

## KAJIAN METODE UJI TARIK DAN IMPAK KELONGSONG ZIRKALOI PASCAIRADIASI

Jan Setiawan, Rohmad Sigit EBP, Sri Ismarwanti, Sungkono, Purwadi,  
Hadi Suwarno, Usman Sudjadi  
Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir

### ABSTRAK

Paduan zirkonium atau zirkaloi merupakan bahan yang digunakan sebagai bahan kelongsong elemen bakar nuklir dari reaktor daya. Kelongsong elemen bahan bakar nuklir berfungsi sebagai pengungkuh bahan bakar nuklir beserta produk fisinya agar tidak berinteraksi langsung dengan air pendingin. Zirkaloi memiliki karakteristik penghantar panas yang baik, transparan terhadap neutron, kekuatan mekanik yang baik terutama pada temperatur tinggihan memiliki ketahanan korosi yang baik. Iradiasi akan mendorong beberapa perubahan material pada skala mikro. Perubahan skala mikro ini mempengaruhi kinerja bahan di dalam reaktor. Pengujian integritas zirkaloi pascairadiasi meliputi pengujian tidak merusak dan merusak. Pengujian tidak merusak meliputi pengujian visual, kelurusan/profilometri, dan lapisan oksida. Untuk pengujian merusak dilakukan dengan pendekatan terhadap karakteristik daktilitas dan fraktur pada kelongsong. BATAN – Indonesia memiliki fasilitas bilik panas (*Hotcell/HC*) yang diperuntukkan melakukan pengujian pascairadiasi bahan bakar nuklir. Pengujian merusak yang dapat digunakan adalah pengujian kekerasan dan tarik. Pengujian dengan mesin uji tarik dapat digunakan untuk mengetahui karakteristik daktilitas dan fraktur kelongsong. Pengujian dengan mesin uji impak digunakan untuk pengujian karakteristik fraktur kelongsong. Dalam pengujian preparasi sampel uji sangat penting. Sampel uji tarik, dapat dibentuk sesuai dengan standard ASTM E8, sedangkan sampel untuk uji impak, dibentuk sesuai dengan standard ASTM E23. Pengujian untuk mengetahui karakteristik daktilitas berkembang metode *ring hoop tensile test* (RHTT) dan metode untuk karakteristik impak berkembang metode *pin-loaded test* (PLT). Hasil dari RHTT pada zirkaloi yang teriradiasi dan diberikan perlakuan panas menunjukkan terjadinya penurunan nilai *ultimate tensile strength* (UTS). Nilai UTS zirkaloi yang teriradiasi akan lebih rendah dibandingkan zirkaloi tidak teriradiasi untuk sampel yang dipanaskan lebih dari 600 °C. Sedangkan hasil dari PLT pada kelongsong zirkaloi-2 dan zirkaloi-4 yang tidak teriradiasi menunjukkan nilai UTS berturut-turut 576 MPa dan 732 MPa.

**Kata Kunci:** zirkaloi, pascairadiasi, pengujian, bilik panas

### PENDAHULUAN

Instalasi radiometalurgi (IRM) merupakan salah satu instalasi yang dimiliki oleh Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir (PTBBN) sebagai salah satu unit kerja di Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN). Salah satu tugas dan fungsi PTBBN yang terkait pada IRM adalah melaksanakan pengembangan teknik uji radiometalurgi. Teknik uji radiometalurgi merupakan pemeriksaan pascairadiasi terhadap elemen bakar reaktor riset dan daya beserta komponennya<sup>[1]</sup>. Pengujian pascairadiasi terhadap elemen bakar beserta komponennya dilakukan didalam fasilitas *hotcell* (HC). PTBBN memiliki fasilitas bilik panas HC yang diperuntukkan melakukan pengujian pascairadiasi bahan bakar nuklir untuk jenis pelat dan *rod*. HC yang dimiliki terdiri atas 12 bilik dengan fungsinya masing-masing. Saat ini fasilitas HC di Indonesia dapat melakukan pengujian ultrasonik, pencacahan radiasi gamma, pengamatan strukturmikro dengan mikroskop optik, pengujian kekerasan makro, dan pengujian tarik.

