

# Urania

## Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir

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



### ANALISA DAN INTERPRETASI DATA HASIL UJI TAK MERUSAK DALAM RANGKA PENGEMBANGAN BASIS DATA POTENSI CACAT PADA PELET $UO_2$

Refa Artika<sup>1</sup>, Helmi Fauzi Rahmatullah<sup>1</sup>, Yusuf Gigih Wicaksono<sup>1</sup>,  
Sri Ismarwanti<sup>1</sup>, Rohmad Sigit<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Pusat Riset Teknologi Daur Bahan Bakar Nuklir dan Limbah Radioaktif – BRIN  
K.S.T B.J. Habibie Gedung 720, Tangerang Selatan, Banten 15314  
e-mail: [refa.artika@brin.go.id](mailto:refa.artika@brin.go.id)

(Naskah diterima: 15–09–2023, Naskah direvisi: 19–10–2023, Naskah disetujui: 23–10–2023)

#### ABSTRAK

**ANALISA DAN INTERPRETASI DATA HASIL UJI TAK MERUSAK DALAM RANGKA PENGEMBANGAN BASIS DATA POTENSI CACAT PADA PELET  $UO_2$ .** Pengembangan bahan bakar nuklir baik untuk reaktor riset dan daya telah menjadi fokus penelitian Pusat Riset Teknologi Daur Bahan Bakar Nuklir dan Limbah Radioaktif (PRTDBBNLR), mulai dari tahap fabrikasi, uji pra-irradiasi, iradiasi dan uji pasca-irradiasi. Sebagai satu-satunya fasilitas uji pasca-irradiasi di Asia Tenggara, Instalasi Radiometalurgi (IRM) dituntut untuk siap melakukan evaluasi unjuk kerja bahan bakar nuklir, salah satunya adalah *short pin PWR-fuel* berisi  $UO_2$  yang saat ini sedang dalam tahap proses iradiasi. Salah satu upaya untuk yang dilakukan IRM adalah dengan mengembangkan teknik uji tak merusak, baik metode, analisis, interpretasi maupun inventarisasi terhadap potensi cacat yang mungkin terjadi secara sistemik pada *short pin PWR-fuel* berisi pelet  $UO_2$ . Tujuan penelitian ini adalah menginventarisasi metode dan data potensi cacat pada pelet  $UO_2$  untuk basis data pengujian pasca-irradiasi. Karakterisasi dilakukan terhadap lima sampel pelet  $UO_2$  pra-irradiasi dengan variasi kondisi sinter/mentah, baik/cacat dan perbedaan pengayaan uranium (3%, 4%, dan 5%) menggunakan metode uji visual dan radiografi sinar-X digital. Pengamatan visual mampu memberikan interpretasi awal mengenai kondisi permukaan pelet  $UO_2$ . Radiografi sinar-X digital dioperasikan pada tegangan 150 kV dan arus 1800  $\mu A$  untuk menghasilkan citra digital yang kemudian akan dilakukan proses *image enhancement* menggunakan *image processor* dalam rangka interpretasi pelet  $UO_2$ . Pengujian menggunakan radiografi sinar-X digital dan proses *image enhancement* menambah informasi hasil interpretasi pelet  $UO_2$ . Retak dan lubang pada permukaan pelet  $UO_2$  telah dapat dipetakan, begitu pula telah didapatkan analisis perbedaan pengayaan uranium yang dapat diamati dari grafik *gray value*. Seluruh informasi terkait metode analisis dan hasil interpretasi pada penelitian ini telah dapat digunakan sebagai basis data untuk menentukan kondisi pelet  $UO_2$  di dalam kelongsong *short pin PWR-fuel* pasca-irradiasi.

