

---

## ANALISIS METALOGRAFI PELAT ELEMEN BAKAR $U_3Si_2/Al$ PASCA IRADIASI DENSITAS $2,96 \text{ gU/cm}^3$

Maman Kartaman Ajiriyanto, Aslina Br.Ginting, Junaedi

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir – BATAN

Kawasan Puspipstek Serpong Gd.20, Tangerang Selatan, Banten 15314

e-mail: makar@batan.go.id

(Naskah diterima: 20-12-2017, Naskah direvisi: 30-01-2018, Naskah disetujui: 01-02-2018)

### ABSTRAK

**ANALISIS METALOGRAFI PELAT ELEMEN BAKAR  $U_3Si_2/Al$  DENSITAS  $2,96 \text{ gU/cm}^3$  PASCA IRADIASI.** Telah dilakukan analisis metalografi pelat elemen bakar (PEB)  $U_3Si_2/Al$  pasca iradiasi di dalam *hotcell*. Tujuan analisis metalografi untuk mengetahui perubahan mikrostruktur PEB  $U_3Si_2/Al$  dan ketebalan kelongsong AlMg2 setelah mengalami iradiasi didalam reaktor hingga *burnup* 56%. PEB  $U_3Si_2/Al$  pasca iradiasi dipotong pada posisi *top*, *middle* dan *bottom* dengan ukuran masing-masing sekitar  $5 \times 5 \times 1,37$  mm. Preparasi metalografi dimulai dari pemotongan PEB menggunakan *cutting machine* dengan *low speed*, *mounting*, *grinding* dan *polishing* didalam *hotcell* 104-105. Proses *mounting* dilakukan menggunakan resin dengan waktu >10 jam, proses *grinding* menggunakan kertas ampas hingga ukuran grit 2400 dan proses *polishing* dilakukan menggunakan pasta intan dari ukuran 3 sampai 1 mikron dengan kecepatan putar 150 rpm selama 5 menit. Pengamatan mikrostruktur menggunakan mikroskop optik di *hotcell* 107 dengan perbesaran 200 kali. Hasil analisis mikrostruktur diperoleh partikel  $U_3Si_2$  dengan bentuk dan ukuran beragam, matriks Al dan kelongsong AlMg2 yang tersebar sepanjang PEB  $U_3Si_2/Al$ . Pengamatan mikrostruktur PEB  $U_3Si_2/Al$  pasca iradiasi belum menunjukkan hasil yang baik karena hanya dapat mengamati topografi *meat*  $U_3Si_2/Al$ , matriks Al dan kelongsong AlMg2. Hal ini disebabkan karena pengamatan mikrostruktur dengan menggunakan mikroskop optik di dalam *hotcell* maksimal hanya dengan perbesaran 200 kali sehingga fenomena *interaction layer* dan *small gas bubble* tidak dapat diamati. Namun mikrostruktur PEB  $U_3Si_2/Al$  dengan *burn up* 56% dibandingkan dengan mikrostruktur bahan bakar  $U_3Si_2/Al$  pasca iradiasi dengan *burn up* 60% yang merupakan hasil peneliti sebelumnya, hasilnya menunjukkan adanya interaksi antara *meat*  $U_3Si_2$  dengan matriks Al dan adanya lapisan atau *layer* dengan ketebalan sekitar 5 hingga 20 mikron. Sementara itu, ketebalan kelongsong AlMg2 diperoleh lebih besar dari 0,25 mm, hal ini menunjukkan bahwa pengaruh iradiasi tidak memberikan perubahan ketebalan kelongsong AlMg2 secara signifikan sehingga secara keseluruhan PEB  $U_3Si_2-Al$  pasca iradiasi masih memiliki integritas dan kestabilan cukup baik.

**Kata kunci :** PEB  $U_3Si_2/Al$ , pasca iradiasi, mikrostruktur, ketebalan kelongsong.

---

## ABSTRACT

**METALLOGRAPHIC ANALYSIS OF IRRADIATED  $U_3Si_2/Al$  FUEL ELEMENT PLATE OF 2,96  $gU/cm^3$  DENSITY.** Metallographic analysis of  $U_3Si_2/Al$  fuel element plate has been performed in hotcell. The purpose of metallographic analysis is to study changes in PEB  $U_3Si_2/Al$  microstructure and  $AlMg_2$  cladding thickness after irradiation in reactor until burn up of 56%. The fuel element plate of irradiated  $U_3Si_2/Al$  was cut in top, middle and bottom positions with each size around  $5 \times 5 \times 1,37$  mm. Metallographic preparation starts from sample cutting using cutting machine with low speed and sample mounting, grinding and polishing in hotcell 104–105. Sample mounting was done by using resin for more than 10 hours followed by grinding with sand papers up to grit size of 2400 and polishing with diamond paste of size 3 to 1 micron at a rotational speed of 150 rpm for 5 minutes. Microstructure observation was performed with optical microscope in hotcell 107 at 200 times magnification. Microstructure examination reveals  $U_3Si_2$  particles with diverse forms and sizes, Al matrix and  $AlMg_2$  cladding were spread along the  $U_3Si_2/Al$  side. Microstructure observation of irradiated  $U_3Si_2/Al$  has not shown good result because only topography observation of  $U_3Si_2/Al$  meat, Al matrix and  $AlMg_2$  cladding can be done due to limited capability of the optical microscope in hotcell, where maximum magnification can be attained only at 200 times so that the phenomenon of interaction layer and small gas bubble can not be observed. However,  $U_3Si_2/Al$  microstructure of 56% burnup, if compared to the microstructure of  $U_3Si_2/Al$  fuel element plate of 60% burnup from previous researcher, shows interaction between  $U_3Si_2$  meat with Al matrix and the existence of layers with a thickness about 5 up to 20 microns. Meanwhile, the observed thickness of  $AlMg_2$  cladding is greater than 0.25 mm, which indicates that irradiation does not significantly change the thickness of  $AlMg_2$  cladding so that the overall irradiated  $U_3Si_2-Al$  still has good integrity and stability.

