

UJI TAK MERUSAK *SHORT PIN PWR – FUEL DUMMY* PASCA IRADIASI

Rohmad Sigit, Refa Artika, Maman Kartaman Ajiriyanto, Tri Yulianto
Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir – BATAN
Kawasan PUSPIPTEK Serpong Gd.20 Tangerang Selatan, Banten 15314
e-mail: sigitebp@batan.go.id

(Naskah diterima: 15-5-2020, Naskah direvisi: 7-6-2020, Naskah disetujui: 21-6-2020)

ABSTRAK

UJI TAK MERUSAK *SHORT PIN PWR – FUEL DUMMY* PASCA IRADIASI. Pelaksanaan uji pasca iradiasi untuk bahan bakar nuklir digunakan sebagai indikator kehandalan unjuk kerja bahan bakar selama proses iradiasi. Salah satu tahapan awal pengujian pascairadiasi adalah pengujian tak merusak. Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir (PTBBN) melakukan pengembangan bahan bakar reaktor daya tipe *Pressurized Water Reactor* (PWR). *Short pin PWR fuel dummy* dengan material kelongsong zircaloy-4 telah melalui proses iradiasi di Reaktor Serba Guna – G.A. Siwabessy (RSG-GAS) dan telah dikirim ke *hot cell* Instalasi Radiometalurgi (IRM) – PTBBN. Pengujian tak merusak yang dilakukan di IRM antara lain melalui pengamatan visual dan pengujian radiografi sinar-X. Pengamatan visual dilakukan di *hot cell* 102 dengan bantuan kamera digital, sedangkan pengujian radiografi sinar-X dilakukan di *hot cell* 103 IRM. Pengujian radiografi sinar-X menggunakan parameter tegangan dengan interval 120–125 kV dan kuat arus 1000–1100 μ A. Material uji ditempatkan pada ketinggian 60 cm dari detector untuk mendapatkan skala 1:1 terhadap benda uji sebenarnya. Pengamatan visual menunjukkan pembentukan beberapa *spot* yang mengindikasikan terjadinya oksidasi pada permukaan *short pin PWR fuel dummy*. Pengamatan terhadap citra radiografi yang dihasilkan dari pengujian radiografi sinar-X tidak menunjukkan adanya anomali dengan indikasi *grey value* pada arah aksial dan radial relatif homogen. Secara umum, berdasarkan hasil uji tak merusak, unjuk kerja *short pin PWR fuel dummy* relatif baik dengan tidak ditemukannya cacat yang signifikan. Sebagai konfirmasi terjadinya pembentukan oksida pada permukaan *short pin PWR fuel dummy*, perlu didukung oleh pengujian *Eddy Current* yang dilanjutkan dengan pengamatan mikrostruktur melalui pengujian metalografi.

Kata kunci: *Short pin*, PWR, kelongsong, pasca iradiasi, uji tak merusak, radiografi sinar-X.

ABSTRACT

NON-DESTRUCTIVE TEST OF IRRADIATED SHORT PIN OF PWR TYPE – FUEL DUMMY. *Post-irradiation examination (PIE) for nuclear fuel is used as an indicator of fuel performance reliability during the irradiation process. The Center for Nuclear Fuel Technology (PTBBN) conducts research and development of nuclear fuel for Pressurized Water Reactor (PWR). Short pin of PWR fuel dummy with zircaloy-4 cladding has been irradiated at the Multipurpose Reactor – G.A. Siwabessy (RSG-GAS) and has been sent to the Radiometallurgy Installation (IRM) – PTBBN. Non-destructive tests conducted at the IRM includes visual observation and X-ray radiographic test. Visual observations using a digital camera were done in hot cell 102, while X-ray radiographic test was carried out in hot cell 103 IRM. X-ray radiographic test using the voltage and current parameters at a range of 120-125 kV and 1000-1100 uA. The test material was placed at a height of 60 cm from the detector to obtain a 100% magnification. Visual observation shows the formation of several spots indicating oxidation on the short pin PWR fuel dummy surface. Radiographic images from X-ray radiographic testing do not show any anomalies, which is indicated by relatively homogeneous gray value in the axial and radial directions. Generally, based on the non-destructive test results, performance of the short pin PWR - fuel dummy is relatively satisfactory with no significant defects. To confirm the existence of oxides formation on the surface of the short pin PWR fuel dummy, Eddy Current test is needed, followed by microstructure observations.*

