

# PERILAKU CREEP PADA BAJA AUSTENITIK PADA KONDISI TEMPERATUR TINGGI

Uum Sumirat

\* Pendidikan Teknik Mesin FPTK Universitas Pendidikan Indonesia Jl. Setiabudi 207 Bandung  
Email : [sumiratum@gmail.com](mailto:sumiratum@gmail.com)

## Abstract

**PERILAKU CREEP PADA BAJA AUSTENITIK PADA KONDISI TEMPERATUR TINGGI** Material baja jenis baja tahan karat austenitik yang dijadikan bahan penelitian ini. Baja tersebut diuji creep pada kondisi tempertur 750, 800, 850, dan 900 °C di bawah kondisi tegangan kerja  $0.9\sigma$ ,  $\sigma$ , dan  $1.1\sigma$ . Dilakukan pula pemeriksaan struktur mikro dan makro pada specimen setelah dilakukan uji creep. Berdasarkan data-data hasil uji creep yang diperoleh ditentukan besar konstanta A, n dan energi aktivasi Q. Kurva creep memperlihatkan daerah linier dan rupture. Pada daerah linier (*power law creep*) mempunyai energi aktivasi sebesar,  $Q = 213, 36$  kJ/mol dan konstanta eksponen tegangan,  $n = 6$  menunjukkan bahwa mekanisme creep yang terjadi pada proses tersebut adalah mekanisme dislokasi pada tegangan tinggi. Strukturmikro baja tersebut berupa austenit yang diperkuat oleh endapan delta ferrite, hanya saja endapan ini akan bergeser kebatas butir saat mengalami pemanasan yang cukup tinggi dan lama, sehingga mengakibatkan elongasinya menurun pada suhu tinggi.

Kata Kunci : Baja tahan karat austenitik, creep, struktur mikro, struktur makro, temperatur tinggi

**Creep Behavior of Austenitic Stainless Steels Under High Temperature Conditions.** Austenitic stainless steels used as specimen of this research. The condition of the creep tests were under tempertur of 750, 800, 850, and 900 °C, and under the conditions of work stress  $0.9\sigma$ ,  $\sigma$ , and  $1.1\sigma$ . The macro and microstructure of specimen after creep test was conducted investigation. Based on the data of creep test results were determined some constants such as : A, n and activation energy Q. The creep curve showed the linear range and rupture. In the linear region (*power law creep*) has an activation energy of,  $Q = 213, 36$  kJ / mol and a constant stress exponent,  $n = 6$ . Those showed the creep mechanism that occurs in the process is the mechanism of dislocation at high stress. Austenite microstructure of the steel reinforced by delta ferrite presipitation , only this will shift to grainboundary under high temperature condition, so that resulted in elongasion decreased at high temperatures.

Keywords: austenitic stainless steel, creep, microstructure, macrostructure, high temperature

## 1. Pendahuluan

Pada kondisi operasi ( $> 700^{\circ}\text{C}$ ) paduan 15,83Cr-11,39Ni-1,7Mn-1,96Mo mengalami proses *aging* yaitu terbentuknya presipitat karbida sekunder dalam fasa matriks austenit. Karbida sekunder berfungsi sebagai penghambat gerakan dislokasi sehingga paduan memiliki kekuatan mulur yang lebih tinggi pada suhu tinggi. Penyebaran karbida-karbida di dalam suatu material akan dapat menstabilkan secara signifikan perbaikan ketahanan *creep rupture* dari baja tahan karat austenitik dan paduannya pada temperatur 700 - 800 °C. Keberadaan presipitan halus (partikel yang tidak larut) dalam matriks akan menjadi penghambat yang efektif bagi gerakan dislokasi. Unsur pepadu dalam baja tahan karat secara signifikan ada pengaruhnya seperti Karbon, Niobium, Titanium, Zirkonium, Tembaga dan Nitrogen. Peningkatan unsur karbon pada paduan secara signifikan dapat menurunkan laju *creep* minimum dan meningkatkan *life rupture* karena dengan meningkatnya kandungan karbon maka konsentrasi presipitat karbida semakin tinggi, seperti halnya pada paduan Fe-36Al-0,4C secara signifikan ketahanan *creep* meningkat setelah paduan tersebut

