



UNIVERSITAS INDONESIA

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

RINGKASAN DISERTASI

Untuk memperoleh gelar Doktor Bidang Metalurgi dan Material
Dipertahankan di hadapan Sidang Terbuka Senat Akademik
Universitas Indonesia di bawah pimpinan Dekan Fakultas Teknik
Universitas Indonesia

Prof.Dr.Ir.Bambang Sugiarto, M.Eng

Pada hari Kamis 24 Juni 2010, pukul 10.00 WIB

oleh

MYRNA ARIATI

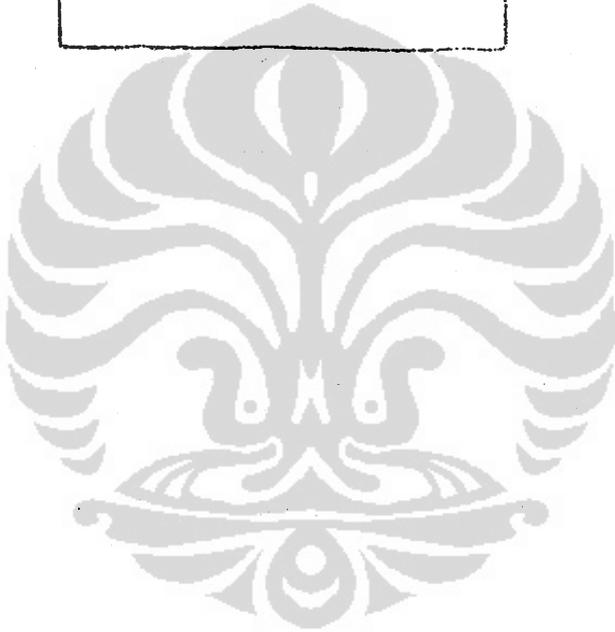
8405000061

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

PERPUSTAKAAN FAKULTAS
TEKNIK UDIN. INAGOMEDIA

No. INDUK

No. :
/



Promotor :

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

Guru Besar Tetap Fakultas Teknik
Universitas Indonesia

Ko-Promotor :

Dr.Azwar Manaf, M.Met

Staf Pengajar Tetap Fakultas Matematika
dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Indonesia

Ko-Promotor :

Dr.Ir.Sutopo, MSc

Staf Pengajar Tetap Fakultas Teknik
Universitas Indonesia



PANITIA PENGUJI

1. Prof. Dr.–Ing. Ir. Bambang Suharno
2. Dr. Ir. Agus H.S. Wargadipura, MSc
3. Dr. Ir. Iskandar Muda, M.Eng
4. Dr. Ir. Dedi Priadi, DEA

ABSTRAK

Berbagai penelitian dari para peneliti terdahulu terhadap pertumbuhan butir baja terfokus pada kondisi isothermal, sehingga berbagai tinjauan terhadap topik ini terdapat dalam berbagai literatur. Sedangkan berbagai aplikasi proses material, seperti canai panas, pengecoran atau tempa berlangsung dalam kondisi non-isothermal. Prediksi pertumbuhan butir mempergunakan persamaan yang didapat secara empiris dalam kondisi anil isothermal, sehingga terjadi fluktuasi dalam besar butir dan sifat mekanis produk baja. Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi persamaan yang ada dan mendapatkan pertumbuhan butir austenit dalam kondisi non-isothermal. Tiga komposisi baja HSLA-Nb, dengan 0,019, 0,037 dan 0,056% berat Nb diamati pertumbuhan butirnya setelah dilakukan deformasi canai satu pass, dalam kondisi pendinginan kontinyu. Pendekatan yang digunakan adalah memberikan regangan deformasi canai panas antara 0,3-0,4, dengan temperatur pemanasan awal 1200°C, dan temperatur deformasi antara 900-1100°C, dengan kecepatan pendinginan antara 7-12°C/detik dalam rentang waktu rata-rata 30 detik setelah deformasi, kemudian didinginkan cepat ke temperatur ruang. Kecepatan pendinginan direkayasa dengan memasukkan benda uji ke dalam *heating jacket* dan pendinginan cepat dilakukan dengan *water jetspray*.

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa pertumbuhan butir austenit baja setelah proses canai panas dapat digambarkan sebagai fungsi kecepatan pendinginan. Besar butir austenit semakin menurun dengan meningkatnya kecepatan pendinginan. Kinetika pertumbuhan butir austenit non-isothermal didapat dengan melakukan modifikasi matematis persamaan

pertumbuhan butir isothermal dengan memasukkan faktor *inverse* kecepatan pendinginan berpangkat m . Model modifikasi ini dilakukan iterasi dengan hasil eksperimen, dan didapat model empiris dengan nilai amat mendekati hasil eksperimen, dengan hubungan besar butir austenit yang berbanding terbalik dengan kecepatan pendinginan berpangkat m ($1/Cr^m$), dan penambahan konstanta B . Konstanta kecepatan pendinginan m hampir tidak terpengaruh oleh komposisi baja yaitu sekitar 12, sedangkan konstanta B meningkat dari $3,0 \times 10^{10}$ sampai 8×10^{10} dengan peningkatan prosentase Nb, C atau N dalam baja. Model ini dievaluasi dengan perhitungan pertumbuhan butir austenit hasil perhitungan matematis berdasarkan persamaan isothermal dan metode *additivity*. Didapat bahwa model non isothermal empirik hasil modifikasi memiliki nilai besar butir austenit yang amat mendekati perhitungan matematis dengan nilai konstanta yang relatif sama.

Didapat bahwa nilai besar butir austenit dari perhitungan dengan persamaan modifikasi empirik yang didapat memiliki nilai deviasi rata-rata terhadap hasil eksperimen yang relatif rendah (4-15%), dibanding deviasi rata-rata hasil perhitungan dengan persamaan isothermal. Dapat disimpulkan bahwa model pertumbuhan butir non-isothermal hasil modifikasi yang didapat, dapat dipergunakan untuk memprediksi besar butir austenit setelah canai panas dengan lebih akurat.

Kata Kunci : Pertumbuhan Butir, Austenit, Non-isothermal, Canai Panas

DAFTAR ISI

Abstrak	4
Daftar Isi	6
Latar Belakang dan Permasalahan	7
Tujuan Penelitian	9
Kebaruan Penelitian	10
Batasan Masalah	10
Hipotesa	11
Metodologi	11
Hasil dan Diskusi	13
Kesimpulan	36
Daftar Acuan	38
Ucapan Terima Kasih	41
Daftar Riwayat Hidup	43
Daftar Publikasi	44

I. LATAR BELAKANG DAN PERMASALAHAN

Saat ini produksi baja nasional menurut data Direktorat Jenderal Industri Logam, Mesin, Tekstil dan Aneka, Kementerian Perindustrian dan Asosiasi Industri Logam Indonesia adalah sebesar 6 juta ton /tahun, dengan jumlah ekspor baja sebesar 1,8 juta ton/tahun. Sementara kebutuhan baja nasional mencapai 10 juta ton /tahun. Sehingga kekurangan kebutuhan dalam negeri sekitar 4 juta ton ditutupi dengan impor terutama dari Cina [1].

Salah satu jenis baja yang terus dikembangkan dan diproduksi dengan proses canai adalah baja *High Strength Low Alloy Steel (HSLA)*, yang mengandung karbon rendah dan paduan mikro antara lain unsur Nb. Baja jenis ini memiliki kekuatan yang tinggi namun ringan dan mudah dibentuk sehingga amat dibutuhkan untuk berbagai aplikasi, yaitu merupakan bahan baku industri konstruksi seperti *roof, canning* atau kaleng kemasan, perkapalan, otomotif dan elektronika. Penggunaan baja HSLA paduan mikro terus meningkat, mencapai diatas 50% dari seluruh produksi baja secara global [2]. Untuk itu, masing-masing jenis baja HSLA memiliki persyaratan atau spesifikasi sifat material yang ditentukan, seperti kekerasan, mampu bentuk, kerataan permukaan.

Produk industri baja diantaranya adalah Hot Rolled Coil (HRC), Cold Rolled Coil (CRC) atau Hot Rolled Plate (HRP) yang merupakan hasil dari proses pembentukan slab baja melalui proses canai. Sifat-sifat produk baja tersebut di atas, selain ditentukan oleh komposisi bahan baku, juga ditentukan oleh variabel dan kondisi proses canai selama proses produksi, antara lain temperatur, besar deformasi, dan kecepatan pendinginan [2]. Dalam proses canai, terdapat beberapa tahapan proses, yaitu [3]:

1. *Reheating*, yaitu pemanasan ke temperatur di atas temperatur deformasi.

