

## STUDI PARAMETER PERSAMAAN KONSTITUTIF BAJA HSLA PADA UJI TARIK PANAS REGANGAN BIDANG

Richard A.M.N<sup>a,b</sup>, Suryadi<sup>a,c</sup>, Diwangkoro. K<sup>a</sup>, D. Priadi<sup>a</sup>, dan E.S. Siradj<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Departemen Teknik Metalurgi dan Material, Universitas Indonesia, Depok, 16424

<sup>b</sup> Jurusan Teknik Mesin, Universitas HKBP Nommensen, Medan. 20234

<sup>c</sup> Pusat Teknologi Industri Proses, BPPT, Puspiptek Serpong, 15314

E-mail : richard\_alf@yahoo.com  
suryadi\_chun@yahoo.co.id  
dedi@eng.ui.ac.id

### Abstrak

Uji tarik panas merupakan salah satu metode pengujian yang dilakukan untuk mengevaluasi sifat mekanis, sifat plastisitas material dan sifat perpatahan selama proses pembentukan logam. Pengujian dilakukan dengan menggunakan parameter dari persamaan konstitutif dimana tegangan pada zona deformasi merupakan fungsi dari regangan, laju regangan dan temperatur. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari karakteristik aliran dari baja HSLA melalui penentuan parameter persamaan konstitutif dengan uji tarik panas regangan bidang pada proses pembentukan lembaran logam. Dari hasil penelitian dapat diamati bahwa dengan meningkatnya temperatur akan menurunkan nilai koefisien pengerasan regang ( $n$ ) sebesar 47% dan menurunkan persentase elongasi sebesar 26%. Pada laju regangan  $0.1 \text{ s}^{-1}$ , dengan meningkatnya temperatur akan menurunkan tegangan luluh sebesar 42% dan akan meningkatkan nilai koefisien sensitifitas laju regangan ( $m$ ) sebesar 96%. Sementara itu pada temperatur yang sama dan laju regangan yang meningkat akan menurunkan nilai energi aktivasi.

**Kata kunci:** Parameter, Persamaan konstitutif, Baja HSLA, Uji tarik panas regangan bidang.

### Abstract

*Hot tensile test are one of testing method conducted to evaluate the mechanical properties, material plasticity and fracture properties during metal forming. Test was carried out by using the parameters of constitutive equations in which the flow stress is a function of strain, strain rate and temperature. This research aims to study the plasticity characteristics of HSLA steel by determining the parameters of the constitutive equation using hot tensile plane strain test in the sheet metal forming. The result showed that increasing temperature will lower the value of strain hardening coefficient ( $n$ ) around 47% and decrease the elongation percentage around 26%. At the  $0.1 \text{ s}^{-1}$  strain rate, increasing the temperature will lower the yield stress around 42% and will increase the value of strain rate sensitivity coefficient ( $m$ ) around 96%. At a constant temperature and increasing strain will lower the activation energy value.*

**Keywords :** Parameter, Constitutive equation, HSLA Steel, Hot tensile plane strain

Diterima (received) : 13 Oktober 2011, Direvisi (reviewed) : 25 Nopember 2011, Disetujui (accepted) : 6 Desember 2011.

## PENDAHULUAN

Mampu bentuk logam (*metal formability*) bukan hanya ditentukan oleh mikrostruktur dari material, temperatur, laju regangan dan regangan, tetapi juga dipengaruhi oleh parameter persamaan konstitutif<sup>2)</sup>. Dalam proses pembentukan lembaran logam secara plastis, sifat dan kemampuan logam untuk terdeformasi secara plastis pada variasi parameter pembentukan tanpa terjadinya perpatahan adalah hal yang utama<sup>7,13)</sup>. Dengan perkembangan teknik manufaktur dalam hal ini pengerjaan panas untuk produk *con-cast (wrought)* terutama baja dan paduan super (*super alloys*), dibutuhkan informasi yang dapat diandalkan mengenai karakteristik produk tersebut saat dilakukan pengerjaan panas.

Uji tarik uniaxial regangan bidang merupakan salah satu metode pengujian yang dilakukan untuk mengevaluasi sifat mekanis dan plastisitas dari pembentukan lembaran logam<sup>1)</sup> dan umumnya dilakukan dalam keadaan dingin untuk lembaran logam<sup>1-4)</sup> dan dalam keadaan panas untuk lembaran non ferrous<sup>5)</sup>.

Uji tarik regangan bidang ini dapat dilakukan pada regangan yang cukup besar<sup>2)</sup> dan akan semakin besar lagi jika dilakukan dalam keadaan panas. Uji tarik panas regangan bidang ini dapat dilakukan sampai deformasi plastis yang cukup besar sebelum terjadi ketidakstabilan plastis setempat (*local necking*), yang diikuti dengan perpatahan<sup>6)</sup>.

