

KAJIAN PENGUJIAN MEKANIK PADA BAHAN STRUKTUR ELEMEN BAKAR NUKLIR

Jan Setiawan

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir – BATAN, Indonesia

jansetiawan@batan.go.id

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 charphy* (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

Abstract

STUDY ON MECHANICAL TEST OF NUCLEAR FUEL STRUCTURE MATERIAL. Degradation on mechanical properties of nuclear fuel element structure material in this case is cladding, primary in accident conditions such as reactivity initiated accident (RIA) and loss of coolant accident (LOCA) become main concern due to its associated to safety operation. Mechanical testing that simulated the degradation mechanism became important. In this study, briefly explained the tensile and fracture test for cladding and the sample in circumference form. The tensile tests that applicable are ring (transversal) and longitudinal tensile test. Both of samples for these tests also be formed a dogbone gage in order to limiting the deformation area and maximized the uniformity strain distribution. Fracture testing that applicable are pin-load testing (PLT) and vallecitos embedded charphy (VEC). Both of samples for these tests need a pre-crack comply to the ASTM E 1280.

Keywords: tensile, fracture, structure material of nuclear fuel element, cladding, aluminum alloy, zircalloy.

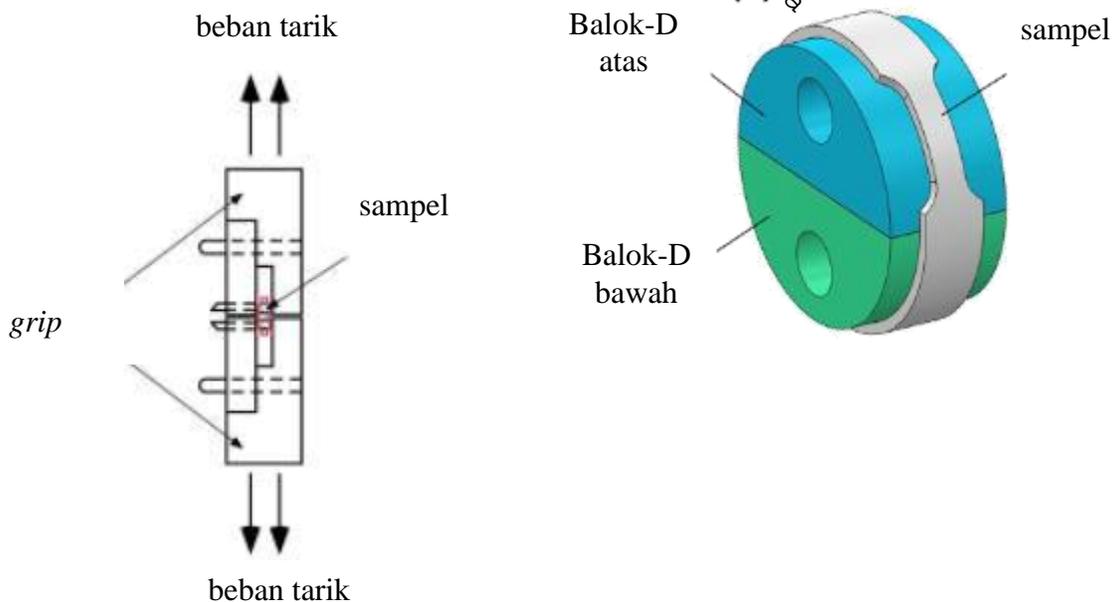
Pendahuluan

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 untuk uji tarik untuk bahan logam menggunakan ASTM E8. ASTM E8 telah mencakup bentuk sampel untuk bahan struktur elemen bakar berbentuk pelat dan pipa. Untuk ukuran sampelnya juga telah mencakup dari ukuran normal maupun yang *subsize* [4]. Pembuatan sampel logam yang menggunakan sistem penekan akan menghasilkan cacat geser atau kerja dingin yang signifikan sepanjang tepi sampel. Hal ini dapat dihilangkan dengan melakukan penghalusan menggunakan gerinda. Pembuatan sampel dengan cacat geser atau kerja dingin yang lebih sedikit dapat menggunakan mesin EDM (*electrical discharge machining*), mesin frais atau mesin *wire cutting*. Standar pengujian untuk uji impak menggunakan ASTM E23 adalah pengujian impak dengan batang yang diberi tarik untuk material logam. ASTM E23 telah mencakup bentuk sampel untuk berbentuk bar 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 karakteristik dari pengujian tarik dan fraktur yang telah dilakukan pada paduan aluminum dan/atau zirkaloi sebagai bahan kelongsong elemen bakar nuklir.

