

Model Penguatan Baja HSLA-Nb akibat Deformasi Panas pada Fasa Austenit

E.S.Siradj

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

Abstrak

Selama proses *thermomechanical treatment* baja paduan rendah berkekuatan tinggi (HSLA), penguatan yang terjadi pada akhir deformasi (*finishing*) adalah disebabkan adanya awal pengendapan (*pre precipitate hardening*) setelah proses awal deformasi panas (*roughing*). Dengan menggunakan baja HSLA yang mengandung 0,031% Nb, penguatan akibat awal deformasi yang terlihat [pada tegangan 0,05% regangan ($\sigma_{0,05}$)] deformasi akhir pada temperatur 900°C di evaluasi. Hasil pengamatan pada penelitian ini memperlihatkan adanya penguatan baja HSLA, akibat diberikan deformasi awal dapat digambarkan dalam bentuk model empiris yang merupakan fungsi dari energi aktivasi (Q_{act}) dan temperatur deformasi (T_{def}).

Abstract

During thermo-mechanical treatment process of High Strength Low Alloy Steel, strengthening is occurred during finishing deformation due to pre precipitation hardening formed after roughing. Using HSLA steel containing 0.031% Nb, strengthening of this steel during finishing deformation at temperature of 900°C under strain of 0.5 is evaluated in terms of stress at 0.05% strain, $\sigma_{0,05}$. Data results shows that the strengthening of this steel due to roughing deformation can be described into empirical model as a function activation energy (Q_{act}) and roughing deformation temperature (T_{def}).

1. Pendahuluan

Peranan paduan mikro seperti Nb, V dan Ti dalam baja HSLA (*High Strength Low Alloy*) sangat diperlukan terutama didalam meningkatkan kekuatan baja dengan tegangan luluh (*yield strength*) > 482 MPa, terutama untuk baja dengan ketebalan > 10 mm [1]. Adanya tambahan paduan mikro tersebut disebabkan secara praktis sukarnya didapat kombinasi sifat *strength*, *toughness* dan *ductility* pada baja karbon biasa.

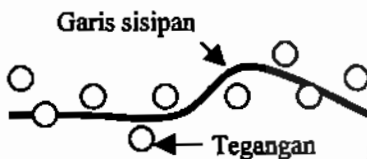
Penguatan pada baja HSLA disebabkan adanya partikel endapan karbonitrida seperti (Nb(CN), V(CN), Ti(CN)), yang terbentuk selama proses pencanaan panas melalui *thermomechanical treatment*. Mekanisme penguatan selama proses *thermomechanical* secara teori telah disampaikan oleh beberapa peneliti sebelumnya[2-4] yang menduga

kemungkinan disebabkan adanya *pre precipitation hardening* atau *cluster hardening*. Bahkan secara lebih detail mekanisme penguatan tersebut telah disampaikan oleh Lie dan Jonas[5] untuk baja HSLA yang mengandung Nb, dimana *cluster* atom Nb yang menyebabkan derajat ketidak sesuaian (*degree misfit*) memengaruhi kerapatan sisipan (*dislocation*).

Penjelasan kemungkinan kesesuaian mekanisme penguatan pada baja HSLA akibat adanya fasa kedua (Nb) dengan teori interaksi partikel dan sisipan telah dilakukan, dimana presipitasi dari fasa kedua berupa partikel dalam kondisi larutan padat, memegang peranan penting dalam proses penguatan material. Proses penguatan pada dasarnya merupakan interaksi sisipan (*dislocation*) dengan fasa pengendapan atau fasa dispersi. Interaksi ini, secara umum tergantung kepada

dimensi dari partikel, kekuatan partikel, jarak antara partikel dan fraksi partikel yang ada.

Dalam teori penguatan Mott dan Nabarro[6] tersebut (*teori particle-dislocation interaction*) menyatakan penguatan material disebabkan adanya interaksi endapan dari partikel (*particle precipitation*) dan sisipan (*dislocation*) (gambar 1) dimana mekanisme penguatannya didasarkan kepada analisa tegangan dalam (*internal stress*) disebabkan adanya perbedaan volume atom rata-rata dalam metrik dan partikel endapan.



Gambar1. Perubahan garis sisipan (*dislocation line*) akibat adanya tegangan dari partikel endapan.