Pengujian umumnya dilakukan dengan menggunakan parameter dari persamaan konstitutif dimana tegangan alir merupakan fungsi dari regangan, laju regangan dan temperatur. Hal ini dapat menjelaskan karakteristik rheologi dari material.

Dengan mengetahui parameter persamaan konstitutif tersebut, karakteristik tegangan dan regangan pada proses pembentukan logam akan dapat diprediksi sehingga sifat mekanis dan struktur mikro akhir dari proses deformasi plastis dapat diketahui.

## BAHAN DAN METODE

### Persamaan Konstitutif Pada Proses Deformasi Plastis

Suatu persamaan konstitutif dapat dikembangkan dengan menggabungkan hasil analisa dengan cara makroskopik dan mikroskopik<sup>17)</sup>. Konsep yang dipakai untuk menyatakan hubungan konstitutif adalah

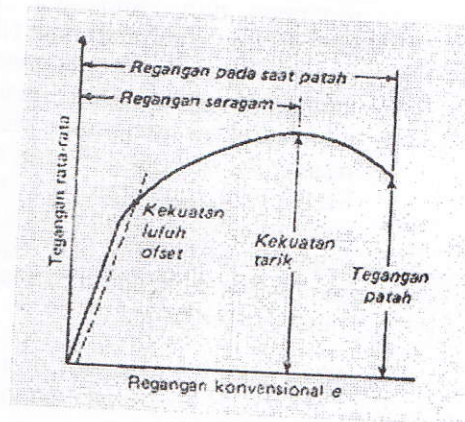
bahwa tegangan alir tergantung pada nilai regangan, laju regangan dan temperatur sesaat, dinyatakan dengan persamaan<sup>19)</sup>:

$$f[\sigma, \epsilon, \dot{\epsilon}, T] = 0 \quad (1)$$

dan umumnya dinyatakan dalam persamaan:

$$\sigma = K\epsilon^n \quad (2)$$

dimana  $n$  adalah eksponen pengerasan regang, dan  $K$  adalah konstanta. Persamaan diatas tidak memperhitungkan pengaruh laju regangan dan temperatur, sedangkan dalam pengubahan bentuk logam (*metal forming*), terkadang sering sekali dilakukan dengan cara pengerjaan panas dan kecepatan pembebanan yang berubah-ubah. Untuk itu perlu dilihat hubungan pengaruh laju regangan dan pengaruh laju temperatur dalam hubungannya dengan kurva aliran tegangan dan regangan (Gambar 1).



Gambar 1.  
Kurva Tegangan – Regangan

Sensitivitas laju regangan ( $m$ ) adalah kemampuan dari sebuah bahan untuk menahan ketidakstabilan plastis atau necking. Apabila nilai  $m$  rendah maka penambahan tegangan pada bagian leher (*neck*) akan menyebabkan semakin besarnya laju regangan pada lokasi tersebut akibatnya perpanjangan tidak seberapa sebelum akhirnya patah. Sebaliknya apabila  $m$  besar penambahan laju regangan pada bagian leher berjalan lambat dalam merespon penambahan tegangan dan karena itulah bagian leher akan terdeformasi secara gradual sehingga perpanjangan sangat besar sebelum akhirnya patah<sup>9)</sup>.

Laju sensitivitas regangan  $m$  berubah dengan berubahnya parameter proses selama pembentukan. Oleh karena itu,  $m$  ditentukan sebagai fungsi dari regangan, laju regangan, temperatur dan mikrostruktur.

Laju regangan mempunyai pengaruh yang penting terhadap tegangan aliran. Kenaikan laju regangan akan memperbesar kekuatan tarik, dan pengaruhnya bertambah besar dengan naiknya temperatur. Terdapat hubungan antara tegangan alir  $\sigma$  dan laju regangan  $\dot{\epsilon}$  pada regangan dan temperatur konstan, yaitu :

$$\sigma = C [\dot{\epsilon}]^m |\epsilon, T \quad (3)$$

dimana nilai dari  $m$  dapat diperoleh dari *slope* logaritma hubungan kurva  $\sigma - \dot{\epsilon}$ .

Sensitivitas laju regangan merupakan indikator yang baik dalam hal perubahan perilaku deformasi dan pengukuran  $m$  memberikan penjelasan<sup>10)</sup> antara konsep dislokasi deformasi dan pengukuran yang lebih bersifat makroskopik pada uji tarik.

Kurva tegangan-regangan, sifat aliran dan sifat perpatahan yang diperoleh pada uji tarik sangat tergantung pada temperatur pada saat pengujian<sup>8)</sup>. Umumnya dengan naiknya temperatur kekuatan mengecil dan terlihat bertambah besar, namun dengan adanya perubahan struktur melalui proses pengendapan, penyepuhan regang atau kristalisasi kembali dapat mengubah perilaku tersebut.

