

## Hubungan Tegangan Deformasi Dan Presipitasi Kinetik Nb(CN) Pada Baja HSLA Pada Temperatur 900 °C

Eddy S. Siradj

Department Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia.  
Kampus UI Depok 16424, Tel(021)7863510  
Email: siradj@yexa.eng.ui.ac.d

### Abstrak

Peranan paduan mikro dalam baja High Strength Low Alloy (HSLA) sangat dominan didalam meningkatkan kualitas baja tersebut. Terbentuknya presipitasi karbonitrida berupa Nb(CN) pada baja yang mengandung Niobium akan sangat mempengaruhi kekuatan baja tersebut. Mekanisme peningkatan kekuatan akibat adanya presipitasi dari paduan mikro pada akhir deformasi panas belum sepenuhnya di pahami. Penelitian sebelumnya lebih melakukan pendekatan terhadap peningkatan kerapatan sisipan (dislocation) akibat deformasi. Baja Nb-HSLA yang mengandung 0,031%Nb dipergunakan dalam penelitian ini, dengan menggunakan penekanan bidang (Compressive plane stress), hubungan kinetik presipitasi pada 5% fraksi endapan,  $t_{0,5}$ , dengan maksimum tegangan yang dicapai pada temperatur 900°C dengan laju regangan 1 detik<sup>-1</sup> diamati. Hasil analisa data penelitian memperlihatkan bahwa hubungan presipitasi kinetik dan kerapatan sisipan adalah  $t_{0,5} = \rho^{-1.5}$ .

**Kata kunci:** HSLA, presipitation hardening, Nb(CN) dan micro alloyed steel

### Abstract

Micro alloying in High Strength Low Alloy (HSLA) steel is very important role to improve the quality of those steel formation of precipitation of carbonitride such as Nb(CN) in those niobium containing steel has a significant influenced on strength. Mechanism of strength improvement due to the existing of micro alloy the precipitated in hot finishing deformation not fully studied. The previous investigated use relationship between deformation and density of dislocation. HSLA steel containing 0.031% Nb was used in this research and deformation was performed using compressive plane stress, the relationship between 5% fraction precipitate,  $t_{0,5}$ , and maximum stress achieved at a temperature of 900°C under strain rate of 1 sec<sup>-1</sup> were evaluated. Analysis data results shows that the relationship between 5% fraction and density of dislocation can be described as,  $t_{0,5} = \rho^{-1.5}$ .

**Keywords:** HSLA, presipitation hardening, Nb(CN) and micro alloyed steel

### 1. Latar Belakang

Baja HSLA oleh peneliti sebelumnya [1] telah didefinisikan baja HSLA (High Strength Low Alloy) sebagai baja yang memiliki kekuatan luluh (Yield strength) dari 350 sampai 750 N/mm<sup>2</sup>. Menurut AISI (American Iron and Steel Institute) mendefinisikan; HSLA adalah baja yang spesifik dengan komposisi kimia yang dapat meningkatkan nilai kekuatan mekanis.

Penguatan baja HSLA terjadi selama proses "thermomechanical treatment"

setelah deformasi akhir. Peningkatan penguatan dalam baja HSLA disebabkan dan internal stress yang secara tidak langsung akibat adanya presipitasi paduan mikro seperti Nb(CN), Ti(CN) dan V(CN).

Terbentuknya presipitasi paduan mikro tersebut dalam baja HSLA menyebabkan peningkatan kekuatan, akibat *precipitation hardening*. Kinetika terbentuknya pengendapan paduan mikro telah banyak dilakukan, oleh Dutta dan Sellars[2], yang menggambarkan kinetika terbentuknya pengendapan Nb(CN) dalam baja Nb-HSLA sebagai berikut,

$$t_{0,05} = A [Nb]^{-1} \varepsilon^{-1} Z^{-0.5} \exp(270000/RT) \exp(B/T^3 (\ln k_s)^2)$$