Dalam teori penguatan endapan (*precipitation hardening*) diterangkan[8] Jika N adalah jumlah partikel per unit volume pada sebuah mono-kristal dengan jari-jari partikel adalah r_0 , maka kekuatan dalam bentuk regangan geser rata-rata, γ_m , dengan asumsi jarak antara partikel adalah R , [$R = 0,5 (N^{-1/3})$] maka regangan geser rata-rata yang diperlukan,

$$\gamma_m = \epsilon r_0^3 / [0,5(N^{-1/2})]^3 = 8 \epsilon r_0^2 N \quad (1)$$

dimana, ϵ = derajat ketidak sesuaian

Derajat ketidak sesuaian antara dispersi partikel fase kedua dengan matrik dapat ditulis sbb,

$$\epsilon = 1 - [r_a / r_m] \quad (2)$$

dimana r_a = Jari-jari atom fasa kedua
 r_m = Jari-jari atom matrix

Volume fraksi dari partikel endapan, f dapat ditulis,

$$f = \frac{4}{3} \pi r_0^3 N \quad (3)$$

Dari rumus diatas, maka tegangan geser yang diperlukan,

$$\gamma_m = 8 \epsilon r_0^3 [f / \frac{4}{3} \pi r_0^3] = 2 \epsilon f \quad (4)$$

Tegangan geser kritis, τ_y , untuk terjadinya deformasi pada paduan adalah

$$\tau_y = \gamma_m \mu = 2 \mu \epsilon f$$

Apa bila $\sigma_y = 2 \tau_y$

Maka Penguatan baja (strength) dalam bentuk tegangan luluh (yield stress), σ_y , adalah,

$$\sigma_y / 2 = 2 \mu \epsilon f \quad (5)$$

dimana, μ = modulus geser

Dari rumus diatas terlihat bahwa tegangan geser kritis tergantung kepada ukuran dan jarak antara partikel dan juga tergantung juga kepada jumlah dari presipitasi (f). Teori Mott dan Nabarro memprediksikan pengaruh jarak kritis antara partikel untuk mencapai maksimum pengerasan (*maximum hardening*).

Bila jarak antara partikel lebih besar dari nilai jarak kritis, maka tegangan luluh, hanya tergantung kepada volume fraksi, f dan derajat ketidak sesuaian, ϵ . Kelemahan dari teori ini adalah tidak memperhitungkan peranan modulus elastisitas dari fasa dispersi dan matrix.

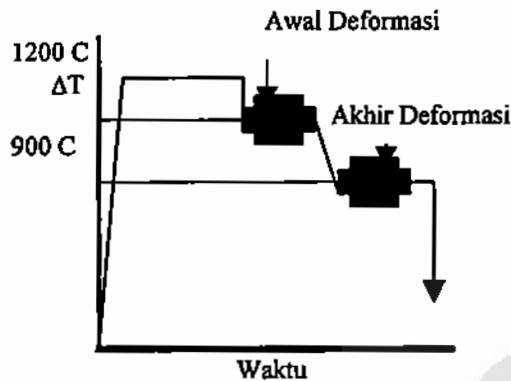
Pada penelitian ini, penguatan baja Nb-HSLA yang terjadi selama deformasi penekanan panas bidang datar di evaluasi dari hasil deformasi akhir (*finishing*) pada temperatur 900°C dibawah regangan 0,5 dan laju regangan 1 detik⁻¹. Hasil pengamatan akan di evaluasi untuk permodelan penguatan setelah awal-deformasi, sehingga model penguatan baja HSLA mengandung paduan mikro Nb secara empiris dapat dirumuskan.

2. Bahan Dan Metoda Penelitian

Baja HSLA-Nb hasil canai panas berupa plat dipergunakan dalam penelitian ini. Dimana komposisi baja tersebut seperti terlihat pada table 1. dibawah ini.

Tabel 1.
Komposisi Kimia Baja HSLA dalam % berat.

C	Si	Mn	S	N	Nb
0,1	0,33	1,35	0,019	0,0042	0,031



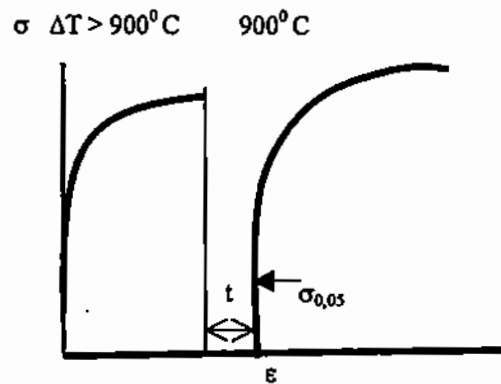
Ket : $\Delta T = 1100, 1050, 1000, 950\text{ }^{\circ}\text{C}$

Gambar 2. Siklus panas dan deformasi yang dialami benda kerja

Siklus panas yang dialami benda kerja seperti terlihat pada gambar 3 diatas. Deformasi benda kerja dilakukan dengan menggunakan *Servo-hydraulic machine*. Ukuran benda kerja $60 \times 30 \times 10\text{ mm}$, permukaannya dilapisi lapisan krom (hard chrom) untuk mencegah terbentuknya lapisan oksida (scale) selama proses pemanasan.

