

Persamaan Empiris Pertumbuhan Butir Austenit Baja HSLA-0,019% Nb pada Proses Pendinginan non-Isotermal

M. Ariati, T. W. Sulistio, A. Manaf*, Sutopo, dan E.S. Siradj

Departement Metalurgi dan Material Fakultas Teknik, UI, Depok

*Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, UI, Depok

E-mail: myrna@metal.ui.ac.id

ABSTRAK

Kekuatan akhir produk manufaktur baja antara lain ditentukan oleh besar butir austenit. Persamaan pertumbuhan butir austenit yang selama ini digunakan yaitu Persamaan Beck dan Sellars umumnya berasumsi bahwa proses berjalan pada kondisi isotermal, sementara hampir semua proses manufaktur berjalan dalam kondisi non-isotermal. Dengan demikian, persamaan yang ada tidak tepat untuk digunakan karena sering menyebabkan tidak tercapainya spesifikasi produk. Penelitian ini dilakukan pada baja paduan rendah HSLA-0.019%Nb, dengan mengamati pertumbuhan butir austenit pada kondisi non-isotermal setelah dilakukan proses deformasi canai panas satu *pass*. Pendekatan yang digunakan adalah memberikan regangan deformasi 0,3-0,4, dengan proses canai panas dan temperatur deformasi 900-1100 °C, kecepatan pendinginan 7-12 °K/detik, dalam rentang waktu 25-50 detik, dan pendinginan cepat menggunakan *water jetspray*. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa pertumbuhan butir austenit baja setelah proses canai panas dapat digambarkan sebagai fungsi kecepatan pendinginan. Besar butir semakin menurun dengan meningkatnya kecepatan pendinginan. Pertumbuhan butir austenit non-isotermal didapat dengan melakukan iterasi antara hasil eksperimen dan persamaan pertumbuhan butir empiris Beck dan Sellars. Persamaan akhir yang didapat merupakan modifikasi persamaan pertumbuhan butir isothermal dengan adanya nilai berbanding terbalik kecepatan pendinginan berpangkat m ($1/Cr^m$), di mana $m = 14$ dan penambahan konstanta B sebesar 10^{14} .

Kata kunci: Pertumbuhan butir, Austenit, Non-isotermal, Canai panas.

ABSTRACT

The strength of a final steel product is affected by its final austenite grain size. The applied model for austenite grain growth by Beck and Sellars actually based on the isothermal condition assumption, whilst most of the materials processing take place under non-isothermal condition. Hence, this situation results in deviation of product specification. This paper examines the austenite grain growth under non-isothermal condition of HSLA-0.019%Nb single composition after single pass hot-rolling process and predicts its final austenite grain size. The material was hot-rolled about 0.3-0.4 at a temperature of 900-1100 °C, cooling rate of 7-12 °K/s, in a time period of 25-50 second, and quenched by using water jetspray. The results show that austenite grain growth after hot-rolled can be illustrated as a function of cooling rate. Grain size decreases as the cooling rate increases. Non-isothermal austenite grain growth was obtained by modifying Beck and Sellar's empirical model, in which the cooling rate is $1/Cr^m$ where $m = 14$ and an additional constant of B is 10^{14} .

Keywords: Grain growth, Austenite, non-isothermal, hot rolling.

PENDAHULUAN

Baja *High Strength Low Alloy Steel* (HSLA) merupakan baja paduan rendah dengan kekuatan tinggi, dan dengan penambahan sejumlah kecil Nb, V atau Ti, baja ini mempunyai sifat yang sangat dibutuhkan di industri manufaktur seperti mudah dibentuk, dilas, sangat ulet serta mempunyai kekuatan yang tinggi, dengan minimum kekuatan tarik 350 MPa [1,2]. Karena memiliki persentase karbon dan paduan dalam jumlah yang amat kecil (paduan mikro) dan terbentuknya endapan karbida

paduan yang memperkuat baja, maka baja ini memiliki perbandingan antara kekuatan terhadap berat yang tinggi. Hal ini sangat menguntungkan karena HSLA lebih ringan untuk mendapatkan kekuatan yang sama, sehingga lebih ekonomis dilihat dari segi transportasi dan disain struktur. Kekuatan dari baja jenis ini dapat ditingkatkan dengan berbagai cara, antara lain dengan mekanisme penguatan presipitat, yaitu dengan penambahan sejumlah kecil paduan Nb, atau dengan metode penghalusan butir, atau dengan pengerasan pengerjaan dengan proses canai.

Kekuatan yang tinggi dari baja HSLA-Nb dipengaruhi oleh mikrostruktur akhir yang terbentuk. Oleh karena itu, dibutuhkan suatu proses terkendali yang dapat mengontrol mikrostruktur akhir baja, yang dikenal sebagai *Thermo Mechanical Control Process* (TMCP) [3]. Pada akhir proses ini diharapkan terbentuk butir ferit yang halus melalui pengerolan terkendali, dimana struktur ferit halus dapat meningkatkan kekuatan mekanis baja HSLA-Nb. Secara umum, proses termomekanik terdiri dari proses pemanasan awal (*reheating*), canai panas (*hot rolling*), serta pendinginan (*cooling*) [4,5].