Pengujian Tarik *Ring* (Tranversal)

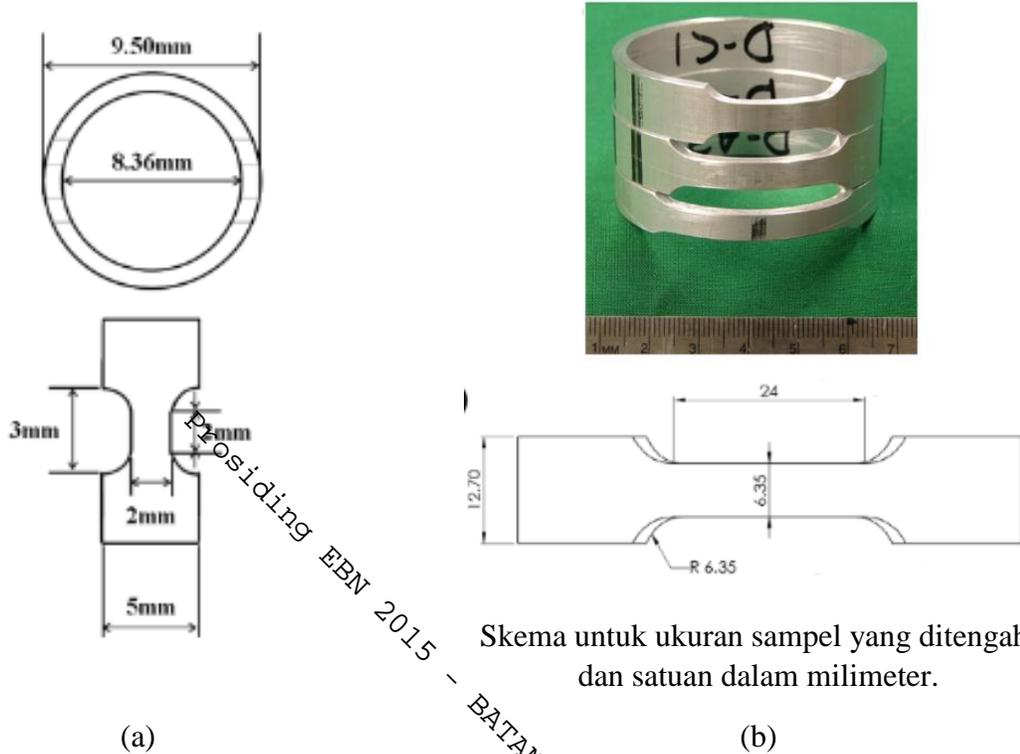
Untuk pengujian kelongsong elemen bakar nuklir untuk mengetahui kinerja dari elemen bakar nuklir dilakukan pengujian setelah diiradiasi (*post irradiation examination-PIE*). Pengujian tarik dilakukan untuk mengevaluasi dari perubahan panjang, regangan dan energi regangan yang diperoleh dari pengujian tersebut. Pengujian tarik *ring* untuk bahan kelongsong elemen bakar nuklir telah dilakukan oleh banyak peneliti [2], [6]–[9]. Arsene, dkk dalam referensi [10] menggunakan berbagai jenis *mandrel* untuk meregangkan sampel uji tarik *ring* tanpa terjadi pelekukan. Keduanya menggunakan analisis elemen hingga untuk mengetahui faktor penentu mengenai pengujian ini seperti menganalisis pengaruh terhadap gesekan dan membandingkan dengan eksperimen. Sampel yang digunakan menggunakan paduan Al-Si dan zirkaloi. Begitu juga yang dilakukan oleh Link dkk dalam referensi [10] menggunakan kelongsong zirkaloi sebagai bahan uji tarik *ring*. Sampel untuk pengujian tarik *ring* dilakukan pada arah melingkar, diberi lekukan *gage* dalam rangka membatasi daerah deformasi dalam daerah tertentu saja dan untuk memaksimalkan keseragaman distribusi regangan pada daerah tersebut. Wang, dkk dalam referensi [10] melakukan uji tarik *ring* menggunakan tabung baja, dimana selama proses penarikan diukur menggunakan ekstensometer. Analisis grid lingkaran digunakan dilakukan untuk mengkaji distribusi spasial regangan setelah pengujian. Desain dari *grip* dibentuk berupa silinder yang dibagi dua dengan tujuan untuk mempertahankan kelengkungan sampel selama proses deformasi. Dosik, dkk membuat *grid* tersebut dari bahan AerMet 100 dengan nilai kekerasan Rockwell sebesar 55 [6]. Sampel yang diletakkan ada *grip* tersebut dan ditarik. Untuk meminimalisasi gesekan antara sampel dengan grip, permukaan grip dapat dilumasi dengan pelumas grafit [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 pada Gambar 2 menyajikan skematik sampel untuk uji tarik *ring*.