dimana  $t_{0,05}$  = 5% fraksi presipitasi

[Nb] = kandungan Nb dalam % berat

$\varepsilon$  = regangan deformasi

Z = Zener Hollomon parameter

$$= \varepsilon \exp[400.000/RT]$$

$k_s$  = ratio supersaturasi

Q = energi aktivasi

A dan B = Konstanta

R dan T = konstanta gas dan temperatur

Rumusan tersebut diatas menggambarkan hubungan faktor internal bahan yaitu komposisi dan eksternal yaitu, regangan, temperatur dan laju regangan. Waktu yang diperlukan untuk terbentuknya 5% fraksi endapan Nb(CN) telah dianggap merupakan waktu awal terbentuknya endapan. Walaupun demikian dengan metoda deteksi yang lebih sempurna, melalui *stress relaxation* teknik, waktu pencapaian terbentuknya 2 – 3 % fraksi endapan dapat dideteksi dengan baik.

Telah diamati sebelumnya oleh Siradj[3], pada 5% fraksi endapan terbentuk, ukuran endapan yang terlihat dengan Transmission Electron Microscope adalah 2-5 nm diameter. Ini merupakan endapan yang sangat kecil, dimana efektifitas endapan didalam peranannya untuk memperkuat baja HSLA (precipitation hardening) diamati pada besar endapan dari 2 sampai 10 nm.

Landasan teori penguatan akibat adanya dispersi endapan yang bersifat *coherent*, disampaikan pertama kali oleh Mott dan Nabarro yang menjelaskan penguatan kristal akibat adanya *coherent inclusions*. Pada gambar 1 dibawah ini memperlihatkan penguatan dari Al-Cu akibat adanya partikel inklusi baik yang berada dalam larutan padat (solid solution), di daerah Guinier-Preston maupun dalam bentuk endapan.

Akibatnya adanya distorsi dari matrix akibat presipitasi coherent, pengerasan kristal akan terjadi yang diakibatkan terbentuknya tegangan dalam elastis (internal elastic stresses,  $\sigma_i$ ) yang dapat digambarkan sbb,

$$\sigma_i = \pm \mu \eta [R/D]^3 \quad (1)$$

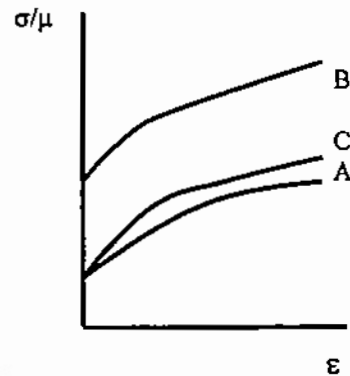
dimana  $\sigma_i$  = Tegangan dalam elastis

$\mu$  = Modulus geser

$\eta$  = Faktor ukuran inklusi

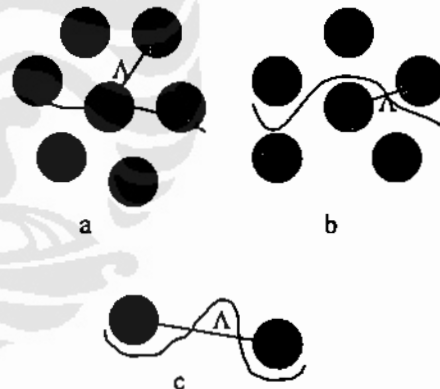
R = Jari-jari inklusi koheren

D = Jarak antara inklusi



Gambar 1.

Kurva Tarik Dari Kristal Tunggal Al-Cu (3,5 % Berat Cu) Setelah Dilakukan Perbedaan Perlakuan. A: Larutan Padat, B : G-P Zone, C : Presipitasi



Gambar 2.

Teori Mott dan Nabarro : a. Larutan Padat b. G-P zones c. Presipitasi

Untuk distribusi inklusi yang lebih uniform, maka tegangan dalam elastis akibat adanya inklusi koheren dapat digambarkan sbb;

$$\sigma_i = \pm \mu \eta [2R/\Lambda]^3 \cong \mu \eta f \quad (2)$$

dimana  $f$  adalah fraksi dari atom inklusi dan  $\Lambda$  adalah amplitudo jarak antara endapan.