**Kata kunci:** Uji tak merusak, pelet  $UO_2$ , uji visual, radiografi sinar-X digital, basis data.

**ABSTRACT**

**ANALYSIS AND INTERPRETATION OF NON-DESTRUCTIVE TEST RESULTS TO DEVELOPE A DATABASE OF POTENTIAL DEFECTS IN  $UO_2$  PELLETS.** *The development of nuclear fuel for both research and power reactors has been the focus of Research Center for Nuclear Fuel Cycle and Radioactive Waste Technology (PRTDBBNLR) research from fabrication, pre-irradiation, irradiation, and post-irradiation examination phases. As the only post-irradiation examination facility in Southeast Asia, Radiometallurgy Installation (IRM) is required to be ready to evaluate the performance of nuclear fuel, one of them is the short pin PWR-fuel containing  $UO_2$  pellets which is currently in the irradiation process. One of the efforts made by IRM is to develop non-destructive testing techniques, including methods, analysis, interpretation, and inventory of potential defects that may occur systematically in short pin PWR-fuel containing  $UO_2$  pellets. The aim of this research is to inventory methods and data of potential defects in  $UO_2$  pellets for a post-irradiation examination database. Characterization was performed on five samples of pre-irradiated  $UO_2$  pellets with variations in sintered/raw, good/defect conditions, and differences in uranium enrichment (3%, 4%, and 5%) using visual test methods and digital X-ray radiography. Visual examination can provide interpretation results regarding the conditions on the surface of the  $UO_2$  pellets. Digital X-ray radiography was operated at a voltage of 150 kV and a current of 1800  $\mu$ A to produce a digital image then be carried out an image enhancement process using an image processor to interpret the  $UO_2$  pellets. Digital X-ray radiography method and image enhancement process adds information of  $UO_2$  pellets data. Cracks and surface holes of  $UO_2$  pellets can be mapped. The difference in uranium enrichment can be observed from the gray value graphic. Information from this interpretation will be useful as an initial database of interpretation methods to determine the condition of the  $UO_2$  pellets in the irradiated short pin PWR-fuel.*

**Keywords:** *Non-destructive testing,  $UO_2$  pellets, visual testing, digital X-ray radiography, database.*

Analisa dan Interpretasi Data Hasil Uji Tak Merusak  
Dalam Rangka Pengembangan Basis Data Potensi Cacat Pada Pelet  $UO_2$   
(Refa Artika, Helmi Fauzi Rahmatullah, Yusuf Gigih Wicaksono, Sri Ismarwanti, Rohmad Sigit)

## PENDAHULUAN

Riset bahan bakar nuklir sebagai upaya untuk memperkuat kompetensi sekaligus menjamin ketersediaan bahan bakar nuklir telah lama dilakukan oleh Pusat Riset Teknologi Daur Bahan Bakar Nuklir dan Limbah Radioaktif (PRTDBBNLR). Saat ini, pengembangan bahan bakar nuklir, baik untuk reaktor riset maupun reaktor daya telah menjadi fokus penelitian mulai dari tahap fabrikasi, uji pra-iradiasi, iradiasi hingga uji pasca-iradiasi.

Peningkatan densitas uranium pada bahan bakar nuklir silisida tipe pelat  $U_3Si_2/Al$  dari  $2,96 \text{ g/cm}^3$  menjadi  $4,8 \text{ g/cm}^3$  menjadi salah satu riset yang sedang berlangsung secara menyeluruh hingga tahapan uji pasca-iradiasi [1]–[5]. Selain itu, sebagai opsi memperkaya pilihan jenis bahan bakar nuklir yang akan digunakan, telah dilakukan fabrikasi pelat  $U_3Si_2/Al$  densitas  $5,2 \text{ g/cm}^3$  ukuran penuh serta pelat mini bahan bakar nuklir berbasis paduan U-Mo dan U-Zr [6]–[9]. Penguasaan teknologi terkait bahan bakar untuk reaktor berpendingin gas temperatur tinggi (HTGR) juga dilakukan secara intensif melalui penguatan riset dan kompetensi dalam pembuatan kernel berbasis *surrogate* serta kajian teknik pelapisan menuju tahap pembuatan TRISO [10], [11]. Pada sisi yang lain, bahan bakar nuklir untuk reaktor daya tidak ketinggalan untuk dikembangkan melalui pembuatan *short pin PWR-fuel*. Terdapat beberapa variasi dan tahapan riset yang telah dicapai. *Short pin PWR-fuel dummy* telah selesai diiradiasi dan diuji pasca-iradiasi [12], sedangkan *short pin PWR-fuel* berisi pelet  $UO_2$  hasil fabrikasi Instalasi Elemen Bakar Eksperimental (IEBE) sedang dalam proses iradiasi di *Power Ramp Test Facility* (PRTF) di Reaktor Serba Guna-G.A. Siwabessy (RSG-GAS) [13]–[15].

Sebagai satu-satunya fasilitas uji pasca-iradiasi di Asia Tenggara, Instalasi Radiometalurgi (IRM) dituntut untuk siap melakukan evaluasi unjuk kerja *short pin PWR-fuel* berisi pelet  $UO_2$  ketika periode iradiasi yang ditargetkan telah tercapai. Keterbatasan alat karakterisasi dan catatan bahwa IRM belum pernah melakukan pengujian pasca-iradiasi pada bahan bakar nuklir tipe rod, IRM mengupayakan untuk memperkaya dan mengoptimasi metode yang digunakan. Salah satu upaya untuk mewujudkan hal tersebut adalah dengan mengembangkan teknik uji tak merusak, baik

metode, analisis, interpretasi maupun inventarisasi terhadap potensi cacat yang mungkin terjadi secara sistemik pada *short pin PWR-fuel* berisi pelet  $UO_2$ . Teknik uji tak merusak merupakan salah satu metode yang digunakan dalam evaluasi unjuk kerja bahan bakar nuklir. Sebagai mekanisme pengujian awal, uji tak merusak memegang peranan penting dalam memperoleh gambaran awal untuk mempersempit daerah pengamatan terkait degradasi bahan bakar *short pin PWR-fuel* berisi pelet  $UO_2$  [16].

