

KAJIAN PENGUJIAN MEKANIK PADA KELONGSONG ELEMEN BAKAR NUKLIR

Jan Setiawan, Fajar Al Afgani
Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir

ABSTRAK

KAJIAN PENGUJIAN MEKANIK PADA BAHAN STRUKTUR ELEMEN BAKAR NUKLIR. Degradasi sifat mekanik pada bahan struktur elemen bakar nuklir dalam hal ini kelongsong terutama dalam kondisi kecelakaan seperti *reactivity initiated accident* (RIA) dan *loss of coolant accident* (LOCA) menjadi perhatian dikarenakan keterkaitannya dengan keselamatan operasi elemen bakar nuklir tersebut. Pengujian mekanik yang dapat mensimulasikan mekanisme degradasi sifat mekanik tersebut menjadi sangat penting. Dalam kajian ini disampaikan secara singkat mengenai pengujian tarik dan fraktur untuk kelongsong yang pembahasannya ditekankan pada bentuk melingkar. Pengujian tarik yang dapat dilakukan untuk sampel bentuk melingkar adalah pengujian tarik *ring* (transversal) dan longitudinal. Kedua sampel untuk pengujian tetap dibuat *gage* untuk membatasi daerah deformasi dan memaksimalkan keseragaman distribusi regangan. Pengujian fraktur pada sampel bentuk melingkar adalah pengujian *pin-load testing* (PLT) dan *vallecitos embedded charpy* (VEC). Kedua sampel untuk pengujian fraktur tersebut memerlukan *pre-crack* yang ketentuannya mengikuti standar ASTM E 1280.

Kata Kunci: tarik, fraktur, bahan struktur elemen bakar nuklir, kelongsong, paduan aluminum, zirkaloi

PENDAHULUAN

Kelongsong bahan bakar nuklir merupakan bahan struktur elemen bakar nuklir yang menyokong dan mempertahankan pelet bahan bakar beserta produk fisi yang terbentuk selama iradiasi agar tidak keluar sehingga berinteraksi dengan pendingin^[1]. Kondisi operasi elemen bakar di reaktor terkait panjang siklus dan derajat bakar (*burnup*) yang tinggi dapat mempengaruhi sifat mekanik dari kelongsong. Karakteristik yang dipengaruhi selama proses tersebut adalah ketangguhan fraktur yang diakibatkan oleh oksidasi, iradiasi neutron dan penangkapan hidrogen. Hal ini merupakan sifat yang penting untuk menunjukkan kehandalan, integritas bahan dan penentuan yang tepat terhadap sisa umur bahan^[2]. Hal ini akan terkait terhadap keselamatan penggunaan baik dalam kondisi normal maupun dalam kondisi transien. Ketangguhan fraktur pada kelongsong juga menjadi dasar dalam melakukan evaluasi pada desain dan kinerjanya pada *burnup* tinggi^[3]. Dasar pengujian sifat mekanik pada bahan dapat dilakukan antara lain pengujian tarik, fraktur dan fatik. Pengujian tarik dan fraktur merupakan sifat yang dikarakterisasi berdasarkan sifat fisik dengan ukuran yang berbeda. Pengujian sifat tarik suatu bahan, berdasarkan mikrostruktur (ukuran butir) dan pengujian sifat fraktur didasari oleh medan tekanan tiga dimensi. Pengujian mekanik yang dilakukan, umumnya bersifat merusak dan memerlukan pengambilan contoh (sampel) dari bahan yang diuji. Pengujian pada bahan struktur elemen bakar nuklir di *hotcell* memerlukan sampel uji dengan ukuran yang kecil

(*subsize* atau miniatur). Pemilihan ukuran sampel tersebut didasari akan ketersediaan bahan uji yang terbatas dan meminimalis jumlah limbah yang akan dihasilkan.

Standar pengujian uji tarik untuk bahan logam digunakan ASTM E8. ASTM E8 telah mencakup bentuk sampel untuk bahan struktur elemen bakar berbentuk pelat dan pipa. Ukuran sampelnya juga telah mencakup dari ukuran normal maupun yang *subsize*^[4]. Standar pengujian uji dampak untuk bahan logam digunakan ASTM E23, dengan sampel pengujianya berbentuk *bar* yang diberi takik. ASTM E23 telah mencakup bentuk sampel balok dan silinder sehingga standar ini dapat digunakan sebagai acuan untuk bahan struktur elemen bakar berbentuk pelat^[5]. Untuk ukuran sampelnya dalam standar ini telah mencakup ukuran normal maupun yang *subsize*. Pengujian dalam kajian ini akan ditekankan kepada pengujian tarik dan dampak untuk sampel *ring* dan silinder yang telah dilakukan pada paduan aluminium dan/atau zirkaloi sebagai bahan kelongsong elemen bakar nuklir.

