

Karakteristik Laju Regangan Melar pada Baja Tahan Karat Austenitic 316L

*I. M. W. Ekaputra^a, Gunawan Dwi Haryadi^b

^aJurusan Teknik Mesin, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Sanata Dharma
Paingan, Maguwoharjo, Depok, Sleman-Yogyakarta 55282, Telp. +62274 883037.

^bDepartemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: made@usd.ac.id

Abstract

In this study, the creep strain rate characteristics of austenitic 316L stainless steel was investigated from the uniaxial creep-rupture test. The tests were conducted under various applied load levels with a constant temperature at 525°C. The creep exponent was obtained by applying a Norton's law equation on a regression line of creep strain rate vs. stress curve. The steel clearly showed an instantaneous primary stage, following with the secondary and tertiary stages on the creep curve. It was found that the creep rupture time decreased systematically with an increase in the stress. The secondary stage of creep curve almost dominated the creep's lifetime. Therefore, the creep strain rate was determined from the minimum strain rate on this stage. The obtained creep exponent indicated that the responsible creep mechanism was grain boundary sliding or diffusional creep mechanism.

Keywords: Austenitic 316L stainless steel, Creep exponent, Grain-boundary sliding, Norton's law.

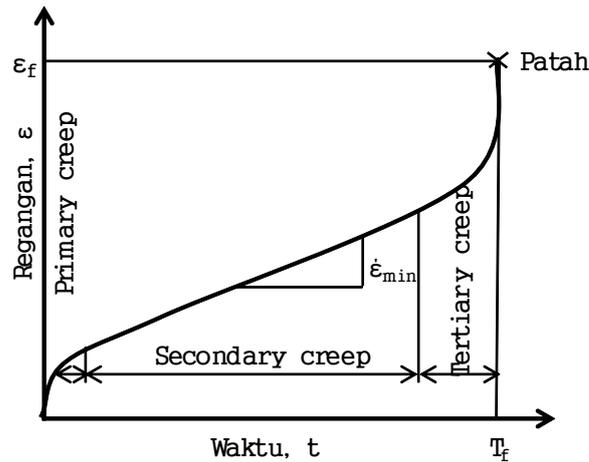
1. Pendahuluan

Dalam dunia industri dengan lingkungan kerja yang cukup ekstrim, pemilihan material yang tepat merupakan suatu hal yang sangat krusial. Pada industri pembangkit tenaga listrik seperti pembangkit listrik tenaga gas dan uap (PLTGU) serta pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN), kondisi lingkungan kerja yang bersifat korosif dan temperatur yang tinggi berpotensi mengakibatkan kegagalan pada komponen-komponennya. Salah satu material yang dapat diterapkan pada lingkungan tersebut adalah baja tahan karat austenitik 316L. Baja 316L memiliki beberapa sifat mekanis yang unggul, diantaranya adalah tahan pada lingkungan korosif dan suhu tinggi, sifat mampu bentuk dan las yang baik, serta tidak dapat dimagnetkan [1-5]. Baja ini memiliki komposisi kimia terbesar diantaranya adalah *Chromium* (Cr), *Molybdenum* (Mo), dan *Nickel* (Ni), serta komposisi *Carbon* (C) yang rendah (<0.03 C wt-%).

Jenis-jenis kegagalan yang berpotensi terjadi pada PLTGU/ PLTN diantaranya adalah kegagalan akibat lelah (*fatigue*) dan melar (*creep*) [6]. Kegagalan akibat melar merupakan salah satu potensi kegagalan yang hampir dapat terjadi di sebagian besar komponen dalam PLTGU/ PLTN. Kegagalan melar terjadi akibat pembebanan konstan yang berlangsung secara terus menerus pada kondisi temperatur yang tinggi. Temperatur tinggi yang dimaksud adalah temperatur *homologous*, dimana kondisi temperatur kerja bernilai lebih dari 0.5 temperatur luluh material. Kegagalan melar dalam mekanisme perpatahan (*fracture mechanics*) tergolong dalam mekanisme perpatahan yang bergantung pada waktu (*time-dependent fracture mechanics*), dimana deformasi yang terjadi hingga material gagal hanya bergantung pada waktu operasinya. Umumnya, proses melar terjadi dalam waktu yang cukup lama, dan pada periode tertentu akan mengalami gagal secara tiba-tiba. Oleh sebab itu, evaluasi melar menjadi salah satu aspek keselamatan dalam suatu struktur yang perlu diperhitungkan dengan seksama dan hati-hati. Secara garis besar, karakteristik proses melar dapat direpresentasikan dengan kurva regangan terhadap waktu seperti yang terlihat pada Gambar 1.

