

Urania

Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir

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



SIMULASI UJI TAK MERUSAK PELAT ELEMEN BAKAR PASCA IRADIASI MENGGUNAKAN METODE *PENETRANT TEST*

Yusuf Gigih Wicaksono¹, Helmi Fauzi Rahmatullah¹,
Refa Artika¹, Sri Ismarwanti¹, Rohmad Sigit¹

¹Pusat Riset Teknologi Daur Bahan Bakar Nuklir dan Limbah Radioaktif – BRIN
Kawasan Sains dan Teknologi B.J. Habibie, Gd.20 Tangerang Selatan, Banten 15314
yusu018@brin.go.id

(Naskah diterima: 24–09–2022, Naskah direvisi: 31–09–2022, Naskah disetujui: 11–10–2022)

ABSTRAK

SIMULASI UJI TAK MERUSAK PELAT ELEMEN BAKAR PASCA IRADIASI MENGGUNAKAN METODE *PENETRANT TEST*. Pengujian pasca iradiasi baik secara tidak merusak maupun merusak bertujuan untuk mengetahui unjuk kerja bahan bakar nuklir selama iradiasi di reaktor. Saat ini, uji tak merusak di Instalasi Radiometalurgi dilakukan melalui pengamatan visual, radiografi sinar-X digital dan *ultrasonic test* dalam inspeksi potensi cacat atau anomali pada pelat elemen bakar (PEB). Keterbatasan radiografi sinar-X dan *ultrasonic test* dalam mendeteksi cacat permukaan menyebabkan perlunya pengembangan metode uji tak merusak lainnya, sehingga perlu dilakukan simulasi penggunaan metode *penetrant test* pada PEB *dummy*. Tujuan simulasi ini adalah mengetahui kemampuan metode *penetrant test* untuk melengkapi data uji tak merusak yang telah dimiliki sebelumnya sekaligus mengkaji kapabilitas *hot cell* dalam penerapan metode tersebut. Pada penelitian ini telah dilakukan simulasi menggunakan PEB *dummy* dengan cacat artifisial. Simulasi dilakukan dengan metode *water washable visible penetrant* dan *solvent removable visible penetrant*. Tahapan simulasi penerapan *penetrant test* antara lain *precleaning*, *apply penetrant*, *dwell time*, *remove penetrant*, *apply developer*, *inspect* dan *post cleaning*. Hasil simulasi dengan metode *penetrant test* mampu mendeteksi cacat permukaan berupa *crack* dan *porosity*, tetapi tidak dapat mendeteksi cacat *blister*. Berdasarkan hasil simulasi tersebut, dapat disimpulkan bahwa *penetrant test* dapat menjadi alternatif metode untuk melengkapi hasil pengujian tak merusak menggunakan metode radiografi sinar-X dan ultrasonik. Selain itu, untuk mengakomodasi penerapan metode *penetrant test* di *hot cell* IRM, diperlukan pengembangan fasilitas dukung dengan tetap memperhatikan kemudahan *handling* dan sistem keselamatan.

Kata kunci: Uji tak merusak, *penetrant test*, PEB *dummy*, simulasi.

ABSTRACT

NON-DESTRUCTIVE TEST SIMULATION OF IRRADIATED FUEL PLATE USING PENETRANT TEST METHOD. *The post-irradiation examination aims to determine the performance of nuclear fuel during irradiation in the reactor. Non-destructive tests at the Radiometallurgical Installation include visual observations, digital X-ray radiography, and ultrasonic tests for inspection of potential defects or anomalies in the fuel plate (PEB). Limitations in the detection of surface defects necessitate other nondestructive test methods, i.e., to simulate the use of the penetrant test method on the PEB dummy. The purpose of this simulation is to determine the ability of the penetrant test method to complement the non-destructive test data that has been previously conducted as well as to review the capability of the hot cell in applying the method. The simulation was carried out using a dummy PEB with artificial defects and used water-washable visible penetrant and solvent-removable visible penetrant. The simulation stages for implementing the penetrant test include precleaning, applying the penetrant, dwell time, removing the penetrant, applying developer, inspection, and post-cleaning. The simulation results with the penetrant test method are able to detect surface defects in the form of cracks and porosity, but cannot detect blister defects. Based on the simulation results, it can be concluded that the penetrant test can be an alternative method to complement the non-destructive test using X-ray and ultrasonic radiographic methods. In addition, to accommodate the application of the penetrant test method in IRM hot cells, it is necessary to develop support facilities while still paying attention to ease of handling and safety systems.*