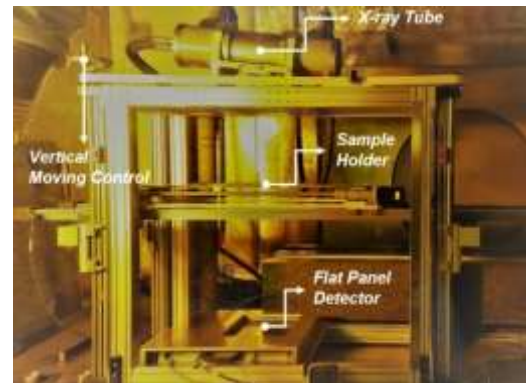
Keywords: *short pin, PWR, cladding, post-irradiation, non destructive test, X-ray radiography.*

PENDAHULUAN

Kestabilan dalam uji iradiasi dan pemenuhan kualifikasi uji pasca iradiasi merupakan indikator kehandalan unjuk kerja bahan bakar nuklir. Integritas mekanik kelongsong bahan bakar nuklir sebagai salah satu *barrier* yang berfungsi untuk mencegah kontak antara bahan bakar nuklir dengan pendingin/moderator serta mencegah lepasan produk fisi harus dipastikan kehandalannya. Sebagai dukungan untuk evaluasi integritas mekanik kelongsong bahan bakar nuklir, Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir (PTBBN) memiliki fasilitas pengujian pasca iradiasi di dalam *hot cell* Instalasi Radiometalurgi (IRM) untuk uji merusak dan uji tak merusak. Pengamatan visual, pengukuran konsistensi dimensi, pengujian *gamma scanning*, radiografi sinar-X dan *eddy current test* merupakan beberapa pengujian tak merusak yang umum dilakukan[1-3]. Selain untuk bahan bakar reaktor riset Reaktor Serba Guna G.A Siwabessy (RSG-GAS) dan bahan bakar reaktor daya tipe *Pressurized Heavy Water Reactor* (PHWR), IRM juga didesain untuk melakukan pengujian pasca iradiasi untuk bahan bakar *Pressurized Water Reactor* (PWR)[4].

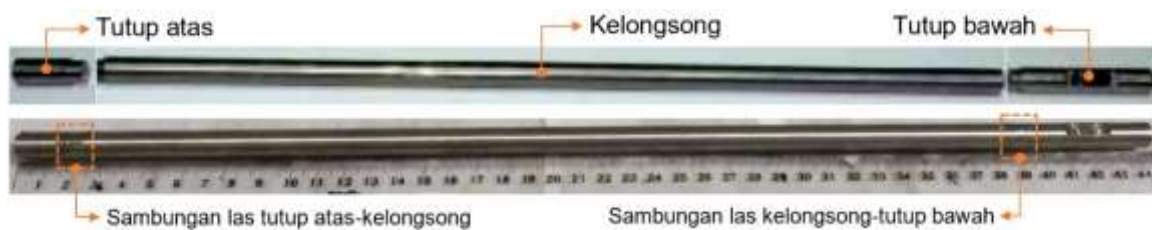
Peralatan radiografi sinar-X digital sebagai salah satu peralatan uji tak merusak, saat ini telah terpasang di *hot cell* 103 IRM melengkapi peralatan pengujian ultrasonik yang telah terpasang sebelumnya. Pengujian ultrasonik sebelumnya telah digunakan untuk deteksi cacat blister pada bahan bakar tipe pelat, sedangkan untuk tipe rod masih dalam tahapan penelitian dan pengembangan [1]. Radiografi sinar-X digital di *hot cell* 103 IRM dilengkapi sistem penggerak holder sampel uji yang dapat diatur secara otomatis pada arah horizontal, sedangkan untuk pergerakan arah vertikal masih dilakukan secara manual menggunakan bantuan MS-Manipulator seperti yang terlihat pada Gambar 1[5].