METODOLOGI

Pengujian kelongsong elemen bakar nuklir untuk mengetahui kinerja dari elemen bakar nuklir dilakukan pengujian setelah diiradiasi (*post irradiation examination-PIE*). Pengujian mekanik yang dapat dilakukan adalah mengevaluasi karakteristik *ductile* dan frakturnya. Karakteristik *ductile* dilakukan dengan melakukan pengujian tarik, sedangkan pengujian fraktur dilakukan dengan melakukan pengujian dampak. Pengujian tarik dilakukan untuk mengevaluasi dari perubahan panjang, regangan dan energi regangan yang diperoleh dari pengujian tersebut. Pengujian tarik *ring* untuk bahan kelongsong elemen bakar nuklir telah dilakukan oleh banyak peneliti^{[2],[6-9]}. Pengujian tarik dengan memipihkan sisi silinder yang diambil dari kelongsong sehingga menjadi bentuk pelat, akan memunculkan regangan awal pada spesimen. Metode ini hanya dapat digunakan sebagai studi kualitatif terhadap kelongsong^[10]. Pengujian tarik dilakukan dengan laju penarikan yang lambat^[11].

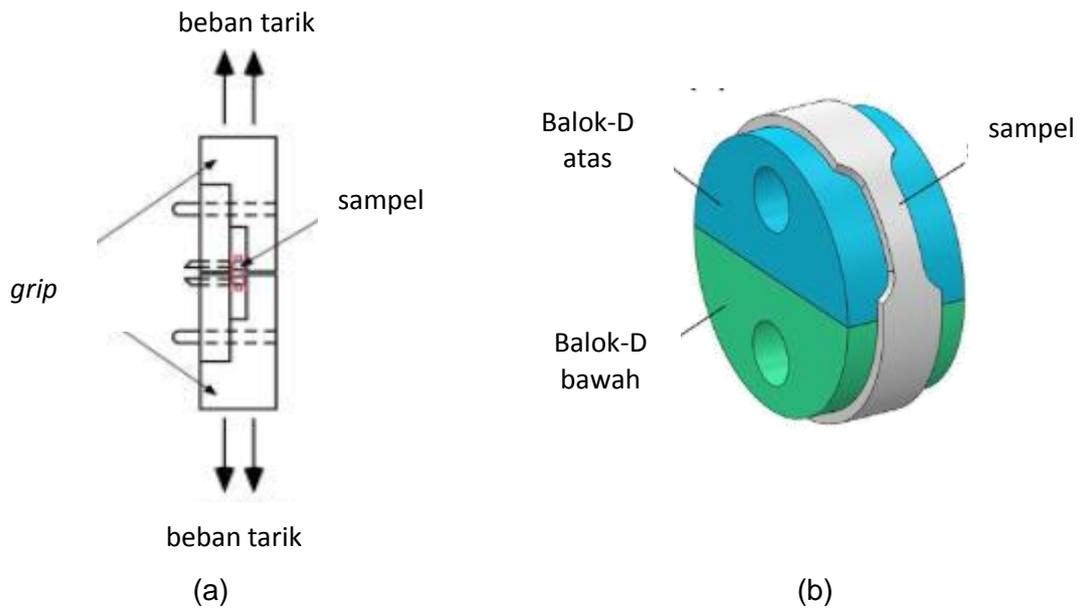
Pengujian dampak dilakukan untuk mengevaluasi perilaku fraktur, namun dengan menggunakan standar pengujian ATSM tidak dapat diaplikasikan pada kelongsong elemen bahan nuklir yang bentuk silinder dan memiliki ketebalan dinding yang tipis (dalam ukuran millimeter) dan mengalami tekanan dari dalam selama penggunaannya. Geometri dan beban kondisi operasi seperti inilah yang membatasi pengaplikasian konsep mekanika fraktur untuk memperoleh parameter fraktur yang benar pada silinder dengan dinding yang tipis^[12]. Metode yang dapat digunakan untuk mengevaluasi fraktur mekanik adalah metode *pin-load-testing* (PLT) dan *vallecitos embedded charpy* (VEC)^[3,12].