dilaku panas pada temperatur 1200-1250<sup>0</sup> C. Peningkatan ketahanan *creep* ini disebabkan terbentuknya karbida butir halus FeTiP dan Ti-rich pada perlakuan temperatur tinggi<sup>35</sup>. Penambahan unsur Niobium dalam paduan akan meningkatkan kestabilan karbida yang dihasilkan sehingga karbida dapat berfungsi efektif sebagai penghambat gerakan dislokasi pada temperatur yang lebih tinggi.

## 2. Metodologi

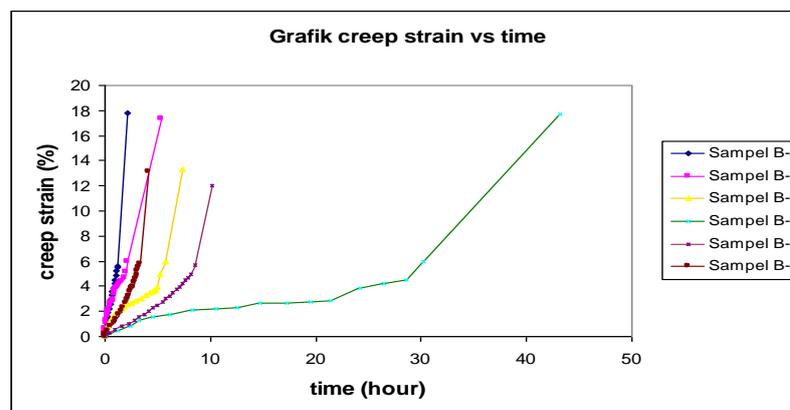
Material yang dijadikan bahan uji adalah baja tahan karat austenitik mempunyai komposisi kimia sebagai berikut Fe = 68,10, C = 0,057, Si = 0,36, Mn = 1,70, Cr = 15,83, Ni = 11,39, Mo = 1,96, Cu = 0,27, V = 0,040, U = 0,015, Co = 0,29, S = 0,017, P = 0,027. Pemeriksaan komposisi kimia dilakukan dengan menggunakan Spektrometri jenis Metorex yang dilaksanakan berdasarkan prinsip AAS (*Atomic Absorbtion Spectrophotometer*). Uji tarik mengacu standar ASTM A.370 dilakukan pada 800 °C dan 25 °C. Uji kekerasan dengan skala kekerasan HB pada benda uji sebelum diuji creep dan setelah diuji creep. Kondisi percobaan uji creep pada variasi tempertatur 800, 820, 850 dan 900 °C di bawah kondisi tegangan kerja 53,8; 67,25; 80,7; 107,6; 123,74; dan 134,5. Pemeriksaan struktur mikro dilakukan mulai dengan proses pemotongan benda uji, selanjutnya *mounting*, *grinding*, *polishing* dan akhirnya di etsa (*etching*). Kemudian specimen diperiksa dibawah mikroskop untuk diamati dan difoto dengan perbesaran 200, 500 dan 1000 X. Analisis struktur mikro dibandingkan dengan standar ASM. Uji fraktografi dilakukan dengan perbesaran 25 X.

## 4. Hasil Diskusi

### a. Creep

Analisis bahan, pengujian creep, penentuan konstanta  $n$  dan  $Q$ , persamaan creep, sifat mekanik dan struktur mikro, serta meningkatkan ketahanan creep akan dibahas. Pada analisa bahan dibahas hasil uji komposisi kimia, kemudian distandarkan pada ASTM. Sedangkan pada pengujian creep dibahas grafik hasil uji creep. Konstanta  $n$  dan  $Q$  ditentukan berdasarkan grafik, hal ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik mekanisme creep. Sifat mekanik dan struktur mikro dianalisa untuk mendukung data-data hasil uji creep dan dilakukan pembahasan pengaruh unsur pepadu terhadap peningkatan ketahanan creep.

