

Uji tidak merusak bahan bakar U_3Si_2-Al tingkat muat uranium $4,8 \text{ g/cm}^3$ pasca irradiasi fraksi bakar 20% dan 40%

Yusuf Nampira* dan Sri Ismarwanti
Kawasan Nuklir BATAN Serpong
*email : ynampira@gmail.com

Abstrak

Pengembangan bahan bakar nuklir reaktor riset uranium silisida/aluminium bertujuan untuk memperpanjang penggunaannya di reaktor dilakukan dengan meningkatkan tingkat muat uranium dari $2,9 \text{ gU/cm}^3$ menjadi $4,8 \text{ gU/cm}^3$ dalam bahan bakar tersebut. Untuk mengetahui unjuk kerja bahan bakar ini dalam penggunaannya di reaktor perlu dilakukan pengujian pasca irradiasi, diantaranya uji tidak merusak penyapuan gamma, pengamatan visual, pengukuran ketebalan terhadap elemen bakar nuklir uranium silisida tingkat muat uranium $4,8 \text{ g/cm}^3$ pasca irradiasi dengan fraksi bakar 20% dan 40%. Hasil pengujian menunjukkan bahwa distribusi fraksi bakar ^{235}U dalam pelat ke dua elemen bakar mengikuti pola distribusi normal. Bagian tengah elemen bakar dengan fraksi bakar 40%, mencapai fraksi bakar 53%, *swelling* pelat elemen bakar sangat kecil lebih kecil dari 1% dan tidak ditemukan korosi yang dapat berpotensi lepasnya uranium dan hasil belah dari pelat elemen bakar. Elemen bakar uranium silisida tersebut mempunyai unjuk kerja yang baik.

Kata kunci : Bahan bakar nuklir, uji tidak merusak, pasca irradiasi, fraksi bakar 20%-40%.

Abstract

Development of nuclear fuel research reactor uranium silicide / aluminum with the aim to extend its use in the reactor is done by increasing the fuel density from 2.9 gU /cm^3 to 4.8 gU /cm^3 . Performance of these fuels in the reactor is carried out by investigating the post irradiation examination, including non destructive tests, such as: the gamma scanning, visual observation, measurement of the thickness of the uranium silicide/aluminium fuel element loading level of 4.8 gU / cm^3 after irradiation with a burnup of 20% and 40%. These experimental results show that the burn-up distribution of ^{235}U in the fuel plates follow a normal distribution pattern. In case of fuel plate irradiated up to 40% burnup, the burnup in the middle part of the fuel reaches 53% with very small (less than 1%) and no corrosion that can potentially release of uranium. It is concluded that the uranium silicide fuel elements have good performance.

Keywords: nuclear fuel, non destructive test, post-irradiation, 20% -40% burnup.

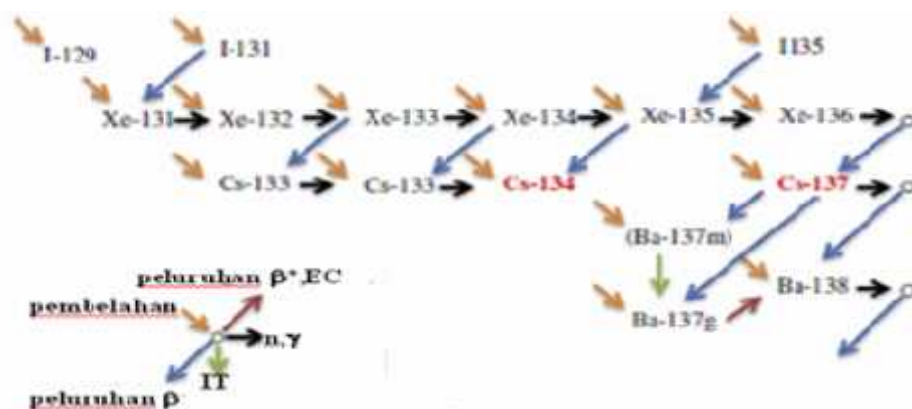
1. Pendahuluan

Hingga saat ini fasilitas Reaktor Serba Guna GA Siwabesi banyak digunakan untuk penelitian yang berkaitan dengan pengujian bahan dan bahan nuklir serta penggunaannya untuk produksi radiofarmaka, yang sangat dibutuhkan di bidang kesehatan. Guna meng-efektifkan pengoperasian reaktor tersebut, sangat diperlukan suatu bahan bakar nuklir yang dapat digunakan dalam jangka waktu yang lebih lama pada daya operasi reaktor

normal. Oleh sebab itu dibutuhkan suatu bahan bakar yang mempunyai kandungan uranium yang lebih banyak dalam elemen bakar. Berkaitan dengan hal tersebut, maka dilakukan pengembangan elemen bakar yang selama ini digunakan, yaitu diantaranya menaikkan tingkat muat uranium dalam bahan bakar. Selama ini, reaktor menggunakan bahan bakar uranium silisida/aluminium, yang mempunyai tingkat muat uranium $2,96 \text{ g/cm}^3$