**Keywords:** PEB  $U_3Si_2/Al$ , post irradiation, microstructure, cladding thickness.

## PENDAHULUAN

Bahan bakar  $U_3Si_2/Al$  densitas  $2,96 \text{ gU/cm}^3$  pasca iradiasi yang telah mengalami pendinginan di *fuel storage* dikirim ke IRM (Instalasi Radiometalurgi) untuk dilakukan uji PIE (*Post Irradiation Examination*) atau Uji Pasca Iradiasi di dalam *hotcell*. Uji pasca iradiasi bertujuan untuk mengetahui karakter bahan bakar setelah diiradiasi di reaktor dengan *burn up* 56%[1]. Bahan bakar pasca iradiasi mengalami penurunan unjuk kerja yang disebabkan oleh reaksi fisi  $^{235}U$  dengan neutron termal dan menghasilkan beberapa hasil fisi (hasil belah) maupun unsur-unsur bermassa berat seperti U, Pu, Nd, Cs, Eu, Sr, Ce, Zr, Kr dan Xe[2]. Besarnya isotop hasil fisi dan unsur-unsur bermassa berat berpengaruh kepada perubahan sifat kimia, mikrostruktur, sifat mekanik dan perubahan sifat lainnya, sehingga menyebabkan penurunan unjuk kerja bahan bakar  $U_3Si_2/Al$ .

Penurunan unjuk kerja bahan bakar pasca iradiasi dapat diketahui dengan melakukan uji tidak merusak (*non destructive test*, NDT) dan uji merusak (*destructive test*, DT). Uji tidak merusak meliputi pengamatan cacat secara visual terhadap bahan bakar pasca iradiasi, pengukuran ketebalan atau dimensi pelat elemen bakar (PEB) untuk mengetahui *swelling* dan pengukuran distribusi gamma di dalam PEB. Sementara itu, uji merusak meliputi analisis metalografi untuk mengamati perubahan mikrostruktur dan analisis fisikokimia untuk mengetahui kandungan hasil fisi dan unsur bermassa berat di dalam PEB[1].

Pada penelitian sebelumnya telah dilakukan analisis fisikokimia bahan bakar PEB  $U_3Si_2/Al$  densitas  $2,96 \text{ gU/cm}^3$  pasca iradiasi pada potongan bagian *top*, *middle* dan *bottom*. Hasil analisis fisikokimia telah diperoleh kandungan isotop  $^{235}U$  dalam PEB  $U_3Si_2/Al$  yang disebabkan oleh reaksi fisi[3,4]. Data isotop  $^{235}U$  sisa digunakan untuk perhitungan *burn up* bahan bakar

$U_3Si_2/Al$ . Besar *burn up* maksimal untuk bahan bakar  $U_3Si_2/Al$  saat diiradiasi dalam teras reaktor yang diizinkan hingga *burn up* 56%. Untuk melengkapi data PIE atau uji pasca iradiasi PEB  $U_3Si_2/Al$  densitas  $2,96 \text{ gU/cm}^3$  maka dilakukan penelitian lanjutan yaitu analisis metalografi. Data metalografi PEB  $U_3Si_2/Al$  bertujuan untuk mengetahui pengaruh radiasi terhadap mikrostruktur bahan bakar  $U_3Si_2/Al$  selama diiradiasi di dalam reaktor. Mikrostruktur yang diamati adalah ukuran partikel  $U_3Si_2$  dan distribusinya, ketebalan kelongsong  $AlMg_2$ , *layer* akibat interaksi dispersan  $U_3Si_2$  dengan matriks Al dan porositas akibat iradiasi. Data PIE digunakan sebagai umpan balik kepada reaktor dan fabrikator untuk mengevaluasi unjuk kerja bahan bakar  $U_3Si_2/Al$ .

Peneliti bahan bakar nuklir telah banyak melakukan analisis mikrostruktur terhadap bahan bakar  $U_3Si_2/Al$  pasca iradiasi. Peneliti A. Leenaers, dkk melakukan analisis metalografi PEB  $U_3Si_2/Al$  densitas  $4,8 \text{ gU/cm}^3$  dengan kelongsong  $AlFeNi$  pasca iradiasi dan memperoleh hasil mikrostruktur berupa *small gas bubble* pada *meat*  $U_3Si_2/Al$ , *interaction layer* pada dispersan  $U_3Si_2$  dan matriks Al serta perubahan kekerasan mikro pada *meat*  $U_3Si_2/Al$ [5]. Peneliti lain juga menyatakan bahwa mikrostruktur bahan bakar  $U_3Si_2/Al$  pasca iradiasi adalah gas *bubble* hasil fisi yang terdistribusi merata pada dispersan  $U_3Si_2$ . Berdasarkan analisis pola difraksi juga menghasilkan struktur  $U_3Si_2$  menjadi amorf[6]. Perubahan mikrostruktur pada bahan bakar  $U_3Si_2/Al$  disebabkan beberapa faktor antara lain adalah pengaruh iradiasi dan porositas *meat* bahan bakar. Pengaruh iradiasi menyebabkan terjadinya interaksi kelongsong  $AlMg_2$  dengan *meat*  $U_3Si_2/Al$  dan interaksi antara *meat* bahan bakar  $U_3Si_2$  dengan matriks Al[7]. Selain itu, selama berada di dalam reaktor, bahan bakar akan mengalami beberapa pembebanan diantaranya adalah *fluks neutron* sebesar  $2 \times 10^{14}$  neutron/cm<sup>2</sup>detik dan temperatur yang

diterima bahan bakar rata-rata sebesar 120 °C. Sementara itu, temperatur yang diterima pada bagian *meat*  $U_3Si_2/Al$  dan antarmuka *meat* dengan kelongsong AlMg2 lebih dari 200 °C[8]. Faktor kedua yang mempengaruhi perubahan mikrostruktur adalah persentase porositas *meat*  $U_3Si_2/Al$  di dalam volume bahan bakar. Porositas *meat* yang dihasilkan fabrikator bahan bakar bervariasi antara satu dengan lainnya, misalnya untuk ANL 3-15%volume bahan bakar, 4%volume untuk CERCA, 7-8%volume untuk NUKEM, 9-10%volume untuk B&W serta 4-8%volume untuk PT. INUKI[9]. Peningkatan porositas di dalam *meat*  $U_3Si_2/Al$  diduga akan mempengaruhi mikrostruktur PEB  $U_3Si_2/Al$ . Faktor ketiga yang mempengaruhi perubahan mikrostruktur bahan bakar adalah terjadinya interaksi  $U_3Si_2/Al$  dengan kelongsong AlMg2 akibat proses perolan PEB  $U_3Si_2/Al$  pada saat fabrikasi.