Pada reaktor berpendingin air, dari segi keselamatan, desain sebuah reaktor diterapkan konsep pertahanan ganda. Bahan bakar nuklir tidak dapat ditempatkan langsung di dalam teras reaktor dan berinteraksi langsung dengan air pendingin. Interaksi langsung bahan bakar nuklir dengan air pendingin dapat mengakibatkan pelepasan produk fisi dari bahan bakar ke air pendingin. Untuk menghindari pelepasan langsung produk fisi tersebut bahan bakar dikungkung di dalam kelongsong. Kelongsong berfungsi sebagai pengungkung bahan bakar nuklir sehingga produk fisi tidak langsung terlepas ke air pendingin. Sebagai pengungkung, kelongsong harus mampu mempertahankan produk fisi yang mungkin dapat terlepas tetap berada di dalam kelongsong. Selain itu, kelongsong harus memiliki kemampuan yang baik untuk menghantarkan panas yang dihasilkan bahan bakar ke air pendingin. Bahan kelongsong dipilih yang memiliki karakteristik transparan terhadap neutron dimana koefisien absorpsi terhadap neutron termal yang rendah, konduktivitas termal yang baik, kekuatan mekanik yang baik terutama pada temperatur tinggi, tekanan yang tinggi dan memiliki ketahanan korosi yang baik, termasuk pada kondisi kecelakaan.

Zirkaloi atau paduan zirkonium merupakan salah satu bahan yang digunakan sebagai bahan kelongsong. Pemilihan zirkaloi sebagai bahan kelongsong dikarenakan memiliki karakteristik absorpsi neutron termal yang rendah, sifat mekanik dan stabilitas yang baik dalam kondisi fluks neutron, dan memiliki ketahanan korosi terhadap air pada temperatur tinggi. Beberapa komposisi pepadu pada zirkaloi yang digunakan sebagai kelongsong bahan bakar nuklir disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi pepadu zirkaloi yang digunakan sebagai kelongsong bahan bakar nuklir<sup>[2]</sup>.

Unsur	zirkaloi-2	zirkaloi-4	Zr-Nb	Zirlo	M5	MDA	E 365	Hana 4
Sn	1,2-1,7	1,2-1,7	-	0,96	-	0,8	1,2	0,4
Fe	0,07-0,2	0,18-0,24	-	0,1	-	0,2	0,35	0,2
Cr	0,05-0,15	0,07-0,13	-	-	-	0,1	-	0,1
Ni	0,03-0,08	-	-	-	-	-	-	-
Nb	-	-	2,4-2,8	0,99	1,0	0,5	1,0	1,5
O	1400 ppm	1400 ppm	0,13	1430 ppm	1250 ppm	-	-	-

Zirkaloi sebagai kelongsong dibatasi penggunaannya pada temperatur maksimum sebesar 400 °C sedangkan untuk paduan Nb-1Zr dapat digunakan lebih tinggi lagi yaitu pada temperatur 800 °C, namun koefisien absorpsi neutron yang dimilikinya 20 kali lebih

besar dibandingkan dengan zirkaloi. Sedangkan, zirkonium karbida (ZrC) dapat digunakan hingga temperatur maksimum sebesar 900 °C dan koefisien absorpsi neutron dimilikinya sebesar 0,20 kali dari zirkaloi<sup>[2]</sup>. Proses korosi yang terjadi pada paduan zirkonium menghasilkan struktur multi-lapisan oksida yang menunjukkan terjadinya proses pertumbuhan oksidasi yang berulang-ulang diikuti dengan perpindahan dari satu lapisan ke lapisan berikutnya. Pemahaman dan pengendalian terhadap lapisan oksida menjadi sangat penting. Lapisan oksida yang mungkin terbentuk pada permukaan zirkaloi antara lain: Zr<sub>3</sub>O dengan struktur kristal tetragonal diikuti dengan Zr<sub>2</sub>O yang memiliki struktur monoklinik<sup>[2]</sup>. Dimensi dari bahan bakar nuklir reaktor daya yang menggunakan zirkaloi dan kondisi operasinya disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Dimensi bahan bakar nuklir reaktor pendingin air dan kondisi operasinya<sup>[3]</sup>.