Pada awal deformasi (*roughing*) deformasi yang diberikan sebesar 0,3, 0,5 dan 0,7 dengan laju regangan 1 sec^{-1} pada kondisi temperatur 1100, 1050, 1000 dan $950\text{ }^{\circ}\text{C}$. Penguatan yang terjadi pada awal deformasi ini di amati pada deformasi akhir, yang dilakukan pada temperatur $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ dibawah tegangan deformasi 0,5 dan laju regangan 1 sec^{-1}

Selama deformasi dilakukan, tegangan dan regangan deformasi yang terjadi catat secara langsung melalui data aquasasi, ilustrasi dari bentuk kurva tegangan dan regangan tarik dapat dilihat pada gambar 4 dibawah ini.



Ket : $t = \text{interval waktu}$

Gambar 3. Tegangan-regangan pada awal deformasi dan akhir deformasi

Penguatan yang terjadi setelah baja HSLA mengalami awal deformasi pada temperatur yang berbeda, diukur pada tegangan deformasi pada 5% strain, $\sigma_{0,05}$. Tegangan ini dianggap masih memberikan nilai penguatan akibat adanya dispersi presipitasi.

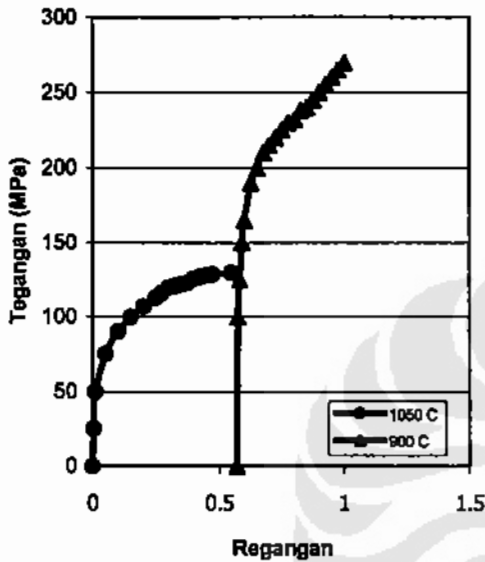
3. Hasil Penelitian Dan Pembahasan.

Pada gambar 5 memperlihatkan salaj satu hasil canai panas yang tergambar dalam bentuk diagram regangan-tegangan. Pada gambar tersebut terlihat dimana, deformasi awal yang diberikan pada temperatur $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ memberikan nilai tegangan tarik sekitar 130 MPa dan pada deformasi akhir yaitu pada temperatur $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ dengan kekuatan tarik sebesar 275 MPa. Laju regangan yang diberikan sebesar 1 def^{-1} Pada gambar ini dapat dilihat bahwa penguatan yang terjadi pada deformasi akhir adalah disebabkan kemungkinan adanya dispersi endapan Nb(CN) yang menghambat pergerakan garis sisipan dalam baja.

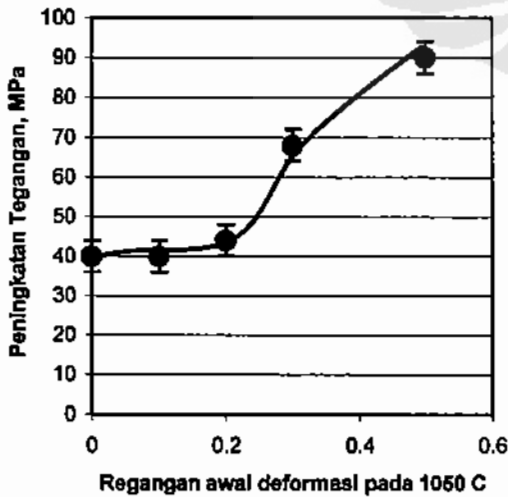
Terbentuknya awal endapan atau pre-precipitation setelah deformasi awal berupa cluster telah disampaikan oleh peneliti terdahulu [5], dimana adanya kerapatan cluster yang meningkat akibat pengaruh kerapatan sisipan (dislocation) terbentuk selama deformasi berjalan. Penguatan tersebut telah digambarkan dengan