Penguatan baja akibat inklusi Nb(CN) diatas, sebelumnya telah dievaluasi[2] dalam penelitiannya penguatan yang terjadi

setelah deformasi akhir (*finishing*) pada temperatur 900°C setelah sebelumnya dilakukan deformasi awal (*roughing deformation*). Dalam hal ini, nilai  $\eta$  merupakan derajat ketidak sesuaian (*degree of misfit*) fungsi dari radius atom matrix Fe dan inklusi Nb. Dalam pengamatan tersebut hanya melihat kepada adanya penguatan yang hanya diakibatkan faktor distorsi dari inklusi, tidak mempertimbangkan adanya peningkatan kerapatan sisipan (*dislocation density*).

Apabila suatu material mengalami perubahan bentuk akibat deformasi plastis, akan menimbulkan banyak sisipan, pergerakan sisipan dan terjadinya interaksi antara sisipan. Dengan meningkatnya kerapatan sisipan, akan membuat material tersebut mempunyai nilai pengerasan regang (*Strain hardening*) yang tinggi.

Mekanisme lain dari peningkatan pengerasan regang adalah diakibatkan juga adanya tegangan balik (*back stress*) dari tahanan timbunan sisipan (*dislocation pile up*). Hal ini diketahui terjadi akibat pergerakan sisipan pada bidang geser yang memotong sisipan pada bidang aktif. Tegangan geser yang diperlukan untuk menggerakkan sisipan pada bidang geser dapat digambarkan sbb;

$$\tau = \tau_0 + \alpha \mu b \rho^{1/2} \quad (3)$$

dimana  $\tau_0$  = tegangan geser yang diperlukan untuk menggerakkan sisipan tanpa ada interaksi sisipan lainnya.

$\alpha$  = bilangan konstan yang tergantung kepada bahan dimana besarnya 0,3 dan 0,6 untuk fcc dan bcc.

$\mu$  = modulus geser elastisitas, b adalah burger vector dan

$\rho$  = kerapatan sisipan (*dislocation density*).

Akibat deformasi panas pada akhir deformasi akhir (*finishing deformation*) yang pada umumnya dilakukan pada temperatur 900°C, terjadi proses deformasi yang menyebabkan meningkatnya kerapatan sisipan. Setelah deformasi terjadi

juga kinetika pengendapan presipitasi (*strain induced precipitation kinetics*). Pengendapan inklusi Nb(CN), menurut Mott and Nabarro, akan menimbulkan tegangan dalam elastis yang disebabkan adanya distorsi kisi matrix. Sehubungan dengan itu juga, akibat regangan deformasi dan laju regangan yang dialami benda kerja, endapan paduan mikro mulai terbentuk secara kinetik.

Hal ini terlihat dengan jelas, mekanisme penguatan dari baja Nb-HSLA diakibatkan oleh;

1. Adanya tegangan dalam elastis akibat pengendapan paduan mikro dari Nb(CN) dalam matrix, (*precipitation hardening*).
2. Meningkatnya kerapatan sisipan (*dislocation*) yang akan membawa efek *interlocking, pile up dislocation*.

Dalam penelitian ini, mekanisme penguatan diamati dalam bentuk hubungan antara pengerasan pengendapan (*precipitation hardening*) yaitu lebih ditekankan kepada kinetika atau laju pengendapan dengan peningkatan dari kerapatan sisipan akibat deformasi pada temperatur konstan 900°C dengan menggunakan baja Nb - HSLA (*single alloying*).

## 2. Bahan dan Metoda Penelitian

Untuk mempermudah pengamatan terhadap pengaruh partikel endapan dari baja HSLA, maka baja HSLA dengan kandungan satu unsur paduan (*single alloying*) di pergunakan. Unsur paduan Niobium (Nb) dalam baja HSLA yang membentuk endapan Nb(CN) akan diteliti lebih lanjut terutama pada laju pembentukannya. Pada Tabel 1, komposisi baja tersebut dalam persen berat dapat dilihat.