Hasil uji creep pada Gambar 1 menunjukkan bahwa sampel B-4 pada kondisi 800 °C dan applied strees 80,7 MPa mempunyai time to rupture yang sangat besar dibandingkan dengan sampel yang lainnya, sedangkan time to rupture yang sangan rendah diperoleh pada sampel B-1 pada kondisi 800 °C dan applied stress 134,5 MPa.



**Gambar 1. Grafik gabungan hasil uji creep**

Pada temperatur tinggi, fenomena *creep* menunjukkan kurva dengan tiga daerah *creep* yaitu *creep* primer, sekunder, dan tertier. Diasumsikan parameter *creep* yang paling berpengaruh adalah *creep* sekunder atau *creep* keadaan tunak. Laju *creep* sekunder ini bergantung pada temperatur dan tegangan yang dinyatakan sebagai:

$$\dot{\epsilon}_s = A\sigma^n \exp(-Q_c / RT) \tag{1}$$

Dimana, A= konstanta, n = *stress exponent*, R = tetapan gas, (8,31 J/mol.K). T = temperatur dalam Kelvin, Qc = energi aktivasi untuk *creep* (Joule/mol). Persamaan di atas dikenal sebagai *Power Law Relationship* yang dapat menjelaskan dengan baik perilaku *creep* pada temperatur tinggi. Dari eksperimen diperoleh nilai n dan Qc bervariasi sesuai kondisi tegangan dan temperatur. Perubahan nilai n dan Qc ini berkaitan dengan perubahan mekanisme *creep*.

Percobaan uji creep dengan variasi tegangan aplikasi bertujuan untuk menentukan harga konstanta n. Sedangkan percobaan uji creep dengan variasi temperatur aplikasi bertujuan untuk menentukan harga energi aktivasi Q. Apabila persamaan (1) di atas dilogaritmakan maka menghasilkan:

$$\text{Log } \bar{\epsilon} = \text{Log } A + n \text{Log } \sigma - \frac{Q}{2,303 RT} \tag{2}$$

Penentuan harga n didapatkan dengan membuat grafik seperti pada gambar 3. Harga n didapat dengan :

$$\frac{\partial \text{Log } \bar{\epsilon}}{\partial \text{Log } \sigma} = n \tag{3}$$

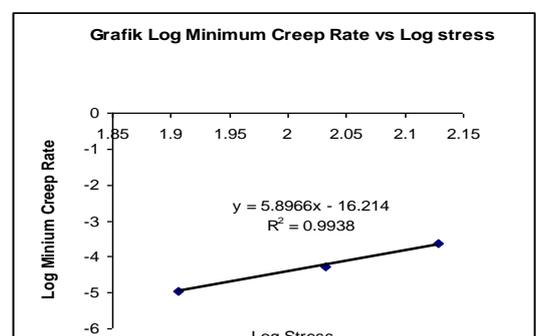
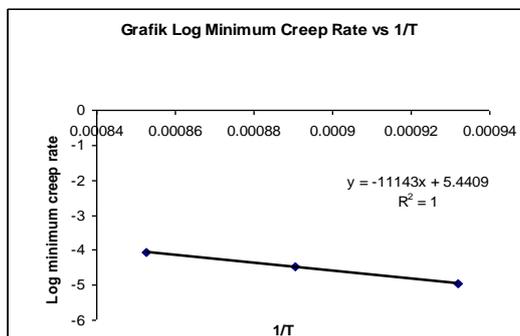
Sedangkan harga Q didapat dengan :

$$\frac{\partial \text{Log } \bar{\epsilon}}{\partial \left(\frac{1}{T}\right)} = \frac{-Q}{2,303 R} \tag{4}$$

$$Q = -\frac{\partial \text{Log } \bar{\epsilon}}{\partial \left(\frac{1}{T}\right)} \times 2,303 R \tag{5}$$

