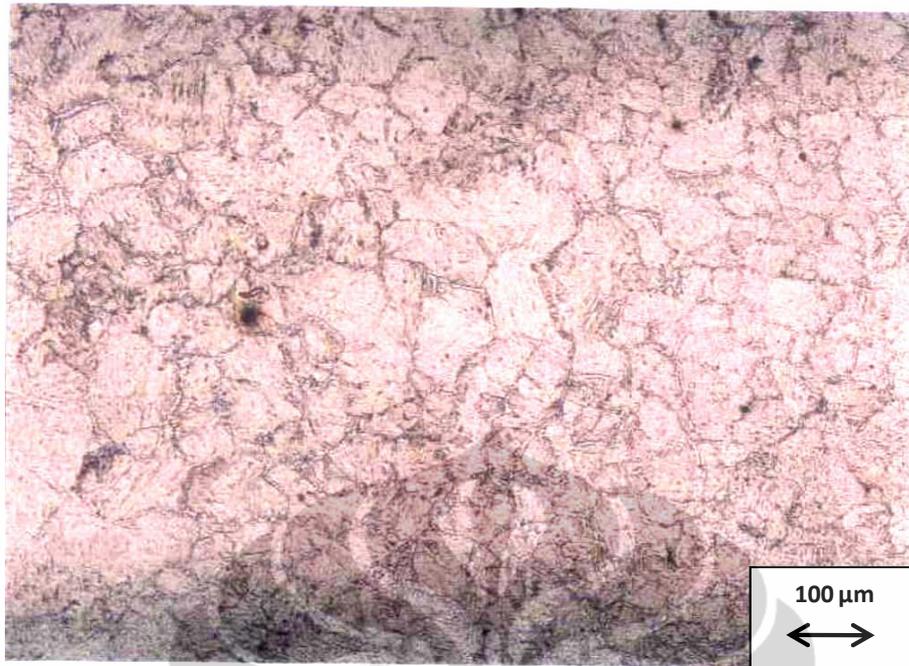
Gambar 4.15. Struktur Mikro Baja komposisi B, Pemanasan Awal 1200°C, Laju Pendinginan 10,5°C/dtk, kuens ke Temperatur Ruang Etsa 30% asam pikral + 1 tetes HCl+ 1 tetes Dodecyl Benzenessulfonat .



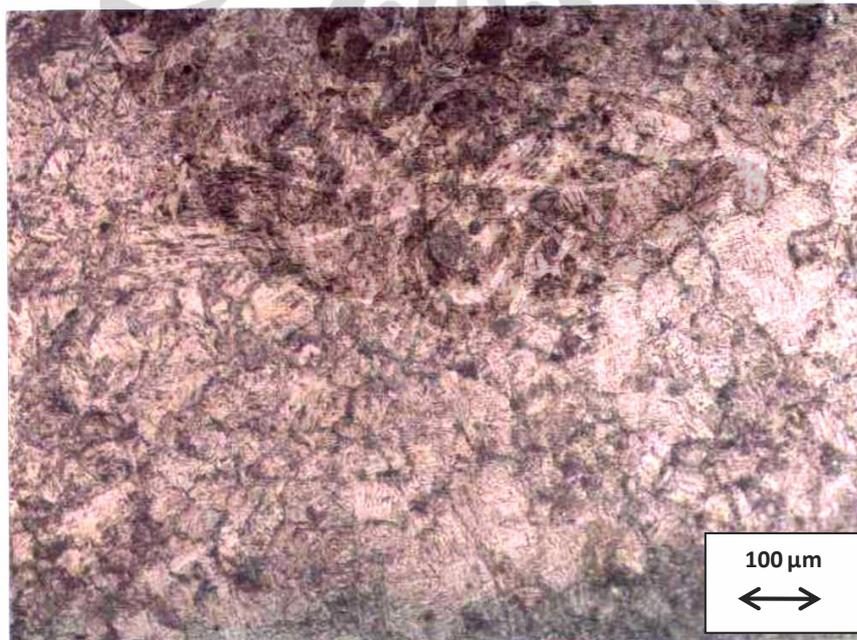
Gambar 4.16. Struktur Mikro Baja komposisi B, Pemanasan Awal 1200°C, Laju Pendinginan 10,5°C/dtk, kuens ke Temperatur Ruang Etsa 30% asam pikral + 1 tetes HCl+ 1 tetes Dodecyl Benzenessulfonat .



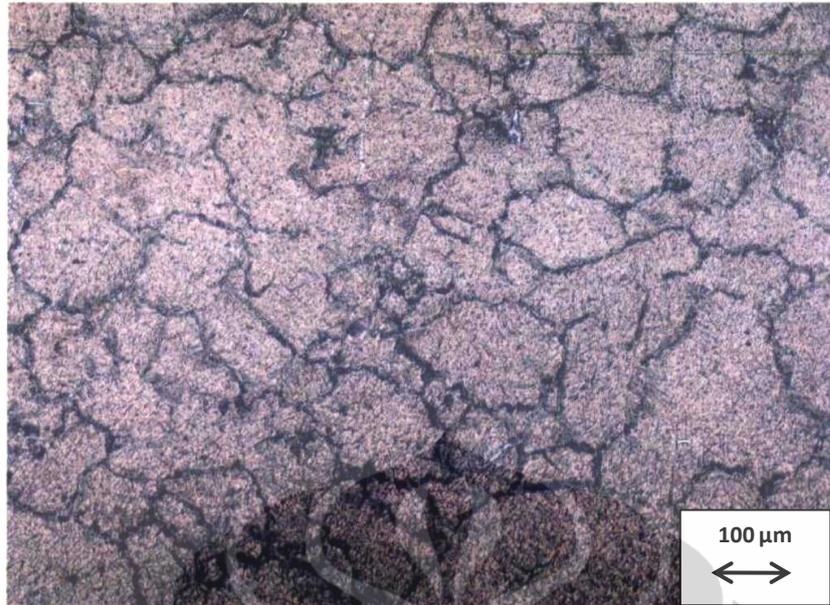
Gambar 4.17. Struktur Mikro Baja komposisi C, Pemanasan Awal 1200°C, Laju Pendinginan 7,6°C/dtk, kuens ke Temperatur Ruang Etsa 30% asam pikral + 1 tetes HCl+ 1 tetes Dodecyl Benzenessulfonat .



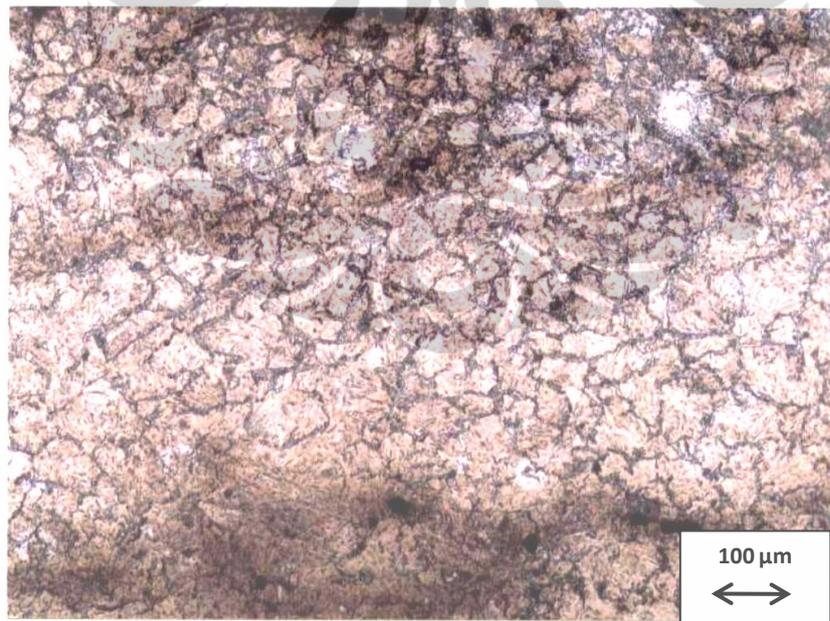
Gambar 4.18. Struktur Mikro Baja komposisi C, Pemanasan Awal 1200°C, Laju Pendinginan 8,5°C/dtk, kuens ke Temperatur Ruang Etsa 30% asam pikral + 1 tetes HCl+ 1 tetes Dodecyl Benzenessulfonat .



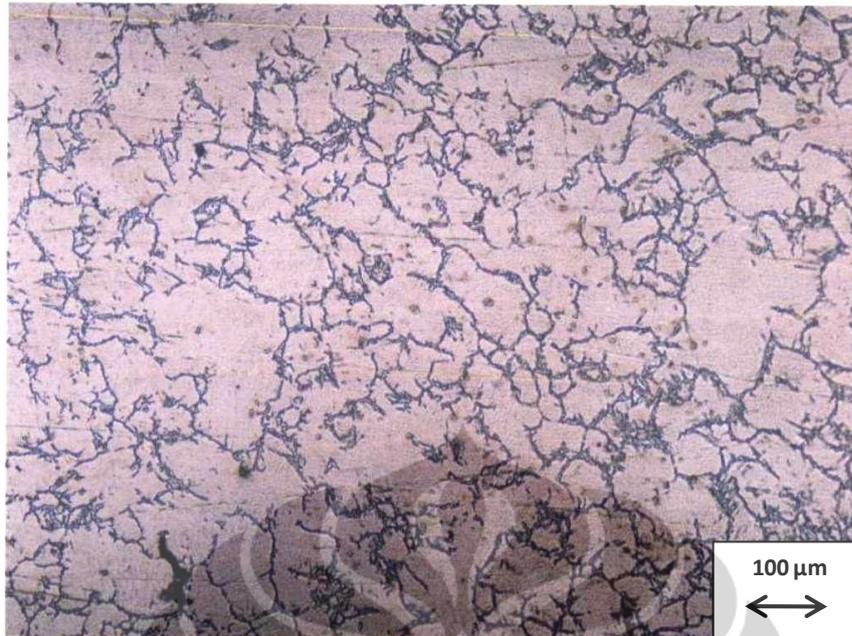
Gambar 4.19. Struktur Mikro Baja komposisi C, Pemanasan Awal 1200°C, Laju Pendinginan 9,47°C/dtk, kuens ke Temperatur Ruang Etsa 30% asam pikral + 1 tetes HCl+ 1 tetes Dodecyl Benzenessulfonat .



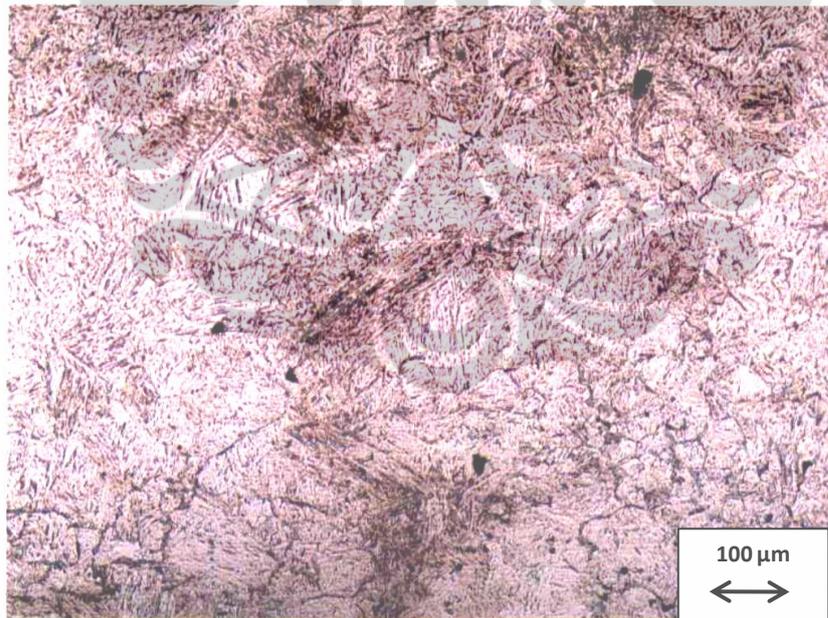
Gambar 4.20. Struktur Mikro Baja komposisi C, Pemanasan Awal 1200°C, Laju Pendinginan 10,24°C/dtk, kuens ke Temperatur Ruang Etsa 30% asam pikral + 1 tetes HCl+ 1 tetes Dodecyl Benzenessulfonat .



Gambar 4.21. Struktur Mikro Baja komposisi C, Pemanasan Awal 1200°C, Laju Pendinginan 11,4°C/dtk, kuens ke Temperatur Ruang Etsa 30% asam pikral + 1 tetes HCl+ 1 tetes Dodecyl Benzenessulfonat .

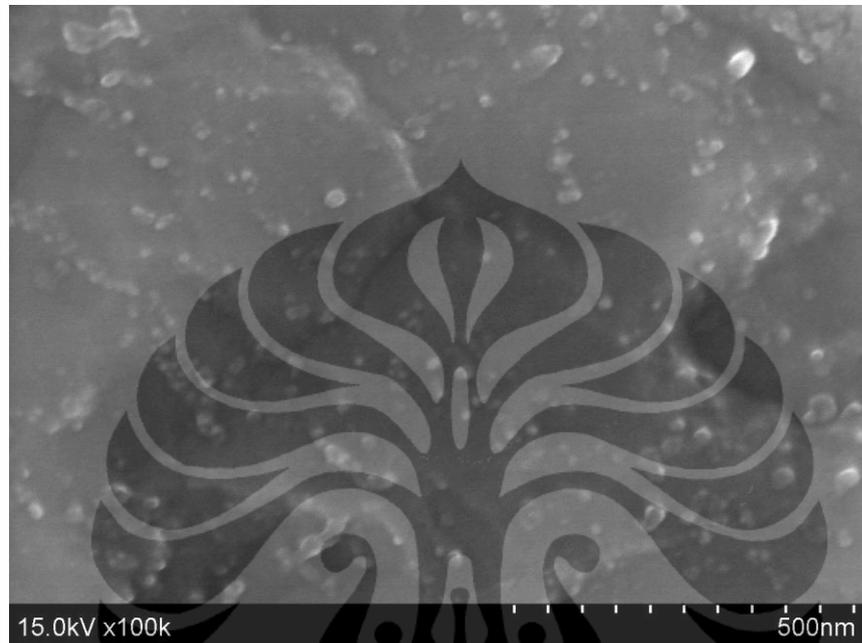


Gambar 4.22. Struktur Mikro Baja komposisi C, Pemanasan Awal 1200°C, Laju Pendinginan 11,17°C/dtk, kuens ke Temperatur Ruang Etsa 30% asam pikral + 1 tetes HCl+ 1 tetes Dodecyl Benzenessulfonat .

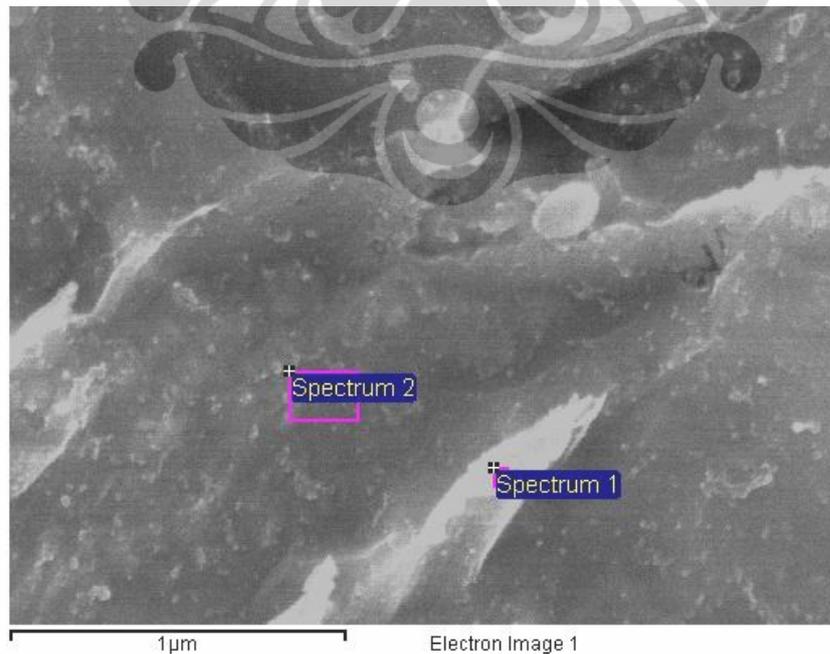


Gambar 4.23. Struktur Mikro Baja komposisi C, Pemanasan Awal 1200°C, Laju Pendinginan 12°C/dtk, kuens ke Temperatur Ruang Etsa 30% asam pikral + 1 tetes HCl+ 1 tetes Dodecyl Benzenessulfonat .

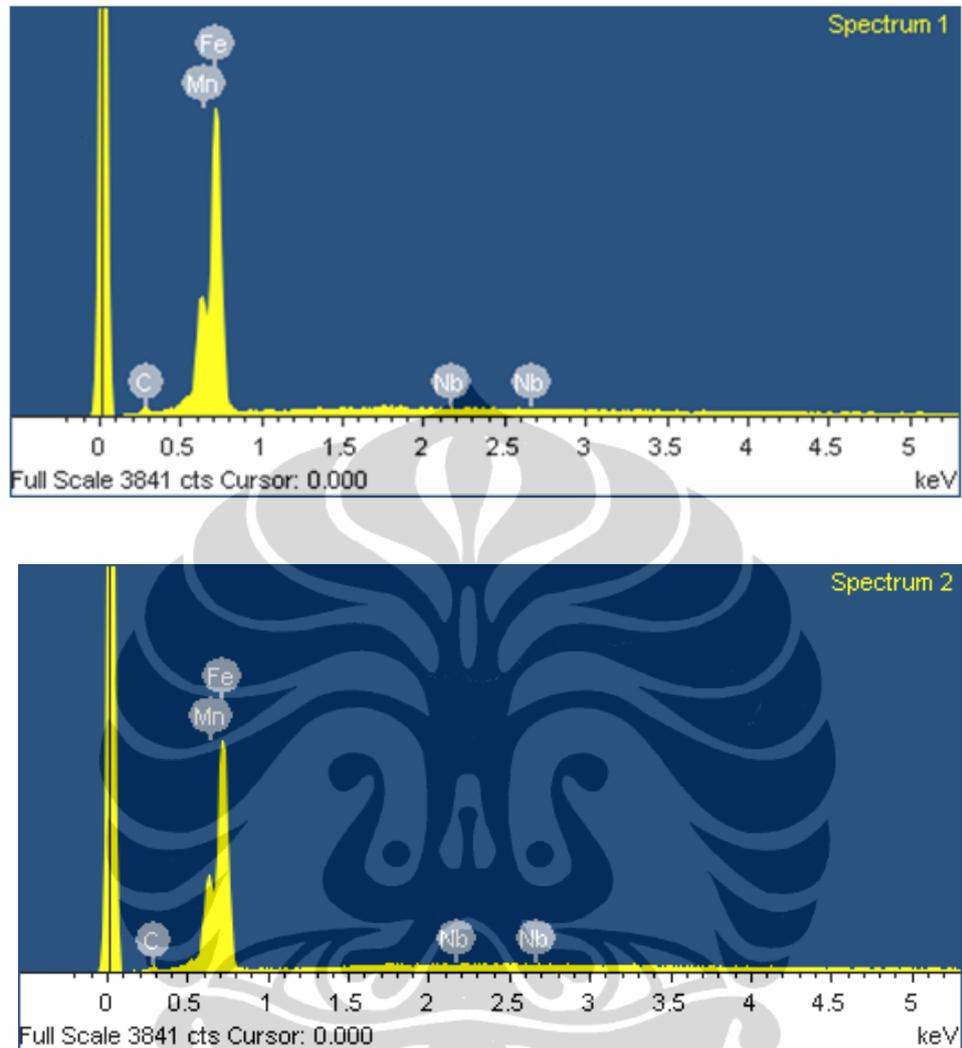
Berikut adalah foto struktur mikro baja A dan C dengan *High Resolution Scanning Electron Microscope* (HRSEM), untuk mengamati keberadaan endapan NbC



Gambar 4.24. Struktur mikro baja A dengan HRSEM ,perbesaran 100.000 kali, etsa Nital 5%.



Gambar 4.25. Struktur mikro baja A dengan HRSEM ,perbesaran 50.000 kali, etsa Nital 5% dan pengambilan komposisi kimia pada dua lokasi dengan EDS



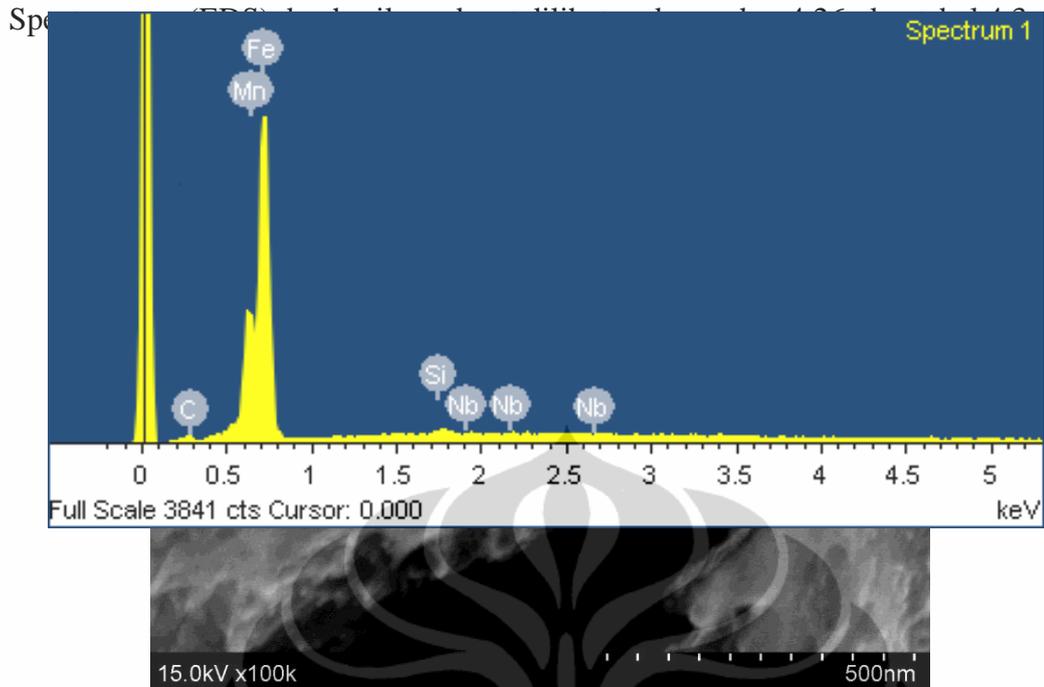
Gambar 4.26. Hasil pengujian komposisi kimia dengan EDS baja A

Tabel.4.3 Hasil Uji komposisi kimia baja A dengan metode EDS

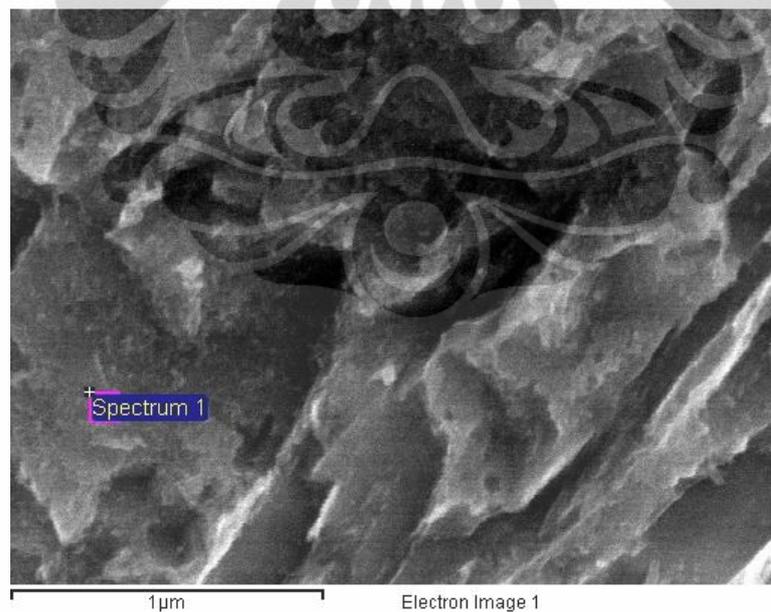
Processing option : All elements analysed (Normalised)

Spectrum	In stats.	C	Mn	Fe	Nb	Total
Spectrum 1	Yes	2.96	0.92	96.04	0.09	100.00
Spectrum 2	Yes	2.20	1.13	96.87	-0.20	100.00
Mean		2.58	1.03	96.45	-0.06	100.00
Std. deviation		0.54	0.15	0.59	0.20	
Max.		2.96	1.13	96.87	0.09	
Min.		2.20	0.92	96.04	-0.20	

All results in weight%



Gambar 4.27. Struktur mikro baja C dengan HRSEM ,perbesaran 100.000 kali, etsa Nital 5% .



Gambar 4.28. Struktur mikro baja C dengan HRSEM ,perbesaran 50.000 kali, etsa Nital 4% dan pengambilan komposisi kimia pada dua lokas dengan EDS

Gambar 4.29. Hasil pengujian komposisi kimia dengan EDS baja C

Tabel.4.4 Hasil Uji komposisi kimia baja C dengan metode EDS

Element	Weight%	Atomic%
C K	1.52	6.67
Si K	0.37	0.70
Mn K	0.98	0.94
Fe K	96.94	91.59
Nb L	0.19	0.11
Totals	100.00	

Bintik atau bulatan putih pada gambar 4.24 , 4.25, 4.27 dan 4.28 diperkirakan adalah endapan partikel NbC, dan hasil analisa unsur kimia dengan EDS dapat dilihat pada tabel 4.3 dan tabel 4.4 menunjukkan partikel putih tersebut mengandung Nb dan C, yang menunjukkan kemungkinan merupakan endapan NbC.

4.3.2. Hasil Perhitungan Kecepatan Pendinginan dan Ukuran Butir Austenit

Kecepatan pendinginan ketiga jenis benda uji dihitung berdasarkan grafik perbedaan temperatur dari temperatur deformasi proses canai panas hingga pendinginan temperatur ruang sebagaimana terlihat pada lampiran I. Hasil perhitungan kecepatan pendinginan ketiga jenis benda uji diberikan pada tabel 4.5, bersama dengan hasil perhitungan besar butir austenit prior.

Perhitungan ukuran butir austenit dengan variabel kecepatan pendinginan untuk benda uji komposisi A,B dan C dapat dilihat pada Lampiran J.1 sampai J 14. Lampiran J 1.menunjukkan perhitungan butir setelah rekristalisasi (d_{rek}), lampiran J2, menunjukkan hasil perhitungan butir yang didapat dari hasil eksperimen, lampiran J3,J4 dan J5, menunjukkan hasil perhitungan butir austenit dengan menggunakan persamaan isothermal dan non-isothermal hasil modifikasi untuk benda uji A,B dan C. Lampiran J.6. –J8. menunjukkan perhitungan besar butir austenit menggunakan pendekatan matematis untuk baja A,B dan C. Besar simpangan baku pada pengukuran butir austenit hasil eksperimen untuk ketiga komposisi baja HSLA-Nb A,B dan C dapat dilihat pada lampiran K. Contoh metode perhitungan butir dengan metode *Intercept* seperti pada ASTM E112 dapat dilihat pada lampiran E. Tabel 4.5 menunjukkan besar butir austenit hasil eksperimen dari baja A,B dan C pada berbagai kecepatan pendinginan, dengan nilai standar deviasi pengukuran.

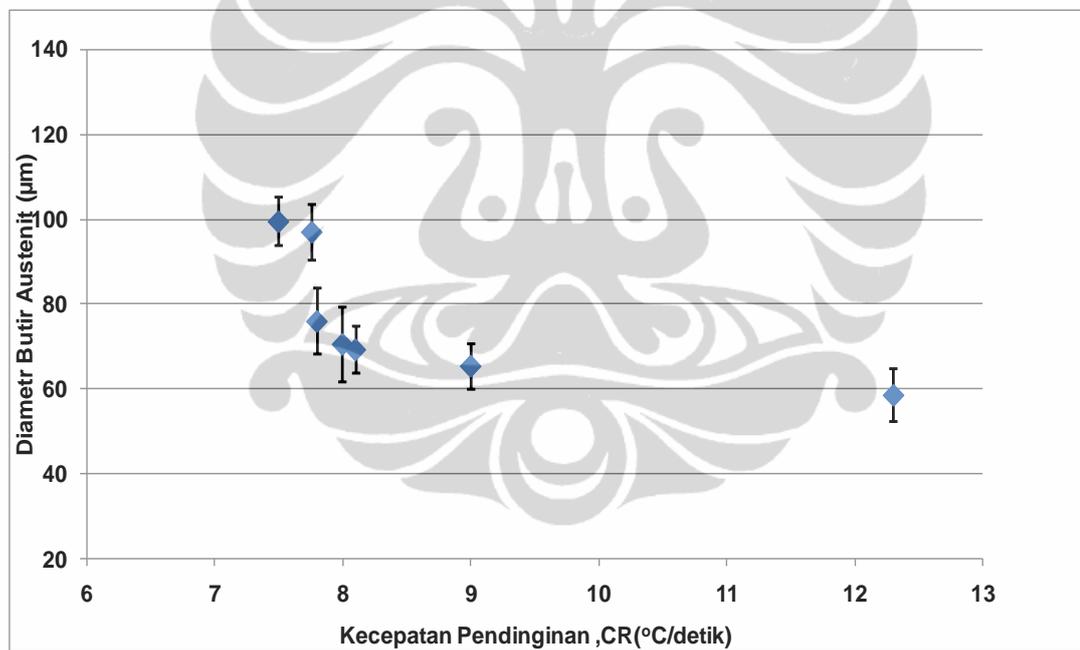
Tabel 4.5 Besar Butir Rata-Rata Austenit Prior Hasil Eksperimen

Type Baja	Cr(°K/s)	d(μm)	S
A	7.50	99.41	5,82
	7.76	96.93	6,58
	7.80	75.86	7,68
	8.00	70.46	8,84
	8.10	69.18	5,41
	9.00	65.29	5,33
	12.30	58.43	6,31
	B	7.90	85.71
8.00		93.97	9,07
8.30		78.78	9,00
8.80		65.85	11,91
9.30		62.07	11,40
10.50		60.00	8,75

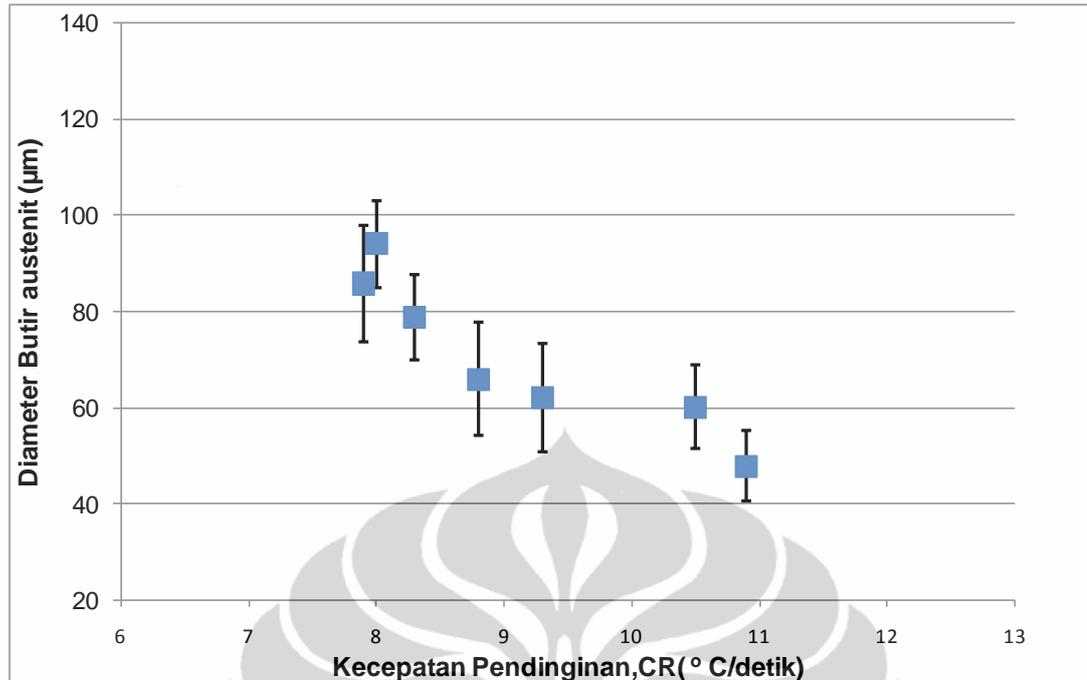
	10.90	47.80	7,29
C	7.60	84.10	3,25
	8.50	53.61	3,41
	9.47	46.36	2,66
	9.50	52.57	3,51
	11.17	39.38	2,18
	11.40	42.56	1,81

4.3.3. Hubungan Kecepatan Pendinginan dan Ukuran Butir Austenit .

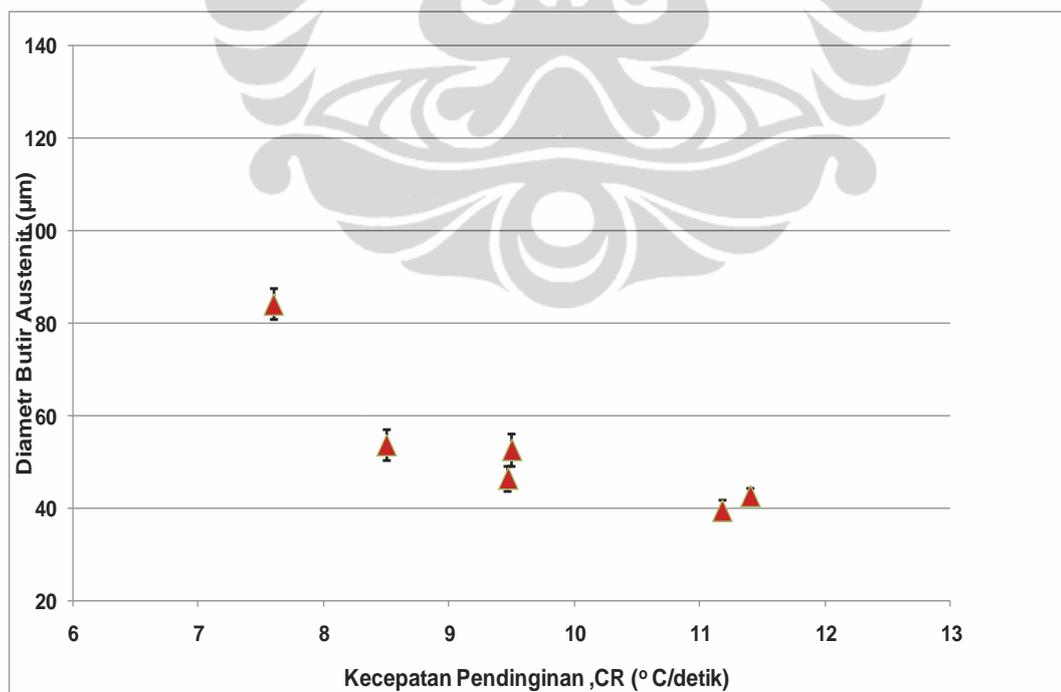
Dari hasil pengukuran besar butir austenit seperti pada tabel 4.5, maka dapat diketahui ukuran butir austenit terhadap kecepatan pendinginan untuk masing-masing baja A,B dan C, seperti pada gambar 4.30, 4.31, dan 4.32 di bawah ini;



Gambar 4.30. Nilai Ukur Butir rata-rata terhadap Kecepatan Pendinginan Baja A



Gambar 4.31. Nilai Ukur Butir rata-rata terhadap Kecepatan Pendinginan Baja B



Gambar 4.32. . Nilai Ukur Butir rata-rata terhadap Kecepatan Pendinginan Baja C

Hubungan besar butir γ dan kecepatan pendinginan seperti pada gambar 4.30 sampai dengan 4.32, adalah hubungan antara kecepatan pendinginan dan besar butir austenit pada baja komposisi A, B dan C, yang didapat dari hasil perhitungan diameter butir austenit hasil eksperimen, yang nilainya seperti pada tabel 4.5 diatas. Rincian perhitungan besar butir austenit hasil eksperimen dapat dilihat pada Lampiran J 2.

