

# INTERAKSI BAHAN BAKAR $U_3Si_2$ -Al DENGAN KELONGSONG AlMg<sub>2</sub> PADA ELEMEN BAKAR SILISIDA TMU 2,96 gU/cm<sup>3</sup> PASCA IRADIASI

**Aslina Br.Ginting, Maman Kartaman, Supardjo**

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir - BATAN

Kawasan Puspiptek, Serpong, Tangerang Selatan, 15314

e-mail: aslina@batan.go.id

(Naskah diterima : 12-12-2014, Naskah direvisi: 26-01-2015, Naskah disetujui: 28-01-2015)

## ABSTRAK

**INTERAKSI BAHAN BAKAR  $U_3Si_2$ -Al DENGAN KELONGSONG AlMg<sub>2</sub> PADA ELEMEN BAKAR SILISIDA TMU 2,96 gU/cm<sup>3</sup> PASCA IRADIASI.** Telah dilakukan analisis interaksi bahan bakar  $U_3Si_2$ -Al dengan kelongsong AlMg<sub>2</sub> pada pelat elemen bakar (PEB)  $U_3Si_2$ -Al tingkat muat uranium (TMU) 2,96 gU/cm<sup>3</sup> pasca iradiasi. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh radiasi terhadap perubahan mikrostruktur PEB selama di reaktor. Untuk mengetahui pengaruh radiasi terhadap mikrostruktur PEB  $U_3Si_2$ -Al perlu dipahami interaksi kelongsong AlMg<sub>2</sub> dengan inti elemen bakar  $U_3Si_2$ -Al pra maupun pasca iradiasi. Pengujian pra iradiasi dilakukan pemanasan PEB  $U_3Si_2$ -Al TMU 2,96 gU/cm<sup>3</sup> dengan ukuran 10x10 mm di dalam tungku DTA (Differential Thermal Analysis) dengan variasi temperatur 450, 550, 650, 900 dan 1350°C. PEB  $U_3Si_2$ -Al TMU 2,96 gU/cm<sup>3</sup> pasca iradiasi dilakukan pemotongan di dalam *hotcell* dengan ukuran 2x10 mm sebanyak 3 (tiga) sampel bagian *bottom*, *middle* dan *top* PEB. Potongan PEB  $U_3Si_2$ -Al TMU 2,96 gU/cm<sup>3</sup> pra maupun pasca iradiasi dikenakan preparasi metalografi meliputi *mounting*, *grinda*, *poles*, dan *etsa*. Pengamatan mikrostruktur interaksi bahan bakar  $U_3Si_2$  dengan kelongsong AlMg<sub>2</sub> dalam PEB  $U_3Si_2$ -Al pra iradiasi dilakukan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM-EDS), sedangkan pengamatan mikrostruktur PEB  $U_3Si_2$ -Al pasca iradiasi dilakukan menggunakan mikroskop optik di dalam *hotcell*. Hasil interaksi  $U_3Si_2$  dengan matrik Al maupun kelongsong AlMg<sub>2</sub> pada PEB  $U_3Si_2$ -Al pra iradiasi terjadi aglomerat dengan pembentukan senyawa baru U(Al,Si)<sub>x</sub> dan UAl<sub>x</sub>. Pembentukan aglomerat semakin besar dengan meningkatnya temperatur pemanasan. Interaksi  $U_3Si_2$  dengan matrik Al maupun kelongsong AlMg<sub>2</sub> pada PEB  $U_3Si_2$ -Al pasca iradiasi diperoleh hasil bahwa pada kelongsong bagian atas dan bawah terjadi lapisan oksida dan pada bagian tengah PEB terbentuk layer senyawa U(Al,Si)<sub>x</sub> berwarna abu-abu terang dengan ketebalan sekitar 1-3 mikron. Dari hasil analisis ini diperoleh bahwa PEB  $U_3Si_2$ -Al pra maupun pasca iradiasi ke duanya menghasilkan senyawa intermetalik U(Al,Si)<sub>x</sub>