Keywords: *Non-destructive test, penetrant test, PEB dummy, simulation.*

PENDAHULUAN

Integritas bahan bakar nuklir merupakan salah satu indikator unjuk kerja bahan bakar nuklir selama iradiasi di dalam reaktor nuklir. Integritas bahan bakar nuklir selama iradiasi harus tetap terjaga untuk menghindari potensi lepasan produk fisi ke dalam aliran pendingin. Data unjuk kerja bahan bakar nuklir selama iradiasi dapat diketahui melalui pengujian pasca iradiasi. Pusat Riset Teknologi Daur Bahan Bakar Nuklir dan Limbah Radioaktif (PRTDBBNLR) telah melakukan riset dan pengembangan bahan bakar nuklir, baik untuk reaktor riset maupun reaktor daya. Bahan bakar reaktor riset yang telah berhasil dikembangkan, difabrikasi dan diiradiasi di teras Reaktor Seba Guna – G.A Siwabessy (RSG-GAS) adalah elemen bakar uji (EBU) tipe pelat U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$. Bahan bakar ini diproyeksikan sebagai kandidat pengganti bahan bakar U_3Si_2/Al densitas $2,96 \text{ gU/cm}^3$ yang selama ini telah digunakan oleh RSG-GAS. Evaluasi unjuk kerja terhadap Pelat Elemen Bakar (PEB) U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ sedang dilakukan di *hot cell* Instalasi Radiometalurgi (IRM) melalui pengujian pasca iradiasi, baik pengujian tak merusak maupun merusak. Pengujian tak merusak yang telah dilakukan antara lain pengamatan visual, pengukuran konsistensi dimensi, pengujian *gamma scanning*, *ultrasonic testing (UT)* dan radiografi sinar-X digital. Hasil uji tak merusak tersebut menunjukkan bahwa tidak ada perubahan warna, cacat, *swelling* maupun kerusakan yang signifikan (anomali) pada kelongsong maupun PEB U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ akibat iradiasi [1]-[4].

Pengujian tak merusak menggunakan radiografi sinar-X dan UT memiliki keterbatasan dalam mendeteksi cacat pada permukaan PEB, karena radiografi sinar-X dan UT dominan digunakan untuk deteksi cacat sub-permukaan [5]. Radiografi sinar-X sulit mendeteksi cacat pada kelongsong PEB yang sejajar dengan inti elemen bakar (IEB) dikarenakan densitas kelongsong lebih kecil dari pada IEB. Penggunaan UT untuk deteksi cacat pada PEB relatif sulit dilakukan karena tebal PEB hanya 1,38 mm yang menyebabkan tinggi grafik yang dihasilkan hampir sama [6]. Dengan keterbatasan itu maka diperlukan metode pengujian tak merusak lainnya agar dapat melengkapi hasil pengujian menggunakan radiografi sinar-X dan UT. Saat ini lebih dari 50 metode NDT

yang telah dikembangkan, salah satunya adalah dengan menggunakan metode *penetrant test* [7].

Penetrant test merupakan pengujian untuk mendeteksi cacat terbuka pada permukaan bahan padat dan tidak berpori dengan menggunakan gaya kapiler [6],[8]. *Penetrant test* dapat mendeteksi cacat permukaan dengan ukuran cacat hingga 0,01 mm, tetapi tidak dapat mendeteksi cacat tertutup, cacat di dalam material dan material yang berpori [9]. *Penetrant test* sangat sesuai diterapkan pada logam seperti titanium, tembaga, aluminium dan besi tahan karat [10]. Kontaminasi yang dihasilkan saat penggunaan tidak akan mempengaruhi benda uji secara signifikan [11].

Penetrant test diklasifikasikan menjadi dua tipe yaitu *visible penetrant* dan *fluorescent penetrant*. Berdasarkan teknik penggunaannya dibagi menjadi tiga metode yaitu *water washable*, *solvent removable* dan *post-emulsifying* [6]. Prinsip kerja *penetrant test* adalah ketika cairan penetran diberikan pada material yang terdapat cacat maka cairan akan masuk ke dalam cacat dan *developer* digunakan untuk mengangkat cairan *penetrant* tersebut agar terlihat secara visual [12],[13]. Pada penetran tipe *fluorescent*, pembacaannya menggunakan sinar ultraviolet di ruang gelap.