[1]. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut, maka dilakukan pengembangan bahan bakar dengan peningkatan kandungan uranium dalam bahan bakar, yaitu menggunakan bahan bakar uranium silisida/aluminium dengan tingkat muat uranium $4,8 \text{ g/cm}^3$ [2,3] bahan bakar UMo/Al [4,5,6,7]. Elemen bakar uranium silisida/ aluminium tingkat muat uranium $4,8 \text{ g/cm}^3$ berbentuk pelat dibuat sesuai dengan proses dan jaminan mutu untuk produksi elemen bakar uranium silisida/ aluminium tingkat muat $2,9 \text{ g/cm}^3$ di PT INUKI Persero.

Dalam penggunaannya, elemen bakar nuklir diirradiasi di dalam *core* reaktor dengan fluks neutron sekitar $10^{14} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$, dimana terjadi reaksi nuklir dan proses fisika. Sebagai akibatnya, terjadi perubahan komposisi dan sifat kimia bahan bakar serta pembungkusnya (kelongsong). Besar tingkat perubahan tersebut sesuai dengan daya yang dihasilkan oleh elemen bakar selama penggunaannya di reaktor [8,9,10]. Selama reaksi nuklir dalam inti bahan bakar berlangsung, terjadi reaksi pembelahan dan penangkapan neutron.



Gb1. Deret pembentukan dan peluruhan hasil belah ^{134}Cs dan ^{137}Cs [1].

Mayoritas perubahan yang terjadi di bahan bakar disebabkan oleh reaksi pembelahan uranium-235 (^{235}U) yang menghasilkan hasil belah yang diantaranya radionuklida ^{131}I , radioisotop Xe dan radioisotop Cs. Selama elemen bakar masih berada di dalam reaktor hasil belah tersebut akan mengalami peluruhan dan tangkapan neutron didalam bahan bakar yang akhirnya akan menghasilkan radionuklida ^{134}Cs dan ^{137}Cs , reaksi tersebut ditunjukkan dalam Gb. 1. Disamping reaksi pembelahan dalam bahan bakar mengandung ^{238}U . ^{238}U dengan neutron thermal mengalami reaksi tangkapan neutron membentuk bahan dapat belah lain, seperti ^{239}Pu dan ^{241}Pu . Nuklida baru ini cenderung

membelah yang secara normal dan berperan sebagai bagian laju pembelahan. Bahan *cladding*/pembungkus/kelongsong-bahan bakar akan mengalami reaksi penangkapan neutron serta proses oksidasi, yang terjadi sebagai pemanasan yang dihasilkan dari reaksi inti yang terjadi dalam bahan bakar dan kontak bahan tersebut dengan air pendingin di sekitarnya. Sehubungan dengan perubahan komposisi unsur dalam bahan bakar dan bahan *cladding* tersebut tentunya akan menyebabkan perubahan sifat fisis, seperti : penurunan daya hantar panas dan perubahan mikrostruktur dan densitas bahan bakar^[4,7]. Hal ini akan menyebabkan penurunan ketangguhan elemen bakar.

Tingkat perubahan tersebut dipengaruhi oleh : pertukaran panas, tekanan, derajat bakar, irradiasi dan faktor-faktor lain^[2]. Guna mengetahui tingkat penurunan tersebut dapat mempengaruhi tingkat keselamatan penggunaannya di dalam reaktor, maka dilakukan pengujian pasca irradiasi terhadap elemen bakar tersebut. Adapun pengujian yang dilakukan yaitu pengujian tidak merusak dan uji/analisis dengan merusak.

Uji tidak merusak (NDT), merupakan bagian sentral dalam program uji pasca irradiasi. Teknik NDT seringkali digunakan untuk memperoleh gambaran elemen bakar pasca iradiasi secara singkat dan sebagai pendekatan awal untuk mempersempit daerah pengamatan *degradasi* elemen bakar pasca irradiasi.^[11,12] Data hasil perolehan pengujian ini memberi kontribusi untuk menentukan daerah pengambilan sampel guna menentukan kebolehjadian penyebab dari perbedaan perubahan yang terjadi dalam elemen bakar melalui pemeriksaan uji merusak. Dari pengujian tersebut data dan informasi penting yang dikumpulkan terutama pada penurunan unjuk kerja *cladding*, yang merupakan keselamatan utama dalam mengevaluasi pemeriksaan dari elemen bakar. Pengujian pelat elemen bakar merupakan suatu kesatuan yang tidak dapat dipisahkan, sebab mayoritas fenomena ketahanan elemen bakar tergantung antara bahan bakar dan *cladding*.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memperoleh gambaran tentang unjuk kerja pelat elemen bakar U_3S_2/Al dengan tingkat muat $4,8 \text{ g U/cm}^3$, melalui pemeriksaan visual, pengukuran ketebalan dan penyapuan gamma (gamma scanning) pada elemen bakar tersebut setelah diirradiasi dengan derajat bakar (burn-up) 20% dan 40%.