**Kata kunci:** interaksi, PEB  $U_3Si_2$ -Al, kelongsong AlMg<sub>2</sub>, pra dan pasca iradiasi

## ABSTRACT

**INTERACTION OF  $U_3Si_2$ -Al FUEL ELEMENT WITH AlMg<sub>2</sub> CLADDING ON POST IRRADIATION WITH LOADING OF URANIUM 2.96 gU/cm<sup>3</sup>.** Interaction of  $U_3Si_2$ -Al fuel element with AlMg<sub>2</sub> cladding on post irradiation of 2.96 gU/cm<sup>3</sup> loading of uranium (TMU) of  $U_3Si_2$ -Al fuel elements plate (PEB) has been analyzed. The purpose of this research is to study the changes of microstructure of nuclear fuel elements during irradiation in reactor core. Understanding on interaction of  $U_3Si_2$ -Al fuel meat with AlMg<sub>2</sub> cladding onpre and post irradiation needed to study the influence of radiation on fuel elements plate. PEB  $U_3Si_2$ -Al with 2.96 gU/cm<sup>3</sup> by size 10 × 10 mm were heated in DTA (Differential Thermal Analysis) furnace with temperature variation at 450, 550, 650, 900 and 1350°C to perform pre irradiation test. Post irradiation samples were cut by size 2 × 10 mm as many as three

*samples taken from bottom, middle, and top of PEB in hotcell. The metallography preparation for each pieces of pre and post irradiation samples of  $U_3Si_2$ -Al fuel elements plate with  $2.96 \text{ gU/cm}^3$  were done through steps mounting, grinding, polishing, and etching. Scanning Electron Microscope (SEM-EDS) were used to observe the pre irradiation microstructure of fuel elements  $U_3Si_2$ -Al with AlMg2 cladding interaction, while the post irradiation microstructure were observed by optical microscope in hot cell. The result show the interaction of  $U_3Si_2$  with Al matrix or AlMg2 cladding in pre irradiation PEB  $U_3Si_2$ -Al occurred agglomeration formed new compounds of  $U(Al,Si)_x$  and  $UAl_x$  formation. Agglomeration formation on heated pre irradiation samples were bigger while heating temperature increased. The post irradiation samples showed the oxide layer were formed outside the AlMg2 cladding and the inner side of cladding that contact to the fuel meat formed light-grey  $U(Al,Si)_x$  layer at 1-3 micron of thickness.*

**Keywords:** Interaction,  $U_3Si_2$ -Al fuel elements plate, AlMg2 cladding, pre and post irradiation.

## PENDAHULUAN

Beberapa pengujian *post irradiation examination* (PIE) yang dilakukan di laboratorium Instalasi Radiometalurgi (IRM), antara lain adalah uji tanpa merusak (*Non Destructive Test*, NDT) yang meliputi ketebalan PEB, distribusi hasil fisi, *swelling*, kelengkungan, cacat secara visual, dan uji merusak (*Destructive Test*, DT) yang meliputi analisis metalografi, mekanik dan analisis *burn up* secara radiokimia. Interaksi bahan bakar  $U_3Si_2$ -Al dengan kelongsong AlMg2 pada pelat elemen bakar (PEB)  $U_3Si_2$ -Al tingkat muat uranium (TMU)  $2,96 \text{ gU/cm}^3$  pasca iradiasi merupakan bagian analisis PIE yang harus dilakukan karena mempengaruhi unjuk kerja PEB  $U_3Si_2$ -Al. Terjadinya proses interaksi kelongsong AlMg2 dengan *meat*  $U_3Si_2$ -Al disebabkan oleh radiasi sinar gamma selama diradiasi dengan daya 15 MW di dalam teras reaktor. Distribusi temperatur di dalam bahan bakar rata-rata sebesar  $120^\circ\text{C}$ , tetapi akibat radiasi kadangkala menyebabkan terjadinya *hot spot* pada posisi tertentu di dalam bahan bakar yang menyebabkan distribusi temperatur meningkat menjadi  $170^\circ\text{C}$ <sup>[1]</sup>. Peningkatan temperatur disebabkan oleh radiasi yang berkorelasi dengan lamanya bahan bakar diradiasi di reaktor dengan *burn up* tertentu menyebabkan kandungan hasil fisi dan unsur bermassa berat (*heavy element*, HE) meningkat. Terbentuknya hasil fisi dan HE menyebabkan tekanan di dalam *meat* bahan bakar meningkat, sehingga mendesak