2. *Roughing*, yaitu proses canai pada temperatur fasa austenit..
3. *Finishing*, yaitu proses canai akhir pada temperatur dibawah temperatur *roughing* yang diikuti dengan pendinginan.

Setelah proses deformasi pada temperatur tertentu , terjadi proses metalurgi mikro yang sangat mempengaruhi karakteristik hasil canai tersebut. Proses metalurgi yang terjadi pada proses canai diakibatkan adanya regangan dan temperatur atau dikenal dengan *Thermo Mechanical Treatment(TMT)*, adalah [3];

- a. *Recovery*, yaitu proses perubahan mikro yang terjadi dengan sendirinya untuk mencapai keseimbangan
- b. Rekristalisasi, yaitu terbentuknya butir baru yang lebih seimbang.
- c. Pertumbuhan butir, yaitu butir austenit tumbuh setelah sepenuhnya mengalami rekristalisasi, sesuai temperatur dan waktu yang ada.

Penelitian yang dilakukan ini, berkonsentrasi pada pertumbuhan butir pada proses *roughing*, dimana butir austenit dalam baja pada tahap ini akan mempengaruhi besar butir akhir baja. Sesuai dengan hukum Hall-Petch[2], semakin halus ukuran butiran material, semakin tinggi sifat mekaniknya.

Terdapat teori pertumbuhan butir austenit yang menjadi perhatian berbagai peneliti untuk meneliti lebih mendalam yang kemudian digambarkan secara empirik dalam model matematis. Pertumbuhan butir austenit pada baja, umumnya diprediksi berdasarkan pada persamaan Beck dan Sellars [4], yaitu persamaan empirik yang didapat pada kondisi anil isothermal.

Berbagai penelitian terdahulu terhadap pertumbuhan butir terfokus pada kondisi isothermal dan telah terdapat berbagai hasil penelitian dalam literatur. Selain Sellars, peneliti seperti Saito [5] bersama Kawasaki Steel Japan, Yada[6] bersama Nippon Steel Japan, Chongxiang dkk [7] melakukan

penelitian perilaku butir austenit selama proses rekristalisasi dan pertumbuhan butir berbagai baja HSLA. Semua penelitian tersebut tetap berdasar pada persamaan pertumbuhan butir dalam kondisi isothermal dan didapat persamaan pertumbuhan butir yang sama dengan persamaan yang didapat oleh Sellars

Permasalahannya adalah bahwa berbagai proses termomekanik termasuk proses canai berlangsung dalam kondisi non-isothermal, sehingga prediksi dengan persamaan isothermal dapat menimbulkan penyimpangan perhitungan besar butir dari yang direncanakan, sehingga sifat baja yang dihasilkan berfluktuasi dan tidak konsisten sehingga tidak memenuhi persyaratan untuk bahan baku bidang enjinereng. Adanya perubahan temperatur selama proses deformasi juga telah diakomodir dalam beberapa penelitian, seperti yang direview oleh S.Mishra dan T.DebRoy[8] , H.R.Wang dan W.Wang [9] serta I.V. Samarasekera dan E.B.Hawbolt [10] dan Angel ZUFIA[11]. Perubahan temperatur selama proses, diakomodir dengan menggunakan temperatur efektif, yaitu temperatur rata-rata selama proses [12].

Namun penggunaan temperatur efektif ini tetap dimasukkan ke dalam persamaan isothermal. Penelitian ini mengamati pertumbuhan butir dalam kondisi non-isothermal untuk mendapatkan model kinetika pertumbuhan butir yang lebih tepat dalam memprediksi pertumbuhan butir austenit dalam rentang waktu tertentu setelah proses canai panas.

II. TUJUAN PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan untuk :

1. 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 pada proses canai panas.

2. Mengevaluasi hubungan ukuran butir austenit yang terbentuk dengan kecepatan pendinginan dalam rentang waktu tertentu setelah proses canai panas baja HSLA-Nb.
3. Mendapatkan pengaruh unsur paduan mikro dalam baja terhadap pertumbuhan butir austenit..

III. KEBARUAN PENELITIAN (STATE OF THE ART)

Kebaruan penelitian disertasi ini adalah pada mendapatkan model kinetika pertumbuhan butir austenite baru pada kondisi non-isothermal yang lebih akurat untuk dimanfaatkan dalam mendisain proses canai untuk mendapatkan besar butir yang direncanakan. Metode yang dilaksanakan adalah dengan memodifikasi persamaan pertumbuhan butir austenit terdahulu dengan memasukkan faktor non-isothermal, yaitu kecepatan pendinginan (*Cooling Rate, CR*). Disamping itu, teknik persiapan benda uji dalam mengamati besar butir austenit menghasilkan teknik etsa yang berbeda dengan teknik etsa austenit yang lain, karena rendahnya prosentase karbon dalam baja, sehingga membutuhkan perlakuan etsa yang khusus untuk menampakkan batas butir austenit.

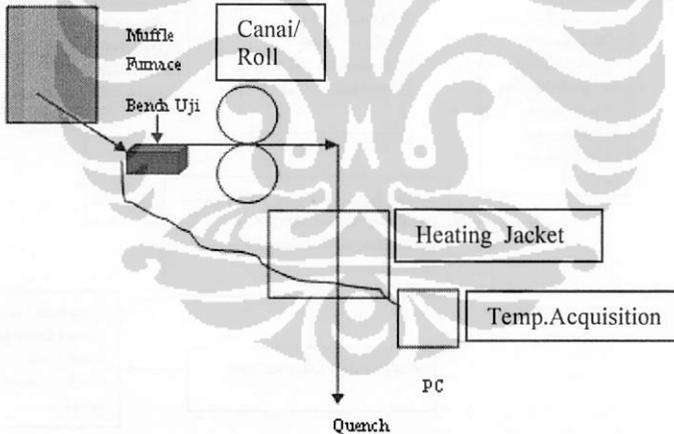
IV. BATASAN MASALAH

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 mil*), dengan memodifikasi model terdahulu yang bersifat isothermal.
3. Proses deformasi dilakukan pada temperatur deformasi di atas 900°C, temperatur *roughing* di industri baja
4. Pengamatan struktur mikro untuk mengukur besar butir austenit mengikuti standar ASTM E112 (Metode Metalografi Kuantitatif *Intercept*).

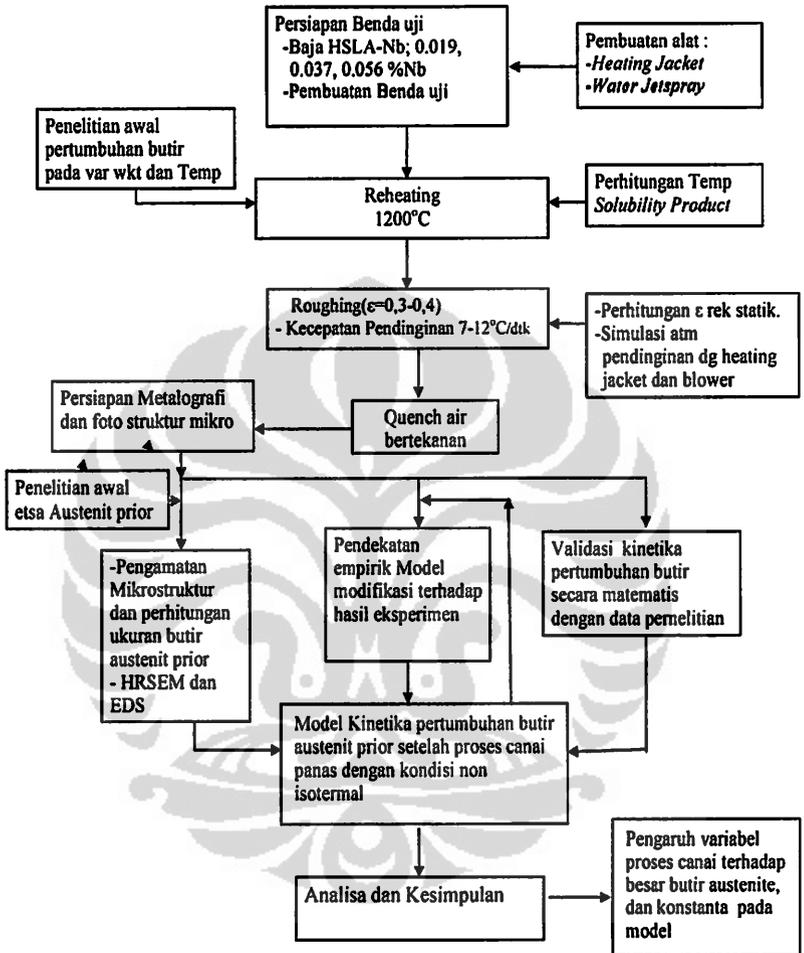
V. HIPOTESA

1. Kinetika pertumbuhan butir austenit prior baja HSLA setelah canai panas dalam kondisi non-isotermal berbeda dibandingkan pertumbuhan butir dalam kondisi isotermal .
2. Dengan berdasarkan model pertumbuhan butir isotermal dan teori aditivitas (siklus penurunan temperatur dibagi menjadi tahap-tahap waktu beberapa temperatur isotermal), akan didapat suatu model untuk memprediksi ukuran butir austenit dalam kondisi non-isotermal yang lebih akurat.
3. Unsur paduan mikro Nb,C dan N mempengaruhi pertumbuhan butir austenite.