2. Tata kerja

2.1. Bahan yang digunakan

Pelat elemen bakar uranium silisida tingkat muat uranium $4,8 \text{ g/cm}^3$ yang telah mengalami irradiasi di teras reaktor serbaguna G.A. Siwabesi hingga mencapai fraksi bakar 20% dan 40% ^{235}U sebagai bahan uji, nitrogen cair sebagai pendingin detektor *high purity germanium* (HpGe), standar ^{60}Co digunakan untuk mengkalibrasi energi, dan standar ^{152}Eu digunakan untuk mengkalibrasi efisien detektor.

2.2. Alat yang digunakan

Spektrometer gamma ORTEC dengan menggunakan detektor HpGe sebagai pendeteksi hasil belah dalam elemen bakar, kamera DLSR, Canon 50D dan teropong binokuler Nikon untuk mengamati elemen bakar secara visual serta *thickness gage* Mitutoyo untuk mengukur ketebalan elemen bakar.

2.3. Langkah kerja

Pelat elemen bakar uranium silisida/Al tingkat muat uranium $4,8 \text{ g/cm}^3$ yang telah diirradiasi dengan fraksi bakar 20% dan 40% setelah mengalami pendinginan lebih dari 101 hari dipindahkan ke *Hotcell*. Pelat elemen bakar tersebut dilakukan pengamatan visual menggunakan teropong binokuler dan kamera digital. Pengukuran ketebalan pelat elemen bakar masing masing dilakukan pada 5 posisi pada arah panjang pelat dan 3 posisi pengukuran pada arah lebar pelat. Penyapuan sinar gamma dilakukan pada jarak setiap variasi 5 mm dengan waktu pencacahan 300 detik untuk pelat dengan fraksi bakar 40% dan 500 detik untuk pelat dengan fraksi bakar 20%.

3. Hasil dan pembahasan

3.1. Spesifikasi elemen bakar

Pelat elemen bakar USi 4,8 g/cm³ yang telah disiapkan mempunyai spesifikasi seperti dalam Tabel 1⁽¹⁴⁾, dimensi pelat ele-

men bakar seperti ditunjukkan dalam Tabel 2.

Tabel 1. Spesifikasi pelat elemen bakar U3Si2/Al tingkat muat 4,8 gU/cm³

URAIAN	NILAI
Pengayaan ²³⁵ U	19,75 ^{+0,2%} _{-0,5%}
Jumlah pelat elemen bakar (PEB) dalam EB uji	3 PEB
Kandungan ²³⁵ U per- PEB	18,36 ± 0,30 g
Kandungan ²³⁵ U per- EB	55,08 ± 3,80 g
toleransi zona 1	nominal ± 20 %
toleransi zona 2	nominal + 25 %

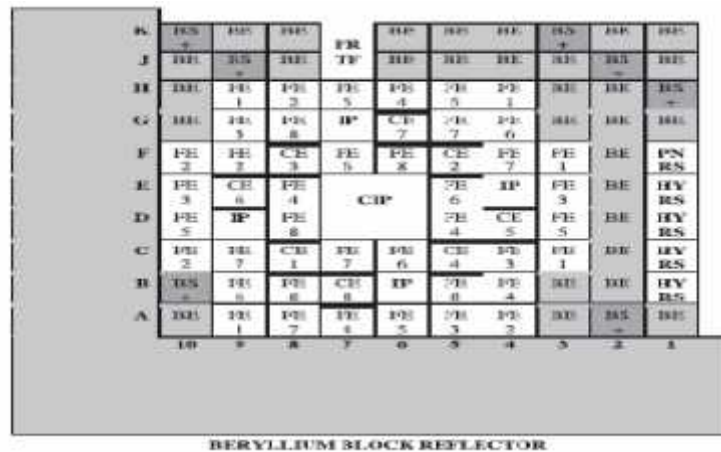
Tabel 2. Data Pengukuran Dimensi

No	Kode PEB	Panjang,mm	Lebar,mm	Tebal,mm
1	CBBJ 249	629,00	70,70	1,40
2	CBBJ 250	629,00	70,71	1,39
3	CBBJ 251	629,00	70,70	1,39