Ketergantungan tegangan alir terhadap suhu  $T$  pada laju regangan  $\dot{\epsilon}$  dan regangan  $\epsilon$  konstan, dinyatakan oleh persamaan :

$$\sigma = C_2 e^{Q/RT} |\epsilon, \dot{\epsilon} \quad (4)$$

dimana :

$Q$  = energi aktivasi aliran plastik kal/g mol

$R$  = konstanta gas universal

Jika persamaan tersebut dipenuhi, maka pemetaan antara  $\ln \sigma$  terhadap  $1/T$  akan menghasilkan suatu garis lurus, dengan kemiringan  $Q/R$ .

Aliran plastik, khususnya pada temperatur tinggi, dapat dianggap sebagai proses aktivasi termal. Pengukuran makroskopik dengan cara uji tarik pada suhu dan laju regangan tertentu menghasilkan aliran tegangan yang dapat menggambarkan hubungan dengan perilaku dislokasi<sup>9)</sup>.

### Prosedur Penelitian

Bentuk dan dimensi spesimen diperoleh dari hasil pengujian tarik pada suhu kamar dengan menggunakan model spesimen peneliti terdahulu<sup>5,11)</sup> dan memodifikasinya. Setelah bentuk spesimen dapat menghasilkan mekanisme regangan bidang<sup>14)</sup>, maka proses uji tarik panas regangan bidang dapat dilakukan.

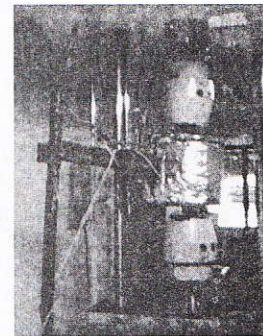
Sampel uji tarik dibuat dari material baja HSLA dengan komposisi seperti pada tabel 1. Sampel dipanaskan pada temperatur 900°C, lalu ditarik pada masing-masing temperatur 700°C, 750°C, 800°C dan 850°C dengan kecepatan penarikan 0.1 s<sup>-1</sup>. Kemudian data-data yang dihasilkan diolah dan dianalisa.

Tabel 1.  
Komposisi Baja HSLA (% berat)

C	Si	Mn	Al	Cu	Nb	Fe
0,085	0,22	1,45	0,049	0,045	0,028	98,1

### Pengujian Tarik

Uji tarik panas uniaxial dilakukan dengan menggunakan spesimen yang memenuhi persyaratan untuk dapat mengalami deformasi regangan bidang (*plane strain*). Pengujian dilakukan dengan menggunakan Mesin Uji Tarik UTS kapasitas 20 kN dan dapur pemanas yang dibuat untuk mendukung penelitian ini (Gambar 2). Pengujian tarik mengacu pada arah arah sejajar canai (0°). Dapur pemanas dibuat dengan dimensi yang sesuai dengan desain *Jig* dan dapat mencapai temperatur 1.000°C.



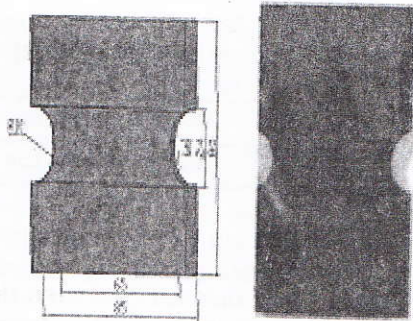
Gambar 2.  
Proses Uji Tarik Panas

Untuk memudahkan pengamatan pada spesimen dibuat *grid* berupa kotak-kotak kecil dengan ukuran 4 x 4 mm<sup>2</sup> di permukaan *gage length* dari spesimen. Kemudian, untuk menjaga agar *grid* tidak hilang, *grid* pada spesimen dipanaskan pada temperatur 90°C.

### Pengamatan Perubahan Dimensi

Pengamatan perubahan dimensi ini dilakukan sebagai tahap pengamatan analitis terhadap terbentuknya mekanisme *plane strain* ( $\beta = \epsilon_2/\epsilon_1 = 0$ ) pada spesimen yang diuji. Pengamatan akan dilakukan dengan cara

menggunakan video kamera dan perubahan dimensi ini dilakukan dengan mengukur dimensi awal dan akhir dari panjang dan lebar setiap grid sebelum dan juga sesudah ditarik<sup>10)</sup>. Pengukuran ini meliputi perubahan *gage width* sebagai nilai regangan minor ( $\epsilon_2$ ) dan *gage length* sebagai nilai regangan mayor ( $\epsilon_1$ ).