Seperti yang terlihat pada gambar, kurva melar dibagi menjadi tiga tahapan proses, diantaranya adalah tahap pertama (*primary stage*), kedua (*secondary stage*), dan ketiga (*tertiary stage*). Pada tahap pertama, proses melar diawali dengan proses penguatan regangan (*strain hardening*), dimana terjadi proses pergerakan/pembentukan dislokasi di dalam material [6]. Tahap selanjutnya dikenal dengan tahapan stabil (*steady stage*), dimana waktu melar secara umum berlangsung cukup lama dibandingkan pada tahapan satu dan tiga. Tahapan selanjutnya diakhiri dengan tahap percepatan (*acceleration stage*), dimana pada tahapan ini mulai terjadi proses *necking* dan material akan mengalami patah secara tiba-tiba. Dengan melihat proporsi waktu yang terjadi dalam masing-masing tahapan melar, tahap kedua menjadi sangat penting untuk dievaluasi lebih jauh. Salah satu evaluasi yang dilakukan pada tahap kedua adalah penentuan hubungan antara laju regangan melar (*creep strain rate*) terhadap beban (*stress*). Laju regangan melar ditentukan berdasarkan nilai minimum dari laju regangan melar (*minimum creep rate*) pada kurva melar. Dengan menentukan nilai minimum tersebut, maka nilai eksponen melar (*creep exponent*), *n*, dapat ditentukan. *n* tersebut ditentukan dengan menerapkan hukum Norton (*Norton's law*) pada regresi garis nilai minimum laju melar terhadap masing-masing pembebanan. Hukum Norton dapat dirumuskan dengan persamaan berikut,

$$\dot{\epsilon} = A(\sigma)^n \quad (1)$$



Gambar 1. Kurva melar.

dimana $\dot{\epsilon}$ = laju regangan melar (1/hr), σ = beban yang diberikan (MPa), n = nilai eksponen melar, dan A = nilai konstanta material.

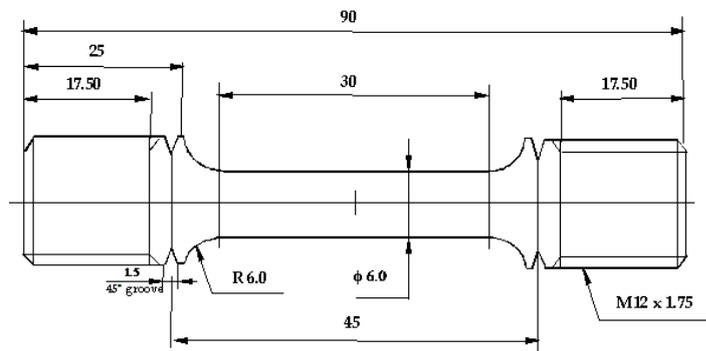
Dalam artikel ini, sejumlah data kegagalan melar pada baja tahan karat austenitik 316L diperoleh melalui pengujian yang dilakukan pada temperatur konstan sebesar 525°C dan pembebanan yang bervariasi yaitu 225 MPa, 215 MPa, 195 MPa, 185 MPa, dan 180 MPa. Dari data pengujian tersebut, nilai laju regangan minimum ditentukan untuk selanjutnya digunakan dalam penentuan nilai eksponen melar. Dengan penentuan nilai eksponen melar, karakteristik laju regangan melar dan mekanisme melar yang terjadi dibahas.

2. Material dan metodologi

Tabel 1 menunjukkan komposisi kimia untuk baja tahan karat austenitic 316L secara keseluruhan. Spesimen yang digunakan berbentuk silinder yang dibentuk dari batang logam melalui proses *hot rolling* hingga terbentuk plat dengan ketebalan 10 mm. Spesimen yang digunakan memiliki dimensi dengan panjang 90 mm dan diameter 6 mm. Pengujian melar dilakukan sesuai dengan standar ASTM E139 [7]. Pembebanan yang diterapkan pada pengujian melar bervariasi yaitu 225 MPa, 215 MPa, 195 MPa, 185 MPa, dan 180 MPa, dengan temperatur konstan sebesar 525°C. Sesuai standar yang digunakan, temperatur dijaga dengan batas toleransi ± 2 °C dari temperatur pengujian. Dari hasil pengujian diperoleh kurva melar berupa regangan terhadap fungsi waktu. Berdasarkan kurva tersebut, nilai laju regangan melar ditentukan dari nilai minimum kurva laju regangan terhadap waktu. Nilai eksponen melar, n dapat ditentukan dengan menerapkan hukum Norton pada regresi garis linear kurva laju regangan minimum terhadap fungsi tegangan.

Tabel 1. Komposisi kimia dari AISI 316L (wt.%).

Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Fe
bal.	0.022	0.47	1.899	0.046	0.008	17.501	10.018	2.096	67.290



Gambar 2. Spesimen uji melar [10].