Dalam pembuatan sampel pengujian memerlukan perhatian sehingga pengujian dapat memberikan hasil yang benar. Pembuatan sampel dalam ASTM dapat dilakukan dengan menggunakan system penekanan, namun ketika diaplikasikan pada logam akan menghasilkan cacat geser atau kerja dingin yang signifikan sepanjang tepi sampel. Hal ini dapat dihilangkan dengan melakukan penghalusan menggunakan gerinda. Untuk meminimalisasi cacat geser atau kerja dingin pada sampel, pembuatannya dapat menggunakan mesin EDM (*electrical discharge machining*), mesin frais atau mesin wire cutting^[4].

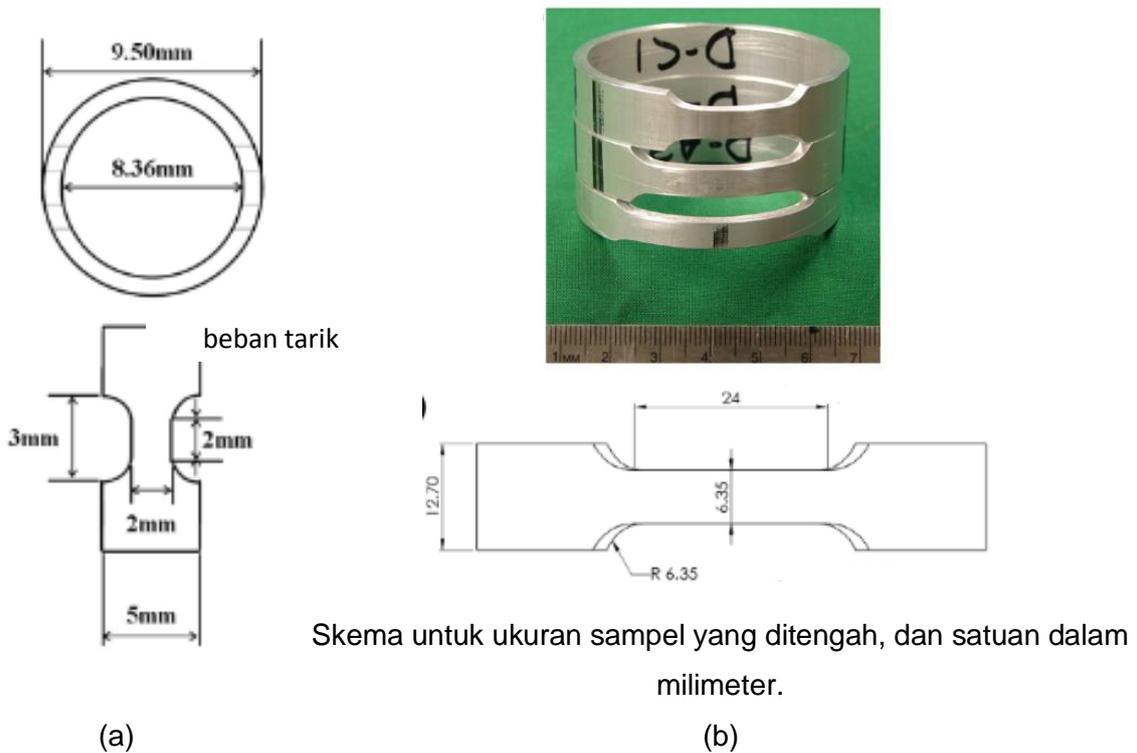
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian Tarik *Ring* (Tranversal)

