

Urania

Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir

Beranda jurnal: <http://jurnal.batan.go.id/index.php/urania/>



UJI PASCA IRADIASI PELAT ELEMEN BAKAR U_3Si_2/Al DENSITAS $4,8 \text{ gU/cm}^3$ PADA *BURNUP* 60%: PENGAMATAN VISUAL, RADIOGRAFI SINAR-X DAN ANALISIS CITRA

Rohmad Sigit¹, Refa Artika¹, Helmi Fauzi Rahmatullah¹,
Sri Ismarwanti¹, Aslina Br.Ginting¹, Supardjo¹

¹Pusat Riset Teknologi Daur Bahan Bakar Nuklir dan Limbah Radioaktif – BRIN
Kawasan Sains dan Teknologi B.J. Habibie, Gd.20 Tangerang Selatan, Banten 15314
roh013@brin.go.id

(Naskah diterima: 14–10–2022, Naskah direvisi: 24–10–2022, Naskah disetujui: 31–10–2022)

ABSTRAK

UJI PASCA IRADIASI PELAT ELEMEN BAKAR U_3Si_2/Al DENSITAS $4,8 \text{ gU/cm}^3$ PADA *BURNUP* 60%: PENGAMATAN VISUAL, RADIOGRAFI SINAR-X DAN ANALISIS CITRA.

Pengembangan bahan bakar U_3Si_2/Al densitas tinggi telah dilakukan melalui peningkatan densitas bahan bakar nuklir dari $2,96 \text{ gU/cm}^3$ menjadi $4,8 \text{ gU/cm}^3$. Peningkatan densitas uranium memiliki dampak terhadap integritas mekanik kelongsong dan stabilitas geometri, sehingga diperlukan pengujian pascairadiasi. Pengujian pascairadiasi yang dilakukan meliputi pengamatan visual, uji radiografi sinar-X dan analisis citra pada Pelat Elemen Bakar (PEB). Pengamatan visual sepanjang permukaan PEB dilakukan menggunakan periskop yang terdedikasi di *operating area hot cell* 102 dan didokumentasikan dengan bantuan kamera melalui jendela *hot cell*. Pengujian radiografi sinar-X dilakukan pada tegangan 150 kV dan kuat arus 1500 μA . Citra yang dihasilkan dianalisis lebih lanjut menggunakan *software ImageJ*. Pengamatan visual tidak menemukan indikasi cacat permukaan, lapisan oksida yang berlebih, *swelling*, *blister*, maupun cacat permukaan lainnya. Interpretasi citra radiografi sinar-X menunjukkan profil bahan bakar yang homogen, tidak menemukan indikasi cacat sub-permukaan, serta menghasilkan profil *burn up* yang sesuai dengan hasil pengujian *gamma scanning*. Berdasarkan hasil pengujian tak merusak, secara keseluruhan PEB U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ selama iradiasi di teras RSG-GAS menunjukkan kinerja yang cukup baik.

Kata kunci: Uji pasca iradiasi, PEB U_3Si_2/Al , pengamatan visual, radiografi sinar-X, analisis citra.

ABSTRACT

POST-IRRADIATION EXAMINATION OF U_3Si_2/Al FUEL WITH 4,8 gU/cm³ DENSITY AND 60% BURNUP: VISUAL INSPECTION, X-RAY RADIOGRAPHY AND IMAGE ANALYSIS. The development of high density U_3Si_2/Al fuels has been carried out by increasing the fuel density from 2.96 gU/cm³ to 4.8 gU/cm³. Increasing the density of uranium has an impact on the mechanical integrity of the cladding and its geometric stability, so a post-irradiation examination is required. The post-irradiation examination carried out included visual inspection, X-ray radiographic tests, and image analysis. Visual inspection of the fuel surface was performed using a dedicated periscope in the operating area of hot cell 102 and documented using a camera through the hot cell window. X-ray radiographic test using the voltage and current parameters at 150 kV and 1500 μA , respectively. The radiographic image is further analyzed using ImageJ software. Based on visual inspections, no blisters, swelling, excessive oxide layer, or other surface defects were found. The interpretation of X-ray radiographic images clearly shows a homogeneous fuel profile, no evidence of sub-surface defects, and a burn-up profile that matches the results of the gamma scanning test. Based on non-destructive post-irradiation examination, the overall performance of the PEB U_3Si_2/Al density of 4.8 gU/cm³ during irradiation on the RSG-GAS core was excellent.