Parameter	
Panjang/diameter/ketebalan dinding	~ 4 m/ ~ 9 mm/ ~0,6 mm
Kandungan bahan bakar	~ 2 kg UO <sub>2</sub>
Temperatur/tekanan air	300 – 330 °C pada 70 – 170 bar
Pembangkitan panas	20 – 30 kW/m
Lama waktu operasi	4 – 7 tahun

Kelongsong bahan bakar nuklir berbasis zirkonium memiliki karakteristik yang sangat memuaskan ketika menggantikan stainless steel. Penggunaan paduan zirkonium mampu meningkatkan kinerja bahan bakar seperti: waktu penggunaan, temperatur, fluks panas permukaan dan fluen *neutron* cepat. Batas penggunaan kelongsong zirkonium ditentukan oleh karakteristik korosinya (oksidasi) dalam sisi panas pendingin reaktor dan secara umum diasosiasikan sebagai absorpsi hidrogen. Konsentrasi hidrogen di atas batas kelarutan padat dalam zirkonium, presipitat zirkonium hidrida akan terbentuk. Adanya presipitasi zirkonium hidrida akan menurunkan kekuatan mekanik dan daktilitas kelongsong.

Iradiasi akan mendorong beberapa perubahan material pada skala mikro. Iradiasi akan membentuk untaian dislokasi dan partikel fasa kedua yang seiring dengan atom-atom yang terpisah dari partikel fasa kedua terdistribusi di matriks zirkonium. Perubahan skala mikro ini mempengaruhi kinerja bahan di dalam reaktor. Paduan zirkonium akan terkorosi sangat cepat dalam uap panas pada temperatur tinggi sehubungan dengan desain dasar kejadian *Loss of Coolant Accident* (LOCA). Pengembangan kelongsong dengan bahan maju saat ini agar mampu memenuhi kriteria sebagai kelongsong dengan ketahanan terhadap kejadian pada temperatur tinggi saat terjadi LOCA.

Pengujian integritas zirkaloi pascairadiasi meliputi pengujian tidak merusak dan merusak. Pengujian tidak merusak meliputi pengujian visual, kelurusan/profilometri, dan lapisan oksida. Untuk pengujian merusak dilakukan dengan pendekatan terhadap karakteristik daktilitas dan fraktur pada kelongsong. Pengujian daktilitas meliputi uji tarik dan/atau kompresi, sedangkan fraktur meliputi uji "burst" dan uji impak. Selain itu dilakukan pengamatan struktur mikro dan analisis kandungan hidrogen. Pendekatan sampel pengujian pascairadiasi pengujian tidak merusak dilakukan pada sampel kelongsong elemen bakar sebenarnya, sedangkan pengujian merusak dapat dilakukan pada sampel kelongsong yang dipreparasi sebelum iradiasi maupun sampel kelongsong elemen bakar sebenarnya. Hyun-Gil Kim, dkk<sup>[4]</sup> melaporkan hasil pengujian pascairadiasi untuk kelongsong HANA (*High Performance Alloy for Nuclear Application*) dengan meliputi kegiatan pengamatan oksida dan matriks menggunakan mikroskop optik, SEM (*Scanning Electron Microscope*) dan TEM (*Transmission Electron Microscope*), pengujian tarik bentuk cincin, dan analisis kandungan hidrogen. Pengujian kelongsong zirkaloi yang berasal dari elemen bahan bakar nuklir untuk pendekatan fraktur dengan *Pin-Load Testing* (PLT) telah dilakukan oleh Samal, dkk<sup>[5]</sup>. Dalam tulisan ini akan disampaikan metode pengujian pascairadiasi yang dibatasi pada pengujian mekanik untuk kelongsong zirkaloi yang dapat dilakukan di Indonesia.

## METODOLOGI

Dalam rangka mengetahui integritas kelongsong elemen bakar nuklir selama iradiasi dilakukan pengujian pascairadiasi (*post irradiation examination-PIE*). Pengujian merusak yang dapat dilakukan adalah pengujian mekanik. Pengujian mekanik yang dilakukan dapat dibagi berdasarkan kepada dua pendekatan karakteristik yaitu: daktilitas dan fraktur. Sedangkan untuk jenis sampel uji dapat berasal dari *tube* zirkaloi atau berasal dari kelongsong zirkaloi sebenarnya. Kelongsong zirkaloi yang telah teriradiasi dapat dilakukan preparasi untuk pengujian mekanik di dalam HC.

