

## MONITORING PROSES *CREEP* SECARA TAK RUSAK DENGAN METODE ULTRASONIK

Roziq Himawan\* dan Farokhi\*\*

\* Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir – BATAN, Serpong

\*\* Rumah Sakit Umum Pusat DR. KARIADI, Semarang

(Diterima 30 Juni 2008, disetujui 3 Nopember 2008)

### ABSTRAK

**MONITORING PROSES *CREEP* SECARA TAK RUSAK DENGAN METODE ULTRASONIK.** Banyak komponen PLTN yang mengalami degradasi material diakibatkan oleh fenomena *creep* karena beroperasi pada lingkungan temperatur dan tegangan tinggi. Untuk mencegah terjadinya kegagalan selama PLTN beroperasi, dilakukan penelitian monitoring proses *creep* secara tak merusak dengan metode ultrasonik. Pengujian ultrasonik dilakukan terhadap material yang telah mengalami uji *creep* dengan berbagai variasi waktu pengujian. Hasil pengujian menunjukkan bahwa semakin lama pengujian *creep* berlangsung, cepat rambat gelombang ultrasonik mengalami penurunan, sedangkan atenuasi mengalami kenaikan, yang disebabkan cacat di dalam spesimen yang berupa *void* yang berkembang menjadi retak mikro dan retak makro. Keberadaan cacat ini akan mengganggu perambatan gelombang sehingga yang mengakibatkan penurunan cepat rambat. Selain itu, cacat di dalam spesimen akan menghamburkan gelombang ultrasonik sehingga memperbesar atenuasi.

KATA KUNCI: Degradasi material, Monitoring tak rusak, Metode ultrasonik

### ABSTRACT

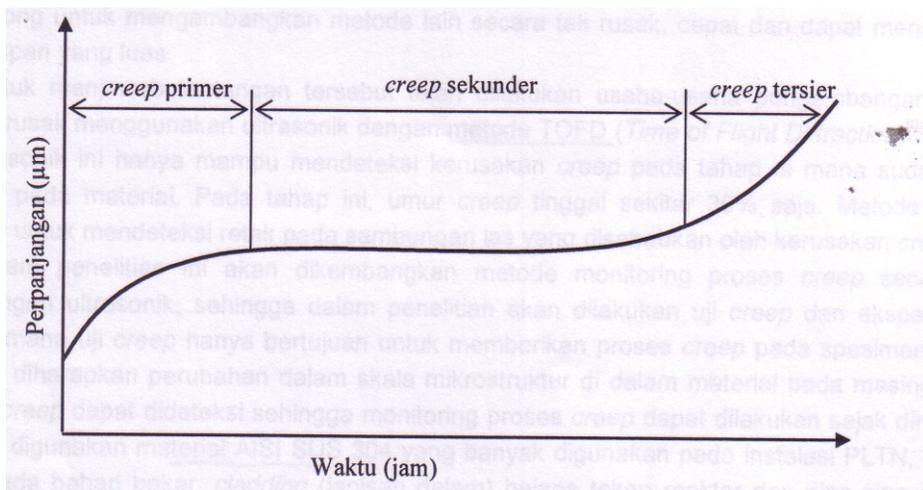
**NON-DESTRUCTIVE MONITORING OF CREEP PROCESS USING ULTRASONIC METHOD.** Material degradation due to creep phenomenon often occurs in many NPP's components in high temperature and stress environment. To prevent failures during NPP operation, study of non-destructive monitoring of creep process using ultrasonic method was conducted. Ultrasonic tests were performed on material following creep test under various elapsed time. Testing results show that the propagation velocity of ultrasonic wave decreased and attenuation increased with increasing time of creep test, which were caused by defects that occurred in the specimen in the form of voids which turned into microcracks and macrocracks. The presence of these defects disturbed wave propagation, thus resulting in the decrease of propagation velocity. In addition, defects in the specimen also would scatter the ultrasonic wave which resulted in the increase of attenuation.

FREE TERMS: Material degradation, Non-destructive monitoring, Ultrasonic method

## I. PENDAHULUAN

*Creep* merupakan salah satu fenomena penuaan yang terjadi pada material yang menerima beban tinggi pada temperatur tinggi. Pada instalasi PLTN, fenomena *creep* dapat terjadi, misalnya pada material zirkaloi yang merupakan *cladding* elemen bahan bakar dan material baja nir karat yang digunakan sebagai *cladding* di *gas cooled reactor*. Semakin bertambahnya jumlah jam operasi suatu instalasi, memberikan konsekuensi semakin meningkatnya penuaan yang mengakibatkan kerusakan material (*material damage*) dan selanjutnya menurunkan tingkat keandalan dan keselamatan. Dalam rangka mencegah kegagalan operasi yang disebabkan oleh kerusakan *creep*, telah banyak dilakukan penelitian