Keywords: Post-irradiation, U_3Si_2/Al fuel, visual inspection, x-ray radiography, image analysis.

Uji Pasca Iradiasi Pelat Elemen Bakar U_3Si_2/Al Densitas 4,8 gU/cm³ Pada *Burnup* 60%:

Pengamatan Visual, Radiografi Sinar-X dan Analisis Citra

(Rohmad Sigit, Refa Artika, Helmi Fauzi Rahmatullah, Sri Ismarwanti, Aslina Br. Ginting, Supardjo)

PENDAHULUAN

Organisasi Riset Tenaga Nuklir (ORTN) Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) melalui Pusat Riset Teknologi Nuklir dan Limbah Radioaktif (PRTDDBNLR) telah mengembangkan bahan bakar silisida U_3Si_2/Al densitas tinggi yang dijadikan kandidat pengganti bahan bakar nuklir yang digunakan di Reaktor Serba Guna-G.A Siwabessy (RSG-GAS) saat ini. Peningkatan densitas bahan bakar nuklir dari 2,96 gU/cm³ menjadi 4,8 gU/cm³ salah satunya bertujuan untuk peningkatan efisiensi manajemen bahan bakar melalui penyesuaian periode *refuelling* menjadi lebih lama. Peningkatan densitas uranium juga akan berdampak terhadap integritas mekanik kelongsong dan stabilitas geometri, sehingga diperlukan pengujian pasca iradiasi untuk mengevaluasi unjuk kerja selama iradiasi di dalam teras RSG-GAS[1]-[3].

Salah satu fasilitas uji pasca iradiasi yang dimiliki oleh PRTDDBNLR adalah Instalasi Radiometalurgi (IRM) yang memiliki fasilitas pengujian tak merusak dan uji merusak beserta rangkaian peralatan bantu lainnya [4]-[6]. Pengujian pasca iradiasi IRM telah berperan dalam riset pengembangan bahan bakar nuklir baik untuk reaktor riset maupun reaktor daya beserta komponen dukungannya. Pengujian tak merusak, metalografi dan pengujian fisikokimia telah dilakukan untuk elemen bakar uji U_3Si_2/Al densitas 4,8 gU/cm³ pasca iradiasi *burnup* 40% dan *short pin PWR fuel dummy* [7]-[16].

Melanjutkan keberhasilan dalam pengujian pasca iradiasi bahan bakar U_3Si_2/Al densitas 4,8 gU/cm³ pasca iradiasi *burnup* 40% yang telah dilakukan sebelumnya, pengujian pasca iradiasi terhadap bahan bakar U_3Si_2/Al densitas 4,8 gU/cm³ pasca iradiasi *burnup* 60% dilakukan untuk mendapatkan data unjuk kerja dan perilaku bahan bakar selama iradiasi. Pengujian tak merusak pada PEB U_3Si_2/Al densitas 4,8 gU/cm³ pasca iradiasi *burnup* 60% yang dilakukan pada penelitian ini meliputi pengamatan visual, uji radiografi sinar-X dan analisis citra. Data yang dihasilkan melalui pengujian pasca iradiasi tersebut akan menjadi bagian dari dokumen persyaratan persiapan sertifikasi produk purwarupa bahan bakar PEB U_3Si_2/Al densitas 4,8 gU/cm³. Selain itu, metode uji yang digunakan dapat diterapkan dalam evaluasi kinerja bahan bakar selama iradiasi di RSG-GAS.