Untuk menghasilkan butir ferit dengan ukuran yang halus di akhir proses, maka butir austenit juga harus dibuat menjadi halus. Pengontrolan butir austenit dalam penelitian ini terjadi setelah proses canai panas, yaitu pada aplikasinya, saat interval waktu antara canai panas pertama dan kedua, atau interval waktu antara canai panas dengan pendinginan, butir austenite mengalami *recovery*, rekristalisasi dan pertumbuhan butir [6]. Pertumbuhan butir terjadi setelah proses rekristalisasi selesai. Untuk tingkat deformasi di bawah 0,8, maka rekristalisasi yang terjadi adalah rekristalisasi statik. Dasar perhitungan pertumbuhan butir austenit selama ini berdasar Persamaan Beck [4,7], dimana eksperimen dilakukan pada kondisi anil, yang artinya pada kondisi yang isothermal. Persamaan tersebut dinyatakan sebagai berikut:

$$d^n - d_0^n = C \cdot t \tag{1}$$

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. Persamaan Beck selanjutnya disempurnakan oleh Sellars [4] dengan menganalisa data pertumbuhan butir pada baja C-Mn dan dapat menghitung nilai konstanta C , Persamaan 1 menjadi:

$$d^n - d_0^n = \left[A \exp \left\{ -\frac{Q_{gg}}{RT} \right\} \right] \cdot t \tag{2}$$

Dimana n dan A merupakan konstanta yang tergantung pada komposisi material dan kondisi proses, menurut Manohar [7], nilai $n = 4,5$ dan $A = 4,1 \times 10^{23}$ untuk baja C-Mn-Nb untuk kondisi rekristalisasi statik. Q_{gg} energi aktivasi untuk pertumbuhan butir, yaitu 435.000 kJ/mol [7], R konstanta gas universal 8,314 J/mol-K, T adalah temperatur absolut °K, dan t adalah waktu (detik). Persamaan 2 juga digunakan untuk menghitung pertumbuhan butir austenit selama proses manufaktur, dengan asumsi bahwa selama pertumbuhan butir, temperatur tetap. Sementara, pemrosesan material seperti pengecoran, pencanaian, dan pengelasan yang sesungguhnya berada dalam kondisi non-isothermal, sehingga perhitungan dalam disain proses menjadi tidak tepat, kekuatan akhir material sering tidak memenuhi spesifikasi akhir. Dalam industri, baja mengalami pemanasan, temperatur meningkat hingga temperatur austenit (*reheating*), penurunan temperatur dengan kecepatan tertentu diantara tahapan canai panas dan diakhir

proses mengalami penurunan temperatur ke temperatur ruang. Pertumbuhan butir austenit pada kondisi temperatur yang berubah (non-isothermal) akan memiliki kinetika yang berbeda dibandingkan dengan pertumbuhan butir austenite pada temperatur tetap (isothermal). Untuk itu diperlukan persamaan pertumbuhan butir austenit selama canai panas pada kondisi yang sesungguhnya (kondisi non-isothermal).

METODE PENELITIAN

Tahapan penelitian meliputi pemotongan spesi-men uji, pemanasan awal (*reheating*), proses canai panas, pendinginan, preparasi metalografi (amplas poles, dan etsa), pengamatan metalografi, pengukuran besar butir austenit, melakukan proses modifikasi terhadap persamaan pertumbuhan butir isothermal, untuk mendapatkan persamaan pertumbuhan butir non-isothermal.

Material

Dalam penelitian digunakan baja HSLA-0,019%Nb hasil coran kontinu dengan komposisi seperti pada Tabel 1

Tabel 1. Komposisi Kimia Baja HSLA -0,019%Nb (% berat)

Ti	C	Si	Mn	P	S	Al
0,001	0,165	0,007	0,664	0,005	0,005	0,037
Cu	Nb	V	Ni	Cr	N	Mo
0,032	0,019	0,005	0,021	0,013	0,033	0,002

Sampel uji yang digunakan berasal dari slab baja yang dipotong menjadi balok dengan dimensi sisi-sisinya 50 mm x 30 mm x 10 mm

Proses Pemanasan

Pemanasan awal yang dilakukan pada sampel uji pada temperatur 1200 °C (1473 °K) yang disertai dengan penahanan (*holding*) selama 5-10 menit pada masing-masing temperatur uji agar temperatur benda uji mencapai temperatur target secara homogen. Proses pemanasan dilakukan menggunakan dapur muffle Carbolite berkapasitas 1600 °C (1873 °K). Pemilihan temperatur tersebut bertujuan untuk mencapai kondisi austenisasi, sehingga nantinya dapat diperoleh fasa austenit. Pada setiap proses pemanasan, dilakukan pencatatan temperatur, baik temperatur di dalam dapur maupun temperatur di termokopel (temperatur sampel uji) untuk memastikan bahwa sampel uji mencapai temperatur pengujian.