Pengujian untuk karakteristik daktilitas pengujiannya adalah pengujian tarik. Sedangkan karakteristik fraktur pengujiannya adalah pengujian impak. Untuk sampel zirkaloi yang dipersiapkan sebelum iradiasi dapat mengikuti ASTM E8 untuk uji tarik dan ASTM E23 untuk uji impak. Untuk sampel kelongsong zirkaloi dari elemen bakar nuklir, sampel zirkaloi diperoleh dengan memotong kelongsong tanpa pelet bahan bakar nuklir menggunakan mesin pemotong. Sampel zirkaloi dibentuk sedemikian rupa mengikuti standard ASTM. Pengujian yang dilakukan untuk karakteristik daktilitas adalah *ring hoop tensile test* (RHTT) yang juga merupakan pengujian tarik transversal dan karakteristik fraktur adalah *pin-loaded test* (PLT). Dalam kajian ini dilakukan penelusuran pustaka

terhadap standar pengujian ASTM E8 dan ASTM E23, serta penelusuran pustaka peneliti lain yang telah melakukan pengujian ataupun pengujian yang merupakan simulasi dari kelongsong bahan bakar nuklir berbentuk *tube*.

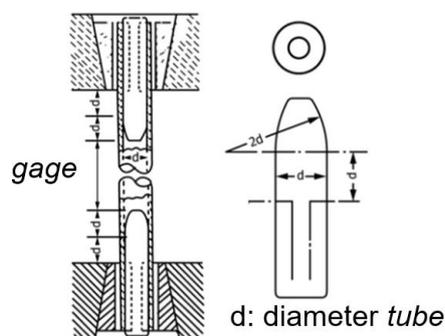
## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Sampel Uji

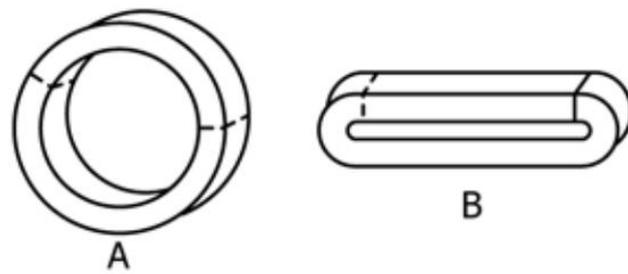
Sampel uji yang dipersiapkan sebelum iradiasi dibentuk sesuai dengan standar ASTM yang berkenaan dengan pengujiannya. Sampel pengujian tarik dari zirkaloi *tube* dapat mengikuti ASTM E8. Berdasarkan Tabel 2 mengenai ukuran diameter dan ketebalan dinding dari *tube* zirkaloi, dimana diameter luar yang tidak lebih dari 25 mm disebut *tube* kecil. Pengujian longitudinalnya dapat dilakukan dengan ukuran penuh *tube*-nya. Saat pengujian, diperlukan pengisi *tube* yang panjangnya dibuat sepanjang pegangan *grip*.

Tujuan memberikan pengisi tersebut dimaksudkan agar *tube* tidak mengalami deformasi saat ditekan oleh *grip* selama proses pengujian tarik. Ilustrasi pengujiannya disajikan pada Gambar 1. Untuk panjang *gage* ditentukan empat kali dari diameter bila mengikuti standar E8 dan lima kali dari diameter bila mengikuti standar E8M. Pengujian tarik transversal sampel ujinya disajikan pada Gambar 2. Untuk memperoleh sampel uji tarik, dilakukan perataan pada spesimen yang proses perataannya dapat dilakukan setelah dipotong ketika spesimen seperti yang tampak pada Gambar 2.a atau sebelum dipotong ketika spesimen sudah seperti yang tampak pada Gambar 2.b.

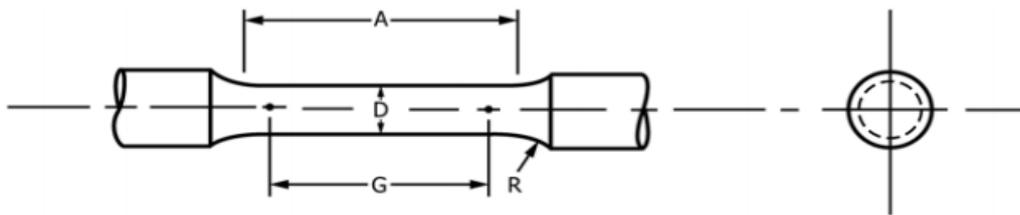
Ukuran yang diberikan, untuk pengujian transversal, bila sampel uji ditunjukkan pada Gambar 3, maka ukurannya adalah ukuran sampel mini yang disajikan pada Tabel 3. Sampel uji dapat juga dibentuk seperti pada Gambar 4 yang serupa dengan pembentukan sampel uji tarik longitudinal untuk *tube* yang berdiameter besar dengan ketebalan dindingnya kurang dari 20 mm.