METODOLOGI

Pengujian pasca iradiasi dilakukan setelah sebelumnya PEB U_3Si_2/Al densitas 4,8 gU/cm³ diiradiasi di RSG-GAS dan dikirim ke *hot cell* IRM melalui kanal hubung. Pengujian yang dilakukan adalah pengujian tak merusak yang meliputi pengamatan visual dan pengujian menggunakan radiografi sinar-X. Pengamatan visual sepanjang permukaan PEB dilakukan menggunakan periskop yang terdedikasi di *operating area hot cell* 102 dan didokumentasikan dengan bantuan kamera DSLR Canon 7 melalui jendela *hot cell*.

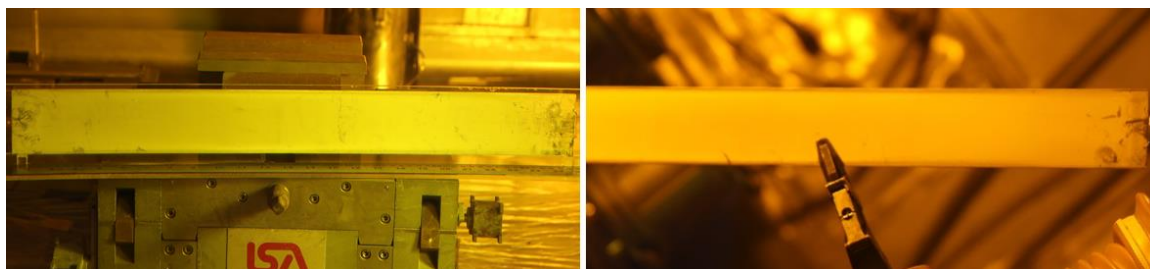
Langkah selanjutnya, PEB ditransfer menuju *hot cell* 103 dengan bantuan *transport trolley* untuk pengujian radiografi sinar-X digital menggunakan *Diondo X-Ray Inspection System*. PEB U_3Si_2/Al diletakkan pada *sample holder* dengan tinggi 60 cm terhadap panel detektor. Pengujian dilakukan per segmen PEB pada tegangan 150 kV dan kuat arus 1500 μA hingga didapatkan citra permukaan PEB secara utuh. Citra yang dihasilkan melalui pengujian radiografi sinar-X digital dianalisis lebih lanjut menggunakan *software ImageJ* untuk mendapatkan data homogenitas sebaran meat bahan bakar, profil *burnup* arah aksial serta dimensi PEB pascairadiasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Pengamatan Visual

Pengamatan visual terhadap PEB U_3Si_2/Al densitas 4,8 gU/cm³ pasca iradiasi *burnup* 60% dilakukan di *hot cell* 102 IRM menggunakan kamera digital dengan bantuan lensa makro untuk mendapatkan detail visual permukaan PEB. Hasil pengamatan visual secara keseluruhan dan per segmen PEB ditunjukkan pada Gambar 1 dan 2.

Hasil pengamatan visual pada beberapa bagian, baik yang terlihat pada Gambar 1 maupun Gambar 2, menunjukkan indikasi perubahan warna yang disebabkan oleh efek penanganan, baik selama pengambilan sampel dari teras RSG-GAS, transfer PEB dari RSG-GAS ke *hot cell* IRM, transfer antar *hot cell* di IRM maupun penanganan saat pengujian. Secara keseluruhan tidak ditemukan indikasi cacat permukaan, lapisan oksida yang berlebih, *swelling*, *blister*, maupun cacat lainnya di permukaan PEB. Untuk mendapatkan data uji tak merusak secara menyeluruh, maka pengujian dilanjutkan dengan menggunakan radiografi sinar-X digital.



Gambar 1. Penampakan permukaan PEB U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ pasca iradiasi *burn up* 60%.