Proses Canai Panas

Canai panas dilakukan dalam satu kali pass dengan regangan deformasi $\epsilon = 0,4$. Pencanaian dilakukan dengan menggunakan mesin canai merek ONO dengan kapasitas beban maksimum 20.000 KgF. Proses canai ini dilakukan satu persatu setiap benda uji.

Pendinginan

Proses pendinginan dilakukan melalui dua tahap, pendinginan lambat dan cepat. Pendinginan dilakukan dengan menggunakan bantuan Heating Jacket atau kipas angin dan waterjet spray. Untuk menghasilkan kecepatan pendinginan yang lambat, benda uji dimasukkan ke dalam heating jacket dengan variasi temperatur 450, 350, 250, 150, 50 °C. Selain itu, digunakan kipas angin dengan kecepatan terendah dan pendinginan pada temperatur kamar selama kurang lebih 20 detik sebelum didinginkan cepat dengan waterjet spray. Pendinginan dengan waterjet spray dimaksudkan supaya benda memiliki struktur akhir martensit, yang diperlukan untuk pengamatan struktur mikro austenit prior. Temperatur selama proses dimonitor dengan kawat termokopel yang dihubungkan ke program "temperature acquisition" yang dihubungkan ke komputer sehingga kecepatan pendinginan dapat dihitung dengan teliti. Kecepatan pendinginan didapat dengan menghitung penurunan temperatur dibagi dengan waktu, dengan menghitung jumlah skala penurunan temperatur dan jumlah skala waktu. Contoh diagram penurunan temperatur terhadap waktu dapat dilihat pada Gambar 4.

Preparasi, Pengujian Metalografi, dan Pengamatan Mikrostruktur

Untuk menjaga supaya kondisi butir benda uji setelah canai panas tidak berubah, maka benda uji tidak mengalami proses pemotongan untuk pengujian metalografi. Preparasi benda uji dilakukan untuk melihat jejak struktur butir austenit prior dalam struktur akhir yang terbentuk pada benda uji setelah pendinginan. Tahapan preparasi dimulai dari amplas, poles, kemudian etsa. Pengamplasan dilakukan dengan menggunakan kertas amplas yang dimulai dari amplas kasar hingga amplas halus untuk mendapatkan permukaan benda uji yang halus dan merata di seluruh permukaan. Ukuran kekasaran dari kertas amplas yang digunakan yaitu: #80, #120, #240, #400, #600, #800, #1000, #1200, #1500 (dalam mesh). Proses pengamplasan dilakukan dengan mengubah arah pengamplasan setiap pergantian tingkat kekasaran kertas amplas untuk meniadakan sisa pengamplasan sebelumnya. Setelah itu benda uji dipoles untuk mendapatkan permukaan yang lebih halus dan mengkilap serta menghilangkan bekas goresan akibat pengamplasan. Proses pemolesan dilakukan dengan menggunakan kain poles dan bahan poles berupa serbuk alumina. Proses selanjutnya yaitu etsa yang bertujuan untuk memunculkan jejak batas butir austenit prior dalam struktur akhir dari benda uji. Untuk mendapatkan jejak batas butir austenit prior, penggunaan zat etsa dan waktu etsa harus tepat. Proses etsa dilakukan melalui etsa kimia dengan menggunakan larutan jenuh asam pikrik (30 gram asam pikrik dalam 100 ml alkohol 96%) ditambah 1 tetes HCl dan pengetsaan dilakukan selama ± 30 detik [8, 9,10].

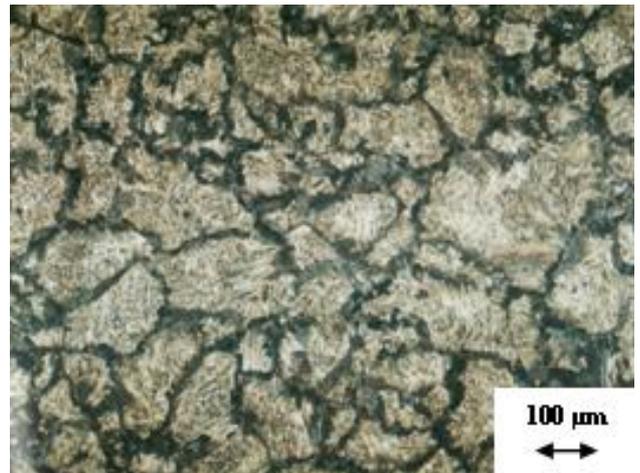
Penghitungan Besar Butir Austenit

Setelah didapat foto mikro dari benda uji, kemudian dilakukan penghitungan besar butir austenit. Penghitungan ini menggunakan metode Intercept linear dan merujuk ke standar ASTM E112 secara manual [11], atau dengan bantuan Program Picsara.

