

## **SIMULASI CREEP PADA MATERIAL SS304 UNTUK PREDIKSI LIFETIME**

Roziq Himawan dan Anni Rahmat

Badan Tenaga Nuklir Nasional, Kawasan Puspiptek Serpong Gd. 80, PTRKN-BATAN,  
Cisauk, Tangerang Selatan, 15310

### **ABSTRAK**

**SIMULASI CREEP PADA MATERIAL SS304 UNTUK PREDIKSI LIFETIME.** Fenomena creep merupakan salah satu fenomena penuaan pada material yang menerima pembebanan pada temperatur tinggi. Fenomena creep ini dapat ditemukan pada beberapa KSS (komponen, sistem dan struktur) PLTN, misalnya pada bejana tekan reaktor. Untuk tetap menjamin integritas KSS, selain harus dapat memprediksi umur pakai (lifetime) juga harus dapat memprediksi umur sisa creep. Dewasa ini, prediksi umur pakai suatu material yang mengalami fenomena creep dilakukan dengan suatu persamaan empiris yang disusun melalui serangkaian pengujian creep sedangkan untuk memprediksi umur sisa digunakan metode pengujian accelerated creep test dan metalografi (replika). Metode melalui serangkaian pengujian ini memiliki kelemahan yaitu selain memakan waktu yang sangat lama juga memerlukan biaya yang besar. Oleh karena itu, diperlukan suatu metode selain eksperimen yang berbasis simulasi berdasarkan finite element method (FEM). Dalam makalah ini, akan dibahas tentang simulasi creep pada material SS304 untuk memprediksi umur pakai. Simulasi dilakukan menggunakan paket program ANSYS. Dengan mempertimbangkan waktu pengujian yang hasilnya digunakan sebagai data pembanding, pertama-tama simulasi dilakukan pada temperatur konstan sebesar 600 °C dengan pemberian tegangan 250 MPa dan 265MPa. Setelah itu, simulasi dilakukan pada temperatur dan beban yang bervariasi. Kriteria umur pakai dalam pengujian adalah patahnya spesimen selama pengujian dilakukan, sedangkan dalam simulasi umur pakai ditentukan jika besarnya tegangan von-mises pada material melampaui besarnya tegangan luluh ( $\sigma_{ys}$ ) material. Dari hasil simulasi diketahui bahwa untuk beban 250 MPa dan 265MPa, masing-masing memberikan umur pakai yang besarnya mendekati hasil pengujian creep. Dalam simulasi dengan memvariasikan temperatur dan beban diketahui bahwa semakin tinggi beban dan temperatur akan memperpendek umur creep. Dalam simulasi ini disimpulkan bahwa hasil simulasi dapat digunakan untuk memprediksi umur pakai creep yang diperlukan dalam tahap desain.

*Katakunci: Creep lifetime, simulasi, ss304, metode elemen hingga*

### **ABSTRACT**

**CREEP SIMULATION ON SS304 MATERIAL FOR LIFETIME PREDICTION.** Creep phenomenon is one of material ageing phenomena when material subjected to load in high temperatur. This phenomenon can be found in SSC (structure, system and component) of NPP, such as reactor pressure vessel. To assure the integrity of SSC, residual lifetime should be predicted besides prediction of lifetime itself. Recently, service lifetime predictions of material which experienced creep are being performed using empirical equation obtained from a set of creep testing. In the other hand, residual life assessments are being performed using some methods such as accelerated creep test and metalography (replica). A method using a set of testing encloses a weakness of time and finance consuming. Thus, simulation base method is needed. In this paper, creep simulation on SS304 material to predict service lifetime will be discussed. Simulations were performed by ANSYS. In consideration of creep testing time, that creep tests were needed to validate simulation results, first, simulations were performed under 600 °C circumference and 250 MPa and 265MPa stresses. After that, simulations were performed with variation of temperature and stress. In creep testing, a material reaches service lifetimewhen specimen rupture, whilst in simulation, when von-mises occur on material is larger than yield stress ( $\sigma_{ys}$ ). From simulation results, it was known that, for 250 MPa and 265MPa of stress gave a service lifetime which closed to testing result. In simulation with variation of temperature and stress showed that creep lifetime decreased as increasing both of stress and temperature. It is concluded that simulation method can be used to predict creep lifetime.