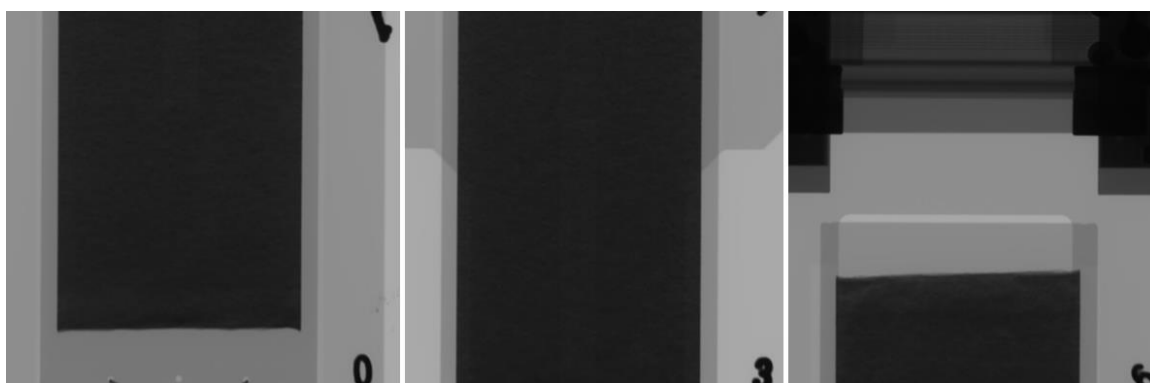


(a) (b) (c)
Gambar 2. Detail visual PEB bagian *top* (a); *middle* (b) dan *bottom* (c).

b. Radiografi Sinar-X Digital

Sebagai salah satu bentuk penegakan kesimpulan hasil uji visual, pengujian menggunakan radiografi sinar-X digital dilakukan terhadap PEB U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ pasca iradiasi *burnup* 60% di *hot cell* 103. Selain untuk mengonfirmasi bahwa indikasi perubahan warna yang terdapat pada permukaan PEB adalah dampak *handling* manipulator, bukan

akibat proses iradiasi di RSG-GAS, pengujian radiografi sinar-X dilakukan untuk mengetahui kondisi sub-permukaan PEB sekaligus mengetahui ada atau tidaknya difusi *meat* ke dalam kelongsong. Komparasi titik pengamatan uji visual menggunakan radiografi sinar-X digital pada Gambar 3 menunjukkan bahwa perubahan warna permukaan yang tampak pada pengamatan visual bukan merupakan dampak iradiasi.



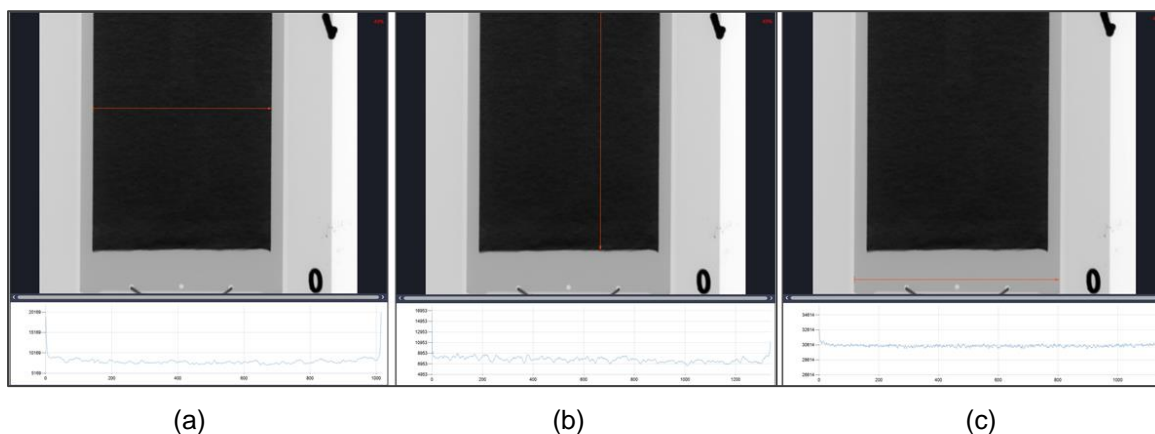
(a) (b) (c)
Gambar 3. Citra radiografi sinar-X pada bagian *top* (a); *middle* (b) dan *bottom* (c) PEB