Pada penelitian ini, simulasi *penetrant test* dilakukan dengan menggunakan metode *solvent removable visible penetrant* dan *water washable visible penetrant*. Selain berbeda dalam penggunaan cairan penetran, perbedaan dua metode *penetrant test* terletak pada tahapan pembersihan permukaan PEB *dummy* setelah *dwelling time* berakhir. Pada metode *solvent removable visible penetrant*, pembersihan dilakukan menggunakan *remover* (SKC-S) yang disemprotkan ke kain halus terlebih dahulu sebelum digunakan pada permukaan PEB *dummy*, sedangkan pada *water washable visible penetrant* pembersihannya dilakukan menggunakan air mengalir pada suhu maksimal 43°C dengan tekanan maksimal 50 psi [5]. Tujuan simulasi ini adalah memberikan alternatif pengujian tak merusak pada PEB, khususnya pada deteksi potensi cacat permukaan yang selama ini baru diakomodasi melalui pengamatan visual. Selain itu, kemudahan penerapan metode ini di dalam *hot cell* lebih lanjut dapat dipelajari dan dikaji melalui simulasi penggunaan *penetrant test* pada PEB.

METODOLOGI

Simulasi pengujian ini menggunakan PEB *dummy* pra iradiasi. Sebelum simulasi pengujian dilakukan, terlebih dahulu disiapkan PEB *dummy* yang mempunyai cacat artifisial dalam bentuk *porosity* dan *crack* dengan ukuran cacat yang bervariasi dari lebar kecil sampai besar seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Pelat elemen bakar *dummy* yang telah diberikan cacat artifisial.

Langkah selanjutnya adalah mempersiapkan peralatan dan bahan serta pengaplikasian metode *penetrant test*. Bahan yang diperlukan pada pengujian dengan metode *penetrant test* terdiri dari *developer*, *cleaner/remover* dan larutan penetroan (*water washable* dan *visible penetrant*) seperti yang terlihat pada Gambar 2.

Simulasi pengujian tak merusak pada PEB *dummy* dengan *penetrant test* dilakukan dengan dua metode uji, yaitu *removable visible penetrant* dan *water washable visible penetrant*. Alur pengujian secara lengkap ditunjukkan pada Gambar 3 [5],[14].

Simulasi pengujian dimulai dengan tahap *pre-cleaning*, yaitu membersihkan permukaan PEB *dummy* menggunakan

cleaner MAGNAFLUX SKC-S hingga bersih dan kering yang dilanjutkan dengan penyemprotan cairan penetroan ke permukaan PEB *dummy* dan dibiarkan selama 5 hingga 10 menit. Hal ini dilakukan untuk memberikan kesempatan untuk cairan penetroan memasuki cacat pada permukaan PEB *dummy*. Waktu tunggu (*dwelling time*) untuk tiap material berbeda dan selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 1.



Gambar 2. Aerosol dan pelarut untuk simulasi *penetrant test* pada PEB *dummy*.

Tabel 1. Minimal *dwelling times* untuk beberapa jenis material [5].