**Tabel 1. Hasil Pengolahan Data**

T (K)	$\dot{\epsilon}$ min (s <sup>-1</sup> )	$\sigma$ (Mpa)	Log $\sigma$	Log $\dot{\epsilon}$ min	T (K)	$\dot{\epsilon}$ min (s <sup>-1</sup> )	$\sigma$ (Mpa)	1/T (K <sup>-1</sup> )	Log $\dot{\epsilon}$ min
1073	0.000235	134.5	2.12872	-3.628102	1073	1.14E-05	80.7	0.00093	-4.943813
1073	5.09E-05	107.6	2.03181	-4.293061	1123	3.3E-05	80.7	0.00089	-4.481443
1073	1.14E-05	80.7	1.90687	-4.943813	1173	8.74E-05	80.7	0.00085	-4.058497



Gambar 2. Grafik Penentuan  $Q$

Gambar 3. Grafik Penentuan  $n$

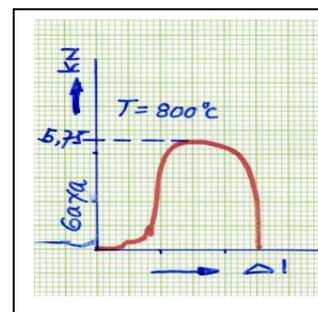
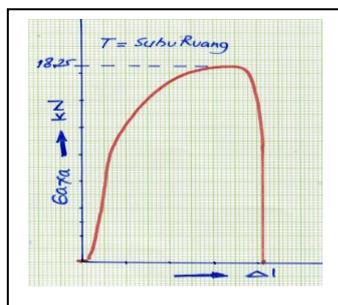
Dari hasil pengolahan data dan grafik diperoleh  $n = 6$  dan energi aktivasi  $Q = 213,36$  kJ/mol. Nilai  $n = 6$  tersebut menunjukkan bahwa pada material baja 15,83Cr-11,39Ni-1,7Mn-1,96Mo mekanisme deformasi dikendalikan oleh *power law dislocation*, hal ini dikarenakan terjadi loncatan-loncatan dislokasi pada daerah *power law creep*. Sedangkan besarnya  $Q = 313,36$  kJ/mol menunjukkan bahwa pergerakan dislokasi yang mengakibatkan creep berlangsung melalui *lattice self diffusion* dalam besi  $\gamma$ . Adapun nilai  $n$  dan  $Q$  untuk berbagai material dapat dilihat pada tabel 2 di bawah ini.

Tabel 2. Harga  $n$  dan  $Q$  untuk berbagai material

No.	Komposisi Kimia	Suhu °C	Koefisien di daerah Tegangan Rendah		Koefisien di daerah Tegangan Tinggi		Deskripsi
			n	Q kJ/mol	n	Q kJ/mol	
1	Baja 1,25 Cr-0,5Mo	510-620	4	400	10	625	Batas butir sliding pada tegangan rendah dan matriks terdeformasi pada tegangan tinggi
2	Baja 2,25Cr – 1Mo	565	2,5	-	12	-	Deformasi terjadi karena adanya deformasi matriks
3	Baja 1 Cr – 0,5Mo, HAZ	550 - 605	3	300	6	300	Mekanisme difusi pada tegangan rendah dan mekanisme dislokasi pada tegangan tinggi
4	Baja 1 Cr – 0,5Mo, Base Metal	550 - 605	5,6	-	5,6	-	-
5	Baja Cr-Mo-V	550 - 600	4,9	326	14,3	503	Loncatan dislokasi melalui partikel pada tegangan rendah dan bowing antara partikel pada tegangan tinggi
6	Baja 20Cr-2,5Ni-Nb	750	3-4,7	465-532	8-12	440-494	Adanya perubahan sliding batas butir menjadi deformasi matriks
7	Baja 20Cr-2,5Ni-Nb	750	2-5	250-390	-	-	Adanya deformasi matriks pada $n > 3$
8	Baja 20Cr-2,5Ni-Nb	700-750	6-8,4	678 pada $\sigma = 79\text{MPa}$	-	-	Adanya presipitat karbida NbC

