

KARAKTERISTIK RHEOLOGI PADUAN KUNINGAN C26800 DENGAN METODA UJI TARIK PANAS

Dedi Priadi, Muhammad Anis, Hariyanto
Jurusan Metalurgi
Fakultas Teknik-Universitas Indonesia
Email: dedi@yexa.eng.ui.ac.id

ABSTRAK

Pada proses pengerjaan panas logam (*hot forming*), perilaku mekanik material dipengaruhi oleh temperatur, kecepatan proses serta, kondisi kontak permukaan. Untuk mendapatkan gaya deformasi pengerjaan panas perlu diketahui rheologi bahan kondisi panas. Dalam penelitian ini dipelajari perilaku rheologi kuningan C26800 yang digunakan sebagai bahan katup tabung gas yang mana dalam pembuatannya adalah dengan tempa panas. Dari hasil penelitian didapat bahwa persamaan konstitutif kuningan dapat digambarkan dengan

$$\text{persamaan } \sigma = K \cdot \dot{\epsilon}^n \cdot \epsilon^m \cdot e^{\frac{Q}{RT}}$$

PENDAHULUAN

Teknologi perubahan bentuk logam, khususnya pengerjaan panas (*hot working*), terus mengalami perkembangan yang pesat. Hal ini terutama karena proses ini dapat menghasilkan produk dengan bentuk lebih bervariasi yang sulit diperoleh dengan pengerjaan dingin (*cold working*). Salah satu material yang umum digunakan untuk pengerjaan panas adalah kuningan.

Penggunaan kuningan yang luas terutama disebabkan oleh konduktivitas panas dan listriknya yang sangat baik. Selain itu, kuningan juga memiliki ketahanan korosi yang tinggi, mudah dibentuk, dan memiliki kekuatan yang cukup tinggi serta ketahanan fatik yang baik⁽¹⁾. Aplikasi kuningan dan paduannya antara lain untuk kabel dan kawat, terminal listrik, radiator otomotif, dan sistem pemanas rumah⁽²⁾.

Gaya deformasi yang diperlukan dalam pengerjaan panas perlu ditentukan agar diperoleh hasil yang baik. Perhitungan untuk besar gaya deformasi tersebut dapat

ditentukan dengan terlebih dahulu mengetahui karakteristik rheologi material.

METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan pada paduan kuningan ASTM C26800 yang berbentuk lembaran dengan tebal 4 mm. Pengujian yang dilakukan berupa uji tarik panas^[4,5] (*hot tension test*) dengan variabel temperatur 450, 500, 550°C dan kecepatan tarik 0,001, 0,01, 0,1 s⁻¹.

Pengujian tarik dilakukan dengan mesin uji tarik Shimadzu Servopulser menggunakan standar JIS Z2201 no. 13b.

HASIL PENELITIAN

Data Hasil Pengujian Tarik

Data yang diperoleh pada pengujian tarik panas, untuk setiap variabel temperatur dan kecepatan tarik, berupa kurva yang menunjukkan hubungan antara beban (P) dengan perubahan panjang (dl).

Perhitungan Tegangan dan Regangan Sesungguhnya

Dari data beban (P) dan perubahan panjang (dl) dapat ditentukan tegangan sesungguhnya (σ) dan regangan sesungguhnya (ϵ). Perhitungannya menggunakan rumus-rumus sebagai berikut :

$$s = \frac{P}{A} \quad \dots(1)$$

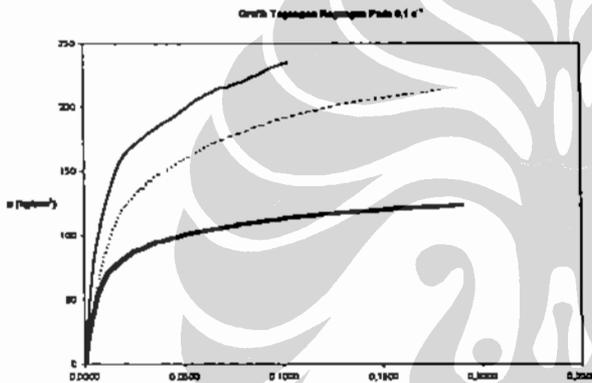
$$e = FK \frac{dl}{l_0} \quad \dots(2)$$