3.2. Perjalanan bahan bakar di dalam reaktor

Elemen bakar uranium silisida tingkat muat uranium 4,8 g/cm³ (EBU-1) mengalami proses irradiasi di dalam *core reactor* serba guna G.A Siwabesi dalam jangka waktu tertentu. Konfigurasi *core reflector* reaktor seperti ditunjukkan dalam Gb. 2 menggambarkan posisi: elemen bakar (FE), elemen kendali (CE), Be elemen reflector (BE), *elemen Be reflector* dengan plug (BS+), posisi irradiasi (IP),: posisi pusat irradiasi (CIP), *rabbit sistem* pneumatik (PNRS), *Rabbit sistem* hidrolis (HYRS) Adapun elemen bakar yang dilakukan proses

irradiasi terdiri dari 3 pelat bahan bakar no3 : CBBJ 249/ no 7 : CBBJ 250 dan no:19 CBBJ 251, masuk ke teras reaktor pada posisi G-7, dan dioperasikan (29-11-2008 s/d 26-05-2009), EBU CBBJ-249 dikeluarkan dari G-7 (teras reaktor). EBU-1 terdiri dari 2 pelat bahan bakar no:7 CBBJ 250 dan no 19 CBBJ251 masuk teras reactor pada teras (posisi G-7) dioperasikan pada teras (16-6 2009 s/d 16-12-2009), kemudian pelat no 19 CBBJ 251 dikeluarkan. EBU-1 terdiri dari 1 pelat bahan bakar no: 7 CBBJ 250 dimasukkan dalam teras pada posisi G-7 hingga mencapai *burn-up* 60%.



Gb2. Konfigurasi *core-reflector* RSG-GAS[1]

3.3. Penyapuan Gamma

Selama irradiasi elemen bakar di *core* reaktor akan mengalami reaksi pembelahan ^{235}U dan penangkapan neutron ^{238}U yang membentuk ^{239}Pu . ^{239}Pu bila terkena neutron juga mengalami pembelahan. Dalam reaksi pembelahan ^{235}U maupun ^{239}Pu akan melepaskan energi yang berupa panas. Kebolehjadian terjadinya reaksi tersebut sangat tergantung dari jumlah neutron yang menyebabkan terjadinya reaksi, yang dipengaruhi oleh posisi dalam pelat elemen bakar dan kedudukan penyerap neutron terhadap elemen bakar. Distribusi pembelahan

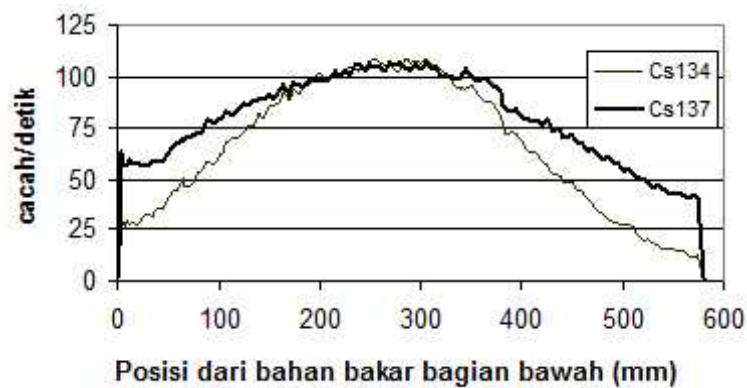
atom dapat belah dapat dilakukan dengan mengukur kandungan hasil belah yang digunakan sebagai indikator fraksi bakar bahan bakar. Sebagai pertimbangan pemilihan radionuklida sebagai indikator tersebut yaitu : (1). Merupakan radionuklida yang berada dalam daerah mayoritas *fission yield* dari reaksi pembelahan ^{235}U . (2). Mempunyaiampang serapan neutron kecil (3) Mempunyai umur paro panjang. Dalam Tabel 3. menunjukkan tentang spesifikasi radionuklida ^{134}Cs dan ^{137}Cs yang memenuhi persyaratan tersebut di atas.

Tabel 3. Spesifikasi radionuklida ^{134}Cs dan ^{137}Cs

Isotop	$T_{1/2}$ (tahun)	σ (barn)	E (keV)	% yield
^{134}Cs	2,1	24,3	605	0,976
^{137}Cs	30,1	0,05	662	0,851

Hasil penyapuan gamma energi 605 keV (^{134}Cs) dan energi 662 keV (^{137}Cs) dalam berbagai posisi pada pelat elemen bakar uranium silisida dengan fraksi bakar ^{235}U perhitungan 20% dan 40%, seperti yang ditunjukkan dalam Gb. 3 dan Gb. 4. Distribusi ^{134}Cs dan ^{137}Cs dalam pelat elemen bakar uranium silisida tingkat muat $4,8 \text{ g/cm}^3$ mengikuti pola distribusi normal. Pengukuran

ini mempunyai fluktuasi lebih kecil dari 4% nilai ini lebih kecil dari penyimpangan pencacahan radiasi gamma dengan peralatan spektrometer gamma. Pengukuran tersebut menunjukkan bahwa bahan bakar dalam pelat mengalami pembelahan secara normal dan tidak menunjukkan adanya ketidaksesuaian pembelahan yang dapat menimbulkan pemanasan lokal yang berlebihan.



Gb 3. Pola distribusi ¹³⁴Cs dan ¹³⁷Cs dalam bahan bakar uranium silisida/aluminium tingkat muat 4,8gU/cm³ fraksi bakar teoritis 40%.