Metode uji tak merusak yang digunakan antara lain pengamatan visual dan radiografi sinar-X digital yang tersedia di IRM. Pengujian radiografi sinar-X digital merupakan salah satu uji radiografi secara langsung atau *direct radiography* (DR). *Direct radiography* bekerja menggunakan *Flat Panel Detector* (FPD) yang mampu mengkonversi aliran listrik menjadi citra digital dan menghasilkan citra secara baik dan cepat [17], [18]. Namun demikian, kualitas citra digital yang dihasilkan memiliki resolusi rendah sehingga perlu upaya tambahan dalam menginterpretasi citra [19], [20]. *Image enhancement* citra digital hasil radiografi sinar-X digital telah dilakukan pada penelitian sebelumnya melalui analisis histogram *gray value* yang dapat menentukan susunan dan jumlah pelet  $UO_2$  dalam *short pin PWR-fuel* [20].

Tujuan penelitian ini adalah mengembangkan metode analisis dan inventarisasi data sebagai basis data potensi cacat yang mungkin terjadi pada pelet  $UO_2$  hasil fabrikasi PRTDBBNLR selama proses iradiasi. Penelitian ini menggunakan pelet  $UO_2$ , identik dengan yang digunakan pada *short pin PWR-fuel* yang sedang dalam tahapan proses iradiasi di PRTF RSG-GAS. Pengujian tak merusak dilakukan terhadap lima buah pelet  $UO_2$  dengan berbagai variasi kondisi dan dianalisa lebih lanjut menggunakan kombinasi hasil uji radiografi sinar-X dan pengamatan visual. Citra digital hasil uji radiografi sinar-X selanjutnya akan diinterpretasi menggunakan *image processor*.

## METODOLOGI

Pengujian diawali dengan proses transfer pelet  $UO_2$  dari *Material Balance Area* (MBA) RI-E yang merupakan fasilitas fabrikasi bahan bakar nuklir (IEBE) menuju MBA RI-F yang merupakan fasilitas uji pasca-iradiasi (IRM). Beberapa sampel pelet  $UO_2$  dengan kondisi dan pengayaan uranium berbeda

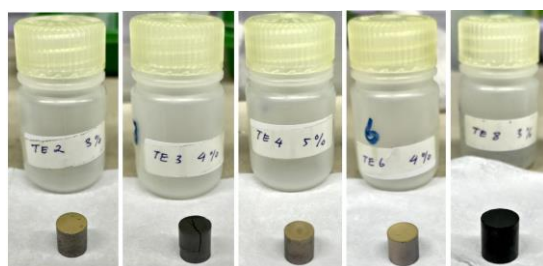
dikirim dari MBA RI-E menuju MBA RI-F untuk dilakukan pengujian tak merusak menggunakan radiografi sinar-X digital di IRM. Sampel pelet  $UO_2$  yang telah berada di MBA RI-F diamati secara visual terlebih dahulu untuk mengetahui kondisi awal seluruh permukaan sampel pelet  $UO_2$ . Pengujian radiografi sinar-X digital dilakukan pada semua sampel pelet  $UO_2$  secara bersamaan menggunakan parameter tegangan dan arus berturut-turut sebesar 150 kV dan 1800  $\mu$ A. Pengamatan secara *real time* dilakukan selama pengujian untuk mendapatkan citra digital sampel pelet  $UO_2$ . Interpretasi lanjutan untuk mendapatkan tambahan informasi dilakukan menggunakan *software* ImageJ.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian tak merusak pada sampel pelet  $UO_2$  dilakukan melalui pengamatan visual dan pengujian radiografi sinar-X digital. Pengamatan visual yang dilakukan terhadap lima sampel pelet  $UO_2$  menghasilkan data yang ditampilkan pada Tabel 1 dan Gambar 1.

Tabel 1. Hasil pengamatan visual kondisi sampel pelet  $UO_2$

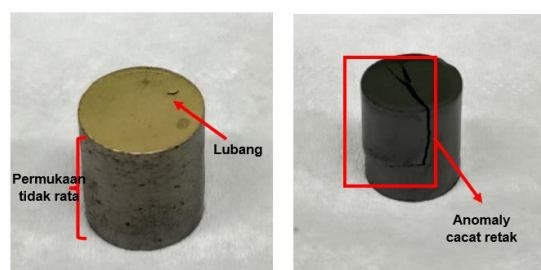
Nama Sampel	Pengayaan Uranium (%)	Hasil Uji Visual
Pelet 2	3	Pelet sinter permukaan tidak rata
Pelet 3	4	Pelet sinter retak
Pelet 4	5	Pelet sinter normal
Pelet 6	4	Pelet sinter normal
Pelet 8	3	Pelet mentah normal, dimensi lebih besar