$$FK = \frac{dl_{ukur}}{dl_{maks}} \quad \dots(3)$$

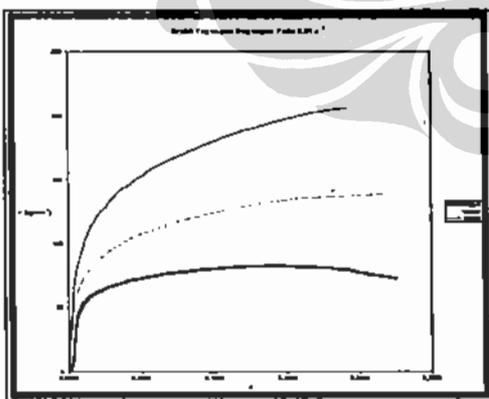
$$\epsilon = \ln(1 + e) \quad \dots(4)$$

$$\sigma = s(1 + e) \quad \dots(5)$$

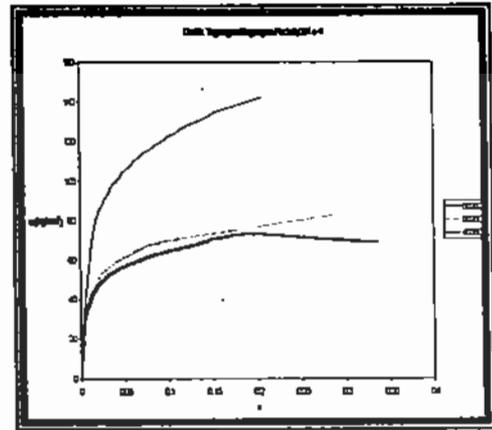
Hasil perhitungan untuk setiap sampel dapat digambarkan sebagai kurva tegangan-regangan (gambar 1-6).



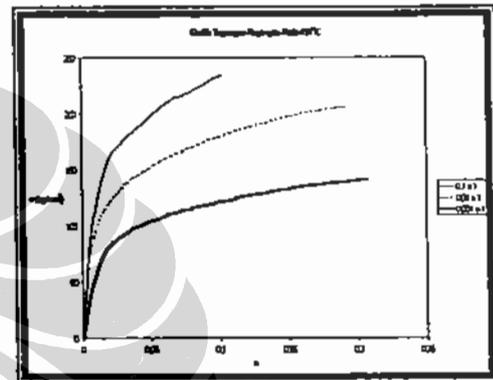
Gambar 1. Kondisi Penarikan 0,1 s⁻¹



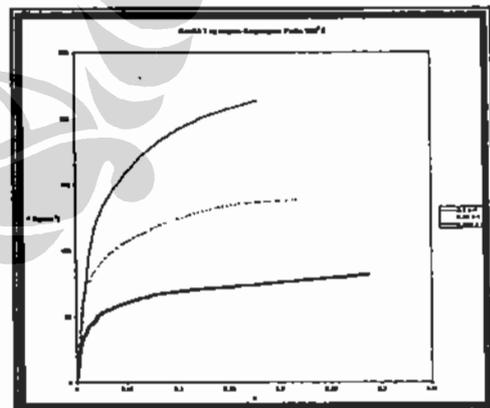
Gambar 2. Kondisi Penarikan 0,01 s⁻¹



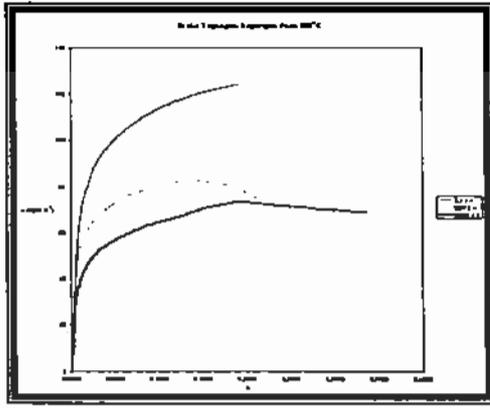
Gambar 3. Kondisi Penarikan 0,001 s⁻¹



Gambar 4. Kondisi Penarikan 450°C



Gambar 5. Kondisi Penarikan 500°C



Gambar 6. Kondisi Penarikan 550°C

Dari data terlihat bahwa dengan meningkatnya temperatur pada kecepatan penarikan yang sama terjadi penurunan tegangan luluh (σ_y). Sebagai contoh, peningkatan temperatur dari 450°C menjadi 550°C menyebabkan penurunan σ_y sebesar 50% pada laju regangan tetap sebesar 0,1 s⁻¹. Pada laju regangan 0,01 s⁻¹, penurunan σ_y yang terjadi sebesar 45%, sedangkan pada laju regangan 0,001 s⁻¹ terjadi penurunan σ_y sebesar 36%.