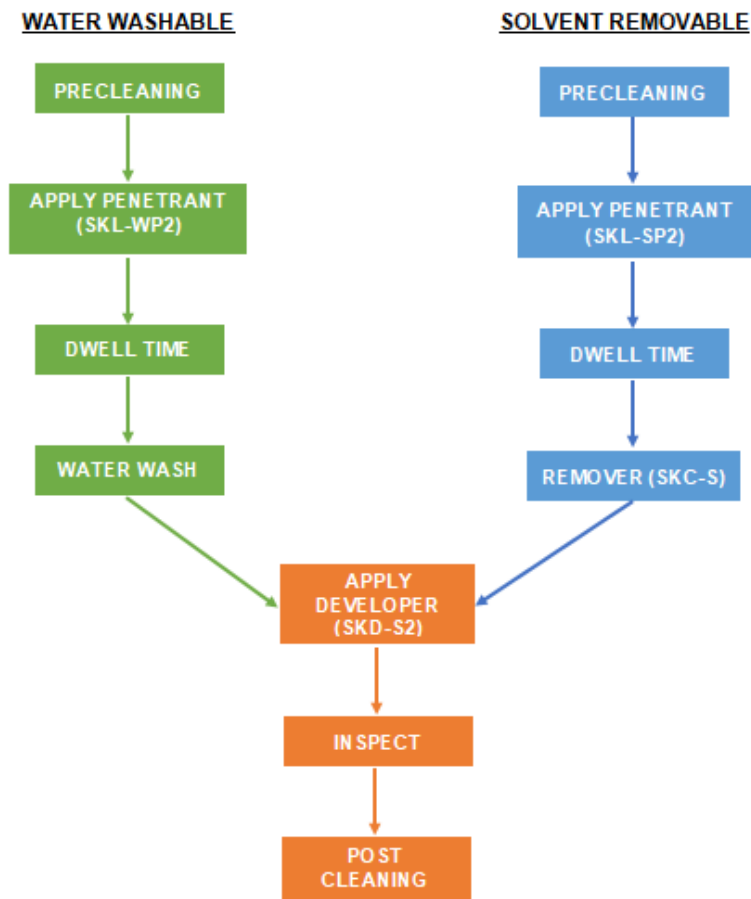
Material	Bentuk	Tipe Diskontinuitas	<i>Dwelling Times</i> ⁽¹⁾ (menit)
Aluminium, magnesium, baja, brass and bronze, titanium dan paduan temperatur tinggi	<i>Castings and welds</i>	<i>Cold shuts, porosity, lack of fusion, cracks</i> (semua bentuk)	5
	<i>Wrought materials – extrusions, forgings, plate</i>	<i>Laps, cracks</i>	10
<i>Carbide-tipped tools</i>	<i>Brazed or welded</i>	<i>Lack of fusion, porosity, cracks</i>	5
Plastik	Semua bentuk	<i>Cracks</i>	5
Kaca	Semua bentuk	<i>Cracks</i>	5
Keramik	Semua bentuk	<i>Cracks</i>	5

Note:

⁽¹⁾ Berlaku pada rentang temperatur antara 50°F hingga 125°F (10°C hingga 52°C), sedangkan pada rentang temperatur dari 40°F (5°C) hingga 50°F (10°C), minimal *dwelling time* harus 2 kali nilai yang tercantum.

Tahapan selanjutnya adalah *apply developer* yang dilakukan dengan penyemprotan developer ke seluruh permukaan PEB *dummy* pada jarak 20 sampai 30 cm. Setelah proses penyemprotan developer selesai, dilakukan tahapan

inspeksi untuk analisa dan interpretasi. Terakhir adalah tahapan *post cleaning*, yaitu pembersihan seluruh permukaan PEB *dummy* yang dilakukan dengan menggunakan *remover* SKC-S atau air dan dikeringkan menggunakan kain bersih.



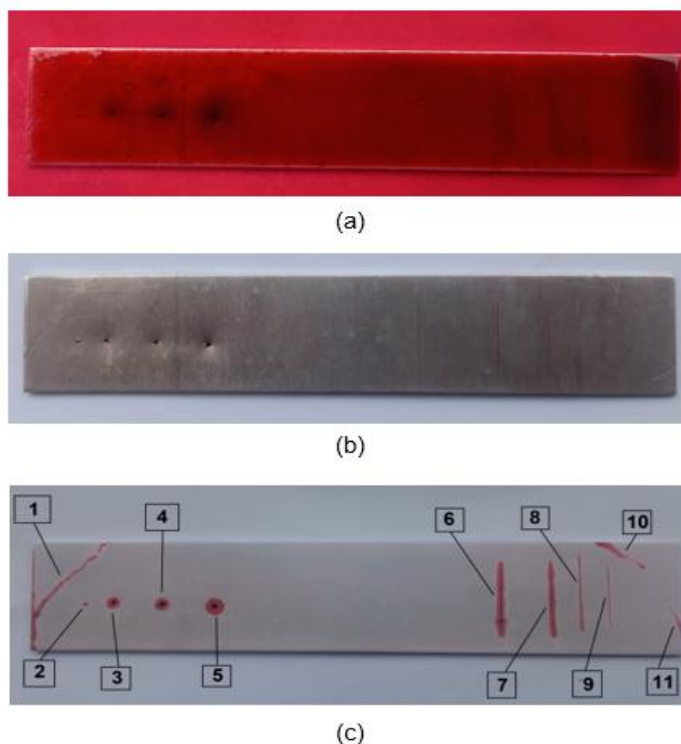
Gambar 3. Prosedur simulasi *penetrant testing* pada PEB *dummy* [15].