Gambar 1. Sampel pelet  $UO_2$  berturut-turut dari sisi kiri pelet nomor 2, 3, 4, 6 dan 8

Berdasarkan pengamatan visual yang telah dilakukan, diketahui dimensi pelet sinter dan mentah berbeda, dimana pelet mentah memiliki dimensi yang lebih besar dari pelet sinter. Terkait dengan kondisi permukaan tiap

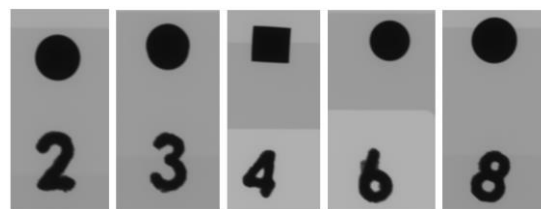
pelet diketahui terdapat dua pelet dalam kondisi cacat yaitu pelet  $UO_2$  nomor 2 dengan kondisi permukaan yang tidak rata pada sisi radial dan pelet  $UO_2$  nomor 3 dalam keadaan retak secara diagonal seperti pada Gambar 2. Hasil evaluasi dengan uji visual hanya mendapatkan interpretasi awal terkait kondisi permukaan pelet  $UO_2$ . Oleh sebab itu, pengujian radiografi sinar-X diperlukan untuk melengkapi hasil pengamatan visual.



Gambar 2. Hasil uji visual pelet  $UO_2$  nomor 2 (kiri) dan pelet  $UO_2$  nomor 3 (kanan)

Pengujian menggunakan radiografi sinar-X digital dilakukan untuk mengetahui kondisi permukaan dan sub-permukaan pelet  $UO_2$  dengan melakukan analisis citra digital yang dihasilkan. Analisis citra digital dilakukan dengan bantuan *software* ImageJ melalui proses *image enhancement* terhadap citra digital pelet  $UO_2$ . Proses *image enhancement* dilakukan dengan menganalisis nilai *gray value* citra digital pelet  $UO_2$  dan mengubahnya menjadi grafik histogram untuk mendapatkan interpretasi kondisi pelet  $UO_2$ .

Hasil citra radiografi dari dari kelima pelet  $UO_2$  ditunjukkan pada Gambar 3. Lima buah citra digital tersebut merupakan data input proses *image enhancement* menggunakan *software* ImageJ.



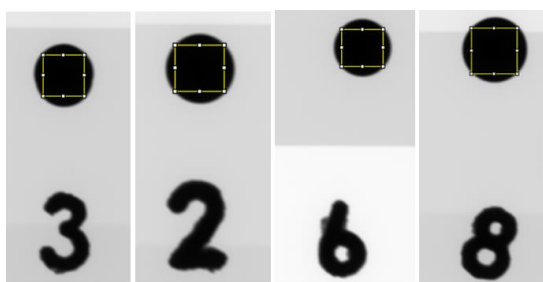
Gambar 3. Citra digital pelet  $UO_2$

Melalui citra digital yang ditunjukkan pada Gambar 3, diketahui posisi penembakan pelet  $UO_2$  nomor 2, 3, 6, dan 8 diambil dari sisi radial, tetapi hal berbeda dilakukan pada pelet  $UO_2$  nomor 4, posisi penembakan dilakukan pada sisi aksial. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan perbedaan sudut pandang

Analisa dan Interpretasi Data Hasil Uji Tak Merusak  
 Dalam Rangka Pengembangan Basis Data Potensi Cacat Pada Pelet  $UO_2$   
 (Refa Artika, Helmi Fauzi Rahmatullah, Yusuf Gigih Wicaksono, Sri Ismarwanti, Rohmad Sigit)

interpretasi kondisi pelet  $UO_2$  pada proses *image enhancement*. Citra digital pada Gambar 3 tidak dapat memberikan informasi adanya perbedaan kontras citra untuk membedakan tingkat kehitaman yang akan terjadi ketika paparan sinar X-ray mengenai bagian cacat dan yang normal. Pelet  $UO_2$  nomor 2 yang secara visual terlihat tidak rata pada permukaannya dan keretakan yang terjadi pada pelet  $UO_2$  nomor 3 tidak terlihat pada citra hasil pengujian radiografi sinar-X digital secara *real time*. Oleh karena itu, diperlukan analisis lanjutan melalui proses *image enhancement* untuk memperbaiki kontras citra digital sehingga interpretasi secara tepat akan dapat dilakukan.