Gambar 3. Bentuk Dan Dimensi Spesimen Uji

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**Tegangan dan Regangan**

Dari data beban (P) dan perubahan panjang (dl) dapat ditentukan tegangan dan regangan sesungguhnya ( $\sigma - \epsilon$ ), sebagai;

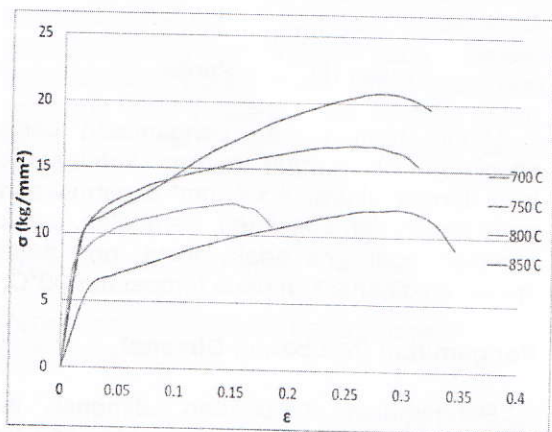
$$s = \frac{P}{A} \text{ dan } e = FK \frac{dl}{l_0} \quad (5)$$

dimana :  $FK = \frac{dl \text{ ukur}}{dl \text{ mesin}} \quad (6)$

Sehingga :

$$\epsilon = \ln(1+e) \text{ dan } \sigma = s(1+e) \quad (7)$$

dan dari hasil uji tarik dapat digambarkan kurva hubungan tegangan regangan.



Gambar 4. Kurva  $\sigma - \epsilon$  Hasil Uji Tarik

Penentuan titik luluh dilakukan dengan mencari titik potong garis sejajar kurva tegangan – regangan sesungguhnya pada regangan 0.1 – 0.2 %. Dari gambar 4 diperoleh nilai tegangan luluh seperti tabel 2 dan persen elongasi seperti pada tabel 3.

Tabel 2. Titik Luluh ( $\sigma_y$ ) Pada Laju Regangan 0.1 s<sup>-1</sup>

Sampel	Temperatur (°C)	$\sigma_y$ (Kg/mm <sup>2</sup> )
1	700	10.222
2	750	9.562
3	800	7.454
4	850	5.882

Tabel 3. Persen Elongasi Pada Laju Regangan 0,1s<sup>-1</sup>

Sampel	Temperatur (°C)	% Elongasi
1	700	37.89
2	750	36.49
3	800	27.97
4	850	41.10

**Koefisien Pengerasan Regang (n)**

Nilai koefisien pengerasan regang (n) dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan (2), di mana  $\sigma$  adalah merupakan tegangan luluh (*yield point*) yang ditentukan dengan menarik garis 0.2 % pada grafik atau kurva  $\sigma - \epsilon$ , yang jika dilogaritmakan akan menjadi :

$$\log \sigma = \log k + n \log \epsilon$$

dan dengan metode kuadrat terkecil :

$$\bar{Y} = a + b \bar{X} \text{ dan } b = \frac{\sum XY - n\bar{X}\bar{Y}}{\sum X^2 - n\bar{X}^2} \quad (8)$$

maka nilai koefisien eksponen n dapat diperoleh begitu juga dengan konstanta k.

Tabel 4. Nilai Koefisien Pengerasan Regang (n)

Sampel	Temperatur (°C)	n
1	700	0.287
2	750	0.174
3	800	0.151
4	850	0.261

### Koefisien Sensitivitas Laju Regangan (m)

Efek dari sensitivitas laju regangan (m) dijelaskan oleh hukum tenaga (*power law*). Dari persamaan (3) diatas, indeks sensitivitas laju regangan (m) dapat diturunkan dari :

$$m = \frac{d \log \sigma}{d \log \dot{\epsilon}} \quad (9)$$

yang dapat diamati pada dua laju regangan yang berbeda, sehingga

$$m = \frac{\log [\sigma_2/\sigma_1]}{\log [\dot{\epsilon}_2/\dot{\epsilon}_1]} \quad (10)$$

dan dengan metode kuadrat terkecil (*least square*) maka koefisien eksponen m dapat diperoleh begitu juga dengan konstanta C.

Tabel 5.  
Koefisien Sensitivitas Laju Regangan (m)

Temperatur (°C)	750	850
M	0.037	0.981

### Energi Aktivasi (Q)

Nilai energi aktivasi (Q) dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan (4) diatas, dan logaritma naturalnya dinyatakan dengan:

$$\ln \sigma = \ln C_2 + Q \frac{1}{RT} \quad (11)$$

dan dengan metode kuadrat terkecil (*least square*) nilai Q dapat diketahui begitu juga dengan konstanta C<sub>2</sub>.