### b. Sifat Mekanik (Kekuatan)

Hasil uji tarik pada suhu kamar menunjukkan bahwa kekuatan tarik maksimum untuk spesimen adalah  $\sigma_u = 646$  Mpa dengan elongation  $\epsilon = 42$  %, disini nampak bahwa material yang diuji memenuhi standar yang telah ditentukan. Berdasarkan standar JIS kekuatan tarik maksimum, batas minimumnya sebesar  $53 \text{ kg/mm}^2$  atau sama dengan  $520$  Mpa dan elongation minimum  $40$  %. Sedangkan kekuatan tarik maksimum yang dilakukan pada suhu tinggi atau  $800$  °C, menunjukkan hasil sebesar  $203,5$  Mpa dengan elongation sebesar  $38$  %.

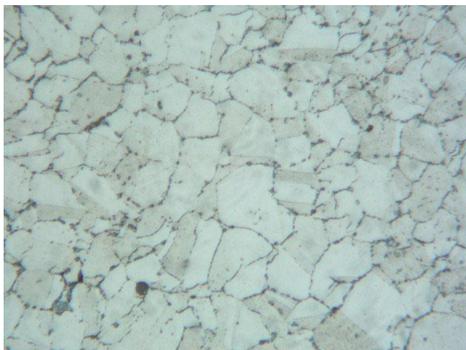


**Gambar 4. Hasil uji tarik pada suhu ruang (kiri) dan suhu tinggi (kanan)**

Disini nampak bahwa pengaruh suhu tinggi dapat menurunkan kekuatan tarik, akan tetapi penambahan panjang atau elongasi belum dapat dipastikan karena pada material tersebut terjadi perubahan struktur atau pergerakan atom yang dapat mereposisi letak dan susunan atom, sehingga dapat menyebabkan elongasinya naik atau turun dalam hitungan prosen. Jadi karakteristik mekanik material yang diuji saat ini sedikit lebih tinggi dibandingkan hasil pengujian yang pernah dilakukan, akan tetapi masih dalam batas yang diijinkan.

### **c. Struktur mikro dan makro**

Hasil analisis strukturmikro dapat dilihat pada gambar 5. Bentuk strukturmikronya menunjukkan struktur austenit dan adanya sejumlah kecil endapan delta ferrite ( $\delta$ -ferrite) yang berwarna kehitaman memanjang pada hasil potongan memanjang dan bintik hitam pada hasil potongan melintang. Terdapat pula bentuk strukturmikro austenit, akan tetapi model endapan delta ferrite semakin banyak tersebar pada batas butiran austenit, hal ini disebabkan karena pengaruh suhu tinggi yang berkepanjangan hingga akhirnya putus atau rusak. Khusus untuk material dasar baja 15,83Cr-11,39Ni-1,7Mn-1,96Mo strukturmikronya juga austenit dengan bentuk delta ferrite yang sangat jelas. Struktur makro menunjukkan nampak secara makro sebelum mengalami kerusakan atau patah terlebih dahulu benda uji mengalami perubahan penampang, juga permukaan patahannya menunjukkan adanya tanda-tanda geseran atau shear lips yang cenderung membentuk sudut 45 derajat. Hal ini berarti bahwa material baja 15,83Cr-11,39Ni-1,7Mn-1,96Mo cukup liat.



**Gambar 5. Bentuk strukturmikro spesimen setelah uji creep, nampak struktur austenit dan  $\delta$ -ferrite (hitam) etsa Kalling reagent. Perbesaran 1000X**



**Gambar 6. Bentuk permukaan patahan spesimen setelah uji creep, nampak bentuk *Shear lips* pada permukaan patahan. Perbesaran 25 X.**

## **5. Kesimpulan**

Dari hasil pengujian dan pembahasan yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa :