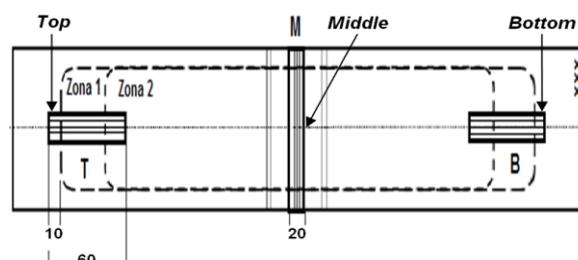
Pada penelitian sebelumnya telah diperoleh hasil bahwa PEB  $U_3Si_2/Al$  pra iradiasi setelah mengalami pemanasan hingga temperatur 500 °C tidak ada perubahan mikrostruktur pada *meat*, namun terjadi perubahan ukuran butir pada bagian kelongsong AlMg2[10]. Hasil penelitian lainnya menyatakan bahwa bahan bakar  $U_3Si_2/Al$  yang telah diiradiasi hingga *burn-up* 60% menyebabkan terjadinya interaksi antara partikel bahan bakar  $U_3Si_2$  dengan matriks Al. Pengamatan adanya *interaction layer* dan *small bubble* pada dispersan  $U_3Si_2$  yang dianalisis dengan elektron sekunder pada

*Scanning Electron Microscope* (SEM). Hasil pengamatan mikrostruktur dengan SEM menunjukkan adanya *interaction layer* dan juga gas *bubble* pada antarmuka di sekeliling dispersan  $U_3Si_2$ [11].

Pada penelitian lanjutan ini dilakukan analisis mikrostruktur PEB  $U_3Si_2/Al$  densitas 2,96 gU/cm<sup>3</sup> pasca iradiasi dengan *burnup* 56%. Sampel PEB dipotong pada bagian *top*, *middle* dan *bottom* sehingga dapat mewakili sifat secara keseluruhan. Pengamatan mikrostruktur yang dianalisis meliputi morfologi dispersan  $U_3Si_2$ , interaksi antara  $U_3Si_2$  dengan matriks Al, ketebalan kelongsong AlMg2, porositas atau gas *bubble* akibat iradiasi terutama pada bagian *meat*  $U_3Si_2/Al$ , pembentukan fasa kedua atau intermetalik pada *interface* partikel  $U_3Si_2$  dengan matriks Al.

## METODOLOGI

Bahan bakar  $U_3Si_2/Al$  densitas 2,96 gU/cm<sup>3</sup> yang telah diiradiasi dalam reaktor G.A. Siwabessy hingga *burn up* 56% dikirim ke *hotcell* IRM untuk dilakukan uji pasca iradiasi. Bahan bakar tersebut dibongkar (*dismantling*) sehingga diperoleh PEB  $U_3Si_2/Al$  dengan nomor pelat 20 yang siap dianalisis. PEB  $U_3Si_2/Al$  dipotong menjadi tiga bagian yaitu pada posisi *top*, *middle* dan *bottom* dengan ukuran masing-masing sekitar 5x5x1,37 mm menggunakan alat potong *diamond cutting low speed* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Posisi pemotongan PEB  $U_3Si_2/Al$  bagian *top*, *middle* dan *bottom*[12]

Ketiga sampel hasil potongan tersebut *dimounting* menggunakan resin epoksi dan *hardener* dengan *curing time*

>10 jam dan dibiarkan hingga mengeras secara alamiah selama 10 jam di dalam *hotcell*. Hasil *mounting* kemudian diampelas

dan dipoles menggunakan mesin *grinding* dan *polishing*. Proses *grinding* dilakukan menggunakan kertas SiC secara bertahap mulai dari ukuran grit 500, 800, 1200, 2000 dan 2400 dengan kecepatan putar 150 rpm masing-masing selama 3-5 menit[13,14]. Sampel kemudian dicuci dalam ultrasonik untuk menghilangkan pengotor yang menempel pada permukaan sampel. Proses *polishing* dilakukan dengan menggunakan pasta intan dari ukuran 3 sampai 1 mikron dengan kecepatan putar 150 rpm selama 5 menit. Sampel PEB  $U_3Si_2/Al$  hasil poles dicuci kembali dan dikeringkan, kemudian ditransfer ke *hotcell* 107 melalui konveyor untuk pengamatan mikrostruktur dengan menggunakan mikroskop optik. Keseluruhan tahapan preparasi metalografi didalam *hotcell* 104-105 dilakukan secara *remote* menggunakan bantuan tangan manipulator. Pengamatan mikrostruktur sampel PEB  $U_3Si_2/Al$  densitas  $2,96 \text{ gU/cm}^3$  pada potongan *top*, *middle* dan *bottom* dilakukan dengan perbesaran 50, 100 dan 200 kali di *hotcell* 107. Sementara itu, pengukuran ketebalan kelongsong AlMg2 dilakukan menggunakan *software zenlite* yang terlebih dahulu dilakukan kalibrasi menggunakan *reticle* dengan lensa objektif yang sama. Setelah kalibrasi dilakukan *image* analisis meliputi pemberian skala pada gambar dan pengukuran jarak. Pengukuran tebal kelongsong AlMg2 dilakukan dari titik terluar *meat* dan ditarik garis tegak lurus hingga sisi luar PEB  $U_3Si_2/Al$ [15].