*Keywords: Creep lifetime, simulation, ss304, finite element method.*

## 1. PENDAHULUAN

Fenomena creep merupakan salah satu jenis pemicu degradasi material dalam material penyusun KSS (komponen, sistem dan struktur) instalasi PLTN. Oleh karena itu, dalam rangka menjamin integritas KSS, disamping perlunya dilakukan kajian umur sisa (*remaining life assessment*, RLA) selama masa operasi instalasi, perlu dilakukan juga kajian prediksi umur pakai (*service lifetime*) sebagai dasar pelaksanaan desain.

Dewasa ini pelaksanaan prediksi umur pakai umumnya dilakukan dengan persamaan-persamaan empiris hasil dari serangkaian pelaksanaan uji *creep*[1]. Karena pengujian *creep* memerlukan variasi beban dan temperatur yang banyak dan setiap pengujiannya memakan waktu yang panjang, maka metode ini memerlukan banyak waktu dan biaya. Sementara itu, untuk pelaksanaan kajian umur sisa umumnya dilakukan dengan *accelerated creep rupture test* ataupun beberapa metode tak-rusak[2-6].

Karena kelemahan metode melalui pengujian ini, maka untuk melakukan desain diperlukan suatu metode yang dengan dapat dengan mudah melakukan perubahan parameter. Hal ini dapat dilakukan dengan metode melakukan simulasi.

Dalam penelitian ini akan dilakukan simulasi *creep* pada material baja nir karat SS304 untuk memprediksi umur pakai suatu material. Simulasi dilakukan berdasarkan metode elemen hingga yang menggunakan paket program komputer ANSYS. Untuk memvalidasi hasil simulasi dilakukan beberapa pengujian *creep rupture*. Untuk mengetahui variasi umur *creep*, simulasi dilakukan dengan memvariasikan besarnya temperatur dan tegangan.

## 2. TEORI

*Creep* adalah salah satu fenomena mekanik dimana suatu material menerima beban tetap pada temperatur tinggi yang akan mengakibatkan deformasi dalam waktu panjang. Secara struktur mikro terdapat 3 mekanisme yang dominan selama terjadinya proses *creep* [7,8]. Pada tegangan tinggi (perbandingan antara tegangan normal dan *shear modulus ratio* lebih dari 0,01) ditandai oleh pergerakan dislokasi (termasuk gerakan dislokasi akibat aktivasi panas di sepanjang *slip planes* dan melampaui pembatas. Pada tegangan menengah (perbandingan antara tegangan normal dan *shear modulus ratio* antara 0,01 dan 0,0001), terjadi *creep* dislokasi (termasuk gerakan dislokasi yang melampaui pembatas akibat beberapa mekanisme yang dipicu secara termal seperti difusi vakansi atau atau *interstitials*). Pada tegangan rendah

(perbandingan antara tegangan normal dan *shear modulus ratio* kurang dari 0,0001), terjadi difusi *creep* (termasuk aliran vakansi dan *interstitials* di dalam material di bawah pengaruh tegangan yang bekerja). Dari ketiga mekanisme ini, yang paling penting dalam mekanika struktur adalah terjadinya *creep* dislokasi [7]. Untuk temperatur di bawah 25% temperatur leleh, *primary creep* merupakan mode deformasi yang dominan[9]. Untuk temperatur di atas ini maka *secondary creep* akan sangat jelas terlihat pada material logam[10]. Sedangkan *tertiary creep* merupakan deformasi yang tidak stabil yang disertai patahnya spesimen akibat perpanjangan yang tidak terbatas (*ductile rupture*) atau akibat terbentuknya kavitas internal (*brittle rupture*) [11].