menggunakan teori penguatan Mott dan Nabarro, *theori particle-dislocation interaction* dimana penguatan material disebabkan adanya interaksi endapan dari partikel (*particle precipitation*) dan sisipan (*dislocation*), seperti dirumuskan pada rumus(5) diatas yang dapat ditulis kembali,

$$\sigma_y/2 = 2 \mu \epsilon f \quad (6)$$



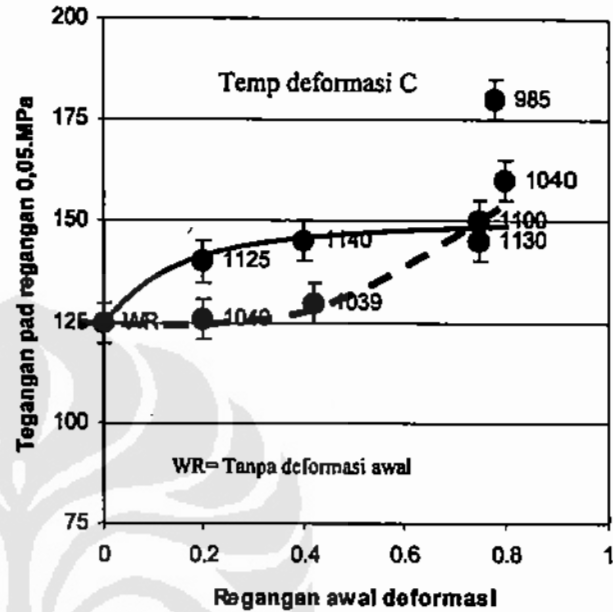
Gambar 4 Diagram regangan-tegangan hasil dari deformasi awal pada 1050 °C dan deformasi akhir pada 900 °C



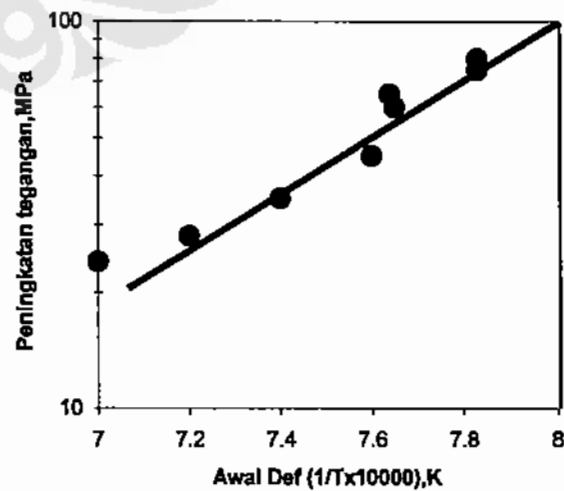
Gambar 5 Pengaruh awal deformasi terhadap peningkatan tegangan deformasi akhir pada temperatur 900 °C regangan 0,5 strain rate 1 detik⁻¹.

bila penguatan diperhitungkan pada nilai tegangan deformasi pada regangan 0,05%, yaitu $\sigma_{0,05}$, maka penguatan material dapat ditulis ,

$$\sigma_{0,05} = 2 \mu \epsilon f \quad (7)$$



Gambar 6 Hubungan peningkatan tegangan pada deformasi akhir 900 C regangan 0,5, laju regangan 1 detik⁻¹ akibat diberikan regangan dan temperatur yang berbeda pada awal deformasi.



Gambar 7 Pengaruh temperatur awal deformasi terhadap peningkatan tegangan pada regangan 0,05 temperatur 900 °C regangan 0,5 laju regangan 1 detik⁻¹.

Dengan menggunakan nilai $\mu = 4,5 \times 10^{10}$ Pa pada temperatur 900°C dan nilai f sebesar 8×10^{-4} untuk Nb_HSLA dan nilai ϵ diperhitungkan dengan radius atom Fe dan Nb, 0,124 nm dan 0,163 nm, maka oleh penelitian sebelumnya [4], didapat nilai penguatan sebesar 22 MPa. Nilai ini terlihat jauh lebih kecil jika dilihat pada Gambar 4 diatas, dimana penguatan terjadi pada deformasi akhir akibat deformasi awal pada temperatur 1050°C adalah sebesar 45 MPa. Hal ini mungkin disebabkan antara lain, (i) Rumusan penguatan diatas (7) tidak memperhitungkan tegangan yang diperlukan untuk menggerakkan garis sisipan (dislocation line) melewati partikel dispersi. Hal tersebut telah disampaikan oleh Cahn [6]. (ii) Tidak diperhitungkan pengaruh regangan dan temperatur yang diberikan pada awal deformasi. Seperti diketahui, regangan dan temperatur dapat mempengaruhi terbentuknya pre-precipitation hardening dari cluster.