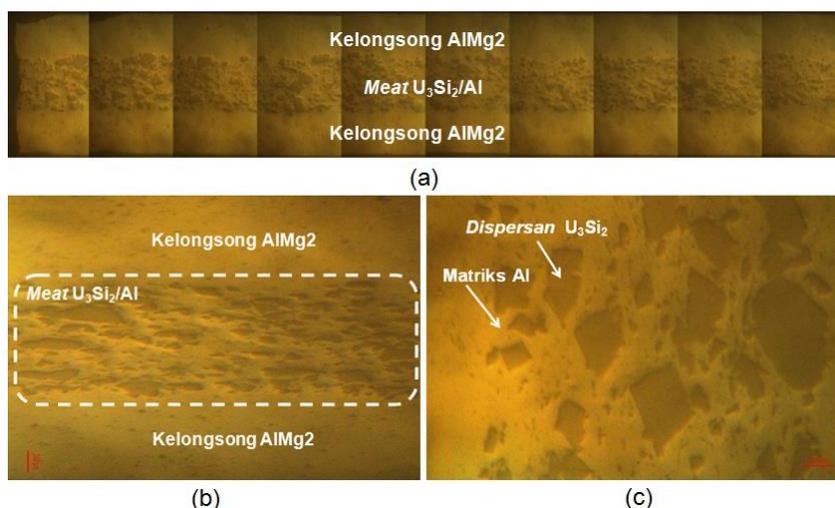
## HASIL DAN PEMBAHASAN

### a) Analisis mikrostruktur

Hasil pengamatan mikrostruktur PEB  $U_3Si_2/Al$  pasca iradiasi dari potongan bagian *top*, secara utuh ditunjukkan pada Gambar 2.(a). PEB  $U_3Si_2/Al$  terdiri dari

bagian kelongsong AlMg2 dan *meat*  $U_3Si_2/Al$  yang terdistribusi secara merata ditengah di sepanjang PEB. Pada bagian tepi terlihat adanya deformasi akibat pemotongan. Ketebalan kelongsong AlMg2 relatif merata dan dispersan  $U_3Si_2$  tidak berdifusi kedalam kelongsong AlMg2. Hasil tersebut diperjelas dengan analisis mikrostruktur potongan PEB  $U_3Si_2/Al$  bagian *top* dengan perbesaran 100 kali seperti yang terlihat pada Gambar 2.(b), yang menunjukkan adanya perbedaan antara kelongsong AlMg2 dengan *meat*  $U_3Si_2/Al$ .

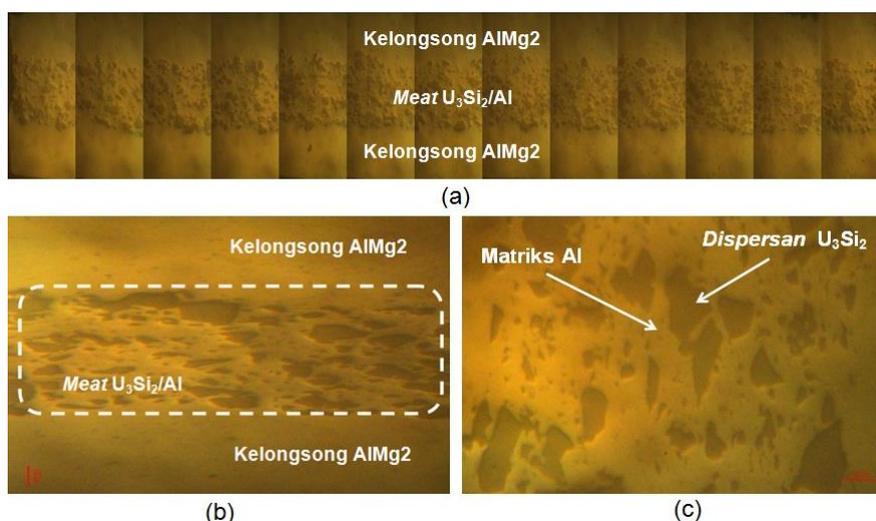
Sementara itu, analisis mikrostruktur *meat*  $U_3Si_2/Al$  dengan perbesaran 200 kali terlihat perbedaan yang nyata antara dispersan  $U_3Si_2$  dan matriks Al. Partikel  $U_3Si_2$  terdispersi secara merata dalam matriks Al seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.(c). Bagian yang berwarna agak gelap adalah dispersan  $U_3Si_2$  sedangkan yang terang adalah matriks Al. Ukuran dispersan tidak homogen dan bentuk tidak beraturan. Proses pembuatan dispersan  $U_3Si_2$  dengan cara *mechanical milling* menghasilkan bentuk dan ukuran yang khas seperti tersebut diatas yaitu bentuk tidak beraturan dan menyudut serta ukuran juga relatif kurang homogen. Pada sekeliling dispersan  $U_3Si_2$  tidak terlihat adanya reaksi antar muka dispersan  $U_3Si_2$  dengan matriks Al. Selain itu juga tidak terlihat adanya porositas atau gas *bubble* akibat iradiasi. Hal ini diduga karena resolusi mikroskop optik yang rendah atau juga karena gas *bubble* tidak terbentuk selama proses iradiasi. Mikroskop optik memiliki daya resolusi terbatas dibandingkan dengan mikroskop elektron, sehingga gas *bubble* dengan ukuran yang sangat halus tidak terlihat jelas apabila diamati dengan mikroskop optik.



Gambar 2. (a). Mikrostruktur PEB U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>/Al potongan bagian *top* perbesaran 50 kali  
(b). Mikrostruktur potongan PEB U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>/Al bagian *top* perbesaran 100 kali  
(c). Mikrostruktur U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> dan matriks Al potongan bagian *top* perbesaran 250 kali

Hasil pengamatan mikrostruktur PEB U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>/Al pasca iradiasi potongan bagian *middle* secara utuh ditunjukkan pada Gambar 3.(a). Sama halnya dengan mikrostruktur PEB U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>/Al potongan bagian *top*, pada potongan bagian *middle* diperoleh mikrostruktur PEB U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>/Al terdiri dari bagian kelongsong AlMg2 dan *meat* U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>/Al yang terdistribusi merata disepanjang pelat bahan bakar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.(b), sedangkan dari Gambar 3.(c) terlihat jelas mikrostruktur partikel U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> terdispersi secara merata dengan matriks Al.