Dalam referensi^[10] digunakan berbagai jenis *mandrel* untuk meregangkan sampel uji tarik *ring* tanpa mengalami pelekukan. Analisis *finite element* dilakukan pada hasil pengujian untuk mengetahui faktor yang mempengaruhi pengujian seperti pengaruh terhadap gesekan yang dibandingkan hasilnya dengan eksperimen. Kelongsong zirkaloi yang digunakan sebagai bahan uji tarik *ring* diberi lekukan *gage* dalam rangka membatasi daerah deformasi dalam daerah tertentu saja dan untuk memaksimalkan keseragaman distribusi regangan pada daerah tersebut^[10]. Pada pengujian tarik *ring* yang menggunakan tabung baja, selama proses penarikan diukur menggunakan ekstensometer^[10]. Desain *grip* untuk pengujian tarik *ring* dibentuk berupa silinder yang dibagi dua dengan tujuan untuk mempertahankan kelengkungan sampel selama proses deformasi. Kajian terhadap distribusi spatial regangan setelah pengujian juga dilakukan dengan menganalisis *grip* yang digunakan. *Grip* tersebut dibuat dari bahan AerMet 100 yang memiliki nilai kekerasan Rockwell sebesar 55^[6]. Dalam pelaksanaan pengujian tarik, permukaan *grip* dapat dilumasi dengan pelumas grafit untuk meminimalisasi gesekan antara sampel dengan *grip*^[3]. Dari kurva tegangan-regangan yang diperoleh dapat ditentukan keseragaman dan total pertambahan panjang. Skematik dari *grip* untuk pengujian tarik *ring* disajikan pada Gambar 1 dan Gambar 2.



Gambar 1. Skematik desain *grip* (a) setengah silinder^[3] dan (b) blok D^{[2],[10]}.



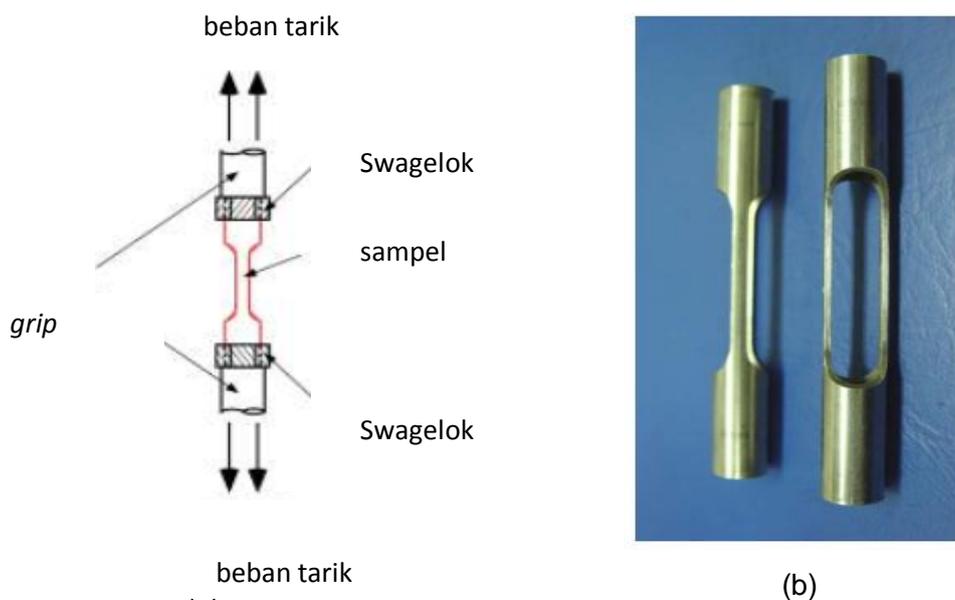
Gambar 2. Skematik sampel *dogbone*(a) *doublelegage*^[8] dan (b) *singlelegage*^{[2],[10]}.

Pengujian tarik *ring* pada paduan aluminium dan pada kelongsong zirkaloi-2 serta Zr-2,5%Nb oleh peneliti terdahulu menggunakan desain *grip* yang serupa.^{[10],[12]} Diameter dalam kelongsong zirkaloi yang digunakan sebesar 83 mm dengan ketebalan sebesar 4,3 mm. Kelongsong diberikan perlakuan tekanan dalam hingga 10 MPa pada temperatur 300 °C dan disimulasikan pada lingkungan yang korosif. Dari studi tersebut disimpulkan bahwa pengujian tarik *ring* merupakan metode yang sangat handal dan sangat tepat