untuk mengetahui mekanisme kerusakan material akibat *creep*<sup>[1]</sup>. Kerusakan akibat *creep* secara umum terjadi melalui mekanisme terjadinya deformasi, terbentuknya *creep void*, yang selanjutnya tumbuh menjadi retak di dalam butir ataupun retak batas butir<sup>[2]</sup>. Seperti diperlihatkan pada Gambar 1, secara umum proses *creep* dibagi menjadi tiga fase yaitu, *creep* primer, sekunder (*steady state*) dan tersier. Namun demikian, tergantung pada beban, temperatur dan karakteristik material, ketiga fase tersebut tidak selalu nampak pada proses *creep*. Pada tiap fase, terjadi perubahan internal material yang spesifik. Pada fase primer ditandai dengan laju regangan yang besar dan akan mengalami penurunan. Fase sekunder memiliki laju regangan minimum sehingga seakan-akan tidak terjadi regangan. Sedangkan pada fase tersier, laju regangan akan semakin bertambah yang akhirnya akan mengakibatkan spesimen patah.



Gambar 1. Kurva perubahan perpanjangan selama proses *creep*

Dengan mengetahui mekanisme kerusakan *creep* (adanya perubahan-perubahan di dalam material), maka kegagalan operasi atau kecelakaan instalasi dapat dicegah melalui pemantauan kondisi kerusakan secara berkala.

Pemantauan kondisi kerusakan material akibat *creep* dilakukan menggunakan berbagai metode yang bertujuan mengevaluasi umur komponen<sup>[3]</sup>. Secara umum metode-metode tersebut dapat dikelompokkan menjadi 4, yaitu:

1. Metode probabilistik dengan menggunakan data di masa lalu
2. Analisis secara teori berdasarkan data operasi seperti suhu dan tegangan kerja
3. Uji secara merusak menggunakan spesimen terbuat dari material komponen terkait
4. Deteksi kerusakan atau deteksi cacat secara tak merusak

Dari keempat metode tersebut, terdapat dua metode yang banyak digunakan untuk evaluasi sisa umur *creep*, yaitu metode replika (metalografi) yang tergolong dalam metode 4 dan metode uji *creep* dipercepat yang tergolong dalam metode 3. Metode uji *creep* dipercepat dilakukan dengan memotong sebagian material komponen yang ingin dievaluasi kemudian dilakukan uji *creep* rupture. Banyak metode yang digunakan untuk menentukan sisa umur, di

antaranya adalah menggunakan metode diagram Larson-Miller. Metode ini merupakan uji secara merusak dimana dari sisi waktu serta biaya tidak ekonomis.

Metode replika (metalografi) dilakukan dengan cara mengambil replika mikrostruktur permukaan material yang ingin dievaluasi yang dilakukan secara berkala untuk mengamati perubahan mikrostruktur material. Telah banyak dilakukan penelitian terkait dengan metode replika untuk menentukan sisa umur *creep* yang menghasilkan metode penentuan umur yang akurat<sup>[4]</sup>. Misalnya, untuk menentukan sisa umur, dilakukan dengan membandingkan mikrostruktur referensi<sup>[5]</sup>. Secara lebih spesifik lagi, untuk melakukan kuantifikasi mikrostruktur, dilakukan dengan mengamati *void* yang terjadi, misalnya metode parameter  $A$ <sup>[6]</sup> dan metode fraksi luasan *void*<sup>[7]</sup>. Meskipun metode replika merupakan metode yang akurat untuk menentukan sisa umur material, namun metode replika ini hanya menguji di permukaan material saja, sementara kerusakan akibat *creep* tidak terbatas terjadi di permukaan material, tetapi juga terjadi di dalam material. Selain itu, karena pelaksanaan uji replika memerlukan waktu yang lama, maka pengambilan replika hanya memungkinkan dilakukan pada tempat-tempat tertentu saja yang dianggap mewakili kondisi secara menyeluruh. Karena kelemahan ini, maka terdorong untuk mengembangkan metode lain secara tak rusak, cepat dan dapat mengevaluasi dengan cakupan yang luas.

Untuk menjawab tantangan tersebut telah dilakukan usaha-usaha pengembangan metode evaluasi tak rusak menggunakan ultrasonik dengan metode TOFD (*Time of Flight Diffraction*)<sup>[8]</sup>. Namun, metode ultrasonik ini hanya mampu mendeteksi kerusakan *creep* pada tahap di mana sudah terjadi retak makro pada material. Pada tahap ini, umur *creep* tinggal sekitar 30% saja. Metode ini telah diaplikasikan untuk mendeteksi retak pada sambungan las yang disebabkan oleh kerusakan *creep*.