Pada dasarnya, simulasi bertitik tolak dari suatu model persamaan yang menggambarkan karakteristik *creep* yang berasal dari hasil pengujian. Dalam makalah ini simulasi dilakukan berdasarkan model yang dengan persamaan-persamaan berikut ini[12].

Persamaan aliran Holloman[9] menyatakan bahwa *flow stress* merupakan fungsi dari regangan dan laju regangan, yang dinyatakan dengan persamaan di bawah ini.

$$\sigma = k\varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m \quad (1)$$

dengan  $k$  adalah koefisien kekuatan,  $\varepsilon$  adalah regangan,  $n$  adalah indek *work hardening* yang setara dengan *true strain* pada *ultimate tensile stress* dan  $m$  adalah sensitivitas laju regangan. Sementara itu, hukum Bailey-Norton menyatakan[13],

$$\varepsilon^c = A\sigma^p t^q \quad (2)$$

dimana  $A$ ,  $p$  dan  $q$  masing-masing adalah konstanta yang merupakan fungsi dari temperatur. Nilai  $p$  adalah lebih besar dari 1 sedangkan  $q$  biasanya bilangan pecahan. Hukum di atas berlaku untuk *creep* primer dan sekunder. Jika Pers.(2) diturunkan, maka diperoleh persamaan berikut ini.

$$\dot{\varepsilon}^c = \frac{\partial \varepsilon^c}{\partial t} = qA\sigma^p t^{q-1} \quad (3)$$

Persamaan di atas selanjutnya disebut persamaan *time hardening*. Jika Pers.(2) dipecahkan untuk,

$$t = \left( \frac{\varepsilon^c}{A\sigma^p} \right)^{1/q} \quad (4)$$

Dengan mensubstitusikan Pers.(4) ke Pers.(3) akan diperoleh

$$\dot{\epsilon}^c = qA^{1/q} \sigma^{p/q} (\epsilon)^{(q-1/q)} \quad (5)$$

Persamaan *time hardening* inilah yang digunakan dalam pelaksanaan simulasi dengan ANSYS.

### 3. TATA KERJA

Dalam penelitian ini spesimen dibuat dari material AISI SUS 304 dimana sifat mekanik dan komposisi kimianya masing-masing diperlihatkan pada Tabel 1 dan Tabel 2, sedangkan bentuk spesimen diperlihatkan pada Gambar 1.

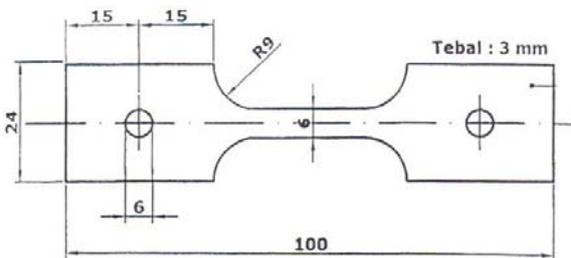
Untuk memvalidasi hasil simulasi, pertamanya dilakukan simulasi dan pengujian *creep*[17] dengan temperatur pengujian 600°C dan tegangan 250 dan 265MPa. Kemudian hasil keduanya dibandingkan. Setelah itu, simulasi dilakukan dengan memvariasikan temperatur dan tegangan. Untuk temperatur digunakan nilai 200, 300, 400, 500 dan 600°C, sedangkan tegangan besarnya masing-masing 0,3 $\sigma_{YS}$ ; 0,5 ; 0,7  $\sigma_{YS}$  dan 0,9  $\sigma_{YS}$ .