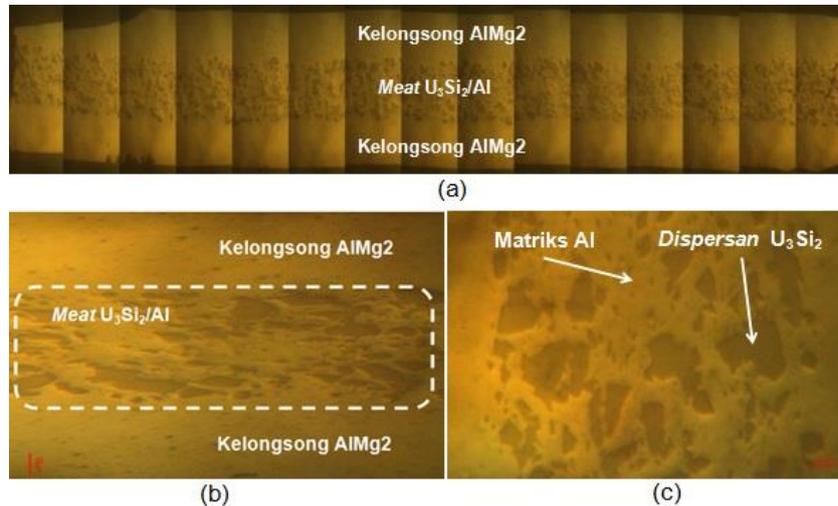
Gambar 3.(b) memperlihatkan adanya dispersan U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> yang membentuk *cluster* yang mengakibatkan distribusi panas kurang homogen. Pada proses pembuatan inti elemen bakar, partikel U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> dicampur dan diaduk secara merata dan dikompaksi. Pada proses pencampuran tersebut diharapkan partikel U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> tercampur secara merata sehingga partikel U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> dikelilingi oleh matriks Al. Matriks Al dalam hal ini selain berfungsi sebagai pengungku juga sebagai penghantar panas.



Gambar 3. (a). Mikrostruktur PEB U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>/Al potongan bagian *middle* perbesaran 50 kali  
(b). Mikrostruktur potongan PEB U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>/Al bagian *middle* perbesaran 100 kali  
(c). Mikrostruktur U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> dan matriks Al potongan bagian *middle* perbesaran 250 kali

Hasil pengamatan mikrostruktur PEB  $U_3Si_2/Al$  pasca iradiasi potongan bagian *bottom* secara utuh ditunjukkan pada Gambar 4. Pada bagian tepi sebelah kiri, memiliki ukuran tidak rata dikarenakan

deformasi akibat pemotongan. Pemotongan pada sampel PEB dilakukan dengan teknik *shear cutting* sehingga menghasilkan deformasi pada sampel terutama pada bagian tepi



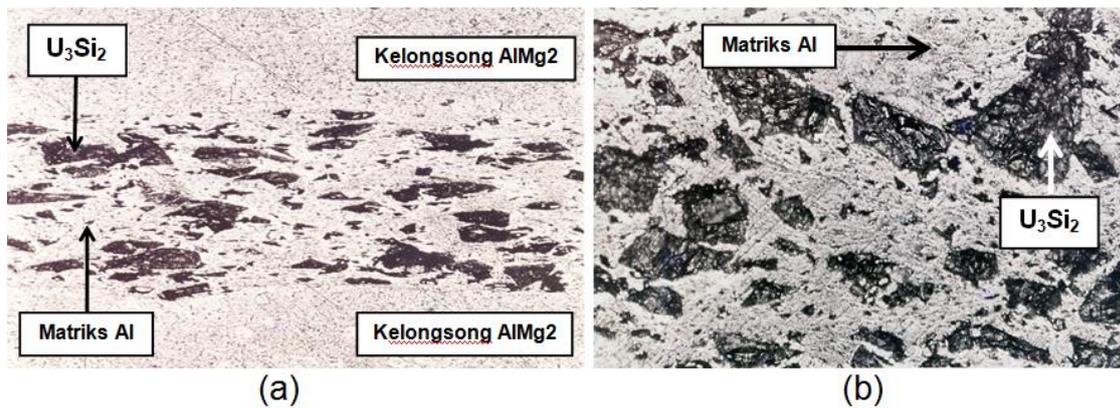
Gambar 4. (a). Mikrostruktur PEB  $U_3Si_2/Al$  potongan bagian *bottom* perbesaran 50 kali  
(b). Mikrostruktur potongan PEB  $U_3Si_2/Al$  bagian *bottom* perbesaran 100 kali  
(c). Mikrostruktur  $U_3Si_2$  dan matriks Al potongan bagian *bottom* perbesaran 250 kali

Gambar 2; 3 dan 4 diketahui bahwa pengamatan mikrostruktur PEB  $U_3Si_2/Al$  pasca iradiasi belum menunjukkan hasil yang baik karena hanya dapat mengamati topografi  $U_3Si_2$  yang tersebar di dalam matriks Al disepanjang PEB. Pengaruh iradiasi yang menyebabkan terjadinya interaksi antara kelongsong AlMg2 dengan *meat* bahan bakar  $U_3Si_2/Al$ , interaksi antara  $U_3Si_2$  dengan matriks Al yang menyebabkan adanya *bubble* dan *void interface* celah antara kelongsong AlMg2 dengan *meat*  $U_3Si_2/Al$  belum dapat dianalisis. Hal ini disebabkan pengamatan struktur mikro menggunakan mikroskop optik di dalam *hotcell* 107 maksimal hanya dengan perbesaran 200 kali, sehingga fenomena diatas belum bisa dianalisis. Salah satu kelemahan dari mikroskop optik adalah daya resolusi yang kecil sehingga gelembung gas dengan ukuran kecil tidak terlihat jelas.