Dalam penelitian ini akan dikembangkan metode monitoring proses *creep* secara tidak merusak dengan ultrasonik, sehingga dalam penelitian akan dilakukan uji *creep* dan eksperimen uji ultrasonik, dimana uji *creep* hanya bertujuan untuk memberikan proses *creep* pada spesimen. Melalui uji ultrasonik diharapkan perubahan dalam skala mikrostruktur di dalam material pada masing-masing fase proses *creep* dapat dideteksi sehingga monitoring proses *creep* dapat dilakukan sejak dini. Dalam penelitian ini digunakan material AISI SUS 304 yang banyak digunakan pada instalasi PLTN, misalnya untuk *grid* pada bahan bakar, *cladding* (lapisan dalam) bejana tekan reaktor dan pipa-pipa di sistem pendingin primer.

## II. TEORI

Gelombang ultrasonik merupakan salah satu gelombang elastis, sehingga memiliki sifat-sifat yang sama dengan gelombang suara misalnya pada perbatasan antara dua media yang berbeda maka gelombang akan mengalami pemantulan dan pembiasan.

Ketika gelombang ultrasonik merambat di dalam suatu media, maka sifat-sifat material sangat berpengaruh pada cepat rambat gelombang maupun besarnya energi yang akan diteruskan. Dengan menggunakan kedua sifat ini, maka dalam penelitian ini digunakan dua parameter untuk menganalisis hubungan antara derajat kerusakan yang menyertai proses *creep* dan gelombang ultrasonik. Kedua parameter tersebut adalah cepat rambat dan atenuasi.

Cepat rambat gelombang ultrasonik  $v$  dalam spesimen dihitung dengan persamaan di bawah ini:

$$v = \frac{2x}{\Delta t} \quad (1)$$

dimana  $x$  adalah tebal spesimen dalam meter dan  $\Delta t$  adalah selisih waktu antara pantulan gelombang ultrasonik dari *backwall* yang ke- $n$  dan ke- $(n-1)$  dalam detik, yang ditunjukkan pada sumbu datar osiloskop. Untuk memperoleh data yang akurat, pengukuran cepat rambat gelombang digunakan gelombang pantul dari *backwall* kedua dan ketiga.

Sedangkan atenuasi dihitung berdasarkan persamaan<sup>[13]</sup>:

$$A_n = A_{n-1} e^{-\mu x} \quad (2)$$

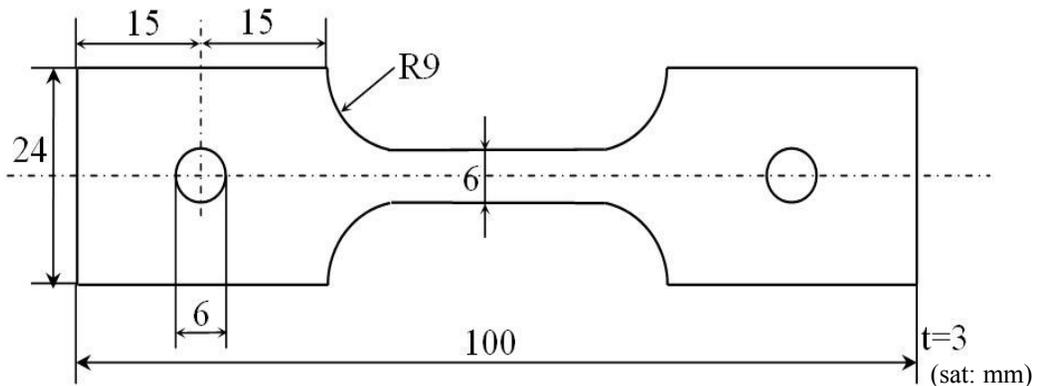
dimana  $\mu$  = atenuasi [dB/m]  
 $A_{n-1}$  = amplitudo *back echo* ke- $(n-1)$  [V]  
 $A_n$  = amplitudo *back echo* ke- $n$  [V]  
 $x$  = tebal spesimen [m]

### III. TATA KERJA

Penelitian dengan melakukan uji *creep* dan uji ultrasonik, selanjutnya hasil kedua pengujian tersebut dibandingkan untuk mengetahui korelasinya.