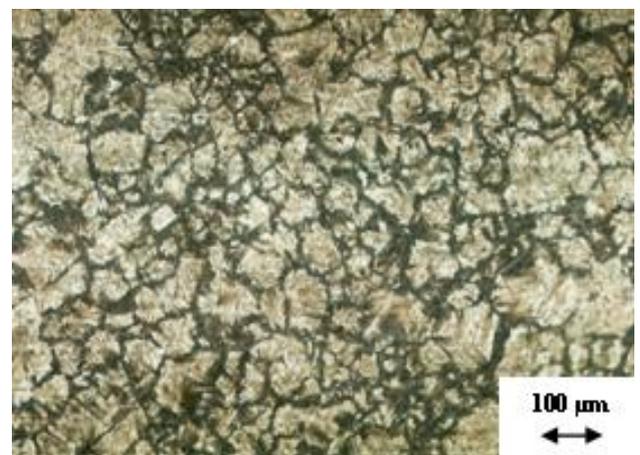
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Foto Mikro

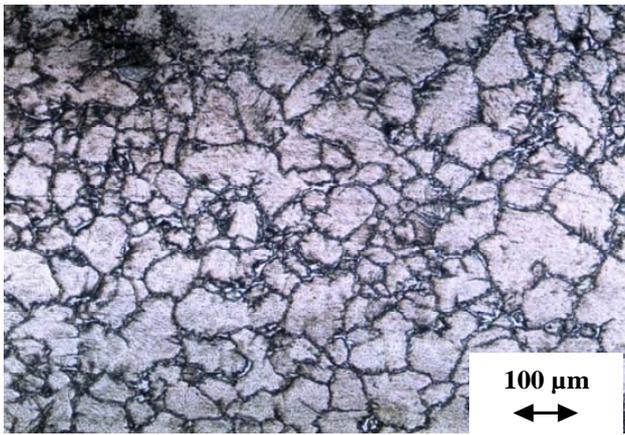
Setelah sampel melalui tahap canai panas, pendinginan udara dengan variasi kecepatan pendinginan, yang dilanjutkan pendinginan cepat menggunakan air, sampel dilakukan preparasi metalografi. Etsa menggunakan larutan etsa asam pikrik jenuh. Kemudian dilakukan pengambilan foto mikro. Contoh foto mikro masing-masing sampel dapat dilihat pada Gambar 1 sampai dengan Gambar 4.



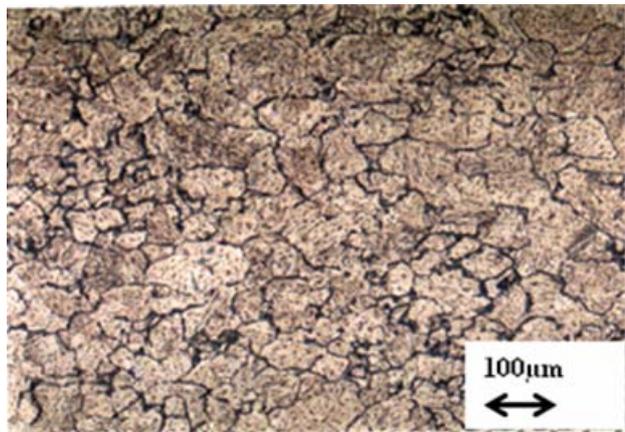
Gambar 1. Foto Mikro Sampel dengan Laju Pendinginan 7,5 °K/dtk.



Gambar 2. Foto Mikro Sampel dengan Laju Pendinginan 8 °K/dtk.



Gambar 3. Foto Mikro Sampel dengan Laju Pendinginan 9 °K/dtk.



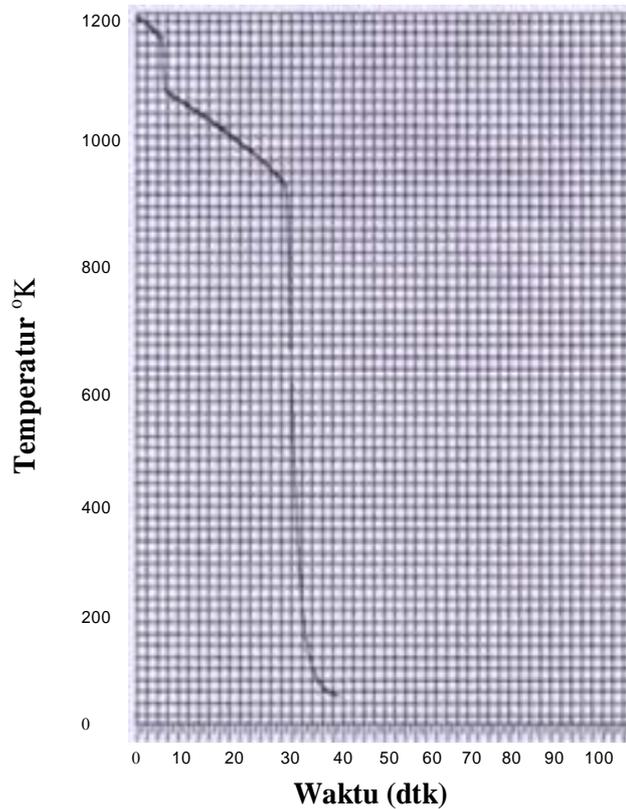
Gambar 4. Foto Mikro Sampel dengan Laju Pendinginan 12,3 °K/dtk.