Tabel 6.  
Energi Aktivasi (Q) Pada Temperatur 850°C

Laju regangan (s <sup>-1</sup> )	0.1	0.01
Q (kal/gr.mol)	583.49	598.47

### Pengaruh Temperatur terhadap Tegangan

Titik luluh merupakan batas dimana material akan terus mengalami deformasi tanpa adanya penambahan beban. Tegangan yang menyebabkan terjadinya mekanisme luluh ini disebut sebagai tegangan luluh (*yield stress*). Untuk jenis material yang tidak menunjukkan batas luluh yang jelas seperti baja kekuatan tinggi penentuannya dapat dengan metode *offset*.

Tabel 2 menunjukkan hubungan antara tegangan luluh ( $\sigma_y$ ) dan temperatur penarikan, dengan meningkatnya temperatur dari 700°C ke 850°C akan mengakibatkan penurunan tegangan luluh sebesar 42,5 %.

Penurunan nilai tegangan luluh ini disebabkan karena gaya yang diperlukan untuk membebaskan dislokasi yang terkunci sangat peka terhadap temperatur<sup>18)</sup>. Pada temperatur yang semakin tinggi, dislokasi yang terkunci semakin mudah bergerak melewati penghalangnya. Karena itu, tegangan luar yang dibutuhkan untuk deformasi lebih sedikit.

### Pengaruh Temperatur Terhadap Persentase Elongasi

Persentase elongasi merupakan perbandingan antara panjang awal sampel terhadap panjang sampel setelah diberikan perlakuan uji tarik. Pada tabel 3 diatas menunjukkan dengan meningkatnya temperatur maka persen elongasi baja HSLA semakin menurun, dimana dari temperatur 700°C ke 800°C terjadi penurunan sebesar 26%.

Penurunan persentase elongasi terjadi pada temperatur 700°C ke 800°C disebabkan dislokasi yang bergerak tertahan oleh mekanisme work hardening baja HSLA, karena unsur-unsur pembentuk karbida seperti Niobium saling berikatan membentuk senyawa karbida yang dapat meningkatkan kekuatan dan menahan laju dislokasi. Dengan meningkatnya temperatur, senyawa karbida akan semakin banyak terbentuk dan akan semakin menghalangi pergerakan dislokasi<sup>18)</sup>.

Pada temperatur 800°C ke 850°C, terjadi peningkatan persen elongasi sebesar 32%. Hal ini disebabkan kondisi penarikan pada sampel 4 berbeda dengan tiga sampel yang lain. Penarikan pada sampel 4 berada pada fasa austenit ( $\gamma$ ) yang memiliki struktur FCC, struktur ini lebih lunak dibandingkan dengan fasa ferit ( $\alpha$ ) yang memiliki struktur BCC. Sehingga sampel 4 memiliki struktur yang lebih lunak jika dibandingkan dengan sampel 3 dan sampel 2 yang memiliki fasa ferit + austenit ( $\alpha+\gamma$ ), dan jauh lebih lunak lagi jika dibandingkan dengan sampel 1 (700°C) dengan struktur ferit ( $\alpha$ ) yang memiliki kekerasan jauh lebih tinggi dibandingkan dengan austenit ( $\gamma$ ).

Dengan kondisi penarikan sampel 4 pada fasa austenit ( $\gamma$ ) yang memiliki struktur lebih lunak dibandingkan fasa austenit+ferit ( $\gamma+\alpha$ ) maupun fasa ferit ( $\alpha$ ), menyebabkan persen

elongasi sampel 4 jauh lebih tinggi dibandingkan ketiga sampel yang lain. Hal ini disebabkan karena dislokasi lebih mudah bergerak pada temperatur tinggi, sehingga tidak terjadi penumpukan dislokasi di satu tempat. Dengan demikian deformasi yang terjadi lebih merata, sehingga deformasi yang mungkin terjadi semakin besar.

### **Pengaruh Temperatur terhadap Pengerasan Regang**

Koefisien pengerasan regang ( $n$ ) didefinisikan sebagai proses peningkatan kekerasan pada suatu proses pengubahan bentuk plastis, sehingga tegangan yang diperlukan agar deformasi berjalan tetap dapat meningkat. Proses pengerasan regang terjadi karena pergerakan dislokasi yang ada dihalangi. Halangan tersebut dapat berupa batas butir, interaksi dislokasi, atom larut, impuritis, dan partikel fasa kedua.

Koefisien pengerasan regang ( $n$ ) berkisar antara  $n=0$  (material bersifat plastis) hingga  $n=1$  (material bersifat elastis). Untuk lembaran plat baja karbon rendah harga  $n$  berkisar antara 0.1-0.3. Harga  $n$  yang tinggi menandakan kemampuan mendistribusikan regangan lebih baik, sehingga dapat memperkecil terbentuknya penciutan lokal yang dapat menyebabkan perpatahan pada saat pembentukan<sup>7)</sup>.