Hubungan diameter butir austenit dengan kecepatan pendinginan (non-isothermal) untuk ketiga jenis baja A,B dan C seperti terlihat pada gambar 4.30 - 4.32 di atas menunjukkan kecenderungan yang sama, yaitu dengan semakin tinggi kecepatan pendinginan dari 7 s/d 12 °C/detik, maka ukuran butir austenit terlihat semakin halus. Kecenderungan ini tampak sesuai dengan teori pertumbuhan butir γ , dimana semakin tinggi kecepatan pendinginan, maka butir γ tidak memiliki kesempatan untuk tumbuh (*grain growth*), atau kemungkinan kinetika pertumbuhan butir austenit rendah.

Contoh perhitungan diameter butir γ dapat dilihat pada lampiran E

Hasil perhitungan secara rinci yang menunjukkan adanya simpangan baku rata-rata pada pengukuran besar butir benda uji pada setiap kecepatan pendinginan, dapat dilihat pada lampiran K.



BAB V

PEMBAHASAN

5.1 Material

Material yang diteliti adalah baja HSLA-Nb hasil dari pengecoran kontinyu (*continous casting*), dan menurut hasil uji komposisi kimia memiliki 3 (tiga) kandungan unsur Nb yang berbeda, yaitu 0,019, 0,037 dan 0,056% Nb (lihat tabel 4.1). Perbedaan kandungan unsur Nb pada baja merupakan faktor penting untuk diamati terhadap kinetika pertumbuhan butir austenit. Nb adalah pembentuk karbida atau nitrida dimana karbida Niobium memiliki kelarutan yang rendah pada baja dan ditemukan dalam bentuk endapan atau presipitat. Partikel yang tidak larut akan menahan pertumbuhan austenit sehingga butir ferit tidak tumbuh dan tetap lebih halus.[53]. Selain menghaluskan butir ferit, endapan Niobium juga dapat meningkatkan sifat mekanik baja, melalui mekanisme penghalangan pergerakan dislokasi dengan mekanisme *solute drag*[37,79]. Semakin besar prosentase Nb dalam baja, *yield stress* juga meningkat, dan bila ukuran endapan semakin halus, *yield stress* baja juga semakin tinggi. Niobium dapat menghaluskan butir ferit dengan mekanisme penghalangan pergerakan batas butir ferit ketika akan tumbuh, dan juga sebagai tempat terjadinya nukleasi fasa ferit [79]

Kandungan karbon baja A dan C terlihat cukup tinggi untuk jenis baja HSLA-Nb, yaitu sekitar 0,16 dan 0,17 % C, sedangkan untuk baja B, kandungan karbon terdapat jauh lebih rendah, yaitu sekitar 0,048%. Nitrogen untuk ketiga jenis baja tersebut relatif tinggi, yaitu di atas 0,03% berat, dibandingkan baja pada umumnya yaitu sekitar 0,006%N. Walaupun demikian, menurut H.Watanabe [78], kandungan Nitrogen yang tinggi akan mengendap dalam bentuk nitrida, terutama lebih cepat terjadi pada temperatur 870 dan 925°C. Namun pengendapan yang tercepat terlihat pada temperatur di atas 925°C. Prosentase karbon dalam baja juga berpengaruh terhadap kekuatan baja HSLA-Nb. Selain memberikan penguatan dalam larutan padat, karbon juga bereaksi dengan Nb dan N membentuk endapan karbonitrida. Baja dengan prosentase karbon yang tinggi lebih reaktif membentuk senyawa NbC atau NbCN [53]

5.2 Penetapan Temperatur Pemanasan Awal

Penentuan temperatur pemanasan awal untuk ketiga paduan baja ini mengikuti persamaan temperatur *solubility product* [26]. Namun persamaan temperatur *Solubility Product* dapat diterapkan hanya untuk paduan-paduan dimana prosentase N lebih rendah dibandingkan dengan C. Hal ini sesuai untuk jenis baja ini, yang memiliki prosentase N ~ 0,033, ~ 0,004 dan ~ 0,031% berat untuk baja A, B dan C.

Dengan demikian dapat diketahui bahwa ketiga baja tersebut memiliki nilai $(C+12/14N)$ atau *Carbon equivalent* masing-masing sebesar 0,193, 0,051, 0,198. Gambar 2.5 memperlihatkan hubungan prosentase Nb dengan nilai $(C+12/14N)$. Tampak bahwa nilai $(C+12/14N)$ yang terendah dimiliki oleh baja B. Demikian juga dengan temperatur kelarutan endapannya (*solubility product*). Sedangkan baja C memiliki nilai $(C+12/14N)$ dan temperatur kelarutan endapan tertinggi memiliki prosentase Nb tertinggi (0,056%). Pada lampiran B telah dicantumkan temperatur kelarutan untuk masing-masing baja A, B dan C.

Untuk keseragaman pengaruh temperatur pemanasan awal terhadap pertumbuhan butir austenit, pemanasan awal dilakukan pada temperatur 1200°C. Untuk baja C, menurut perhitungan pada lampiran B, temperatur pemanasan awal yang diberikan belum mencapai temperatur kelarutan dari endapan NbCN pada baja C yang tinggi kandungannya. Hal ini dilakukan untuk menghindarkan pertumbuhan butir Austenit yang berlebihan pada pemanasan awal. Disamping itu, menurut penelitian yang dilakukan oleh Masanori Ueki dkk [57], yang dilakukan terhadap baja HSLA-Nb dengan komposisi yang mendekati baja dalam penelitian ini, bahwa temperatur kelarutan dari senyawa Nb, C dan N adalah sesuai dengan nilai pada tabel 5.1.

Tabel 5.1.Senyawa yang terbentuk pada baja paduan mikro dan temperatur kelarutannya[57].

Senyawa	NbC	NbN	Nb[C,N]	V ₄ C ₃	VN
Temp Kelarutan (°C)	1069	1029	1135	861	963

Dari tabel 5.1 di ketahui bahwa untuk kelarutan senyawa NbC, NbN maupun Nb[C,N] terjadi pada temperatur jauh dibawah 1200°C. Sehingga diperkirakan pemilihan temperatur pemanasan awal (*reheating*) 1200°C telah melarutkan sebagian besar senyawa karbida dan nitride yang ada dalam baja. Namun ada kemungkinan pada baja C, saat pemanasan awal (*reheating*), pertumbuhan butir austenit belum sepenuhnya merupakan pertumbuhan butir normal, karena masih ada sebagian endapan Nb yang belum larut dan menghambat pertumbuhan butir austenit .

5.3. Penentuan Larutan Etsa Batas Butir Austenit.

Kualitas penampakan batas butir austenit prior menjadi penting karena penelitian ini ditujukan untuk mengamati hubungan antara variabel dalam proses canai panas dengan besar butir fasa austenit, sesaat sebelum mengalami pendinginan setelah proses deformasi dan rekristalisasi statik. Untuk menampakkan batas butir austenit prior, dibutuhkan etsa yang spesifik , dimana larutan etsa yang dipergunakan amat sensitif terhadap prosentase karbon pada baja.

Besar butir austenit sesaat sebelum tansformasi menentukan sifat mekanis akhir baja HSLA setelah deformasi, rekristalisasi dan bertransformasi [2, 59, 74, 79, 75]. Untuk itu dilakukan teknik etsa yang tepat agar dapat dilakukan pengamatan dan analisa pertumbuhan butir fasa austenit. Austenit prior lebih sulit diamati pada baja dengan komposisi karbon yang lebih rendah, karena fasa ini hanya akan muncul jika berada dalam matriks fasa martensit

Evaluasi mendapatkan larutan etsa yang tepat dilakukan dengan menggunakan benda uji baja HSLA dengan komposisi B. Baja B memiliki

prosentase karbon yang jauh lebih rendah dibandingkan komposisi kedua baja lain. Austenit prior lebih sulit diamati pada baja dengan komposisi karbon yang lebih rendah, karena fasa ini hanya akan muncul jika berada dalam matriks fasa martensit [83]. Disamping itu Baja B mengandung fosfor, yang dapat bersegregasi ke batas butir selama austenisasi. Kandungan fosfor minimum yang harus dimiliki baja untuk memudahkan dalam penampakan batas butir austenit prior adalah sekitar 0,005%P. Kandungan fosfor 0,005, 0,010 dan 0,014% ditemukan cukup memadai untuk memunculkan masing-masing untuk ketiga jenis baja, batas butir Austenit dengan segregasi fosfor pada batas butir Austenit [83].

Inti dari teknik etsa yang diterapkan adalah berbagai komposisi larutan asam pikrik dengan pelarut air atau alkohol, dan penambahan beberapa jenis *Wetting agent*. Beberapa teknik dilakukan dengan memanaskan zat etsa untuk meningkatkan kontak permukaan baja dengan zat kimia, dengan berbagai variasi waktu etsa. Hasil pengamatan dengan menggunakan beberapa zat etsa austenit prior baja HSLA-Nb terhadap baja B dapat dilihat pada lampiran C, sebagaimana diambil dari berbagai sumber literatur dan penelitian terdahulu [4, 81, 82, 83]. Berdasarkan realitas sebagaimana dapat dilihat pada lampiran D, dapat disimpulkan bahwa larutan etsa yang paling optimum adalah larutan jenuh 30% asam pikrik dalam alkohol 90%, dengan penambahan *wetting agent* Dodecyl Benzenessulfonat dengan diperkuat oleh 1 tetes HCl pekat.

5.4. Pengaruh Temperatur Dan Waktu Tahan Pemanasan Terhadap Besar Butir Austenit.

Dari penelitian pendahuluan terhadap baja komposisi B, telah diketahui bahwa semakin tinggi temperatur pemanasan awal, semakin besar ukuran butir austenit. Hasil pada gambar 4.2 dan 4.3 pada bab IV, memperlihatkan bahwa pengaruh temperatur pemanasan besar butir austenit lebih besar dibandingkan dengan pengaruh waktu tahan reheating pada temperatur tertentu. Hal ini terlihat pada grafik pertumbuhan butir austenit yang meningkat lebih tajam pada peningkatan temperatur pemanasan. (gambar 4.2). dibandingkan dari grafik yang sama pada gambar 4.3. Hasil penelitian pendahuluan ini menunjukkan

bahwa temperatur pemanasan awal memiliki peran besar terhadap besar butir austenit awal (d_0), saat dimulainya proses canai panas. Sementara pada persamaan Sellars, pada persamaan 2.18, tampak bahwa besar butir austenit diakhir proses pemanasan awal (d) dipengaruhi oleh besar butir Austenit awal (d_0). Untuk itu penentuan temperatur pemanasan awal umumnya mengacu pada temperatur kelarutan endapan NbCN yang terdapat pada baja HSLA-Nb, dengan menggunakan persamaan Irvine [10], yaitu seperti pada persamaan (2.6) ;

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

. Pemanasan awal ketiga jenis baja ini dilakukan pada temperatur 1200°C, yaitu diatas dan mendekati temperatur kelarutan endapan ketiga jenis baja , Perbedaan ini disebabkan oleh besarnya perbedaan komposisi karbon yang jauh lebih tinggi pada baja A dan C dibandingkan dengan baja B, sehingga temperatur pemanasan awal pada baja A dan C lebih tinggi.

Temperatur pemanasan awal juga dibatasi untuk baja C, agar tidak terjadi pertumbuhan butir austenit yang berlebihan pada bagian tertentu dari baja C. Hasil pengamatan butir austenit memperlihatkan bahwa semakin tinggi temperatur pemanasan awal, batas butir austenit semakin jelas terlihat. Hal ini sesuai dengan dasar perlakuan panas baja, bahwa semakin tinggi temperatur pemanasan, prosentase austenit menjadi semakin tinggi. Saat di dinginkan cepat, didapat prosentase martensit yang lebih tinggi. Prosentase fasa martensit yang tinggi membuat batas butir austenit menjadi lebih jelas dan mudah diamati setelah proses etsa [83].

5.5 Perbandingan Hasil Eksperimen Dengan Model Isotermal

Hubungan antara besar butir austenit dengan kecepatan pendinginan setelah proses canai hasil eksperimen dapat dilihat pada gambar 4.26 sampai dengan gambar 4.28. Besar butir austenit pada gambar tersebut merupakan hasil perhitungan besar butir dari foto struktur mikro gambar 4.6 hingga gambar 4.25, Dari hubungan tersebut, diketahui bahwa semakin tinggi kecepatan

pendinginan setelah canai panas, besar butir austenit akhir sebelum bertransformasi menjadi ferit semakin halus, untuk ketiga jenis baja tersebut. Data hubungan tersebut adalah antara laju pendinginan CR (*Cooling rate*) sebagai sumbu X dan diameter akhir butir austenit sebagai sumbu Y.

Kecenderungan yang sama juga telah dilaporkan oleh Matthias Militzer [65] yang telah melakukan eksperimen terhadap beberapa jenis baja HSLA-Nb, (lihat pada gambar 2.20), bahwa besar butir ferit menjadi lebih halus dengan meningkatnya kecepatan pendinginan.

Selain itu tampak dalam gambar 2.20, bahwa butir ferit juga bertambah halus dengan meningkatnya kandungan unsur Niobium dan Titanium dalam baja, dimana butir HSLA 90 dengan prosentase paduan yang lebih tinggi memiliki butir ferit yang lebih halus, dan baja HSLA 50 dengan prosentase paduan yang paling rendah memiliki butir ferit yang lebih kasar.

C.M. Sellars [75], Hiroshi Sekine [76] dan M. Anelli dkk [77], juga melaporkan hal yang sama, seperti yang tampak pada gambar 2.22. Semakin besar ukuran butir austenit akhir sebelum transformasi semakin besar pula ukuran butir fasa ferit setelah transformasi. Demikian juga bahwa semakin besar regangan deformasi pada baja, semakin halus butir ferit akhir dan butir austenit. Jadi untuk mendapatkan besar butir ferit akhir yang halus, perlu perlakuan proses canai terkontrol agar diperoleh besar butir austenit akhir yang halus sebelum bertransformasi menjadi fasa ferit.

Demikian juga dengan eksperimen yang dilakukan oleh Naoki Nakata [60] terhadap baja HSLA-Nb dengan 0,054% Nb, eksperimen oleh M. Militzer dkk [9], terhadap beberapa jenis baja HSLA paduan mikro, didapat bahwa dengan meningkatnya kecepatan pendinginan setelah canai panas, juga didapat butir ferit yang semakin halus.

Model pertumbuhan butir yang dipergunakan dalam menghitung pertumbuhan butir austenit pada baja secara umum mengikuti persamaan Sellars [2] yaitu seperti pada persamaan 2.18. Persamaan Sellars didapat secara empiris terhadap berbagai baja HSLA yang mengandung unsur paduan mikro, termasuk Nb. Kondisi eksperimen yang dilakukan oleh Sellars adalah kondisi

anil isothermal . Persamaan ini telah digunakan untuk memprediksi pertumbuhan butir austenit baja pada proses manufaktur, dengan asumsi bahwa selama proses manufaktur temperatur dianggap tetap. Sebenarnya kondisi ini tidak sepenuhnya tepat, karena proses pertumbuhan butir berlangsung dalam kondisi non-isothermal. Pada tabel 5.2 – 5.4 di bawah ini ditampilkan hasil perhitungan besar butir austenit dengan menggunakan persamaan pertumbuhan butir isothermal, dan dibandingkan dengan besar butir austenit hasil eksperimen.

Temperatur yang digunakan dalam perhitungan pada tabel tersebut seperti tampak di bawah ini adalah temperatur efektif seperti dapat dilihat pada persamaan 2.35, yaitu merupakan temperatur yang mempresentasikan temperatur rata-rata pertumbuhan butir[28]. Contoh perhitungan temperatur efektif dan hasil perhitungan besar butir dengan persamaan isothermal untuk baja A,B dan C dapat dilihat pada lampiran J3.a, J 4 a, dan J 5 a.

Tabel 5.2. Perhitungan Besar Butir Austenit dengan Persamaan Pertumbuhan Butir Isothermal, dibandingkan dengan Hasil Eksperimen, Baja A

No Benda Uji	Diameter Austenit Eksperimen (μm)	Diameter Austenit Perhitungan Isothermal(μm)	Temperatur Efektif ($^{\circ}\text{K}$)
1.	99,41	64,39	1338
2.	96,93	60,64	1328
3.	75,86	56,85	1318
4.	70,46	63,45	1336
5.	69,18	43,75	1268
6.	65,29	42,64	1262
7.	58,43	49,11	1292

Tabel 5.3. Perhitungan Besar Butir Austenit dengan Persamaan Pertumbuhan Butir Isotermal, dibandingkan dengan Hasil Eksperimen, Baja B

No Benda Uji	Diameter Austenit Eksperimen (μm)	Diameter Austenit Perhitungan Isotermal(μm)	Temperatur Efektif ($^{\circ}\text{K}$)
1.	85,71	69,97	1353
2.	93,97	52,49	1304
3.	78,78	49,71	1295
4.	65,65	49,30	1293
5.	62,07	36,55	1202
6.	60	50,40	1297
7.	47,80	67,32	1346

Tabel 5.4. Perhitungan Besar Butir Austenit dengan Persamaan Pertumbuhan Butir Isotermal, dibandingkan dengan Hasil Eksperimen, Baja C

No Benda Uji	Diameter Austenit Eksperimen (μm)	Diameter Austenit Perhitungan Isotermal(μm)	Temperatur Efektif ($^{\circ}\text{K}$)
1.	84,10	70,69	1354
2.	53,61	72,01	1357
3.	46,36	37,69	1222
4.	53	59,96	1327
5.	65	79,37	1373
6.	39,38	46,73	1283
7.	42,56	36,60	1203
8	48,50	43,91	1270

Dari tabel 5.2, 5.3 , dan 5.4 , menunjukkan bahwa diameter butir austenit hasil perhitungan dengan persamaan isothermal memiliki nilai cukup

jauh terhadap hasil eksperimen. Hal ini dapat disebabkan karena faktor temperatur yang digunakan adalah temperatur yang dianggap konstan, walaupun dengan mengambil nilai temperatur efektif.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa perhitungan dengan persamaan pertumbuhan butir isothermal seperti pada persamaan 2.33 kurang tepat untuk digunakan dalam perhitungan besar butir austenit, dan diperlukan modifikasi mengingat kondisi pada aplikasi bahwa pertumbuhan butir terjadi pada kondisi non-isothermal.

Namun demikian, persamaan pertumbuhan butir austenit oleh Sellars dapat dijadikan persamaan dasar untuk memprediksi besar butir austenit setelah proses canai panas dan mengalami rekristalisasi statik. Oleh sebab itu konstanta empiris yang telah didapatkan dan dibuktikan oleh Sellars [2] digunakan juga dalam perhitungan besar butir austenit pada penelitian ini. Jarak waktu yang diamati adalah sekitar 30 detik setelah proses canai panas. Kondisi saat eksperimen, baja mengalami penurunan temperatur setelah keluar dari proses canai, dan dinyatakan dalam laju pendinginan (*Cooling Rate*) dalam °C/detik, yang diukur dengan *Temperatur acquisition*. Modifikasi persamaan pertumbuhan butir isothermal dilakukan secara matematis sebagai berikut;

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

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

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

Sehingga didapat ;

$$d^n - d_o^n = [A \exp\left(\frac{-Q_{gg}}{RT}\right)] \cdot \Delta T \cdot \frac{1}{CR} \quad (5.1)$$

Dimana ; d = diameter butir Austenit setelah rekristalisasi (µm)
 d_o = diameter butir Austenit awal pertumbuhan butir (d rek), (µm)
 n, A, Q_{gg} = Konstanta Material [3,4], 4,5, 4.1+23, 435 kJ/mol.

T	=	Temperatur Deformasi (°K)
ΔT	=	Perubahan temperatur selama proses canai (kondisi non-isothermal)
CR	=	Kecepatan Pendinginan(°C/detik)
A	=	Konstanta

Untuk merumuskan model yang dapat mewakili hasil eksperimen, maka model persamaan (5.1) yang telah melibatkan faktor kecepatan pendinginan [*Cooling Rate*, (1/CR)], dilakukan simulasi pendekatan terhadap hasil eksperimen.

5.6 Perbandingan Hasil Eksperimen Dengan Model Non-Isotermal

Untuk melakukan modifikasi terhadap persamaan yang sudah ada, yaitu persamaan 5.1 yang telah mengandung faktor kecepatan pendinginan (*Cooling Rate*), dapat mengacu pada beberapa hasil penelitian terdahulu terhadap hubungan antara besar butir fasa austenit terhadap besar butir ferit pada proses transformasi, atau besar butir ferit terhadap kecepatan pendinginan setelah proses deformasi atau transformasi. Hal ini dilakukan karena belum adanya studi secara langsung, hubungan antara diameter butir austenit terhadap kecepatan pendinginan CR (*Cooling Rate*).

Pada proses transformasi fasa austenit menjadi fasa ferit, didapat bahwa ukuran butir ferit ($d\alpha_o$), pada transformasi dari austenit yang terekristalisasi penuh dinyatakan dengan persamaan yang merupakan pengembangan dari persamaan yang didapatkan oleh Sellars dan Beynon [59, 73], yang dimodifikasi dengan pengaruh Carbon dan Mangan (dinyatakan dalam Carbon equivalen), seperti pada persamaan di bawah ini, seperti dinyatakan pada persamaan (2.36), dapat ditulis kembali,

$$d\alpha_o = (\beta_0 + \beta_1 C_{eq}) + (\beta_2 + \beta_3 C_{eq}) CR^{-0,5} + \beta_4 (1 - \exp(-\beta_5 d\gamma))$$

Sedangkan untuk tahap pertumbuhan butir ferit setelah terjadi transformasi fasa dari austenit ke fasa ferit, dinyatakan dalam persamaan seperti di bawah ini dan telah divalidasi dan memberikan hasil yang amat mendekati antara hasil

perhitungan dengan hasil eksperimen dari P.D.Hodgson dan R.K.Gibbs [59], seperti pada persamaan (2,37) ;

$$d\alpha = d\alpha_{lim} + A(1,6 - \epsilon_r) + B CR^{-0,5}$$

Penelitian yang dilakukan oleh Niltawatch [70] dan Albones[68] terhadap baja C-Mn, memiliki hubungan besar butir austenit awal terhadap besar butir ferit pada transformasi austenit menjadi fasa ferit adalah sebagai berikut, seperti pada persamaan (2.38):

$$d_\alpha = 11,7 + 0,14d_\gamma + 37,7 R^{-1/2}$$

B. Donnay dkk [74] juga mendapatkan hubungan antara besar butir ferit akhir dengan besar butir austenit sebelum transformasi. Rentang ukuran butir austenit pada penelitian B.Donnay dkk adalah antara 20-170 μ m dan kecepatan pendinginan antara 0,01-70 $^{\circ}$ C/detik. Persamaan yang didapat adalah sebagai berikut, seperti dapat dilihat pada persamaan (2.39);

$$d\alpha = (13-0,73 C_{eq}^{0,45}) d\gamma^{0,3} \cdot CR^{-0,15}$$

Dari keempat persamaan di atas, terlihat kecenderungan yang tampak dari hubungan antara besar butir austenit dengan besar butir ferit pada (persamaan (2.35),(2.38), (2.39) atau hubungan pertumbuhan butir ferit setelah transformasi dari austenit pada persamaan (2.37) , terlihat bahwa hubungan besar butir ferit terhadap kecepatan pendinginan berbanding terbalik, ($d\alpha \sim 1/CR^m$), dimana tampak menurut persamaan (2.37), nilai $m \sim -0,5$, sedangkan pada persamaan (2.39) , nilai $m \sim -0,15$.

Dengan demikian ada kemungkinan kinetika pertumbuhan butir austenit setelah deformasi dan rekristalisasi statik memiliki hubungan antara besar butir austenit dengan kecepatan pendinginan dari temperatur deformasi memiliki hubungan yang sama seperti transformasi fasa ferit di atas, atau persamaan 5.1 menjadi bentuk seperti pada persamaan 5.2 di bawah ini;

$$d^n = d_o^n + \left[A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \Delta T \right] 1/CR^m \quad (5.2)$$

Dimana m adalah faktor kecepatan pendinginan (CR^m).

Untuk menyesuaikan ketinggian grafik, kedalam persamaan 5.2 di atas, ditambahkan konstanta B . Jadi dengan demikian, persamaan pertumbuhan butir isothermal 5.1, kemungkinan perlu dimodifikasi kembali menjadi bentuk persamaan 5.3 seperti di bawah ini:

$$d^n - d_o^n = \left[A \exp\left(\frac{-Q_{gg}}{RT}\right) \right] \cdot \left[B \cdot \Delta T \cdot \frac{1}{CR^m} \right] \quad (5.3)$$

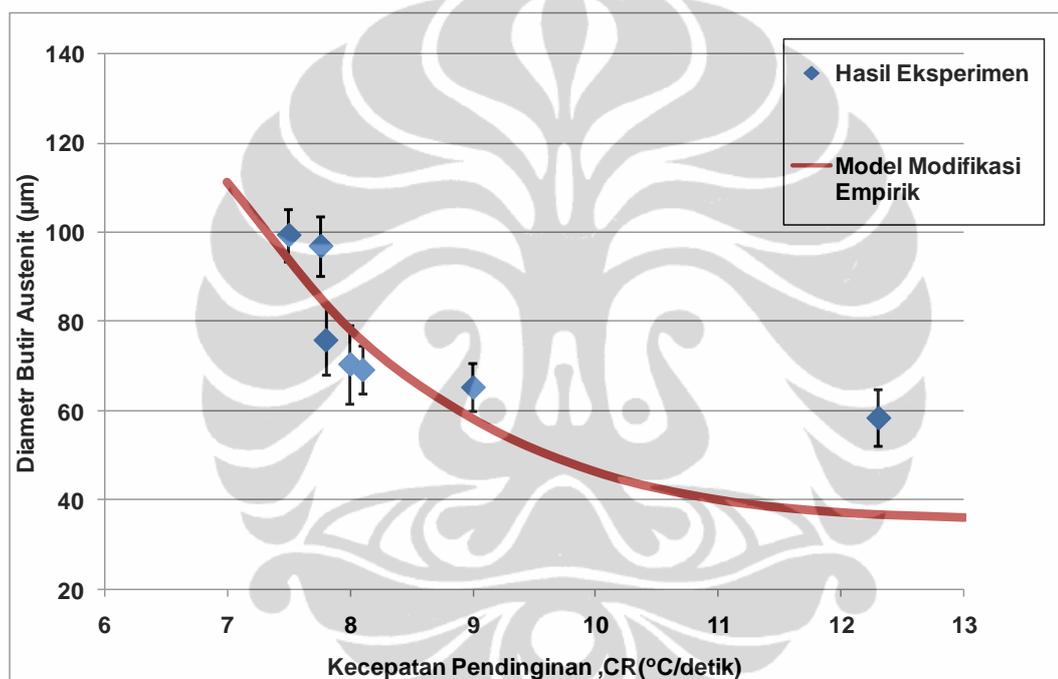
Dimana	d	= Besar butir akhir (μm)
	d_o	= Besar butir awal (μm)
	n, A, Q_{gg}	= Konstanta material ⁽⁴⁾ , 4,5, 4,1+23 dan 435 k
J/mol	T	= Temperatur deformasi ($^{\circ}\text{C}$)
	ΔT	= Perubahan temperatur selama kondisi non-isothermal
	CR	= Kecepatan pendinginan ($^{\circ}\text{C}/\text{detik}$)
	B, m	= Konstanta material dan proses

Dari persamaan di atas tampak bahwa besar butir austenit (d_y) berbanding lurus dengan $1/CR^m$.

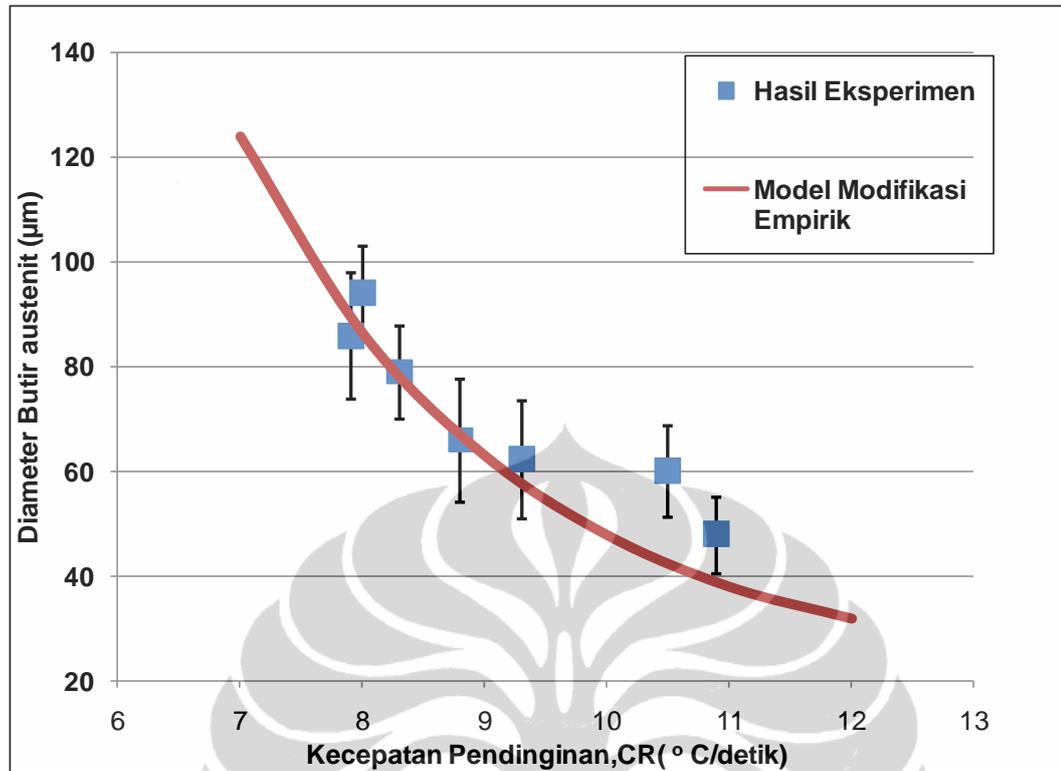
Bentuk persamaan 5.3 di atas kemudian dilakukan evaluasi kembali dengan melakukan pendekatan terhadap hasil eksperimen. Pendekatan dilakukan dengan simulasi (*fitting*) terhadap beberapa pasangan nilai B dan m yang akan dimasukkan dalam persamaan 5.3. tersebut. Metode yang diterapkan adalah melakukan pendekatan, dengan salah satu faktor dibuat tetap. Misal B dibuat tetap, dan m divariasikan dengan nilai mulai dari 1, hingga grafik mendekati grafik hasil eksperimen. Dari beberapa hasil pendekatan, kemudian didapat satu kondisi yang paling tepat atau paling dekat dengan hasil eksperimen, seperti dapat dilihat pada gambar 5.1-5.3 di bawah.