VI. METODOLOGI



Gambar 1. Ilustrasi Pelaksanaan Pengujian



Gambar 2. Alur penelitian

VII. HASIL DAN DISKUSI

Hasil penelitian yang didapat dan ditampilkan adalah terdiri dari Uji komposisi material dan pengelompokan/penamaan benda uji, 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, dan penelitian pengaruh kecepatan pendinginan terhadap besar butir austenit pada 3 (tiga) komposisi baja HSLA-Nb secara eksperimen. Hasil uji komposisi dilakukan dengan spektrometer emisi, dapat dilihat pada tabel 1 di bawah ini, dan diberi notasi baja A, baja B dan baja C.

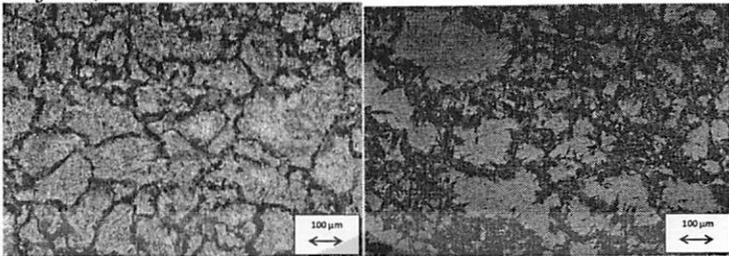
Tabel 1. Hasil uji komposisi ke 3(tiga) komposisi benda uji.

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

Penelitian pendahuluan dilakukan terhadap benda uji A, B dan C, untuk menetapkan temperatur *reheating* dan mendapatkan teknik etsa untuk menampilkan batas butir austenit. Dari perhitungan temperatur *Solubility Product*, temperatur *reheating* ditetapkan 1200°C yaitu sekitar temperatur *Solubility Product*[13].

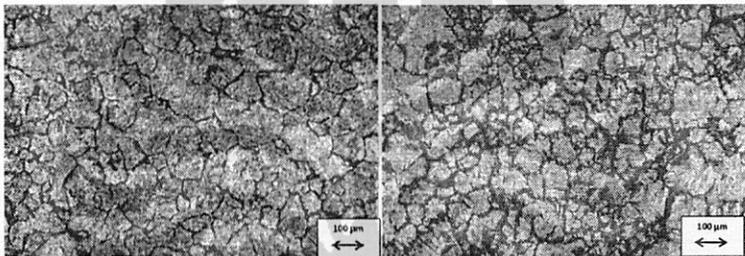
Dari penelitian terhadap teknik etsa austenit prior, didapat bahwa etsa yang dapat menampakkan batas butir austenit dengan jelas adalah larutan asam picric 30% dalam alkohol, dengan sedikit penambahan HCl dan *wetting agent* berupa *dodecyl benzenesulfonat*. Struktur mikro austenite dari baja A, B dan C dapat dilihat seperti pada gambar di bawah ini

Baja A;



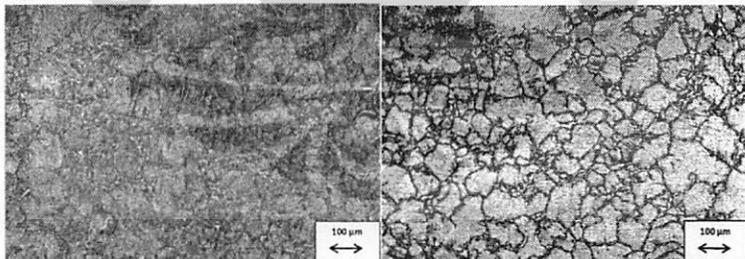
CR 7,5°C/dtk

CR 7,7°C/dtk



CR 7,8°C/dtk

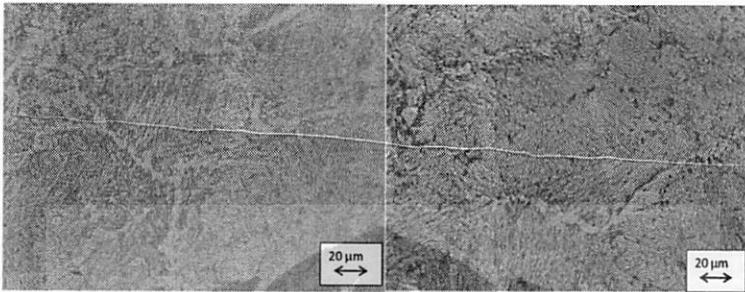
CR 8°C/dtk



CR 8,1 °C/dtk

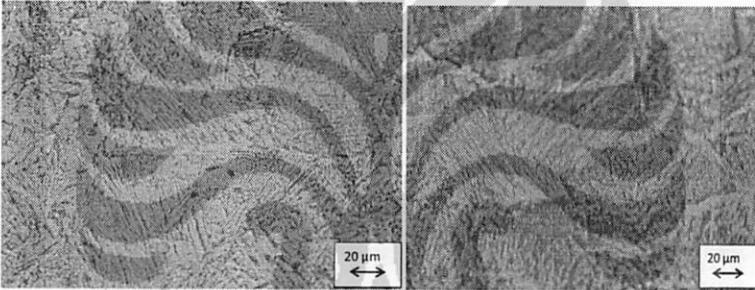
CR 9°C/dtk

Baja B;