Tegangan tarik maksimum (UTS) juga mengalami penurunan dengan meningkatnya temperatur. Pada laju regangan 0,1 s⁻¹, terjadi penurunan UTS sebesar 39%. Sedangkan pada laju regangan 0,01 s⁻¹, penurunan UTS sebesar 45%, dan pada 0,001 s⁻¹ terjadi penurunan UTS sebesar 54%.

Penurunan nilai tegangan tersebut disebabkan karena gaya yang diperlukan untuk membebaskan dislokasi yang terkunci sangat peka terhadap temperatur⁽³⁾. Pada temperatur yang semakin tinggi, dislokasi yang terkunci semakin mudah bergerak melewati penghalangnya. Karena itu, tegangan luar yang dibutuhkan untuk deformasi lebih sedikit.

Hubungan yang sederhana antara temperatur dengan tegangan dijelaskan oleh Zener dan Holomon⁽³⁾ sebagai

$$\sigma = A e^{-\frac{Q}{RT}} \quad \dots(6)$$

di mana pada laju regangan tetap, A merupakan fungsi tegangan ($A=A(\sigma)$), sehingga persamaan menjadi

$$A(\sigma) = \sigma \epsilon e^{\frac{Q}{RT}} \quad \dots(7)$$

Oleh karena itu, pada laju regangan tetap, tegangan akan berbanding terbalik dengan temperatur.

Perubahan laju regangan juga mempengaruhi σ_y , dimana meningkatnya laju regangan mengakibatkan kenaikan σ_y . Pada temperatur tetap 450°C, peningkatan laju regangan dari 0,001 s⁻¹ menjadi 0,1 s⁻¹ meningkatkan σ_y hingga 124%. Pada temperatur 500°C peningkatan yang terjadi adalah 162%, dan pada 550°C terjadi peningkatan sebesar 76%.

Makin cepat laju regangan juga meningkatkan UTS, misalnya pada temperatur 450°C, terjadi kenaikan sebesar 91%. Pada temperatur 500°C, kenaikan yang terjadi sebesar 109%, dan pada 550°C sebesar 154%.

Meningkatnya tegangan akibat pertambahan laju regangan disebabkan oleh kerapatan dislokasi meningkat dengan cepat sehingga untuk pergerakan selanjutnya membutuhkan energi yang lebih besar⁽³⁾.

Hubungan antara tegangan dengan laju regangan dapat juga digambarkan dengan persamaan (8), di mana terlihat bahwa pada temperatur tetap, tegangan berbanding lurus dengan laju regangan.

$$\sigma = C(\dot{\epsilon})^m I \epsilon, T \quad \dots(8)$$

Perhitungan Koefisien Pengerasan Regang (n)

Nilai n dapat ditentukan dengan :

$$\sigma = k \epsilon^n \quad \dots(9a)$$

dimana σ merupakan tegangan luluh (*yield point*) yang ditentukan dengan menarik garis 0,2% pada kurva σ - ϵ .

$$\log \sigma = \log k + n \log \epsilon \quad \dots(9b)$$

dengan metode kuadrat terkecil (*least square*) :

$$\bar{Y} = a + b\bar{X} \quad \dots(10)$$

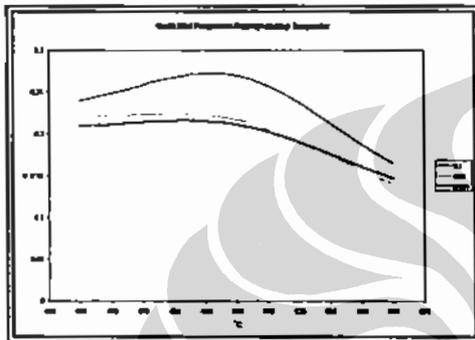
$$b = \frac{\sum XY - n\bar{X}\bar{Y}}{\sum X^2 - n\bar{X}^2} \dots(11)$$

→ nilai n bisa didapat

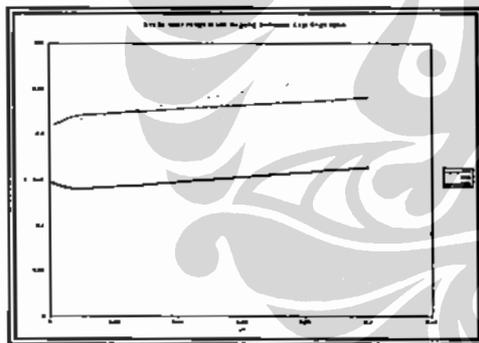
$$a = \bar{Y} - b\bar{X} \dots(12)$$

→ nilai k bisa didapat

Koefisien pengerasan regang (n) semakin kecil bila temperatur meningkat. Pada laju regangan $0,1 \text{ s}^{-1}$, terjadi penurunan nilai n sebesar 32%, pada laju regangan $0,01 \text{ s}^{-1}$ nilai n turun sebesar 36% dan pada $0,001 \text{ s}^{-1}$ penurunan yang terjadi sebesar 30%.