#### 3.1. Bahan

Spesimen yang dipakai terbuat dari material AISI SUS 304. Sifat-sifat mekanik dan komposisi kimia material diperlihatkan pada Tabel 1 dan 2, sedangkan bentuk dan ukuran spesimen diperlihatkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Bentuk dan dimensi spesimen<sup>[12]</sup>

Tabel 1. Sifat mekanik AISI SUS 304<sup>[9,10]</sup>

$\sigma_{UTS}$ (MPa)	$\sigma_{YS}$ (MPa)	Elongation (%) □□□
586	241	55

Tabel 2. Komposisi kimia AISI SUS 304 (% berat)<sup>[11]</sup>

Fe	Cr	Ni	Mn	Cu	Si	Unsur lain
70,7	18,1	8,29	1,53	0,43	0,40	0,55

## 3.2. Cara Kerja

### 3.2.1. Pengujian *creep*

Fenomena *creep* dapat terjadi pada berbagai suhu, namun *creep* yang ideal terjadi pada suhu antara 0,4 sampai 0,6 dari titik lebur material<sup>[12]</sup>. Berdasarkan hal tersebut, pada penelitian ini pengujian *creep* dilakukan pada suhu 600 °C (Titik lebur AISI SUS304 adalah 1397 °C) dan dengan beban 412,92 N. Untuk mengetahui umur *creep* ( $N_f$ ) pada kondisi pengujian ini, pertama-tama dilakukan pengujian *creep fracture* (pengujian *creep* yang dilakukan sampai material mengalami putus). Selanjutnya, untuk mewakili pengujian di masing-masing fase proses *creep*, pengujian *creep* dihentikan dalam rentang fase primer, sekunder dan tersier. Setelah dilakukan uji *creep*, dilakukan uji ultrasonik terhadap masing-masing spesimen.

### 3.2.2. Pengujian ultrasonik

Pengujian ultrasonik dilakukan dengan metode *Water Immersion*, yaitu metode pengujian ultrasonik yang menggunakan kuplan (*couplant*) air. Karena dalam metode ini *transducer* tidak menempel pada objek pengujian (non-kontak) maka pengaruh penekanan *transducer* pada metode kontak bisa dieliminasi. Selain itu, dengan penggunaan *transducer focus*, maka energi ultrasonik yang masuk ke dalam material lebih efisien. Skema pengujian diperlihatkan dalam Gambar 3. *Transducer* yang digunakan adalah *transducer* fokus dengan jarak fokus 1 inci (sekitar 25,4mm) dan frekuensi tengah sebesar 10 MHz.

Seperti diperlihatkan pada Gambar 3, gelombang ultrasonik dibangkitkan oleh *ultrasonic pulser-receiver* (rangkain *pulser generator*) yang selanjutnya diteruskan ke spesimen oleh *transducer*. Gelombang pantul permukaan bawah spesimen (*backwall*) akan diterima oleh *transducer* yang sama dan diteruskan ke unit *ultrasonic pulser-receiver* (rangkain *signal receiver*). Selanjutnya sinyal gelombang ultrasonik yang diterima ditampilkan pada osiloskop. Sinyal gelombang ultrasonik diubah ke bentuk digital dan di-*download* ke komputer untuk dilakukan analisis. Untuk melakukan evaluasi hasil pengujian ultrasonik, digunakan dua parameter, yaitu cepat rambat gelombang ultrasonik pada material dan atenuasi yang didefinisikan pada bagian teori.

## IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

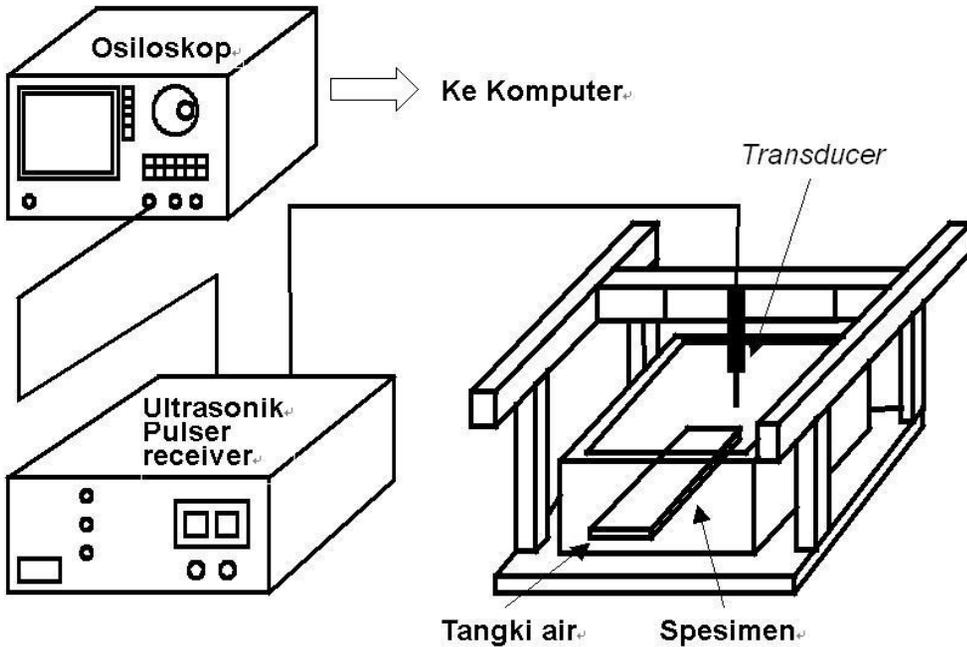
### 4.1. Uji *Creep*

Dari uji *creep fracture* (uji *creep* dimana spesimen sampai patah) dengan kondisi seperti disebutkan di atas (temperatur 600 °C dan beban 412,92 N) yang bertujuan untuk mengetahui umur *creep*,  $T_f$ , diketahui bahwa pada kondisi pengujian tersebut umur *creep*,  $T_f$ , adalah 60 hari (1440 jam). Dari hasil tersebut, untuk memodelkan pelaksanaan monitoring *creep* yang merepresentasikan ketiga proses *creep*, maka pengujian *creep* selanjutnya diberhentikan (*interrupted creep test*) pada waktu pengujian masing-masing mencapai 5 hari ( $N=0,08T_f$ ), 20 hari ( $N=0,3T_f$ ), 50 hari ( $N=0,83T_f$ ) dan 58 hari ( $N=0,97T_f$ ). Setelah itu dilakukan uji ultrasonik dengan metode seperti yang telah diuraikan sebelumnya.

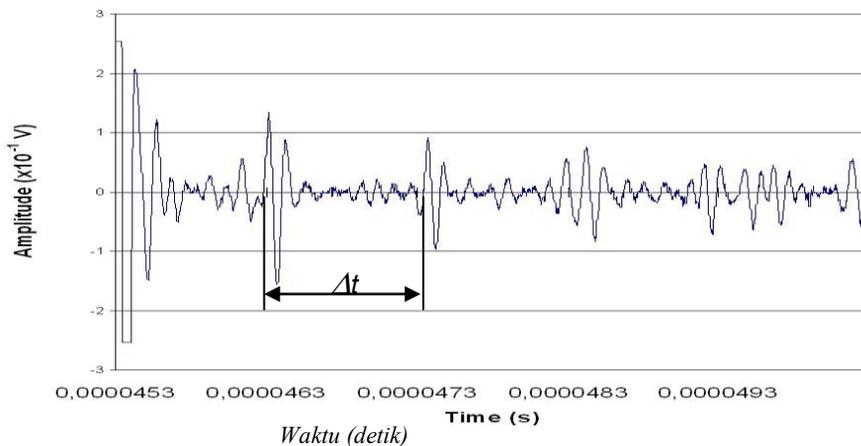
### 4.2. Uji Ultrasonik

Selain dilakukan pengujian pada spesimen yang telah mengalami uji *creep*, uji ultrasonik juga dilakukan pada material segar (*as received*), yaitu spesimen yang tidak mengalami uji *creep* ( $T=0T_f$ ). Pada Gambar 4 dan 5, masing-masing diperlihatkan sinyal gelombang ultrasonik dari

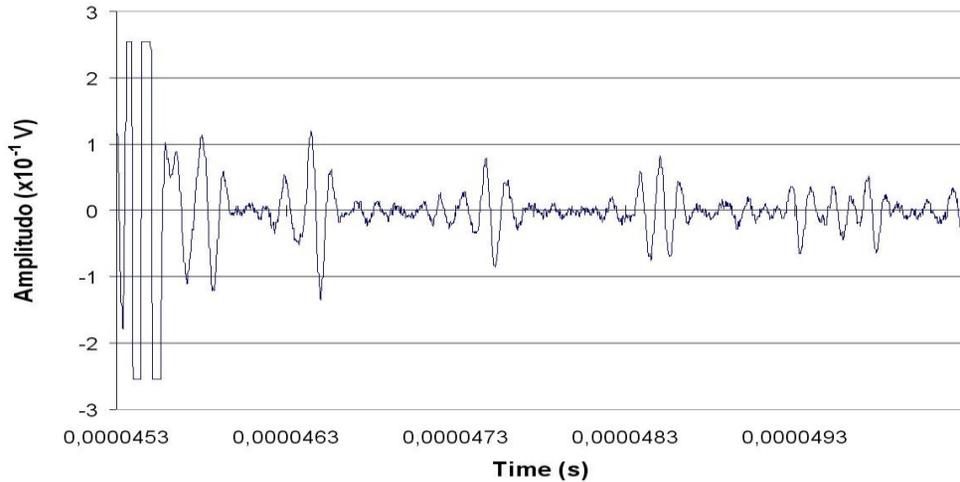
pengujian terhadap spesimen pada  $T=0T_f$  dan  $T=0,97T_f$ . Sumbu tegak adalah amplitudo gelombang dan sumbu mendatar adalah waktu. Sinyal gelombang pertama merupakan