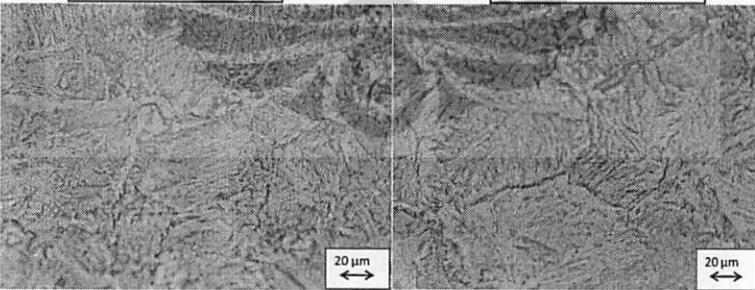
CR 7,9 °C/dtk

CR 8 °C/dtk



CR 8,3 °C/dtk

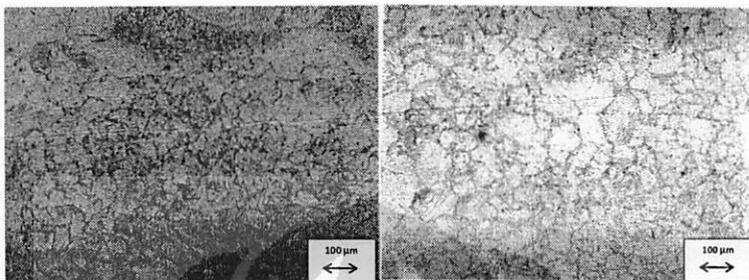
CR 8,8 °C/dtk



CR 9,3 °C/dtk

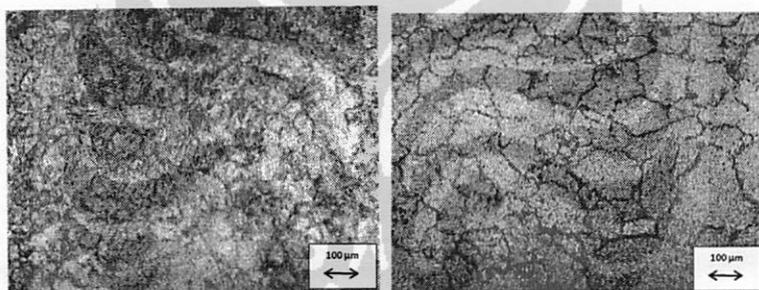
CR 10,5 °C/dtk

Baja C



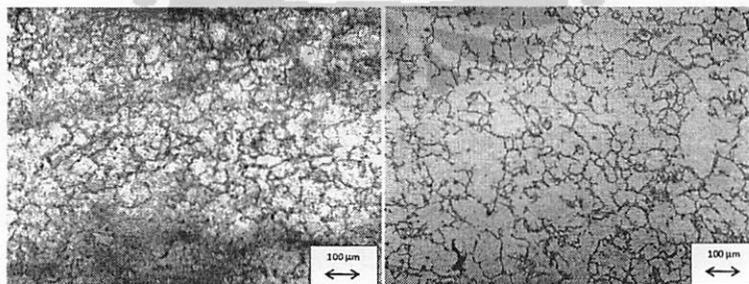
CR 7,6 °C/dtk

CR 8,5 °C/dtk



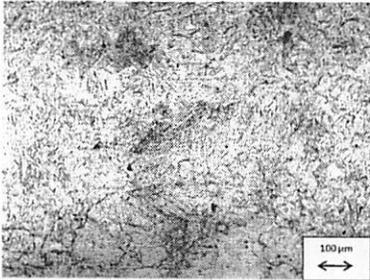
CR 9,4 °C/dtk

CR 10,24 °C/dtk



CR 11,4 °C/dtk

CR 11,17 °C/dtk

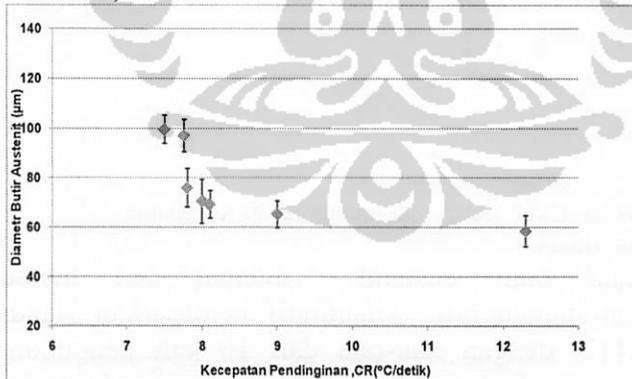


CR 12,3 °C/dtk

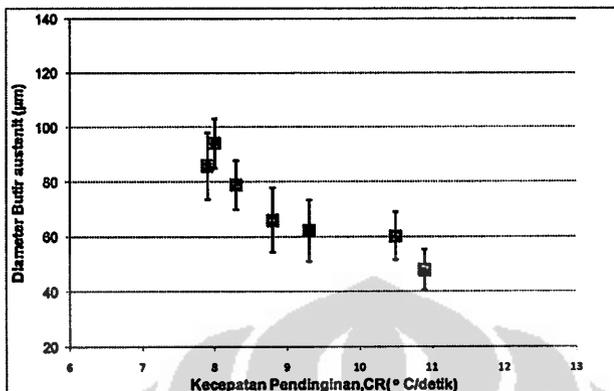
Gambar 2. Struktur Mikro Baja A,B dan C, Pemanasan Awal 1200°C, Variabel Laju Pendinginan, kuens ke Temperatur Ruang Etsa 30% asam pikral + 1 tetes HCl+ 1 tetes Dodecyl Benzenessulfonat .

7.1 Hubungan Besar Butir Austenit dengan Kecepatan Pendinginan Hasil Eksperimen.

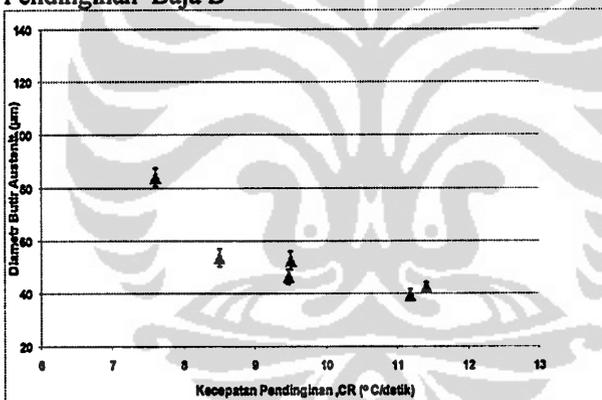
Hasil perhitungan besar butir austenit baja A,B dan C dengan variabel kecepatan pendinginan diplot pada gambar 3-5 di bawah;



Gambar 3. Nilai Ukur Butir rata-rata terhadap Kecepatan Pendinginan Baja A .



Gambar 4. Nilai Ukur Butir rata-rata terhadap Kecepatan Pendinginan Baja B



Gambar 5. Nilai Ukur Butir rata-rata terhadap Kecepatan Pendinginan Baja C

Besar butir austenit didapat dari metode perhitungan metalografi kuantitatif berdasarkan standar ASTM E112, dengan rata-rata dari 10 kali pengukuran pada setiap kecepatan pendinginan, dengan penyimpangan pengukuran dinyatakan dengan s (deviasi standar pengukuran) yang dinyatakan dengan garis vertikal pada setiap titik hasil pengukuran diameter butir austenite pada gambar 3-5.

7.2.Perbandingan Hasil Eksperimen Dengan Model Isothermal.

Hasil eksperimen ini kemudian dibandingkan dengan nilai perhitungan besar butir austenit dengan menggunakan persamaan isothermal yang dinyatakan Sellars[4]:

$$d^n - d_o^n = \left[A \exp \left(\frac{-Q_{gg}}{RT} \right) \right]. t \quad (1)$$

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 ($^{\circ}\text{K}$)

t = waktu pertumbuhan butir (detik)

Nilai pertumbuhan butir austenit yang dihitung berdasarkan persamaan (1) isothermal dapat dilihat pada tabel 2-4 di bawah;

Tabel .2. Perhitungan Besar Butir Austenit dengan Persamaan Pertumbuhan Butir Isothermal, dibandingkan dengan Hasil Eksperimen, Baja A .

No Benda Uji	Kec Pend ($^{\circ}\text{C/dtk}$)	Diameter Austenit Eksperimen (μm)	Diameter Austenit Perhitungan Isothermal(μm)	Temperatur Efektif ($^{\circ}\text{K}$)
1.	7.50	99,41	64,39	1338
2.	7.76	96,93	60,64	1328
3.	7.80	75,86	56,85	1318
4.	8.00	70,46	63,45	1336
5.	8.10	69,18	43,75	1268
6.	9.00	65,29	42,64	1262
7.	12.30	58,43	49,11	1292

Tabel 3. Perhitungan Besar Butir Austenit dengan Persamaan Pertumbuhan Butir Isotermal, dibandingkan dengan Hasil Eksperimen, Baja B .

No Benda Uji	Kec Pend (°C/dtk)	Diameter Austenit Eksperimen (μm)	Diameter Austenit Perhitungan Isotermal(μm)	Temperatur Efektif (°K)
1.	7.90	85,71	69,97	1353
2.	8.00	93,97	52,49	1304
3.	8.30	78,78	49,71	1295
4.	8.80	65,65	49,30	1293
5.	9.30	62,07	36,55	1202
6.	10.50	60	50,40	1297
7.	10.90	47,80	67,32	1346

Tabel 4. Perhitungan Besar Butir Austenit dengan Persamaan Pertumbuhan Butir Isotermal, dibandingkan dengan Hasil Eksperimen, Baja C .

No Benda Uji	Kec Pend (°C/dtk)	Diameter Austenit Eksperimen (μm)	Diameter Austenit Perhitungan Isotermal(μm)	Temperatur Efektif (°K)
1.	7.60	84,10	70,69	1354
2.	8.50	53,61	72,01	1357
3.	9.47	46,36	37,69	1222
4.	9.50	53	59,96	1327
5.	11.17	39,38	46,73	1283
6.	11.40	42,56	36,60	1203

Karena persamaan isothermal tidak terdapat faktor perubahan temperatur , maka faktor temperatur dalam perhitungan di atas memasukkan faktor Temperatur efektif, yang mencerminkan temperatur rata-rata dari temperature tertinggi dan terendah selama pertumbuhan butir. Dari tabel diatas Hasil perhitungan di atas menunjukkan nilai yang cukup jauh terhadap nilai besar butir 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 (1) kurang tepat untuk digunakan dalam memprediksi besar butir austenit, dan diperlukan modifikasi mengingat kondisi pada aplikasi bahwa pertumbuhan butir terjadi pada kondisi non-isothermal. Namun demikian, persamaan pertumbuhan butir austenit isothermal 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 [4] 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;

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

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

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

Sehingga didapat ;

$$d^n - d_o^n = \left[A \exp \left(\frac{-Q_{gg}}{RT} \right) \right] \cdot \Delta T \cdot \frac{1}{CR} \quad (2)$$

Dimana ; d = diameter butir Austenit setelah rekristalisasi (μm)

d_0 = 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 ($^{\circ}\text{K}$)

ΔT = Perubahan temperatur selama proses canai (kondisi non- isothermal)

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

Untuk merumuskan model yang dapat mewakili hasil eksperimen, maka model persamaan (2) yang telah melibatkan faktor kecepatan pendinginan (*Cooling Rate*, $(1/CR)$), dilakukan modifikasi pendekatan terhadap grafik hasil eksperimen.