HASIL DAN PEMBAHASAN

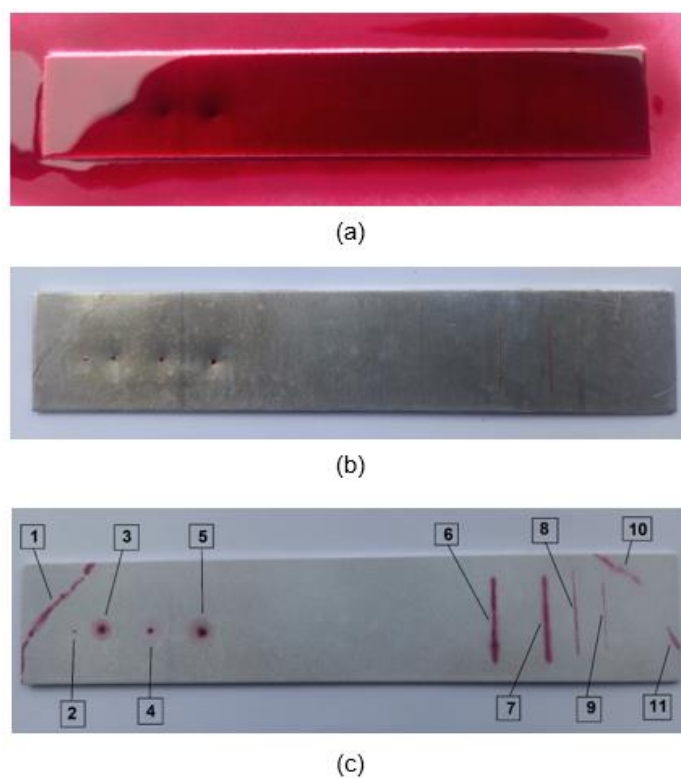
Hasil simulasi *penetrant test* pada PEB *dummy* dengan metode *solvent removable visible penetrant* dapat dilihat pada Gambar 4, sedangkan dengan metode *water washable visible penetrant* ditunjukkan pada Gambar 5. Gambar 4 (a) dan 5 (a) menunjukkan proses pemberian cairan penetran untuk masing-masing metode, SKL-SP2 untuk metode *solvent removable* dan SKL-WP2 untuk metode *water washable*. Setelah memberlakukan *dwell times* selama 10 menit, permukaan PEB *dummy* dibersihkan menggunakan *remover* SKC-S pada metode *solvent removable visible penetrant* (Gambar 4.b) dan dibersihkan menggunakan air bersih pada metode *water washable visible*

penetrant (Gmbar 5.b) Kedua penggunaan metode menunjukkan hasil yang cukup baik dengan indikasi tampilan visual sesuai dengan bentuk dan posisi cacat artifisial pada PEB *dummy* pasca penggunaan *developer* SKD-S2. Indikasi cacat ditunjukkan dengan warna merah pada permukaan PEB *dummy* dan indikasi retakan ditampilkan melalui warna dalam bentuk garis, sedangkan *porosity* ditampilkan dalam bentuk titik seperti yang terlihat pada Gambar 4(c) dan 5(c).

Pasca inspeksi permukaan PEB *dummy*, indikasi cacat tersebut dianalisis dan diukur menggunakan *software* pengolah citra *ImageJ* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6. Hasil pengukuran dimensi cacat dapat dilihat pada Tabel 2.