Uji Pasca Iradiasi Pelat Elemen Bakar U_3Si_2/Al Densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ Pada *Burnup* 60%: Pengamatan Visual, Radiografi Sinar-X dan Analisis Citra (Rohmad Sigit, Refa Artika, Helmi Fauzi Rahmatullah, Sri Ismarwanti, Aslina Br. Ginting, Supardjo)

c. Analisis Citra

Analisis citra hasil radiografi sinar-X umumnya dilakukan setelah melalui proses *image enhancement* atau perbaikan kualitas citra. Secara umum, analisis citra pada PEB dilakukan terkait pemetaan distribusi *burn-up* melalui nilai *gray value* yang dihasilkan sekaligus pemetaan kemungkinan keberadaan anomali yang diduga disebabkan oleh pengaruh iradiasi. Pemetaan tersebut dijadikan dasar untuk pencuplikan sampel tambahan jika diperlukan. Karakteristik yang harus diamati pada PEB U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ *burnup* 60% pasca iradiasi salah

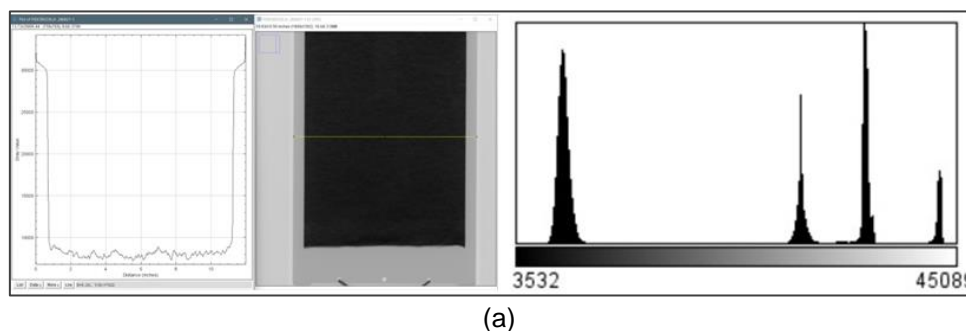
satunya adalah homogenitas sebaran *meat* bahan bakar dan integritas kelongsong. Homogenitas dapat ditentukan berdasarkan pengolahan citra hasil radiografi sinar-X menggunakan *software* pengolah citra melalui analisis *gray value*. Profil homogenitas PEB berdasarkan nilai *gray value* ditunjukkan pada Gambar 4. Berdasarkan analisa *gray value* yang dilakukan, baik pada arah horisontal *meat* dan kelongsong menunjukkan hasil yang relatif homogen, sedangkan pada arah vertikal *meat* terdapat indikasi rentang *gray value* yang sedikit lebih lebar akibat adanya pengaruh perbedaan *burnup* bahan bakar.