7.3. Perbandingan Hasil Eksperimen Dengan Model Non-Isotermal

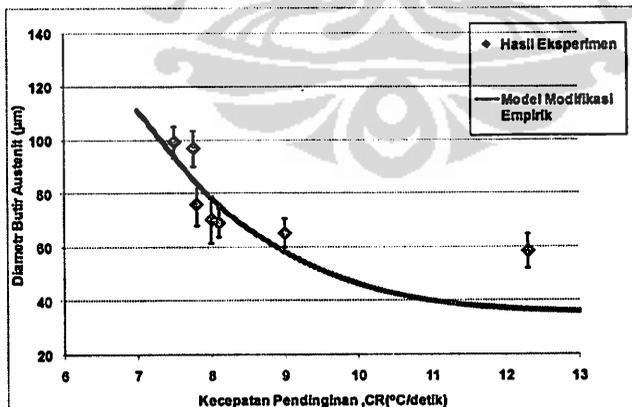
Untuk melakukan modifikasi terhadap persamaan yang sudah ada, yaitu persamaan (2) yang telah mengandung faktor kecepatan pendinginan (*Cooling Rate*), dapat mengacu pada beberapa hasil penelitian terdahulu terhadap hubungan antara besar butir fasa austenit terhadap besar butir ferit pada proses transformasi, seperti yang dilakukan oleh B. Donnay dkk [14] 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 diameter fasa ferit akhir (d_f) berbanding lurus terhadap diameter austenit (d_a) dan berbanding terbalik dengan *inverse* kecepatan pendinginan berpangkat bilangan $(1/CR^{-15})$. Berdasarkan persamaan kondisi yang ada dalam persamaan tersebut, maka kemungkinan persamaan pertumbuhan butir austenit setelah deformasi dan rekristalisasi statik

memiliki hubungan antara besar butir austenit dengan kecepatan pendinginan dari temperatur deformasi memiliki hubungan yang sama, dan mempunyai bentuk:

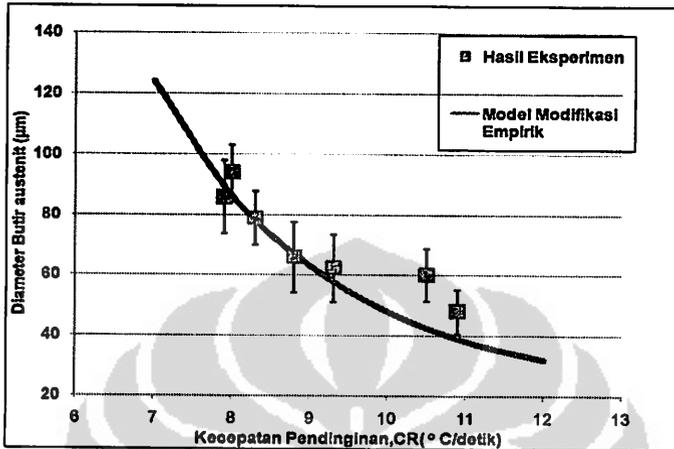
$$d^n - d_o^n = \left[A \exp\left(\frac{-Q_{gg}}{RT}\right) \right] \cdot \left[B \cdot \Delta T \cdot \frac{1}{CR^m} \right] \quad (3)$$

Dimana m adalah konstanta kecepatan pendinginan dan B adalah konstanta material dan proses.

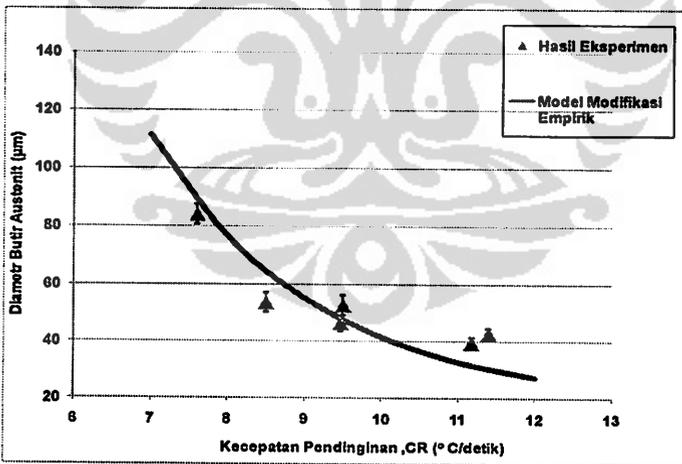
Bentuk persamaan (3) di atas kemudian dilakukan evaluasi kembali dengan melakukan pendekatan terhadap hasil eksperimen. Pendekatan dilakukan dengan simulasi (*fitting*) terhadap beberapa pasangan nilai B dan m yang akan dimasukkan dalam persamaan (3) tersebut. Metode yang diterapkan adalah melakukan 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 6-8 berikut ini



Gambar 6. Plot model modifikasi empirik dengan nilai eksperimen Baja A, $B=3,0 \times 10^{10}$, $m=12,0$



Gambar 7. Plot model modifikasi empirik dengan nilai eksperimen Baja B, $B=6,0 \times 10^{10}$, $m=12,2$



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

Gambar 6-8 , menunjukkan , bahwa model modifikasi persamaan pertumbuhan butir isothermal, yaitu persamaan (2), dimodifikasi kembali menjadi persamaan non-isothermal untuk baja komposisi A, B dan C, dinyatakan pada persamaan (3) , memiliki hasil perhitungan yang mendekati kecenderungan hasil eksperimen, apabila nilai konstanta B dan m sesuai dengan nilai yang tercantum pada tabel 5 di bawah untuk baja A,B dan C;

Tabel 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

Perhitungan diameter butir austenit dengan model modifikasi empirik dapat dilihat pada tabel 6 di bawah;

Tabel 6. Perhitungan besar butir austenit baja A dengan model modifikasi empirik

Cr($^{\circ}$ K/s)	T($^{\circ}$ K)	d rek(μ m)	d(μ m)	
7	1350	35.36	111.24	B= 3.0E+10
8	1350	35.36	78.30	m= 12
9	1350	35.36	58.27	
10	1350	35.36	46.38	
11	1350	35.36	40.10	
12	1350	35.36	37.27	
13	1350	35.36	36.13	

Tabel 7 . Perhitungan besar butir austenit baja B dengan model modifikasi empirik

Cr(°K/s)	T(°K)	d rek(μm)	d(μm)	
7	1350	25.43	123.80	B= 6,0E+10
8	1350	25.43	86.26	m= 12,2
9	1350	25.43	62.86	
10	1350	25.43	47.70	
11	1350	25.43	37.85	
12	1350	25.43	31.77	
13	1350	25.43	123.80	

Tabel 8 . Perhitungan besar butir austenit baja B dengan model modifikasi empirik

Cr(°K/s)	T(°K)	d rek(μm)	d(μm)	
7	1350	21.94	111.01	B= 8,0E+10
8	1350	21.94	76.43	m= 12,6
9	1350	21.94	55.11	
10	1350	21.94	41.42	
11	1350	21.94	32.61	
12	1350	21.94	27.25	
13	1350	21.94	111.01	

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

Antara ketiga komposisi Nb dan C dalam baja A, B dan C, terdapat perbedaan nilai kontanta 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.

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

Persamaan (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 (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 isotermal dari waktu 0 hingga t detik yang diamati, yang dapat diselesaikan sebagai di bawah ini;

Sellars :

$$D^n - D_0^n = [A \exp (-Q/RT)] t$$

Perubahan temperatur terhadap pada waktu menjadi;