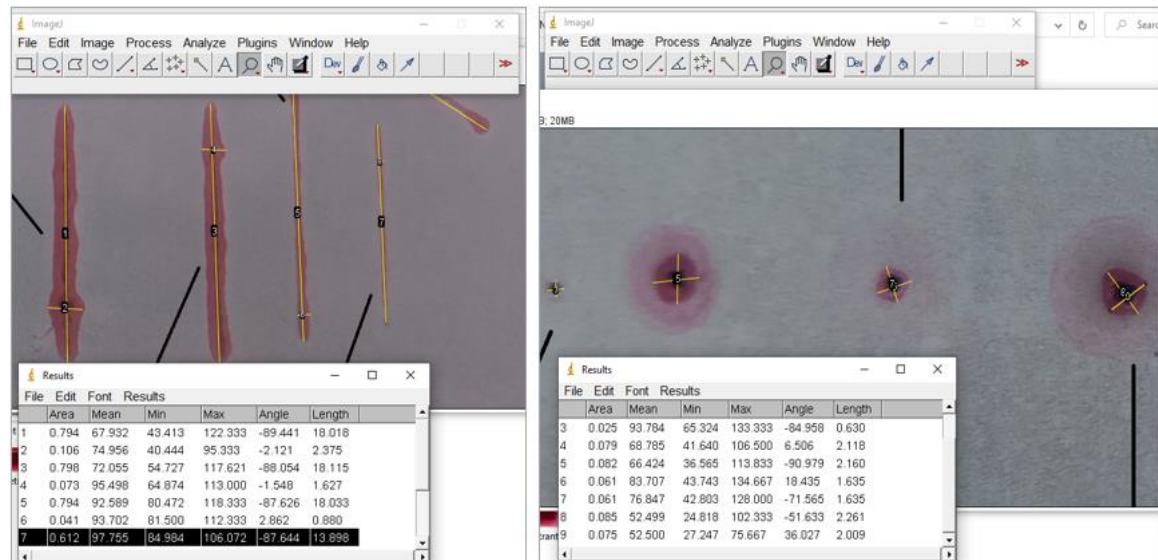


Gambar 4. Proses penggunaan *penetrant solvent removable* (SKD-S2) mulai dari aplikasi penetran (a); pembersihan (b) dan hasil akhir (c).



Gambar 5. Proses penggunaan *penetrant water washable* (SKL-WP2) mulai dari aplikasi penetran (a); pembersihan (b) dan hasil akhir pengujian (c).

Simulasi Uji Tak Merusak Pelat Elemen Bakar Pasca Iradiasi Menggunakan Metode *Penetrant Test* (Yusuf Gigih Wicaksono, Helmi Fauzi Rahmatullah, Refa Artika, Sri Ismarwanti, Rohmad Sigit)



Gambar 6. Pengukuran dimensi *cracks* dan *porosity* pada PEB *dummy* dengan menggunakan aplikasi *imageJ*.

Pada simulasi pengujian ini, cacat artifisial berupa *porosity* diukur berdasarkan panjang diameter cairan *penetrant* terpanjang dan terpendek, sedangkan pada *crack* yang diukur ialah panjang dan lebar cacat. Garis warna kuning pada Gambar 6 menunjukkan panjang serta lebar cacat hasil dari

pengukuran *imageJ*. Hasil dari pengukuran metode *solvent removable visible penetrant* dapat dilihat pada Tabel 2. Hasil pengukuran tersebut menunjukkan bahwa semakin lebar cairan *penetrant* yang terlihat, maka semakin besar ukuran cacat pada permukaan PEB *dummy*.

Tabel 2. Hasil pengukuran dimensi cacat menggunakan aplikasi *ImageJ*.

No	Jenis Cacat	Metode <i>solvent removable visible penetrant</i>		Metode <i>water washable visible penetrant</i>	
		Panjang Cacat (mm)	Lebar Cacat (mm)	Panjang Cacat (mm)	Lebar Cacat (mm)
1	<i>Crack</i>	23,47	1,25	23,09	1,34
2	<i>Porosity</i>	1,12	0,25	0,76	0,63
3	<i>Porosity</i>	3	2,80	2,16	2,11
4	<i>Porosity</i>	3,36	3,01	1,63	1,63
5	<i>Porosity</i>	4,21	3,97	2,26	2
6	<i>Crack</i>	18,01	2,37	18,25	1,88
7	<i>Crack</i>	18,11	1,62	18,50	1,29
8	<i>Crack</i>	18,03	0,88	17,80	0,55
9	<i>Crack</i>	13,89	0,48	14,09	0,32
10	<i>Crack</i>	10,99	1,61	11,61	1,13
11	<i>Crack</i>	5,17	1,15	5,26	1,04

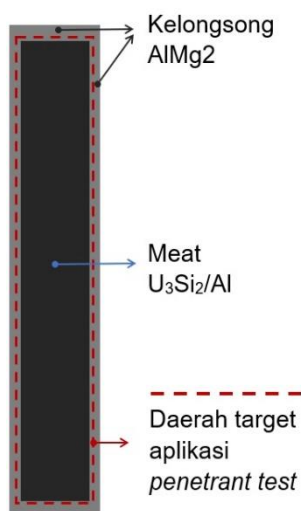
Pada Gambar 5 (c), secara visual terlihat bahwa cacat artifisial nomor 4 memiliki dimensi lebih besar daripada cacat artifisial nomor 3, tetapi hasil pengukuran pada Tabel 2 menunjukkan bahwa ukuran cacat artifisial nomor 4 lebih kecil jika dibandingkan cacat artifisial nomor 3. Hal ini dapat terjadi karena pada saat melakukan *remove penetrant*, tekanan air lebih besar diberikan pada cacat artifisial nomor 4, sehingga *penetrant* yang

terperangkap pada cacat no 4 lebih banyak terbuang.