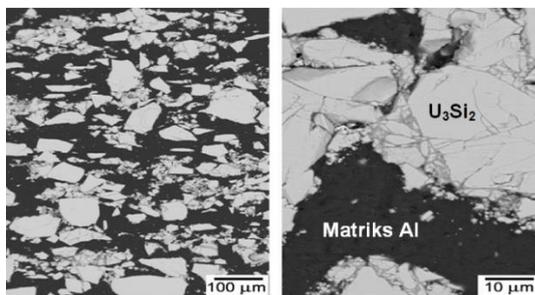
Hasil pengamatan mikrostruktur PEB  $U_3Si_2/Al$  pasca iradiasi tersebut juga didukung oleh hasil analisis mikrostruktur PEB  $U_3Si_2/Al$  pra iradiasi menggunakan

mikroskop optik dan SEM dengan perbesaran 200 kali ditunjukkan pada Gambar 5 dan 6. Mikrostruktur PEB  $U_3Si_2/Al$  pra iradiasi yang terdiri dari kelongsong AlMg2,  $U_3Si_2$  dan matriks Al dianalisis menggunakan mikroskop optik diperoleh hasil seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5, sedangkan analisis mikrostruktur menggunakan SEM yang dilakukan oleh peneliti lain ditunjukkan pada Gambar 6.

Apabila dibandingkan antara mikrostruktur PEB  $U_3Si_2/Al$  pra iradiasi pada Gambar 5.(a) dengan mikrostruktur PEB  $U_3Si_2/Al$  pasca iradiasi pada Gambar 2.(a), 3.(a) dan 4.(a) diperoleh hasil yang sama yaitu morfologi dispersan  $U_3Si_2$  tidak banyak perubahan. Demikian pula dengan mikrostruktur *meat*  $U_3Si_2/Al$  pra iradiasi yang ditunjukkan pada Gambar 5.(b) dan Gambar 6 dengan mikrostruktur *meat*  $U_3Si_2/Al$  pasca iradiasi diperoleh bahwa kedua PEB  $U_3Si_2/Al$  pra iradiasi maupun pasca iradiasi mempunyai mikrostruktur yang hampir sama seperti yang terlihat pada Gambar 2.(b), 3.(b) dan 4.(b).



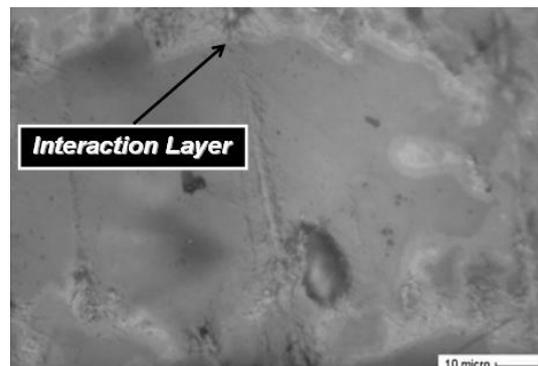
Gambar 5. (a). Mikrostruktur PEB  $U_3Si_2/Al$  pra iradiasi dengan mikroskop optik  
(b). Mikrostruktur *meat*  $U_3Si_2/Al$  pra iradiasi dengan mikroskop optik



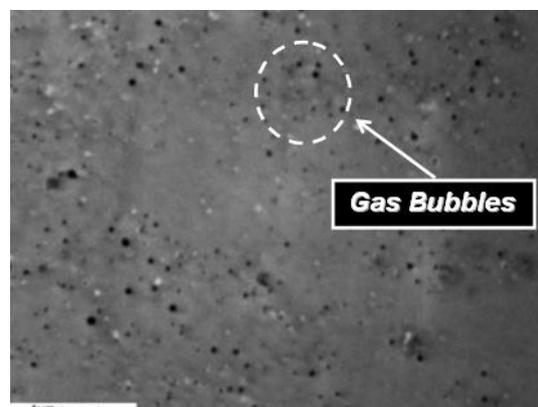
Gambar 7. Mikrostruktur *meat*  $U_3Si_2/Al$  pra iradiasi menggunakan SEM[6]

Secara keseluruhan kualitas gambar mikrostruktur PEB  $U_3Si_2/Al$  pasca iradiasi yang diperoleh sangat baik dan fokus. Preparasi metalografi juga sudah baik yang ditunjukkan dengan permukaan sampel yang bebas goresan dan sedikit kontaminan. Akan tetapi mikrostruktur untuk mengetahui perilaku bahan bakar akibat iradiasi seperti gas *bubble*, porositas, reaksi antar muka belum dapat diamati dengan baik. Hal ini disebabkan karena keterbatasan fasilitas *hotcell* untuk pengamatan mikrostruktur yaitu menggunakan mikroskop optik dengan perbesaran maksimal 200 kali dan memiliki resolusi kecil sehingga fitur seperti gas *bubble* dan senyawa antar muka tidak teramati dengan jelas. Namun, mikrostruktur PEB maupun *meat*  $U_3Si_2/Al$  pasca iradiasi dengan *burn up* 56% dibandingkan dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh G. Ruggirello, *et.al*[9]. Hasil analisis mikrostruktur oleh G. Ruggirello, *et.al* diperoleh mikrostruktur bahan bakar  $U_3Si_2$

yang menunjukkan adanya *interaction layer* dengan ketebalan sekitar 1,5  $\mu m$  dan pembentukan *small gas bubble* dengan dimensi 0,1–0,3  $\mu m$  seperti pada Gambar 7 dan 8. Ketebalan *interaction layer* diamati dengan mikroskop optik sedangkan gas *bubble* diamati dengan SEM.