Fraksi bakar perhitungan dari irradiasi dalam reaktor yaitu pelat tersebut telah mengalami pembakaran sebesar 40%. Berdasarkan data tersebut, distribusi fraksi bakar setiap lokasi aksial dalam pelat elemen bakar dihitung dengan persamaan di bawah ini:

$$F_{i,j} = N \frac{A_{i,j}}{A_{i,r}} F_{i,r}$$

$F_{i,j}$: Fraksi bakar perhitungan posisi j pada pelat i

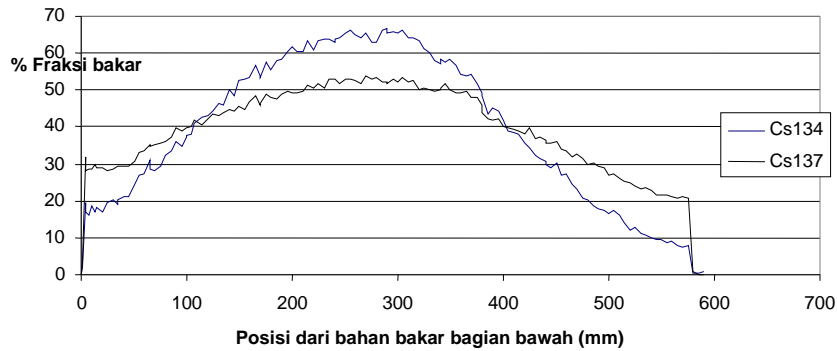
$F_{i,r}$: Fraksi bakar rerata pada pelat i

$A_{i,j}$: Aktifitas cesium pada posisi j pada pelat i

$A_{i,r}$: Aktifitas cesium rerata pada pelat i

Perhitungan fraksi pada setiap lokasi berdasarkan pengukuran ¹³⁷Cs menunjukkan bahwa fraksi bakar maksimum dalam bahan bakar berada pada daerah antara 235 mm sampai dengan 345 mm dengan nilai fraksi bakar 52,7% ²³⁵U, sedangkan berdasarkan pengukuran cesium-134 daerah fraksi bakar tersebut berada pada 250 mm sampai dengan

320 mm dari bahan bakar bagian bawah, dengan nilai fraksi bakar 66,14% ²³⁵U (Gb. 4). Perbedaan nilai fraksi bakar maksimum ini disebabkan oleh perbedaan sumber ¹³⁷Cs didominasi dari pembelahan ²³⁵U secara langsung (Gb. 1), sedang ¹³⁷Cs hasil peluruhan radionuklida hasil belah lainnya lebih sedikit di dibandingkan dengan ¹³⁴Cs. Di samping ituampang serapan neutron ¹³⁴Cs lebih besar dibandingkan dengan ¹³⁷Cs, hal ini ditunjukkan oleh cacah radioaktivitas- γ ¹³⁴Cs pada daerah ujung bahan bakar yang lebih kecil dibandingkan dengan cacah ¹³⁷Cs saat keluar dari proses irradiasi dan daerah antara 130 mm sampai dengan 370 mm dari bagian bawah pelat elemen bakar (Gb. 4). Oleh sebab itu radioaktifitas ¹³⁴Cs dalam elemen bakar tersebut tidak hanya ditentukan oleh fraksi bakar ²³⁵U dalam bahan bakar akan tetapi dipengaruhi faktor-faktor lainnya yang berkontribusi pembentukan ¹³⁴Cs. Sehubungan dengan keadaan tersebut di atas maka data fraksi bakar yang digunakan dalam pengamatan *gamma scanning* adalah data pengamatan ¹³⁷Cs.

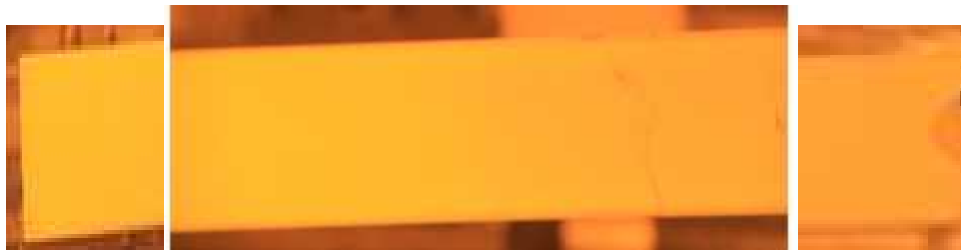


Gb 4 . Distribusi fraksi bakar pada pelat elemen bakar uranium silisida tingkat muat 4,8 (fraksi bakar 40%)

3.4. Pengamatan Visual

Hasil pengamatan visual bahan bakar uranium silisida tingkat muat uranium 4,8 g/cm³ yang telah mengalami irradiasi di dalam teras reaktor dengan daya 15 MW telah mengalami pembakaran ²³⁵U dengan fraksi bakar 20% dan 40% (Gb. 5-6), permukaan *cladding* dari ke dua pelat elemen bakar tersebut mengalami oksidasi permukaan homogen dan tidak menunjukkan adanya

oksidasi sumuran pada permukaan tersebut. oksidasi permukaan tersebut tidak menunjukkan adanya perbedaan warna yang nyata di daerah yang mengalami pembebanan panas berlebih sebagai akibat dari terjadinya reaksi inti dalam bahan bakar. Oksidasi permukaan tersebut dalam batasan normal untuk *cladding* elemen bakar tipe pelat.