Berdasarkan inspeksi akhir pasca simulasi *penetrant test*, terlihat bahwa selain dapat mendeteksi cacat artifisial pada permukaan PEB *dummy*, kedua metode uji tersebut juga berhasil mendeteksi *crack* yang bukan merupakan cacat artifisial yang telah disiapkan sebelumnya. Pada Gambar 4 (c) dan Gambar 5 (c) pasca simulasi *penetrant*

test, terdapat tiga buah *crack* yang terlihat pada sisi kanan dan kiri PEB *dummy* yang sebelumnya tidak terlihat melalui pengamatan visual. Hal ini menunjukkan bahwa metode *penetrant test* dapat digunakan untuk melengkapi hasil pengujian tak merusak lainnya.

Berdasarkan hasil simulasi pengujian yang telah dilakukan, *penetrant test* dapat berperan pada deteksi potensi cacat permukaan kelongsong yang melingkupi *meat* bahan bakar yang ditunjukkan oleh garis putus-putus pada Gambar 8. Pada daerah tersebut, uji radiografi sinar-X kesulitan mendeteksi adanya *cracks* pada kelongsong yang disebabkan oleh tingginya densitas *meat* bahan bakar jika dibandingkan dengan densitas kelongsong. Titik krusial pengamatan berada pada sepanjang *meat* dengan nilai *burnup* tertinggi berada di bagian tengah PEB, sehingga evaluasi integritas kelongsong penting untuk dilakukan dalam pencegahan lepasan produk fisi dan potensi difusi *meat* bahan bakar ke bagian kelongsong.



Gambar 8. Daerah target utama *penetrant test* pada PEB yang ditandai dengan garis putus-putus.

Ketebalan PEB yang hanya sekitar 1,38 mm menyebabkan pengujian dengan metode ultrasonik mengalami beberapa kendala. Namun demikian, interpretasi sinyal pada pengujian ultrasonik telah dapat mendeteksi terjadinya *blister* pada kelongsong PEB menggunakan metode *through transmission* [3], sedangkan untuk penentuan cacat *cracks* dengan ukuran kecil perlu pengembangan lebih lanjut. Cacat *blister* tidak dapat dideteksi menggunakan

penetrant test, karena cacat *blister* termasuk cacat permukaan dengan kedalaman yang tidak cukup untuk dapat diakomodasi dengan *penetrant test*. Hal ini terjadi karena pada saat pemberian *remover*, seluruh cairan *penetrant* yang berada di dalam *blister* ikut terangkat. Hal ini juga terlihat pada Gambar 4 dan 6 yang menunjukkan variasi ketebalan garis yang mengindikasikan jumlah cairan *penetrant* yang tertinggal. Semakin tipis citra garis, maka semakin kecil cacat yang terdapat pada permukaan PEB *dummy*.

Hal lain yang harus dikaji adalah kompatibilitas *hot cell* IRM untuk penerapan metode *penetrant test* pada uji pasca iradiasi PEB yang sebenarnya. Pada dasarnya, penggunaan *penetrant test* telah umum pada industri nuklir, termasuk penerapan secara remote menggunakan sistem robotik untuk inspeksi in-situ komponen reaktor nuklir [16]. Pengembangan fasilitas *hot cell* IRM masih sangat terbuka, terutama untuk alat-alat bantu modifikasi yang spesifik peruntukannya untuk pengujian pasca iradiasi di *hot cell* IRM. Beberapa modifikasi dan pengembangan yang telah dilakukan antara lain pembuatan *punching machine device* untuk pencuplikan sampel PEB, *cutting rod machine* yang didesain untuk uji pasca iradiasi *short pin* PWR fuel serta penambahan kamera pada manipulator untuk mempermudah penanganan dan transportasi sampel [17]. Mengingat keuntungan penggunaan *penetrant test* untuk melengkapi hasil pengujian tak merusak lainnya, maka pengembangan sistem pendukung *penetrant test* untuk mempermudah penanganan dengan tidak mengesampingkan sistem keselamatan akan menjadi fokus kegiatan litbang selanjutnya.