Gambar 1. Pengujian tarik secara longitudinal<sup>[6]</sup>.



Gambar 2. Penyiapan spesimen uji tarik transversal<sup>[6]</sup>.



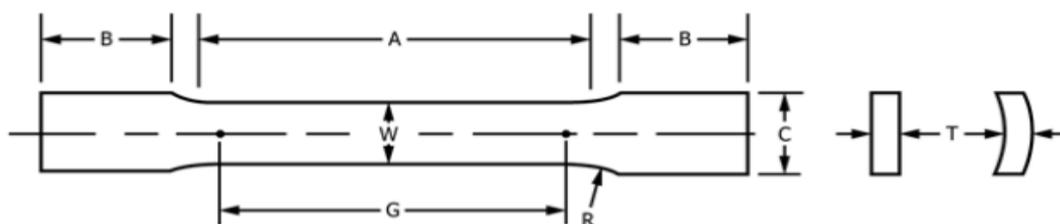
dimana:

D: diameter; T: ketebalan; G: panjang *gauge*; R: jari-jari *fillet*; A: panjang dari bagian paralel yang mengecil.

Gambar 3. Sampel uji transversal untuk ukuran mini<sup>[6]</sup>.

Tabel 3. Ukuran sampel uji transversal untuk ukuran mini<sup>[6]</sup>.

	Sampel 2	Sampel 3	Sampel 4	Sampel 5
	(mm)			
G E8/E8M	36/45 ± 0,1	24/30 ± 0,1	16/20 ± 0,1	10/12,5 ± 0,1
D	9,0 ± 0,1	6,0 ± 0,1	4,0 ± 0,1	2,5 ± 0,1
R	8	6	4	2
A E8/E8M	45/54	30/36	20/24	16/20

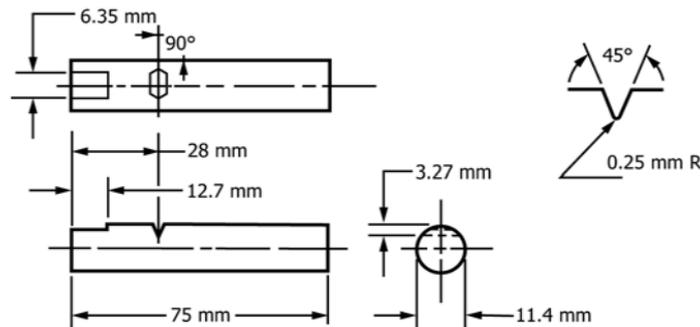


dimana:

W: Lebar sampel; T: ketebalan; G: panjang *gauge*; R: jari-jari *fillet*; A: panjang dari bagian paralel yang mengecil, B: Panjang bagian *grip*, C: Lebar bagian *grip*.

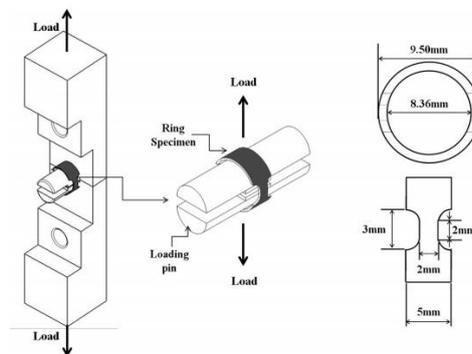
Gambar 4. Sampel uji tarik bentuk pelat yang diratakan<sup>[6]</sup>.

Pengujian impak dengan metode V-notch charpy dapat mengikuti ASTM E23. Pembentukan sampel dari ASTM E23 dapat dipilih tipe Z untuk kelongsong zirkaloi. Sampel uji tipe Z dikenal juga sebagai sampel uji Philpot yang merupakan pengujian tidak standard dalam ASTM E23. Pengujian dengan sampel uji Philpot akan lebih sulit dalam usaha membandingkan proses fraktur yang terjadi dengan sampel standard, sebab adanya perbedaan geometri. Bentuk dan ukuran dari sampel uji Philpot disajikan pada Gambar 5.