Pengaruh regangan awal deformasi terhadap penguatan dapat dilihat pada Gambar 5 diatas. Pada gambar tersebut terlihat, dimana peningkatan penguatan terlihat jika diberikan regangan deformasi besar dari 0,2. Penguatan terlihat mencapai 50 MPa pada regangan deformasi 0,5 pada temperatur 1050°C . Hal ini dimungkinkan pada regangan lebih besar dari 0,2, terbentuk krapatan sisipan dan kerapatan pre-precipitation dari cluster, hal tersebut telah disampaikan oleh Liu & Jonas [5] sebelumnya.

Dilihat dari pengaruh temperatur deformasi awal terhadap penguatan pada deformasi akhir, tergambar pada Gambar 6. Gambar tersebut memperlihatkan bagaimana penguatan terjadi yang diakibatkan perbedaan temperatur awal deformasi, terutama terlihat dengan jelas pada regangan deformasi 0,8. Dengan semakin kecil temperatur deformasi, maka penguatan akan bertambah besar. Seperti contoh pada temperatur 985°C terlihat penguatan mencapai 60 MPa, dibandingkan pada temperatur 1130°C yang hanya tercatat sebesar 22 MPa. Dari gambar tersebut, kelihatannya teori Mott & Nabarro pada rumusan (7) diatas, nilai penguatan

sangat mendekati bila regangan dan temperatur deformasi awal yang diberikan adalah 0,8 dan 1130°C . Walaupun demikian perlu dirumuskan hubungan penguatan terhadap temperatur deformasi.

Hubungan penguatan dan temperatur awal deformasi dapat dirumuskan dengan menggambarkan pada Gambar 7, peningkatan tegangan pada regangan 0,05 ($\sigma_{0,05}$) dalam skala logarithmic fungsi dari temperatur deformasi, T_{def} dalam K yaitu dalam bentuk $1/T \times 10000$. Hubungan penguatan dan temperatur awal deformasi terlihat merupakan garis lurus. Hubungan tersebut mengikuti rumusan sebagai berikut,

$$\sigma_{0,05} = C \exp[Q/RT_{\text{def}}] \quad (8)$$

dimana C = Konstanta,

Q = Energi aktivasi

T_{def} = Temperatur deformasi awal [K]

R = Konstanta gas.

Dengan menggunakan data yang ada pada Gambar 7 diatas, maka didapat nilai konstanta $C = 2,49 \times 10^{-4}$ MPa dan nilai energi aktivasi $Q = 134.000$ J/mol. Jadi pengaruh temperatur awal deformasi (*roughing*) yang dialami dengan peningkatan tegangan penguatan baja Nb-HSLA pada deformasi akhir (*finishing*) pada temperatur 900°C dengan laju regangan 1 detik^{-1} dapat digambarkan dalam rumus empiris dibawah ini.

$$\sigma_{0,05} = 2,49 \times 10^{-4} \exp[134.000/RT_{\text{def}}] \quad (9)$$

Walaupun demikian model penguatan empiris diatas hanya dapat dipergunakan untuk memprediksi penguatan apa bila hanya diberikan satu kali deformasi sebelum deformasi akhir (*single roughing*). Pengamatan terhadap penguatan baja Nb-HSLA, terutama dalam penggunaannya di Industri, sangat perlu diteliti pengaruh deformasi awal lebih dari satu kali *multi roughing deformation*.

4. Kesimpulan

1. Teori penguatan Mott dan Nabarro[7], teori *particle-dislocation*, adanya interaksi endapan dari partikel (*particle precipitation*) dan sisipan (*dislocation*) dapat dipergunakan untuk perhitungan penguatan, terutama pada temperatur deformasi awal diatas 1130°C.
2. Adanya variable lain terutama regangan dan temperatur deformasi yang perlu diperhitungkan dalam penguatan baja HSLA deformasi akhir pada temperatur 900°C.
3. Model empiris penguatan dapat di rumuskan sbb,

$$\sigma_{0,05} = C \exp[Q/RT_{def}]$$

dimana, $C = 2,49 \times 10^{-4}$ MPa dan $Q = 134.000$ J/mol.

Model ini hanya berlaku untuk *single roughing deformation*.

Daftar Pustaka

1. *A.Galibois, M.R.Krishmadev 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. *E.S.Siradj*, Journal Teknologi, No 1 Tahun XV, Maret 2001.
5. *W.J.Liu dan J.J.Jonas*; Metallurgical Trans A, Vol 20A, 1989
6. *R.W.Cahn*, Physical Metallurgy 1 st edition, London, 1965.