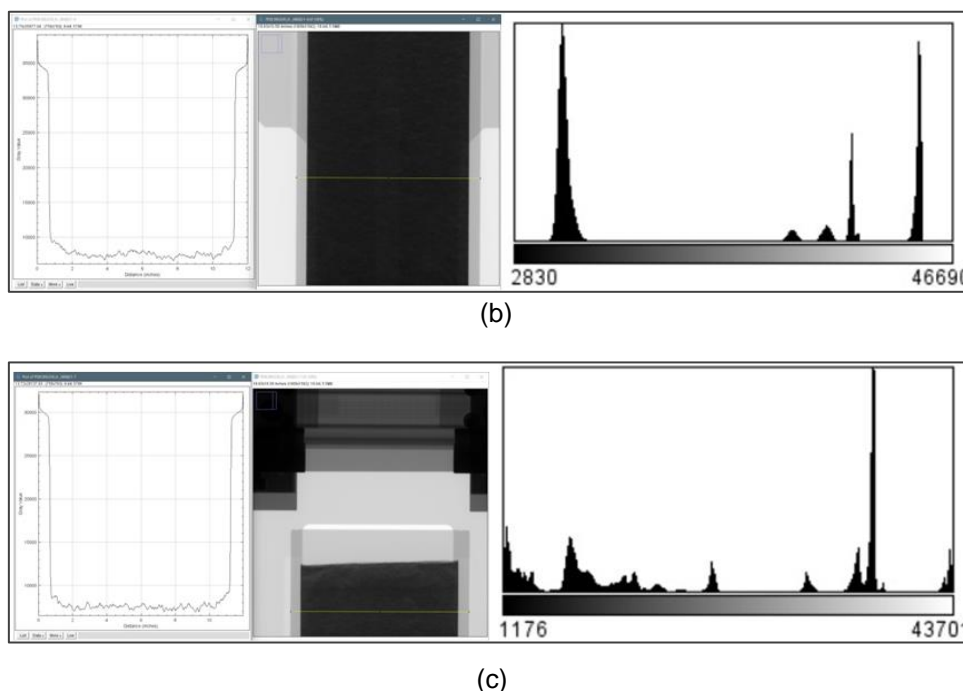


Gambar 4. Analisa *gray value* pada arah horisontal *meat* bahan bakar (a); arah vertikal *meat* bahan bakar (b); dan arah horisontal kelongsong (c).

Selain menggunakan *software* pengolah citra yang melekat pada sistem radiografi sinar-X, *image enhancement* juga dapat dilakukan menggunakan *ImageJ* yang merupakan salah satu *software open source* yang umum digunakan untuk *image enhancement* [17]. Sebaran nilai *gray value* yang cenderung lebih lebar pada arah aksial

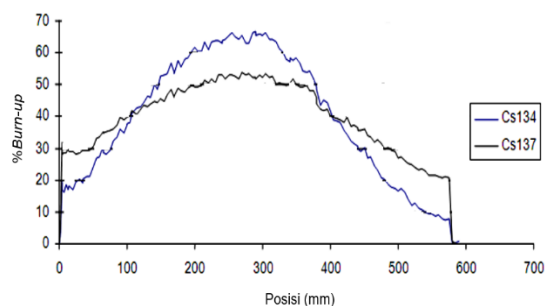
PEB menunjukkan adanya pengaruh distribusi *burnup* bahan bakar. Pengamatan distribusi *burnup* arah aksial didekati melalui analisa *gray value* pada arah aksial PEB yang ditunjukkan pada Gambar 5. Pengamatan dilakukan pada posisi *top*, *middle* dan *bottom* sesuai dengan titik sampling *default* untuk uji pasca iradiasi PEB.





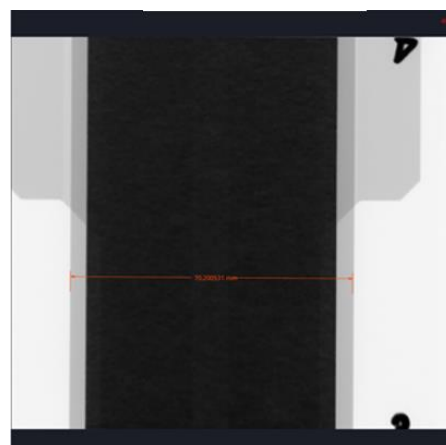
Gambar 5. Analisis *gray value* PEB pada posisi *Top* (a); *Middle* (b); dan *Bottom* (c).

Berdasarkan analisis terhadap nilai *gray value* terhadap citra radiografi sinar-X permukaan PEB, distribusi densitas relatif homogen pada arah horizontal PEB (sisi lebar), sedangkan pada arah aksial PEB, bagian *middle* menunjukkan rerata *gray value* lebih tinggi jika dibandingkan dengan nilai *gray value* pada bagian *top* dan *bottom*. Hal ini selaras dengan data pengujian menggunakan *gamma scanning* yang menunjukkan bahwa distribusi *burnup* arah aksial menghasilkan data *burnup* paling tinggi terdapat pada bagian *middle* [18]. Profil *burnup* yang diukur berdasarkan aktivitas ^{134}Cs dan ^{137}Cs sepanjang arah aksial PEB menggunakan *gamma scanning* ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Profil *burnup* pada PEB U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ [17].