dalam melakukan evaluasi data tegangan regangan dari pengujian. Pengujian tarik *ring* telah dikonfirmasi dengan melakukan pengujian tarik mini pada sampel pelat yang dibentuk dari sisi melingkar kelongsong. Pengujian tarik terhadap paduan Zr-Nb dengan komposisi Zr-1,0Nb-1,0Sn-0,1Fe-0,12O dengan diameter luar sebesar 9,50 mm dan ketebalannya sebesar 0,57 mm telah dilakukan dalam rangka mempelajari bagaimana pengaruh kandungan hidrogen terhadap reorientasi hidrida dan menganalisis tegangan tarik melingkar terhadap reorientasi hidridanya^[8]. Studi tersebut menunjukkan sampel yang teroksidasi akan menghasilkan fraksi radial hidrida yang lebih rendah dengan ukuran hidrida yang lebih pendek dibandingkan sampel yang tidak teroksidasi. Namun, penyebab mengenai terjadinya hal tersebut belum dikaji lebih lanjut^[8]. Dugaan hal tersebut sangat erat berhubungan dengan kelarutan hidrogen yang bergantung oksigen dan energi nukleasi dari hidrida radial.

Pengujian Tarik Longitudinal

Evaluasi terhadap sifat mekanik kelongsong dalam arah longitudinal telah dilakukan dengan didesain sampel berbentuk *dogbone*^[3]. Sampel bentuk *dogbone* memiliki luas penampang lintang yang kecil, sehingga beban menjadi lebih kecil dan dapat diakomodasi oleh *fitting* Swagelok dan tidak akan menyebabkan slip dengan *grip* mesin uji tarik. Pembentukan sampel tabung *dogbone* dibuat dengan perbandingan panjang dengan lebar *gage* lebih dari 4 untuk memaksimalkan keseragaman regangan pada daerah *gage*. Pada Gambar 3 menyajikan skematik *grip* dan sampel pengujian tarik longitudinal.

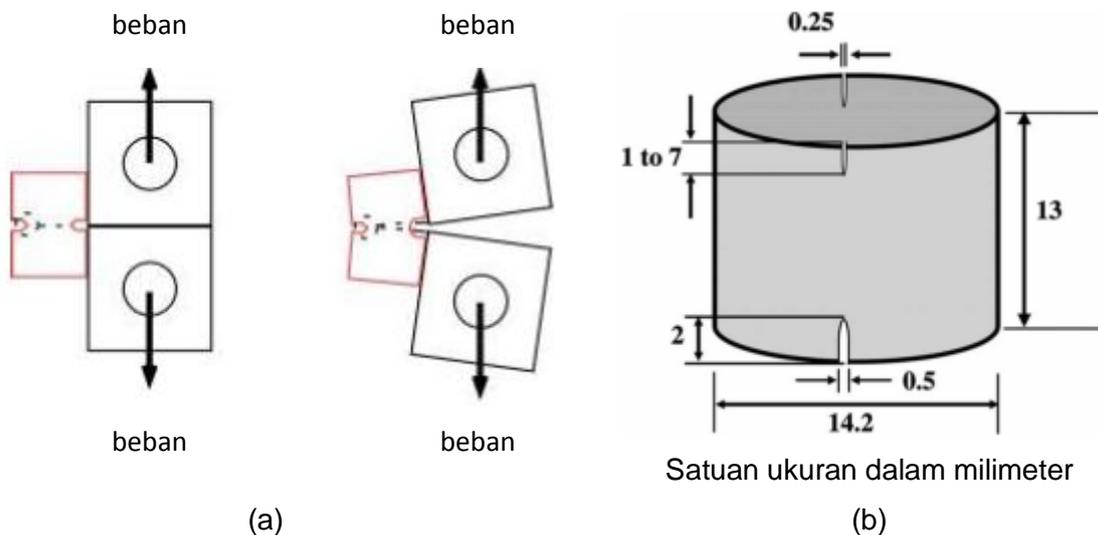


Gambar 3. (a) skematik desain pengujian tarik longitudinal dan (b) sampel longitudinal^[6].

Pembuatan menggunakan mesin *electric discharge machine* (EDM)^[6] dengan panjang *gage* sebesar 12,5 mm dan lebarnya sebesar 3 mm. *Fitting* Swagelok model SS-600-7-12^[11] digunakan sebagai pembantu pemegang sampel.

Pengujian *Pin-Loading Tension* (PLT)

Pengujian PLT dikembangkan untuk mengevaluasi ketangguhan fraktur dari bahan berbentuk tabung dengan ketebelan dinding yang tipis. Sampel tabung diberikan *pre-crack* Mode 1 serupa dengan yang diberikan pada sampel *pin loading* dari pengujian kompaksi^[13]. Gambar 4 menyajikan skematik *grip* pengujian PLT dan sampel yang digunakan dalam pengujiannya.