- Hasil uji tarik pada suhu kamar menunjukkan bahwa kekuatan tarik maksimum spesimen adalah  $\sigma_u = 646 \text{ Mpa}$  dengan elongation  $\epsilon = 42 \%$ , Sedangkan kekuatan tarik maksimum yang dilakukan pada suhu tinggi atau  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ , menunjukkan hasil sebesar  $203,5 \text{ Mpa}$  dengan elongation sebesar  $38 \%$ .
- Spesimen diuji pada suhu  $800 - 900 \text{ }^\circ\text{C}$  pada daerah tegangan  $53,8 - 134,5 \text{ MPa}$  memberikan hasil kurva creep yang signifikan sehingga material tersebut dapat dioperasikan pada suhu tinggi.
- Besar harga  $n$  yang didapat mendekati harga 6, sedangkan harga energi aktivasi sebesar  $213,36 \text{ kJ/mol}$ . Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme creep yang terjadi pada proses tersebut adalah mekanisme dislokasi pada tegangan tinggi.
- Strukturmikro spesimen berupa austenit yang diperkuat oleh endapan delta ferrite, hanya saja endapan ini akan bergeser kebatas butir mana kala mengalami pemanasan yang cukup tinggi dan lama, sehingga mengakibatkan elongasinya menurun pada suhu tinggi.

## 6. Saran

Agar dapat meningkatkan ketahanan creep yang lebih tinggi maka spesimen perlu ditambah unsur Ti karena dengan penambahan Ti akan menghasilkan peningkatan ketahanan creep yang disebabkan oleh terbentuknya karbida butir halus FeTiP dan Ti-rich pada perlakuan suhu tinggi.

## Daftar Pustaka

- (1) Bruce A. Pint, R.W. Swindeman, Karen L. More and Peter F. Tortorelli, 2003, "*Material selection for high temperature (750-1000°C) Metallic Recuperators for improved efficiency microturbines*", Oak Ridge National Laboratory Metals and Ceramics Division, Oak Ridge, Tennessee.
- (2) D. Josell, S.R. Cooriell, and G.B. McFaden, 1995, "*Evaluating the zero creep conditions for thin film and multilayer thin film specimens*", Acta metal. mater. Volume 43, No. 5.
- (3) Fujio Abe, 2003, "*Effect of Quenching, Tempering, and Cold Rolling on Creep Deformation Behavior of a Tempered Martensitic 9Cr-1W Steel*", Metallurgical and Materials Transactions, Volume 34A.
- (4) Kenji Kako, Eishi Kawakami, Joji Ohta, and Masami Mayumzumi, 2002, "*Effect of various alloying elements on Tensile properties of high-purity Fe-18Cr - (14-16) Ni alloys at room temperature*", Material transactions, Vol 43. Nomor. 2.
- (5) Nakazawa, T., Abo H., Tanino M., and Komatsu H., 1990, "*Relationship between phase stability and creep rupture ductility of type 304 and 316 stainless steel*", Proceeding, London.
- (6) Plumtree, A., Nilsson, JO, 1993, "*Creep behaviour of two austenitic stainless steel at 1000°C*" Proceeding, London.
- (7) P.J. Maziasz, R.W. Swinderman, J.P. Montague, M. Fitzpatrick, P.F. Browning, J.F. Grubb, and R.C. Klug, 1999, "*Improved creep-resistance of austenitic stainless steel for compact gas turbine recuperator*", Materials at High Temperature, Vol. 16.
- (8) S.M. Zhu and S.C. Tjong, 1998, "*Creep and rupture properties of an Austenitic Fe-30 Mn-9Al-1Z alloy*", Metallurgical and Materials Transaction, Vol. 29A.
- (9) Tekin, Erdogan, 1990, "*A microstructural study of an Fe35Ni25Cr1Nb superalloy in the temperature range 800 - 1100°C*", Proceeding, London.
- (10) T. Sourmail, H.K., D.H. Bhadeshia, and D.J.C. MacKay, 2002, "*Neural network model of creep strength of austenitic stainless steel*", Material Science and Technology, Vol. 18.
- (11) T. Sourmail, 2001, "*Precipitation in creep resistant austenitic stainless steel*", Material Science and Technology, Vol. 17.