Tegangan operasi maksimum peralatan uji radiografi sinar-X di *hot cell* 103 IRM dapat mencapai 320 kV. Berbeda dengan radiografi sinar-X konvensional, radiografi sinar-X digital mampu mengakomodasi pengamatan secara *real-time* dengan efisiensi dan resolusi yang lebih tinggi [6-8].



Gambar 1. Peralatan uji radiografi sinar-X digital di *hot cell* 103 IRM[5]

Dalam rangka penelitian dan pengembangan bahan bakar untuk reaktor daya, PTBBN telah melakukan fabrikasi *short pin* PWR tanpa bahan bakar (*dummy*) seperti yang terlihat pada Gambar 2. Selain itu, fabrikasi *short pin* PWR *fuel* dengan bahan bakar UO_2 alam juga dilakukan untuk melengkapi data litbang bahan bakar nuklir di PTBBN. *Short pin* PWR *fuel dummy* dengan kelongsong *zircaloy-4* (Zr-4) telah diiradiasi di fasilitas (*Power Ramp Test Facility*) PRTF RSG-GAS dan telah dikirim ke *hot cell* IRM untuk pengujian pasca iradiasi, sedangkan *short pin* PWR *fuel* berbahan bakar UO_2 alam baru memulai tahapan proses iradiasi pada agustus 2019. Pengamatan melalui uji visual dan citra radiografi sinar-X yang dihasilkan pada pengujian pasca iradiasi diharapkan dapat menunjukkan unjuk kerja *short pin* PWR *fuel dummy* yang akan digunakan sebagai evaluasi dan optimasi desain untuk pengembangan bahan bakar reaktor daya selanjutnya.



Gambar 2. *Short pin* PWR-fuel dummy per bagian dan penampakan utuhnya setelah dirangkai.

METODOLOGI

Kelongsong *short pin* PWR fuel dummy pascairadiasi ditransfer dari RSG–GAS ke hot cell 101 IRM melalui kanal hubung instalasi penyimpanan sementara bahan bakar bekas (KH–IPSB3) seperti yang terlihat pada Gambar 3. Selanjutnya, dilakukan pengujian tak merusak melalui

mekanisme pengamatan visual dan radiografi sinar–X digital di hot cell 102 dan 103. Pengamatan visual dilakukan melalui observasi permukaan kelongsong *short pin* PWR fuel dummy pascairadiasi secara menyeluruh menggunakan dukungan kamera DSLR Canon EOS7D dari operating area hot cell 102.

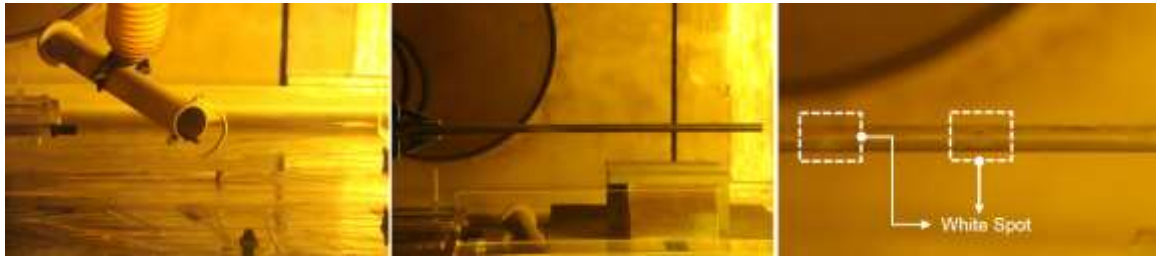


Gambar 3. Transfer *short pin* PWR dari RSG–GAS ke hot cell 101 IRM melalui KH–IPSB3.