Tabel 4 menunjukkan bahwa dengan meningkatnya temperatur maka koefisien pengerasan regang ( $n$ ) semakin kecil, dimana dari temperatur 700°C ke 800°C terjadi penurunan sebesar 47%. Koefisien pengerasan regang yang tinggi ini menandakan adanya rintangan terhadap dislokasi. Peningkatan temperatur ini membantu dislokasi melewati rintangan tersebut. Dengan demikian nilai  $n$  akan menurun dengan meningkatnya temperatur.

Pada temperatur 850°C, penarikan pada fasa austenit menunjukkan kecenderungan nilai  $n$  yang berbeda dibandingkan dengan ketiga sampel yang lain. Peningkatan nilai  $n$  terjadi dari temperatur 800°C ke temperatur 850°C sebesar 42%. Hal ini disebabkan sampel 4 (850°C) memiliki tebal yang lebih besar di bandingkan ketiga sampel yang lain, yaitu 2.7 mm. Sedangkan tebal dari sampel 1 adalah 1.9 mm, sampel 2 adalah 2.1 mm dan sampel 3 adalah 1.4 mm. Hal ini disebabkan perubahan pada luas area tarik yang semakin besar dan menyebabkan perubahan nilai tegangan dan regangan<sup>14)</sup>.

### **Pengaruh Temperatur terhadap Sensitivitas Laju Regangan**

Sensitivitas laju regangan ( $m$ ) adalah kemampuan dari sebuah bahan untuk menahan ketidakstabilan plastis atau necking. Apabila nilai  $m$  rendah maka penambahan tegangan pada bagian leher (neck) akan menyebabkan semakin besarnya laju regangan pada lokasi tersebut, akibatnya perpanjangan tidak seberapa sebelum akhirnya patah. Sebaliknya apabila  $m$  besar penambahan laju regangan pada bagian leher berjalan lambat dalam menanggapi penambahan tegangan dan karena itulah bagian leher akan terdeformasi secara gradual sehingga perpanjangan sangat besar sebelum akhirnya patah<sup>19)</sup>.

Tabel 5 menunjukkan bahwa dengan meningkatnya temperatur maka akan meningkatkan sensitivitas laju regangan, dimana secara keseluruhan kenaikan nilai  $m$  dari temperatur 750°C ke temperatur 850°C adalah sebesar 96%. Sensitivitas laju regangan yang semakin tinggi ini diakibatkan oleh meningkatnya pergerakan dislokasi karena adanya kenaikan energi dari kenaikan temperatur<sup>9)</sup>.

### **Pengaruh Laju Regangan terhadap Energi Aktivasi**

Energi aktivasi ( $Q$ ) adalah energi kinetik minimum yang diperlukan oleh partikel-partikel pereaksi untuk membentuk kompleks teraktivasi. Pada tabel 6 menunjukkan bahwa dengan meningkatnya laju regangan maka energi aktivasi akan berkurang sebesar 2%.

Penurunan energi aktivasi menunjukkan berkurangnya peran aktivasi termal pada pergerakan dislokasi. Hal ini disebabkan atom terlarut tidak sempat berdifusi ke batas butir karena laju regangan yang semakin tinggi, sehingga pergerakan dislokasi menjadi lebih cepat, dimana pergerakan dislokasi lebih ditentukan oleh tegangan yang tinggi<sup>9,10)</sup>. Hal ini ditunjukkan dengan meningkatnya tegangan pada laju regangan yang semakin besar dimana nilai  $Q$  menjadi berkurang.

### **Pengaruh Temperatur terhadap Struktur Mikro**

Sifat mekanik dari baja karbon selama proses pembentukan panas dipengaruhi oleh evolusi dari mikrostruktur. Oleh karena itu, pengontrolan dari proses rekristalisasi, pertumbuhan butir dan transformasi fasa dari baja menjadi sangat penting. Mengingat

perbedaan fasa, bentuk dan ukuran butir sangat penting untuk menentukan sifat mekanik dari material.

Berdasarkan dari hasil penelitian sebelumnya, model persamaan empiris besar butir ferit ( $d_\alpha$ ) untuk baja HSLA adalah<sup>15)</sup>:

$$d_\alpha = 28,1 \cdot d_v^{-0.5} \cdot \exp(Q/RT)^{-0.07} \cdot \dot{\epsilon}^{-0.07} \cdot \dot{\epsilon}^{-0.33} \cdot Rc^{-0.27} \quad (12)$$

dimana :

$d_v$  = besar butir austenit awal [ $\mu\text{m}$ ]

$Q$  = energy deformasi pada proses uji tarik = 195000 [J/mol]

$R$  = Konstanta gas universal [J/mol.K]