Baja HSLA yang dipergunakan adalah hasil dari canai panas (*hot rolled*). Benda uji dibuat dengan ukuran 60x30x10 mm dan diberikan lapisan CrO untuk mencegah

terbentuknya oksida (scale) selama proses pemanasan.

Tabel 1.

Komposisi Kimia Dalam Persen Berat, Baja HSLA-Nb yang Dipergunakan Dalam Penelitian ini. (G= Jenis Baja)

G	C	Si	Mn	S	N	Nb
1	0,02	0,45	1,30	0,003	0,0024	0,1
2	0,013	0,47	1,21	0,004	0,0032	0,09
3	0,1	0,37	1,35	0,019	0,0012	0,03

Kandungan P = 0,005.

Deformasi dilakukan dengan cara penekanan sistim dua bidang (plane strain compressive) menggunakan mesin tekan hydraulic SERVO PULSAR. Penekanan dilakukan pada benda kerja yang terlebih dahulu dilakukan pemanasan, siklus panas benda kerja selama pengujian dapat dilihat pada Gambar 1 dibawah ini. Pada gambar tersebut diperlihatkan dimana sebelum benda kerja di deformasi, pemanasan dilakukan pada temperatur diatas temperatur kelarutan endapan Nb(CN).

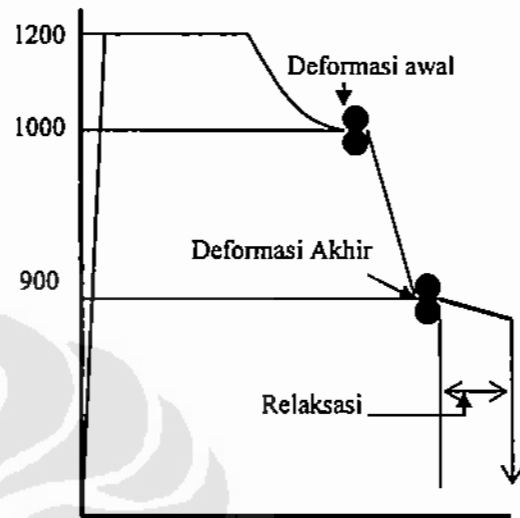
Temperatur kelarutan (*solubility temperature*) dari baja HSLA ini dihitung dengan menggunakan rumusan Irvine dkk [4] yang pada umumnya telah banyak dipergunakan oleh peneliti dalam bidang ini sebelumnya. Waktu tahan pada temperatur tersebut selama 30 menit dan setelah itu dilakukan pendinginan udara hingga mencapai temperatur bervariasi antara 1100 - 980°C dan deformasi dilakukan dengan regangan 0,3 , 0,5 dan 0,7 pada laju regangan yang konstant sebesar 1 detik<sup>-1</sup>.

Deformasi akhir dilakukan setelah benda kerja mencapai temperatur 900 °C. Regangan deformasi diberikan adalah sebesar 0,5 dengan laju regangan 1 detik<sup>-1</sup>. Setelah deformasi akhir dilakukan, benda kerja didinginkan dengann cepat (*quenching*). Setelah deformasi awal pada temperatur diatas 900 °C yaitu pada fasa austenit, terjadi peningkatn kerapatan sisipan (*dislocation*) yang merupakan fungsi dari temperatur dan regangan deformasi.

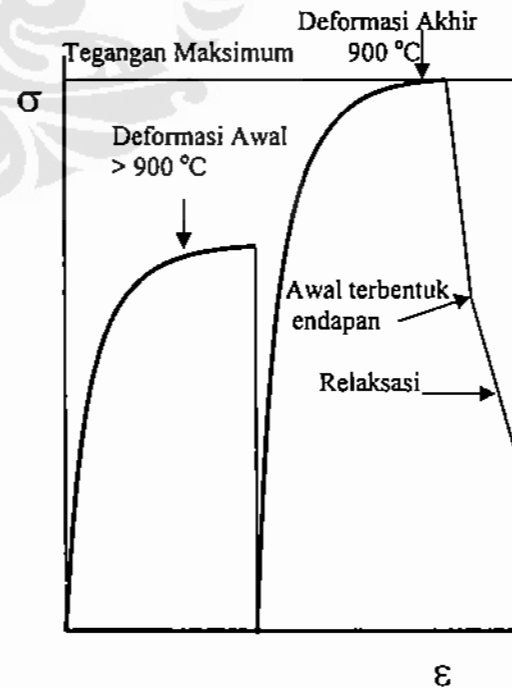
Pada gambar 2 memperlihatkan ilustrasi kurva regangan tegangan kedua