*Image enhancement* dilakukan melalui pemetaan nilai *gray value* yang tertampil dalam bentuk grafik histogram. Nilai *gray value* adalah nilai skala abu yang digunakan dalam citra radiografi digital yang menggambarkan tebal atau densitas benda uji. Jika warna semakin hitam maka benda uji dengan ketebalan atau densitas tinggi akan menyerap radiasi lebih banyak dan menghasilkan citra lebih hitam dibandingkan dengan benda uji yang lebih tipis atau denistas lebih rendah [21]. Gambar 4 menunjukkan proses *plotting* histogram berdasarkan penentuan *Region of Interest* (ROI) dalam bentuk *rectangle* pada sisi radial pelet  $UO_2$ . Plot grafik histogram nilai *gray value* citra digital permukaan pelet ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 4. ROI (*Region of Interest*) *rectangle* yang digunakan

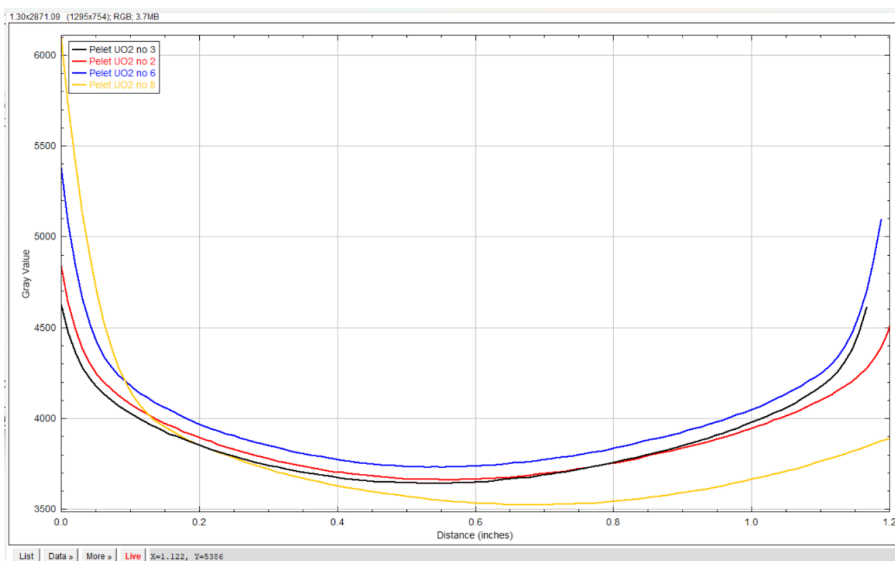
Plot grafik histogram nilai *gray value* pada Gambar 5 menunjukkan bahwa pelet  $UO_2$  nomor 2, 3, 6, dan 8 memiliki grafik *gray value* yang sedikit berbeda. Komposisi pengayaan uranium dan kondisi sinter atau mentah seperti yang dijelaskan pada Tabel 1 dapat diperjelas dari perbedaan grafik *gray*

*value*. Pelet  $UO_2$  dengan pengayaan uranium lebih tinggi cenderung memiliki sebaran nilai *gray value* yang lebih tinggi. Anomali terjadi pada grafik histogram pelet  $UO_2$  nomor 3 yang terjadi akibat retaknya pelet yang mengakibatkan perubahan dimensi pelet menjadi berbentuk oval/lonjong ke bawah dan tidak membentuk lingkaran sempurna. Hal ini juga dapat menunjukkan posisi dari keretakan pelet. Sebelumnya diketahui bahwa pelet dengan tingkat pengayaan uranium lebih tinggi memiliki sebaran titik *gray value* yang lebih tinggi. Dapat diamati bahwa nilai awal *gray value* dari pelet  $UO_2$  nomor 3 lebih rendah dari pelet  $UO_2$  nomor 2. Nilai awal *gray value* pelet  $UO_2$  nomor 3 seharusnya lebih tinggi dari pelet  $UO_2$  nomor 3 karena tingkat pengayaan uranium yang lebih tinggi. Berdasarkan informasi tersebut, dapat diindikasikan bahwa terdapat anomali pada pelet  $UO_2$  nomor 3