(a)

(b)

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



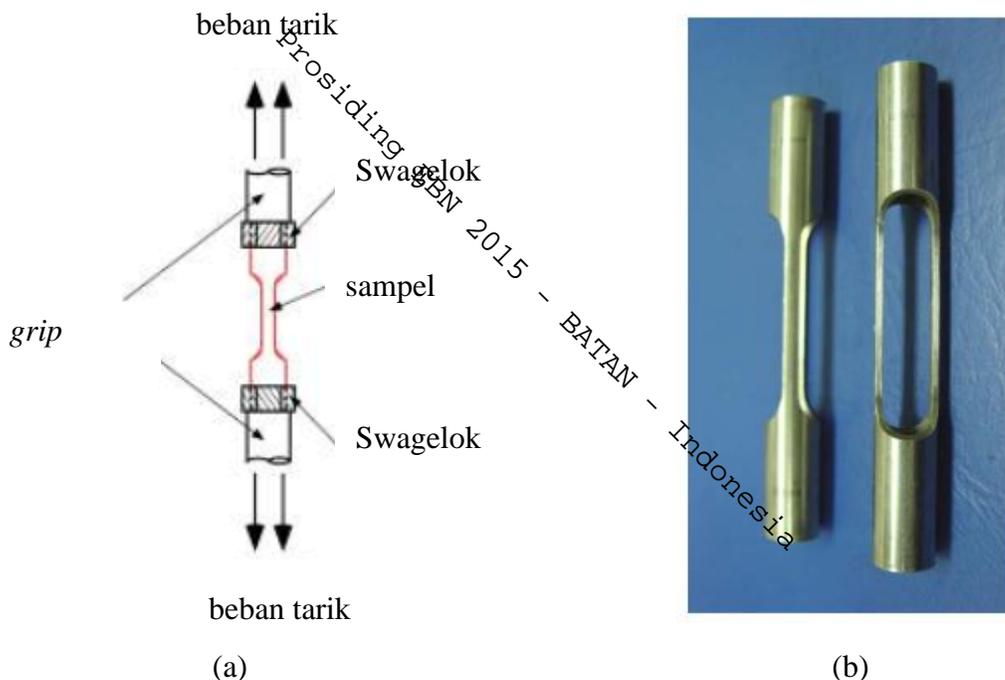
Gambar 2. Skematik sampel *dogbone* (a) *double gage* [8] dan (b) *single gage* [2], [10].

Samal, dkk melakukan pengujian tarik *ring* pada kelongsong zirkaloi-2 dan Zr-2,5%Nb dan CP dick, dkk yang menggunakan paduan aluminum sebagai sampelnya, dimana keduanya menggunakan desain *grip* yang serupa. Samal, dkk menggunakan diameter kelongsong yang digunakan memiliki diameter dalam sebesar 83 mm dengan ketebalan sebesar 4,3 mm. Kelongsong ini diberikan perlakuan tekanan dalam hingga 10 MPa pada temperatur sebesar 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. Hyun-jin, dkk melakukan 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. Pengujian tersebut dilakukan dalam rangka mempelajari bagaimana pengaruh kandungan hidrogen terhadap reorientasi hidrida dan menganalisis tegangan tarik melingkar terhadap reorientasi hidridanya. Dari studi tersebut menunjukkan sampel yang teroksidasi akan menghasilkan fraksi radial hidrida yang lebih rendah dan hidrida yang lebih pendek dibandingkan

sampel yang tidak teroksidasi. Penyebab akan hal tersebut belum dikaji lebih lanjut. Namun, hal tersebut 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 sampel yang didesain dengan *dogbone* [3]. Sampel dengan *dogbone* dibuat dengan luas penampang lintang yang kecil sehingga beban menjadi lebih kecil dapat diakomodasi *fitting* Swagelok dan tidak terjadi slip dengan *grip*. 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 longitudinal.