Pendekatan empiris kinetika pertumbuhan butir ketiga jenis baja HSLA-Nb terhadap hasil eksperimen seperti gambar 5.1-5.3, didapat jika nilai m dan

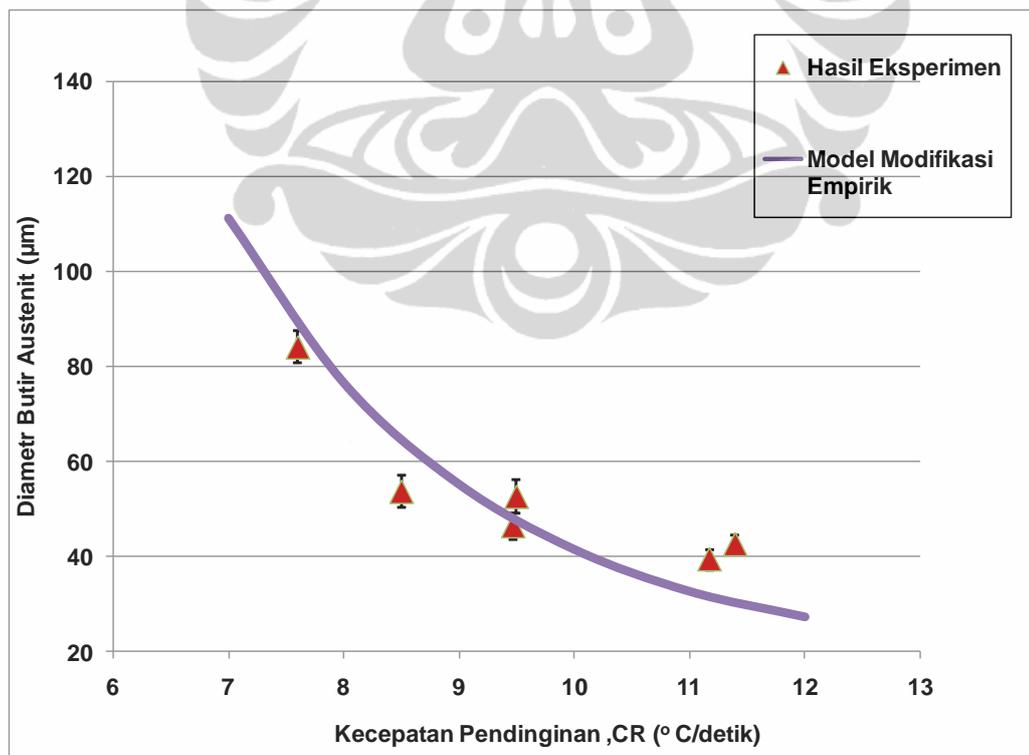
B tertentu, yang menghasilkan grafik yang mendekati hasil eksperimen, dimana konstanta lain seperti Q, R, dan A menggunakan nilai konstanta sesuai yang didapat untuk baja HSLA Nb [59], seperti yang diterapkan dalam eksperimen yang digunakan dalam persamaan Sellars [2]. Hasil perhitungan diameter butir austenit dapat dilihat seperti pada lampiran J.3b, J4b dan J5b, untuk baja A, B dan C dengan nilai B dan m yang memberikan hasil paling mendekati hasil eksperimen. Plot persamaan 5.3 dengan nilai konstanta B dan m dapat digambarkan pada gambar 5.1-5.3 untuk ketiga jenis baja.



Gambar 5.1. Plot Model Modifikasi dengan Eksperimen Baja A, $B=3,0 \times 10^{10}$, $m=12,0$



Gambar 5.2. Plot Model Modifikasi dengan Eksperimen Baja B, $B= 6,0 \times 10^{10}$, $m= 12,2$



Gambar 5.3.. Plot model modifikasi dengan Eksperimen Baja C, $B=8,0 \times 10^{10}$, $m= 12,6$

Gambar 5.1 -5.3 , menunjukkan , bahwa model modifikasi persamaan pertumbuhan butir isothermal, yaitu persamaan (5.1), dimodifikasi kembali menjadi persamaan non-isothermal untuk baja komposisi A, B dan C, dinyatakan pada persamaan (5.3) , memiliki hasil perhitungan yang mendekati kecenderungan hasil eksperimen, dengan konstanta B dan m, apabila nilai konstanta B dan m sesuai dengan nilai yang tercantum pada tabel 5.2.

Nilai B dan m menggambarkan perbedaan kondisi proses antara pertumbuhan butir secara isothermal dan pertumbuhan butir secara non-isothermal.

Tabel 5.5. Nilai B dan m Model Pertumbuhan Butir Austenit non-Isothermal

Jenis Baja	Nilai B ($\times 10^{10}$)	Nilai m
A	3,0	12
B	6,0	12,2
C	8,0	12,6

Antara ketiga komposisi Nb dan C dalam baja A, B dan C, terdapat perbedaan nilai konstanta B, , sedangkan nilai m terdapat perbedaan, namun kecil. Nilai m sebagai konstanta kecepatan pendinginan yang mendekati sama untuk ketiga jenis baja ini dapat diartikan bahwa perbedaan kecepatan pendinginan mempunyai pengaruh yang mendekati sama terhadap pertumbuhan butir austenit untuk ketiga jenis baja dengan komposisi yang berbeda.

Sedangkan konstanta B yang berbeda menunjukkan bahwa kinetika pertumbuhan butir austenit dipengaruhi oleh unsur paduan. Unsur paduan yang paling besar pengaruhnya terhadap pertumbuhan butir baja HSLA-Nb adalah unsur Nb, C dan N , seperti dinyatakan oleh S.C. Hong dkk [79] dan L.J.Cuddy dkk [67], bahwa partikel senyawa NbCN, NbC , atau NbN pada ukuran tertentu akan efektif menghalangi pergerakan batas butir fasa Austenit pada baja.

5.7. Perbandingan Hasil Eksperimen Dengan Model Non- Isotermal Dan Model Perhitungan Matematis.

Persamaan (5.3) adalah persamaan kinetika pertumbuhan butir austenit pada temperatur canai sekitar 1100°C dengan variabel kecepatan pendinginan (*Cooling rate, Cr*) untuk kondisi non-isotermal / pendinginan kontinu pada baja HSLA-Nb dengan ketiga komposisi Niobium di atas.

Untuk mengevaluasi model persamaan 5.3 tersebut, maka dilakukan perbandingan dengan modifikasi model pertumbuhan butir Sellars yang didapat dengan pendekatan perhitungan matematis yang menggambarkan kondisi amat mendekati kondisi eksperimen dan aplikasi di industri yang mengalami penurunan temperatur kontinu, dengan metode *additivity*. Perhitungan melibatkan penyelesaian persamaan integral dengan dengan menggantikan perubahan temperatur persatuan waktu (*Cooling Rate, CR*) sebagai penjumlahan segmen-segmen kecil pertumbuhan butir isothermal dari waktu 0 hingga t detik yang diamati, yang dapat diselesaikan sebagai di bawah ini;

Sellars [2] pada persamaan (2.18) :

$$d^n - d_0^n = [A \exp (-Q/RT)] t$$

Dari [36] dinyatakan ;

$$d^n = d_{RX}^n + A \sum \partial t_i \exp (-Q/RT_i), \text{ dimana } d_{RX} = d_0$$

$$\rightarrow d^n = d_{RX}^n + A \int_{t_1}^{t_2} \ell^{-Q/RT} dt, \text{ dimana } CR = dT/dt, \rightarrow$$

$$dt = dT/CR$$

$$d^n = d_{RX}^n + A \int_{T_1}^{T_2} \ell^{-Q/RT} \frac{dT}{CR}$$

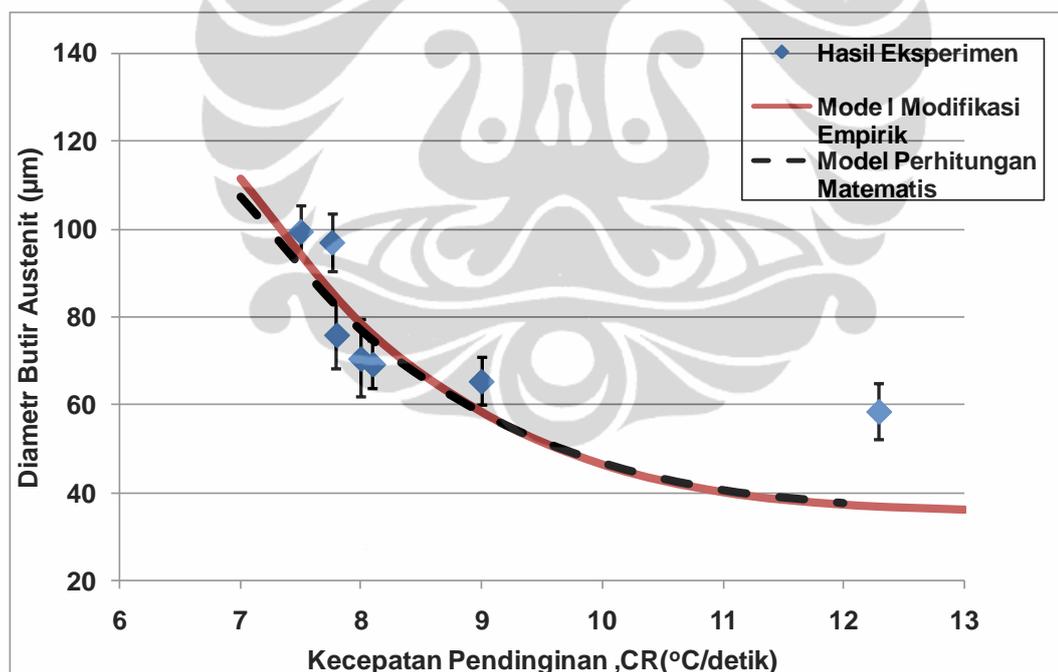
$$d^n = d_0^n + \frac{A}{CR} \int_{T_1}^{T_2} \ell^{-Q/RT} dT$$

Didapat bentuk akhir persamaan 5.3 dengan melibatkan faktor laju pendinginan;

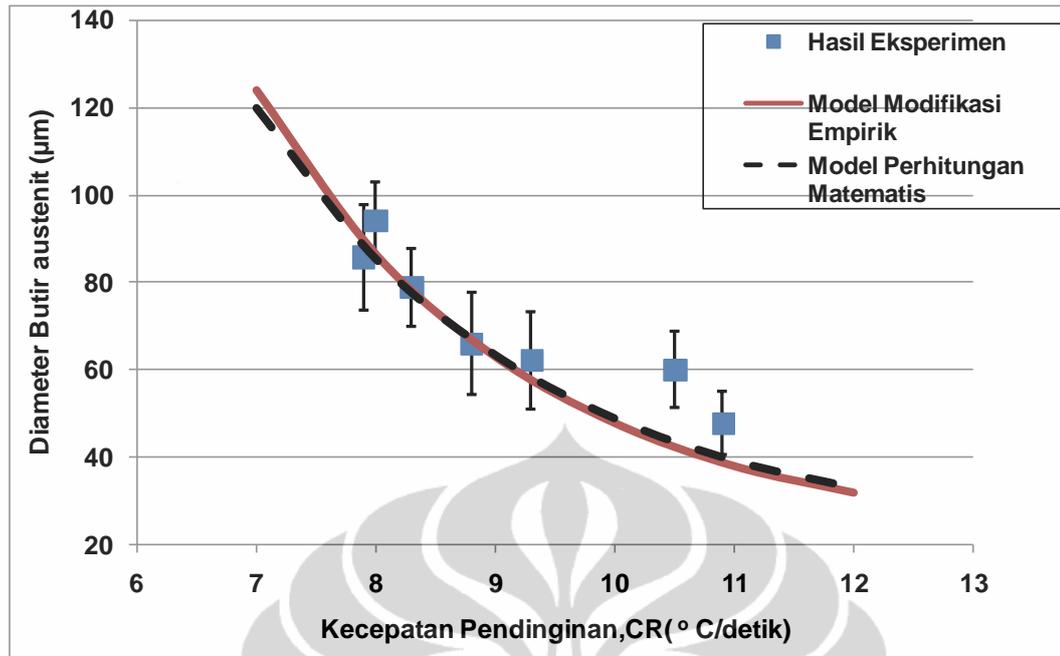
$$d^n = d_0^n + \frac{A}{CR} \int_{T_1}^{T_2} e^{-Q/RT} dT \quad (5.4)$$

Penyelesaian integral persamaan 5.4 di atas dapat menggunakan penyelesaian analisa kinetika proses non-isothermal T. Wanjun dkk[89] , dalam rentang temperatur sesuai eksperimen yang dilakukan ini, yaitu rentang temperatur pengamatan $1149^\circ\text{K} < T < 1363^\circ\text{K}$, didapat persamaan pertumbuhan butir dengan penyelesaian matematik sebagai berikut, seperti dapat dilihat pada lampiran L ;

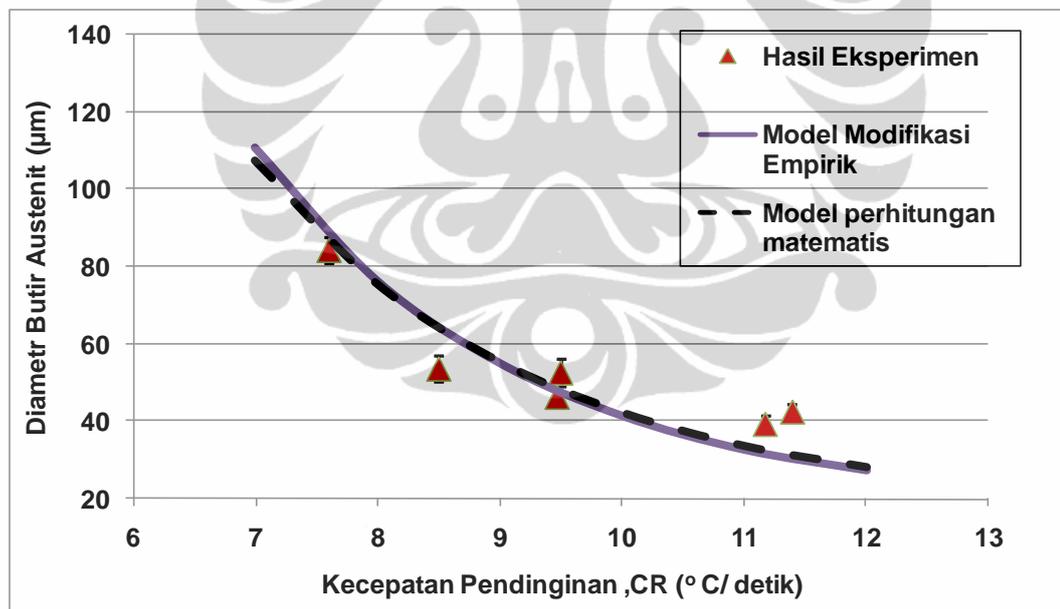
$$d^n - d_0^n = A/CR (RT^2 \cdot e^{-Q/RT} / (1,00198882 Q + 1,87391198RT)) \quad (5.5)$$



Gambar 5.4 Hubungan besar butir austenit terhadap kecepatan pendinginan baja A hasil eksperimen, model empiris dan model matematis



Gambar 5.5 Hubungan besar butir austenit terhadap kecepatan pendinginan baja B hasil eksperimen, model empiris dan model matematis



Gambar 5.6 Hubungan besar butir austenit terhadap kecepatan pendinginan baja C hasil eksperimen, model empiris dan model matematis.

Hasil Perhitungan nilai besar butir austenit berdasarkan persamaan 5.5 dapat dilihat pada lampiran J6, J7 dan J8. Nilai ini dibandingkan dengan nilai besar butir hasil eksperimen baik untuk baja A,B atau C. Gambar 5.4- 5.6

menunjukkan bahwa plot persamaan 5.5 di atas relatif mendekati nilai eksperimen, ketiganya memiliki kecenderungan yang mirip dan dinyatakan dengan dalam garis putus-putus.

Gambar 5.4- 5.6. juga menunjukkan bahwa besar butir Austenit memiliki korelasi proporsional dengan *inverse* laju pendinginan/*Cooling Rate* (CR) berpangkat m .

Tabel 5.6 menampilkan perbandingan nilai konstanta B dan m yang didapat pada persamaan empiris dan nilai konstanta hasil perhitungan model matematis, pada persamaan 5.5.

Tabel 5.6. Nilai B dan m Model Pertumbuhan Butir Austenit non-Isothermal secara Empiris dan Perhitungan Matematis

Benda uji	Nilai B Empiris ($\times 10^{10}$)	Nilai B Matematis ($\times 10^{10}$)	Nilai m Empiris	Nilai m Matematis
A	3,0	3,0	12,0	11,4
B	6,0	6,0	12,2	11,5
C	8,0	8,0	12,6	11,9

Hasil pada tabel 5.6 memperlihatkan bahwa nilai B dan m yang diturunkan dari persamaan matematis (5.5) memiliki nilai yang mendekati sama dengan nilai konstanta B dan m model empiris. Hal ini berarti model pendekatan empiris dan model matematis memiliki posisi yang sama terhadap persamaan pertumbuhan butir isothermal. Namun, hasil pada tabel 5.6 juga memperlihatkan sedikit perbedaan terutama pada nilai m (antara 0,5-1,0). Adanya sedikit perbedaan antara model empiris dan matematis menandakan adanya variabel atau faktor pada hasil eksperimen yang belum dapat terhitung pada perhitungan matematis. Perhitungan perbandingan nilai besar butir austenit antara persamaan isothermal dan non-isothermal yang didapat dalam penelitian ini

(lampiran M) menunjukkan bahwa model non-isotermal hasil modifikasi model isotermal ini memberikan nilai besar butir austenit rata-rata 30-40% lebih dekat dengan nilai eksperimen.

Dari perbandingan yang dilakukan ini dapat disimpulkan bahwa persamaan (5.3) lebih akurat menggambarkan kinetika pertumbuhan butir Austenit non-isotermal setelah proses canai panas.

5.8. Pengaruh Komposisi Nb , C dan N Terhadap Besar Butir Austenit non-isotermal

Jika dilihat nilai konstanta hasil modifikasi model seperti terlihat pada tabel 5.5, terdapat adanya nilai B dan m yang berbeda untuk baja A,B dan C. Hal tersebut kemungkinan disebabkan faktor komposisi, terutama perbedaan komposisi Nb , C dan N. Untuk menjelaskan hubungan pengaruh komposisi kimia, dibawah ini dibahas pengaruh perbedaan komposisi unsur paduan dalam baja terhadap perubahan besar butir austenit akhir. Untuk pengaruh Nb ,diamati hasil eksperimen baja A dan C, untuk pengaruh Nb,C dan N akan diamati baja B dan C, juga amati perbandingan baja A dan B.

5.8.1 Pengaruh Komposisi Nb Terhadap Besar Butir Austenit.

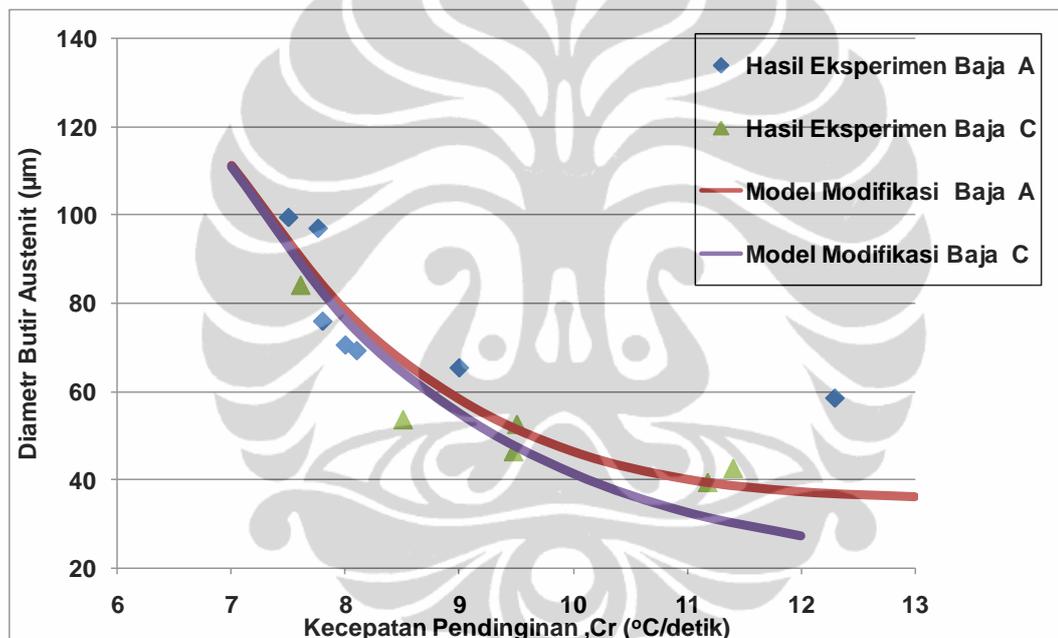
Pengaruh komposisi kimia baja terhadap pertumbuhan butir austenit pada baja A dan C, dapat dilihat pada tabel 5.7 dimana baja A dengan komposisi 0,019%Nb dan 0,165% C, 0,033% N dan baja C dengan 0,056%Nb dan 0,172% C, 0,031 % N. Nilai konstanta B jauh lebih besar pada baja C dibandingkan baja A, dan nilai m juga sedikit lebih besar pada baja C dibandingkan baja A. Prosentase Nitrogen dan Karbon pada baja A mendekatikhb sama dengan prosentase Nitrogen pada baja C, sehingga perbedaan besar butir Austenit baja A dan C lebih disebabkan oleh perbedaan prosentase Niobium.

Perbandingan kecenderungan pertumbuhan butir Austenit terhadap kecepatan pendinginan setelah canai, dan dapat dilihat pada gambar 5.7 ,dimana Kedua baja memiliki prosentase karbon yang relatif sama, yaitu masing-masing 0,165% dan 0,172% dan Nitrogen ya ng relatif sama, 033% dan 0,031%.

Perbedaan keduanya adalah pada fraksi Nb yang lebih tinggi pada baja C (0,056%).

Tabel 5.7. Perbandingan Komposisi Baja A dan C (% berat) terhadap nilai konstanta B dan m

Jenis Baja	C(%)	Nb(%)	N (%)	B ($\times 10^{10}$)	m
A	0,165	0,019	0,033	3,0	12,0
C	0,172	0,056	0,031	8,0	12,6



Gambar 5.7. Hubungan besar butir austenit terhadap kecepatan pendinginan baja baja A dan C hasil eksperimen dan model modifikasi.

Dari hasil pada gambar 5.7, ternyata baja A pada berbagai laju pendinginan memiliki diameter butir Austenit yang lebih besar. Dengan perkataan lain pertumbuhan ukuran butir Austenit pada baja A lebih cepat dibandingkan baja C. Pada kecepatan pendinginan konstan misal pada 11°C/s , didapat;

$$d_{\gamma C} = 32 \mu\text{m}$$

$$d_{\gamma A} = 40 \mu\text{m}$$

Perbedaan ukuran butir austenit tersebut terkait dengan perbedaan prosentase Nb pada kedua jenis baja. Nb memiliki pengaruh terhadap pertumbuhan butir austenit. Perbedaan ini memiliki kecenderungan yang sama untuk setiap kecepatan pendinginan., walaupun dengan perbedaan laju pertumbuhan butir austenit yang berbeda. Perbedaan besar butir austenit lebih besar pada kecepatan pendinginan yang lebih tinggi. Hal ini dapat disebabkan pada pendinginan cepat, baja dengan d_{rek} lebih besar yaitu baja A (35,36 μm) dan d_{rek} yang lebih kecil yaitu baja C (25,43 μm) tak sempat bertumbuh.

Kecenderungan ini sejalan dengan hasil penelitian S.C. Hong, dkk [79] dimana pertumbuhan butir antara baja C-Mn dibandingkan dengan baja yang mengandung unsur Nb. Pada penelitian ini didapat pada pemanasan isothermal, baja dengan prosentase Nb 0,052 memiliki ukuran butir ferit yang jauh lebih halus daripada baja C-Mn. Pada penelitian ini didapat bahwa pada temperatur pemanasan yang sama baja HSLA Nb tumbuh dari 1,5 μm menjadi 2,2 μm dalam waktu tahan 30 menit, sedangkan baja C-Mn pertumbuhan terjadi lebih cepat, yaitu dari 2,0 μm menjadi 4,8 μm dalam waktu tahan 30 menit.

Pertumbuhan yang lebih lambat pada baja dengan Nb kemungkinan disebabkan oleh penghalangan pergerakan batas butir austenit oleh endapan NbCN. Selain itu endapan NbCN ini juga menjadi tempat pengintian tambahan bagi terbentuknya ferit sehingga ferit yang terbentuk juga menjadi lebih halus dibandingkan baja tanpa unsur paduan Nb[79].

Hubungan antara besar butir austenit dengan besar butir akhir fasa ferit memperlihatkan untuk berbagai kecepatan pendinginan dan prosentase deformasi, jika besar butir austenit meningkat, maka besar butir ferit akhir juga akan meningkat. Dengan demikian, ukuran besar butir ferit akhir dapat menjadi gambaran kecenderungan perilaku pertumbuhan butir austenit sesaat sebelum bertransformasi menjadi ferit [2, 76, 77]. Pada penelitiannya terhadap baja C-Mn dan baja HSLA paduan mikro, E.Anelli dkk [77] mendapatkan grafik hubungan antara besar butir austenit sesaat sebelum bertransformasi terhadap besar butir fasa ferit (lihat gambar 2.18.)

Hubungan antara besar butir Ferit yang berbanding lurus dengan diameter austenit dalam baja juga dinyatakan dalam persamaan (2.37) oleh Sellars dan Beynon [59, 73], dalam persamaan (2.38), oleh Niltawatch[70], Albones [68], juga pada persamaan 2.39 oleh B.Donnay, dkk [74]. Jika besar butir austenit sebelum bertransformasi meningkat, maka ukuran butir ferit yang dihasilkan juga ikut meningkat. Dengan demikian, penting untuk mendapatkan besar butir austenit yang halus pada proses canai, karena dengan mendapatkan besar butir austenit yang lebih halus sebelum bertransformasi menjadi ferit, maka besar butir ferit akhir yang didapat akan lebih halus. Hasil pada gambar 5.10 menunjukkan bahwa baja C dengan prosentase Nb yang lebih tinggi memiliki butir austenit yang lebih halus.

Menurut L.J.Cuddy dkk[67], variasi perilaku pertumbuhan butir pada setiap kelompok baja HSLA paduan mikro lebih disebabkan oleh perbedaan rentang konsentrasi paduan mikro. Sesuai dengan hasil pada gambar 2.15, meningkatnya prosentase Nb pada baja HSLA dari 0,01 hingga 0,11% berat, temperatur pengkasaran butir baja juga meningkat sebesar 200°C. Artinya dengan naiknya prosentase Nb dalam baja, kestabilan partikel endapan NbC semakin tinggi, dan semakin efektif menghalangi pergerakan batas butir baja dan diperlukan temperatur lebih tinggi untuk melarutkan endapan agar dapat terjadinya pertumbuhan butir baja.

Untuk menjelaskan kecenderungan tersebut di atas, persamaan Zener [52] dapat dipergunakan. Persamaan Zener memperlihatkan hubungan antara ukuran partikel dengan ukuran butir austenit kritis (R_{kr}), seperti pada persamaan 2.13,

$$R_{kr}=4r/3f$$

Atau secara umum dinyatakan dalam persamaan seperti di bawah ini seperti diuraikan pada persamaan 2.14,

$$R_{kr} = A \cdot r / f$$

Dimana R_{kr} adalah radius kritis butir austenit, A adalah konstanta, r adalah radius partikel rata-rata, dan f adalah fraksi volume dari partikel. Radius kritis partikel adalah ukuran butir yang secara termodinamik stabil, karena gaya pertumbuhan butir tepat sama dengan dengan gaya hambatan yang ditimbulkan oleh partikel terhadap pergerakan batas butir. Pada kondisi $R = R_{kr}$, maka terjadi pertumbuhan butir normal, jika salah satu butir saja memiliki nilai $R > R_{kr}$, maka menandakan pertumbuhan butir abnormal telah terjadi. Dari persamaan di atas, semakin tinggi prosentase paduan mikro, fraksi volume partikel semakin besar dan diameter partikel semakin halus dan diameter butir kritis akan semakin kecil atau halus.

Pengaruh unsur paduan Nb pada baja HSLA akan mempengaruhi fraksi volume endapan NbC dalam larutan padat. Semakin tinggi prosentase Nb, fraksi volume NbC akan semakin besar prosentasenya, sehingga efek *pinning* atau penghalangan pergerakan batas butir akan semakin besar sehingga untuk kecepatan pendinginan yang sama, diameter butir austenit dengan prosentase Nb lebih tinggi akan terhalang untuk tumbuh, sehingga akan memiliki butir yang lebih halus[3]. Hal ini juga ditunjukkan pada penelitian Matthias Militzer[65] yang dilakukan terhadap beberapa komposisi HSLA-Nb, seperti pada gambar 2.20, dimana untuk berbagai kecepatan pendinginan, baja dengan komposisi Nb dan Ti yang lebih tinggi memiliki ukuran butir yang lebih halus.

Pengaruh konsentrasi paduan mikro terhadap besar butir austenit atau ferit dalam baja juga diterangkan oleh L.J. Cuddy dkk [67] seperti tampak pada gambar 2.16 pada bab II, yaitu hubungan antara prosentase paduan mikro dengan temperatur pengkasaran butir baja.

Gambar 2.16 menunjukkan bahwa peningkatan prosentase paduan mikro akan meningkatkan temperatur pengkasaran butir baja. Hal ini berarti dengan meningkatnya prosentase paduan mikro seperti Nb, maka fraksi endapan partikel akan semakin besar, namun dengan radius yang lebih kecil, sehingga efek penghalangan pergerakan batas butir menjadi semakin besar, akibatnya radius kritis butir baja menjadi lebih halus. Sehingga dengan demikian, semakin tinggi prosentase Nb dalam baja, energi yang dibutuhkan untuk terjadinya pengkasaran

butir menjadi semakin besar. Gambar 2.16. memperlihatkan bahwa temperatur yang dibutuhkan untuk terjadinya pengkasaran butir akan semakin tinggi dengan meningkatnya fraksi Nb. Peningkatan prosentase Nitrogen dalam baja juga akan berpengaruh, yaitu mempercepat terbentuknya NbCN, seperti dinyatakan oleh Watanabe [78], terutama pada temperatur di atas 925°C. Menurut Watanabe, hal ini dapat disebabkan peningkatan jumlah senyawa Niobium Carbonitride yang stabil yang disebabkan peningkatan prosentase Nitrogen. Peningkatan Nitrogen juga membuat kelarutan partikel menjadi lebih rendah, atau peningkatan Nitrogen dalam baja akan lebih cepat dan mudah membentuk partikel senyawa endapan.

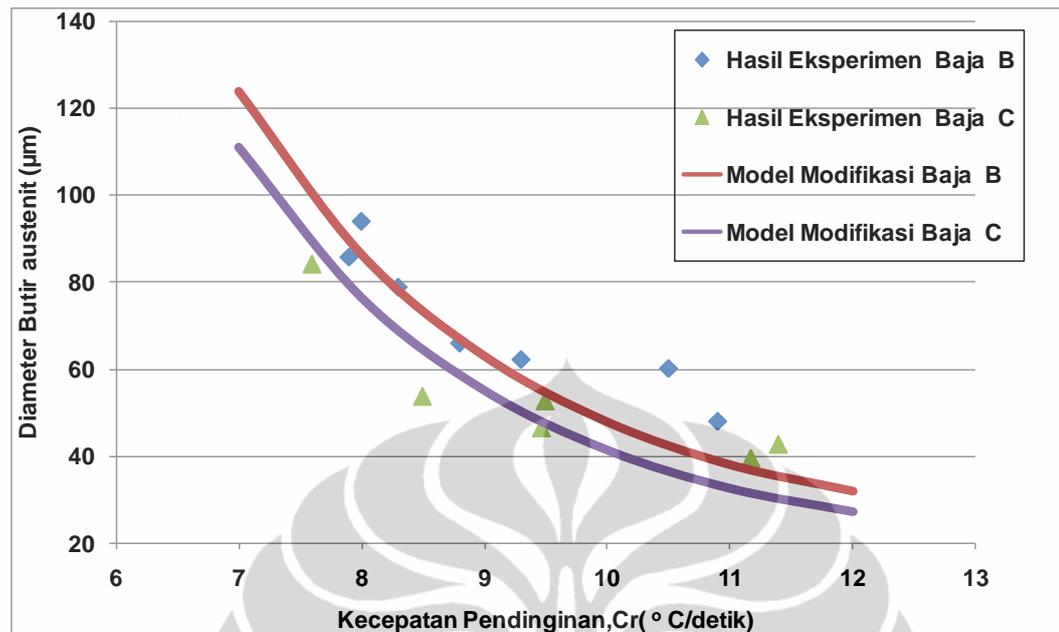
5.8.2 Pengaruh Perbandingan Komposisi Nb, C dan N Terhadap Besar Butir Austenit.

Unsur paduan Niobium, Karbon dan Nitrogen dapat mempercepat terbentuknya partikel senyawa Karbida dan Karbonitrida yang secara umum menghalangi pertumbuhan butir Austenit[67], sehingga baja dengan prosentase ketiga paduan mikro di atas, secara teori metalurgi fisik akan memiliki butir yang lebih halus. Untuk menjelaskan pengaruh unsur Nb, C dan N, maka penjelasan bisa didapat dengan mengamati dan membandingkan pertumbuhan butir austenit dari baja paduan B dan C.

Grafik baja B dan C, antara besar butir austenit terhadap kecepatan pendinginan dapat dilihat pada tabel 5.8 dan gambar 5.8. Tabel 5.8 menunjukkan bahwa baja B memiliki prosentase Nb, dan C yang lebih rendah dan juga tampak bahwa nilai konstanta B dan C lebih besar pada baja C. Demikian juga prosentase Nitrogen baja B adalah 0,0040%, jauh lebih rendah dari baja C dengan N 0,031%.

Tabel 5.8. Perbandingan Komposisi Baja B dan C (% berat) terhadap nilai konstanta B dan m

Jenis Baja	Nb (%)	C (%)	N(%)	B ($\times 10^{10}$)	m
B	0,037	0,048	0,0040	6,0	12,2
C	0,056	0,172	0,031	8,0	12,6



Gambar 5.8. Hubungan besar butir austenit terhadap kecepatan pendinginan baja B dan C hasil eksperimen dan model modifikasi.