Sebagai indikasi integritas kelongsong bahan bakar nuklir, maka konsistensi dimensi selama proses iradiasi harus dipenuhi oleh PEB. Konsistensi dimensi dianalisa menggunakan citra radiografi sinar-X yang dihasilkan dalam pengujian tak merusak. Beberapa titik yang krusial dalam konsistensi dimensi telah dianalisa dan salah satunya ditunjukkan oleh Gambar 7. Secara lengkap, pengukuran dimensi PEB U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ pasca iradiasi *burnup* 60% ditunjukkan pada Tabel 1.



Gambar 7. Pengukuran dimensi lebar PEB U_3Si_2/Al pasca iradiasi.

Uji Pasca Iradiasi Pelat Elemen Bakar U_3Si_2/Al Densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ Pada *Burnup* 60%:

Pengamatan Visual, Radiografi Sinar-X dan Analisis Citra

(Rohmad Sigit, Refa Artika, Helmi Fauzi Rahmatullah, Sri Ismarwanti, Aslina Br. Ginting, Supardjo)

Tabel 1. Dimensi PEB U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ pasca iradiasi *burnup* 60%.

Parameter	Dimensi (mm)
Lebar PEB	70,2005
Lebar <i>meat</i>	62,7877
Jarak <i>meat</i> - <i>cladding</i> SD	15,1357
Jarak <i>meat</i> - <i>cladding</i> SJ	12,0662
Jarak <i>meat</i> - <i>cladding</i> kiri SJ	4,2546
Jarak <i>meat</i> - <i>cladding</i> kanan SJ	4,3941
Jarak <i>meat</i> - <i>cladding</i> kiri SD	4,4638
Jarak <i>meat</i> - <i>cladding</i> kanan SD	4,1151

SIMPULAN

Hasil uji pasca iradiasi pelat elemen bakar U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ pada *burn up* 60% dapat diamati secara visual, menggunakan uji radiografi sinar-X, dan analisis citra dengan hasil yang cukup baik. PEB U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ pada *burn up* 60% menunjukkan kinerja yang cukup baik selama iradiasi di teras RSG-GAS dengan sebaran *meat* relatif merata dan integritas kelongsong masih terjaga dengan baik. Berdasarkan hasil pengujian tersebut, pencuplikan sampel untuk pengujian merusak hanya dilakukan pada tiga posisi yaitu *top*, *middle* dan *bottom*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala PRTDBBNLR dan seluruh operator dan supervisor IRM yang telah membantu pelaksanaan rangkaian kegiatan pengujian pasca iradiasi bahan bakar nuklir untuk reaktor riset.

PERNYATAAN KONTRIBUTOR

Kontributor utama dalam makalah ini adalah Rohmad Sigit, Refa Artika, Helmi Fauzi Rahmatullah dan Sri Ismarwanti.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. P. H. Liem, T. M. Sembiring, "Design of transition cores of RSG GAS (MPR-30) with higher loading silicide fuel," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 240, pp. 1433–1442, 2010.
- [2]. B. Briyatmoko, *et al.*, "PIE technique for high density U_3Si_2/Al fuel plate," *Hotlab Conference Proceeding 2015*, Leuven, Belgium.
- [3]. K. E. Metzger, T. W. Knight, E. Roberts, X. Huang, "Determination of mechanical behavior of U_3Si_2 nuclear fuel by

microindentation method," *Progress in Nuclear Energy*, vol. 99, pp. 147-154, 2017.