Penghitungan Butir Austenit

Dari foto mikro sampel pada setiap kecepatan pendinginan, dihitung ukuran butir austenit masing-masing sampel. Setiap sampel dihitung sebanyak 10 kali, kemudian hasilnya dirata-rata. Penghitungan ukuran butir austenit dapat dilihat pada Tabel 2. Gambar 5 menunjukkan diagram hasil proses monitor temperatur dari perangkat *temperature acquisition* selama proses canai panas. Perhitungan kecepatan pendinginan pada setiap sampel dihitung berdasarkan skala penurunan temperatur terhadap skala waktu pada diagram tersebut. Saat baja mengalami deformasi hingga sesaat sebelum pendinginan cepat pada eksperimen.

Tabel 2. Penghitungan Ukuran Butir Austenit

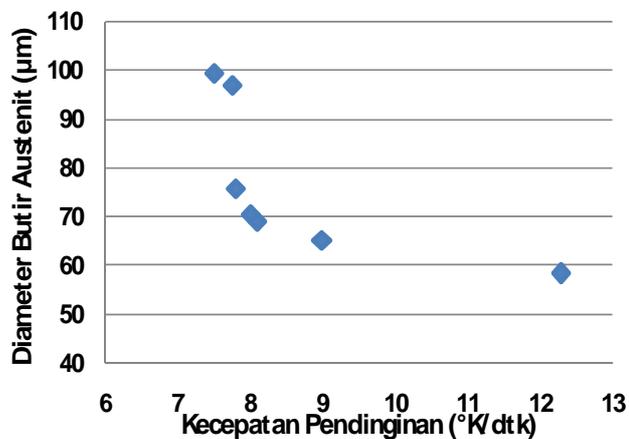
Sampel	Kecepatan Pendinginan (°K/dtk)	Ukuran Butir (μm)
1	7,5	99,41
2	7,7	96,93
3	7,8	75,86
4	8,0	70,47
5	8,1	69,18
6	9,0	65,29
7	12,3	58,43



Gambar 5. Ilustrasi Perhitungan Kecepatan Pendinginan

Hubungan antara Kecepatan Pendinginan dan Ukuran Butir Austenit

Dari hasil penghitungan ukuran butir yang telah dilakukan, maka dapat diketahui hubungan antara kecepatan pendinginan dengan ukuran butir austenit. Hubungan tersebut dapat dilihat pada Gambar 6. Gambar tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi kecepatan pendinginan, maka ukuran butir akhir austenit akan semakin kecil. Hal ini sesuai dengan teori pertumbuhan butir, dimana semakin tinggi kecepatan pendinginan, maka butir tidak akan sempat tumbuh, sehingga akan memiliki ukuran butir yang kecil.

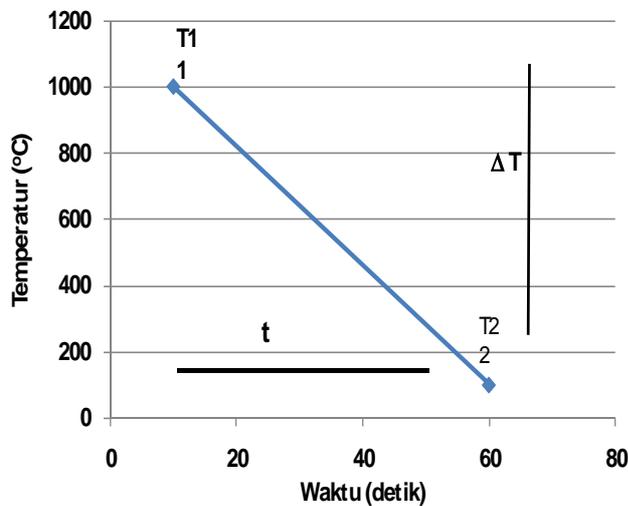


Gambar 6. Hubungan Antara Kecepatan Pendinginan dan Ukuran Butir Austenite

Perbandingan Pertumbuhan Butir Austenit dalam Keadaan Isotermal dengan Non-Isotermal

Dari Persamaan Beck [4,7] pertumbuhan butir austenit digambarkan pada Persamaan 1 dan disempurnakan oleh Sellars [4] seperti pada Persamaan 2 untuk kondisi reheating dimana butir austenit tumbuh pada temperatur konstan (isotermal).