Dari hasil pada gambar 5.8 didapat pada berbagai laju pendinginan, besar butir austenit pada baja B lebih tinggi daripada baja C, dan pada kecepatan pendinginan yang semakin tinggi, perbedaan besar butir austenit cenderung mengecil. Sebagai gambaran, dapat diamati;

Pada kecepatan pendinginan 8°C/detik, didapat;

$$d\gamma_B = 90 \mu\text{m}$$

$$d\gamma_C = 75 \mu\text{m}$$

Sedangkan pada kecepatan pendinginan 11°C/s, didapat ;

$$d\gamma_B = 38 \mu\text{m}$$

$$d\gamma_C = 32 \mu\text{m}$$

Kedua jenis baja memiliki perbedaan komposisi dan nilai konstanta B dan m seperti tampak pada tabel 5.8.

Menurut S,C Hong[79] , pertumbuhan butir pada baja dengan prosentase Nb lebih tinggi lebih lambat dibandingkan baja dengan prosentase Nb lebih

rendah, karena terhalang oleh partikel NbC. Demikian juga tampak pada gambar 5.8 di atas, peningkatan prosentase Niobium menjadikan butir baja menjadi lebih halus pada baja C. Hal ini karena terbentuk endapan NbCN yang lebih stabil, sehingga penghalangan pergerakan batas butir baja menjadi lebih efektif.

Baja B mengandung niobium, karbon dan nitrogen yang jauh lebih rendah dibandingkan baja C, sehingga kecenderungan pembentukan partikel endapan NbCN jauh lebih rendah, sehingga efek penghalangan pergerakan batas butir (*pinning effect*) jauh lebih rendah, akibatnya pertumbuhan butir lebih cepat pada baja B, dan besar butir austenit pada baja B setelah canai panas sebelum transformasi jauh lebih besar dibandingkan baja C [79]. Pada kecepatan pendinginan yang semakin tinggi, perbedaan besar butir Austenit semakin kecil, menunjukkan bahwa perbedaan prosentase niobium, karbon, dan nitrogen menjadi tidak terlalu besar pengaruhnya karena waktu pembentukan senyawa partikel menjadi semakin singkat, sehingga jumlah senyawa partikel yang dapat terbentuk juga terbatas walaupun memiliki prosentase Nb yang tinggi. Baja B memiliki D_{rek} (25,43 μm) yang sedikit lebih besar dari D_{rek} baja C (21,94 μm), sehingga besar butir baja B lebih besar dari baja C.

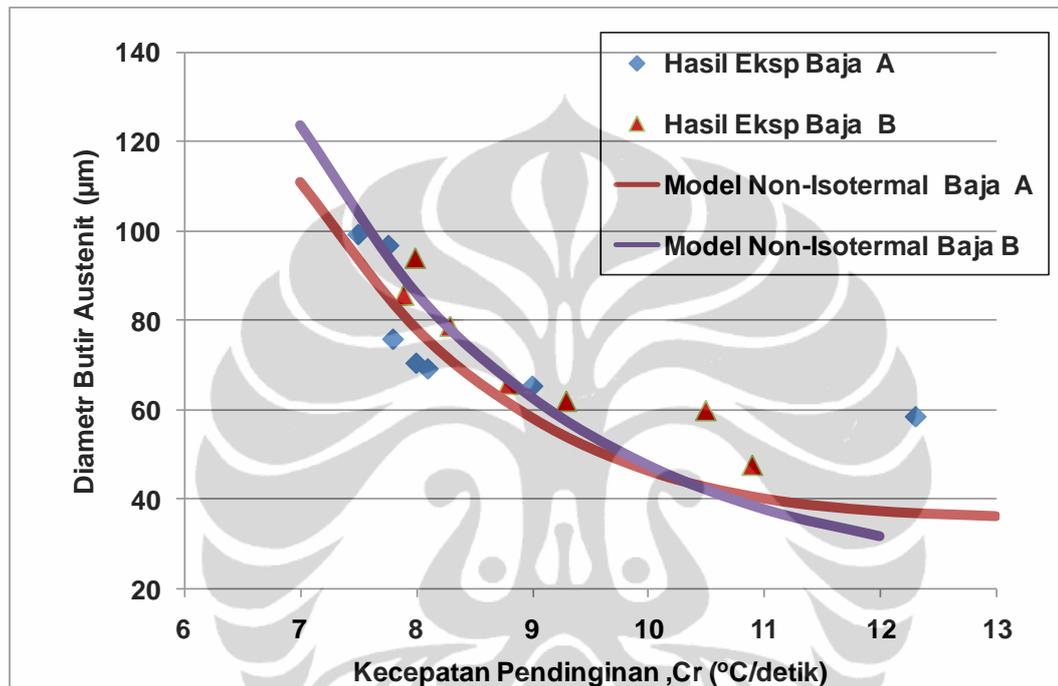
Perbandingan antara baja komposisi A dan B dapat dilihat pada tabel 5.9 dan gambar 5.9. Kedua jenis baja memiliki perbedaan komposisi seperti berikut;

Tabel 5.9. Perbandingan Komposisi Baja A dan B (% berat) terhadap nilai konstanta B dan m

Jenis Baja	Nb (%)	C (%)	N(%)	B ($\times 10^{10}$)	m
A	0,019	0,165	0,033	3,0	12,0
B	0,037	0,048	0,0040	6,0	12,2

Dari tabel 5.9. di atas terlihat bahwa baja A memiliki prosentase Nb jauh lebih rendah daripada baja B. Namun kandungan karbon dan nitrogen pada baja A jauh lebih tinggi daripada baja B. Menurut Watanabe [78], nitrogen dan karbon dalam baja berpengaruh akan mempercepat terbentuknya partikel

endapan pada temperatur sekitar 925°C sehingga akan menambah efektifitas pembentukan butir Austenit yang lebih halus .Efek pembentukan endapan yang kuat dengan tingginya prosentase Nb pada baja B menjadi terhambat karena prosentase karbon dan nitrogen yang amat rendah . Sehingga secara keseluruhan kemungkinan pengaruh unsur niobium , karbon dan nitrogen terhadap pertumbuhan butir baja komposisi A dan B menjadi berimbang.



Gambar 5.9. Hubungan besar butir austenit terhadap kecepatan pendinginan baja A dan B hasil eksperimen dan, model modifikasi..

Dari gambar 5.9 di atas tampak, pada perbandingan grafik baja A dan B terjadi perubahan perbandingan besar butir austenit. Pada kecepatan pendinginan kurang dari $10,5^{\circ}\text{C/dtk}$, baja komposisi B memiliki besar butir austenit yang lebih besar daripada baja A, dan pada kecepatan pendinginan lebih tinggi dari $10,5^{\circ}\text{C/dtk}$, besar butir austenit baja A lebih besar dari besar butir baja B. Sebagai contoh, pada kecepatan pendinginan 9°C/dtk , didapat ;

$$d\gamma_A = 59 \mu\text{m}$$

$$d\gamma_B = 65 \mu\text{m},$$

sedangkan pada kecepatan pendinginan 12°C/dtk , didapat ;

$$d\gamma_A = 39 \mu\text{m}$$

$$d\gamma_B = 31 \mu\text{m}.$$

Pada kecepatan pendinginan $9^\circ\text{C}/\text{dtk}$ butir austenit baja B terlihat tumbuh lebih cepat daripada Baja A, dan pada kecepatan pendinginan $12^\circ\text{C}/\text{dtk}$ butir austenit baja A tumbuh lebih cepat daripada baja B.

Baja A memiliki prosentase Nb lebih rendah daripada baja B, dan prosentase karbon jauh lebih tinggi dari baja B. Dari hasil penelitian di atas didapat pada kecepatan pendinginan yang relatif lambat, pertumbuhan butir austenit baja A menjadi lebih lambat dibandingkan baja B, karena kemungkinan besarnya prosentase karbon dan nitrogen pada baja A, yang memicu terbentuk inti presipitat lebih cepat, yang akan menghalangi pertumbuhan butir baja A. Disamping itu, D_{rek} baja A ($35,36 \mu\text{m}$) yang lebih besar dari D_{rek} baja B ($25,43 \mu\text{m}$) ikut memperlambat pertumbuhan butir austenit baja A. Pengintian presipitat pada baja B dapat menjadi lebih lambat disebabkan rendahnya prosentase karbon dan nitrogen, sehingga jumlah endapan yang lebih sedikit memungkinkan butir austenit untuk tumbuh menjadi lebih besar. Disamping itu baja B dengan D_{rek} lebih halus cenderung tumbuh lebih cepat.

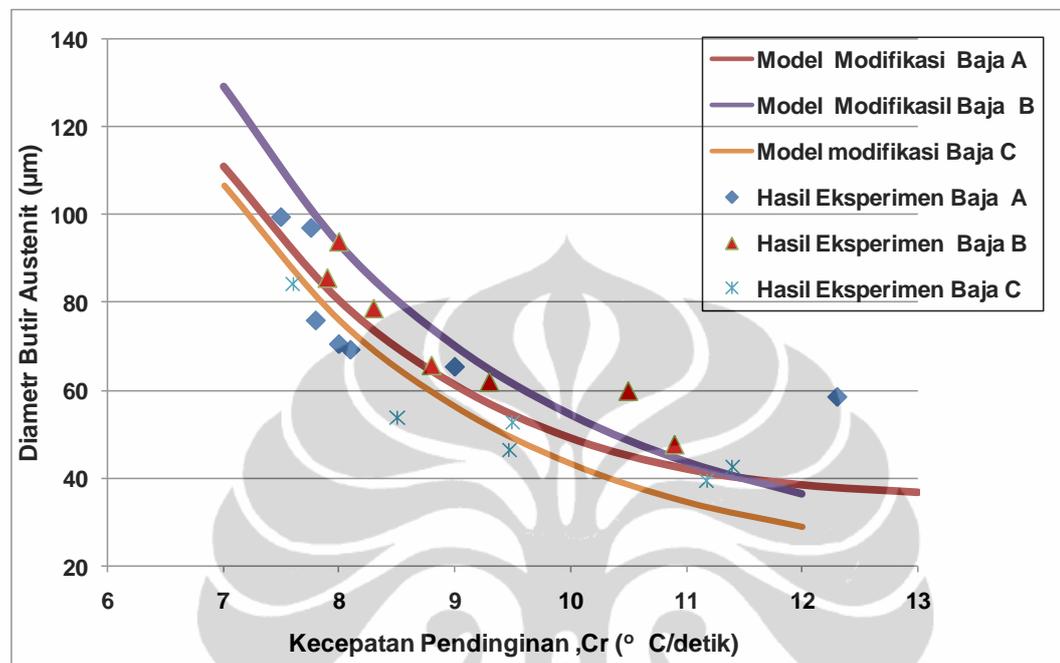
Pada kecepatan pendinginan lebih besar dari $10,5^\circ\text{C}/\text{dtk}$, prosentase Nb yang lebih tinggi pada baja B memiliki energi (*driving force*) yang cukup untuk bereaksi dengan sisa karbon dalam baja, membentuk endapan NbCN, sehingga pertumbuhan butir Austenit menjadi lebih lambat, ukuran butir akhir austenit menjadi lebih halus. Sebaliknya, untuk baja A, pada kecepatan pendinginan lebih tinggi dari $10,5^\circ\text{C}/\text{dtk}$, kandungan Nb yang rendah telah hampir seluruhnya bereaksi membentuk presipitat NbCN, sehingga kecepatan pendinginan yang tinggi tidak banyak mempengaruhi pembentukan presipitat baru, sehingga laju pembentukan presipitat rendah, pertumbuhan butir austenit baja A menjadi lebih dapat tumbuh. Disamping itu secara umum kedua baja pada kecepatan pendinginan yang lebih tinggi, tidak memiliki waktu untuk tumbuh, sehingga besar d_{rek} baja A ($35,36 \mu\text{m}$) yang lebih besar dari d_{rek} baja B ($25,43 \mu\text{m}$) tetap memiliki besar butir austenit yang lebih besar.

Perbedaan besar butir austenit kedua jenis baja komposisi A dan B ini tidak terlalu besar, karena perbandingan prosentase Nb , C dan N yang saling mempengaruhi pertumbuhan butir Austenit. Baja B memiliki prosentase Nb yang dua kali lebih besar daripada prosentase Nb pada baja A, tapi memiliki prosentase karbon dan Nitrogen yang jauh lebih rendah daripada baja A. Akibatnya, walaupun memiliki kandungan Niobium yang lebih tinggi, baja B tidak cepat membentuk endapan karena prosentase Karbon dan Nitrogen yang amat rendah, sehingga laju pembentukan presipitat rendah, mengakibatkan efek penghalangan pergerakan batas butir rendah, sehingga pertumbuhan butir Austenit antara baja komposisi A dan B tidak jauh berbeda . Bahkan pada kecepatan pendinginan sekitar $10,5^{\circ}\text{C}/\text{detik}$, baja komposisi A dan B ini memiliki besar butir Austenit yang sama, yaitu $45\mu\text{m}$.

Berdasarkan gambar 2.16, peningkatan prosentase Nb dalam baja dapat mempertinggi temperatur pengkasaran butir atau cenderung meningkatkan kestabilan senyawa partikel ,sehingga mempertinggi efektifitas penghalangan pergerakan batas butir baja. Namun jika kecenderungan itu dibarengi dengan prosentase C yang kecenderungan konsentrasinya berkebalikan dengan Niobium, maka akan menghasilkan kestabilan endapan yang relatif sama, antara baja A dan B. Sehingga baja A dan B memiliki besar butir austenit yang cukup kecil perbedaannya. Secara umum, untuk ketiga komposisi baja A, B dan C di atas, hubungan besar butir austenit terhadap kecepatan pendinginan dapat dilihat pada gambar 5.10 di bawah ini.

Untuk ketiga komposisi baja didapat, dengan meningkatnya kecepatan pendinginan, maka besar butir austenit semakin halus. Hal ini juga ditunjukkan pada penelitian D Q Bai dkk[80] , bahwa pengaruh kecepatan pendinginan terhadap butir akhir Ferit, dimana semakin tinggi kecepatan pendinginan pada baja HSLA Nb , butir Ferit semakin halus [4,9,65,88]. Hal ini secara analogi dan sejalan dengan peneliti terdahulu, didapat bahwa semakin halus besar butir ferit akhir maka besar butir Austenit sebelum transformasi juga semakin halus[2,75, 76, 77]. Hal ini disebabkan, pada kecepatan pendinginan yang lebih tinggi, atau penurunan temperatur yang lebih besar, butir Austenit yang

terekristalisasi tidak memiliki kesempatan untuk tumbuh, bertransformasi menjadi butir ferit yang halus.



Gambar 5.10. Model non-isothermal dan hasil eksperimen hubungan antara besar butir austenit terhadap kecepatan pendinginan setelah canai panas untuk baja komposisi A,B dan C.

Hal ini juga sejalan dengan penelitian M.Militzer, dkk [65], yang dilakukan terhadap beberapa jenis baja HSLA. Hasil penelitian M.Militzer ini menunjukkan bahwa ukuran butir ferit menurun dengan meningkatnya kecepatan pendinginan rata-rata, untuk baja HSLA-Nb, HSLA-V, HSLA-Nb/T.

Dari penelitian tersebut didapat, untuk seluruh komposisi Nb dalam baja HSLA, meningkatnya kecepatan pendinginan akan menghaluskan ukuran butir fasa ferit. Sedangkan hubungan antara ukuran butir ferit dan butir Austenit, menurut C.M Sellars [2], yang juga memuat hasil penelitian beberapa peneliti terdahulu, menyatakan bahwa meningkatnya ukuran butir austenit akan sejalan dengan meningkatnya ukuran butir fasa ferit, seperti dinyatakan dalam beberapa penelitian, seperti oleh C.M.Sellars [75] Hiroshi Sekine [76], E.Anelli [77], mengenai hubungan besar butir austenit terhadap ukuran butir ferit.

Hasil penelitian yang menunjukkan besar butir ferit sebagai fungsi dari kecepatan pendinginan pada baja HSLA, dapat dianalogikan dengan kecenderungan ukuran butir austenit yang sama. Menurunnya ukuran butir austenit dengan meningkatnya kecepatan pendinginan, dapat dijelaskan bahwa dengan semakin besar kecepatan pendinginan, *driving force* terbentuknya presipitat NbC semakin besar, pembentukan inti partikel semakin tinggi, sehingga ukuran partikel lebih halus, dan efek penghalangan (*pinning effect*) terhadap pergerakan batas butir Austenit selama pendinginan bertambah besar, sehingga butir austenit menjadi semakin halus. Dengan semakin halusnya besar butir austenit, fasa ferit yang mulai terbentuk pada batas butir austenit juga menjadi semakin halus.

Demikian juga dengan hubungan antara pengaruh prosentase Nb, kecepatan pendinginan terhadap besar butir Ferit akhir dapat dilihat penelitian oleh Mathias Militzer [9] seperti pada gambar 2.20, dimana didapat bahwa semakin besar kandungan paduan pembentuk karbida seperti Nb, dan Ti, untuk kecepatan pendinginan yang sama, akan didapat besar butir Ferit akhir yang lebih halus yang disebabkan karena efek penghalangan pergerakan batas butir yang lebih besar pada baja dengan kandungan paduan pembentuk endapan karbida lebih tinggi.

Komposisi baja pada penelitian M.Militzer di atas adalah seperti pada tabel 5.10 di bawah.

Tabel 5.10 Komposisi Baja Pada Penelitian oleh M.Militzer [9]

Jenis Baja	Nb(% berat)	Ti(% berat)
HSLA 50	0,02	0,01
HSLA 60	0,035	
HSLA 80	0,08	0,05
HSLA 90	0,05	0,14

Pada grafik pada gambar 5.10 juga tampak bahwa hasil eksperimen sedikit berbeda dibandingkan grafik pada gambar 2.20 hasil penelitian

M.Militzer, dimana pada baja B, dengan prosentase Nb yang lebih besar, memiliki besar butir austenit yang lebih besar dibandingkan baja A dengan prosentase Nb lebih rendah. Hal ini dapat disebabkan adanya perbedaan komposisi karbon dalam baja B yang jauh lebih kecil dari baja A, sehingga pembentukan endapan tidak cukup untuk menghambat pertumbuhan butir austenit. Pada kecepatan pendinginan tinggi, besar butir D_{rek} Baja B yang lebih kecil ($25,43\mu\text{m}$) dari pada baja A ($35,36\mu\text{m}$) tidak cukup waktu untuk tumbuh sehingga austenit pada baja B lebih halus.

Pengaruh prosentase Nb dalam baja terhadap pergerakan batas butir austenit dapat diterangkan berdasarkan hasil penelitian Masayoshi Suehiro [87], yaitu dengan semakin meningkatnya prosentase Nb dalam baja, kecepatan pergerakan batas butir austenit akan menurun, sehingga pertumbuhan butir menjadi lebih kecil. Pengaruh Nb juga diterangkan pada penelitian yang dilakukan oleh S.C Hong dkk [79], yang dilakukan pada baja HSLA dengan $C=0,14\%$, dan $Nb=0,052\%$, dimana dengan temperatur reheating 1250°C , Nb pada presipitat telah larut sehingga saat pendinginan terbentuk endapan halus NbC yang menghalangi pertumbuhan butir austenit, sehingga baja memiliki butir austenit yang halus, lebih halus dari butir Austenit baja C-Mn.

Dari lampiran M yang menampakan perbandingan nilai deviasi besar butir hasil perhitungan persamaan isothermal dan non-isothermal terhadap nilai besar butir hasil eksperimen, tampak bahwa hasil perhitungan dengan persamaan benda uji C dengan prosentase Nb tertinggi diantara ketiga benda uji memiliki deviasi yang terbesar dibandingkan benda uji A dan B dengan nilai Nb yang lebih rendah. Nilai deviasi terendah adalah pada benda uji A dimana penyimpangan tertinggi berkisar antara 10-11%,. Nilai deviasi benda uji B memiliki penyimpangan cukup rendah, yaitu di bawah 10% untuk benda uji dengan 5 kecepatan pendinginan dari 7 kecepatan pendinginan yang di dapat. Namun 2 data lainnya memiliki deviasi jauh lebih tinggi dari deviasi pada baja A. Pada baja C hanya 1 data memiliki deviasi di bawah 10%, selebihnyaa memiliki deviasi di atas 12%. Dari data ini tampak bahwa semakin besar prosentase Nb dalam baja, ketelitian, hasil perhitungan model kinetika pertumbuhan butir non-

isothermal ini terhadap hasil eksperimen semakin berkurang. Sehingga dapat diartikan persamaan kinetika pertumbuhan butir non-isothermal yang didapat, memiliki ketelitian tertinggi untuk prosentase Nb antara 0,01% hingga sekitar 0,04%, yaitu dengan nilai deviasi rata-rata 10,21 % untuk baja A dan deviasi rata-rata 9,97 % baja B, dibandingkan nilai deviasi rata-rata 15,55% untuk baja C.

5.8.3. Pengamatan Endapan NbC dengan High Resolution Scanning Electron Microscope (HRSEM) .

Perilaku pertumbuhan butir austenit yang terjadi selama proses canai panas hingga pendinginan terkontrol ke temperatur ruang pada penelitian ini sebagian besar erat hubungannya dengan keberadaan endapan partikel NbC atau NbCN pada baja HSLA-Nb. Untuk memastikan keberadaan endapan karbida atau karbonitrida tersebut, dilakukan penamatan terhadap baja dengan menggunakan HRSEM. Pengamatan dilakukan dengan perbesaran hingga 100.000 kali dan dilakukan juga analisa komposisi kimia dengan Electron Dispersive Spectrometer (EDS) untuk memastikan unsur yang terdapat pada partikel endapan tersebut. Dari gambar 4.24. dan 4.26 pada bab IV, tampak bahwa pada benda uji terdapat partikel berukuran kecil berwarna keputihan yang tersebar pada beberapa bagian dari benda uji. Konfirmasi kehadiran partikel diamati pada perbesaran hingga 100.000 kali . Tampak bahwa endapan berwarna keputihan dapat diamati dengan skala 50 nm, yang masih dapat dibaca dengan teliti sampai ukuran sekitar 10 nm. Hasil pengujian komposisi kimia dengan menggunakan EDS, memastikan bahwa partikel putih mengandung Nb dan C. Walaupun alat EDS tidak terlalu akurat mengenai prosentase elemen paduan, namun prosentase hasil difraksi dapat memastikan keberadan elemen paduan tersebut. Seperti dapat dilihat pada gambar 4.25 dan gambar 4.27, untuk baja A dan C, ada puncak-puncak difraksi elemen paduan pada titi-titik yang ditunjuk pada gambar 4.24. dan gambar 4.26,

Gambar 4.24 dan 4.26 serta gambar lain pada lampiran M dapat dibandingkan dengan hasil analisa partikel NbC oleh para peneliti lain (gambar

2.24) dengan perbesaran 50.000 kali dan (gambar 2.25), dengan perbesaran 100.000 kali. , bentuk dan ukurannya relatif mendekati sama.

Hasil observasi gambar 4.24 hingga gambar 4.27, memastikan bahwa partikel bulat keputihan pada gambar foto struktur mikro dengan HRSEM , memiliki ukuran kurang dari 10 nanometer adalah NbC. Hal ini juga dikonfirmasi dengan hasil pembacaan energi sinar x pada tabel 4.3. dan 4.4 pada . Pada hasil difraksi tersebut, tampak adanya unsur Nb dan C, namun unsur paduan N tidak terbaca oleh alat EDS, karena memiliki berat atom yang sangat kecil. Diduga endapan tersebut kemungkinan besar adalah partikel NbC atau partikel NbCN.



BAB VI
KESIMPULAN DAN RENCANA PENELITIAN LANJUT.

5.1 Kesimpulan .

Dari sejumlah eksperimen dan pengamatan yang telah dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Kinetika pertumbuhan ukuran butir austenit baja HSLA-Nb pasca canai panas dan rekristalisasi statik akan semakin lambat dengan meningkatnya kecepatan pendinginan, dengan demikian ukuran butir austenit akhir semakin halus..
2. Persamaan kinetika pertumbuhan butir austenit isothermal memberikan deviasi relatif rata-rata (16-50%) terhadap terhadap nilai eksperimen walaupun telah memasukkan nilai Temperatur efektif, dengan demikian kurang tepat digunakan dalam memprediksi pertumbuhan besar butir austenit pada kondisi non- isothermal hasil proses canai panas.
3. Telah diperoleh persamaan empirik model kinetika pertumbuhan butir austenit non- isothermal setelah proses canai untuk baja HSLA-Nb sebagai berikut::

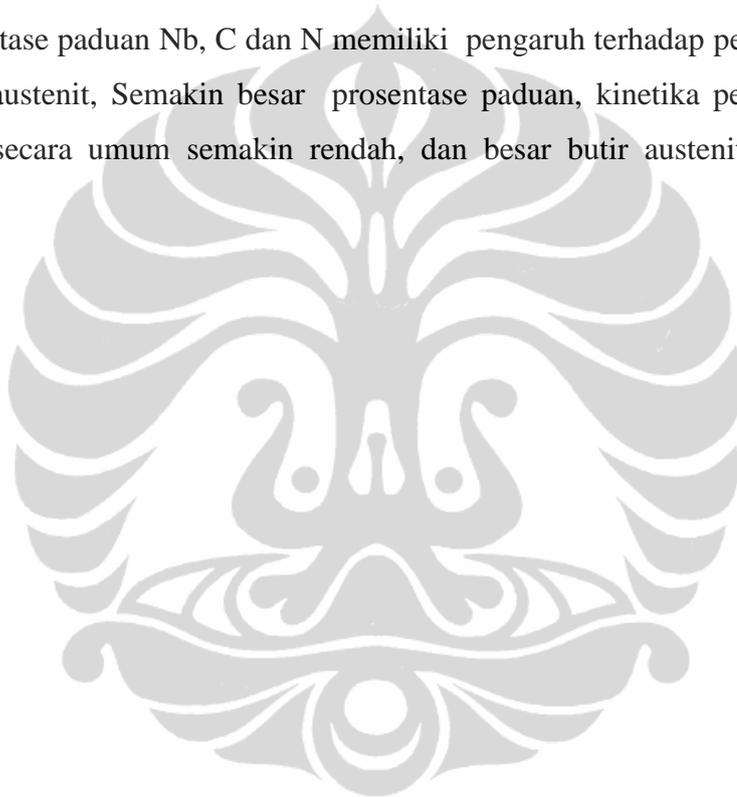
$$d^n - d_o^n = \left[A \exp\left(\frac{-Q_{gg}}{RT}\right) \right] \cdot \left[B \cdot \Delta T \cdot \frac{1}{CR^m} \right]$$

Dimana	d	= Besar butir akhir (μm)
	d ₀	= Besar butir awal (μm)
	n, A, Q _{gg}	= Konstanta material ⁽⁴⁾ , 4,5 , 4,1+23 , 435 k J/mol
	T	= Temperatur deformasi (°C)
	ΔT	= Perubahan temperatur selama kondisi non-isothermal
	CR	= Kecepatan pendinginan (°C/detik)
	B, m	= Konstanta material dan proses

Hasil. perhitungan ukuran butir austenit yang diprediksi dengan persamaan kinetika empirik memiliki deviasi rata-rata yang cukup rendah (4-15%).

Dengan demikian, model empirik kinetik dapat menghasilkan prediksi kinetika pertumbuhan butir austenit setelah proses canai panas baja HSLA-Nb yang lebih sesuai kondisi proses yang bersifat non-isotermal.

4. Nilai konstanta B pada persamaan kinetik empirik memiliki orde 10^{10} dan meningkat dengan meningkatnya prosentase Nb dalam baja, sedangkan nilai m secara umum tidak dipengaruhi oleh perbedaan komposisi baja.
5. Prosentase paduan Nb, C dan N memiliki pengaruh terhadap pertumbuhan butir austenit, Semakin besar prosentase paduan, kinetika pertumbuhan butir secara umum semakin rendah, dan besar butir austenit semakin halus.



5.2. Saran Penelitian Selanjutnya.

1. Untuk melihat pengaruh paduan secara lebih menyeluruh, perlu diadakan penelitian lanjutan dengan rentang komposisi Nb dalam baja yang lebih luas, dan perlu diamati perubahan ketelitian perhitungan besar butir austenit dengan persamaan non-isotermal.
2. Untuk memastikan letak partikel endapan paduan mikro terhadap butir austenit, masih diperlukan konfirmasi pengambilan data partikel dengan *Transmission Electron Microscope* (TEM)
3. Penelitian ini memiliki rentang kecepatan pendinginan antara 7-12 °C/detik. Untuk lebih dapat mengakomodir proses di industri yang lebih bervariasi, perlu dilakukan penelitian lanjut dengan rentang kecepatan pendinginan yang lebih luas lagi sesuai kondisi nyata di industry baja.
4. Perlu penelitian lanjut untuk mengetahui order konstanta B dan m pada baja paduan mikro jenis lain (non-Nb, sehingga didapat batasan yang lebih luas untuk dapat digunakan baja yang lebih bervariasi.)

DAFTAR ACUAN

1. C.M Sellars, (1980) :“ The Physical Metallurgy of Hot Working , *Proc. Int. Conf.on Hot Working and Forming Processes , Sheffield, England*, pg 3-15
2. C.M Sellars, (1982), ”Static Recrystallization and Precipitation During Hot Rolling of Microalloyed Steels” , *Mat Science Seminar, Sheffield, England*
3. P.A .Manohar., D.P Dunne, T.Chandra, and C.R. Killmore., *ISIJ Int*, 36,(1996), pg194
4. M.Militzer, A.Giumelli, E.Bruce Hawbolt, and T.R. Meadowcroft, *Metall .and mater. Trans*, 27A, (1996) , pg3399
5. Chongxiang Yue, Liwen Zhang, Shulun Liao and Huiju Gao, *J. Mater. Eng. Performance, ASM Int*, (2009), pg1059.
6. L.Q.Ma, Z.Y.Liu,S.H .Jiao, X.Q.Yuan and D.Wu, *Acta Metall. Sin*, 19, 4, (2005), pg271.
7. B. Pereda, J.M Rodriguez-Ibabe and B.Lopez, , *ISIJ Int*, 48, 10,(2008), pg1457.
8. M. Militzer, E.B Hawbolt and TR Meadowcroft, *Metall. Mater Trans*, 31A, (2000), pg1247
9. J.Wang, J.Chen, Z.Zhao and XY Ruan, *Acta Metall Sin*,, 19, 4, (2006), pg 279.
10. K.J. Irvine, F.B.Pickering and T .Gladman, *J.Iron Steel Inst*,1967,205,pg161
11. LQ Ma, ZY Liu,S.H Jiao, XQ Yuan and D.Wu, Key Lab of Rolling and Automation, *Acta Metall. Sin*, 19, 4, (2006),pg 271
12. Yang H Bae, Jae sang Lee, Jong Kyo Choi, Wong Yong Choo and Soon H.Hong, *Mater Trans*, 45,1(2004),pg 137
13. J.Kliber, I.Schindler, Dept of Materials Forming, *J. Mater Proc. Tech*, 60, (1996), pg 597
14. Z.Kedzierski,Mpadko, A Skolyszewsky,A Zielinska-Lipiec,H Kusiak, *J.Mater Proc Technology* 60,1996. pg 603
15. L.J.Cuddy, J.J.Brown, and J.C. Raley, *Metall Trans*, 11A,(1980), pg 381 .
16. J.N.Cordea and R.E.Hook, *Metall Trans A*, Vol 1,(1970). pg 111.
17. D.C. Houghton, *J.f Metall Matter*,1 41, 10,(1993), pg 2993.