- [4]. J. Setiawan, S. Ismarwanti, A. Paid, H. F. Rahmatullah, R. Sigit, M. K. Ajiriyanto, "Capability of Indonesian hot cell towards pebble bed post irradiation examination," *Journal of Physics: Conference Series*, 2048, 012015, 2021.
- [5]. H. F. Rahmatullah, P. Prajitno, Sungkono, "Computer vision algorithm for identifying the post-irradiated nuclear fuel in a hotcell," *AIP Conference Proceedings*, 2381, 020014, 2021.
- [6]. H. F. Rahmatullah, R. Artika, A. G. Hutagaol, "Uji fungsi radiografi sinar-X di Instalasi Radiometalurgi," *Buletin Pengelolaan Reaktor Nuklir*, Vol. 16 No. 2, hal. 24-31, 2019.
- [7]. R. Artika, R. Sigit, H. F. Rahmatullah, A. B. Ginting, Supardjo, "Uji tak merusak pelat elemen bakar U_3Si_2/Al densitas uranium $4,8 \text{ gU/cm}^3$ menggunakan radiografi sinar-x digital," *Urania Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir*, vol. 26, no. 1, hal. 49-56, 2020
- [8]. P. H. Liem, S. Amini, A. G. Hutagaol, and T. M. Sembiring, "Nondestructive burnup verification by gamma-ray spectroscopy of LEU silicide fuel plates irradiated in the RSG GAS multipurpose reactor," *Annals Nuclear Energy*, vol. 56, pp. 57–65, 2013.
- [9]. A. B. Ginting and P. H. Liem, "Absolute burn-up measurement of LEU silicide fuel plate irradiated in the RSG GAS multipurpose reactor by destructive radiochemical technique," *Annals Nuclear Energy*, vol. 85, pp. 613–620, 2015.
- [10]. M. Fauzi, R. Himawan, H. F. Rahmatullah, S. Permana, A. Gogo, "Analisis cacat blister pada kelongsong bahan bakar U_3Si_2/Al menggunakan ultrasonic test," *Urania Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir*, vol. 23, no. 3, hal. 153-164, 2017.
- [11]. R. Sigit, R. Artika, M. K. Ajiriyanto, and T. Yulianto, "Uji tak merusak short pin PWR – fuel dummy pasca iradiasi," *Urania Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir*, vol. 26, no. 2, pp. 83–90, 2020.
- [12]. M. K. Ajiriyanto, A. B. Ginting, and Junaedi, "Analisis Metalografi Pelat

- Elemen Bakar U_3Si_2/Al ," *Urania Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir*, vol. 24, no. 1, hal. 39–50, 2018
- [13]. J. C. Sihotang, M. K. Ajiriyanto, A. S. D. Putri, E. Nurlaily, A. B. Ginting, "Study of fission gas bubbles and interaction layer on irradiated U_3Si_2-Al density of 4.8 gU/cm^3 ," *Urania : Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir*, vol. 28, no. 2, pp. 69–78, Jun. 2022.
- [14]. A. Nugroho, D. Anggraini, Boybul, S. Indaryati, I. Haryati, R. Kriswarini, A. B. Ginting, "Pemisahan cesium dalam PEB U_3Si_2/Al pasca iradiasi dengan metode kolom penukar kation menggunakan resin dowex," *Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir Urania*, vol. 24, no. 2, hal. 73–134, 2018.
- [15]. A. B. Ginting, Supardjo, Yanlinastuti, S.Indaryati, Boybul, "Perhitungan *burn up* PEB U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ pasca iradiasi potongan bagian *middle*," *Urania Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir*, vol. 25, no. 2, hal. 91–106, 2020.
- [16]. A. B. Ginting, S. Amini, Noviarly, Yanlinastuti, A. Nugroho, Boybul, "Natural zeolite as a replacement for resin in the cation exchange process of cesium on post-irradiated nuclear fuel," *Nukleonika*, vol. 66, no.1, pp.11–19, 2021.
- [17]. E. Vandiel, T. Vaasma, S. Sugita, "Application of image analysis technique for measurement of sand grains in sediments," *MethodsX*, Volume 7, 100981, 2020.
- [18]. Y. Nampira, S. Ismarwanti, H. F. Rahmatullah, and K. Mustopa, "Non destructive test nuclear fuel U_3Si_2/Al $4,8 \text{ gU/cm}^3$ post irradiation with 60% burn up research reactor," *Hotlab Conference Proceeding* 2016, Karlsruhe, Germany.