3. Hasil dan pembahasan

3.1. Karakteristik kurva melar

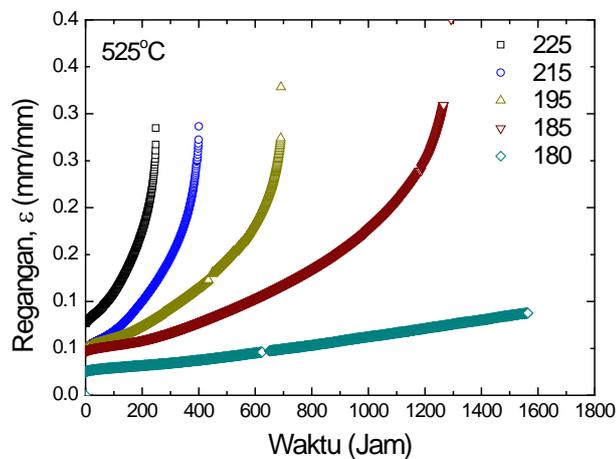
Gambar 3 menunjukkan variasi regangan kurva melar terhadap fungsi waktu untuk material baja tahan karat 316L dengan beberapa kondisi pembebanan yang bervariasi pada temperatur 525°C. Dari masing-masing kurva terlihat bahwa deformasi yang terjadi diawali oleh tahapan pertama berupa peningkatan deformasi yang terjadi secara tiba-tiba

dan dalam waktu singkat, diikuti dengan tahapan kedua dan ketiga. Tahap kedua pada kurva melar ditandai dengan perubahan deformasi yang tidak terlalu signifikan. Tahap ketiga ditandai dengan peningkatan deformasi yang terjadi secara tiba-tiba, dimana baja umumnya mulai mengalami *necking* dan selanjutnya patah.

Dari gambar juga terlihat bahwa waktu melar yang dibutuhkan hingga mengalami patah sangat bergantung pada besarnya pembebanan yang diterapkan. Semakin besar pembebanan yang diterapkan, maka waktu melar yang terjadi semakin singkat. Seperti yang telah dilaporkan pada hasil penelitian lainnya [2, 6], umur melar yang terjadi pada baja 316L sebagian besar terdapat pada tahapan kedua pada kurva melar.

3.2. Laju regangan minimum

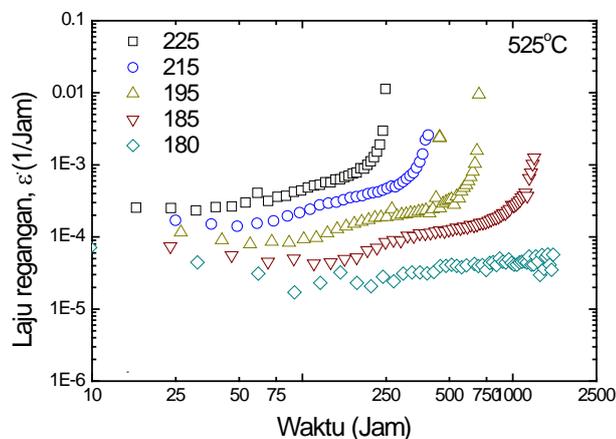
Gambar 4 menunjukkan kurva logaritmik ganda antara laju regangan melar pada masing-masing pembebanan terhadap waktu. Perlambatan laju regangan awal terlihat sesaat setelah pembebanan awal. Pada kurva juga terlihat bahwa penurunan laju regangan melar terjadi pada tahap awal menuju tahap kedua yang bernilai minimum. Peningkatan waktu melar yang sistematis terhadap penurunan laju regangan minimum dapat diamati pada Gambar 4. Tabel 2 menunjukkan nilai laju regangan minimum untuk masing-masing pembebanan. Setelah melewati laju regangan minimum, laju regangan terhadap waktu meningkat secara tiba-tiba pada tahap ketiga hingga baja mengalami patah.



Gambar 3. Kurva melar regangan terhadap waktu.

Tabel 2. Laju regangan baja 316L pada temperatur 525°C.

Pembebanan (MPa)	Laju regangan
225	2.65×10^{-4}
215	1.37×10^{-4}
195	8.33×10^{-5}
185	4.44×10^{-5}
180	2.17×10^{-5}



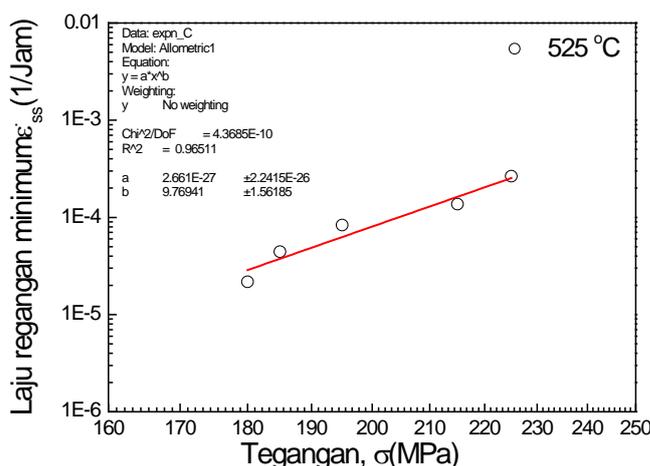
Gambar 4. Laju melar minimum pada masing-masing pembebanan.