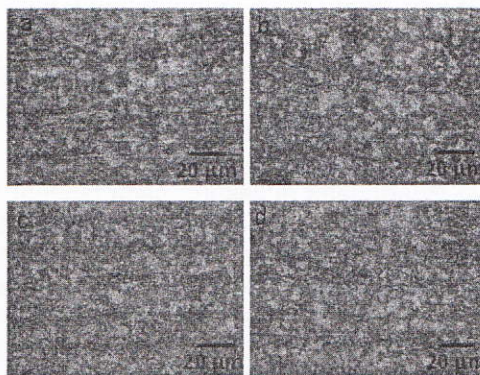
$T$  = Temperatur deformasi [K]

$Rc$  = laju pendinginan [ $^\circ\text{C/s}$ ]

Dengan memasukkan data besar butir austenit awal, temperatur tarik, regangan, laju regangan dan laju pendinginan dari proses uji tarik panas pada titik luluh dapat diperoleh besar butir ferit seperti yang ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 7  
Besarnya Butir Ferit Terhadap Temperatur Tarik Pada Titik Luluh

Sampel	1	2	3	4
T ( $^\circ\text{C}$ )	700 $^\circ\text{C}$	750 $^\circ\text{C}$	800 $^\circ\text{C}$	850 $^\circ\text{C}$
$d_\alpha$ ( $\mu\text{m}$ )	0.929	1.032	1.207	1.397



Gambar 5.  
Besarnya Butir Ferit Pada Regangan 0,2 Dan Laju Regangan  $0.1\text{s}^{-1}$  Pada Temperatur Tarik a.700 $^\circ\text{C}$ , b. 750 $^\circ\text{C}$ , c. 800 $^\circ\text{C}$ , d. 850 $^\circ\text{C}$ .

Pada validasi sampel terhadap model empiris pertumbuhan butir ferit pada titik luluh, menunjukkan besar butir ferit yang berbeda-beda. Dengan meningkatnya temperatur akan meningkatkan besar butir ferit. Hal ini adalah disebabkan dengan

meningkatnya temperatur maka butir akan mengalami pertumbuhan, sehingga besar butir akan meningkat. Hal ini juga sesuai jika dikaitkan dengan kriteria tegangan luluh dari persamaan Hall-Petch,  $\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2}$ , yaitu jika besar butir semakin meningkat maka tegangan luluh akan semakin kecil<sup>11)</sup>. Dengan meningkatnya temperatur penarikan akan menurunkan tegangan luluh sebesar 42%. Secara mikroskopis kita juga dapat melihat bahwa besar butir ferit akan berkurang dengan meningkatnya temperatur (Gambar 5).

## SIMPULAN

- Parameter persamaan konstitutif memegang peranan terhadap aliran tegangan yang terjadi pada proses uji tarik panas Baja HSLA.
- Dengan meningkatnya temperatur penarikan akan menyebabkan penurunan nilai dari tegangan luluh, koefisien pengerasan regangan dan persentase elongasi pada daerah fasa ferit + austenit ( $\alpha+\gamma$ ) dan akan menyebabkan terjadinya peningkatan pada daerah fasa austenit ( $\gamma$ ).
- Koefisien sensitivitas regangan akan berkurang dengan meningkatnya temperatur penarikan, sementara itu besar butir ferit yang terbentuk akan meningkat.
- Sementara itu dengan meningkatnya laju regangan akan menurunkan energi aktivasi yang dibutuhkan oleh partikel partikel dalam membentuk ikatan.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Adiwijaya, Agung, *Perbandingan Solusi FEM Dengan Solusi Analitik Pada Uji Tarik Uniaxial Material Superplastis Dalam Kondisi Regangan Bidang (Plane Strain)*, Skripsi, Program Sarjana FT UI, Depok, 1998.
2. An, Y.G., Vegter, H. dan Elliot, L., *A Novel and Simple Method for the Measurement of Plane Strain Work Hardening*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 155-156, 2004, p. 1616.
3. Avner, S., *Introduction to Physical Metallurgy*, 1<sup>st</sup> Ed., McGraw-Hill Int., Singapore, 1974, p. 135;357
4. Dimitrios S., Shinici T., Elton L.G., *Investigation of the Large Plastic Deformation of IPP Induced by Plane*