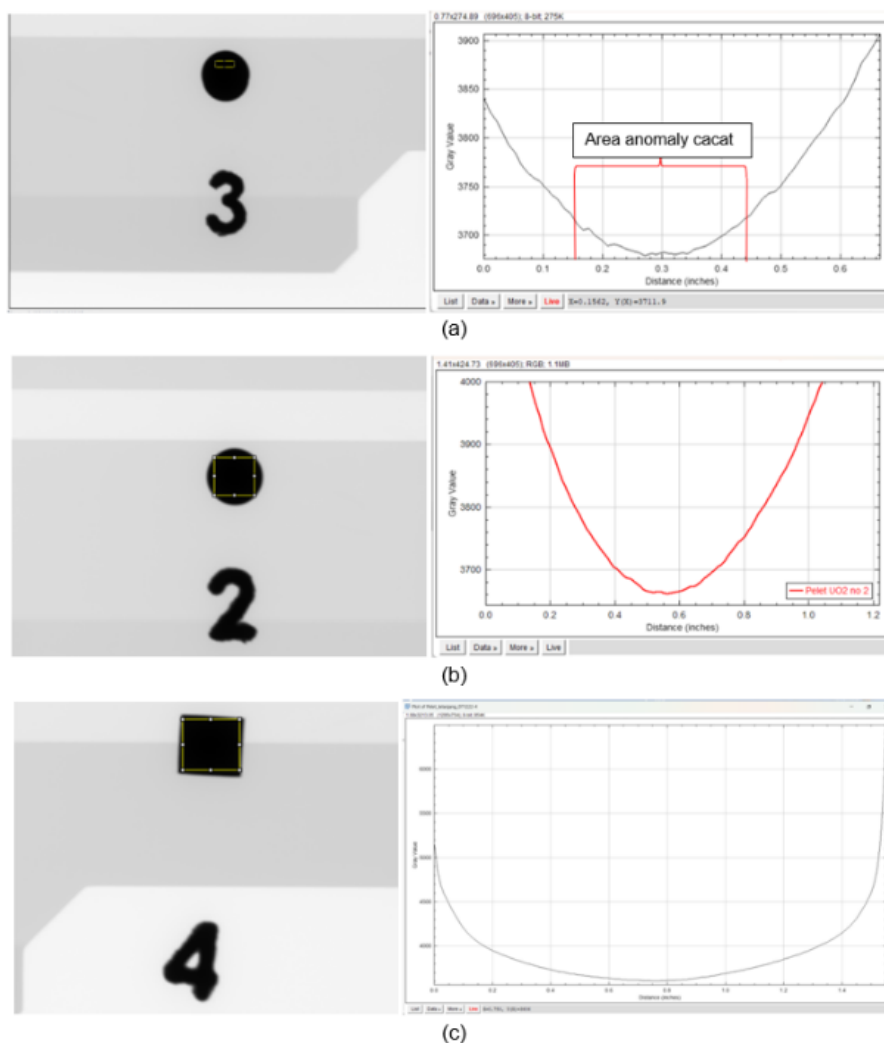
Kondisi berbeda terjadi pada grafik *gray value* pelet  $UO_2$  nomor 8, dimana grafik *gray value* yang terjadi memiliki nilai minimum paling rendah dibanding grafik *gray value* ketiga pelet lainnya. Hal ini terjadi karena kondisi pelet  $UO_2$  nomor 3 yang masih berupa pelet mentah, belum mengalami proses sinter sehingga kondisi kerapatan serbuk  $UO_2$  belum mengalami kepadatan. Diameter pelet yang lebih besar juga menjadi faktor penentu hasil grafik *gray value* dimana grafik *gray value* pelet  $UO_2$  nomor 8 memiliki rentang yang lebih besar dengan titik minimum pada posisi 0,7 in sedangkan ketiga pelet lainnya berada pada posisi antara 0,4 – 0,6 in.

Setelah mengetahui posisi anomali pada pelet  $UO_2$  nomor 3 yang berada di sebelah kiri bagian pelet, *scanning* secara *real time* pada citra digital dilakukan dengan menggunakan ROI *rectangle* yang lebih kecil untuk mendapatkan posisi retak paling dominan. Posisi anomali retak diketahui dengan timbulnya grafik *gray value* yang tidak rata, hal ini dikarenakan cacat retak yang terjadi berupa sebuah garis maka dengan menggunakan ROI *rectangle* yang lebih kecil, area padat pelet juga masuk dalam lingkup *scanning* secara bersamaan. Gambar 6 menunjukkan hasil *plotting gray value* yang menunjukkan posisi retak paling dominan berada pada sisi kiri atas permukaan sisi radial pelet  $UO_2$  nomor 3.

Analisa dan Interpretasi Data Hasil Uji Tak Merusak  
 Dalam Rangka Pengembangan Basis Data Potensi Cacat Pada Pelet UO<sub>2</sub>  
 (Refa Artika, Helmi Fauzi Rahmatullah, Yusuf Gigh Wicaksono, Sri Ismarwanti, Rohmad Sigit)



Gambar 5. Plot histogram grafik *gray value* pelet UO<sub>2</sub> 2, 3, 6 dan 8



Gambar 6. Plot histogram *gray value* pelet UO<sub>2</sub> nomor 3 (a), nomor 2 (b), dan nomor 4 (c).