18. WE.V.Pereloma, BR Crawfoed, P.D.Hodgson , *Mater.Sci.Eng A299* , (2000),pg 27
19. PD Hodgson, *Mater. Forum.*, 17, 4, (1993), pg. 403.
20. XG Zhou, ZY Liu and D Wu, Z Li, CM Li, *Acta Metall Sin* (2006)
21. SF, Medina, “*Scripta Metall. Mat*, 32, 1,(1995),USA, pg 43
22. Mataya, M.C, Nilsson. E. R, Brown. E. L and George Krauss, *Metal.Mater. Trans A*, 34, 8, (2003), pg 1683.
23. Jose Enrique Garcia Gonzales, MSc, ,” Study of the Effect of Hot Rolling Processing Parameters on the variability of HSLA Steels” *Thesis,university of Pittsburgh,2002.*
24. Mohsen Kazeminezhad , *J. Mater. Sci. Eng ,A*, 486, 1-2 ,(2008) , pg 202
25. B Dutta; E J Palmiere *Metall.Mater.Trans.*, 34A, 6; (2003) , pg 1237
26. S.Mishra and T DebRoy, *J. Mater Sci Tech*, 22, 3, (2006) , pg 253
27. HR Wang and W Wang, *J.Mater Sci Tech* vol 24, 2, (2008). Pg 228
28. S. Akta, GJ Richardson and CM Sellars , *ISIJ Int* 45, 11 , (2005), pg 1666
29. S.Akta, GJ Richardson and CM Sellars, *ISIJ Int.*, 45, 11 , (2005), pg 1686.
30. S.Akta, GJ Richardson and CM Sellars, *ISIJ Int.*, 45, 11 , (2005), pg 1676
31. T Jia, ZY Liu, XQ Yuan,XH Liu and GD Wang, (2007), *Mater .Sci. Tech* , 23,7, (2007), pg 780
32. AR Salehi, S Serajzadeh, A Karimi taheri, , *J. Mater. Sci*, 41, 917, (2006), pg1925
33. E Schmidt, Y Wang, and S Sridhar, *Metall. Trans*,37A, 6; (2006), pg1799
34. Dongsheng Liu;F Fazeli; M Militzer; W J Poole, *Metall. Mater. Trans*, 38A,4, (2007),pg 894
35. S.Jiao, J.Penning, F.Leysen,Y.Houbaert and E.Aenourdt, *ISIJ Int*, 40, (2000), pg 1035.
36. Angel ZUFIA and Jose manuel LLANOS, *ISIJ Int* , 41, 10, (2001), pg1282
37. Cubberly, *et al.*, *Properties and Selection: Iron and Steels*. Metals Handbook Vol 1, 10th Edition (Ohio: ASM International, 1998), pg 389-423
38. “*Baja HSLA*,” diakses pada tanggal 12 April 2006 dari website KS <http://www.krakatasteel.com/product/bhsIndonesia/hslasteel/index.asp>

39. "Control of High Strength Low Alloy (HSLA) Steel Properties" 12 April 2006 <http://www.key-to-steel.com/default.aspx?ID=CheckArticle&NM=182>
40. Bruce L. Bramfitt, Arlan O. Benscoler, *Metallographer's Guide, Practices and Procedures for Iron and Steels*, ASM International, (2002), pp 7-8;33;70-73;219-221;229-230
41. "High Strength Low Alloy Steel," diakses 16 Januari 2007, <https://www.asminternational.org/Template.cfm?Section=SneakPreview&template=Ecommerce/FileDisplay.cfm&file=ACF798.pdf>
42. "Baja HSLA aplikasi," diakses 12 April 2006 http://www.krakatausteel.com/product/bhsIndonesia/hslasteel/hslaIna_applGenStruc.asp
43. "HSLA Steel," Wikipedia, diakses 12 April 2006 http://en.wikipedia.org/wiki/HSLA_steel
44. "Steels – Selected Special Steels," diakses 12 April 2006 <http://www.azom.com/details.asp?ArticleID=290>
45. N. Parihanti, "Pengaruh temperatur terhadap pertumbuhan butir austenit piror pada baja HSLA 0.029%Nb As-Cast selama pemanasan isothermal," *Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI Jurusan Metalurgi, Depok, 2001, hal. 3-4*
46. Juliawatri, "Pengaruh Waktu tahan terhadap besar butir austenit piror pada baja HSLA 0.029%Nb hasil coran kontinu selama pemanasan isothermal," *Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI Jurusan Metalurgi, Depok, 2002, hal. 11;14-15;27*
47. Fang Jian, *J. Tech*, 2002: pg. 5
48. Sidney Avner, *Introduction to Physical Metallurgy* (Singapore: McGraw-Hill International, (1974), pp 135;357
49. B.K.Panigrahi, (2001), "Processing of low Carbon Steel Plate and Hot Strip-an overview", *R& D Centre for Iron and Steel, Steel Authority of India Ltd,Ranchi 834002,India.*
50. D.A.Porter, K.E. Easterling "Phase Transformation in metals and Alloys", *Published by Chapman & Hall London,1992*
51. P.R.Rios, *Mater Sci Tech*", 4, 4,(1988), pg 324
52. C.Zener, as quoted by C.S Smith, *Trans Met Soc ,AIME*, 175 ,15, (1948)
53. T.Gladman and F.B.Pickering, *J.Iron Steel Inst*,205 (1967), 653
54. N.Hannerz and F. Kazinezy, *J Iron Steel Inst*,208, (1970), p475,
55. M.Hillert, *Acta Metallurgica*, 13, (1965) ,pg 227.

56. *Strengthening of Plain Carbon Steel* , diakses 12 April 2007, www.mmat.ubc.ca/course/mmat380/default.htm
57. Masanori UEKI, Shiro HORIE and Tadahisa NAKAMURA, *Trans. ISIJ Int*, 27, 6, (1987), pg 453 .
58. WE.V.Pereloma, BR Crawfoed, P.D.Hodgson, *J. Mater. Sci. Eng.A* , 299, 1-2, (2001), pg 27.
59. P.D.Hodgson and RK Gibss, *ISIJ Int* , 32, 12, (1992). pg 1329.
60. B. Dutta and C.M.Sellars, *Mater Sci Tech*, 3, (1987), pg 197. .
61. P.D.Hodgson, R.E.Gloss and G.L.Dunlop, *32nd Mechanical Working and Steelmaking Conference ,ISS-AIME, Cincinnati*, (1991).pg 527.
62. R.Priestner *et al*, “*Journal of Iron Steel Institute*” 206, (1968) ,pg 1252.
63. A.Le Bon *et al*, “*Mem.Sci. Rev.Metall*, 57, (1973) , pg 577.
64. A.Le Bon, *et al*, “*Metall .Sci*, 9,(1975), pg 3.
65. Matthias Militzer, *ISIJ Int* , 47 ,1 , (2007) , pg 1-15.
66. R.K Amin, F. B Pickering,”Austenite Grain Coarsening and the Effect of Thermomechanical Processing on Austenite Recrystallization” *Proc.Int Conf of Thermomechanical Processing of Microalloyed Austenite,The Metallurgical Society of AIME,Pittsburgh; (1982). pp. 1-31.*
67. L.J.Cuddy and J.C Raley, *Metall. Mater. Trans*, Volume 14A, (1983), pg 1983
68. Albones (1979) , *Hot Working and Forming Processes ,Proc.Conf, Sheffield, England.*
69. S Denis, *ISIJ Int*, 32, 3, (1992), pg 316
70. Niltawach, (1979), *Hot Working and Forming Processes (Proc.Conf), Sheffield, England,*
71. K.E Thelning, *Steel and its Heat Treatment* ,Boxholm: Butterworths & Co, (1984), hal. 434-435
72. *Strengthening of Plain Carbon Steel* , diakses 12 April 2007 www.mmat.ubc.ca/course/mmat380/default.htm
73. C.M Sellars and J.Beynon (1985), “*Proc.Conf.on High strength Low Alloy Steels*” edited by D.Dune and T.Chandra, South Coast Printers, pg 142.
74. B.Donnay, J.C.Herman and V.Leroy (1996)., “Microstructure Evolution of C-Mn Steels in the Hot Deformation Process: The Stripcam Model”, *Conf. Proc of Steel Transformation Induced Precipitation Computer Assisted Model (Stripcam), CRM, Belgium and Thyssen Stahl,AG,Germany* .

75. C.M.Sellars, *J. ASM Int*, (1986), pg 73.
76. Hiroshi Sekine and Tadakatsu Maruyama ,*Research Article, UDC 669.15'293-194-122.4, Trans ISIJ, 16, 1976.*
77. E.Anelli, M.Gherzi, A.Macanzoni, *J. Strength .Metals Alloys (ICSMA 7), 2, Canada ,(1985), pg 1031.*
78. H.Watanabe, Y.E Smith and R.D Pehlke (1977),”Precipitation Kinetics of Niobium Carbonitride in Austenite of High-Strength Low-Alloy Steel” *Proc.Int Conf of Austenite Hot Deformation, AIME,New York, , pg 140*
79. SC. Hong, S.H. Lim, H.S. Hong, K.J. lee, D.H. Shin, and K.S.Lee., *J.Mater Sci. Tech, 20, 2, (2004) , pg 207.*
80. D.O Bai, S Yue, T.M. Maccagno and J.J.Jonas., *ISIJ Int., 38, 4, (1998), pg 371.*
81. G.F Vander Voort, *Metallography-Principles and Practice (USA: McGraw-Hill, 1984), pg. 166-170;219-223*
82. Myrna Ariati, E.S.Siradj, “Evaluasi Proses Etsa untuk Menampakkan Batas Butir Austenit Prior pada Baja HSLA,” *Jurnal Teknologi, Fakultas Teknik UI Jurusan Metalurgi, Depok, 2000*
83. Chris North, “Etching to reveal grain boundaries,” *Experts Metallography Forum, Diakses 11 Februari 2007*
84. J.Irvine and T.N. Baker , *J. Metal Sci , (1979), pg 229.*
85. K.A. Alogab, *ISIJ Int , 47, 2, (2007), pg 307.*
86. Eddy. S Siradj,” Strain Induced Precipitation Kinetics of Nb[CN] in Nb-HSLA Steel as a Function of the Thermomechanical History” *Ph.D Thesis, Department of Engineering materials, University of Sheffield ,UK, 1997*
87. Masayoshi Suehiro, , *ISIJ Int, 38, 6, (1998), pg 547,*
88. Naoki Nakata and Matthias Militzer, *ISIJ Int, 45 , 1 , (2005), pg 82.*
89. T.WanJun,L Yuwen,Y.Xil, W Zhiyong, and W Cunxin, *J.Therm An. Cal,74, (2003), pg 309.*

Lampiran B

Perhitungan Temperatur Kelarutan Presipitat Komposisi material;

Kode Benda Uji	Ti	C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Nb	V	Ni	Cr	N	Cu+Cr+Ni
A	0,001	0,165	0,007	0,664	0,005	0,005	0,037	0,032	0,019	0,005	0,021	0,013	0,033	
B	0,002	0,048	0,266	0,706	0,010	0,007	0,037	0,052	0,037	0,003	0,022	0,018	0,0040	0,092
C	0,004	0,172	0,259	1,048	0,014	0,033	0,044	0,042	0,056	0,004	0,263	0,020	0,031	0,062

Berdasarkan model empiris yang dinyatakan oleh persamaan Irvine [3], yang dinyatakan pada persamaan 3.1.;

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

Sehingga untuk baja A :

$$\begin{aligned} \text{Log}(0,019) (0,165 + 12/14 (0,033)) &= 2,26 - 6770/T \\ -2,435 &= 2,26 - 6770/T \\ T &= 1441,95 \text{ } ^\circ\text{K} \\ &= 1169^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Untuk baja B :

$$\begin{aligned} \text{Log}(0,037) (0,048 + 12/14 (0,004)) &= 2,26 - 6770/T \\ -2,72 &= 2,26 - 6770/T \\ T &= 1359,4 \text{ } ^\circ\text{K} \\ &= 1086,4^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Untuk baja C :

$$\begin{aligned} \text{Log}(0,056) (0,172 + 12/14 (0,031)) &= 2,26 - 6770/T \\ -1,9551 &= 2,26 - 6770/T \\ T &= 1606 \text{ } ^\circ\text{K} \\ &= 1333^\circ\text{C} \end{aligned}$$



Lampiran C

Pengamatan Berbagai Larutan dan Metode Etsa Batas Butir Austenit Prior

No.	Temp. Pemanasan Sampel (°C)	Zat Etsa	Waktu Etsa	Hasil Pengamatan Mikro	Ket
1.	1300	(30 gr picric acid + 100 ml alkohol) + 2 tetes HCl	3 menit	Batas butir austenit cukup jelas terlihat namun mikrostruktur sedikit gosong	Larutan jenuh picric diendapkan 4-5 hari
2.	1200	(30 gr picric acid + 100 ml alkohol) + 2 tetes HCl	2 menit	Batas butir austenit cukup jelas terlihat namun mikrostruktur sedikit gosong	Larutan picric jenuh diendapkan 4-5 hari
3.	1100	(30 gr picric acid + 100 ml alkohol) + 2 tetes HCl	1,5 menit	Butir austenit tidak tampak, hanya struktur lain yang termakan	Larutan picric jenuh diendapkan 4-5 hari
4	1000	(30 gr picric acid + 100 ml alkohol) + 2 tetes HCl	1,5 menit	Butir austenit tidak tampak, hanya struktur lain yang termakan	Larutan picric jenuh diendapkan 4-5 hari
5.	1300	(30 gr picric acid + 100 ml alkohol) + 1 tetes HCl	2,5 menit	Hasil sangat baik, <i>prior austenite</i> terlihat dengan jelas dan tidak gosong	Larutan picric jenuh diendapkan 4 hari
6.	1200	(30 gr picric acid + 100 ml alkohol) + 1 tetes HCl	2 menit 55 detik	Hasil sangat baik, <i>prior austenite</i> terlihat dengan jelas dan tidak gosong	Larutan picric jenuh diendapkan 4 hari
7.	1100	(30 gr picric acid + 100 ml alkohol) + 4 tetes HCl	5 mnt & 8 mnt	Hanya struktur yang termakan, tidak ada batas butir austenitnya	Larutan picric jenuh diendapkan 5 hari
8.	1000	5 gr asam picric + 2,5 ml HCl + 50 ml aquades	5 menit	Tidak jelas sturuktur maupun batas butirnya,	Larutan fresh (langsung dipakai setelah dibuat)

				gosong	
9.	1000	5 gr asam picric + 2,5 ml HCl + 50 ml aquades	3 menit	Tidak jelas struktur maupun batas butirnya (hasil sama dengan No.8, namun tidak gosong)	Larutan fresh
10.	1100	5 gr asam picric + 2,5 ml HCl + 50 ml aquades	8 menit	Gosong	Larutan fresh
11.	1100	5 gr asam picric + 2,5 ml HCl + 50 ml aquades	2 menit	Batas butir tidak tampak, hanya strukturnya yang termakan	Larutan fresh
12.	1100	2,5 gr asam picric + 0,25 gr CuCl ₂ + 2 tetes HCl + 2 ml teepol + 100 ml aquades (Menggunakan Ultrasonik Cleaner)	15 menit	Belum tampak mikrostrukturnya	Larutan fresh
13.	1100	2,5 gr asam picric + 0,25 gr CuCl ₂ + 2 tetes HCl + 2 ml teepol + 100 ml aquades (Menggunakan Ultrasonik Cleaner)	30 mnt, 45 mnt dan 60 mnt	Mulai terlihat struktur tapi tidak ada batas butir. Penambahan waktu tidak memberikan pengaruh yang cukup besar	Etsa merupakan lanjutan dari pengetsaan sebelumnya (dari 15 mnt hingga 60 mnt)
14.	1100	4 gr asam picric + 100 ml alkohol	2 mnt, 3 mnt, 5 mnt, dan 10 mnt	Hanya struktur yang termakan, tidak ada batas butir. Penambahan waktu tidak memberikan pengaruh yang cukup besar	Penambahan 1-2 tetes HCl tidak memberikan pengaruh yang besar, hanya lebih mempertajam mikrostruktur
15.	1100	(30 gr picric acid + 100 ml alkohol) + 1 tetes HCl + 3 tetes teepol	4 mnt, 5 mnt, 8 mnt, dan 11 mnt	Hanya struktur yang termakan, tidak ada batas butir. Penambahan waktu tidak memberikan pengaruh yang	Larutan picric jenuh diendapkan 4-5 hari

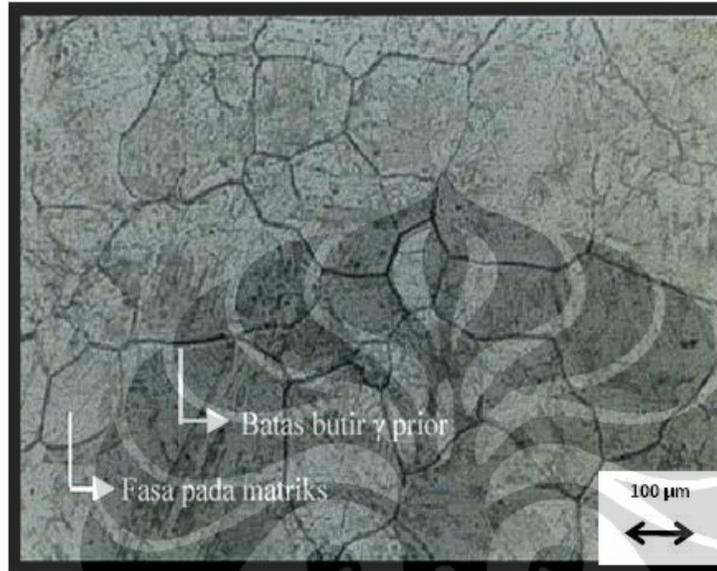
				cukup besar	
16.	1100	1 gr picric acid + 12,5 gr NaOH + 100 ml aquades	2 mnt dan 5 mnt	Tidak termakan baik struktur maupun batas butirnya (mikrostruktur tidak tampak)	Larutan etsa dipanaskan hingga mendidih terlebih dahulu baru proses etsa dilakukan
17.	1100	Etsa jepang : 2 gr asam picric + 0,5 gr CuCl ₂ + 1 tetes HCl + 2 ml teepol + 100 ml aquades	1-3 mnt	Ada batas butir tapi tidak jelas sedangkan struktur tidak termakan	Ukuran butir kecil walaupun dengan perbesaran 500x
18.	1000	Etsa jepang : 2 gr asam picric + 0,5 gr CuCl ₂ + 1 tetes HCl + 2 ml teepol + 100 ml aquades	3 menit	Fasa campuran antara butir yang kecil (halus) dan butir kasar, namun struktur tidak tampak	Dilakukan uji hardness (vickers) pada butir yang kasar dan halus. Hasil : 98 – 165 HV.
19.	1100	5 gr FeCl ₃ + 100 ml aquades	1,5 mnt	Struktur tidak jelas	
20.	1100	(5 gr FeCl ₃ + 100 ml aquades) + 1 tetes HCl	1,5 mnt	Sama seperti No.19	Penambahan HCl tidak memberikan pengaruh pada hasil etsa
21.	1100	10 gr asam picric + 100 ml alkohol + 20 tetes HCl	4 mnt	Hanya struktur yang tampak namun batas butir tidak jelas	
22.	1100	3 gr asam oksalat + 100 ml aquades	15 detik, 1 mnt, dan 3 mnt	Tidak termakan baik struktur maupun batas butirnya (mikrostruktur tidak tampak)	Penambahan waktu tidak memberikan pengaruh
23.	1100	1 gr asam picric + 2 ml teepol + 50 ml aquades (larutan etsa dipanaskan 70-80 ⁰ C)	2 menit	Batas butir hampir tampak namun belum jelas (masih samar)	
24.	1100	1 gr asam picric + 2 ml teepol + 50 ml aquades (larutan etsa dipanaskan 70-80 ⁰ C)	4,5 menit	Ada lapisan yang menutupi struktur sehingga mikrostruktur tidak jelas. <i>Lightly repolish</i> tidak	Etsa merupakan lanjutan dari pengetsaan sebelumnya (dari 2 mnt dilanjutkan hingga 2,5 mnt)

				memberikan hasil yang cukup baik (mikrostruktur hampir hilang)	
25.	1100	1 gr asam picric + 2 ml teepol + 50 ml aquades (larutan etsa dipanaskan 70-80 ⁰ C)	3,5 menit	Batas butir tidak jelas, hasil pengamatan mikrostruktur No.23 lebih baik dibandingkan waktu etsa ini	Sampel yang digunakan untuk etsa telah di preparasi ulang
26.	1100	1 gr asam picric + 2 ml teepol + 50 ml aquades + 9 tetes HCl (larutan etsa dipanaskan 70-80 ⁰ C)	55 detik	Gosong dan mikrostruktur tidak tampak	<i>Lightly repolish</i> tidak membantu
27.	1100	2 gr asam picric + 3 ml teepol + 100 ml aquades + 9 tetes HCl (larutan etsa dipanaskan 70-80 ⁰ C)	4,5 mnt	Gosong	<i>Lightly repolish</i> menampakkan butir namun sebagian batas butir belum jelas (banyak yang terputus)
28.	1100	Super Picral : 1 gr asam picric + 3 sendok spatula teepol + 50 ml aquades (tanpa pemanasan dan tidak menggunakan <i>ultrasonic cleaner</i>)	40 mnt	Hampir terbentuk butir	Dari sumber, etsa dilakukan hingga permukaan sampel menghitam yaitu sekitar 4-5 mnt. Namun, sampai sekitar 7 mnt permukaan sampel belum termakan. Setelah 30 mnt baru menunjukkan adanya reaksi pada permukaan sampel secara perlahan
29.	1100	5 gr asam picric + 1,5 ml teepol + 50 ml aquades (larutan etsa dipanaskan 50-60 ⁰ C)	10 mnt	Batas butir belum jelas	
30.	1100	5 gr asam picric + 1,5 ml teepol + 50 ml aquades + 3 tetes HCl (larutan etsa dipanaskan 50-60 ⁰ C)	10 mnt	Terbentuk butir namun walaupun pada perbesaran 500x terlihat sangat kecil	

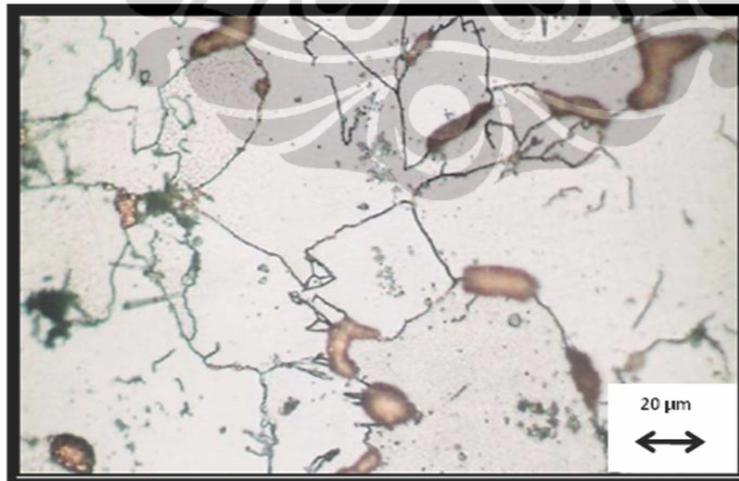


Lampiran D1
Struktur Mikro Baja B dengan Beberapa Teknik Etsa

Foto Mikro Berbagai Teknik Etsa Pada Baja HSLA-Nb Yang Mengalami Pemanasan Pada Temperatur 1200°C



1. Batas butir austenit prior, etsa 30 gr asam picric, 100 ml alkohol, dan 1 tetes HCl. Larutan diendapkan selama \pm 4-5 hari. Larutan etsa temperatur ruang. Waktu pengetsaan adalah 3 menit. Perbesaran 100x



2. Batas butir austenit prior, etsa 2 gr asam picric, 0,5 gr CuCl_2 , 2 ml teepol, 100 ml aquades, dan 1 tetes HCl. Temperatur larutan etsa merupakan temperatur ruang. Waktu pengetsaan adalah 6 menit. , perbesaran 500x



3. Batas butir austenit prior, etsa 2 gr asam picric, 3 ml teepol dan 100 ml aquades.
 0
 Temperatur larutan etsa sekitar 70-80 C. Waktu pengetsaan adalah 3 menit.
 Perbesaran. 500x

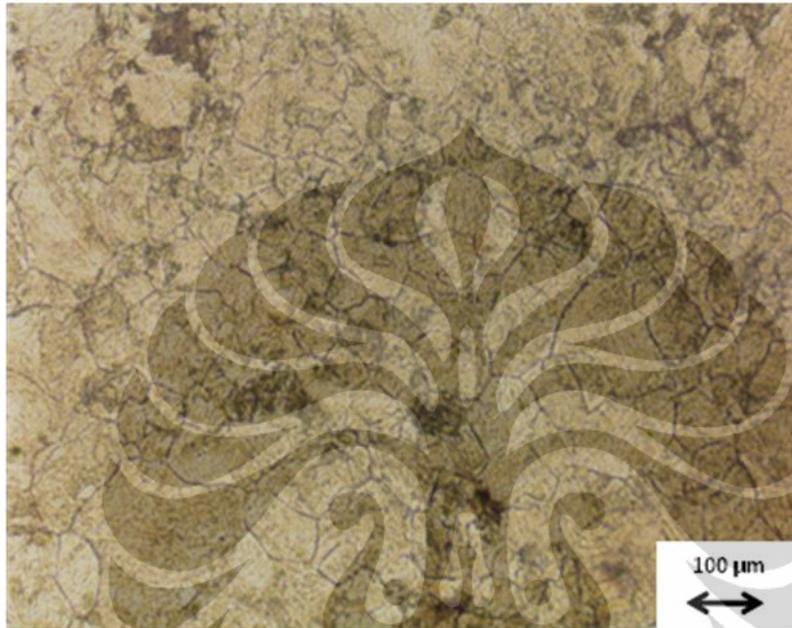


4. Batas butir austenit prior, etsa 2 gr asam picric, 3 ml teepol, 100 ml aquades dan 3
 0
 tetes HCl. Temperatur larutan etsa sekitar 70-80 C. Waktu pengetsaan adalah 2,5
 menit. Modifikasi Super Picral. Perbesaran 100x

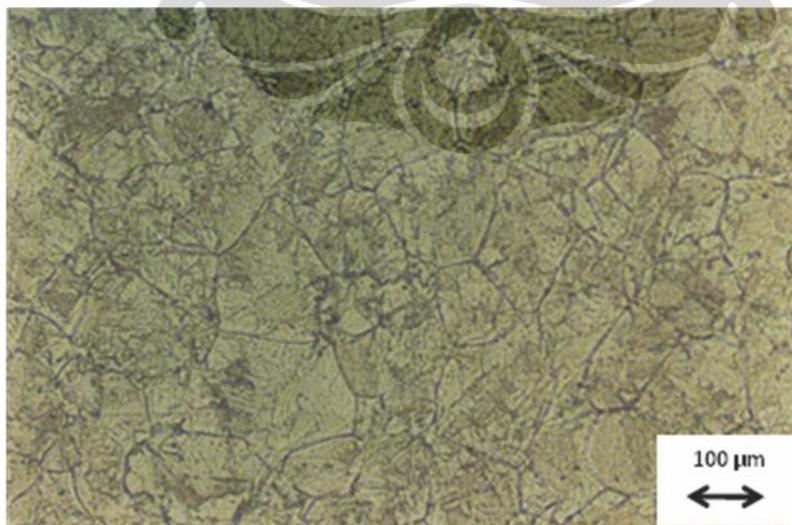


5. Batas butir austenit prior , 10 gr asam picric, 100 ml aquades dan 3 ml teepol.
Larutan diendapkan selama ± 1 hari. Temperatur larutan etsa sekitar 70-80 C. Waktu pengetsaan adalah 3,5 menit, perbesaran 500x

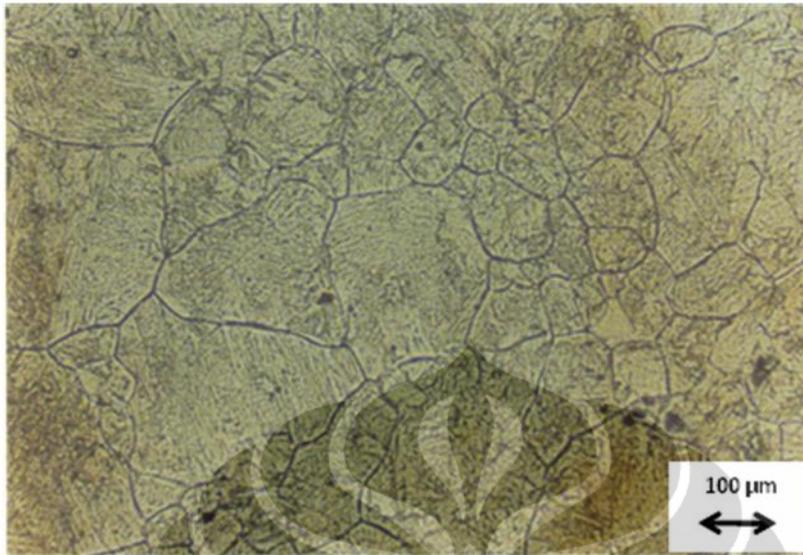
Struktur Mikro Baja B variabel Waktu Tahan, pada Temperatur Reheating 1200°C



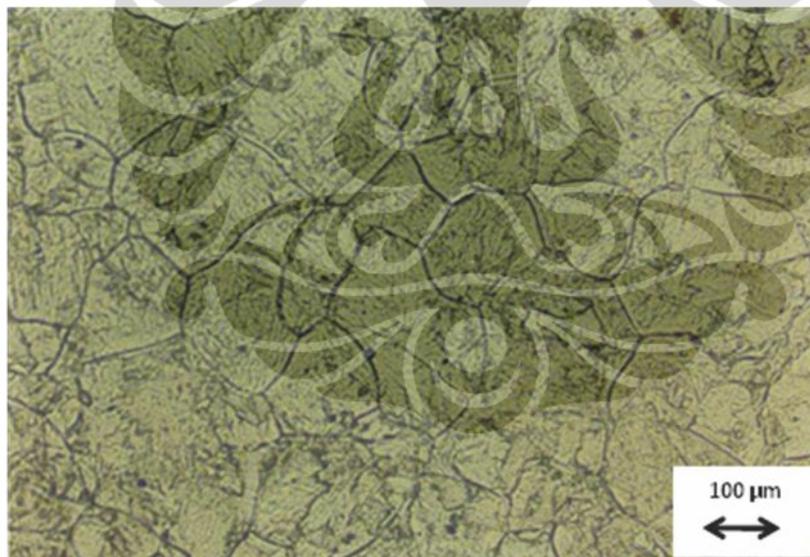
1. Batas butir austenit prior setelah *quenching* pada baja HSLA-Nb 0.037 % temperatur pemanasan 1200°C, tanpa waktu tahan, perbesaran 100X



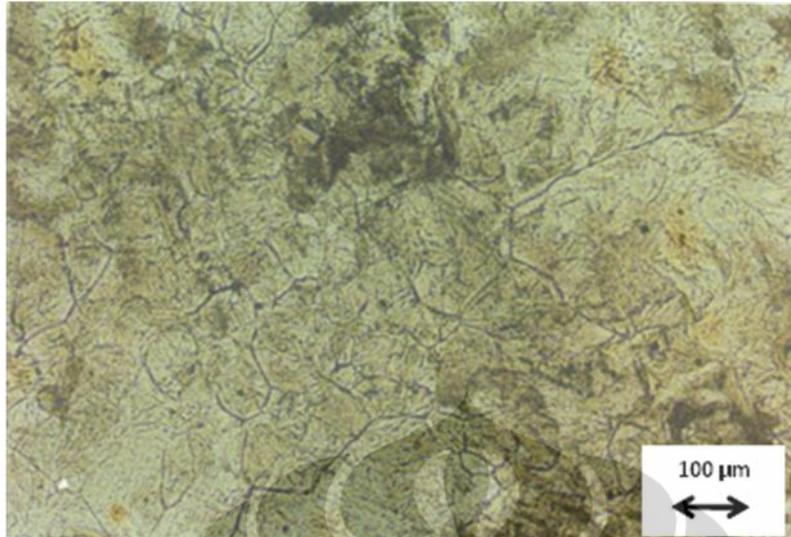
2. Foto batas butir austenit prior setelah *quenching* pada baja HSLA-Nb 0.037 % temperatur pemanasan 1200°C, waktu tahan 0.5 jam, perbesaran 100 X.



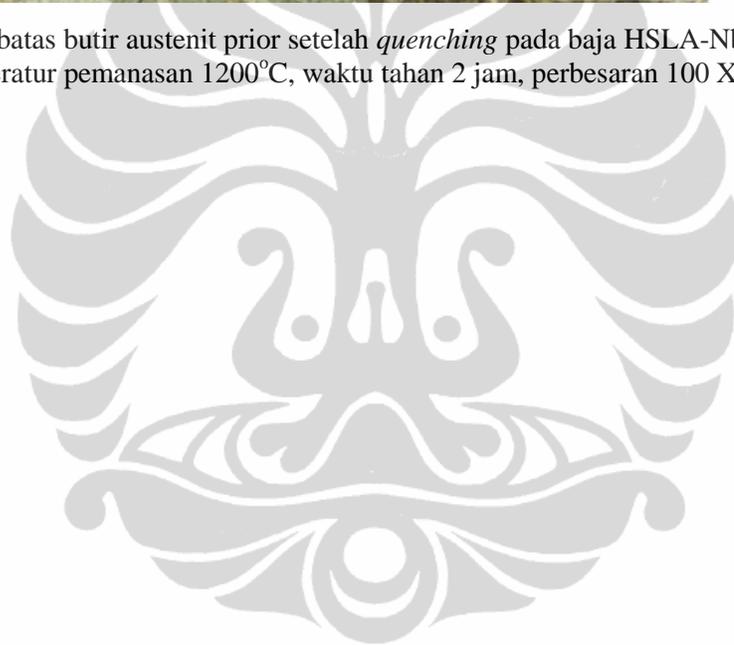
3. Foto batas butir austenit prior setelah *quenching* pada baja HSLA-Nb 0.037 % temperatur pemanasan 1200°C, waktu tahan 1 jam, perbesaran 100 X



4. Foto batas butir austenit prior setelah *quenching* pada baja HSLA-Nb 0.037 % temperatur pemanasan 1200°C, waktu tahan 1.5 jam, perbesaran 100 X

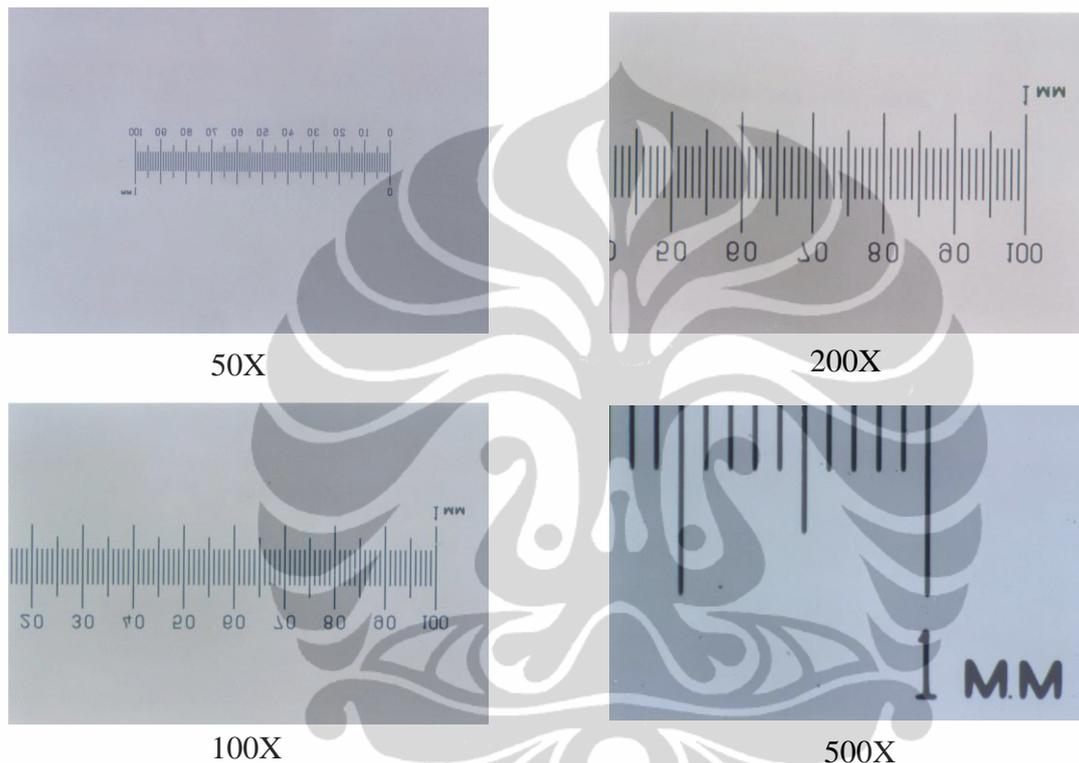


5. Foto batas butir austenit prior setelah *quenching* pada baja HSLA-Nb 0.037 % temperatur pemanasan 1200°C, waktu tahan 2 jam, perbesaran 100 X



Contoh Perhitungan Ukuran Butir

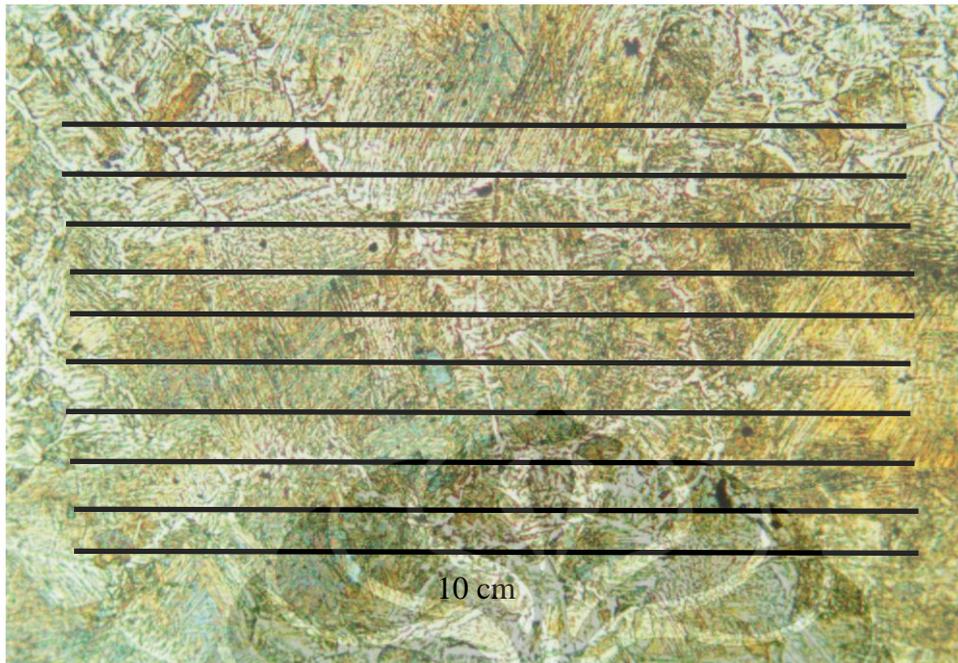
Setelah didapat foto mikro dari benda uji, selanjutnya diukur besar butir austenit dengan menggunakan metode perbandingan. Perhitungan dilakukan dengan bantuan foto standar perbesaran tertentu yang berisi skala seperti terlihat pada gambar dibawah.