Gambar 3. Skema alat pengujian ultrasonik metode *Water Immersion*



Gambar 4. Hasil pengujian ultrasonik spesimen pelat material segar



Gambar 5. Hasil pengujian ultrasonik spesimen pelat dengan waktu pemuluran 120 jam

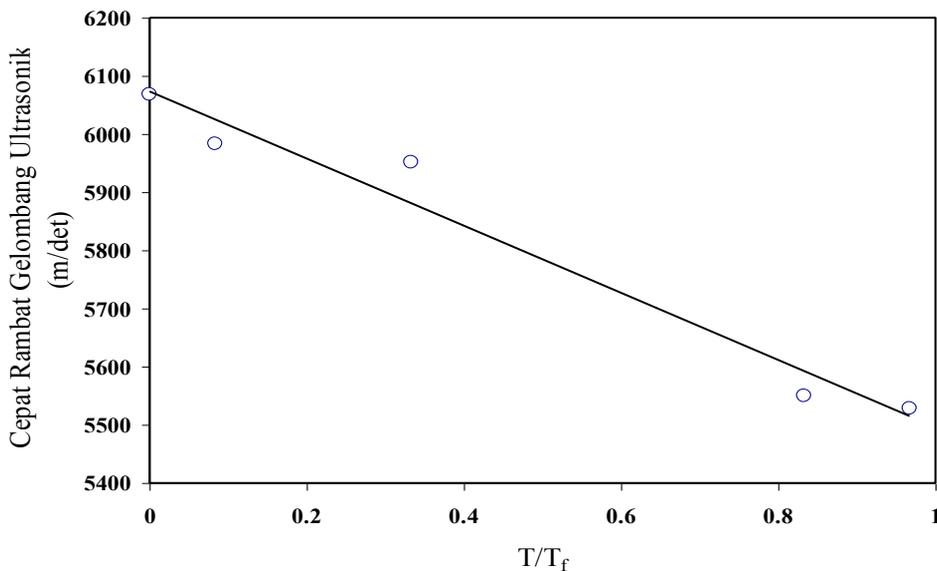
gelombang pantul dari permukaan sedangkan sinyal gelombang kedua dan seterusnya merupakan gelombang pantul dari *backwall* spesimen yang ke-1, ke-2 dan seterusnya.

Dari kedua gambar tersebut terlihat jelas bahwa  $\Delta t$  antara sinyal gelombang pantul dari permukaan spesimen dan dari *backwall* antara spesimen pada  $T=0T_f$  dan  $T=0,97T_f$  mengalami kontraksi sedangkan untuk amplitudo, penurunan tinggi amplitudo dapat dilihat mulai dari sinyal gelombang pantul *backwall* ke-1. Dari perubahan kedua parameter ini, dapat diketahui bahwa terdapat perbedaan fenomena perambatan gelombang ultrasonik di kedua spesimen tersebut. Karena gelombang ultrasonik yang digunakan adalah sama, maka perubahan ini disebabkan oleh kondisi material yang berbeda, dalam hal ini perbedaan disebabkan adanya degradasi material akibat fenomena *creep*, yaitu karena terjadinya *void*, retak mikro dan retak makro. Selanjutnya, hasil uji ultrasonik terkait dengan perubahan cepat rambat gelombang dan amplitudo, secara rinci masing-masing diperlihatkan pada Gambar 6 dan 7.

Gambar 6 memperlihatkan hubungan antara cepat rambat gelombang ultrasonik dalam spesimen dan waktu uji *creep*. Sumbu tegak adalah cepat rambat yang dihitung dengan persamaan (1) sedangkan sumbu mendatar adalah waktu uji *creep* yang dinormalisasi dengan umur *creep*,  $T_f$ . Simbol bulat pada grafik merupakan data aktual grafik, sedangkan garis lurus merupakan garis pendekatan (regresi) linier dari data pengujian. Dalam melakukan perhitungan cepat rambat, tebal spesimen diukur secara aktual pada kondisi setelah pengujian *creep* dan bukan menggunakan nilai ketebalan awal. Karena, pada saat pengujian *creep*, spesimen akan mengalami pertambahan panjang, namun sebaliknya ketebalan mengalami penipisan. Sehingga, jika nilai ketebalan menggunakan nilai inisial sebelum pengujian *creep*, maka hasil perhitungan cepat rambat tidak akan akurat.