deformasi tersebut. Deformasi akhir yang di lakukan pada baik temperatur, regangan dan laju regangan yang konstan dimaksudkan untuk mengetahui pengaruh kerapatan sisipan yang terbentuk setelah deformasi awal terhadap tegangan maksimum yang dapat dicapai.

Temperatur °C



Gambar 1. Siklus Panas yang Dialami Benda Kerja Dalam Penelitian ini.



Gambar 2. Ilustrasi Tegangan-Regangan Pada Deformasi Awal dan Deformasi Akhir.

Relaksasi dilakukan setelah deformasi akhir diberikan. Hal ini dimaksudkan untuk mendeteksi awal terbentuknya presipitasi dari Nb(CN). Sehingga korelasi antara tegangan maksimum yang terjadi yang merupakan fungsi dari kerapatan sisipan dengan waktu awal terbentuknya endapan Nb(CN) dapat dilakukan.

### 3. Hasil Penelitian dan Pembahasan

Dari hasil pengamatan data hasil uji tekan panas memperlihatkan bentuk kurva tegangan regangan finishing baja HSLA Nb no 2 pada temperatur 900°C setelah terlebih dahulu diberikan deformasi awal pada temperatur 1028°C dengan regangan deformasi yang berbeda. Tanpa diberikan deformasi awal dan deformasi yang kecil 0,1, memperlihatkan tegangan deformasi yang rendah dibandingkan apabila diberikan regangan deformasi pada 0,3 dan 0,47 sebelumnya. Begitu juga apabila awal deformasi dilakukan pada temperatur yang lebih tinggi 1140°C. Pada Tabel 2, dapat dilihat hasil pengujian tekan panas tersebut yang meliputi nilai maksimum nilai tegangan yang dicapai.

**Table 2.**  
Hasil Tekan Panas Pada Temperatur 900 °C Dengan Laju Regangan 1 Detik<sup>-1</sup>

Jenis Baja	Regangan Roughing (x100%)	Temp Roughing [°C]	Tegangan Mak [MPa]	t <sub>0.05</sub> [detik]
1	WR	1140	120	8,91
	0,1		190	4,46
	0,3		202	3,98
	0,65		220	3,16
2	WR	1028	200	6,31
	0,1		201	5,62
	0,3		250	2,51
3	WR	1050	210	5,89
	0,1		250	3,16
	0,3		255	3,02
	0,45		275	2,51

Hal yang sama terlihat juga pada baja HSLA Nb No 2, dimana penguatan yang tergambar pada kurva tegangan regangan memperlihatkan penguatan yang lebih rendah pada baja tersebut jika tidak

diberikan deformasi awal sebelumnya dibandingkan apabila sebelumnya baja tersebut diberikan deformasi awal pada temperatur 1050°C dengan regangan sebesar 0,2 sampai 0,45.

**Tabel 3.**  
Hasil Uji Tekan Baja 2 Pada Temperatur 900 °C Dengan Laju Regangan 1 Detik<sup>-1</sup>

Jenis Baja	Temp Roughing °C	Regangan Roughing (x100%)	Tegangan Maksimum [MPa]
2	WR	0,45	220
	1000		325
	1020		275

Pengaruh temperatur deformasi awal terhadap penguatan pada kurva tegangan regangan deformasi akhir pada temperatur dan regangan deformasi yang konstan, 900°C dan 0,45 terlihat dengan jelas pada Tabel 3 terutama untuk baja No 2. Dimana terlihat besarnya temperatur selama deformasi awal berpengaruh cukup signifikan, bila dibandingkan dengan penguatan tanpa diberikan deformasi awal sebelumnya. Tanpa diberikan deformasi awal (WR), pada deformasi akhir tercatat tegangan maksimum yang dicapai adalah 220 MPa, sedangkan jika diberikan deformasi awal pada temperatur 1000 °C dengan deformasi sebesar 0,45, tegangan maksimum yang dapat dicapai lebih tinggi sebesar 325 MPa.