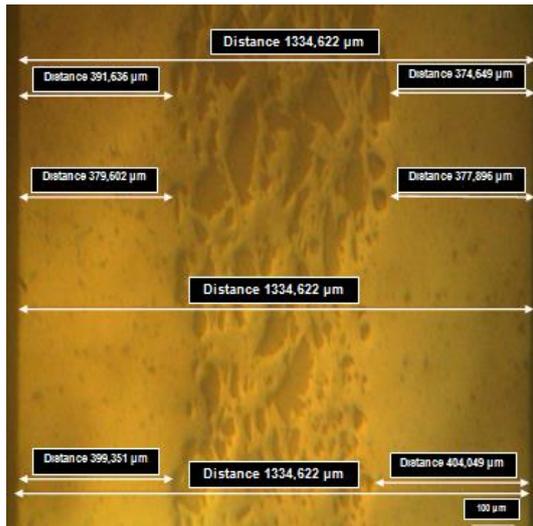
Gambar 7. *Interaction layer* pada tampilan mikrostruktur  $U_3Si_2/Al$



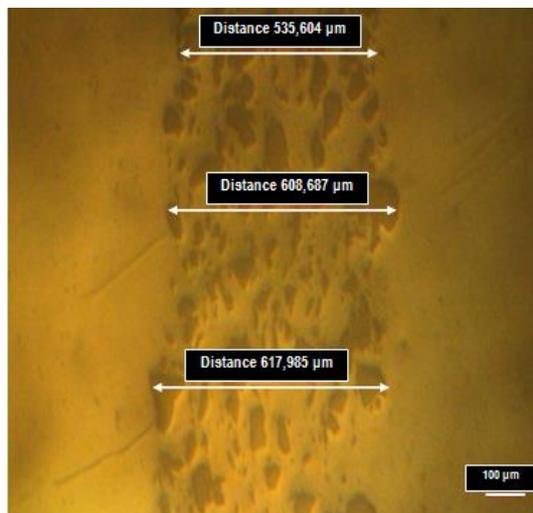
Gambar 8. *Gas bubbles* pada tampilan mikrostruktur  $U_3Si_2/Al$

**b) Analisis ketebalan kelongsong AIMg2**

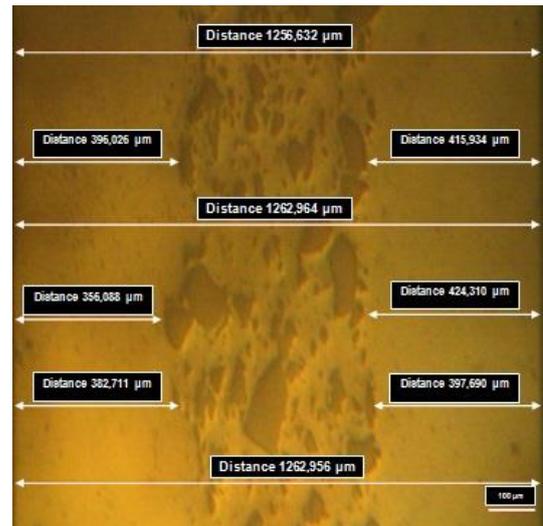
Penentuan ketebalan kelongsong AIMg2 dilakukan dengan metode pengamatan mikrostruktur PEB  $U_3Si_2/Al$  pasca iradiasi bagian potongan *top*, *middle* dan *bottom* seperti ditunjukkan pada Gambar 9, 10 dan 11.



Gambar 9. Ketebalan Kelongsong AIMg2 bagian *top*.



Gambar 10. Ketebalan Kelongsong AIMg2 bagian *middle*.



Gambar 11. Ketebalan Kelongsong AIMg2 bagian *bottom*.

Gambar 9, 10 dan 11 menunjukkan keseluruhan penampang lintang sampel PEB  $U_3Si_2/Al$  yang terdiri dari kelongsong AIMg2 dan *meat*  $U_3Si_2/Al$ . Batas antara kelongsong AIMg2 dengan *meat*  $U_3Si_2/Al$  masih relatif merata. Hasil pengukuran ketebalan kelongsong AIMg2 pada posisi *top*, *middle* dan *bottom* dituangkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Ketebalan kelongsong PEB  $U_3Si_2/Al$  densitas  $2,96 \text{ gU/cm}^3$

Posisi Sampel PEB $U_3Si_2/Al$	Ketebalan minimum, (mm)	Ketebalan maksimum, (mm)
<i>Top</i>	0,368	0,399
<i>Middle</i>	0,374	0,404
<i>Bottom</i>	0,322	0,397

Ketebalan kelongsong rata-rata pada posisi *top* diperoleh sebesar 0,375 mm dengan ketebalan maksimum sebesar 0,399 dan ketebalan minimum sebesar 0,368 mm. Pada posisi *middle* mempunyai ketebalan kelongsong AIMg2 rata-rata 0,385 mm dengan ketebalan minimum sebesar 0,374 mm dan ketebalan maksimum sebesar 0,404 mm. Sementara itu, kelongsong AIMg2 pada posisi *bottom* mempunyai ketebalan rata-rata sebesar 0,366 mm

dengan ketebalan minimum sebesar 0,322 mm. Persyaratan fabrikasi untuk ketebalan kelongsong bahan bakar harus terpenuhi minimum  $>0,25$  mm. Tabel 1 menunjukkan bahwa ketebalan kelongsong AlMg2 masih memenuhi persyaratan yaitu lebih besar dari 0,25 mm. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh proses iradiasi di dalam reaktor tidak memberikan perubahan ketebalan kelongsong AlMg2 secara signifikan.