SIMPULAN

Simulasi pengujian tak merusak dengan metode *penetrant test* dapat mendeteksi cacat yang berada di permukaan PEB *dummy* seperti *crack* atau *porosity* namun tidak dapat mengukur kedalaman cacat. Selain itu, *penetrant test* tidak dapat mendeteksi cacat yang terletak di sub-permukaan PEB. Data dan hasil pengujian yang komprehensif akan memerlukan semua opsi metode uji tak merusak untuk saling melengkapi. Melalui simulasi yang dilakukan pada penelitian ini, *penetrant test* tidak dapat menggantikan peran dari pengujian radiografi sinar-X maupun ultrasonik, akan tetapi dapat menjadi solusi atas kekurangan dari metode

tersebut, sehingga metode ini sangat layak untuk dapat diterapkan di dalam *hot cell* dengan tetap memperhatikan kapabilitas *hot cell* dan sistem keselamatan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala PRTDBNLR dan seluruh staf IRM yang telah membantu pelaksanaan kegiatan penelitian ini.

PERNYATAAN KONTRIBUTOR

Kontributor utama dalam makalah ini adalah Yusuf Gigih Wicaksono dan Rohmad Sigit, sedangkan Helmi Fauzi Rahmatullah, Sri Ismarwanti dan Refa Artika sebagai kontributor anggota.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Y. Nampira, S. Ismarwanti, H. F. Rahmatullah, and K. Mustopa, "Non destructive test nuclear fuel U_3Si_2/Al 4,8 gU/cm^3 post irradiation with 60% burn up research reactor," *Hotlab Conference Proceeding* 2016, Karlsruhe, Germany.
- [2]. R. Artika *et al.*, "Non destructive tes for U_3Si_2/Al fuel plate with 4,8 gU/cm^3 uranium density using digital X-ray radiography," *Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir Urania*, vol. 26, no. 1, hal. 49-56, 2020.
- [3]. 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", *Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir Urania*, vol. 23, no. 3, hal. 153-164, 2017.
- [4]. 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.
- [5]. A. Kumar, "Experimental study of defects in stainless steel 316L weldments through liquid penetrant test for surface," 2021, doi: 10.34218/IJARET.12.4.2021.047.
- [6]. ASME, "Nondestructive examination Section V 2019 ASME Boiler and Pressure Vessel Code An International Code from IHS," 2019. [Online]. <https://www.asme.org/shop/certification-accreditation>
- [7]. J. Idris and A. Al-Bakoosh, "Application of non-destructive testing techniques for the assessment of casting of AA5083 Alloy," 2014.
- [8]. International Atomic Energy Agency, "Liquid penetrant and magnetic particle testing at level 2," 2000. Accessed: Dec. 03, 2022. [Online]. Available: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/31/018/31018313.pdf?r=1.
- [9]. G. Caturano, G. Cavaccini, A. Ciliberto, V. Pianese, and R. Fazio, "Liquid penetrant testing: Industrial process," vol. 3, p. 12, 2009, doi: 10.1685/CSC09319.
- [10]. Q. Y. Lu and C. H. Wong, "Applications for non-destructive testing techniques for post-process control of additively manufactured parts," *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 12, no. 4, pp. 301–321, 2017.
- [11]. N. P. Migun, A. B. Gnusin, and I. v Volovich, "Some possibilities of enhancing the efficiency of penetrant inspection penetrant methods," *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 41, no. 7, pp. 55–60, 2005.
- [12]. K. A. Reddy, "Non-destructive testing evaluation of stainless steel materials," *Mater Today Proc*, vol. 4, no. 8, pp. 7302–7312, 2017, doi: 10.1016/J.MATPR.2017.07.060.
- [13]. M. Gupta, M. A. Khan, R. Butola, and R. M. Singari, "Advances in applications of Non-Destructive Testing (NDT): A review," *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2021,
- [14]. MAGNAFLUX, "How to Instructions Visible Dye Penetrant Testing," 2018. Accessed: Dec. 03, 2022. [Online]. <https://www.magnaflux.com/Files/Instructions/How-to-Do-Visible-Dye-Penetrant-Testing.pdf>
- [15]. MAGNAFLUX, "Penetrant Testing Process Guide Methods A-B-C-D", Accessed: Dec. 03, 2022. [Online]. https://www.magnaflux.com/Files/Instructions/Penetrant-Testing_Process-Guide_Methods-A-B-C-D.pdf.
- [16]. M. J. Choi, K. T. Park, S. Hyun, "Liquid penetrant testing apparatus for a welding part of steam generator heating pipe," 2010. <https://patents.google.com/patent/KR20100060128A/en>
- [17]. 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.

HALAMAN INI DIBIARKAN KOSONG