**Tabel 1. Sifat mekanik AISI SUS 304 [14,15]**

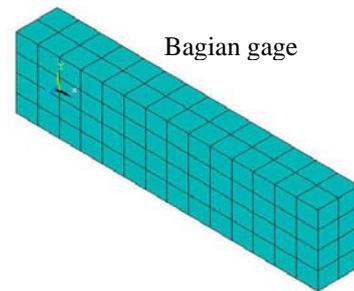
| $\sigma_{UTS}$ (MPa) | $\sigma_{YS}$ (MPa) | Elongation |
|----------------------|---------------------|------------|
| 586                  | 241                 | 55         |

**Tabel 2 Komposisi kimia AISI SUS 304 (wt %)[16]**

| Fe   | Cr   | Ni   | Mn   | Cu   | Si   | Lain |
|------|------|------|------|------|------|------|
| 70,7 | 18,1 | 8,29 | 1,53 | 0,43 | 0,40 | 0,55 |



**Gambar 1. Bentuk spesimen uji creep.**



**Gambar 2. Model spesimen dan meshing yang digunakan dalam simulasi**

Simulasi dilakukan berdasarkan metode elemen hingga menggunakan paket program ANSYS dimana material diasumsikan homogen isotropik. Model yang digunakan dalam simulasi diperlihatkan pada Gambar 2.

### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada Tabel 1 diperlihatkan hasil pengujian *creep rupture test* pada temperatur 600°C dan hasil simulasi untuk kondisi pengujian yang sama. Pada pengujian dengan tegangan sebesar 250 MPa, hasil pengujian dan hasil simulasi masing-masing sebesar 208 dan 224 jam, sedangkan pada pengujian dengan tegangan sebesar 265 MPa hasil pengujian dan hasil simulasi masing-masing sebesar 92 dan 108 jam. Jika melihat kedua kondisi pengujian ini, maka diketahui bahwa antara hasil pengujian dan hasil simulasi memberikan perbedaan sekitar 10%. Perbedaan hasil yang nilainya sekitar 10% ini masih wajar dan dapat diterima, karena dalam simulasi kondisi/karakter material diasumsikan homogen dan tidak memiliki cacat suatu apapun. Pada pengujian yang menggunakan material sebenarnya, meskipun menggunakan material yang sama, pada umumnya pengujian memberikan hasil yang berlainan. Hal ini disebabkan oleh berbagai jenis cacat (*defect*) material, yang umumnya berupa cacat struktur mikro.

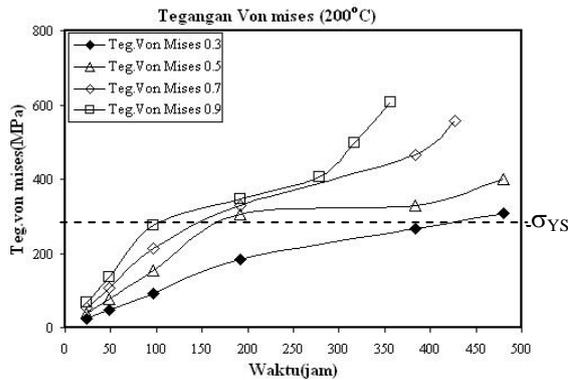
Berdasarkan perbandingan hasil simulasi dan pengujian ini, maka dapat dinyatakan bahwa prosedur simulasi yang digunakan dapat diterapkan untuk memprediksi umur pakai material.

Pada Gambar 3 (a-d) diperlihatkan hasil simulasi untuk temperatur masing-masing 200, 300, 400, dan 500°C. Pada gambar diperlihatkan perubahan besarnya tegangan Von mises seiring dengan bertambahnya waktu pengujian. Tegangan