Pengujian tak merusak selanjutnya dilakukan menggunakan peralatan *Digital X–Ray Inspection System K4* yang telah terpasang di dalam hot cell 103. Scanning dilakukan ke seluruh permukaan kelongsong *short pin* PWR fuel dummy pasca iradiasi dengan melakukan variasi nilai tegangan dan arus. Analisis lebih lanjut terhadap citra radiografi dilakukan pada bagian *end cap* untuk mendapatkan data dimensi seperti diameter kelongsong, diameter *end cap*, dan panjang *end cap* yang mewakili seluruh kelongsong *short pin* PWR fuel dummy pasca iradiasi secara utuh.

HASIL DAN PEMBAHASAN

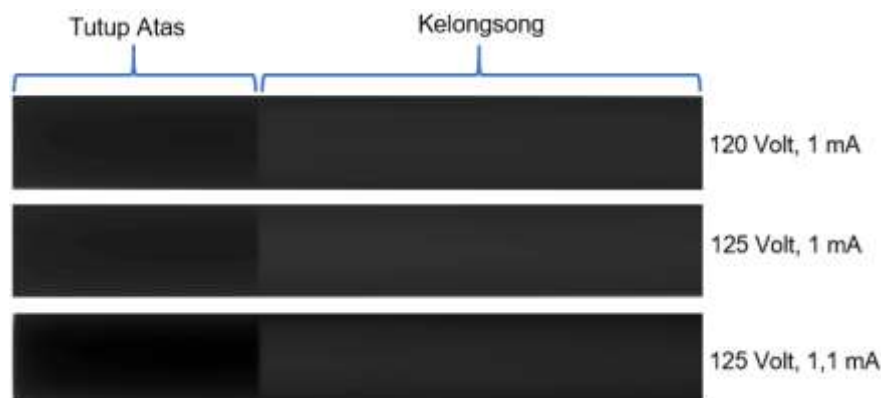
Pengujian tak merusak *short pin* PWR fuel dummy pasca iradiasi diawali dengan pengujian visual di hot cell 102 yang dilanjutkan dengan penentuan parameter pengujian radiografi sinar–X di hot cell 103 IRM. Hasil pengujian visual menunjukkan adanya beberapa perubahan warna yang diindikasikan munculnya *white spot* pada beberapa lokasi. Keberadaan *white spot* tersebut diduga akibat pembentukan oksida pada permukaan kelongsong Zr–4 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Pengamatan visual *short pin PWR fuel dummy* pasca iradiasi di *hot cell 102 IRM*

Selanjutnya, selain dilakukan *scanning* menggunakan peralatan radiografi sinar-X secara menyeluruh pada *short pin PWR fuel dummy*, *scanning* detail juga dilakukan berdasarkan identifikasi awal posisi *white spot* melalui pengamatan visual. Tahapan awal pengujian radiografi sinar-X adalah menentukan parameter pengujian yang optimal untuk menghasilkan citra radiografi yang baik dengan melakukan variasi nilai tegangan dan arus. Pengujian dilakukan pada rentang nilai tegangan 120–125 kV dan kuat arus 1000–1100 μA berdasarkan nilai optimal yang didapatkan dari hasil beberapa pengujian sebelumnya

menggunakan sampel kelongsong *short pin PWR fuel* pra-iradiasi [9]. Pada tahapan ini didapatkan kesimpulan bahwa nilai tegangan tidak memberikan perbedaan yang signifikan terhadap citra radiografi. Hal yang berbeda terjadi ketika perubahan nilai arus dilakukan pada nilai tegangan yang sama. Nilai arus yang kecil menghasilkan citra radiografi dengan resolusi yang cukup rendah. Dengan nilai arus dan tegangan yang optimal, citra radiografi dapat ditampilkan dengan sangat baik. Citra radiografi pada beberapa kombinasi nilai tegangan dan arus disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Citra radiograf sambungan tutup atas dan kelongsong *short pin PWR-fuel* pada beberapa kombinasi nilai tegangan dan arus.