Untuk keadaan non-isotermal, nilai T akan berubah mengikuti nilai t yang diberikan. Hal ini menyebabkan adanya variabel T1 dan T2, yang akan menimbulkan adanya ΔT pada setiap nilai t yang diberikan. Ilustrasi dari variabel yang ada untuk pendinginan dalam keadaan non-isotermal dapat dilihat pada Gambar 7 dan Tabel 3.



Gambar 7. Ilustrasi Variabel untuk Pendinginan dalam Keadaan Kontinu.

Dari Gambar 7, terlihat bahwa variabel ΔT mempengaruhi kinetika pertumbuhan butir, untuk keadaan non-isotermal. Secara matematis, Persamaan 2 (dari Sellars), dapat ditulis dengan memasukkan kedalamnya variabel kondisi non-isotermal seperti pada Persamaan 3 dan dapat dijelaskan sebagai berikut.

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

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

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

$$d^n - d_0^n = \left[A \cdot \exp\left(\frac{-Q_{gg}}{RT}\right) \right] \cdot \Delta T \cdot \frac{1}{Cr} \quad (3)$$

Dari Persamaan 3, terlihat bahwa untuk pertumbuhan butir austenit dipengaruhi oleh perubahan temperatur (ΔT) selama pertumbuhan butir dan Cr (*cooling rate*) kecepatan pendinginan), yaitu perubahan temperatur persatuan waktu ($\Delta T/t$). Walaupun demikian asumsi yang ada pada Persamaan 3 tetap berdasar pada Persamaan Sellars, yaitu kondisi isothermal. Persamaan 3 akan dievaluasi terhadap hasil eksperimen.

Modifikasi Persamaan untuk Kondisi Non-Isotermal

Dari data hasil eksperimen, nilai diameter akhir austenite (d), dapat dilihat pada Tabel 3. Nilai ini kemudian dimasukkan ke dalam Persamaan 3 untuk mendapatkan nilai d_0 atau d rekristalisasi hasil eksperimen, yaitu diameter butir awal sebelum pertumbuhan butir, saat butir baru selesai rekristalisasi.

Pada tabel 3, ΔT (°K) adalah penurunan temperatur selama pengamatan setelah canai hingga sesaat sebelum didinginkan cepat, *cooling rate* (Cr (°K/s)) adalah kecepatan pendinginan yang didapat dengan menghitung skala penurunan temperatur terhadap waktu seperti pada Gambar 5, yang didapat dari data monitor *temperature acquisition*. A, n dan Q adalah konstanta yang didapat dari eksperimen Beck dan Sellars yang dikonfirmasi oleh Manohar [7], untuk baja C-Mn-Nb, untuk kondisi rekristalisasi statik. Nilai T(°K) adalah temperatur deformasi, nilai d (µm) adalah diameter akhir butir austenit, dan nilai $d^n - d_0^n$ didapat dari Persamaan 3, yang menggambarkan nilai pertumbuhan butir setelah rekristalisasi statik yang terjadi setelah proses canai panas. Dari hasil eksperimen di atas didapat nilai d_0 yang merupakan diameter butir austenit saat proses rekristalisasi statik selesai setelah canai panas. Berdasarkan data di atas, dalam pendekatan model pertumbuhan butir austenit dengan model dasar Persamaan Sellars, nilai d_0 dihitung nilai rata-rata dari berbagai kecepatan pendinginan, didapat 67 µm dan nilai ΔT dimasukkan nilai rata-rata adalah 160°C. Temperatur deformasi pada model adalah 1200 °K, dengan

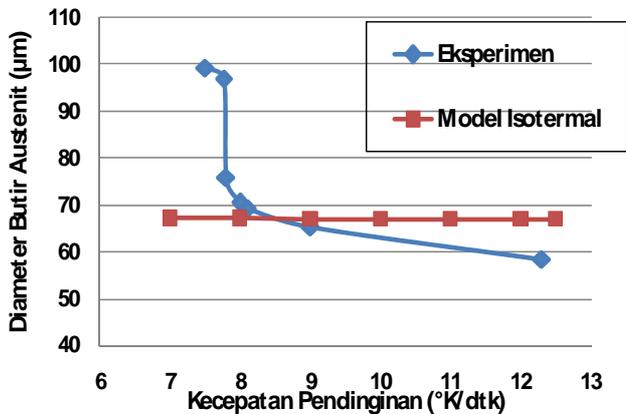
Tabel 3. Data Hasil Eksperimen

ΔT (°K)	Cr (°K/dtk)	A	Q (kJ/mol)	T(°K)	$d^n - d_0^n$	d (µm)	d_0 (µm)
195	7,5	4,1E+23	-435000	1398	583550726.2	99,41	81.12
170	7,7	4,1E+23	-435000	1383	327580854.6	96,93	87.26
156	7,8	4,1E+23	-435000	1369	203075955.5	75,86	57.88
180	8,1	4,1E+23	-435000	1323	59707499.87	69,18	63.63
135	9	4,1E+23	-435000	1308	25601987.79	65,29	62.57
135	12,3	4,1E+23	-435000	1338	45952661.25	58,43	49.73

Tabel 4. Pendekatan Pertumbuhan Butir Austenit dengan Persamaan Sellars.