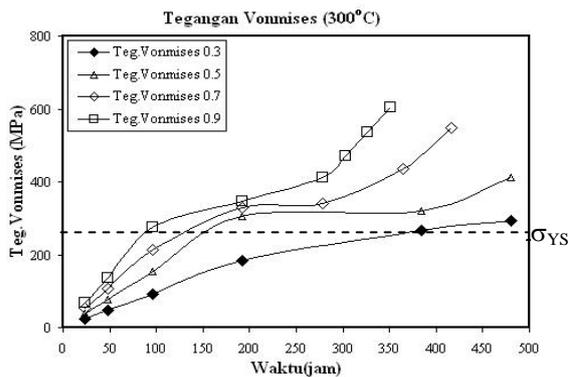
Von-mises adalah tegangan utama yang bekerja pada material jika material menerima beban. Dalam setiap gambar terdapat 4 kurva, dimana masing-masing kurva menunjukkan besarnya tegangan Von-mises untuk menyimulasikan tegangan pengujian yang besarnya 0,3; 0,5; 0,7; dan  $0,9\sigma_{YS}$ . Garis mendatar putus-putus menunjukkan nilai besarnya  $\sigma_{YS}$  pada masing-masing temperatur pengujian. Karena besarnya  $\sigma_{YS}$  merupakan fungsi dari temperatur, di mana semakin tinggi temperatur  $\sigma_{YS}$  semakin kecil maka garis mendatar putus-putus

**Tabel 1 Hasil simulasi dan pengujian creep pada temperatur 600°C**

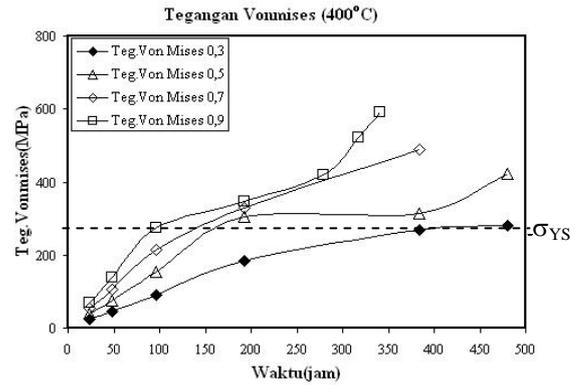
| Tegangan | Simulasi | Pengujian |
|----------|----------|-----------|
| 250 MPa  | 224 jam  | 208 jam   |
| 265 MPa  | 108 jam  | 92 jam    |



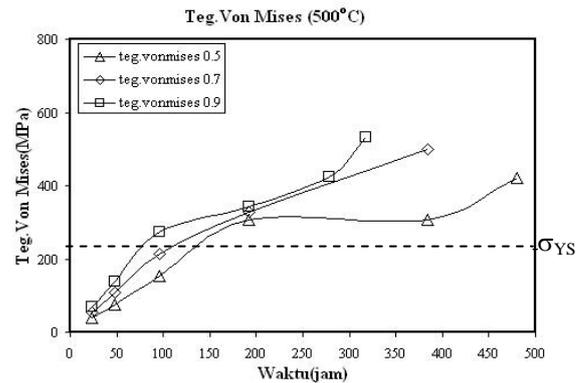
(a) Simulasi pada temperatur 200°C



(b) Simulasi pada temperatur 300°C



(c) Simulasi pada temperatur 400°C



(d) Simulasi pada temperatur 500°C

**Gambar 3 Hasil simulasi dengan variasi besar tegangan dan temperatur**

untuk masing-masing gambar posisinya berbeda-beda, dimana semakin tinggi temperatur pengujian garis  $\sigma_{YS}$  posisinya semakin ke bawah. Sebagaimana telah diuraikan pada bagian sebelumnya, bahwa dalam pelaksanaan simulasi, suatu material dinyatakan telah patah (*rupture*) jika nilai tegangan mencapai nilai  $\sigma_{YS}$ -nya. Oleh karena itu, dalam masing-masing gambar ini, jika kurva memotong garis mendatar putus-putus ini, maka pada titik potong tersebut material mengalami patah. Jika kurva tidak memotong, berarti material belum mengalami patah.