Penentuan parameter jarak benda uji terhadap detektor untuk menghasilkan citra radiografi dengan rasio dimensi 1:1 terhadap benda uji sesungguhnya didapatkan pada ketinggian 60 cm dari *flat panel detector*. Dengan kata lain, pada posisi tersebut, holder sampel uji memiliki jarak yang sama, baik terhadap *flat panel detector* maupun *focal spot source* pada tabung sinar-X yang

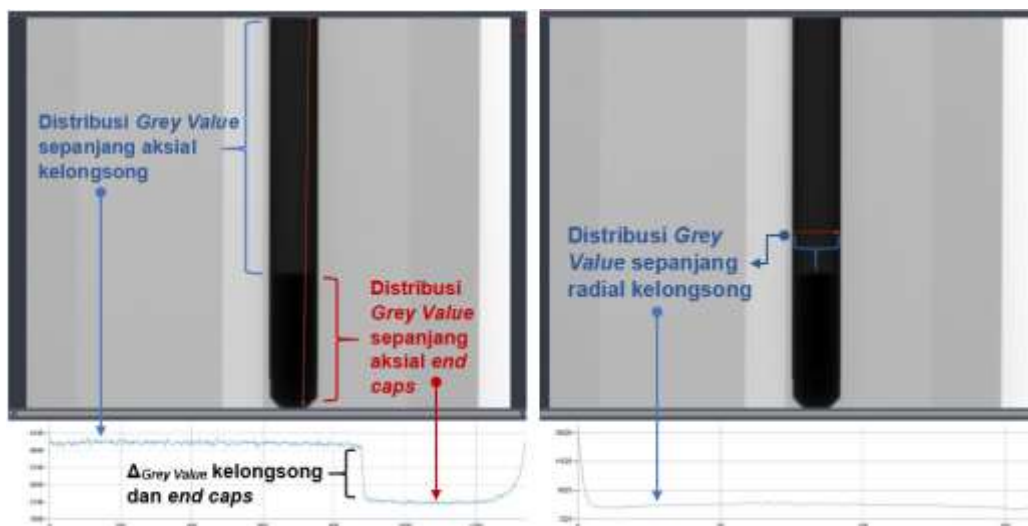
menghasilkan nilai perbesaran sama dengan satu. Citra kelongsong *short pin PWR fuel dummy* pasca iradiasi secara utuh didapatkan dengan melakukan penembakan sebanyak 6 kali seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6. Hal ini disebabkan *framing* untuk satu kali tembakan hanya dapat menampilkan citra sebesar 231,296 mm x 186,816 mm.



Gambar 6. Penampakan citra radiograf utuh *short pin* PWR *fuel dummy* pasca iradiasi

Hasil pengujian secara umum tidak menunjukkan adanya anomali pada *short pin* PWR *fuel dummy* pasca iradiasi yang ditunjukkan dengan distribusi *grey value* yang relatif homogen baik pada arah radial maupun arah aksial kelongsong seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7. Homogenitas *grey value* berkorelasi dengan nilai kerapatan benda uji. Homogenitas nilai tersebut menunjukkan ketebalan yang cukup merata

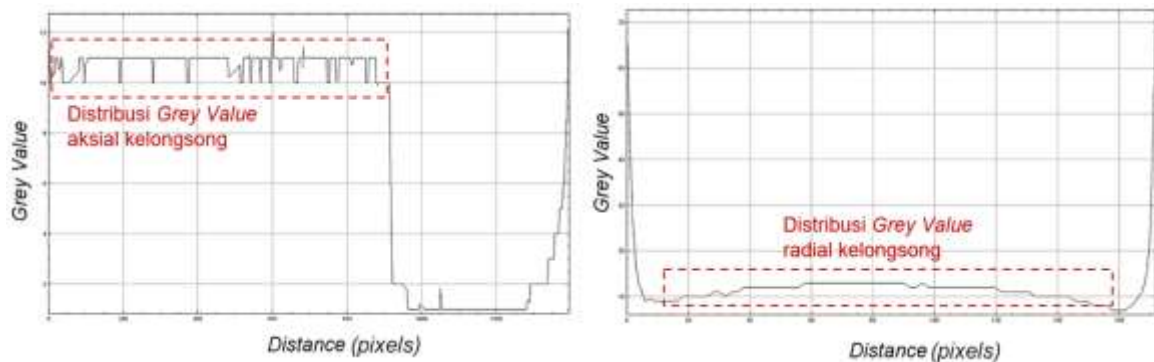
pada hampir seluruh permukaan kelongsong. Perbedaan nilai *grey value* cukup jelas terlihat pada kelongsong dan *end caps* yang merupakan Zr-4 pejal. Nilai minimum *grey value* memberikan citra gelap dengan kerapatan material yang lebih tinggi, sebaliknya citra terang mengindikasikan kerapatan yang lebih rendah akan memberikan *grey value* dengan nilai maksimum.