Dilihat dari pengaruh deformasi awal terhadap awal waktu terbentuknya endapan Nb(CN) (start precipitation time) dengan metoda relaksasi pada baja HSLA Nb yang sebelumnya metoda ini telah dibahas oleh Sirad[5]. Dari hasil relaksasi tegangan yang dilakukan setelah deformasi akhir pada temperatur konstant 900°C, hasilnya terlihat pada Tabel 2. Dimana t<sub>0.05</sub> merupakan lamanya waktu mulai terbentuknya 5% fraksi endapan Nb(CN).

Lamanya waktu mulai terbentuknya awal endapan yang ditunjuk dengan terbentuknya 5% fraksi endapan seperti terlihat pada Tabel 2, menggambarkan dimana dengan bertambah besar deformasi yang diberikan pada temperatur konstant, lamanya waktu mulai terbentuknya 5%

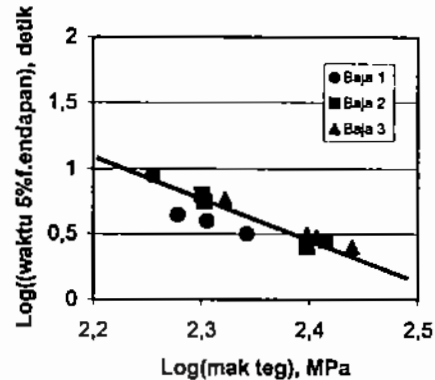
fraksi endapan Nb(CN) akan di percepat. Sebagai contoh,  $t_{0,05}$  pada deformasi 0,1 tercatat selama 4,46 detik, sedangkan pada deformasi 0,65 tercatat 3,16 detik pada temperatur konstant 1140°C.

Untuk menggambarkan hubungan waktu awal terbentuknya endapan Nb(CN),  $t_{0,05}$  dengan maksimum tegangan yang dicapai pada akhir deformasi yang tercatat pada temperatur 900°C,  $\sigma_{max}$ , tergambar pada Gambar 5, dalam bentuk hubungan logaritma ( $\log t_{0,05}$  dan  $\log \sigma_{max}$ ). Pada umumnya hubungan waktu awal pembentukan endapan Nb(CN) terlihat sangat dipengaruhi oleh tingginya tegangan maksimum yang dicapai. Makin tinggi tegangan maksimum yang dicapat maka terlihat waktu awal pembentukan endapan terlihat makin bertambah cepat. Seperti telah dijelaskan sebelumnya oleh Liu dan Jonas[6], dimana dengan makin besar deformasi yang diberikan, akan berakibat terbentuknya cluster dari atom Nb yang akan mempercepat terbentuknya endapan Nb(CN). Oleh sebab itu dengan makin besar deformasi yang diberikan pada deformasi awal pada temperatur diatas 900°C, akan mempercepat kinetika pengendapan Nb(CN) setelah deformasi akhir pada 900°C terdeteksi selama proses *relaksasi tegangan* dimana kurva relaksasinya tidak dicantumkan dalam tulisan ini.

Adapun hubungan maksimum tegangan yang dicapai selama deformasi akhir dengan maksimum regangan deformasi awal gambar 5, jelas terlihat dengan meningkatnya regangan deformasi awal yang diberikan sebelumnya, akan meningkatkan tegangan maksimum yang dicapai. Walaupun demikian, seperti terlihat pada gambar tersebut, maksimum tegangan yang dicapai sangat tergantung kepada besarnya temperatur deformasi awal yang diberikan.