Gb 5. Visual pelat elemen bakar tingkat muat uranium 4,8 g/cm³ (fraksi bakar 20%).



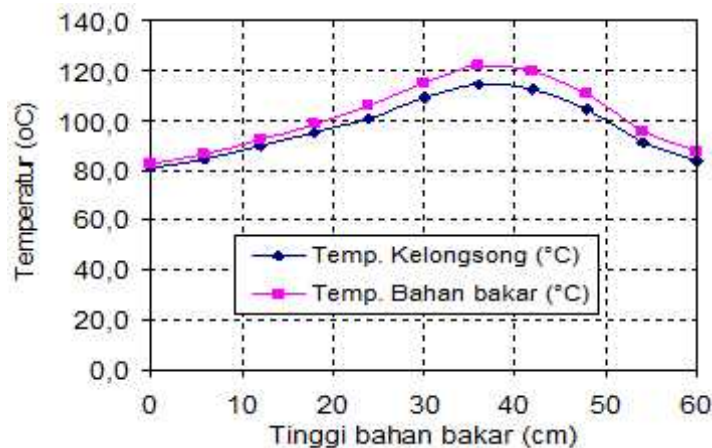
Gb 6. Visual pelat elemen bakar tingkat muat uranium 4,8 g/cm³ (fraksi bakar 40%).



Gb7. Visual ketebalan pelat elemen bakar tingkat muat uranium $4,8 \text{ g/cm}^3$ (fraksi bakar 20%).

Berdasarkan perhitungan temperatur bahan bakar dalam reaktor, keadaan operasi tunak menunjukkan bahwa distribusi panas dalam elemen bakar ditunjukkan seperti pada Gb. 8. Temperatur tersebut mencapai maksimum pada daerah antara 30 cm sampai 40 cm dari

bawah bahan bakar. perbedaan temperatur maksimum terhadap temperatur rendah (daerah bawah dan atas) berada sekitar 40°C . dengan perbedaan tersebut korosi pada permukaan AlMg_2 relatif sama.

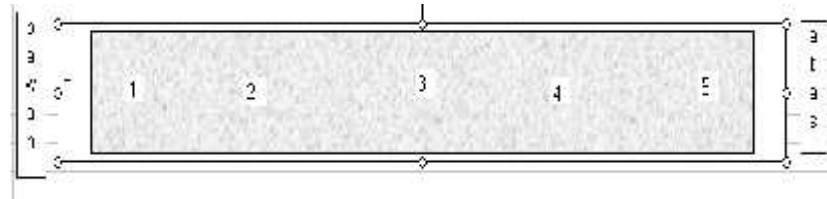


Gb 8. Distribusi Panas pada bahan bakar dan kelongsong pelat elemen bakar uranium silisida/aluminium [14].

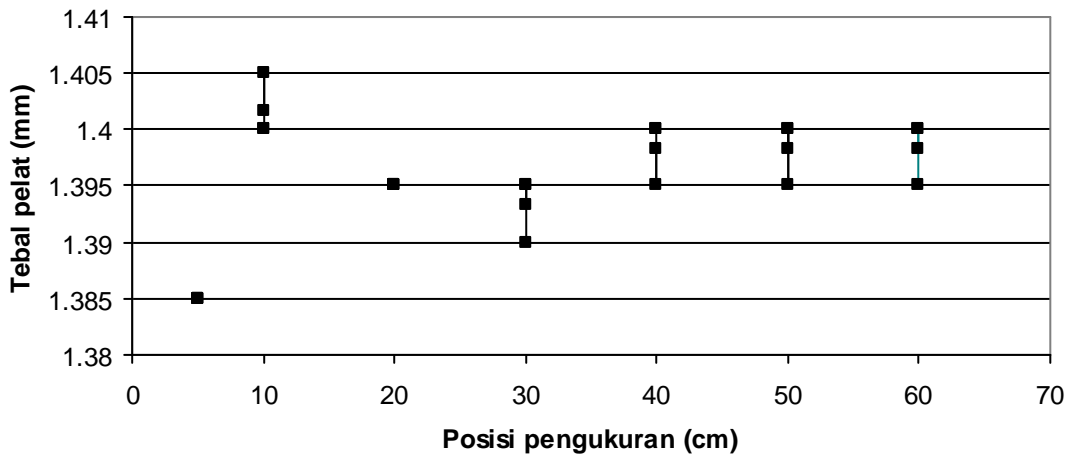
3.5. Pengukuran Ketebalan

Selama bahan bakar diiradiasi akan terjadi reaksi pembelahan satu atom ^{235}U akan menghasilkan dua atom hasil belah. Sesuai dengan tingkat reaksi pembelahan yang berlangsung dalam bahan bakar tersebut maka volume bahan bakar berubah secara terus menerus sesuai dengan fraksi bakar (burn-up) yang dicapai oleh bahan bakar tersebut. Hasil belah-inti padat diantaranya: Nb, Y, Zr, Mo, Ru, Te, Rh, Pd, Rb, I, Ba dan Sr menyebabkan *swelling* pada cladding elemen bakar. *Swelling* hasil belah padat tidak