$\Delta T(^{\circ}K)$	$Cr(^{\circ}K/s)$	A	Q(kJ/mol)	T(^{\circ}K)	$d^n - d_0^n$	$d_0(\mu m)$	d(μm)
160	7	4,1E+23	-435000	1200	1064021.102	67	67.09
160	8	4,1E+23	-435000	1200	931018.464	67	67.08
160	9	4,1E+23	-435000	1200	827571.968	67	67.07
160	10	4,1E+23	-435000	1200	744814.7712	67	67.06
160	11	4,1E+23	-435000	1200	677104.3375	67	67.06
160	12	4,1E+23	-435000	1200	620678.976	67	67.05
160	12,5	4,1E+23	-435000	1200	595851.817	67	67.05

memperhitungkan temperatur sampel sekitar 10% di bawah temperature baca pada termokopel. Nilai ini dimasukkan ke dalam Persamaan 3, yang merupakan model Sellars yang sama dengan memasukkan faktor kecepatan pendinginan. Hasil simulasi terhadap Persamaan 3 dapat dilihat pada Tabel 4.

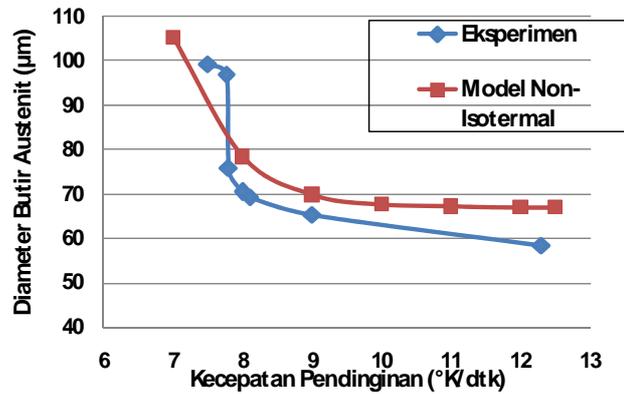


Gambar 8. Perbandingan Hasil Eksperimen dengan Model Persamaan Isotermal

Terlihat pada Tabel 4 dan Gambar 8 bahwa model Persamaan Isothermal Sellars belum mendekati grafik hasil eksperimen. Artinya, Persamaan 3 belum menggambarkan pertumbuhan butir Austenit pada kondisi non-isotermal. Oleh sebab itu, perlu dilakukan suatu modifikasi dengan penambahan konstanta pada model Persamaan 3. Berdasarkan kecenderungan bentuk grafik eksperimen melengkung, maka pendekatan dilakukan dengan memasukkan konstanta m sebagai pangkat dari kecepatan pendinginan ($1/Cr^m$) dan nilai B dimasukkan untuk mencapai kesamaan tinggi grafik. Sehingga diperkirakan bentuk persamaan yang mendekati situasi non-isotermal adalah;

$$d^n - d_0^n = \left[A \cdot \exp\left(\frac{-Q_{gs}}{RT}\right) \right] \cdot \left[B \cdot \Delta T \cdot \frac{1}{Cr^m} \right] \tag{4}$$

Bentuk Persamaan 4 kemudian diiterasi dengan bantuan program Microsoft Excel, dengan berbagai variasi nilai konstanta B dan m, hingga grafik model mendekati hasil eksperimen. Sebagai hasilnya, didapat konstanta yang menghasilkan grafik model yang mendekati grafik hasil eksperimen seperti pada Gambar 9.



Gambar 9. Hasil Eksperimen Terhadap Model Persamaan Non-isotermal Hasil Modifikasi

Gambar 9 menunjukkan model cukup mendekati hasil eksperimen, walaupun ada perbedaan pada kecepatan pendinginan maksimum yang diamati pada eksperimen ini yaitu sekitar 12 °K/s, dimana model sedikit lebih landai, namun secara umum model cukup menggambarkan pertumbuhan butir austenite pada kondisi non-isotermal, dan kondisi ini didapat dengan melakukan modifikasi terhadap Persamaan Sellars dengan memasukkan konstanta B dan m sebesar 1×10^{14} dan 14 pada persamaan Sellars. Nilai B dan m pada persamaan ini adalah merupakan gabungan pengaruh faktor komposisi, variabel proses dan perubahan temperatur persatuan waktu selama pertumbuhan butir, yang belum terakomodir pada Persamaan Empiris Sellars.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa persamaan empiris pertumbuhan butir austenit kondisi non-isotermal yang mendekati kondisi sesungguhnya dalam aplikasi canai panas di industri adalah seperti Persamaan 4, dan untuk baja HSLA-0,019%Nb memiliki persamaan seperti pada Persamaan 5.