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

Setelah itu ditarik garis sebanyak 10 buah pada foto. Kemudian dari 10 garis tersebut diambil rata-ratanya, sehingga hasil pengukuran lebih akurat. Misalnya pada foto perbesaran 100X, garis kesatu jumlah batas butir yang memotong garis sebanyak 9 buah, maka diameter butirnya sama dengan $720\mu\text{m}/9 = 80\mu\text{m}$. Begitu seterusnya sampai garis ke-10, kemudian diambil rata-ratanya.

Contoh penarikan garis dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Lampiran F

Hasil Perhitungan Diameter Butir Prior Austenit Pengaruh Waktu Tahan Reheating, Dengan Penahanan Pada Temperatur 1200°C

Data. Diameter butir austenit Prior pengaruh waktu tahan pada temp 1200°C
 Perb 100X → 12,6 cm = 969,23 μm

Sampel	N	d (969,23/N)	d rata-rata
1 Waktu tahan 0,5 jam	12	80.76916667	81.4
	10	96.923	
	9	107.6922222	
	11	88.11181818	
	14	69.23071429	
	14	69.23071429	
	14	69.23071429	
	11	88.11181818	
	12	80.76916667	
	15	64.61533333	
2 Waktu tahan 1 jam	13	74.55615385	94.0
	10	96.923	
	9	107.6922222	
	15	64.61533333	
	9	107.6922222	
	9	107.6922222	
	9	107.6922222	
	11	88.11181818	
	11	88.11181818	
	10	96.923	
3 Waktu tahan 1,5 jam	8	121.15375	102.7
	10	96.923	
	9	107.6922222	
	9	107.6922222	
	10	96.923	
	9	107.6922222	
	11	88.11181818	
	10	96.923	
	10	96.923	
	9	107.6922222	

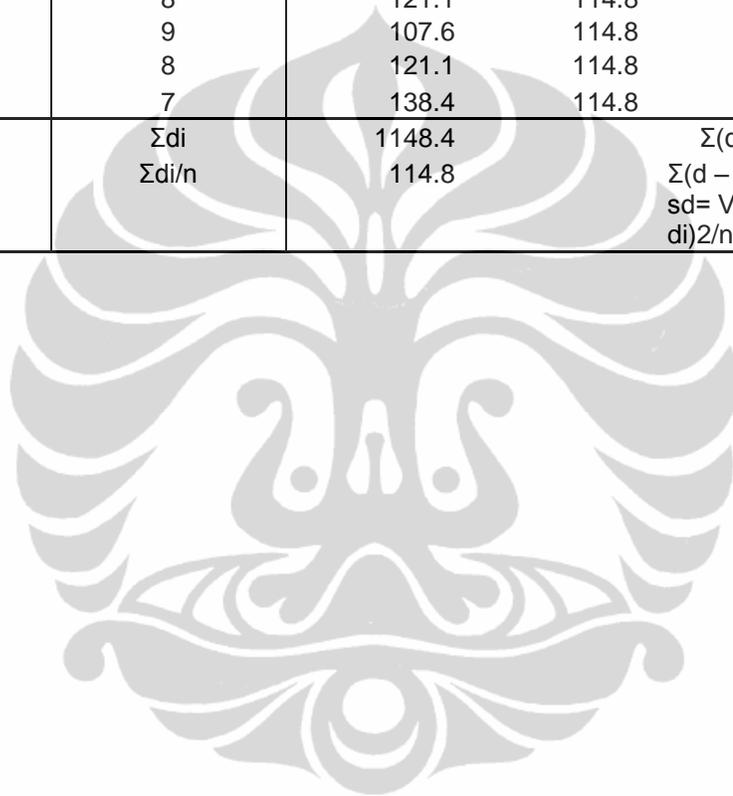
4 Waktu tahan 2 jam	7	138.4614286	114.8
	9	107.6922222	
	9	107.6922222	
	11	88.11181818	
	10	96.923	
	8	121.15375	
	8	121.15375	
	9	107.6922222	
	8	121.15375	
	7	138.4614286	



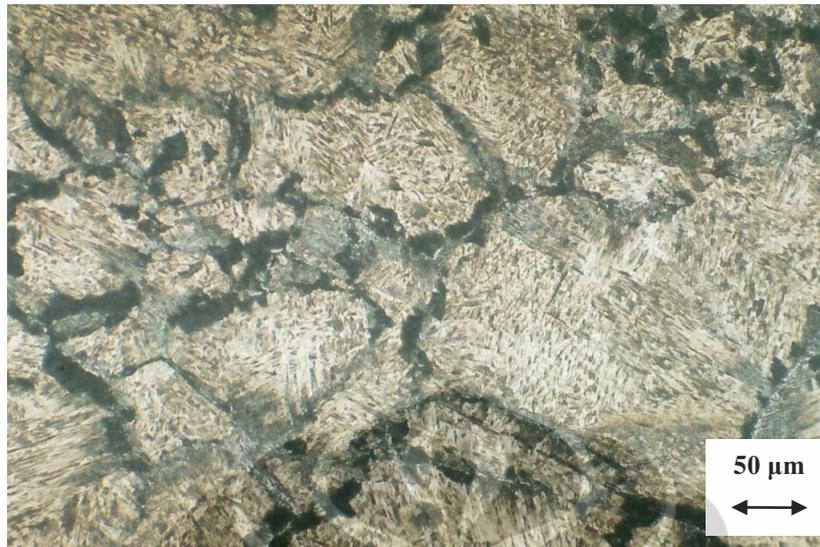
Lampiran G
Standar Deviasi Besar Butir Austenit Prior Variabel Waktu
Tahan untuk baja B pada Pemanasan 1200°C

Sampel	N	di (969,23/N)	d=Σdi/n	d – di	(d – di)2
1 Waktu tahan 0,5 jam	12	80.7	81.4	0.69	0.489
	10	96.9	81.4	-15.45	238.842
	9	107.6	81.4	-26.22	687.685
	11	88.1	81.4	-6.64	44.134
	14	69.2	81.4	12.23	149.762
	14	69.2	81.4	12.23	149.762
	14	69.2	81.4	12.23	149.762
	11	88.1	81.4	-6.64	44.134
	12	80.7	81.4	0.69	0.489
	15	64.6	81.4	16.85	284.028
		Σdi	814.684		Σ(d – di)2
	Σdi/n	81.468		Σ(d – di)2/n-1	194.343
				sd= √Σ(d – di)2/n-1 =	13.940
2 Waktu tahan 1 jam	13	74.5	94.0	19.44	378.102
	10	96.9	94.0	-2.92	8.538
	9	107.6	94.0	-13.69	187.449
	15	64.6	94.0	29.38	863.517
	9	107.6	94.0	-13.69	187.449
	9	107.6	94.0	-13.69	187.449
	9	107.6	94.0	-13.69	187.449
	11	88.1	94.0	5.88	34.682
	11	88.1	94.0	5.88	34.682
	10	96.9	94.0	-2.92	8.538
	Σdi	940.0		Σ(d – di)2	2077.858
	Σdi/n	94.0		Σ(d – di)2/n-1	230.873
				sd= √Σ(d – di)2/n-1 =	15.194
3 Waktu tahan 1,5 jam	8	121.1	102.7	-18.38	337.864
	10	96.9	102.7	5.84	34.218
	9	107.6	102.7	-4.91	24.202
	9	107.6	102.7	-4.91	24.202
	10	96.9	102.7	5.84	34.218
	9	107.6	102.7	-4.91	24.202
	11	88.1	102.7	14.66	214.939
	10	96.9	102.7	5.84	34.218
	10	96.9	102.7	5.84	34.218
	9	107.6	102.7	-4.91	24.202
	Σdi	1027.7		Σ(d – di)2	786.487

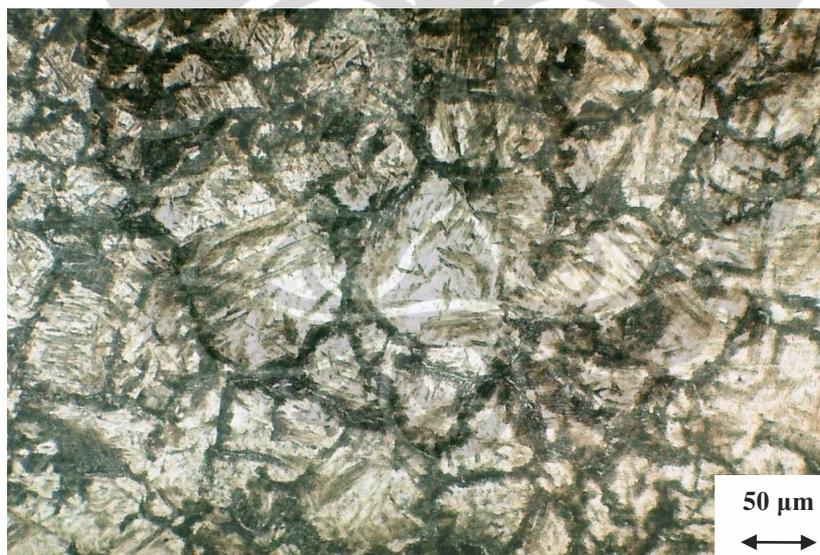
	$\Sigma di/n$	102.7		$\Sigma(d - di)^2/n-1$	87.387
				$sd = \sqrt{\Sigma(d - di)^2/n-1} =$	9.348126436
4 Waktu tahan 2 jam	7	138.4	114.8	-23.61	557.520
	9	107.6	114.8	7.15	51.227
	9	107.6	114.8	7.15	51.227
	11	88.1	114.8	26.73	714.906
	10	96.9	114.8	17.92	321.361
	8	121.1	114.8	-6.30	39.742
	8	121.1	114.8	-6.30	39.742
	9	107.6	114.8	7.15	51.227
	8	121.1	114.8	-6.30	39.742
	7	138.4	114.8	-23.61	557.520
	Σdi	1148.4		$\Sigma(d - di)^2$	2424.219
	$\Sigma di/n$	114.8		$\Sigma(d - di)^2/n-1$	269.357
				$sd = \sqrt{\Sigma(d - di)^2/n-1} =$	16.412



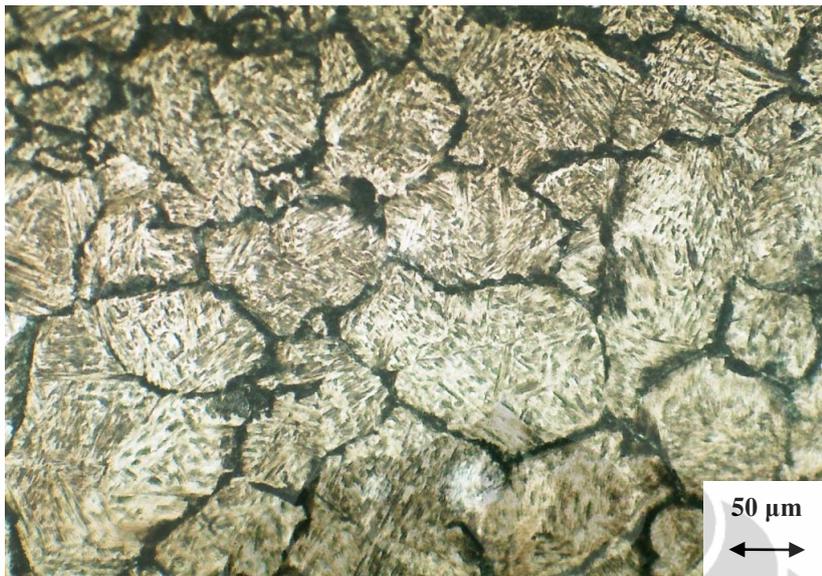




200 X, CR 7,5°C/dtk



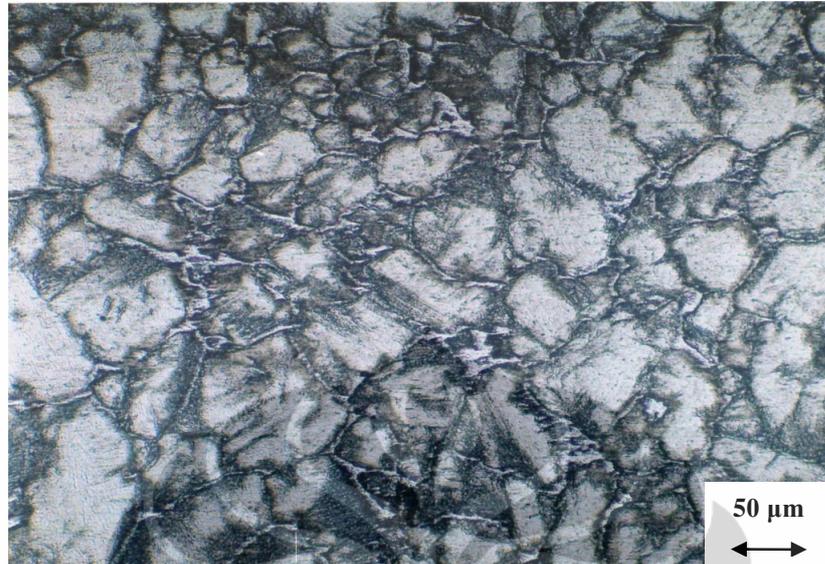
200 X, CR 8 °C/dtk



200 X, CR 7.8 °C/dtk



200 X, CR 8,1 °C/dtk



200 X, CR 9 °C/dtk



200 X, CR 7,7 °C/dtk

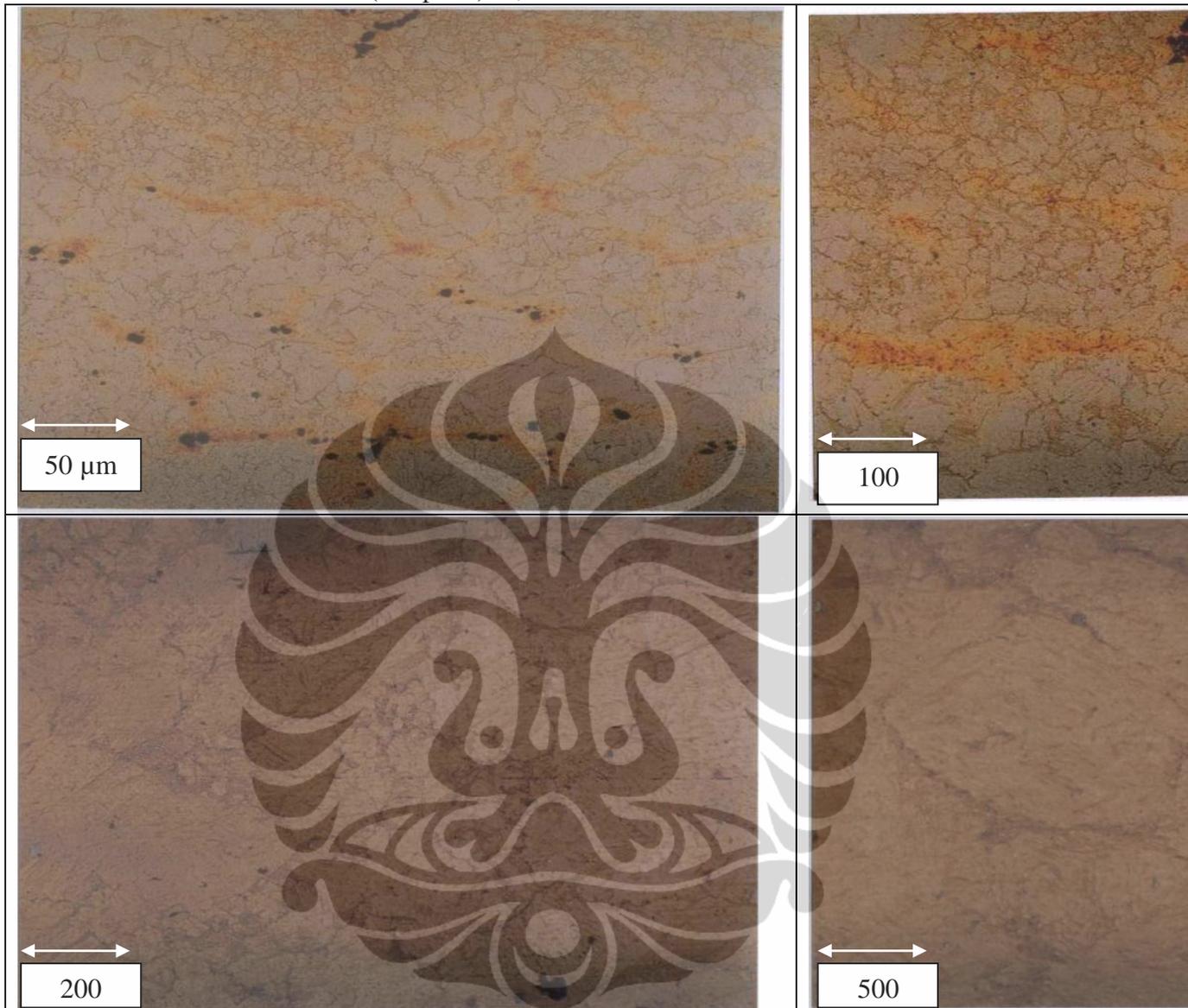


z

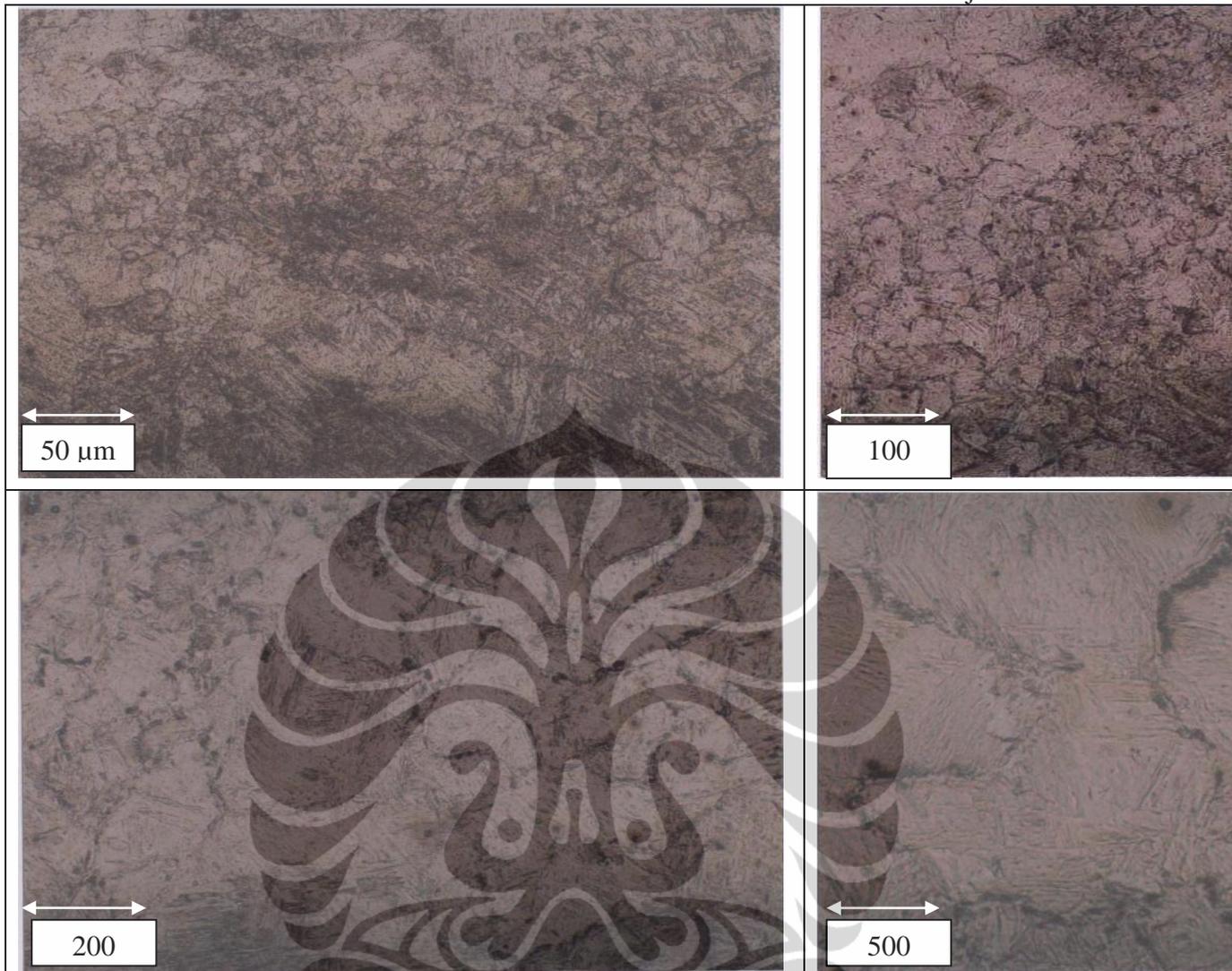




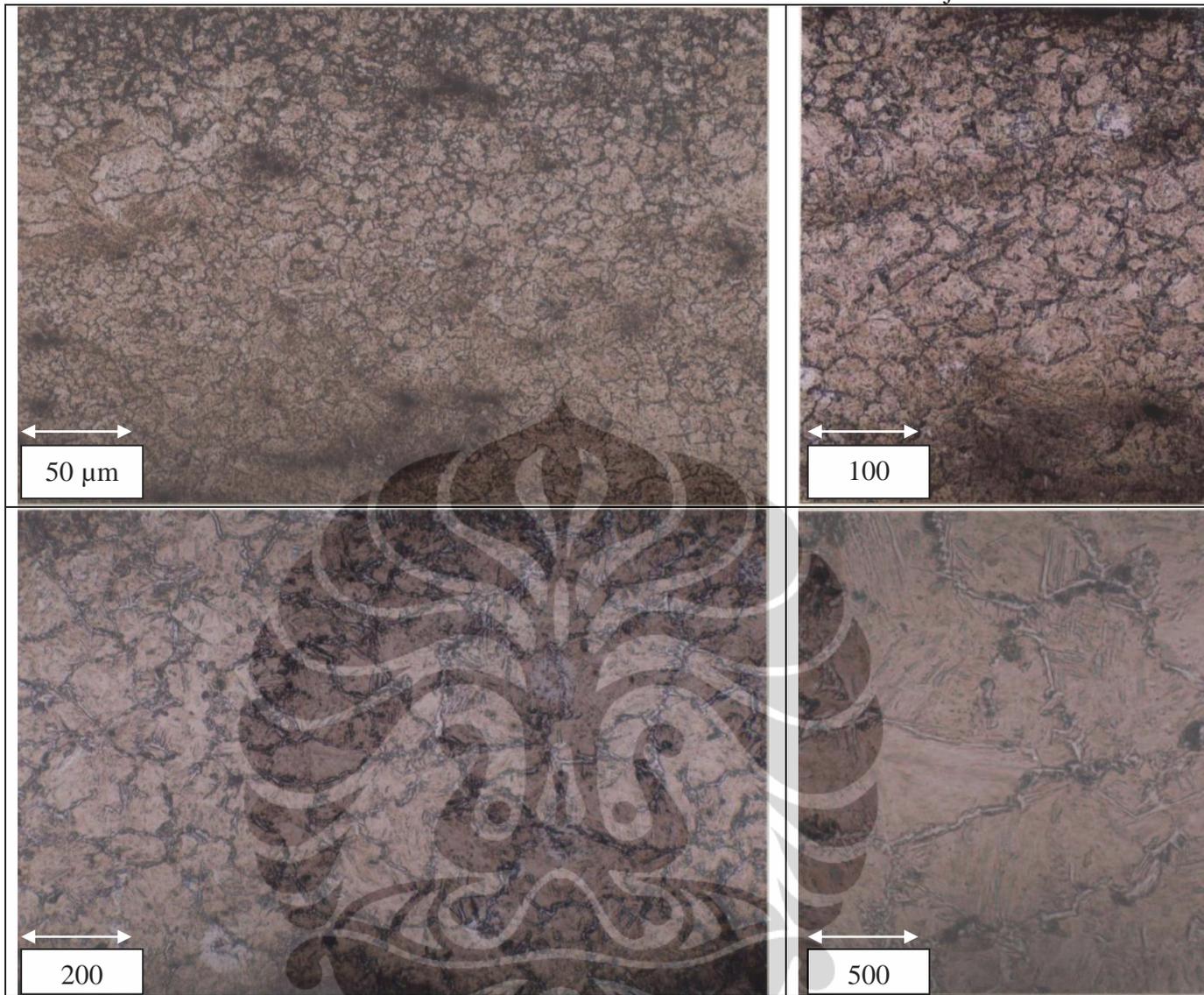
Hasil Foto Mikro sampel uji dengan pemanasan menggunakan pendinginan ruang
(sampel 1)= $9,5^{\circ}\text{C}/\text{detik}$



Hasil Foto Mikro sampel uji dengan pemanasan menggunakan heating jacket 450°C
(sampel 2= $7,6^{\circ}\text{C}/\text{detik}$)

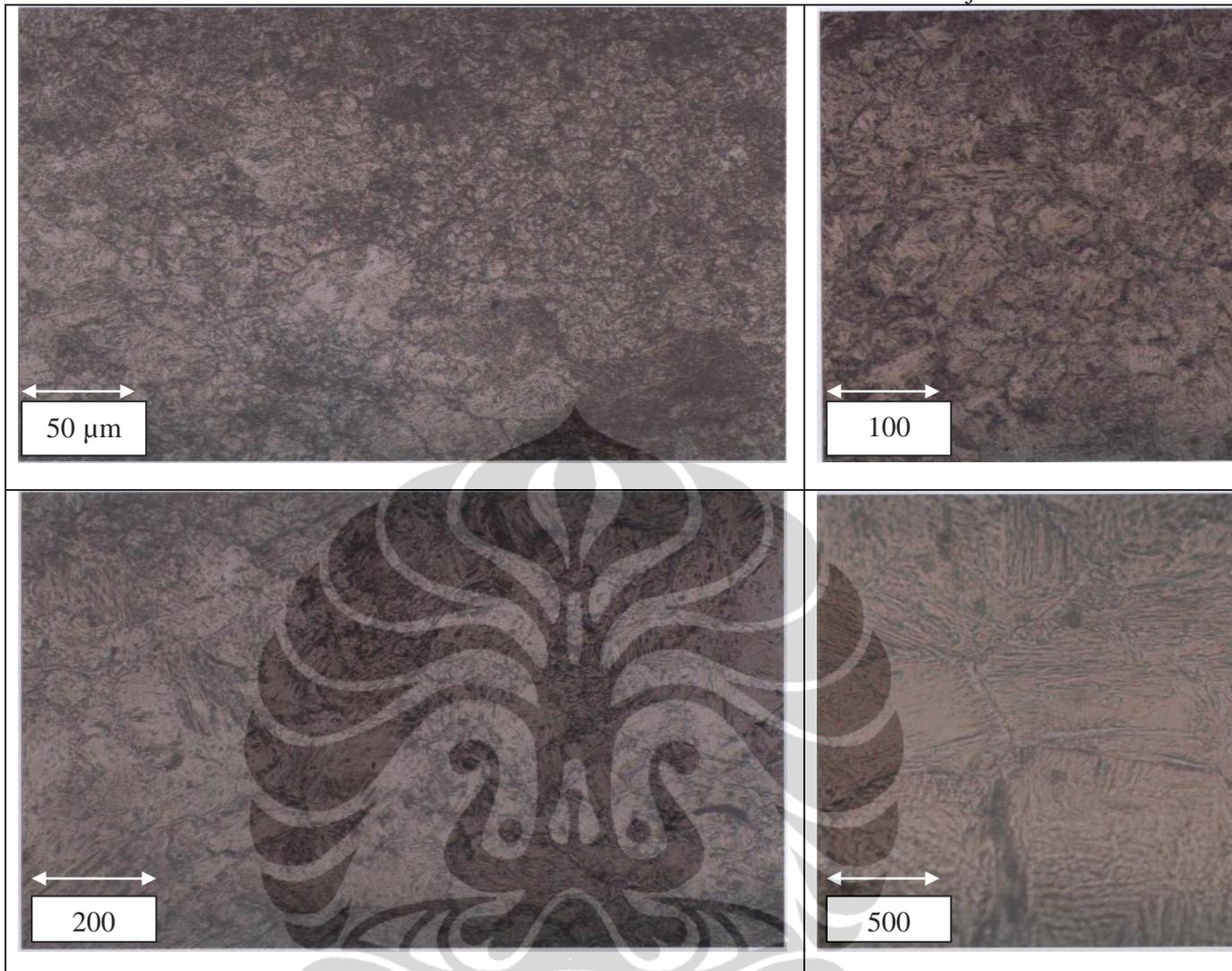


Hasil Foto Mikro sampel uji dengan pemanasan menggunakan heating jacket 50
⁰C(Sampel III =8,6° C/detik)



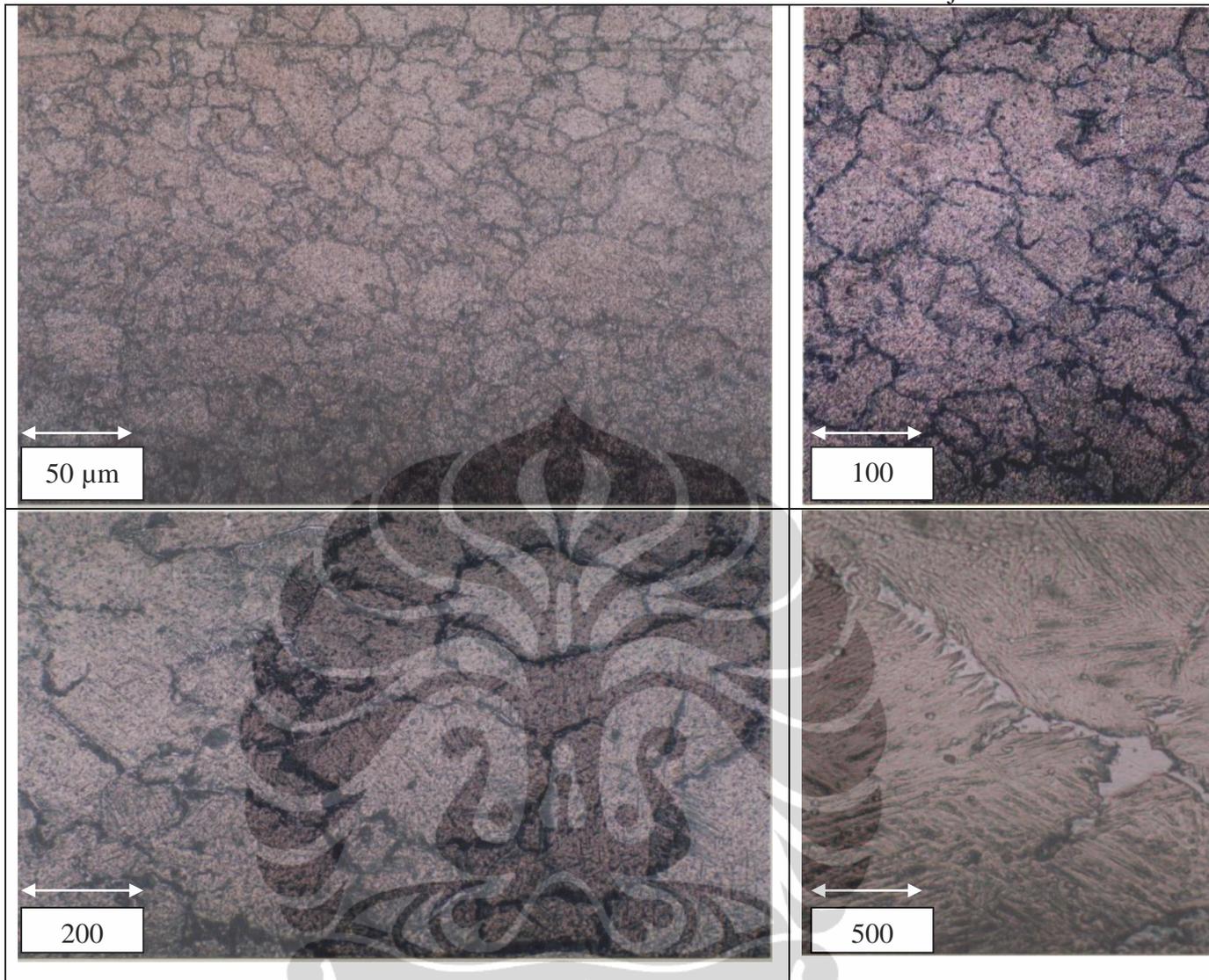
Hasil Foto Mikro sampel uji dengan pemanasan menggunakan heating jacket 250
⁰C(sampel IV=9,47⁰C/detik)