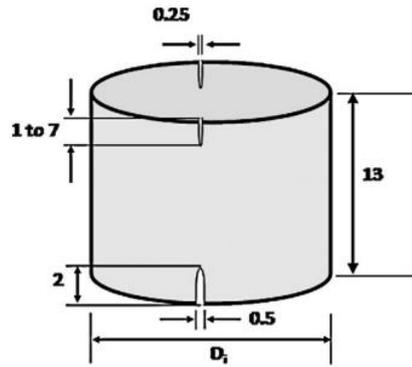
Gambar 5. Sampel uji Philpot untuk pengujian impak<sup>[7]</sup>.

Sampel uji diperoleh dari spesimen kelongsong yang dipotong menggunakan mesin potong *low speed* ataupun gerinda. Sampel uji RHTT yang dilakukan oleh Kim, dkk<sup>[8]</sup>; Cha, dkk<sup>[9]</sup> dan seperti yang dilaporkan Setiawan, dkk<sup>[10]</sup> disajikan pada Gambar 6.



Gambar 6. Sampel RHTT zirkaloi<sup>[9]</sup>.

Sampel uji PLT yang dilakukan oleh Samal, dkk<sup>[5]</sup> dan dilaporkan juga oleh Setiawan, dkk<sup>[10]</sup> disajikan pada Gambar 7. Sampel yang dibuat dan pengujian yang dilakukan bukan sampel dan pengujian yang standard. Samal, dkk<sup>[5]</sup> hanya melakukan PLT pada sampel zirkaloi-2 dan zirkaloi-4 yang tidak teriradiasi. Analisis mengenai pengujian PLT dikembangkan oleh Samal, dkk<sup>[11]</sup>.

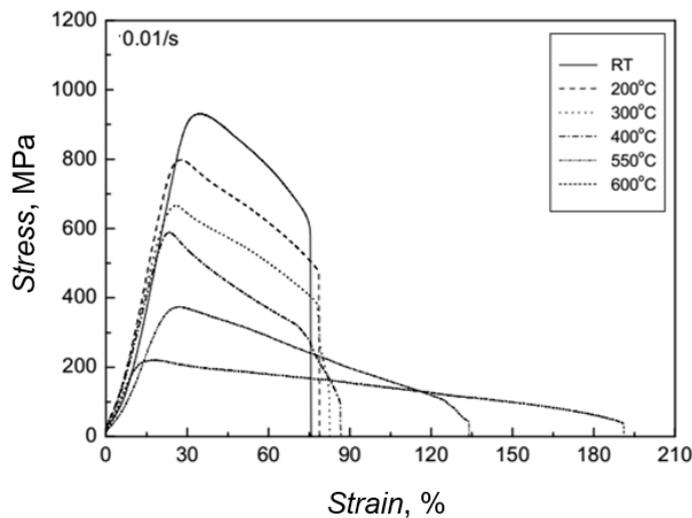


$D_i$ : diameter tabung; ukuran dalam satuan mm.

Gambar 7. Skema sampel PLT tube zirkaloi<sup>[5]</sup>.

### Hasil pengujian

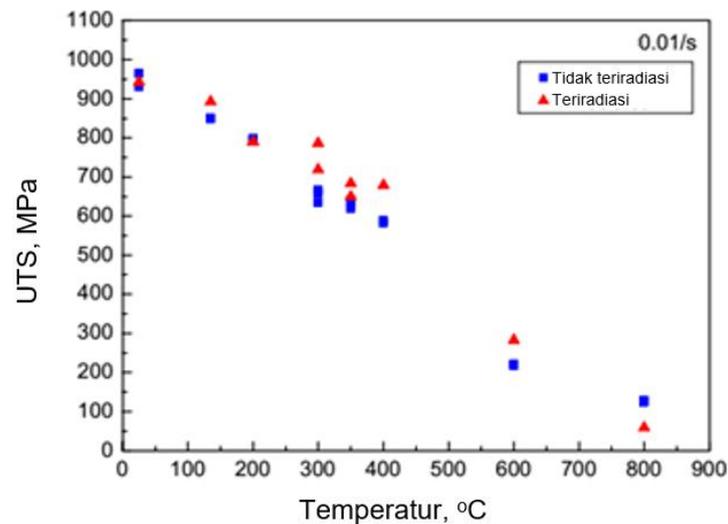
Pengujian tarik transversal dan longitudinal dilakukan oleh Kim, dkk<sup>[12]</sup> untuk zirkaloi-4 yang tidak teriradiasi. Perlakuan yang dilakukan adalah pemanasan dalam tungku resistif dari 200, 300, 400, 550 dan 600 °C. Hasil yang diperoleh menunjukkan penurunan nilai UTS seiring dengan peningkatan temperatur, ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Kurva stress-strain RHTT zirkaloi-4 tidak teriradiasi<sup>[12]</sup>.