Gambar 7. Nilai n terhadap Temperatur



Gambar 8. Nilai n terhadap Laju Regangan

Koefisien pengerasan regang yang tinggi mengisyaratkan adanya rintangan terhadap dislokasi⁽³⁾. Peningkatan temperatur membantu dislokasi melewati rintangan tersebut. Dengan demikian koefisien pengerasan regang menurun dengan naiknya temperatur.

Semakin tinggi laju regangan mengakibatkan kenaikan nilai n. Pada

temperatur 450°C terjadi kenaikan 13%. Pada temperatur 500°C kenaikan yang terjadi sebesar 22%, dan pada temperatur 550°C nilai n naik sebesar 10%.

Laju regangan yang tinggi mengakibatkan terbentuknya tumpukan dislokasi yang lebih cepat, yang menghalangi dislokasi selanjutnya. Semakin banyaknya rintangan terhadap pergerakan dislokasi mengakibatkan naiknya koefisien pengerasan regang.

Perhitungan Koefisien Sensitifitas Laju Regangan (m)

Dari persamaan (8), nilai m diperoleh dengan rumus :

$$m = \frac{\log\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)}{\log\left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}\right)} \dots(13)$$

$$\log\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right) = C_1 + m \cdot \log\left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}\right) \dots(14)$$

dengan metode kuadrat terkecil (*least square*) dengan persamaan 10, bisa didapat nilai a dan b dengan persamaan 11 dan 12.

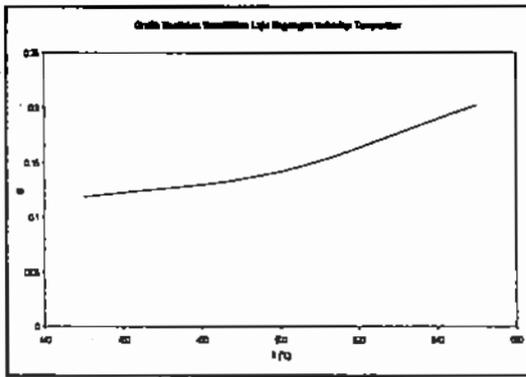
b → nilai m

a → nilai C_1

Meningkatnya temperatur mengakibatkan sensitifitas laju regangan bertambah. Nilai m untuk temperatur 450°C adalah 0.119, temperatur 500°C sebesar 0.142 dan pada temperatur 550°C , diperoleh

nilai m sebesar 0.202. Secara keseluruhan kenaikan nilai m mulai dari temperatur 450°C hingga temperatur 550°C adalah sebesar 71%.

Nilai sensitifitas laju regangan yang semakin tinggi dengan kenaikan temperatur diakibatkan oleh meningkatnya pergerakan dislokasi karena adanya energi dari temperatur yang tinggi⁽³⁾.



Gambar 9. Grafik Nilai m terhadap Temperatur

Pada grafik σ_y terhadap temperatur pada lampiran 4, terlihat bahwa kemiringan kurva pada laju regangan $0,1 \text{ s}^{-1}$ lebih tajam daripada laju regangan yang lebih rendah, yaitu $0,01 \text{ s}^{-1}$ dan $0,001 \text{ s}^{-1}$. Ini menunjukkan bahwa penurunan nilai σ_y meningkat dengan makin cepatnya laju regangan. Dengan demikian, peningkatan temperatur mengakibatkan pengaruh laju regangan terhadap tegangan luluh semakin besar.

Perhitungan Energi Aktivasi (Q)

Nilai Q dapat diperoleh dengan rumus^[6]:

$$\sigma = C_2 e^{\frac{Q}{RT}} \quad \dots(15)$$

$$\ln \sigma = \ln C_2 + Q \frac{1}{RT} \quad \dots(16)$$

dengan $R = 1,987 \text{ kal/derajat.mol}$

dengan metode kuadrat terkecil (*least square*) dengan persamaan 10, bisa didapat nilai a dan b dengan persamaan 11 dan 12.