3.3. Nilai eksponen melar

Gambar 5 menunjukkan kurva logaritmik ganda antara laju regangan melar minimum terhadap fungsi tegangan. Dengan menerapkan hukum Norton pada regresi garis linear, persamaan laju perambatan retak terhadap fungsi tegangan untuk baja 316L diperoleh sebagai berikut,

$$\dot{\epsilon} = 2.66 \times 10^{-27} (\sigma)^{9.77} \quad (2)$$

Dari beberapa penelitian yang telah dilaporkan [2, 8], nilai eksponen melar, n yaitu 9.77, mengindikasikan bahwa pola pembebanan yang diberikan cenderung berada pada area pembebanan yang rendah.



Gambar 5. Nilai eksponen melar dari beberapa variasi pembebanan pada 525°C.

Karakteristik kurva laju regangan melar umumnya dibedakan menjadi dua area pembebanan yaitu area dengan pembebanan kecil dan tinggi. Kedua area tersebut memiliki gradien kurva berupa nilai eksponen melar yang berbeda, sehingga metode extrapolasi tidak dapat digunakan saat melakukan prediksi laju regangan terhadap variasi pembebanan yang cukup luas. Perubahan gradien yang terjadi antara pembebanan kecil dan tinggi berkaitan erat dengan perubahan mekanisme melar yang terjadi. Telah dilaporkan bahwa pada area pembebanan rendah, deformasi dikontrol oleh mekanisme *grain-boundary sliding* atau *diffusional* melar, sedangkan pada pembebanan yang tinggi, mekanisme melar berubah menjadi mekanisme dislokasi melar (*dislocation creep*) [2].

4. Kesimpulan

Dari hasil pengujian melar pada baja tahan karat austenitik 316L diperoleh bahwa penentuan nilai laju regangan dapat ditentukan berdasarkan nilai minimum laju regangan pada tahap kedua. Berdasarkan nilai laju regangan minimum, nilai eksponen melar diperoleh sebesar 9.77 yang mengindikasikan bahwa pola pembebanan yang diberikan cenderung berada pada area pembebanan yang rendah. Berdasarkan pola pembebanan tersebut dapat ditarik kesimpulan bahwa mekanisme melar yang terjadi berupa *grain-boundary sliding* atau *diffusional* melar. Prediksi laju regangan pada baja 316L dapat dilakukan lebih jauh dengan melakukan pengujian melar menggunakan beberapa variasi pembebanan dan temperature yang lebih luas.

Referensi

- [1] M. D. Mathew, K. Laha, and V Ganesan, 2012, "Improving creep strength of 316L stainless steel by alloying with nitrogen". *J. of Material Science and Engineering A*, 535: 76-83.
- [2] A. Nassour, W. W. Bose, and D. Spinelli, 2001, "Creep properties of austenitic stainless-steel weld metals". *J. of Materials Engineering and Performance*, 10: 693-698.
- [3] V. Ganesan, M. D. Mathew, P. Parameswaran, and K. Laha, 2013, "Effect of nitrogen on evolution of dislocation substructure in 316LN SS during creep". *Procedia Engineering*, 55: 36-40.
- [4] J. G. Kumar, V. Ganesan, K. Laha, and M. D. Mathew, 2013, "Time dependent design curves for a high nitrogen grade of 316LN stainless steel for fast reactor applications". *J. of Nuclear Engineering and Design*, 265: 949-956.
- [5] I.M.W. Ekaputra, Woo-Gon Kim, Jae-Young Park, Seon-Jin Kim and Eung-Seon Kim, 2016, "Characterization of the Q^* parameter for evaluating creep crack growth rate for Type 316LN stainless steel". *J. of Mechanical Science and Technology*, 30 (7): 1-8.

- [6] K. A. Mohammad, E. S. Zainudin, S. Salit, N. I. Zahari, and A. Ali, 2013, “Creep test of type austenitic 316L stainless steel at high temperature”, *Applied Mechanics and Materials*, 368-370: 708-711.
- [7] ASTM E 139-07, 2007, “Standard test method for conducting creep, creep rupture and stress rupture tests of metallic materials”.
- [8] E. I. Samuel, B. K. Choudhary, D. P. R. Palaparti, and M. D. Mathew, 2013, “Creep deformation and rupture behaviour of P92 steel at 923 K”, *Procedia Engineering*, 55: 64-69.