Kim, dkk<sup>[8]</sup> melakukan RHTT pada zirkaloi yang tidak teriradiasi dan yang teriradiasi dengan derajat bakar rerata sebesar 65 GWd/tU. Hasil pengujian RHTT zirkaloi-4 yang dilakukan SKim, dkk<sup>[8]</sup>, menunjukkan nilai *ultimate tensile strength* (UTS) yang lebih tinggi untuk sampel yang teriradiasi dibandingkan UTS sampel yang tidak teriradiasi hingga temperatur 600 °C, di atas temperatur tersebut nilai UTS yang teriradiasi akan lebih rendah. Nilai UTS dari sampel zirkaloi-4 yang teriradiasi dan tidak teriradiasi ditunjukkan

pada Gambar 9. Pada temperatur kamar diperoleh UTS berkisar 570 MPa untuk yang tidak teriradiasi dan berkisar 670 MPa untuk yang teriradiasi.



Gambar 9. Nilai UTS sampel zirkaloi-4 yang teriradiasi dan tidak teriradiasi seiring dengan peningkatan temperatur<sup>[8]</sup>.

Pada Gambar 9 tersebut terlihat adanya penurunan UTS pada temperatur 800 °C. Hal ini mungkin disebabkan oleh fenomena perambatan minimum oleh regangan dinamis akibat penuaan zirkaloi-4 pada temperatur di atas 600 °C<sup>[8]</sup>. Karakteristik daktilitas mekanik yang menurun di atas temperatur 600 °C ini menjadi batas desain penggunaan zirkaloi-4 untuk kondisi kecelakaan<sup>[8]</sup>. Setiawan, dkk<sup>[13]</sup> melakukan RHTT pada zirkaloi-4 diperoleh nilai UTS sebesar 340 MPa. Sampel uji yang dibuat oleh Jan Setiawan tidak dibentuk *dogbone*, sehingga lebar sampel sebesar 3,50 mm dan tebal sampel sebesar 0,45 mm. Samal, dkk menyatakan metode RHTT ini dapat menunjukkan perbandingan hasil yang baik antara sampel uji bentuk ring dengan sampel mini yang diambil dari sisi lengkung *tube* zirkaloi<sup>[14]</sup>. Jaramillo, dkk<sup>[15]</sup> menunjukkan karakteristik elastis dari kelongsong zirkaloi-4 bukan merupakan fungsi dari iradiasi. Karakteristik linier dari grafik beban-regangan menunjukkan konsistensi antara kelongsong teriradiasi dengan kelongsong yang tidak teriradiasi. Samal, dkk<sup>[16]</sup> telah melakukan PLT pada zirkaloi-2 dan zirkaloi-4 yang digunakan untuk reaktor BWR dan PHWR di India. Hasil PLT dari zirkaloi-2 dan zirkaloi-4 diperoleh nilai UTS berturut-turut 576 MPa dan 732 MPa untuk sampel yang tidak teriradiasi tetapi tidak melakukan pengujian untuk sampel yang teriradiasi.

## KESIMPULAN

Pengujian mekanik terhadap zirkaloi sebagai kelongsong elemen bakar nuklir dilakukan untuk mengetahui karakteristik daktilitas dan fraktur yang terjadi selama

penggunaannya di teras reaktor. Pengujian yang dilakukan dapat dilakukan menggunakan mesin uji tarik untuk mengetahui kedua karakteristik tersebut. Karakteristik daktilitas diobservasi menggunakan uji tarik, baik transversal maupun longitudinal. Dalam pengujian tarik, pembentukan sampel *gage* sangat penting. Dibentuknya *Gage* pada sampel diharapkan perubahan akan terjadi pada daerah tersebut, sehingga memudahkan dalam melakukan analisa karakteristik daktilitas maupun frakturnya.