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

$$D_{RX} = D_0 [11,15]$$

$$\rightarrow D^n = D_{RX}^n + A \int_1^{T^2} \ell^{-Q/RT} dt, \text{ dimana } CR = dT/dt, \rightarrow dt = dT/CR$$

$$D^n = D_{RX}^n + A \int_1^{T^2} \ell^{-Q/RT} \frac{dT}{CR}$$

$$D^n = D_0^n + \frac{A}{CR} \int_1^{T^2} \ell^{-Q/RT} dT$$

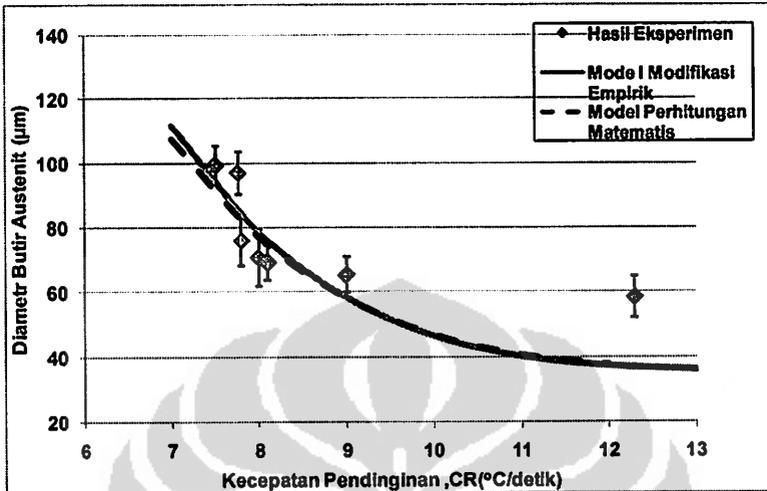
Didapat bentuk akhir persamaan 5.3 dengan melibatkan faktor laju pendinginan;

$$D^n = D_0^n + \frac{A}{CR} \int_1^{T^2} \ell^{-Q/RT} dT \quad (4)$$

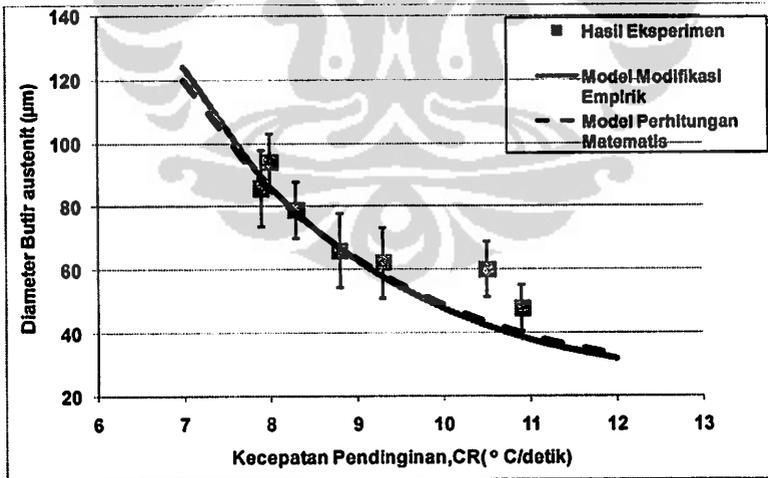
Penyelesaian integral persamaan 4 di atas kemudian menggunakan penyelesaian analisa kinetika proses non-isotermal T. Wanjun dkk[15], dalam rentang temperatur sesuai eksperimen yang dilakukan ini, yaitu rentang temperatur pengamatan $1149^\circ\text{K} < T < 1363^\circ\text{K}$, didapat persamaan pertumbuhan butir dengan penyelesaian matematik sebagai berikut,

$$D^n - D_0^n = A/CR (RT^2 \cdot e^{-Q/RT} / (1.00198882 Q + 1,87391198RT)) \quad (5)$$

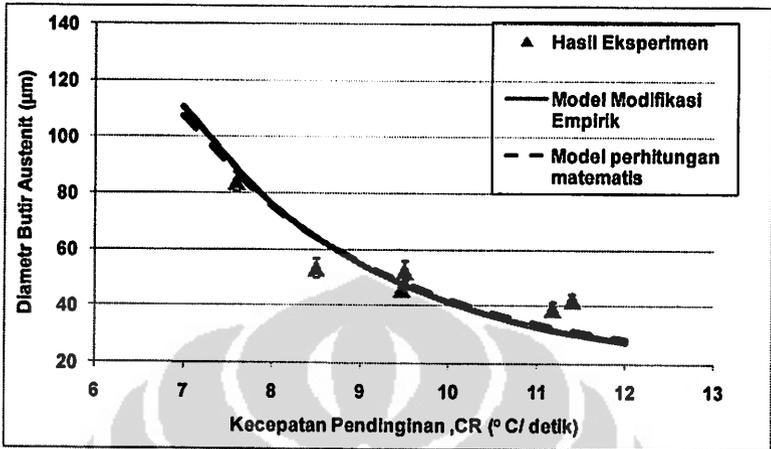
Perhitungan besar butir austenit dengan menggunakan persamaan matematis (5) menghasilkan plot terhadap nilai model modifikasi dan hasil eksperimen baja A,B dan C seperti tampak pada gambar 9-11 di bawah ini;



Gambar 9. Hubungan besar butir austenit terhadap kecepatan pendinginan baja A hasil eksperimen, model empiris dan model matematis



Gambar 10. Hubungan besar butir austenit terhadap kecepatan pendinginan baja B hasil eksperimen, model empiris dan model matematis



Gambar 11 Hubungan besar butir austenit terhadap kecepatan pendinginan baja C hasil eksperimen, model empiris dan model matematis

Gambar 9-11 menunjukkan bahwa plot perhitungan dengan persamaan (5) di atas yang dinyatakan dengan garis putus-putus relatif mendekati nilai eksperimen, dan amat mendekati perhitungan model modifikasi., dengan nilai konstanta yang mendekati sama.

Tabel 9 menampilkan perbandingan nilai konstanta B dan m yang didapat pada persamaan empiris dan nilai konstanta hasil perhitungan model matematis, dengan persamaan (5).

Tabel 9. Nilai B dan m Model Pertumbuhan Butir Austenit non-Isothermal secara Empiris dan Perhitungan Matematis

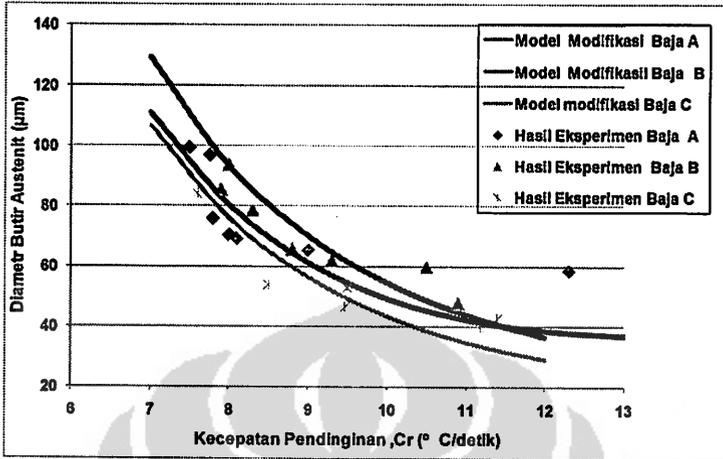
Benda uji	Nilai B Empiris (X 10 ¹⁰)	Nilai B Matematis (X 10 ¹⁰)	Nilai m Empiris	Nilai m Matematis
A	3,0	3,0	12,0	11,4
B	6,0	6,0	12,2	11,5
C	8,0	8,0	12,6	11,9

Hasil pada tabel 9 memperlihatkan bahwa nilai B dan m yang didapat dari persamaan matematis (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 9 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 pada tabel 2, 3 dan 4 dan non-isothermal pada tabel 6,7 dan 8 terhadap hasil eksperimen dengan kecepatan pendinginan yang sama, menunjukkan bahwa model non-isothermal hasil modifikasi model isothermal ini memiliki deviasi rata-rata cukup rendah, yaitu antara 4-15% terhadap nilai eksperimen dibandingkan deviasi perhitungan persamaan isothermal rata-rata sebesar butir 16-50%. Dengan demikian, model modifikasi empirik kinetika pertumbuhan butir dapat menghasilkan prediksi kinetika pertumbuhan butir austenit setelah proses canai panas baja HSLA-Nb yang lebih sesuai kondisi proses yang bersifat non- isothermal

7.5. Pengaruh Komposisi Nb , C dan N Terhadap Besar Butir Austenit non-isothermal .

Kinetika pertumbuhan butir austenite non-isothermal untuk ketiga komposisi baja HSLA-Nb tampak pada gambar di bawah ini;



Gambar 11. Model non-isotermal dan hasil eksperimen hubungan antara besar butir austenit terhadap kecepatan pendinginan setelah canai panas untuk baja komposisi A,B dan C

Dari gambar 11 di atas tampak bahwa dengan meningkatnya kecepatan pendinginan, maka besar butir austenit semakin halus untuk ketiga jenis baja. Hal ini dapat dianalogikan dengan hasil beberapa penelitian terdahulu, seperti D.Q. Bai [16], Naoki Nakata dan M.Militzer [17], bahwa besar butir akhir ferit akan semakin halus dengan meningkatnya kecepatan pendinginan pada proses transformasi baja HSLA-Nb. Dengan adanya hubungan yang sebanding antara besar butir austenit dan ferit [18], maka besar butir austenit juga semakin halus dengan meningkatnya kecepatan pendinginan.