Lampiran H1
Struktur Mikro Baja A



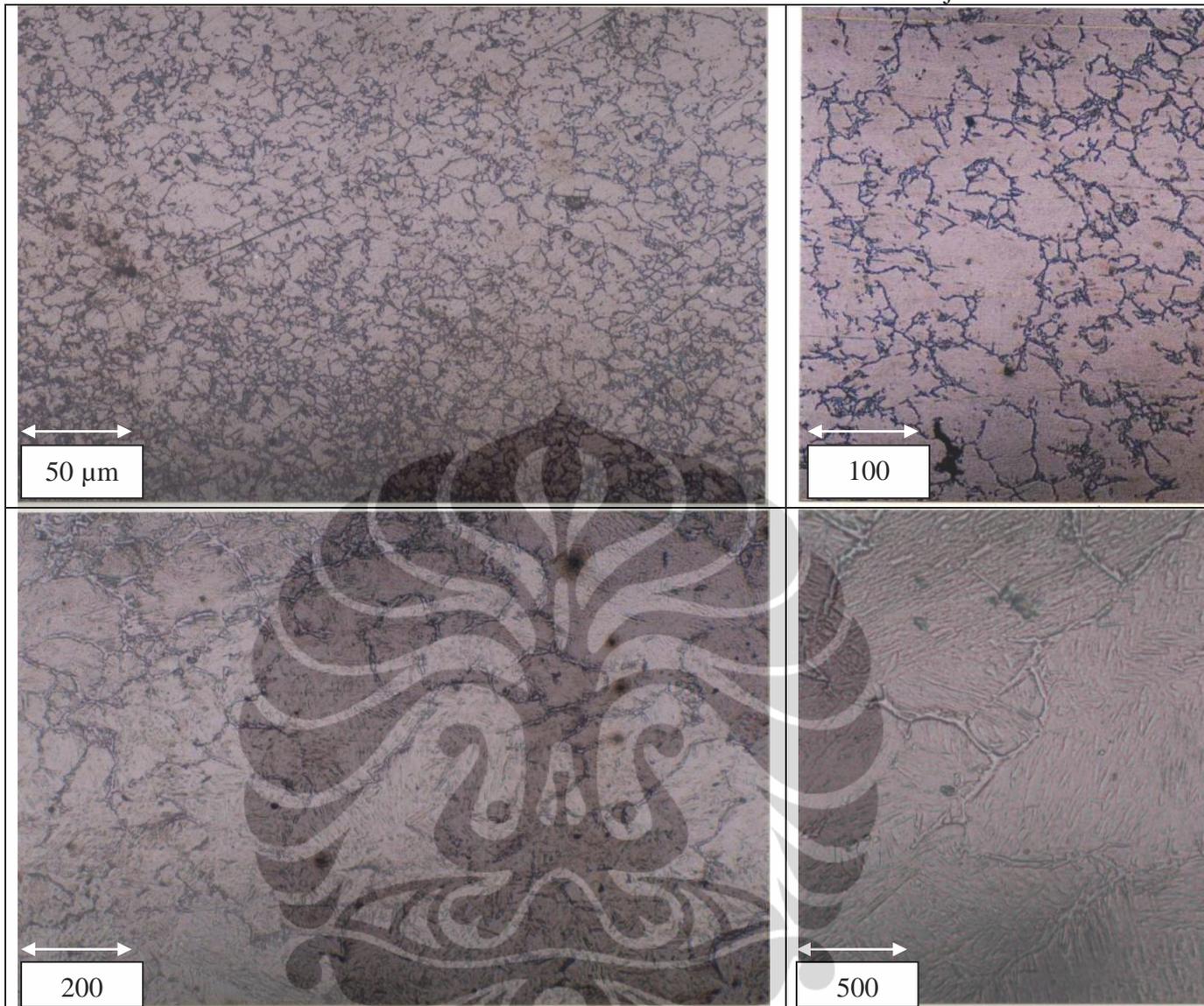
Hasil Foto Mikro sampel uji dengan pemanasan menggunakan heating jacket 150
⁰C(Sampel V=10,42⁰C/detik)

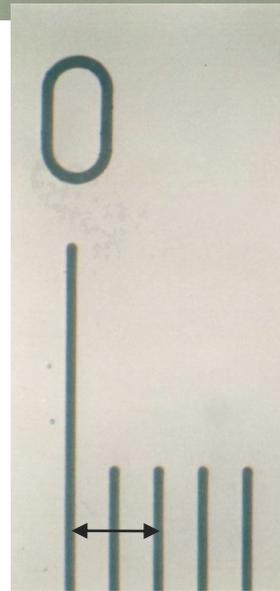
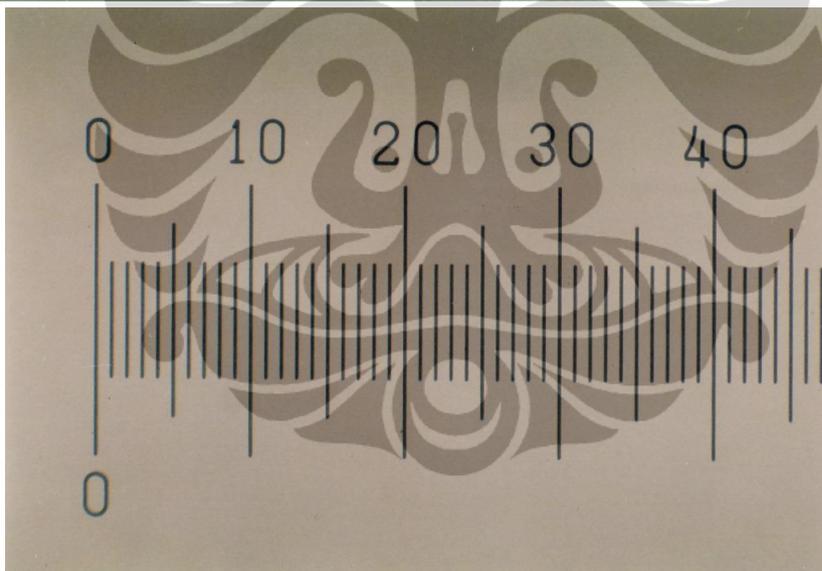
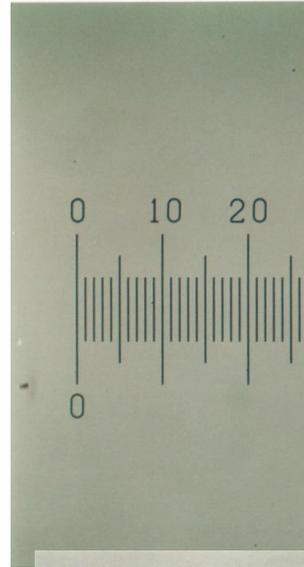
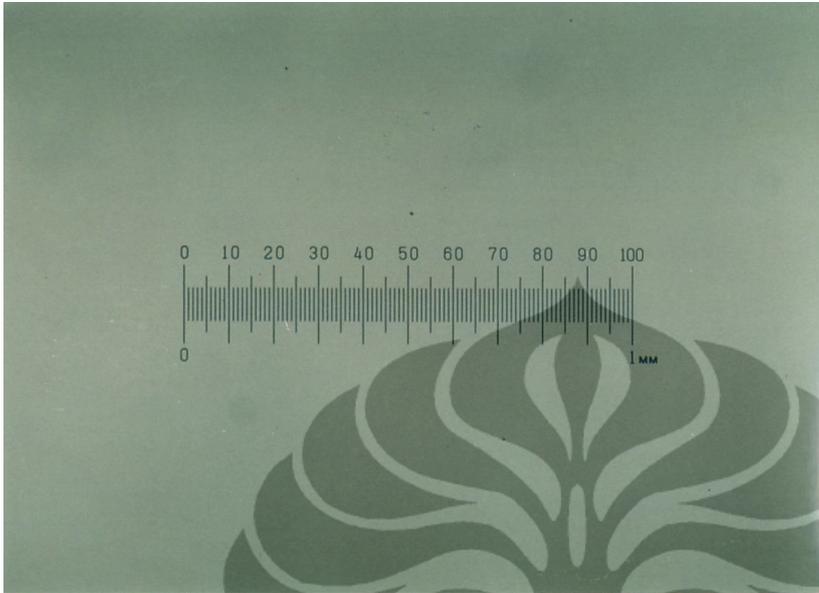
Lampiran H1
Struktur Mikro Baja A



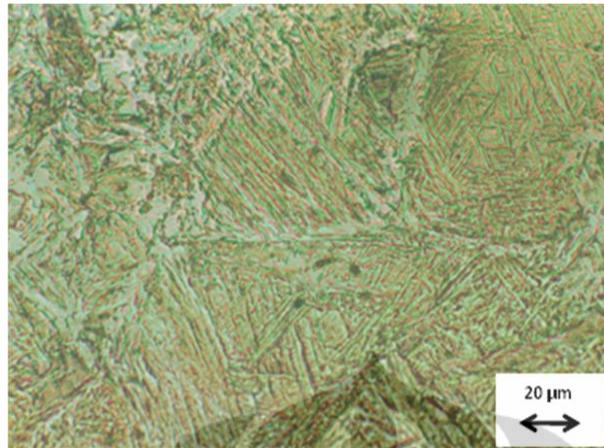
Hasil Foto Mikro sampel uji dengan pemanasan menggunakan kipas angin level
1(sampel VII=11,176°C/detik)

Lampiran H1
Struktur Mikro Baja A





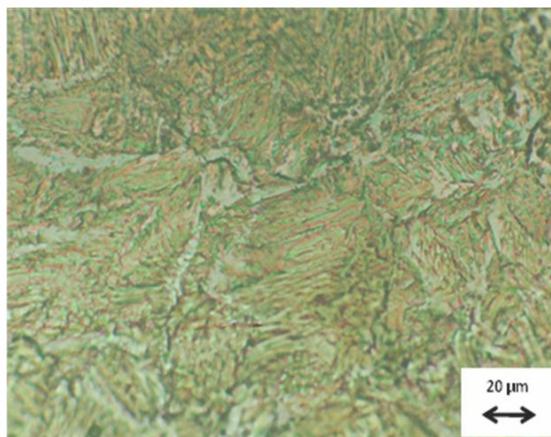
Lampiran H2
Struktur Mikro Baja B



500 X, CR 7,9°C/dtk



500 X, CR 8,3°C/dtk



500 X, CR 10,9°C/dtk

Lampiran H3 Struktur Mikro Baja C



200 X, CR 9,5°C/dtk

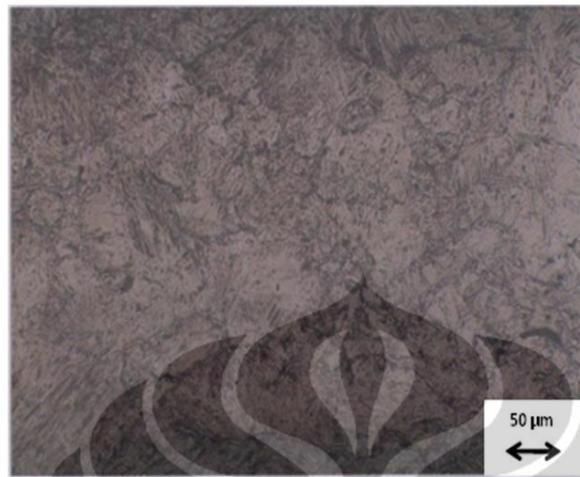


200 X, CR 7,6°C/dtk

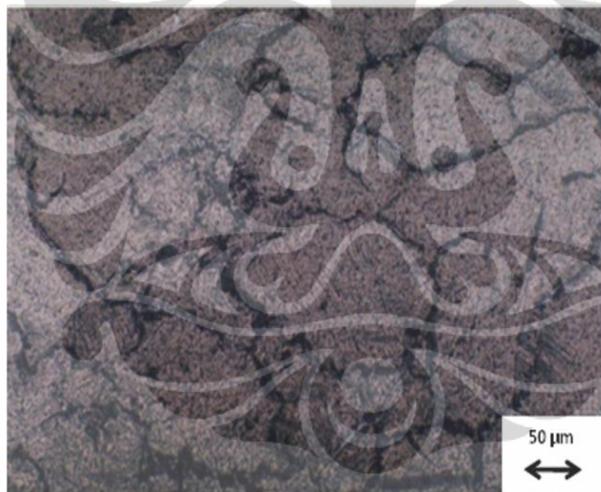


200 X , CR 8,6°C/dtk

Lampiran H3 Struktur Mikro Baja C

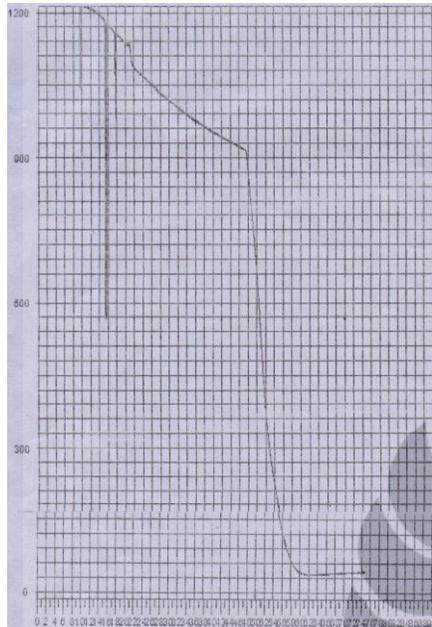


200 X , 9,47°C/dtk

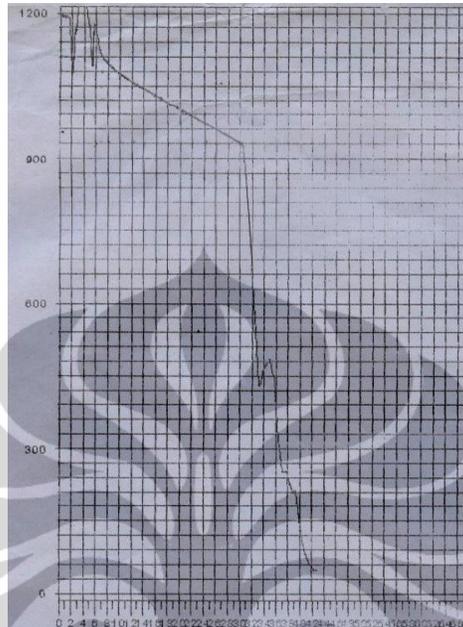


200 X, CR 10,42 °C/dtk

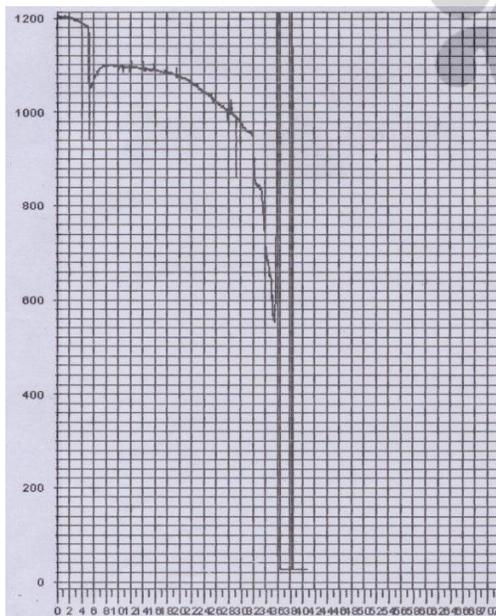
Lampiran I
Data Acquisition



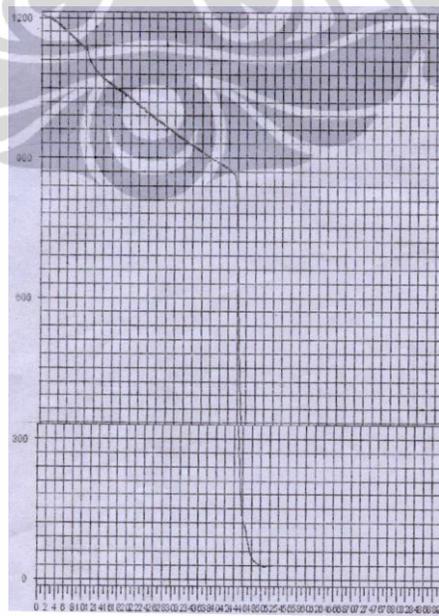
Sampel A,
7,5 °C/dtk



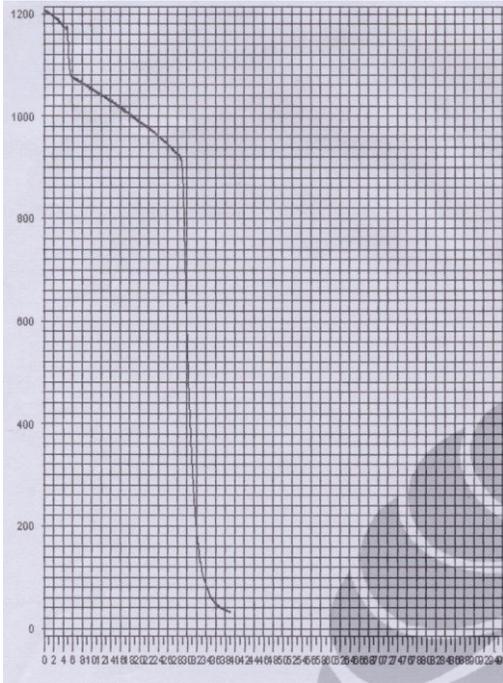
Sampel A,
7,7 °C/dtk



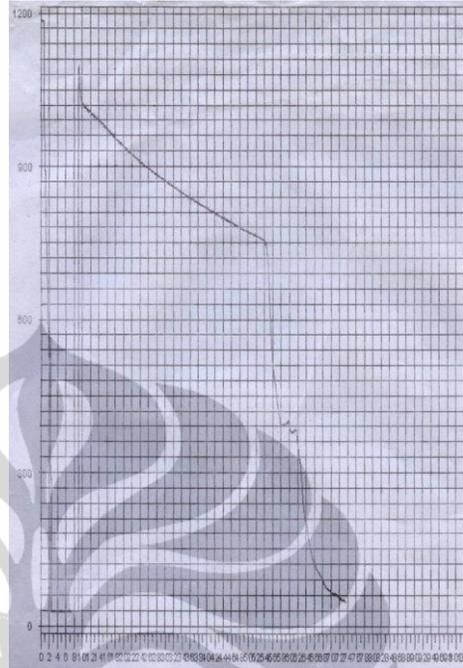
Sampel A,
7,8 °C/dtk



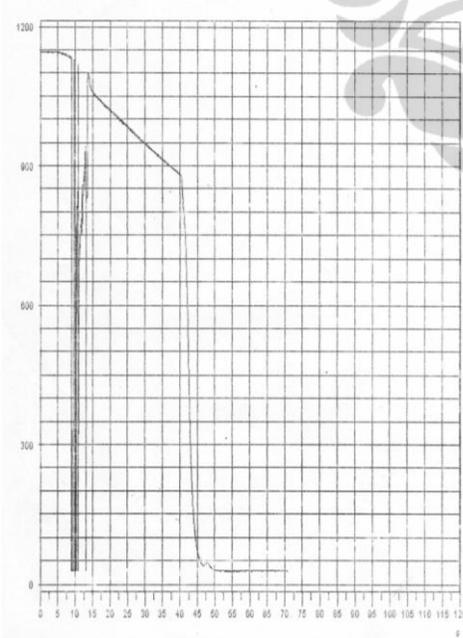
Sampel A,
8 °C/dtk



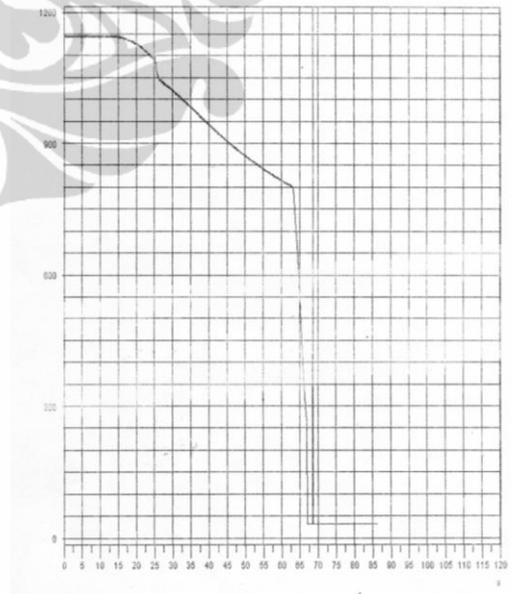
Sampel A,
8,1 °C/dtk



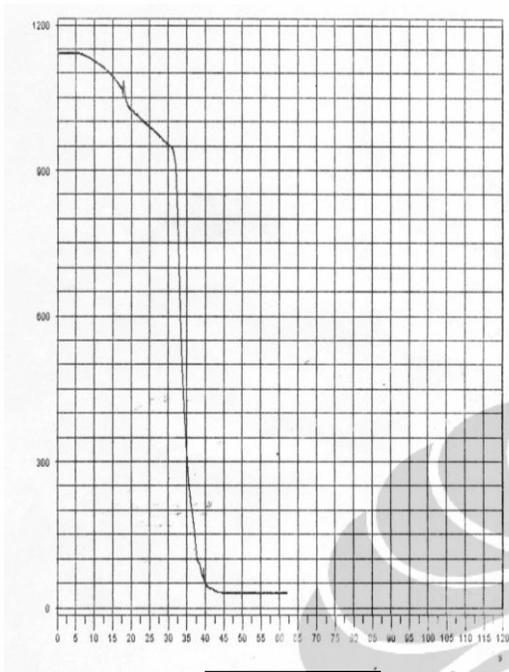
Sampel A,
9 °C/dtk



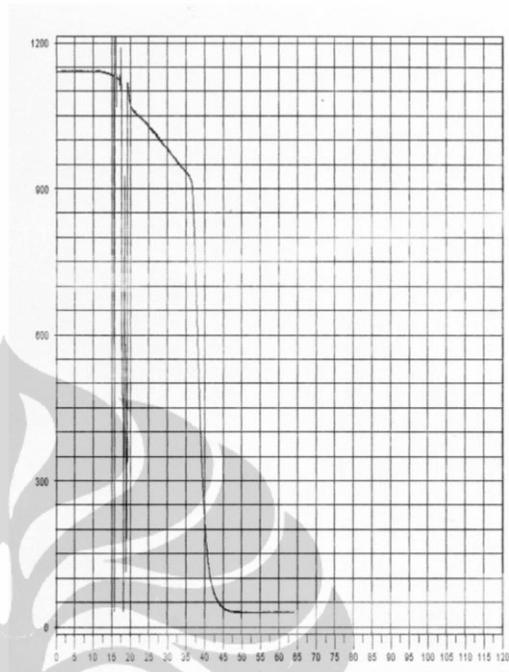
Sampel B
7,9°C/dtk



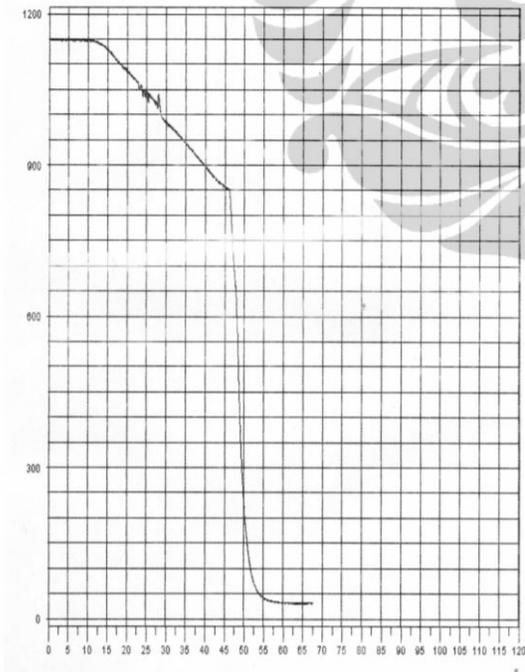
Sampel B
8 °C/dtk



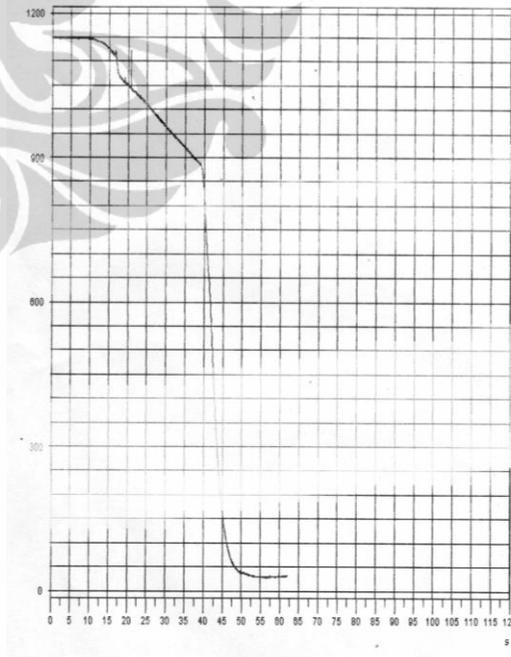
Sampel B
8,3°C/dtk



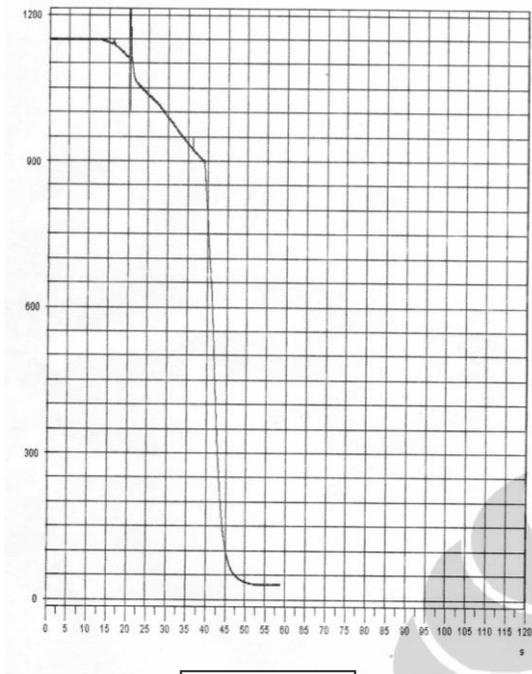
Sampel B
8,8°C/dtk



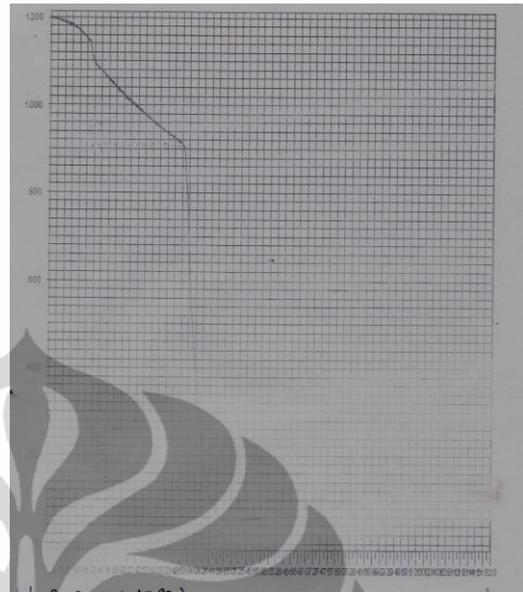
Sampel B
9,3°C/dtk



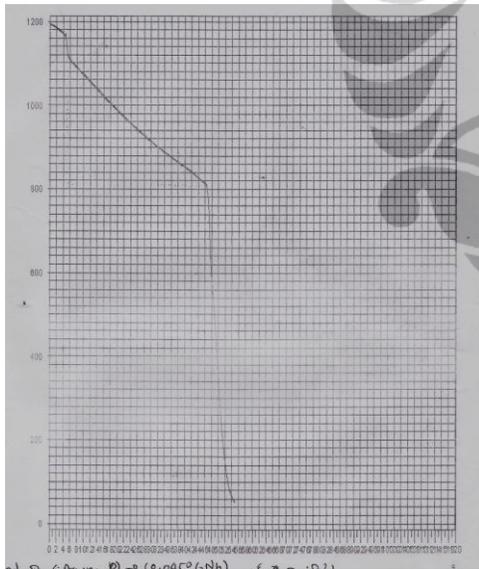
Sampel B
10,5°C/dtk



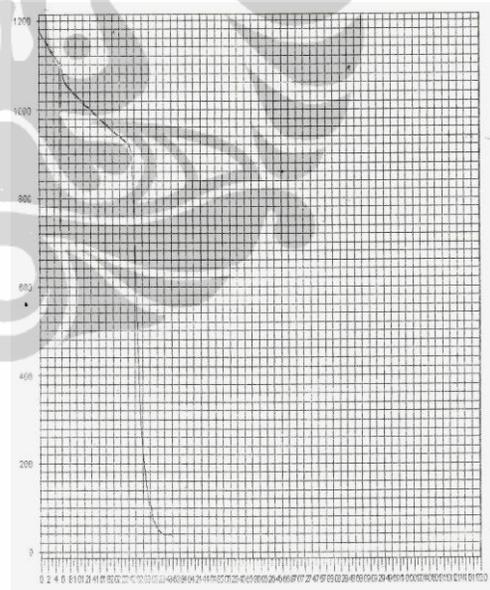
Sampel B
10,9°C/dtk



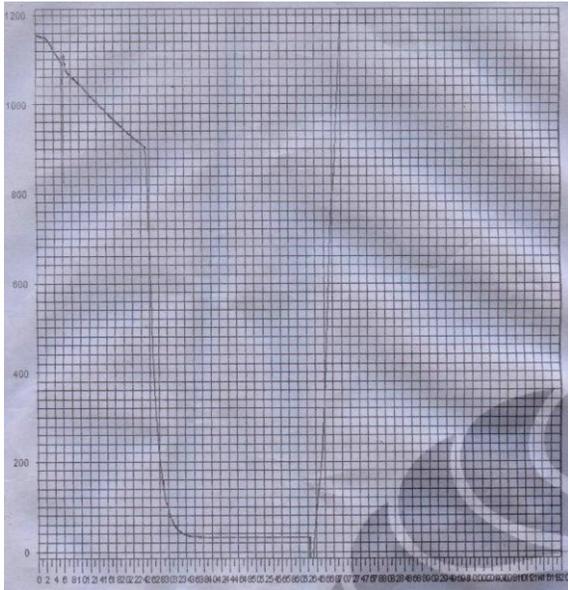
Sampel C
7,6°C/dtk



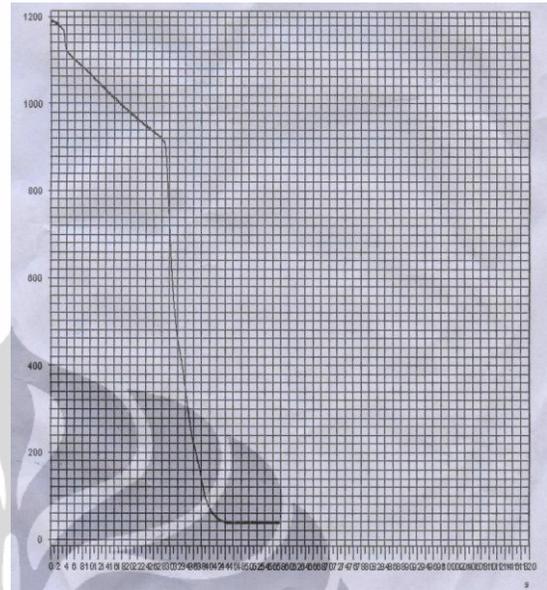
Sampel C
8,5°C/dtk



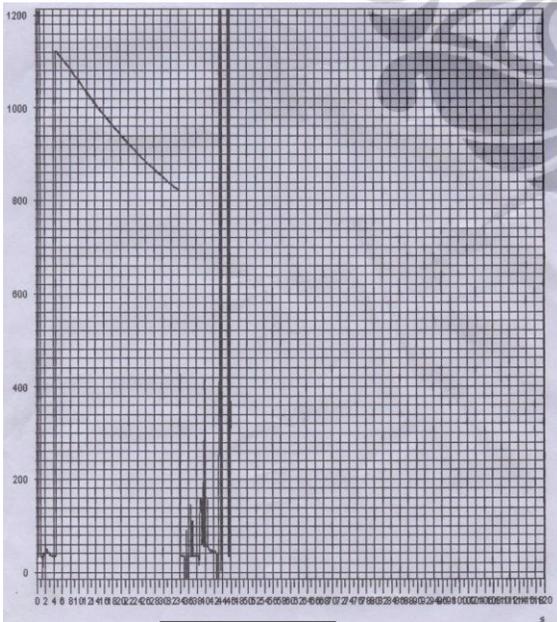
Sampel C
9,47°C/dtk



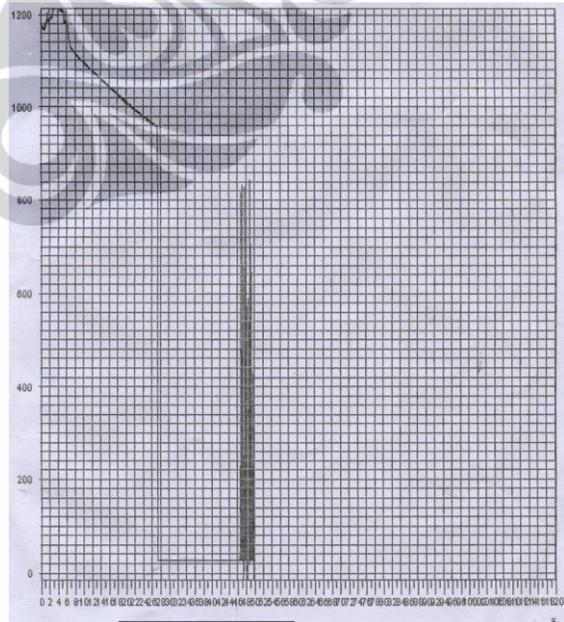
Sampel C
9,5°C/dtk



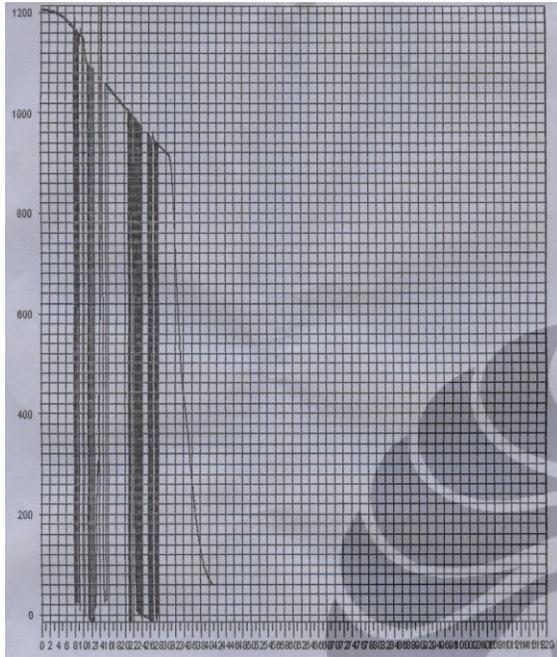
Sampel C
10,24°C/dt



Sampel C
11,1°C/dtk



Sampel C
11,1°C/dtk



Sampel C
12°C/dtk

Lampiran J
Perhitungan Diameter Rekristalisasi dan Diameter Austenit Prior
Berbagai Model Matematik Analisa Kinetika Pertumbuhan Butir
Non-Isotermal.