Dari grafik ini bisa diketahui bahwa, semakin lama waktu pengujian *creep* maka cepat rambat gelombang ultrasonik akan mengalami penurunan. Nilai penurunan ini maksimum (pada  $T/T_f=0,97$ ) sebesar 540 m/det atau setara dengan lebih kurang 9%. Penurunan ini dapat diregresikan dengan baik dengan mengaplikasikan regresi linier. Jika hasil ini dibandingkan

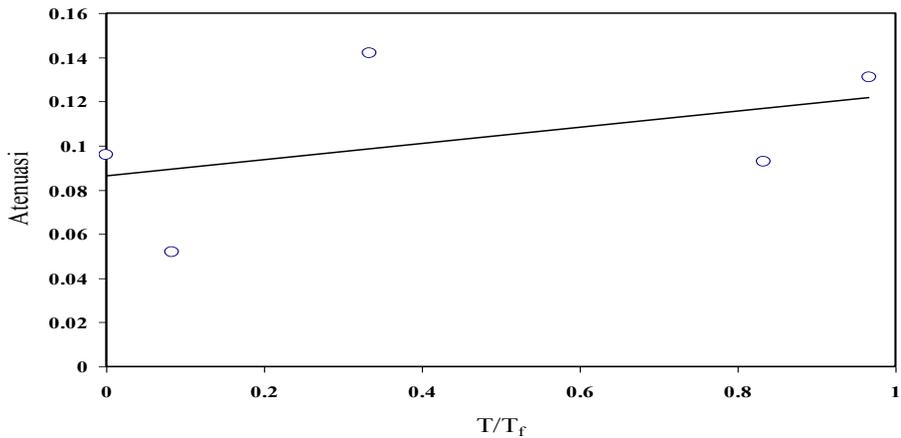
dengan grafik sinyal gelombang ultrasonik pada Gambar 4 dan 5, dimana  $\Delta t$  antara satu sinyal dengan sinyal yang lain pada Gambar 4 dan Gambar 5 mengalami kontraksi atau berkurang. Dari hasil ini, dengan pengurangan  $\Delta t$  maka berdasarkan persamaan (1) seharusnya cepat rambat gelombang ultrasonik mengalami kenaikan. Namun hal ini tidak diperlihatkan pada Gambar 5. Hal ini dikarenakan pengurangan  $\Delta t$  pada Gambar 5 tidak semata-mata menunjukkan pengurangan  $\Delta t$  secara mutlak, tetapi pengurangan juga disebabkan oleh berkurangnya ketebalan spesimen sehingga hasil pada Gambar 6 tidak bisa secara langsung dibandingkan dengan hasil pada Gambar 4 dan 5.



Gambar 6. Hubungan antara cepat rambat dan waktu uji *creep*

Gambar 7 memperlihatkan hubungan antara atenuasi gelombang ultrasonik selama merambat di dalam spesimen dan lama waktu uji *creep*. Sumbu tegak adalah atenuasi yang dihitung dengan persamaan (2) sedang sumbu mendatar adalah waktu uji *creep* yang dinormalisasi dengan umur *creep*,  $N_f$ . Simbol bulat pada grafik merupakan data aktual grafik, sedangkan garis lurus merupakan garis pendekatan (regresi) linier dari data pengujian. Seperti dalam perhitungan cepat rambat, pada perhitungan atenuasi ini ketebalan spesimen juga diukur secara aktual pada kondisi setelah pengujian *creep*.

Dari Gambar 7 dapat diketahui, bahwa semakin lama uji *creep* dilakukan, maka nilai atenuasi cenderung bertambah besar. Meskipun pertambahan ini dapat dibuat persamaan regresi secara linier, namun nilai deviasi standarnya tidak sebesar pada cepat rambat gelombang ultrasonik. Hal ini dapat dilihat dari fluktuasi nilai atenuasi yang lebih besar bila dibandingkan dengan fluktuasi pada cepat rambat. Jika hasil pada Gambar 7 dibandingkan dengan hasil pada Gambar 4 dan 5, akan diperoleh kesesuaian dimana semakin besar atenuasi berarti semakin besar pengurangan amplitudo sinyal gelombang pantulnya. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 4 dan 5.