Makin tinggi temperatur awal yang diberikan akan meningkatkan nilai tegangan maksimum yang dicapai pada deformasi akhir, lihat Tabel 4. Peningkatannya terlihat cukup signifikan, sebagai contoh untuk regangan deformasi

awal 0,4 akan meningkatkan tegangan maksimum dari 210 MPa pada temperatur 1040°C menjadi 300 MPa pada temperatur 1050°C untuk jenis baja yang sama. Disini memperlihatkan perbedaan temperatur sangat besar pengaruhnya terhadap penguatan selama deformasi akhir.



Gambar 5.  
Hubungan Logaritma Waktu Mulai Terbentuknya 5% Fraksi Endapan Nb(CN) Dengan Maksimum Tegangan yang Dicapai Untuk Ketiga Jenis Baja HSLA.

Jika hubungan lamanya waktu mulai terbentuknya endapan Nb(CN) dengan maksimum tegangan pada akhir deformasi pada temperatur 900°C digambarkan seperti pada gambar 5 dalam logaritma, maka terlihat dimana hasil pengamatan data kemungkinan dapat ditarik garis lurus secara linear. Maka hubungan antara lama waktu awal terbentuknya endapan,  $t_{0,05}$  dengan maksimum tegangan akhir,  $\sigma_{max}$  dapat ditulis sebagai berikut,

$$t_{0,05} = C_1 \sigma_{max}^{-3} \quad (3)$$

dimana nilai konstan  $C_1$  adalah sebesar  $3,1 \times 10^7$  MPa. Hasil ini kelihatannya cukup konsisten terhadap hasil sebelumnya[7] yaitu

$$t_{0,05} = [\sigma - \sigma_0]^{-3} \quad (4)$$

Akibat deformasi yang diberikan akan menciptakan jumlah sisipan (dislocation) yang padat. Untuk menghitung hubungan antara kepadatan sisipan (dislocation density) dengan kinetik pengendapan Nb(CN), maka rumusan Bailey-Orowan dipergunakan sebagai berikut,

$$\sigma = [Mb\mu/2\pi] \cdot \rho^{1/2} \quad (5)$$

dimana  $M$  = faktor Taylor, untuk  
 $b$  = Burger vector  
 $\mu$  = Modulus geser

Karena baja ini dipanaskan pada temperatur diatas 900°C yang dalam bentuk fasa austenit (f.c.c), maka faktor Taylor untuk kristal f.c.c adalah 3,1 dan Burger vector adalah  $2,59 \times 10^{-10}$  m, sedangkan modulus geser sangat tergantung kepada temperatur yang dapat ditulis sbb,

$$\mu = 8,1 \times [1-0,91(T-300)/1810] \times 10^{10} \text{ N/m}^2 \quad \dots\dots(6)$$

Sehingga hubungan antara kinetika pengendapan dengan maksimum tegangan yang dicapai dapat ditulis sebagai berikut,

$$t_{0,05} = C_1 [Mb\mu/2\pi]^{-3} \cdot \rho^{-3/2} \quad (7)$$

dengan memasukkan data diatas maka hubungan tersebut memberikan rumusan empiris seperti dibawah ini,

$$t_{0,05} = C_2 \cdot \rho^{-1,5} \quad (8)$$

dimana konstanta  $C_2$  dihitung sebesar  $5 \times 10^{22}$ . Dengan mengambil nilai kerapan sisipan sebesar  $2,8 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$  [8], maka dengan menggunakan rumus diatas lama waktu awal terbentuknya endapan Nb(CN) adalah 10,6 detik. Hal ini kelihatannya sesuai dengan rumusan (3) apabila tegangan maksimum diperhitungkan. Begitu juga apabila dibandingkan dengan pengamatan Wanatabe dkk[9], LeBon dkk[10] dan Weiss & Jonas [11] memperlihatkan waktu kinetika pengendapan yang konsisten dengan rumusan empiris diatas pada temperatur 900°C sekitar 10 detik, tergantung kepada kondisi deformasi yang diberikan.