J1.

Diameter Rekristalisasi

$$D_{rek} = A d_o^{0,67} \varepsilon^{-0,67}$$

Dimana:

1. Baja Komposisi A

d_o adalah 133,28 μm (dari penelitian pendahuluan)

ε (def) penelitian rata-rata 0,35, dan nilai $A = 0,34-0,8$, untuk penelitian ini diambil nilai

$$A = 0,66 [2]$$

$$\rightarrow D_{rek} = 0,66 \cdot 133,28^{0,67} \cdot 0,35^{-0,67} \mu\text{m} = 35,36 \mu\text{m}$$

2. Baja Komposisi B

d_o adalah 81,47 μm (dari penelitian pendahuluan)

ε (def) penelitian rata-rata 0,35, dan nilai $A = 0,34-0,8$, untuk penelitian ini diambil nilai

$$A = 0,66 [2]$$

$$\rightarrow D_{rek} = 0,66 \cdot 81,47^{0,67} \cdot 0,35^{-0,67} \mu\text{m} = 25,43 \mu\text{m}$$

3. Baja Komposisi C

d_o adalah 65,33 μm (dari penelitian pendahuluan)

ε (def) penelitian rata-rata 0,35, dan nilai $A = 0,34-0,8$, untuk penelitian ini diambil nilai

$$A = 0,66 [2]$$

$$\rightarrow D_{rek} = 0,66 \cdot 65,33^{0,67} \cdot 0,35^{-0,67} \mu\text{m} = 21,94 \mu\text{m}$$

J.2.

**DATA BESAR BUTIR AUSTENIT BAJA A, B dan C HASIL
EKSPERIMEN VARIABEL KECEPATAN PENDINGINAN**

TYPE BAJA	Cr(°K/s)	dT(°K)	T(°K)	d(μm)
A	7.50	195	1398	99.41
	7.76	170	1383	96.9388
	7.80	156	1369	75.8643
	8.00	270	1407	70.4666
	8.10	180	1323	69.1841
	9.00	135	1308	65.2958
	12.30	135	1338	58.4325
	B	7.9	215	1378
8		290	1363	93.97
8.3		125	1348	78.78
8.8		150	1348	65.85
9.3		140	1263	62.07
10.5		200	1363	60.00
10.9		240	1413	47.8
C		7.6	190	1413
	8.5	200	1418	53.61
	9.47	170	1273	46.36
	9.5	180	1383	52.57
	11.176	250	1348	39.38
	11.4	240	1263	42.56
	12	380	1348	48.50

J.3.

a. **BESAR BUTIR AUSTENIT BAJA A HASIL MODEL
ISOTERMAL**

T (detik)	T _{eff} (°K)	d _{rek} (μm)	d _{rek} ⁿ (μm)	d ⁿ -d ₀ ⁿ	d(μm)
30	1338	35.36	9296193	1.29E+08	64.4611
30	1328	35.36	9E+06	96369748.3	60.69
30	1318	35.36	9296193	69370481.56	56.8356
30	1336	35.36	9296193	118458924	63.302
30	1268	35.36	9296193	14967459.18	43.7624
30	1262	35.36	9296193	12303887.4	42.6461
30	1292	35.36	9296193	31193494.9	49.0367

Contoh perhitungan T_{eff} adalah dengan menggunakan persamaan 2.35;

$$T_{eff} = \frac{-Q_{gg}}{R \ln \left(\frac{R}{Q_{gg}(T_f - T_i)} \left(T_f^2 \exp\left(\frac{-Q_{gg}}{RT_f}\right) - T_i^2 \exp\left(\frac{-Q_{gg}}{RT_i}\right) \right) \right)}$$

Dimana : nilai $Q_{gg} = 435 \text{ kJ/mol}$, mengacu kepada hasil penelitian Sellars (2) yang berlaku untuk baja HSLA-C-Mn-Nb, yang menjadi acuan berbagai penelitian pertumbuhan butir austenit. R adalah konstanta gas. T_i adalah temperatur saat baja keluar dari proses canai dan T_f adalah temperatur sesaat sebelum dilakukan pendinginan cepat. (Dapat dilihat pada lampiran J2 di atas) Jadi pada benda uji. A, dengan temperatur deformasi 1398°K dan turun sebanyak 195°K , dimasukkan dalam persamaan 2.35, maka didapat Temperatur efektif (T_{eff}) sebesar 1338°K . Dengan cara yang sama didapat Temperatur efektif untuk semua benda uji A,B dan C pada berbagai kondisi seperti pada lampiran J3a, J4a, dan J5a. Perhitungan besar butir dilakukan menggunakan persamaan 2.33 dengan T adalah T_{eff} dan t adalah waktupertumbuhan butir rata-rata dalam eksperimen adalah 30 detik.

b. BESAR BUTIR AUSTENIT BAJA A HASIL MODEL NON-ISOTERMAL (PERSAMAAN 5.3) VARIABEL KECEPATAN PENDINGINAN

Cr($^\circ\text{K/s}$)	dT($^\circ\text{K}$)	T($^\circ\text{K}$)	d rek(μm)	d(μm)	$d^n - d_0^n$	
7	150	1350	35.36	111.2456427	1.6E+09	B= 3.0E+10
8	150	1350	35.36	78.30962041	3.2E+08	m= 12
9	150	1350	35.36	58.27041081	7.9E+07	
10	150	1350	35.36	46.38441545	2.2E+07	
11	150	1350	35.36	40.10305561	7083229	
12	150	1350	35.36	37.27718295	2493266	
13	150	1350	35.36	36.13616062	954165	

J.4.

a. BESAR BUTIR BESAR BUTIR AUSTENIT BAJA B HASIL MODEL ISOTERMAL

T (detik)	T _{eff} (°K)	d _{rek} (μm)	d _{rek} ⁿ (μm)	d ⁿ -d _o ⁿ	d(μm)
30	1353	25.4	2E+06	1.94E+08	69.4089
30	1304	25.4	2E+06	45288606.03	50.8762
30	1295	25.4	2097740	34263095.9	47.7311
30	1293	25.4	2097740	32186412.63	47.2588
30	1202	25.4	2097740	1501660.563	28.6423
30	1297	25.4	2097740	36466735.31	48.5232
30	1346	25.4	2097740	158485417.8	66.6672

b. BESAR BUTIR AUSTENIT BAJA B HASIL MODEL NON-ISOTERMAL (PERSAMAAN 5.3) VARIABEL KECEPATAN PENDINGINAN

Cr(°K/s)	dT(°K)	T(°K)	d _{rek} (μm)	d(μm)	d ⁿ -d _o ⁿ	
7	150	1350	25.43	123.8041991	2.61E+09	B= 6,0E+10
8	150	1350	25.43	86.26436009	5.12E+08	m= 12,2
9	150	1350	25.43	62.86549981	1.22E+08	
10	150	1350	25.43	47.70515719	33663151	
11	150	1350	25.43	37.85373793	10523592	
12	150	1350	25.43	31.77869758	3640353	
13	150	1350	25.43	123.8041991	2.61E+09	

J.5.

a. BESAR BUTIR BESAR BUTIR AUSTENIT BAJA B HASIL MODEL ISOTERMAL

T (detik)	T _{eff} (°K)	d _{rek} (μm)	d _{rek} ⁿ (μm)	d ⁿ -d _o ⁿ (μm)	d(μm)
30	1354	25.4	949966	1.99E+08	69.9608
30	1357	25.4	949966	217220562.1	71.2961
30	1222	25.4	949966	3062802.308	29.3381
30	1327	25.4	949966	90815361.57	58.8145
30	1373	25.4	949966	340509277.9	78.7585
30	1283	25.4	949966	23476457.84	43.8275
30	1203	25.4	949966	1557017.816	26.4261
30	1270	25.4	949966	15461591.33	40.1205

b.BESAR BUTIR AUSTENIT BAJA C HASIL MODEL NON-ISOTERMAL (PERSAMAAN 5.3) VARIABEL KECEPATAN PENDINGINAN

Cr(°K/s)	dT(°K)	T(°K)	d rek(μm)	d(μm)	d ⁿ -d ₀ ⁿ (μm)	
7	150	1350	21.94	111.0113294	1.33E+09	B= 8,0E+10
8	150	1350	21.94	76.43215052	2.87E+08	m= 12,6
9	150	1350	21.94	55.11110201	74170413	
10	150	1350	21.94	41.42544334	22081042	
11	150	1350	21.94	32.61526857	7379105	
12	150	1350	21.94	27.25710292	2712909	

J.6

DATA BESAR BUTIR AUSTENIT BAJA A HASIL PENYELESAIAN T.WANJUN dkk [89] SIMULASI VARIABEL KECEPATAN PENDINGINAN

Cr(°K/s)	dT(°K)	T(°K)	d rek(μm)	d(μm)	d ⁿ -d ₀ ⁿ (μm)	
7	150	1350	35.36	107.3887378	1.37E+09	B= 3,0E+10
8	150	1350	35.36	76.97509287	2.99E+08	m= 11,4
9	150	1350	35.36	58.16641113	78006011	
10	150	1350	35.36	46.7833606	23468897	
11	150	1350	35.36	40.54850772	7918010	
12	150	1350	35.36	37.58414899	2936476	
13	150	1200	35.36	106.5812	1.32E+09	

Lampiran J

J.7

DATA BESAR BUTIR AUSTENIT BAJA B HASIL MODEL T.WANJUN dkk [89] SIMULASI VARIABEL KECEPATAN PENDINGINAN

Cr(°K/s)	dT(°K)	T(°K)	d rek(μm)	d(μm)	d ⁿ -d ₀ ⁿ (μm)	
7	150	1350	25.43	119.8150645	1.37E+09	B= 6.0E+10
8	150	1350	25.43	85.23893617	2.99E+08	m= 11,5
9	150	1350	25.43	63.25691868	78006011	
10	150	1350	25.43	48.73833895	23468897	
11	150	1350	25.43	39.07244248	7918010	
12	150	1350	25.43	32.86675	2936476	
13	150	1350	25.43	119.8150645	1.37E+09	

J.8**DATA BESAR BUTIR AUSTENIT BAJA C HASIL MODEL T.WANJUN
dkk [89] SIMULASI VARIABEL KECEPATAN PENDINGINAN**

Cr(°K/s)	dT(°K)	T(°K)	d rek(μm)	d(μm)	d ⁿ -do ⁿ (μm)	
7	150	1350	21.94	107.4339104	1.38E+09	B= 8,0E+10
8	150	1350	21.94	75.52317097	2.82E+08	m= 11,9
9	150	1350	21.94	55.45464758	69338676	
10	150	1350	21.94	42.32417611	19790712	
11	150	1350	21.94	33.66412307	6366320	
12	150	1350	21.94	28.1766901	2260500	
13	150	1350	21.94	107.4339104	1.38E+09	



Lampiran K

Perhitungan Simpangan Baku Baja A

Jml Perhitungan	7,5 C/s	diameter	(d-d̄) ²	7,7 C/s	diameter	(d-d̄) ²	7,8 C/s	diameter	(d-d̄) ²
1	8	90.21	84.73	8	89.29	58.57	9	80.18	18.65
2				7	102.04	26.03	11	65.60	105.26
3	7	103.09	13.56	7	102.04	26.03	11	65.60	105.26
4	7	103.09	13.56	7	102.04	26.03	10	72.16	13.69
5	7	103.09	13.56	7	102.04	26.03	9	80.18	18.65
6	7	103.09	13.56	7	102.04	26.03	10	72.16	13.69
7				8	89.29	58.57	10	72.16	13.69
8				8	89.29	58.57	9	80.18	18.65
9	7	103.09	13.56	7	102.04	26.03	9	80.18	18.65
10	8	90.21	84.73	8	89.29	58.57	8	90.21	205.69
Σ	51	695.88	237.23	74	969.39	390.46	96	758.64	531.89
Perbesaran	100X			100X			100X		
d rata - rata (d̄)	99.4109			96.93878			75.86431		
Simpangan	5.821572			6.586706			7.687555		

Jml Perhitungan	8 C/s	diameter	(d-d̄) ²	8,1 C/s	diameter	(d-d̄) ²	9 C/s	diameter	(d-d̄) ²
				12	66.67	6.34	10	71.43	37.61
	11	64.94	30.60	12	66.67	6.34	13		
	9	79.37	79.18	12	66.67	6.34	9		
	9	79.37	79.18	11	72.73	12.55	11	64.94	0.13
	11	64.94	30.60	11	72.73	12.55	13		
	11	64.94	30.60	11	72.73	12.55	12	59.52	33.32
	11	64.94	30.60	11	72.73	12.55	12	59.52	33.32
	10	71.43	0.93	11	72.73	12.55	15		
	9	79.37	79.18	13	61.54	58.46	11	64.94	0.13
	11	64.94	30.60	12	66.67	6.34	10	71.43	37.61
Σ	92	634.20	391.46	116	691.84	146.58	116	391.77	142.11
Perbesaran	100X			100X			100X		
d rata - rata (d̄)	70.46657			69.18415			65.29582		
Simpangan	8.848317			5.414352			5.3313		

Lampiran K (lanjutan)

Perhitungan Simpangan Baku
Baja A

Jml Perhitungan	12,3 C/s	diameter	(d- \bar{d}) ²
1	15	55.56	8.28
2	15	55.56	8.28
3	16	52.08	40.31
4	15	55.56	8.28
5	14	59.52	1.19
6	14	59.52	1.19
7	16	52.08	40.31
8	15	55.56	8.28
9	12	69.44	121.26
10	12	69.44	121.26
Σ	144	584.33	358.64
Perbesaran	100X		
d rata - rata (\bar{d})	58.43254		
Simpangan	6.312587		

CR (C/dtk)	d(μ m)	S
7.5	99.41	5.82
7.76	96.9388	6.59
7.8	75.8643	7.69
8	70.4666	8.85
8.1	69.1841	5.41
9	65.2958	5.33
12.3	58.4325	6.31

Lampiran K (lanjutan)

Perhitungan Simpangan Baku
Baja B

Jml Perhitungan	8,3 C/dtk	diameter (μm)	$(d-\bar{d})^2$	7,9 C/dtk	diameter (μm)	$(d-\bar{d})^2$	8 C/dtk	diameter (μm)	$(d-\bar{d})^2$
1	12	65.00	189.89	10	78.00	59.44	8	97.50	12.46
2	9	86.67	62.20	8	97.50	139.00	9	86.67	53.34
3	10	78.00	0.61	11	70.91	219.07	8	97.50	12.46
4	11	70.91	61.95	8	97.50	139.00	8	97.50	12.46
5	10	78.00	0.61	10	78.00	59.44	10	78.00	255.04
6	10	78.00	0.61	9	86.67	0.92	8	97.50	12.46
7	9	86.67	62.20	7	111.43	661.44	7	111.43	304.80
8	8	97.50	350.44	9	86.67	0.92	8	97.50	12.46
9	10	78.00	0.61	9	86.67	0.92	9	86.67	53.34
10	10	78.00	0.61	10	78.00	59.44	8	97.50	12.46
Σ	99		729.72	91		1339.60	83		741.29
Perbesaran	100X			100X			100X		
d rata - rata (d)	78.78			85.71			93.97		
Simpangan	9.004437376			12.20017286			9.075518791		

Jml Perhitungan	10,5 C/dtk	diameter (μm)	$(d-\bar{d})^2$	10,9 C/dtk	diameter (μm)	$(d-\bar{d})^2$	9,3 C/dtk	diameter (μm)	$(d-\bar{d})^2$
1	10	54.00	36.00	9	60.00	148.84	8	67.50	29.48
2	10	54.00	36.00	11	49.09	1.67	7	77.14	227.19
3	8	67.50	56.25	10	54.00	38.44	9	60.00	4.28
4	9	60.00	0.00	10	54.00	38.44	7	77.14	227.19
5	7	77.14	293.88	14	38.57	85.17	10	54.00	65.12
6	9	60.00	0.00	11	49.09	1.67	9	60.00	4.28
7	11	49.09	119.01	14	38.57	85.17	12	45.00	291.38
8	10	54.00	36.00	11	49.09	1.67	10	54.00	65.12
9	8	67.50	56.25	13	41.54	39.21	8	67.50	29.48
10	8	67.50	56.25	10	54.00	38.44	7	77.14	227.19
Σ	90		689.64	113		478.70	87		1170.75
Perbesaran	200X			200X			200X		
d rata - rata (d)	60			47.8			62.07		
Simpangan	8.753639341			7.29			11.40539525		

Jml Perhitungan	8,8 C/dtk	diameter (μm)	$(d-\bar{d})^2$
1	7	77.14285714	127.5286224
2	9	60	34.2225
3	9	60	34.2225
4	9	60	34.2225
5	9	60	34.2225
6	7	77.14285714	127.5286224
7	9	60	34.2225
8	10	54	140.4225
9	7	77.14285714	127.5286224
10	6	90	583.2225
Σ	82	675.4285714	1277.343367
Perbesaran	200X		
d rata - rata (\bar{d})	65.85		
Simpangan	11.9133136		

CR (C/dtk)	d(μm)	S
7.9	85.71	12.2
8	93.97	9.07
8.3	78.78	9
8.8	65.85	11.91
9.3	62.07	11.4
10.5	60	8.75
10.9	47.8	7.29

Lampiran K (lanjutan)

Perhitungan Simpangan Baku Baja C

Jml Perhitungan	7,6 C/s	diameter	$(d-\bar{d})^2$	8,5 C/s	diameter	$(d-\bar{d})^2$	9,47 C/s	diameter	$(d-\bar{d})^2$
1								47.22	0.732736
2					47.38	38.84406		47.22	0.732736
3		81.72	5.684818		53.06	0.305256		47.07	0.498436
4		81.61	6.221461					49.84	12.08258
5		81.84	5.12699		56.72	9.656556		42.94	11.72378
6					57.18	12.72706		43.08	10.78466
7		80.22	15.08768		56.84	10.41676		49.84	12.08258
8		87.74	13.21842		53.55	0.003906		46.97	0.367236
9		87.86	4.6225		50.57	9.256806		46.92	0.309136
10		87.74	13.21842		53.6	0.000156		42.54	14.62298
Σ	0	588.73	63.18028		428.9	81.21055	0	463.64	63.93684
Perbesaran	100X			100X			100X		
d rata - rata (\bar{d})	84.10429			53.6125			46.364		
Simpangan	3.245003			3.406099			2.665351		

Jml Perhitungan	9,5 C/s	diameter	(d- \bar{d}) ²	11,176 C/s	diameter	(d- \bar{d}) ²	11,4 C/s	diameter	(d- \bar{d}) ²
1					38.79	0.353364		41.3	1.597696
2					42.57	10.14776		39.34	10.39418
3		52.63	0.002669		40.8	2.003798		41.3	1.597696
4		59.15	43.1868		35.94	11.8642		43.18	0.379456
5		52.52	0.003403		40.84	2.118642		43.04	0.226576
6								43.18	0.379456
7		52.03	0.300669		37.29	4.386698		43.18	0.379456
8		49.75	7.999469		40.76	1.892153		45.16	6.739216
9		49.39	10.16547		37.25	4.555853		41.04	2.322576
10					40.22	0.698153		44.92	5.550736
Σ	0	315.47	61.65848		354.46	38.02062		425.64	29.56704
Perbesaran	100X			100X			100X		
d rata - rata (\bar{d})	52.57833			39.38444			42.564		
Simpangan	3.511652			2.180041			1.812519		

Cr (C/ dtk)	d (μ m)	S
7.6	84.10429	3.25
8.5	53.6125	3.41
9.47	46.364	2.66
9.5	52.57	3.51
11.176	39.3844	2.18
11.4	42.564	1.81

Penyelesaian Modifikasi Model Kinetika Pertumbuhan Butir Sellars

Dengan Pendekatan Integral Partial T.Wanjun, dkk[89]

Penyelesaian $\rightarrow \int_{T_1}^{T_2} e^{-Q/RT} dT$ Menurut T. Wanjun dkk [89]

$$\begin{aligned} \int_{T_1}^{T_2} \ell^{-Q/RT} dT &= \int_{T_1}^{T_2} \partial e^{-Q/RT} \times RT^2/Q \\ &= \frac{R}{Q} T^2 \partial e^{-Q/RT} \\ &= \frac{R}{Q} T^2 e^{-Q/RT} - \int_{T_1}^{T_2} \ell^{-Q/RT} d\left(\frac{R}{Q} T^2\right) \\ &= \frac{R}{Q} T^2 e^{-Q/RT} - \int_{T_1}^{T_2} \ell^{-Q/RT} \cdot \frac{R}{E} 2 T dT \\ &= \frac{R}{Q} T^2 e^{-Q/RT} - \frac{2R}{Q} \int_{T_1}^{T_2} T \ell^{-Q/RT} dT \end{aligned}$$

$$\int_{T_1}^{T_2} \ell^{-Q/RT} dT + \int_{T_1}^{T_2} \frac{2RT}{Q} \ell^{-Q/RT} dT = \frac{R}{Q} T^2 e^{-Q/RT}$$

$$\int_{T_1}^{T_2} \left(1 + 2\frac{RT}{Q}\right) \ell^{-Q/RT} dT = \frac{R}{Q} T^2 e^{-Q/RT}$$

Bila $x = \frac{RT}{Q} \rightarrow dT = \frac{Q}{R} dx$

$$\int_{T_1}^{T_2} (1 + 2x) \ell^{-1/x} \cdot \frac{Q}{R} dx = x T e^{-Q/RT}$$

[Type text]

$$\int_{T1}^{T2} (1+2x) e^{-1/x} \cdot dx = \frac{R}{Q} T x e^{-1/x}$$

$$= x^2 \cdot e^{-1/x} \quad \text{kedua ruas dibagi dengan } \int_{x1}^{x2} e^{-1/x}$$

$$\int_{x1}^{x2} (1+2x) e^{-1/x} \cdot dx / \int_{x1}^{x2} e^{-1/x} dx = x^2 \cdot e^{-1/x} / \int_{x1}^{x2} e^{-1/x}$$

$$1 + 2 \int_{x1}^{x2} x e^{-1/x} dx / \int_{x1}^{x2} e^{-1/x} dx = x^2 \cdot e^{-1/x} / \int_{x1}^{x2} e^{-1/x}$$

Misalkan

$$\int_{x1}^{x2} x e^{-1/x} dx / \int_{x1}^{x2} e^{-1/x} = k(x) \text{ , maka :}$$

$$1 + 2 k(x) = x^2 \cdot e^{-1/x} / \int_{x1}^{x2} e^{-1/x} \rightarrow \int_{x1}^{x2} e^{-1/x} dx = x^2 \cdot e^{-1/x} / 1 + 2k(x)$$

$$\text{Dimana } x = \frac{RT}{Q} \rightarrow \frac{1}{x} = \frac{Q}{RT}$$

$$\frac{dx}{dt} = \frac{R}{Q} \rightarrow dx = \frac{R}{Q} dT$$

$$\text{Jadi, } \int_{T1}^{T2} e^{-Q/RT} dT = Q/R \cdot R^2 T^2 / Q^2 \cdot e^{-Q/RT} / 1 + 2 k(x)$$

$$\int_{T1}^{T2} e^{-Q/RT} dT = RT^2 \cdot e^{-Q/RT} / Q (1 + 2 k(x)),$$

[Type text]

Dimana untuk batasan temperatur dalam penelitian ;

$876^{\circ}\text{C} < T < 1090^{\circ}\text{C}$, atau $1149^{\circ}\text{K} < T < 1363^{\circ}\text{K}$ atau

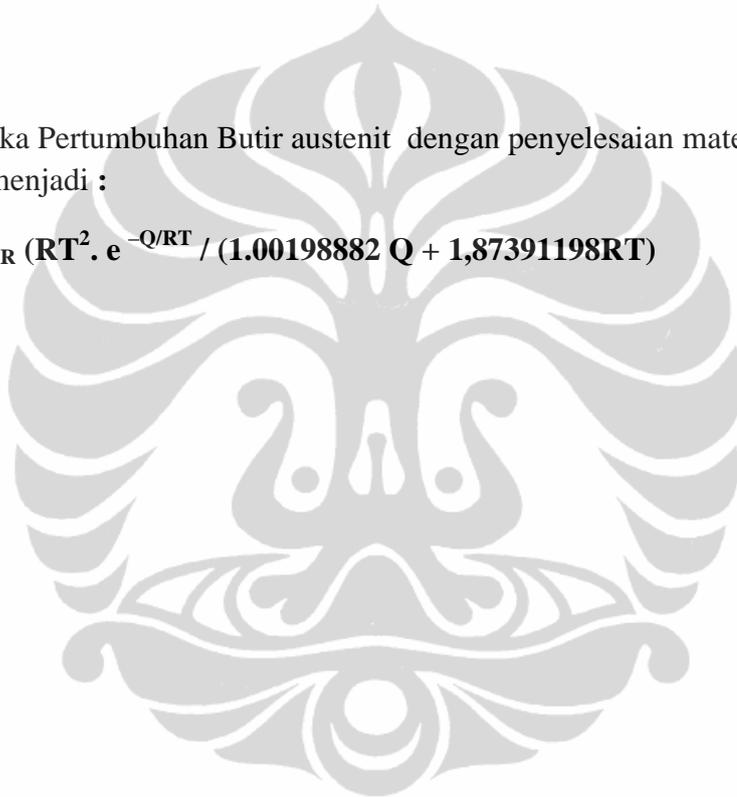
$0,022 < x < 0,026$, didapat

$$k(x) = 99441 \times 10^{-8} + 93695599 \times RT/Q$$

$$\int_{T_1}^{T_2} e^{-Q/RT} dT = RT^2 \cdot e^{-Q/RT} / (1.00198882 Q + 1,87391198RT)$$

Model Kinetika Pertumbuhan Butir austenit dengan penyelesaian matematik Wanjun dkk menjadi :

$$D^n - D_0^n = A/C_R (RT^2 \cdot e^{-Q/RT} / (1.00198882 Q + 1,87391198RT))$$



[Type text]

Universitas Indonesia



[Type text]

Universitas Indonesia

Perbandingan Penyimpangan Perhitungan Besar Butir Austenit

Isotermal dan Non-Isotermal

a. Baja A

$T_{\text{Eff}} (^{\circ}\text{K})$	d Model Isotermal (μm)	Dev. model isothermal (%)	T Model ($^{\circ}\text{K}$)	d Model non-Isotermal (μm)	Dev.model non-isoterm (%)	d Eksp (μm)
1338	64.46	35.15	1350	94.77	4.66	99.41
1328	60.69	37.39	1350	86.21	11.05	96.93
1318	56.83	25.07	1350	84.92	11.94	75.86
1336	63.30	10.15	1350	78.30	11.12	70.46
1268	43.76	36.74	1350	76.29	10.27	69.18
1262	42.65	34.68	1350	58.27	10.75	65.29
1292	49.04	16.07	1350	51.57	11.74	58.43

b. Baja B

$T_{\text{Eff}} (^{\circ}\text{K})$	d Model Isotermal (μm)	Dev. model isothermal (%)	T Model ($^{\circ}\text{K}$)	d Model non-Isotermal (μm)	Dev.model non-isoterm (%)	d Eksp (μm)
1353	69.41	18.78	1350	90.14	5.16	85.71
1304	50.88	45.96	1350	86.26	8.20	93.97
1295	47.73	39.22	1350	79.24	0.58	78.78
1293	47.26	28.01	1350	67.54	2.87	65.65
1202	28.64	53.86	1350	58.31	6.05	62.07
1297	48.52	19.15	1350	42.77	28.71	60.00

1346	66.67	39.34	1350	38.82	18.78	47.8
------	-------	--------------	------	--------------	-------	-------------

c . Baja C

T_{Eff} ($^{\circ}\text{K}$)	d(μm) Model Isothermal	Dev. model isothermal (%)	T Model($^{\circ}\text{K}$)	d Mode non- Isothermal	Deviasi model non- isothermal (%)	D Eksp(μm)
1354	69.96	16.81	1350	95.06	13.03	84.10
1357	71.30	32.99	1350	68.93	28.57	53.61
1222	29.34	36.71	1350	51.08	10.18	46.36
1327	58.81	10.97	1350	50.64	4.45	53.00
1283	43.83	11.29	1350	34.52	12.34	39.38
1203	26.43	37.90	1350	32.01	24.78	42.56

Lampiran N
Susunan Peralatan Dan Peralatan Pendukung

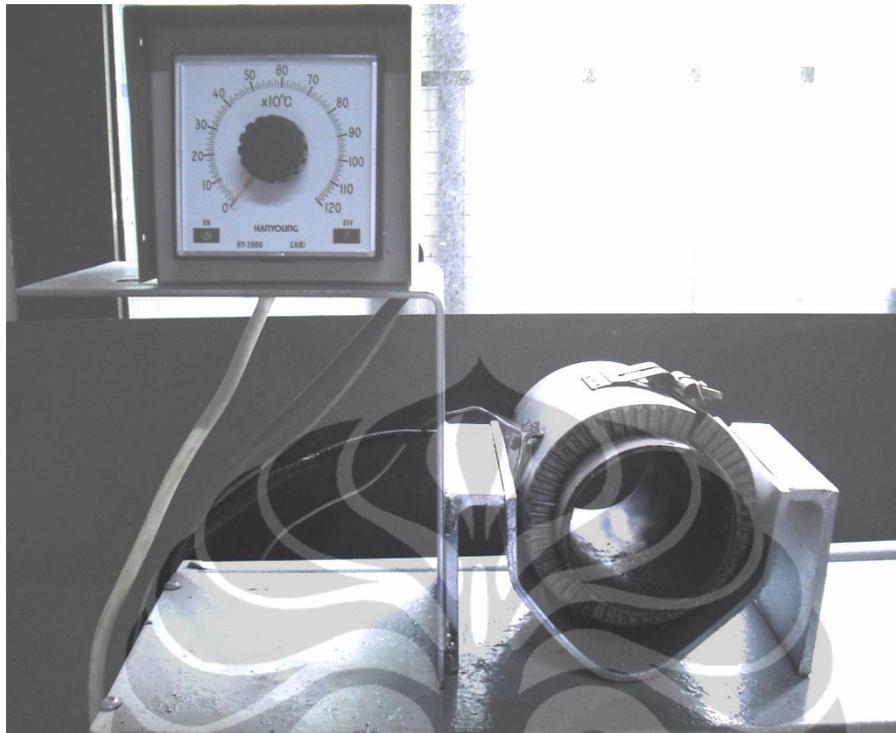
N 1. Susunan peralatan kerja



N 2. *Water Jet Cooling System*



N 3. Heating Jacket



N 4. Komputer Data Akuisisi



N 7. Benda uji setelah canai panas



N 8. Gambar sampel uji setelah preparasi metalografi