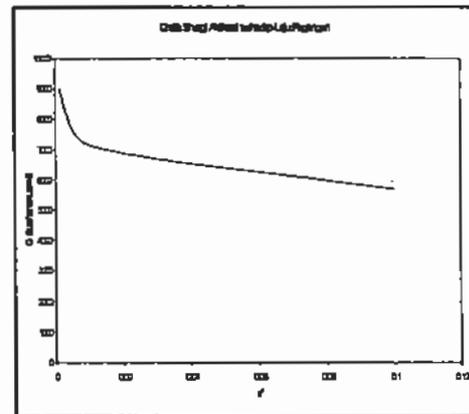
b \rightarrow nilai Q

a \rightarrow nilai C_2

Energi aktivasi (Q), berkurang bila laju regangan meningkat. Pada laju regangan $0,001 \text{ s}^{-1}$, nilai Q adalah 8989 kal/gr.mol . Pada laju regangan $0,01 \text{ s}^{-1}$, Q turun menjadi 7136 kal/gr.mol , dan pada $0,001 \text{ s}^{-1}$, nilai Q adalah 5673 kal/gr.mol .

Berarti dari laju regangan $0,001 \text{ s}^{-1}$ ke $0,01 \text{ s}^{-1}$, nilai Q turun sebesar 21%, dan dari $0,001 \text{ s}^{-1}$ ke $0,1 \text{ s}^{-1}$ penurunannya sebesar

37%. Secara keseluruhan terdapat perbedaan nilai Q sebesar 37 % dari laju regangan $0,001 \text{ s}^{-1}$ hingga laju regangan $0,1 \text{ s}^{-1}$.



Gambar 10. Nilai Q terhadap Laju Regangan

Penurunan energi aktivasi menunjukkan berkurangnya peran aktivasi termal pada pergerakan dislokasi. Hal ini disebabkan karena atom terlarut tidak sempat berdifusi ke batas butir, sehingga pergerakan dislokasi lebih ditentukan oleh tegangan yang tinggi⁽³⁾. Hal ini juga ditunjukkan dengan meningkatnya tegangan pada laju regangan yang semakin cepat.

Perhitungan Nilai konstanta K

Nilai konstanta K pada persamaan konstitutif merupakan hasil perkalian ketiga konstanta pada persamaan 9, 14, dan 15.

$$K = k.C_1.C_2 \quad \dots(17)$$

KESIMPULAN

Dari pengolahan data yang dilakukan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Persamaan konstitutif untuk paduan kuningan C26800 adalah:

$$\sigma = K \cdot \epsilon^n \cdot \epsilon^m \cdot e^{\frac{Q}{RT}} \quad \dots(18)$$

dengan nilai parameter konstitutif lihat tabel 1.

2. Meningkatnya temperatur mengakibatkan tegangan luluh (σ_y) dan nilai koefisien pengerasan regang (n) berkurang, sedangkan nilai sensitifitas

laju regangan ($\dot{\epsilon}$) dan % elongasi bertambah.

3. Meningkatnya laju regangan mengakibatkan tegangan luluh (σ_y) dan nilai koefisien pengerasan regang (n) bertambah, sedangkan energi aktivasi (Q) dan % elongasi berkurang.

DAFTAR ACUAN

- (1) Butts, Allison. 1960. "Copper, American Chemical Society Monograph Series". Reinhold Publishing Corporation. New York.
- (2) 1979. "Metals Handbook, Ninth Edition, Vol. 2, Properties and Selection : Nonferrous Alloys and Pure Metals". American Society for Metals. Ohio.
- (3) Hosford, William F. dan Robert M. Caddell. 1983. "Metal Forming, Mechanics and Metallurgy". Prentice-Hall International Inc. Englewood Cliffs, New Jersey.
- (4) "Standard Methods of Tension Testing of Metallic Materials". ASTM Designation E 8, Annual Book of ASTM standards.
- (5) "Teknik-teknik Pengujian". ASTM E21-69.
- (6) Prasad, Y.V.R.K. dan S. Sasidhara. 1997. "Hot Working Guide, A Compendium of Processing Maps". ASM International. USA.

Tabel 1. Nilai parameter konstitutif

Parameter Konstitutif	Temperatur/laju regangan								
	450			500			550		
	0.1	0.01	0.001	0.1	0.01	0.001	0.1	0.01	0.001
K	529	513	448	486	386	300	264	281	380
n	0,240	0,221	0,209	0,270	0,217	0,211	0,164	0,141	0,148
m	0,119			0,142			0,202		
	Laju regangan								
	0.1			0.01			0.001		
Q	5673			7136			8989		

Keterangan :

- Satuan temperatur : °C
- Laju regangan : s⁻¹
- Q : kal/gr.mol