Dari keempat gambar ini dapat diketahui bahwa, di dalam temperatur pengujian yang sama, semakin besar tegangan yang bekerja pada material umur pakai material (waktu patah) semakin pendek. Pada kondisi pembebanan yang sama, semakin tinggi temperatur pengujian akan mengakibatkan umur pakai material juga semakin pendek. Dengan memperhatikan pengaruh temperatur dan pembebanan dalam simulasi uji *creep* ini, maka simulasi dapat dipergunakan sebagai metode untuk mendesain umur pakai suatu material.

## 5. KESIMPULAN

Telah dilakukan simulasi *creep* pada material SS304 untuk memprediksi umur pakai dengan berbagai variasi temperatur dan tegangan pengujian. Dengan membandingkan hasil pengujian dan hasil simulasi diketahui bahwa hasil simulasi berbeda sekitar 10% dari hasil pengujian. Dari hasil-hasil simulasi diketahui bahwa umur pakai material akan berkurang seiring dengan peningkatan temperatur lingkungan dan peningkatan beban yang bekerja pada material. Dari hasil-hasil simulasi dapat disimpulkan bahwa simulasi dapat digunakan untuk mendesain umur pakai material.

## 6. DAFTAR PUSTAKA

1. Woo Gon Kim, et al., "Creep Life Prediction of Type 316LN Stainless Steel by Minimum Commitment Method", Key Engineering Materials, Vol. 326-328 (2006), pp. 1313-1316.
2. H. UMAKI et.al., Remaining Life Diagnosis Techniques of Aging Power Plant Equipment, Ishikawajima Harima Technical Report, 29(3), pp.162-169, (1989).
3. B.J. CANE and JOHN W., "Remanent Life Assessment Seminar", ERA Technology Leatherhead-UK 22/23, September (1992).
4. B.J. CANE and M.SHAMAS, "A Method for Remaining Life Estimation by Quantitative Assessment of Creep Cavitation on Plant", Report TPRD/L2645/N84, CEGB, U.K., (1984).
5. Y. SAKAGUCHI et.al., "Development of Non-destructive Life Diagnosis Technology of Boiler Material", Fossil and Nuclear Power Plant, Vol.39 (6), pp.653-664, (1988).
6. M.G. SILK, et.al., Ultrasonic Time Domain Measurements of the Depth of Crack Like defects in Ferritic an Austenitic Steels, Ultrasonic Inspection of Reactor Components, Specialists' Meeting. Paris, France, OECD Nuclear Energy Agency, SNI 9/16, September 27-29,(1976).
7. Boyle JT, Spence J. Stress analysis for creep. London: Butterworths;1983.
8. Dieter GE. Mechanical metallurgy. Singapore: McGraw Hill;1986.
9. Neeraj T, Hou D-H, Daehn GS, Mills M. Phenomenological and microstructural analysis of room temperature creep in titanium alloys. Acta Mater 2000;48:1225-38.
10. Wang XN, Wang XC. Finite element analysis of creep damage. Comput Struct 1996;60(5):781-6.
11. Sasikala G, Ray SK, Mannan SL. Evolution of damage in tertiary creep of type 316 (N) SS weld. Acta Mater 2004;52:5677-86.
12. R. Rajendran, et al., Creep life prediction of a high strength steel plate, Materials and Design 29 (2008) 427-435.
13. Harry K. Creep analysis. New York: John Wiley & Sons; 1980. p.20.
14. INCROPERA, F.P., and DEWITT, D.P., "Fundamentals of Heat Transfer", Jhon Wiley & Sons, Canada, pp. 157, 1981.
15. GENSURE, J.G. and POTTS, D.L., "International Metallic Materials Cross-Reference", Genium Publishing Corporation, New York, 1991.
16. Anonim, "Laporan Analisis Komposisi Kimia AISI SUS 304", LIPI, 2004.
17. Meyer Creep Machine Test User's Manual.

**TANYA JAWAB**