Begitu juga sesuai dengan pengamatan dari Hansen dkk [12] dengan menggunakan baja HSLA dengan kandungan 0,03%Nb, waktu awal terbentuknya endapan Nb(CN) tercatat antara 10 sampai 100 detik pada temperatur 900 dan 950°C. Sedangkan untuk baja HSLA dengan kandungan 0,042%Nb dan 0,1%C telah disampaikan oleh Kwon & DeArdo[13] terdeteksi pada waktu 5 sampai 10 detik pada temperatur 900°C.

Dilihat dari hasil diatas, jelas bahwa setelah deformasi awal pada temperatur diatas 900°C kerapatan sisipan meningkat selama deformasi akhir yang akan membantu terbentuknya clustering dan mempercepat awal waktu terbentuknya endapan. Kerapatan sisipan akan menyediakan kisi untuk nukleasi terbentuknya endapan Nb(CN). Sebelumnya asumsi ini didukung oleh Cahn[8] dan Weiss dan Jonas[11] yang menjelaskan bahwa kecepatan awal terbentuknya endapan akan dipercepat jika sebelumnya telah dilakukan deformasi atau regangan awal.

#### 4. Kesimpulan.

1. Maksimum tegangan yang dicapai selama deformasi akhir (finishing) pada temperatur dan regangan konstant, 900°C dan 0,45, sangat dipengaruhi temperatur dan regangan deformasi sebelumnya (roughing deformation).
2. Makin besar regangan deformasi yang diberikan pada deformasi awal (roughing) akan semakin tinggi tegangan maksimum yang akan dicapai pada deformasi akhir.
3. Lamanya waktu yang diperlukan untuk terbentuknya awal pengendapan ( 5% fraksi endapan) Nb(CN) sangat dipengaruhi temperatur dan besarnya regangan deformasi awal. Pada temperatur konstan, dengan makin besarnya deformasi awal yang diberikan, akan semakin cepat terbentuknya endapan Nb(CN).
4. Hubungan antara tegangan maksimum pada deformasi akhir (finishing) dengan lamanya waktu mulai terbentuknya endapan Nb(CN) dapat digambarkan dalam hubungan empiris,  $t_{0,05} = C_2 \cdot \rho^{-1,5}$  dimana  $C_2$  adalah konstanta yang merupakan fungsi dari Modulus geser, burger vektor dan Taylor faktor yang besarnya  $5 \times 10^{22}$ .

**Daftar Acuan**

- [1]. *A.Galibois, M.R.Krishnadev dan A.Dube. Metallurgical Trans A, vol 10A, August 1979.*
- [2]. *B.Dutta, E.Valdes dan C.M.Sellers; Acta Metal, vol 40, no 4, 1992.*
- [3]. *E.S.Siradj, PhD Thesis, University of Sheffield, U.K. 1997.*
- [4]. *K.J.Irvine, F.B.Pickering dan T.Gladman, Iron Steel Ins, 205, 1967.*
- [5]. *E.S.Siradj, Journal Teknologi, No 1 Tahun XV, Maret 2001.*
- [6]. *W.J.Liu dan J.J.Jonas; Metallurgical Trans A, Vol 20A, 1989*
- [7]. *D.Y.Choi, Mphil Thesis University of Sheffield, 1992.*
- [8]. *R.W.Cahn, Physical Metallurgy 1 st edition, London, 1965.*
- [9]. *H.Watanabe, Y.E.Smith dan R.D.Pehlke, The hot deformation of austenite, ed J.B.Ballace, AIME-TMS NY 140. 1977.*
- [10]. *A.LeBon, J. Rpfes - Vernis dan C.Rossard, Metal Sci,9,36, 1975.*
- [11]. *.I Weiss dan J.J.Jonas, Metal Trans A,10A, 1979.*
- [12]. *S.S.Hansen,J.B.Vander Sande dan Morris Cohen, Met Trans A,Vol 11A 1980.*
- [13]. *Kwon dan DeArdo, Acta Metall, vol 39, no 4, 1991.*