Gambar 7. Distribusi *grey value* arah aksial dan radial *short pin* PWR *fuel* pasca iradiasi.

Keberadaan cacat pada kelongsong akan memunculkan citra yang lebih terang dengan lonjakan nilai *grey value* pada plot histogram. Sebagai validasi, citra radiografi diolah menggunakan software pengolahan citra *Image-J* yang menghasilkan pola yang ditunjukkan pada Gambar 8. Pola arah aksial mengonfirmasi nilai *grey value* yang

konsisten dan homogen dengan tidak ditemukannya lonjakan nilai *grey value* yang signifikan. Distribusi arah radial mengindikasikan adanya penurunan nilai *grey value* pada kedua sisi. Pola ini terjadi karena profil kelongsong yang berbentuk silinder yang membuat profil lengkung di kedua sisinya.

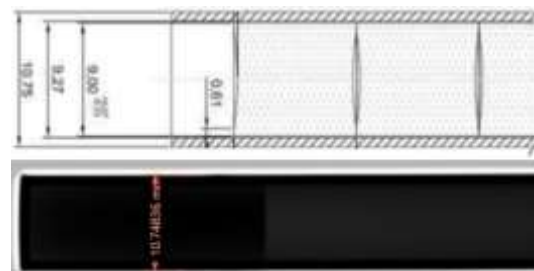


Gambar 8. Analisa profil *grey value* arah aksial dan radial kelongsong dengan *software* pengolahan citra *Image-J*

Berdasarkan hasil citra radiografi dan analisa distribusi *grey value* yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa tidak terdapat cacat yang signifikan pada keseluruhan kelongsong. Perubahan hanya terjadi pada level permukaan kelongsong sesuai dengan hasil pengamatan visual. Analisa lebih lanjut sebagai bentuk konfirmasi terhadap hasil pengamatan visual harus didukung menggunakan metode uji lainnya. Pembentukan lapisan oksida pada permukaan kelongsong misalnya, dapat dideteksi dan diukur secara kuantitatif menggunakan *Eddy Current Test*[10]. Sebagai bentuk konfirmasi dugaan pembentukan lapisan oksida dari hasil pengamatan visual, uji metalografi dapat digunakan untuk pengukuran ketebalan oksida secara merusak. Korosi permukaan akibat pertumbuhan lapisan oksida akan memberi pengaruh terhadap distribusi temperatur bahan bakar. Selain dapat mempengaruhi transfer panas dari kelongsong ke pendingin, keberadaan oksida di luar batas desain pada permukaan kelongsong akan meningkatkan resiko interaksi dengan hidrogen yang akan menyebabkan degradasi mekanik kelongsong bahan bakar nuklir[11].

Selain untuk mengetahui adanya potensi timbulnya cacat selama proses iradiasi, analisis lanjutan terhadap citra radiografi sinar-X yang dihasilkan juga dapat digunakan untuk memastikan konsistensi

dimensi *short pin PWR fuel dummy*. Pada penelitian ini parameter yang digunakan sebagai acuan konsistensi dimensi adalah diameter kelongsong. Data dimensi diperoleh dengan cara mengukur dimensi hasil citra yang tertampil menggunakan *software* analisis citra dengan citra apa adanya maupun dalam kondisi *Region of Interest* (ROI) aktif. Pengukuran diameter kelongsong dapat menggunakan citra apa adanya sedangkan kondisi ROI digunakan saat harus membedakan dua buah bagian yang berbeda, misalnya pengukuran panjang *end cap* membutuhkan batas jelas antara bagian pejal dan kosong kelongsong *short pin PWR fuel dummy* pasca iradiasi. Hasil pengukuran diameter menunjukkan konsistensi dimensi antara kelongsong pra dan pascairadiasi seperti yang terlihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Diameter kelongsong berdasarkan desain awal dan hasil pengukuran kelongsong *short pin PWR fuel dummy* pasca iradiasi berdasarkan citra radiografi sinar-X.