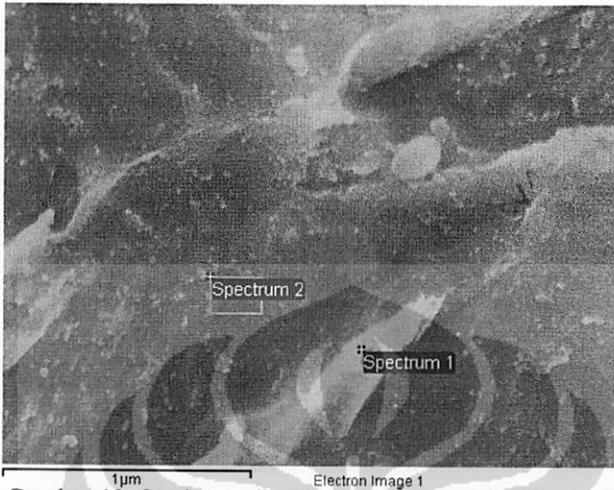
Dari gambar 11 di atas juga tampak pada baja B, dengan prosentase Nb yang lebih besar, memiliki besar butir austenit yang lebih besar dibandingkan baja A dengan prosentase Nb lebih rendah. Hal ini dapat disebabkan adanya perbedaan komposisi karbon dan Nitrogen dalam baja B yang jauh lebih kecil dari baja A, sehingga pembentukan endapan tidak cukup untuk menghambat pertumbuhan butir austenit. Prosentase Nb, C an N yang cukup, temperatur dan waktu, akan mendorong

terbentuknya endapan NbC atau NbCN, yang menghalangi pertumbuhan butir.[19].Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh S.C.Hong dkk[20] dan L.J.Cuddy,dkk[21], bahwa partikel senyawa NbCN,NbC dan NbN pada ukuran tertentu akan efektif menghalangi pergerakan batas butir fasa austenit pada baja.

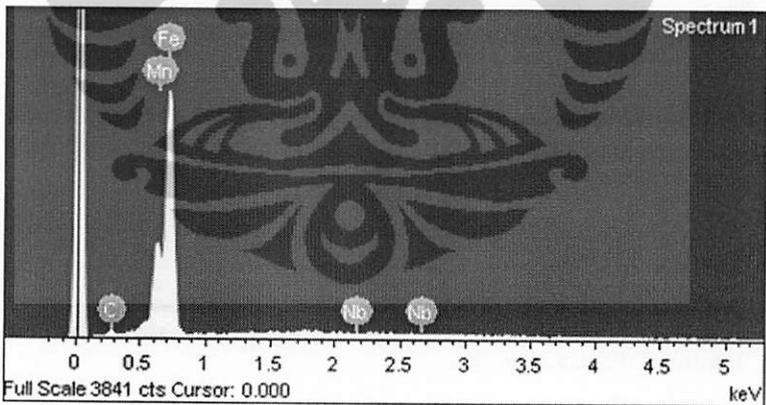
Pada gambar 12 di bawah, keberadaan endapan NbC dalam baja HSLA-Nb ditunjukkan dengan gambar yang diambil pada salah satu komposisi benda uji,baja A dengan *High Resolution Scanning Electron Microscope(HRSEM)*,dengan perbesaran 100.000 kali ,komposisi endapan dianalisa dengan *Electron Diffraction Spectrometer (EDS)*.

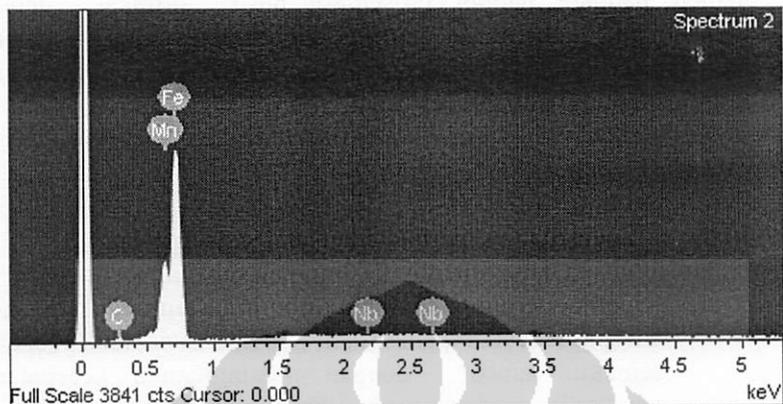


Gambar 12. Struktur mikro baja A dengan HRSEM ,perbesaran 100.000 kali, etsa Nital 5%.



Gambar 13. Struktur mikro baja A dengan HRSEM ,perbesaran 50.000 kali, etsa Nital 5% dan pengambilan komposisi kimia pada dua lokasi dengan EDS





Gambar 14. Hasil pengujian komposisi kimia dengan EDS baja A pada 2 (dua) lokasi) partikel

Tabel 10. Hasil Uji komposisi kimia baja A dengan EDS

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	

Dari gambar 12,13 dan 14 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 keberadaan partikel yang mengandung elemen paduan tersebut, yang mempengaruhi perilaku pertumbuhan butir austenite selama proses canai.

VIII. Kesimpulan.

Dari rangkaian eksperimen dan analisa yang telah dilakukan, maka dapat diambil 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_o	= Besar butir awal (μm)
n, A, Q_{gg}	= Konstanta material , 4,5,
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

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-isothermal.

4. 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.

DAFTAR ACUAN RINGKASAN DISERTASI

1. Kabar Bisnis, 26 Februari 2010.
2. J.Adamczyk ,”Development of the Microalloyed Constructional Steels”*Journal of Achievements in Material and manufacturing engineering* , Vol 14 Issue 1-2, Jan-Feb 2006 pp 9-20
3. B.K.Panigrahi, “Processing of Low Carbon Steel Plate and Hot Strip-an overview”, *Bulletin of Material Science*, Vol 24, No 4, August 2001, pp 361-371.
4. C.M Sellars, (1980) :“ The Physical Metallurgy of Hot Working , *Proc. Int. Conf.on Hot Working and Forming Processes* , Sheffield, England, pg 3-15
5. Saito.Y, Saeki.M, Nishida.M,Ito.Y,Tanaka.T. and Takizawa.S, *Proc.Int.Conf.on Steel Rolling*, Tokyo, Iron and Steel Institute of japan, 1980,p1309
6. Yada.H,, *Proc.Int.Symp.Accelerated Cooling of Rolled Steel*, *Conf. of Metallurgists, CIM Winnipeg,MB, Canada Ruddle,G.E and Crawley, A.F (eds)*, Pergamon press, Canada, 1987, p.105.
7. Chongxiang Yue, Liwen Zhang, Shulun Liao and Huiju Gao, “ Kinetic Analysis of the Austenite Grain Growth in GCr15 Steel”, *Journal of Materials Engineering and Performance,ASM International 1059-9495*, March 2009
8. S.Mishra and T DebRoy, “Non-isothermal Grain Growth of metals and Alloys- a riview, *Materials Science and Technology*,Mar 2006;22,3, pg 253
9. HR Wang and W Wang, “Simple Model for Austenite Grain Growth in Microalloyed Steel” *Institute of Materials,Minerals and Mining, Published by Maney on Behalf of Institute*, vol 24, Number 2, 2008..
10. I.V Samarasekera and EB Hawbolt,” Overview of Modelling The Microstructural state of Steel Strip

- during Hot Rolling”, *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, August, 1995
11. Angel ZUFIA and Jose manuel LLANOS, “ Mathematical Simulation and Controlled Cooling in EDC Conveyer of a Wire Rod Rolling Mill”, *ISIJ International*, Vol 41, No 10, pp1282-1288, (2001).
 12. S. Akta, GJ Richardson and CM Sellars (2005), “ Hot Deformation and Recrystallization of 3% Silicon Steel Part 1;Microstructure, Flowstress and Recrystallization Characteristics, *ISIJ International*, Vol45, No 11 , pp 1666 -1675.
 13. P.R.Rios “Expression for Solubility Product of Niobium Carbonitride in Austenite, “*Materials Science and Technology*”, Vol 4, April 1988
 14. 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 .
 15. Wanjun,L Yuwen,Y.Xil, W Zhiyong, and W Cunxin,(College of Chemistry and Molecular Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China), “New Temperature Integral Approximate Formula For Non-Isothermal Kinetic Analysis, *Akademiai Kiado, Budapest, June,2003*
 16. D.O Bai, S Yue, T.M. Maccagno and J.J.Jonas,”Effect of Deformation and Cooling rate on the Microstructures of Low Carbon Nb-B Steels., *ISIJ International*, Vol 38, No 4, pp 371-379, 1998.[10]
 17. Naoki Nakata and Matthias Militzer, “ Modelling of Microstructure Evolution during Hot Rolling of a 780MPa High Strength Steel”, *ISIJ International*, Vol 45, No 1 , pp 82-90, 2005 [2]