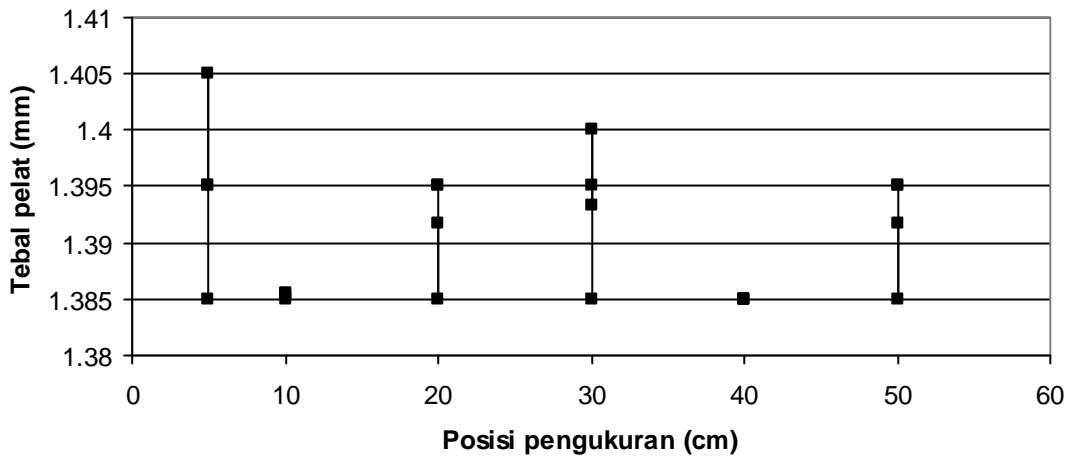
dipengaruhi oleh temperatur. Pembelahan tersebut juga menghasilkan pula hasil belah yang berbentuk gas. Hasil belah ini akan membentuk gelembung-gelembung gas pada matrik *meat* bahan bakar. Kenaikan suhu yang dihasilkan dari reaksi pembelahan dapat menyebabkan peningkatan tekanan gas hasil belah tersebut. Bertambahnya volume tersebut menyebabkan kenaikan tegangan di dalam *cladding* pada derajat bakar tinggi terutama disebabkan oleh hasil belah yang berbentuk gas, hal ini akan menyebabkan terjadinya *swelling* pada pelat elemen bakar.



Posisi pengukuran ketebalan pelat elemen bakar



Pelat elemen bakar fraksi bakar 20%.



Pelat elemen bakar fraksi bakar 40%

Gb. 9 Distribusi ketebalan pelat elemen bakar uranium silisida tingkat muat 4,8 g/cm³.

Uranium dalam bahan bakar tipe pelat U₃Si₂ terdispersi secara homogen dalam *meat* bahan bakar (²³⁵U 0,051 g/cm²) dengan matrik aluminium. Dalam pelat elemen bakar pasca iradiasi hasil belah ²³⁵U yang terbentuk juga

terdispersi dalam matrik bahan aluminium. Sedangkan hasil belah pada setiap posisi pada elemen bakar sesuai dengan distribusi fraksi bakar dalam bahan bakar pada posisi tersebut. Pada posisi pelat bagian tengah (fraksi bakar

maksimum : 52,7%), oleh sebab itu sekitar 0,527 g/cm³ ²³⁵U yang mengalami pembelahan membentuk hasil belah yang terikat oleh matrik. Pada waktu diiradiasi dalam reaktor temperatur elemen bakar seperti ditunjukkan pada Gb. 7. Gas hasil belah yang terbentuk dalam proses pembelahan ²³⁵U terdistribusi terkungkung oleh matrik aluminium dalam elemen bakar, maka penambahan volume yang ditimbulkan oleh hasil belah padat relatif sangat kecil bila dibandingkan oleh jaringan ikatan matrik aluminium dalam bahan bakar yang mengikat *cladding* aluminium. Oleh sebab itu *swelling* elemen bakar yang disebabkan oleh hasil belah padat dan gas hasil belah sangat kecil. Keadaan tersebut ditunjukkan pada Gb. 8 (distribusi ketebalan pelat elemen bakar). Adapun ketebalan pelat elemen bakar uranium silisida pasca irradiasi dengan fraksi bakar 20% dan 40% (antara 1,385 mm sampai 1,405 mm) dari tebal pelat bahan bakar segar antara 1,39 mm hingga 1,40 mm masih dalam batas yang diperkenankan (tidak mengganggu aliran air pendingin dalam bundel bahan bakar).