- strain Compression: Stress-Strain Behavior and Thermo Mechanical Properties*, International Journal of Plasticity, Vol. 22, 2006, p. 1924.
5. Dournaux, J.L., Bouviera, S., Aouafia, A., Vacher, P., *Full Field Measurement Technique and its Application to the Analysis of Materials Behavior Under Plane Strain Mode*, Materials Science and Engineering A, Vol 500A, 2009, p.47
  6. Flores, P., Victor T., G. Gilles, Pieer G., Laurent D., Anne M. H., *Accurate stress Computation in Plane Strain Tensile Tests for Sheet Metal Using Experimental Data*, Journal of Materials Processing Technology, Vol 210, 2010, p. 1712.
  7. Gotoh M., Misawa M, dan Lim C. R., *Forming Limit Strain of Sheet Metals Subjected to Plane Strain Tension*, JSME Int. Journal, Vol 36A, No. 2, 1993.
  8. Guizterrez, I., M. A. Altuna, *Work Hardening of Ferrite and Microstructure Based Modeling of its Mechanical Behavior Under Tension*, Acta Materialia, Vol. 56, 2008, p. 4682.
  9. Hosford, W.F., Robert M. Caddell, *Metal Forming, Mechanics and Metallurgy*, Prentice-Hall International Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1983
  10. Hung, P.C., Voloshin, A.S., *In plane Strain Measurement by Digital Image Correlation*, J. of the Braz. Soc. Of Mech. Sci. & Eng., Vol. 25 No. 3, 2003, p.215.
  11. Kilfoil, L.J., *In-Plane Plane Strain Testing To Evaluat Formability of Sheet Steels Used in Tubular Products*, Tesis, Queen's University, Ontario Canada, September 2007
  12. Liu D. H., Yu H. P., Li C. F., *Quasi Static Dynamic Formability of AA5052-O Sheet Under Uniaxial and Plane Strain Tension*, Transactions of Non Ferrous Metals Society of China, Vol 19, 2009, p. 318.
  13. Mahmudi, R., *A Novel Tecnique for Plane Strain Tension Testing of Sheet Metals*, Journal of Materials Processing Technology, Vol 86, 1999, p. 237.
  14. Napitupulu, R.A.M., Bagus, H.P., Priadi, D., Siradj, E.S., *Effect of Specimen Geometry on the Plane Strain Mechanism of the Uniaxial Tensile Testing of the C-Mn Steel*, Journal of Materials Science and Engineering, Vol 1A, No.5, 2011, p. 639.
  15. Napitupulu, R.A.M., *Laporan Penelitian II, Unpublished*, Program Doktorat Dept. Teknik Metalurgi dan Material, Depok, 2011.
  16. Sinaga, Ramli, *Pengaruh Temperatur dan Waktu Anil Terhadap Parameter Sifat Mampu Bentuk dan Tekstur Pada Lembaran Plat Baja Karbon Rendah*, Puslitbang KIM-LIPI, Serpong, 1995.
  17. Stiebler, K., Kunze, H.D. and El-Magd, E., *Description of the Flow Behaviour of a High Strength Austenitic Steel under Biaxial Loading by a Constitutive Equation*, Nuclear Engineering and Design, Vol 127, 1991.
  18. Smallman, R.E. dan Bishop, R.J., *Metalurgi Fisik Modern & Rekayasa Material*, PT Erlangga. Jakarta, 2000.
  19. ...., *Mechanical Testing and Evaluation*, (2000), ASM Handbook Vol. 8.

#### RIWAYAT PENULIS

**Richard A. M. Napitupulu**, lahir di Enrekang (Sulsel) pada tanggal 26 Agustus 1973. Menyelesaikan pendidikan S1 tahun 1997 di T. Mesin USU dan S2 tahun 2000 di T. Mesin UI. Saat ini sedang mengikuti studi S3 di Departemen Teknik Metalurgi dan Material UI. Bekerja sebagai dosen di Universitas HKBP Nommensen Medan sejak tahun 2003.

**Suryadi**, lahir di Bukittinggi (Sumbar) pada tanggal 2 April 1969. Menyelesaikan pendidikan S1 tahun 1994 di T. Mesin Universitas Andalas dan S2 tahun 2000 di T. Mesin UI. Saat ini sedang mengikuti studi S3 di Departemen Teknik Metalurgi dan Material UI. Bekerja sebagai staf di Pusat Teknologi Industri Proses, BPPT, Jakarta sejak tahun 1995.

**Diwangkoro K**, lahir di Jakarta pada tanggal 26 Februari 1989. Menyelesaikan pendidikan S1 tahun 2011 di T. Metalurgi UI.

**Dedi Priadi**, lahir di Jakarta pada tanggal 17 Oktober 1959. Menyelesaikan pendidikan S1 tahun 1986 di T. Metalurgi UI, S2 tahun 1990 dan S3 tahun 1993 di Ecole Nationale Superieure des Mines de Paris. Bekerja sebagai dosen di Departemen Teknik Metalurgi dan Material UI sejak tahun 1988.

**Eddy S. Sirajd**, lahir di Tarempa (Kepri) pada tanggal 8 Maret 1956. Menyelesaikan pendidikan S1 tahun 1975 di T. Metalurgi UI, S2 tahun 1985 di University of Birmingham dan S3 tahun 1994 di University of Sheffield Inggris. Bekerja sebagai dosen di Departemen Teknik Metalurgi dan Material UI sejak tahun 1983, dan memperoleh gelar Guru Besar sejak tahun 2008.