$$d^{4.5} - d_0^{4.5} = \left[4,1 \times 10^{23} \exp\left(-\frac{435}{8,34+1 \times 7}\right) \right] \cdot \left[1 \times 10^{14} \cdot \Delta T \cdot \frac{1}{Cr^{14}} \right] \tag{5}$$

- dimana
- d = besar butir akhir (μm)
- d_0 = besar butir awal (μm)
- n, A, Q_{gs} = konstanta material (4,5; $4,1 \times 10^{23}$; 435 kJ/mol)
- T = temperatur deformasi (K)
- ΔT = perubahan temperatur selama kondisi non-isotermal (K)
- Cr = kecepatan pendinginan (K/s)

$B, m = \text{konstanta material hasil percobaan (1 x 10}^{14}, 14)$

Persamaan 5 merupakan persamaan yang menggambarkan pertumbuhan butir Austenit baja HSLA-0,019%Nb setelah proses canai panas dengan kondisi non-isotermal seperti sebagaimana kondisi sesungguhnya pada proses canai panas di Industri.

KESIMPULAN

Persamaan pertumbuhan butir Sellars tidak tepat untuk diterapkan dalam memprediksi pertumbuhan butir austenit baja HSLA-0,019%Nb pada aplikasi proses canai panas. Hal tersebut karena dalam persamaan Sellars, temperatur diasumsikan konstan selama proses deformasi, sementara pada kondisi sesungguhnya butir austenit tumbuh pada kondisi non-isotermal, pada proses pemanasan sebelum canai dan pendinginan setelah canai panas. Hasil eksperimen pada penelitian ini menunjukkan bahwa pertumbuhan butir austenit non-isotermal dapat digambarkan sebagai fungsi kecepatan pendinginan. Besar butir semakin menurun dengan meningkatnya kecepatan pendinginan. Pertumbuhan butir austenit non-isotermal didapat dengan melakukan modifikasi terhadap Persamaan Beck dan Sellars, dengan memasukkan konstanta m sebagai pangkat dari kecepatan pendinginan dari $1/Cr$ menjadi $1/Cr^m$, dimana $m = 14$ dan konstanta B sebesar 1×10^{14} . Didapatkan model empiris persamaan pertumbuhan butir austenit kondisi non-isotermal baja HSLA-0,019%Nb yaitu Persamaan 5 yang mendekati kondisi sesungguhnya di industri baja. Untuk mendapatkan batasan berlakunya persamaan ini, perlu dilakukan penelitian lanjutan terhadap beberapa komposisi baja HSLA dengan perbedaan komposisi Nb dan C, untuk mendapatkan nilai konstanta yang berlaku dengan rentang komposisi tertentu.

DAFTAR PUSTAKA

1. B.K Panigrahi, "Processing of low carbon steel plate and hot strip-an overview", Jurnal Teknologi, 24(4): pp. 361-371, 2001.
2. Yang H. Bae, et al., *Effects of Austenite Conditioning on Austenite/Ferrite Phase Transformation of HSLA Steel*, Jurnal Teknologi, 45(1): pp. 137-142, 2004.
3. HR Wang and W Wang, *Simple Model for Austenite Grain Growth in Microalloyed Steel*, Institute of Materials, Minerals and Mining Maney on Behalf of Institute, vol 24, number 2, 2008.
4. C.M Sellars, *Static Recrystallization and Precipitation During Hot Rolling of Microalloyed Steels*, Mat Science Seminar, pp. 1-18, 1982.
5. Eddy S.Siradj, *Strain induced precipitation kinetics of Nb(CN) in Nb-HSLA Steel as a function of thermomechanical history*, Ph.D Thesis, The Department of Engineering Materials University of Sheffield, pp. 9, 1997.
6. 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, pp. 157-165, 1995.
7. P.A.Manohar, D.P Dunne, T Chandra and C.R.Killmore, *Grain Growth Prediction in Microalloyed Steel*, Department of Materials Engineering, University of Wollongong, Northfields avenue, Wollongong, NSW 2522, Australia, Journal of ISIJ International, vol 36 No 2, pp. 194-200, 1996.
8. 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.
9. Chris North, "Etching to reveal grain boundaries", Experts Metallography Forum, USA, 2007.
10. Myrna Ariati, W Narottama Putra, Sutopo, and D Febriani, *Etchant Selection for the High Metallographic Quality of HSLA-0,037%Nb Prior-Austenite Grain Boundaries*, Proceeding of The 11th International Conference of Quality in Research, FTUI, Depok, Jakarta., Indonesia, ISSN 114-1284 pp. 974-979, 2009.
11. Voort, Van der, *Metallography Principles and Practice*, McGraw Hill Book Co. pp. 166-170; 219-223, 1984.