Analisa dan Interpretasi Data Hasil Uji Tak Merusak  
Dalam Rangka Pengembangan Basis Data Potensi Cacat Pada Pelet  $UO_2$   
(Refa Artika, Helmi Fauzi Rahmatullah, Yusuf Gigih Wicaksono, Sri Ismarwanti, Rohmad Sigit)

Proses *image enhancement* juga dilakukan pada pelet  $UO_2$  nomor 2 yang memiliki lubang di salah satu sisinya dengan permukaan pelet yang cenderung tidak rata. Pemetaan grafik histogram *gray value* pada citra digital pelet  $UO_2$  masih menggunakan ROI *rectangle* dalam *scanning* nilai *gray value* di permukaan sisi radial untuk mendapatkan grafik histogram *gray value* keseluruhan. Setelah pengaturan nilai *range gray value*, grafik histogram *gray value* pada permukaan pelet  $UO_2$  nomor 2 dapat diamati seperti yang terlihat pada Gambar 6. Grafik histogram *gray value* yang bergerigi di bagian cekung menunjukkan bahwa permukaan pelet  $UO_2$  nomor 2 tidak rata. Hal ini sesuai dengan hasil pengamatan visual yang dilakukan sebelumnya.

Pengamatan berbeda dilakukan pada pelet  $UO_2$  nomor 4 yang menggunakan sisi aksial untuk posisi penembakan. Meskipun begitu, proses *image enhancement* yang dilakukan masih menggunakan proses yang sama, yaitu dengan memetakan grafik histogram *gray value* untuk interpretasi kondisi pelet pada sisi aksial. Pengamatan pada sisi aksial dilakukan untuk mendapatkan interpretasi dari sisi yang didasarkan pada kondisi pengujian sebenarnya di dalam *hot cell*. Hasil interpretasi berdasarkan histogram grafik *gray value* pada sisi aksial pelet menunjukkan bahwa pada pelet  $UO_2$  nomor 4 dengan pengayaan 5% tidak terdeteksi adanya anomali. Hal ini didasarkan pada nilai *gray value* di Gambar 6 yang tidak mengalami kenaikan atau penurunan secara signifikan pada permukaan sisi aksial pelet

## SIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil mendapatkan metode pemetaan dan analisis potensi cacat pada pelet  $UO_2$  melalui pengujian tak merusak. Kondisi permukaan dan sub-permukaan pelet  $UO_2$  dengan variasi kondisi dan konsentrasi pengayaan uranium telah didapatkan melalui pengamatan visual dan pengujian radiografi sinar-X digital. Hasil pengamatan visual yang dilakukan dengan mengamati kondisi pelet  $UO_2$  telah dapat dikonfirmasi dengan hasil pengujian menggunakan dengan radiografi sinar-X digital. Selain itu, proses *image enhancement* pada citra digital juga telah berhasil memetakan kondisi anomali dan perbedaan nilai pengayaan uranium pada pelet  $UO_2$  melalui analisa grafik *gray value*. Informasi ini

dapat digunakan sebagai basis data awal metode pengujian, analisis dan interpretasi yang digunakan untuk menentukan kondisi pelet  $UO_2$  di dalam kelongsong *short pin PWR-fuel* pasca iradiasi.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih ditujukan kepada Bapak Purwanta dan seluruh staf IRM yang telah membantu dalam proses pengujian. Terima kasih juga diucapkan kepada Ka. PRTDBNLR yang telah menyediakan pendanaan melalui rumah program HITN tahun 2023.

## PERNYATAAN KONTRIBUSI PENULIS

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

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Artika, R. Sigit, H. F. Rahmatullah, Supardjo, and A. B. Ginting, "Uji tak merusak pelat elemen bakar  $U_3Si_2/Al$  densitas uranium 4,8  $gU/cm^3$  menggunakan radiografi sinar-X digital," *Urania J. Ilm. Daur Bahan Bakar Nukl.*, vol. 26, no. 1, 2020.
- [2] J. C. Sihotang *et al.*, "Study of fission gas bubbles and interaction layer on irradiated  $U_3Si_2-Al$  density of 4.8  $gU/cm^3$ ," *Urania J. Ilm. Daur Bahan Bakar Nukl.*, vol. 28, no. 2, hal. 69–78, 2022.
- [3] M. K. Ajiriyanto, A. B. Ginting, and Junaedi, "Analisis metalografi pelat elemen bakar  $U_3Si_2/Al$  pascairadiasi densitas 2,96  $gU/cm^3$ ," *Urania J. Ilm. Daur Bahan Bakar Nukl.*, vol. 24, no. 1, 2018.
- [4] T. Surbakti, P. Surian, and S. Tagor, "Analisis pengaruh densitas bahan bakar silisida terhadap parameter kinetik teras reaktor RSG-GAS," *J. Penelit. Fis. dan Apl.*, vol. 3, no. 1, hal. 19–30, 2013.
- [5] A. B. Ginting and P. H. Liem, "Absolute burnup measurement of LEU silicide fuel plate irradiated in the RSG GAS multipurpose reactor by destructive radiochemical technique," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 85, pp. 613–620, 2015.
- [6] S. Supardjo *et al.*, "Pengembangan teknologi bahan bakar reaktor riset berbasis U-Mo/Al [Fabrikasi dan Pengujian Pelat Elemen Bakar U-Mo-xM (M=Ti, Zr, Si)]," in *Prosiding Seminar*