SIMPULAN

Hasil uji tak merusak melalui pengamatan visual dan pengujian radiografi sinar-X yang dilakukan di *hot cell* IRM menunjukkan bahwa *short pin* PWR *fuel dummy* pasca iradiasi memiliki unjuk kerja yang cukup baik. Nilai *grey value* yang homogen menunjukkan bahwa tidak terdapat cacat signifikan pada kelongsong yang didukung dengan konsistensi dimensi diameter kelongsong antara pra dan pasca iradiasi. Adapun dugaan lapisan oksida yang ditemukan melalui pengamatan visual harus dikonfirmasi dan divalidasi menggunakan pengujian metalografi dan mekanik untuk mengetahui sejauh mana keberadaannya mempengaruhi integritas kelongsong *short pin* PWR *fuel dummy*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Kepala Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir dan Kepala Bidang Uji Radiometalurgi serta seluruh staf Bidang Uji Radiometalurgi yang telah bekerjasama dalam kegiatan litbang tahun 2019. Ucapan terima kasih juga diucapkan kepada seluruh personil yang terlibat dalam proses transfer *short pin* PWR *fuel dummy* pascairadiasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. M. Fauzi, R. Himawan, H. F. Rahmatullah, S. Permana, A. G. Hutagaol, "Analisis cacat blister pada kelongsong bahan bakar U_3Si_2/Al menggunakan ultrasonic test", *Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir Urania*, vol. 23, no. 3, hal. 153-164, 2017.
- [2]. P.H. Liem, A.G. Hutagaol, S. Amini, 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.
- [3]. Z. Liang, *et.al*, "Non-destructive examination on the spent fuel rods", *Hotlab Conference Proceeding 2014*, Baden, Switzerland.
- [4]. A. Sunarto, dkk, "Laporan Analisis Keselamatan (LAK) Instalasi Radiometalurgi (IRM)," Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir, 2012.
- [5]. R. Artika, R. Sigit, H. F. Rahmatullah, Supardjo, A. B. Ginting, "Uji tak merusak pelat elemen bakar U_3Si_2/Al densitas uranium 4,8 gU/cm³ menggunakan radiografi sinar-X digital", *Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir Urania*, vol. 26, no. 1, hal. 49-56, 2020.
- [6]. Y. J. Kim, B. O. Yoo, H. M. Kim, S. B. Ahn, "Development of X-ray system for irradiated fuel in hotcell," *Hotlab Conference Proceeding 2016*, Karlsruhe, Germany.
- [7]. B. S. Verma and I. K. Indrajit, "Impact of computers in radiography: The advent of digital radiography, Part-2," *Indian Journal Radiology Imaging*, vol. 18, no. 3, pp. 204-209, 2008.
- [8]. O. K. Dominika and W. K. Silwya, "Analog and digital systems of imaging in roentgenodiagnosics", *Indian Journal Radiology Imaging*, vol. 75, no. 2, pp. 73-81, 2010.
- [9]. 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.
- [10]. D. Papaioannou, "Non-destructive examination of irradiated fuel rods at the ITU hot cell", *Hotlab Conference Proceeding 2016*, Karlsruhe, Germany.
- [11]. R. Sigit, F. Al-Afghani, J. Setiawan, Sungkono, "Pengaruh hidrogen terhadap kekuatan tarik kelongsong bahan bakar nuklir berbasis paduan zirconium", *Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir Urania*, vol. 23, no. 3, hal. 175-182, 2017.