Gambar 7. Hubungan antara cepat rambat dan waktu uji *creep*

Dari pengamatan terhadap perubahan dua parameter gelombang ultrasonik seperti yang diperlihatkan di atas, dapat diketahui bahwa proses degradasi material yang disebabkan oleh *creep* dapat dimonitor dengan metode tak merusak ultrasonik. Terjadinya pengurangan cepat rambat gelombang ultrasonik dan penambahan atenuasi yang mengikuti pertambahan lamanya waktu pengujian *creep* dapat dijelaskan sebagai berikut: kerusakan akibat *creep* secara umum terjadi melalui mekanisme terjadinya deformasi, terbentuknya *creep void*, yang selanjutnya tumbuh menjadi retak di dalam butir ataupun retak batas butir<sup>[2]</sup>. Pada saat kerusakan akibat *creep* masih berupa deformasi saja, perubahan mikrostruktur dalam hal ini sangat dominan dipengaruhi oleh orientasi/arah mikrostruktur berpengaruh baik pada penurunan cepat rambat gelombang ultrasonik dan kenaikan atenuasi<sup>[14]</sup>. Orientasi mikrostruktur akan berubah menjadi memanjang ke arah tegangan bekerja<sup>[14]</sup> sedangkan pada saat kerusakan sudah mengakibatkan *void* dan retak, maka interaksi antara gelombang dan *void* dan/atau retak menjadi dominan. Dengan adanya *void*, berarti terdapat udara di dalam media perambatan, dimana secara umum cepat rambat gelombang ultrasonik di dalam zat padat lebih besar daripada di dalam zat cair maupun udara, sehingga, dengan adanya *void* akan memperkecil cepat rambat gelombang di dalam material. Semakin banyak *void* yang terjadi, maka secara fraksi volume material padat akan berkurang, sehingga akan semakin memperbesar pengurangan nilai cepat rambat.

Dalam perambatannya di dalam material, gelombang ultrasonik akan mengalami atenuasi energi (amplitudo) yang salah satunya disebabkan oleh hamburan (*scattering*). Hamburan ini dapat disebabkan oleh *void* dan/atau retak. Hubungan antara besarnya hamburan dan *void* ini adalah linier, dimana semakin banyak *void* di dalam material, maka hamburan yang terjadi semakin besar sehingga dalam perambatannya, gelombang ultrasonik akan semakin kehilangan energi atau dengan kata lain atenuasi semakin besar. Hal ini sesuai dengan hasil pengujian bahwa semakin lama pengujian *creep*, atenuasi akan bertambah besar.

## V. KESIMPULAN

Dari beberapa pengujian diperoleh hasil bahwa semakin lama waktu pengujian *creep* dilakukan, cepat rambat gelombang ultrasonik mengalami penurunan sedangkan atenuasi

mengalami penambahan. Penurunan cepat rambat dan kenaikan atenuasi disebabkan oleh terjadinya cacat selama proses *creep* yaitu berupa *void* yang akan berkembang menjadi retak mikro dan kemudian menjadi retak makro. Perubahan kedua parameter tersebut dapat diamati secara dini ( $T=0,08T_f$ ). Dari kedua hasil ini disimpulkan bahwa metode pengujian tak rusak dengan ultrasonik dapat digunakan untuk memonitor degradasi material yang disebabkan oleh *creep* secara efektif sejak tahap awal proses *creep*.

## VI. DAFTAR PUSTAKA

1. VISWANATHAN, R., "Damage Mechanism Life Assessment of High Temperature Components", ASM International, Metal Park, Ohio, 1993.
2. MASUYAMA, F., "Life Prediction of Welded Structure", JSNDI, Vol.44, No.7, 1995, pp.477-484.
3. SADA, T., "Non-Destructive Damage Detection Techniques for Boiler and Development of Life Evaluation Techniques", Mitsubishi Heavy Industry Report, Vol. 24, No. 3, 1987, pp.255-261.
4. UMAKI, H., et al., "Remaining Life Diagnosis Techniques of Aging Power Plant Equipment", Ishikawajima Harima Technical Report, Vol. 29, No. 3, 1989, pp.162-169.
5. CANE, B.J., and JOHN, W., "Remanent Life Assessment Seminar", ERA Technology Leatherhead-UK Vol. 22, No. 23, September 1992.
6. CANE, B.J., and SHAMAS, M., "A Method for Remaining Life Estimation by Quantitative Assessment of Creep Cavitation on Plant", Report TPRD/L2645/N84, CEGB, U.K., 1984.
7. SAKAGUCHI, Y., et al., "Development of Non-Destructive Life Diagnosis Technology of Boiler Material", Fossil and Nuclear Power Plant, Vol. 39, No. 6, 1988, pp.653-664.
8. SILK, M.G., 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, 27-29 September 1976.
9. INCROPERA, F.P., and DEWITT, D.P., "Fundamentals of Heat Transfer", John Wiley & Sons, Canada, 1981, p.157.
10. GENSURE, J.G., and POTTS, D.L., "International Metallic Materials Cross-Reference", Genium Publishing Corporation, New York, 1991.
11. Anonim, "Laporan Analisis Komposisi Kimia AISI SUS 304", LIPI, 2004.
12. Anonymous, "Metal Test Methods and Analytical Procedures", Annual Book of ASTM, Volume 03.03, 1990.
13. KRAUTKRAMER, "Ultrasonic Testing of Materials", Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 1969.
14. KATO, H., "Ultrasonic Characterization of Plastic Deformation in Brass", Proc. of Int. Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics (ATEM '97), JSME, 1997, pp.301-306.