18. E.Anelli,M.Gheresi,A.Macanzoni, M.Paolicchi, A.Aprile, A.De Vito and F.De mitri, “ Microstructure Evolution During Industrial Rolling of Microalloyed Steel Plates”*Centro Sperimentale Metallurgico, Rome,Italy,1985*, pp 1031-1035.
19. 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
20. SC. Hong, S.H. Lim, H.S. Hong, K.J. lee, D.H. Shin, and K.S.Lee, “ Effect of Nb on Grain Growth of Ferrite in C-Mn Steel during Isothermal Holding After Severe Deformation” *Materials Science and Technology*, feb 2004pp 207,.
21. L.J.Cuddy and J.C Raley, “Austenite Grain Coarsening in Microalloyed Steel”, *Metallurgical and Materials Transaction A*, Volume 14A, October 1983, pp 1983-1995

UCAPAN TERIMAKASIH

Puji syukur ke hadirat Allah SWT atas semua berkah dan rahmatNya yang dilimpahkan bagi saya dan keluarga sehingga saya dapat menyelesaikan program Doktor di Program Studi teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Pada kesempatan ini perkenankan saya menyampaikan rasa terimakasih dan hormat kepada :

1. Rektor Universitas Indonesia.
2. Dekan Fakultas Teknik Universitas Indonesia beserta Sekretaris dan Wakil Dekan beserta para Manajer, serta karyawan di fakultas Teknik Universitas Indonesia.
3. Prof.Dr-Ing. Ir.Bambang Suharno, Kepala Departemen Metalurgi dan Material FTUI atas dukungan yang diberikan untuk menyelesaikan program pascasarjana ini..
4. Prof.Dr.Ir.Eddy S.Siradj, M.Eng ,atas kesediaannya untuk menjadi promotor, yang telah banyak memberikan pengarahan, masukan yang tak ternilai, sejak awal hingga selesainya penulisan disertasi ini.
5. Dr.Azwar Manaf, M.Met dan Dr.Ir.Sutopo.M.Sc, atas kesediaannya menjadi ko-promotor yang telah banyak meluangkan waktu dalam memberikan bimbingan, mengoreksi dan member saran konstuktif pada penelitian ini.
6. Anggota penguji, yang terdiri dari Prof.Dr-Ing.Ir.Bambang Suharno, Dr.Ir.Agus.H.S.Wargadipura, MSc, Dr.Ir.Iskandar Muda. M.Eng dan Dr.Ir.DediPriadi, DEA, atas kesediaannya untuk menguji serta telah banak memberikan masukan dan pengarahannya yang sangat berharga demi penyempurnaan disertasi ini.
7. Prof.Dr.Ir.Djoko Hartanto, MSc, mantan Dekan Fakultas Teknik Universitas Indonesia periode 1996-2000, yang

sejak awal telah memberikan dorongan semangat untuk mengikuti program Doktor ini.

8. Saudara Zaenal Arifin dan Ahmad Azhari,ST yang banyak membantu saya dalam menyelesaikan pekerjaan penelitian ini di Laboratorium Teknik Metalurgi FTUI.
9. Saudara Richard,ST, MSi,saudara Dr.Ir.Nofrijon,MSi, yang banyak membantu dan memberikan masukan dalam penyelesaian penelitian ini.
10. Ir.Basso Makahanap M.Eng, dari PT Krakatau Steel, untuk bantuan teknis di PT Krakatau Steel.
11. Segenap Civitas Akademika Departemen Metalurgi dan Material FTUI , baik staf pengajar dan seluruh karyawan yang banyak memberikan dorongan hingga saya dapat menyelesaikan program ini.
12. Kepada semua pihak yang telah banyak membantu dalam proses penelitian ini, yang tidak memungkinkan untuk saya sebutkan satu persatu.

Akhirnya saya sampaikan rasa terimakasih saya kepada yang tercinta almarhumah ibunda Kustiniyati dan almarhum ayahanda Sofyan Mochtar, yang telah bersusah payah mengusahakan agar kami berempat anak-anaknya dapat menyelesaikan pendidikan sl saat itu. Saya yakin apa yang dicapai oleh kami berempat anak-anaknya adalah jawaban atas doa yang selalu beliau panjatkan dimasa yang lalu. Rasa terimakasih saya sampaikan pula kepada suami tercinta Syarif Hidayat beserta ketiga putri dan putra saya Mareta Maulidiyanti, Maulana Muhammad dan Akbar Hasani yang saya sayangi, berkat dukungan dan doanya sehingga tugas yang berat ini dapat saya selesaikan sebaik-baiknya.

Semoga penelitian ini dapat bermanfaat bagi pengembangan ilmu di dunia Teknik Metalurgi dan Material.

Akhir kata, semoga Tuhan Yang maha Esa berkenan membalas budi baik yang telah diberikan oleh semua pihak.

Depok,24 Juni 2010

Myrna Ariati

RIWAYAT HIDUP

Nama : Myrna Ariati
Tempat,Tanggal lahir : Jakarta,20 April 1960
NIP : 196004201987032001
Pekerjaan : Staf Akademik DMMFTUI
Alamat Kantor : FTUI, Kampus UI, Depok 16424
Alamat Rumah : Jl. Delima Ujung No 6, Perum .Beji
Permai, Depok 16426
Status : Berkeluarga dengan 3 anak

RIWAYAT PENDIDIKAN

No	Perguruan Tinggi	Lulus	Jurusan
1	FT-UI (S-1)	1985	Metalurgi
2	FMIPA-UI (S-2)	1992	Materials Science

RIWAYAT PEKERJAAN

Tahun	Pekerjaan
1985-1986	Staf Technical Support PT.Kemasinti Nusabakti.
1986- Sekarang	Staf pengajar tetap Departemen Metalurgi dan Material FTUI
1987-1992	CPD 2 Jurusan Metalurgi FTUI
1992-1997	Kepala Laboratorium Perlakuan Panas FTUI
1997-2000	Sekretaris Jurusan Metalurgi FTUI.
2001- Sekarang	Kepala Laboratorium Metalografi dan Perlakuan Panas , DMM-FTUI
2004-2006	Sekretaris dan PIC Tenaga Ahli pada Tim Pelaksana Program Hibah Kompetisi A2. Departemen Metalurgi dan Material FTUI.
2005	Sekretaris Tim Pelaksana Hibah Kompetisi SP4 Departemen Metalurgi dan Material FTUI.

DAFTAR PUBLIKASI ILMIAH

1. **M.Ariati, E.S. Siradj (2006, September)** “Recrystallization Kinetics of Nb-High Strength Low Alloy Steel as a Function of Strain During Hot Rolling”, *Proceeding of the 9th International Conference on Quality in Research (QIR)*, University of Indonesia, Faculty of Engineering, ISSN 114-1284 , IMM 36, pp 1-5, Depok, Indonesia
2. **Myrna Ariati, W.Narottama Putra, Meilana Puspawartiningdyah (Agustus 2007)**, “Pengaruh Waktu Tahan Terhadap Besar Butir Austenit Prior Pada Baja HSLA 0,037Nb Hasil Coran Kontinu Selama Pemanasan Isotermal”, *Seminar Nasional Metalurgi dan Material I*, Universitas Indonesia, Depok
3. **M.Ariati, Sutopo and E.S Siradj (2009,June)**, “ Non-Isothermal Kinetics Austenite Grain Growth in Nb-HSLA Steel during Hot Rolling”, *Proceeding of the 4th Internationa Conference on Recent Advances in Materials, Minerals & Environment (RAMM) and 2nd Asian Symposium on Materials & Processing (ASMP)*, Penang, Malaysia.
4. **Myrna Ariati, W.Narottama Putra, Sutopo and D.Febriani (2009, August)** “Etchant Selection for the High Metallographic Quality of HSLA-0.037% Nb Prior-Austenite Grain Boundaries” , *Proceeding of the 11th International Conference on QIR (Quality in Research)*, Faculty of Engineering University of Indonesia, Depok, Indonesia ,ISSN 114-1284, pp 974-979.

5. **M.Ariati, T.W. Sulistio, A.Manaf, Sutopo dan E.S.Siradj,** "Persamaan Empiris Pertumbuhan Butir Austenit Baja HSLA-0,019% Nb Pada Proses Pendinginan non-Isotermal" *Jurnal Teknik Mesin, UK Petra, Surabaya*, ISSN 1410- 9867, Vol 11, No 1, April 2009, hal 59-65.

6. **M.Ariati, A.Prihantono, Sutopo, A.Manaf, E.S.Siradj,** "Persamaan Kinetika Pertumbuhan Butir Austenit baja HSLA-,056% Nb Pada Kondisi non-Isotermal Selama Proses canai Panas" *Jurnal Industri, Fakultas Teknik Industri-ITS, Surabaya*, ISSN 1410-2919, Volume 9 , No 1, Februari 2010.