4. Kesimpulan

Dari hasil pengamatan berdasarkan uji tidak merusak pelat elemen bakar tersebut di atas menunjukkan bahwa : pelat elemen bakar uranium silisida/Al dengan tingkat muat 4,80 gU/cm³ setelah diiradiasi dalam teras reaktor hingga mencapai fraksi bakar teoritis rata rata 20% dan 40% menunjukkan distribusi fraksi bakar sesuai dengan distribusi normal (pada bagian tengah elemen bakar dengan fraksi bakar 40%, mencapai fraksibakar 53%), *swelling* pelat elemen bakar sangat kecil (lebih kecil dari 1%) dan tidak ditemukan korosi yang dapat berpotensi lepasnya uranium dan hasil belah dari pelat elemen bakar.

Ucapan terima kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada seluruh Pimpinan dan staf Pusat Teknologi

Bahan Bakar Nuklir dan Seluruh Pimpinan dan staf Pusat Reaktor Serba Guna yang membantu dalam pelaksanaan kegiatan ini.

Daftar pustaka

1. P. H. Liem, S. Amini, A. G. Hutagaol, T.M Sembiring, Nondestructive burnup verification by gamma-ray spectroscopy of LEU silicide fuel plates irradiated in the RSG GAS multipurpose reactor, *Annu. Nucl. Energy* 56(2013)57-65.
2. M. R. Ghavi, Nuclear Fuel Cycle Reactor Fuel Design and Fabrication, SPSU, CENTER FOR NUCLEAR STUDIES [2013], pp. 1-33.
3. D.F. Sears and K.T. Conlon, [2006], Development of LEU Fuel to Convert Research Reactors: NRU, MAPLE AND SLOWPOKE, Atomic Energy of Canada Limited (AECL), Ontario K0J 1J0, Canada, CANDU, pp. 4-8
4. V.D.B. Sven, L. Ann, K. Edgar, et al., *Adv. Sci. Technol.* 73(2010)78-90
5. M.K. Meyer, R. Ambrosek, R. Briggs, et al., Progres in The RERTR Fuel Development Program, 10th International Topical Meeting, Research Reactor Fuel Management, ENS-IAEA, Sofia, Bulgaria, 30 April-3 May 2006, pp. 55-59.
6. M.Ripert, S. Dubois, P. Boulcourt, et al., IRIS3 Experiment-Status and Result of Thickness Increases, 10th International Topical Meeting, Research Reactor Fuel Management, ENS-IAEA, Sofia, Bulgaria, 30 April-3 May 2006, pp. 113-117.
7. C. Jarousse, P.Lemoin, W. Petry, Monolithic UMo Full Size Prototype Plates Manufacturing Development status as of April 2006, 10th International Topical Meeting, Research Reactor Fuel Management, ENS-IAEA, Sofia, Bulgaria, 30 April-3 May 2006, pp. 65-68.

8. I. Matsson, Studies of Nuclear Fuel Performance using On-site Gamma-ray Spectroscopy and In-pile Measurements, ACTA Uneiversitatis Upsaliensis Uppsala, ISSN 1651, 2006, pp 15-51.
9. S. Pervez, M. Latif, M. Israr, "Performance of HEU and LEU fuels in Pakistan Research Reactor-1 (PARR-1)", IAEA, Nuclear Fuel Cycle and Materials Section, Vienna (Austria); ISBN 978-92-0-162709-4; ISSN 1684-2073, 2009, pp. 67-71
10. D.F. Hergenreder, G. Gennuso, C.A. Lecot, Power Density Distribution by Gamma Scanning of Fuel Rods Measurement Technique in RA-8 Critical Facility", 1999, www.igorr.com/PS2_Gennuso, diunduh 23-09-2013.
11. P. Barbero, G. Bidoglio, M. Bresesti, et al., Post Irradiation Examination of The Fuel Discharged from the Trino Vercellese Reactor after the 2nd Irradiation, Commission of The European Communities Nuclear Science and Technology, EUR 5605, Paris, France, 1977.
12. A. Alghem, M. Kadouma, R. Benaddad, NDT as a tool, for Post-Irradiation Examination, The 17th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai, China, 25-28 Oct 2008, pp. 1-5.
13. K. Eitrheim, Gamma Scanning of Nuclear Fuel, NSK Gamma Seminar, 16-17th September, 2009, pp.1-12.
14. I.P. Hastuti, T.M. Sembiring, S. Suparjo dkk., LAK Insersi Elemen Bakar Uji Silisida 3 pelat Tingkat Muat 4,8 dan 5,2 gU/cm³ di Teras RSG-GAS, PRSG-BATAN, Jakarta, 2008.