## SIMPULAN

Proses iradiasi di dalam reaktor mempengaruhi karakter mikrostruktur PEB  $U_3Si_2/Al$ . Dari analisis mikrostruktur telah diperoleh morfologi dispersan  $U_3Si_2$  dalam matriks Al. Dispersan  $U_3Si_2$  terdistribusi merata dalam matriks Al dengan ukuran bervariasi dan bentuknya cenderung bersudut. Kelongsong AlMg2 pada posisi *top*, *middle* dan *bottom* mempunyai ketebalan  $>0,25$  mm. Beberapa dispersan  $U_3Si_2$  mengalami aglomerasi sehingga distribusi panas dalam inti elemen bakar kurang merata. Hasil metalografi sampel PEB  $U_3Si_2/Al$  densitas  $2,96$  gU/cm<sup>3</sup> dengan *burn up* 56% didalam *hotcell* 107 tidak menunjukkan adanya gas *bubbles* dan reaksi antar muka untuk pembentukan lapisan atau *interaction layer*. Sementara itu, dari hasil analisis diperoleh ketebalan kelongsong AlMg2 masih memenuhi persyaratan yaitu lebih besar dari 0,25 mm. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh proses iradiasi di dalam reaktor tidak memberikan perubahan ketebalan kelongsong AlMg2 secara signifikan.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada penanggung jawab kegiatan Pengujian Pra Dan Pasca Iradiasi Bahan Bakar Reaktor Riset yang telah membiayai kegiatan ini melalui DIPA 2016. Selain itu, kami juga mengucapkan terima kasih kepada Sdri. Anditania Sari DP, Ely Nurlaela

dan Sri Ismarwanti yang telah membantu melaksanakan preparasi metalografi dan pengamatan menggunakan mikroskop optik hingga pembuatan makalah ini selesai. Kami juga mengucapkan banyak terima kasih kepada Kepala Bidang Uji Radiometalurgi (Ir.Sungkono,M.T) atas arahan dan bimbingannya serta seluruh staf BUR yang tidak dapat kami sebutkan satu persatu atas kerjasamanya selama ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. B. Ginting, "Pengujian pra dan pasca iradiasi bahan bakar reaktor riset," *Prosiding Hasil-Hasil Penelitian Bahan Bakar Nuklir Tahun 2016*, Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir, Serpong.
- [2] S. K. Jung, S. J. Young, D. P. Soon, K. H. Yeong, and S. Kyuseok, "Analysis of high burnup pressurized water reactor fuel using uranium, plutonium, neodymium, and cesium isotope correlations with burnup," *Nuclear Engineering Technology*, vol. 47, pp. 924-933, 2015.
- [3] Boybul, Yanlinastuti, D. Anggraini, A. Nugroho, R. Kriswarini, dan A. B. Ginting, "Analisis kandungan cesium dan uranium dalam bahan bakar  $U_3Si_2/Al$  pasca iradiasi," *Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir Urania*, vol.23, no. 2, hal.108–122, 2017.
- [4] D. Anggraini, Boybul, Yanlinastuti, A. Nugroho, R. Kriswarini, dan A. B. Ginting, "Pengaruh pelarut organik pada proses pertukaran anion dalam pemisahan uranium dari larutan  $U_3Si_2/Al$  pasca iradiasi", *Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir Urania*, vol. 23, no. 2, hal. 97–106, 2017
- [5] A. Leenaers, E. Koonen, Y. Partoens, P. Lemoine and S. Van den Berghe, "Post-irradiation examination of AlFeNi clad U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> fuel plates

- irradiated under severe conditions,” *Journal of Nuclear Materials*, vol. 375, pp. 243–251, 2008.
- [6] J. Gan, D. D. Kaiser Jr, B. D. Miller, J. F. Jue, A. B. Robinson, J. W. Madden, P.G. Medvedev, and D. M. Wachs, “Microstructure of the irradiated  $U_3Si_2/Al$  silicide dispersion fuel,” *Journal of Nuclear Materials*, vol. 419, pp. 97–104, 2011.
- [7] A. B.Ginting, M. K. Ajiriyanto, Supardjo, “Interaksi bahan bakar  $U_3Si_2-Al$  dengan kelongsong AlMg2 pada elemen bakar silisida TMU 2,96 gU/cm<sup>3</sup>,” *Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir Urania*, vol. 21, no.1, hal. 9–18, 2015.
- [8] Suwardi, “Performance prediction of high density nuclear fuel plate containing U-7%Mo/Al,” *Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir Urania*, vol.18, no.3, hal. 163-171, 2012.
- [9] G. Ruggirello, H. Calabroni, M. Sanchez and G. Hofman, “Post irradiation examination of  $U_3Si_2-Al$  fuel element manufactured and irradiated in Argentina,” *2002 International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors*, Argentina.
- [10] M. K. Ajiriyanto, Y. Nampira, Junaedi, dan S. Ismarwanti, “Mikrostruktur dan karakteristik mekanik PEB  $U_3Si_2/Al$  TMU 2,96 g/cm<sup>3</sup> pasca perlakuan panas suhu 500 °C”, *Prosiding Seminar Nasional IX SDM Teknologi Nuklir*, Oktober 2013, Yogyakarta.
- [11] Y. S. Kim, G. L. Hofman, “Interdiffusion in  $U_3Si-Al$ ,  $U_3Si_2-Al$ , and  $USi-Al$  dispersion fuels during irradiation,” *Journal of Nuclear Materials*, vol. 410, pp. 1–9, 2011.
- [12] Supardjo, H. Nasution, A. Rojak, B. G. Susanto, Boybul, dan E.P. Hastuti, “Percobaan pembuatan pelat elemen bakar (PEB)  $U_3Si_2-Al$  densitas uranium 4,8 dan 5,2 g/cm<sup>3</sup>dengan pengkayaan 19,89% <sup>235</sup>U untuk sampel uji iradiasi,” *Prosiding Seminar Nasional Daur Bahan Bakar*, Agustus 2003, Serpong.
- [13] Anonim, “*Standar guide for preparation of metallographic specimens*,” ASTM E3-2001.
- [14] Anonim, “*Metallography and microstructure*,” ASM Handbook, vol.9, 2004.
- [15] Supardjo, Boybul, A. Kadarjono, “Pengaruh fabrikasi pelat elemen bakar U-7Mo/Al dengan variasi densitas uranium terhadap pembentukan pori di dalam *meat* dan tebal kelongsong,” *Jurnal Teknologi Bahan Nuklir*. vol. 8,no. 2, hal. 67–122, 2012.