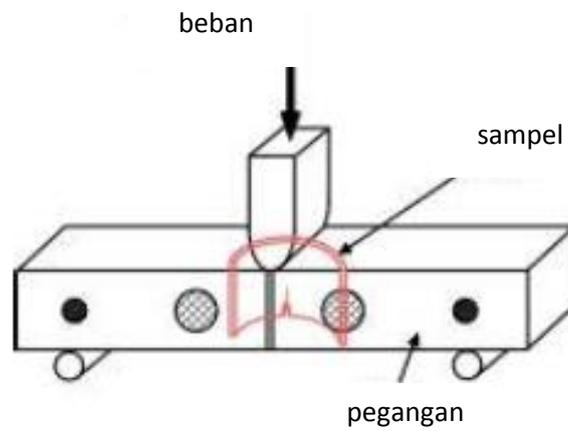
Gambar 4. (a) Skematik *grip* pengujian PLT^[3] dan (b) sampel tabung PLT^[12].

Pengukuran secara kontinu terhadap pertumbuhan *crack* selama pengujian salah satu metode yang digunakan adalah *direct current potential drop* (DCPD). Dalam analisisnya digunakan parameter Integral-J yang merupakan kuantitas dari nonlinear elastik yang dapat dihitung dari kurva beban terhadap perpindahan garis beban sesuai dengan prosedur yang tertuang dalam ASTM E 1820^[13]. PLT pada kelongsong paduan zirkaloi-2 dan zirkaloi-4 dengan berbagai diameter dan ketebalan telah dilakukan^[12]. Dari studi tersebut diperoleh bahwa perilaku ketahanan fraktur sangat bergantung pada kondisi awal tegangan pada ujung dari *pre-crack*^[12]. PLT dengan mengevaluasi kurva J-R pada kelongsong paduan zirkaloi-2 dengan diameter dalam sebesar 12,4 mm dengan ketebalan dindingnya sebesar 0,9 mm yang digunakan sebagai kelongsong elemen bakar nuklir reaktor *boiling water reactor* (BWR) telah dilakukan^[15]. Dari evaluasi tersebut sangat direkomendasikan teknik normalisasi beban pada specimen tunggal untuk mengevaluasi

kurva J-R. Hal tersebut dikarenakan dalam penyusunan parameter integral-J dan pertumbuhan *crack* diperoleh dari sebuah spesimen.

Pengujian *Vallecitos Embedded Charphy (VEC)*

Pengujian fraktur selain PLT adalah VEC. Pada pengujian VEC sampel berupa segmen dari tabung yang dipotong dan dimasukkan ke pegangan yang berbentuk batang dengan ukuran yang serupa dengan sampel untuk pengujian impak Charpy (10x10x55 mm). Sampel VEC diperlakukan seperti sampel standar untuk ketangguhan fraktur dengan pengujian tekuk 3 titik. Pada Gambar 5 disajikan skematik pengujian VEC



Gambar 5. Skematik pengujian VEC ^[3].

Sampel untuk pengujian tekuk 3 titik diberikan takik tunggal seperti yang tertuang pada ASTM E 1820. Dari pengujian ini dapat dievaluasi mengenai K (faktor intensitas tegangan untuk *crack* mode 1), J atau *crack-tip opening displacement (CTOD)*^[14].

Dari empat metode yang disampaikan sangat perlu diperhatikan pembuatan sampel dan perangkat pengujian yang digunakan dalam PIE berada di dalam *hot cell*. Kemudahan preparasi sampel dan pemasangan pada perangkat pengujian perlu dipertimbangkan dengan baik, mengingat semua aktivitas di dalam *hot cell* dilakukan menggunakan manipulator.

KESIMPULAN

Pengujian karakteristik *ductile* dan fraktur mekanik pada bahan kelongsong elemen bakar nuklir yang berbentuk tabung dapat dilakukan tanpa melakukan pemipihan menjadi bentuk pelat. Pengujian *ductile* dilakukan dengan pengujian tarik transversal (*ring*) dan longitudinal (*silinder*). Pengujian tarik transversal telah menunjukkan kehandalan dan dapat dikonfirmasi dengan baik terhadap data pengujian tarik dengan