Karakteristik fraktur kelongsong zirkaloi dapat dilakukan melalui pengamatan patahan yang terjadi pada pengujian tarik. Pengujian yang dapat dilakukan pada mesin uji tarik untuk mengetahui karakteristik fraktur adalah dengan metode yang belum standard PLT. Dari pengujian RHTT dan PLT diperoleh nilai UTS. Kecenderungan nilai UTS untuk sampel zirkaloi adalah menurun seiring meningkatnya temperatur yang dikenai, dan karakteristik untuk sampel zirkaloi-4 yang teriradiasi nilai UTS akan lebih tinggi dibanding yang tidak teriradiasi sampai temperatur 600 °C.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih atas pendanaan untuk penelitian yang disediakan dari DIPA Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir- BATAN.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. <http://www.batan.go.id/index.php/id/profil-ptbbn/165-pusat-teknologi-bahan-bakar-nuklir-ptbbn-batan>, diakses 16 Mei 2017.
2. Azevedo, C. R. F., *Selection of fuel cladding material for nuclear fission reactors*, Engineering Failure Analysis, 18(8), 2011,1943-1962.
3. Hallstadius, L., Johnson, S., & Lahoda, E., *Cladding for high performance fuel*, Progress in Nuclear Energy, 57, 2012, 71-76.
4. Kim, H. G., Choi, B. K., Park, S. Y., Jung, Y. I., Park, D. J., & Park, J. Y., *Post irradiation examination of HANA claddings after research reactor test up to 34GWD/MTU*, Journal of Nuclear Materials, 426(1), 2012, 173-181.
5. Samal, M. K., Sanyal, G., & Chakravarty, J. K., *Estimation of fracture behavior of thin walled nuclear reactor fuel pins using Pin-Loading-Tension (PLT) test*, Nuclear Engineering and Design, 240(12), 2010, 4043-4050.
6. ASTM E8 / E8M-16a, *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
7. ASTM E23-16b, *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.

8. Kim, S. K., Bang, J. G., Kim, D. H., Lim, I. S., Yang, Y. S., Song, K. W., & Kim, D. S., *Hoop strength and ductility evaluation of irradiated fuel cladding*, Nuclear Engineering and Design, 239(2), 2009, 254-260.
9. Cha, H. J., Won, J. J., Jang, K. N., An, J. H., & Kim, K. T., *Tensile hoop stress-, hydrogen content-and cooling rate-dependent hydride reorientation behaviors of Zr alloy cladding tubes*, Journal of Nuclear Materials, 464, 2015, 53-60.
10. Setiawan, J., & Al-Afghani, F. (2015), *Kajian Pengujian Mekanik Pada Kelongsong Elemen Bakar Nuklir*, Hasil-hasil Penelitian EBN, 2015.
11. Samal, M. K., & Sanyal, G., *A Generalized Geometric Shape Function for Evaluation of SIF Values of Thin-Walled Axially-Cracked Fuel Pin Specimens*, Procedia Engineering, 55, 2013, 367-373.
12. Kim, D. S., Ahn, S. B., Oh, W. H., Yoo, B. O., Choo, Y. S., Hong, K. P., & Kim, S. K., *Tensile Test Techniques for a Nuclear Fuel Cladding in a Hot Cell*, In Key Engineering Materials Vol. 345, 2007, Trans Tech Publications pp. 1561-1564.
13. Setiawan, J., Sigit, R.E.B.P., Sungkono, & Suwarno, H., *Pengujian Tarik Transversal Kelongsong Bahan Bakar Nuklir*, Seminar Material, Instrumentasi, Pembelajaran dan Aplikasinya, Bandung, 5 November 2016. Institut Teknologi Bandung.
14. Samal, M. K., Balakrishnan, K. S., Parashar, J., Tiwari, G. P., & Anantharaman, S., *Estimation of Transverse Tensile Behavior of Zircaloy Pressure Tubes Using Ring-Tensile Test and Finite Element Analysis*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 227(6), 2013, 1177-1186.
15. Jaramillo, R. A., Hendrich, W. R., & Packan, N. H., *Tensile Hoop Behavior of Irradiated Zircaloy-4 Nuclear Fuel Cladding* (No. ORNL/TM-2007/012). Oak Ridge National Laboratory (ORNL), 2017.
16. Samal, M. K., Sanyal, G., & Chakravartty, J. K., *Investigation Of Failure Behavior Of Two Different Types Of Zircaloy Clad Tubes Used As Nuclear Reactor Fuel Pins*, Engineering Failure Analysis, 18(8), 2011, 2042-2053.