- Hasil-hasil Penelitian EBN Tahun 2017*, PTBBN-BATAN, hal. 116–129, 2018.
- [7] S. Supardjo, A. Kadarjono, I. Isfandi, Y. D. A. Susanto, S. Permana, and G. Guswardani, "Percobaan pembuatan pelat elemen bakar U-7Mo-xSi/Al dalam ukuran mini," *Urania J. Ilm. Daur Bahan Bakar Nukl.*, vol. 25, no. 3, 2019.
- [8] Masrukan, D. Mustika, D. A. Perdana, and Jumaeri, "Analisis komposisi unsur, densitas, makrostruktur, dan fasa paduan U-6Zr-xNb pasca uji korosi," *Urania J. Ilm. Daur Bahan Bakar Nukl.*, vol. 26, no. 3, hal. 155–166, 2020.
- [9] Masrukan and J. Setiawan, "Karakteristik ingot paduan U-Zr-Nb pasca proses quenching," *Urania J. Ilm. Daur Bahan Bakar Nukl.*, vol. 23, no. 2, 2017.
- [10] Sarjono, G. Rahmadi, E. Mutiara, Mujinem, and D. Haryadi, "Pengaruh jenis prekursor dan metode penetralisasi pada morfologi permukaan kernel tersinter zirkonia," *Urania J. Ilm. Daur Bahan Bakar Nukl.*, vol. 27, no. 2, hal. 75–84, 2021.
- [11] E. Yusnitha, A. Kadarjono, A. Sartono, and P. D. Winastri, "The conceptual design for liquid effluent treatment of UO<sub>2</sub> kernel fabrication," *Urania J. Ilm. Daur Bahan Bakar Nukl.*, vol. 26, no. 2, 2020.
- [12] R. Sigit, R. Artika, M. K. Ajiriyanto, and T. Yulianto, "Uji tak merusak short pin PWR–fuel dummy pasca iradiasi," *Urania J. Ilm. Daur Bahan Bakar Nukl.*, vol. 26, no. 2, 2020.
- [13] O. E. Fadli, A. Khakim, S. Suharyana, and A. Suparmi, "Safety analysis of Indonesia's multipurpose reactor during irradiation of natural UO<sub>2</sub> pin target at Power Ramp Test Facility," *J. Nucl. Eng. Radiat. Sci.*, vol. 7, no. 3, p. 32002, 2021.
- [14] Suwardi, W. Dewayatna, Sungkono, Ridwan, and M. Rifai, "Model simulation of geometry and stress-strain variation of BATAN fuel pin prototype during irradiation test in RSG-GAS reactor," *Urania J. Ilm. Daur Bahan Bakar Nukl.*, vol. 21, no. 1, 2015.
- [15] T. Yulianto, Y. Nampira, and W. Dewayatna, "Uji iradiasi pin bahan Bakar PWR," hal. 19–27, 2016, [Online]. Available: <http://repo-nkm.batan.go.id/id/eprint/3944>
- [16] H. F. Rahmatullah and R. Artika, "Persiapan uji tidak merusak pada sampel short fuel pin PWR pasca iradiasi," *Hasil-Hasil Penelit. EBN Tahun 2018*, hal. 172–185, 2018.
- [17] A. Prosch and B. Larson, "Real-time radiography: An introductory course module for NDT students," *Northeast Iowa Community Coll. Iowa State Univ.*, 2000.
- [18] R. Cole and A. Hespel, "Digital radiography," *Feline Diagnostic Imaging*, pp. 1–11, 2020.
- [19] S. Zelviani, "Kualitas citra pada direct digital radiography dan computed radiography," *Teknosains Media Inf. Sains dan Teknol.*, vol. 11, no. 1, 2017.
- [20] R. Artika, R. Sigit, M. K. Ajiriyanto, and T. Yulianto, "Imange enhancement citra digital short pin PWR fuel berisi pelet UO<sub>2</sub> alam pasca uji radiografi sinar-X menggunakan program ImageJ," *Urania J. Ilm. Daur Bahan Bakar Nukl.*, vol. 28, no. 1, hal. 21–28, 2022.
- [21] F. C. De Beer, "Neutron-and X-ray radiography/tomography: Non-destructive analytical tools for the characterization of nuclear materials," *J. South. African Inst. Min. Metall.*, vol. 115, no. 10, pp. 913–924, 2015.