bentuk sampel pelat. Pengujian tarik longitudinal memerlukan sampel uji yang lebih banyak dan pembuatannya yang relatif lebih kompleks dibanding pengujian tarik transversal. Pengujian fraktur pada sampel bentuk tabung menggunakan pengujian PLT memerlukan analisis yang lebih kompleks. Hasil pengujian dapat menunjukkan perilaku ketahanan fraktur dan sangat bergantung pada kondisi awal tegangan pada ujung *pre-crack*-nya. Pengujian ketahanan fracture dengan teknik VEC, memperlakukan potongan segmen dari kelongsong seperti pengujian tekuk 3 titik. Standar dalam menganalisis hasil pengujian ketahanan fraktur tertuang pada ASTM E 1820.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih penulis ucapkan kepada Ir. Suprijono dan Ir. Budi Briyatmoko, M.Eng sebagai penanggungjawab subkegiatan pengujian tarik dan dampak elemen bakar nuklir.

DAFTAR PUSTAKA

1. M. Beauvy, G. Berthoud, M. Defranceschi, G. Ducros, Y. Guérin, Y. Limoge, and C. Madic, *Nuclear fuels*. 2009.
2. M. Samal, K. Balakrishnan, J. Parashar, G. Tiwari, and S. Anantharaman, *Estimation of transverse tensile behavior of Zircaloy pressure tubes using ring-tensile test and finite element analysis*, Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci., vol. 227, no. 6, pp. 1177–1186, 2013.
3. D. Kim, S. J. Baik, B. O. Yoo, Y. S. Choo, S. B. Ahn, and Y. B. Chun, *Ductility and Fracture Toughness Test Techniques of Irradiated Cladding in a Hot Cell*, pp. 77–78, 2008.
4. ASTM Int., *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials 1*, Astm, no. C, pp. 1–27, 2009.
5. ASTM Int., *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*, Astm, vol. 14, 2001.
6. D. Kim, S. B. Ahn, W. H. Oh, B. O. Yoo, Y. S. Choo, K. P. Hong, and S. K. Kim, *Advanced Tensile Test Techniques of Cladding Tube in Hot Cell*, no. mm, pp. 4–5, 2005.
7. H. G. Kim, B. K. Choi, S. Y. Park, Y. Il Jung, D. J. Park, and J. Y. Park, *Post irradiation examination of HANA claddings after research reactor test up to 34 GWD/MTU*, J. Nucl. Mater., vol. 426, no. 1–3, pp. 173–181, 2012.
8. H. J. Cha, J. J. Won, K. N. Jang, J. H. An, and K. T. Kim, *Tensile hoop stress-, hydrogen content- and cooling rate-dependent hydride reorientation behaviors of Zr alloy cladding tubes*, J. Nucl. Mater., vol. 464, pp. 53–60, 2015.

9. H. Jiang and J. A. J. Wang, *Methodology for mechanical property testing of fuel cladding using an expanding plug wedge test*, J. Nucl. Mater., vol. 446, no. 1–3, pp. 27–37, 2014.
10. C. P. Dick and Y. P. Korkolis, *Mechanics and full-field deformation study of the Ring Hoop Tension Test*, Int. J. Solids Struct., vol. 51, no. 18, pp. 3042–3057, 2014.
11. D. S. Kim, S. B. Ahn, W. H. Oh, B. O. Yoo, Y. S. Choo, K. P. Hong, and S. K. Kim, *Tensile Test Techniques for a Nuclear Fuel Cladding in a Hot Cell*, Key Eng. Mater., vol. 345–346, pp. 1561–1564, 2007.
12. M. K. Samal, G. Sanyal, and J. K. Chakravartty, *An experimental and numerical study of the fracture behaviour of tubular specimens in a pin-loading-tension set-up*, Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci., vol. 224, no. 1, pp. 1–12, 2010.
13. X. K. Zhu and J. A. Joyce, *Review of fracture toughness (G, K, J, CTOD, CTOA) testing and standardization*, Eng. Fract. Mech., vol. 85, pp. 1–46, 2012.
14. ASTM Int., *Measurement of Fracture Toughness 1*, Current, vol. 03, no. August, pp. 8–9, 2001.
15. Sanyal, G., M., K., Samal, J., K., Chakravartty, K.,K., Ray, A.,K., Suri, and S., Banerjee. *Prediction of J-R Curves of Thin-walled Fuel Pin Specimens in a PLT Setup*, Eng. Fract. Mech., vol. 78, pp. 1029–1043, 2011.