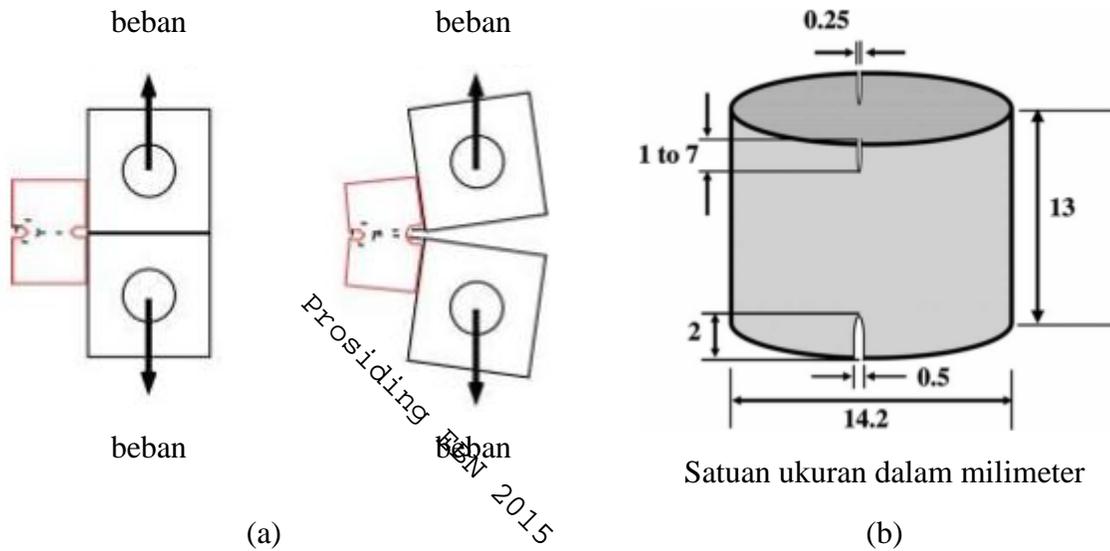


Gambar 3. (a) skematik desain pengujian tarik longitudinal dan (b) sampel longitudinal [6].

D. Kim, dkk membuat sampel menggunakan mesin *electric discharge machine* (EDM) dengan panjang *gage* sebesar 12,5 mm dan lebarnya sebesar 3 mm. Desain *grip* menggunakan bantuan *fitting* Swagelok model SS-600-7-12 [11]. Pembuatan *grip* diharapkan tidak ada *slip* selama pengujian berlangsung dan untuk pengujian pasca iradiasi diperlukan kemudahan untuk ditangani menggunakan manipulator di dalam *hotcell*.

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. Gambar 4 menyajikan skematik *grip* pengujian PLT dan sampel tabung untuk pengujiannya.

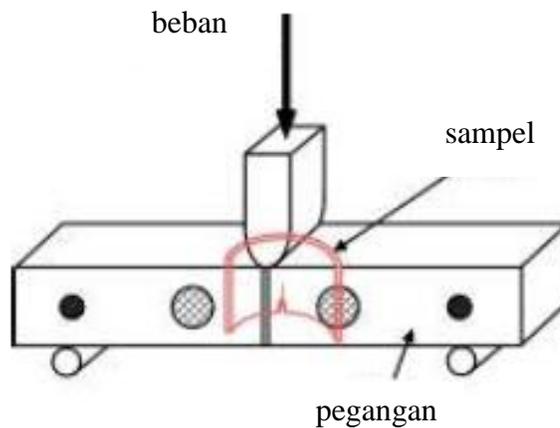


Gambar 4. (a) Skematik *grip* pengujian PLT [3] dan (b) sampel tabung PLT [12].

Pengukuran secara kontinu terhadap pertumbuhan *crack* selama pengujian digunakan metode *direct current potential drop* (DCPD). 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]. Samal, dkk melakukan PLT pada kelongsong paduan zirkaloi-2 dan zirkaloi-4 dengan berbagai diameter dan ketebalan. Dari studi tersebut diperoleh bahwa perilaku ketahanan fraktur sangat bergantung pada kondisi awal tegangan pada ujung *crack*.

Pengujian *Vallecitos Embedded Charpy* (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].

Kesimpulan

Tujuan dari kegiatan ini adalah merupakan kajian mengenai karakteristik pengujian tarik dan fraktur dari paduan aluminum dan zirkaloi yang digunakan sebagai bahan struktur elemen bakar nuklir. Pengujian tarik transversal telah menunjukkan sebagai pengujian yang handal dan dapat dikonfirmasi dengan baik dengan 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 dapat menggunakan pengujian PLT memerlukan analisis yang lebih kompleks dan hasil pengujian menunjukkan perilaku ketahanan fraktur yang ditunjukkan dari pengujian PLT sangat bergantung pada kondisi awal tegangan pada ujung *crack*-nya. Ketahanan fraktur dapat dilakukan dengan pengujian VEC yang memperlakukan potongan segmen dari kelongsong seperti pengujian tekuk 3 titik. Standar untuk 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 impak 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. Chakravarty, “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.