kelongsong AlMg2. Tujuan penentuan interaksi kelongsong AlMg2 dengan inti elemen bakar  $U_3Si_2$ -Al adalah untuk mengetahui pengaruh radiasi terhadap unjuk kerja bahan bakar selama di iradiasi di dalam teras reaktor.

Sebelum melakukan pengujian interaksi kelongsong AlMg2 dengan inti elemen bakar atau *meat*  $U_3Si_2$ -Al pasca iradiasi di dalam *hotcell*, terlebih dahulu dilakukan pengujian interaksi kelongsong AlMg2 dengan *meat*  $U_3Si_2$ -Al pra iradiasi atau secara uji dingin di luar *hotcell*. Pengujian secara dingin dilakukan dengan proses pemanasan PEB  $U_3Si_2$ -Al TMU  $2,96 \text{ gU/cm}^3$  di dalam tungku DTA (*Differential Thermal Analysis*) dengan variasi temperatur. Tujuan pengujian analisis metalografi PEB pra iradiasi untuk memperoleh metode baku yang selanjutnya digunakan dalam pengujian metalografi PEB pasca iradiasi di dalam *hotcell*. Terjadinya interaksi *meat*  $U_3Si_2$ -Al dengan kelongsong AlMg2 pada PEB  $U_3Si_2$ -Al pra iradiasi disebabkan oleh beberapa faktor antara lain: saat pembuatan ingot  $U_3Si_2$ -Al menggunakan busur listrik, dimana matrik Al dipanaskan hingga melebur dan leburannya berinteraksi langsung dengan logam U membentuk fase baru  $U(Al,Si)_3$  dan senyawa  $UAl_x$ . Faktor kedua yang mempengaruhi interaksi adalah persentase lompong atau porositas di dalam volume *meat*. Porositas *meat*  $U_3Si_2$ -Al yang dihasilkan pabrikator 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 5-9 % volume untuk PT. BATEK<sup>[2]</sup>. Peningkatan porositas di dalam *meat* diduga akan mempengaruhi sifat metalografi PEB  $U_3Si_2$ -Al. Faktor lain yang menyebabkan terjadinya interaksi *meat*  $U_3Si_2$ -Al dengan kelongsong AlMg2 adalah proses perolan PEB  $U_3Si_2$ -Al.

Analisis metalografi terhadap PEB  $U_3Si_2$ -Al TMU 2,96 gU/cm<sup>3</sup> pasca iradiasi diawali dengan pemotongan PEB dengan dimensi 2x10 mm sebanyak 3 (tiga) posisi sampel. Potongan sampel tersebut merupakan hasil pemotongan pada bagian *bottom* (10 cm dari bawah), *middle* (30 cm dari bawah) dan *top* (10 cm dari atas). Pemotongan sampel tersebut berdasarkan distribusi hasil fisi yang diperoleh dari hasil analisis menggunakan *gamma scanning*. Fenomena yang diamati dalam analisis metalografi adalah interaksi kelongsong AlMg2 dengan *meat* bahan bakar  $U_3Si_2$ -Al, interaksi antara *meat* bahan bakar  $U_3Si_2$  dengan matrik Al, interaksi antara  $U_3Si_2$  dengan matrik Al yang menyebabkan adanya *bubble* dan *void* dan yang terakhir adalah analisis ikatan antar muka atau *interface* celah antara kelongsong dengan *meat* bahan bakar<sup>[3]</sup>

## METODOLOGI

### a. Analisis mikrostruktur PEB $U_3Si_2$ -Al TMU 2,96 gU/cm<sup>3</sup> pra iradiasi

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah PEB  $U_3Si_2$ -Al dengan TMU 2,96 gU/cm<sup>3</sup> yang dipotong dengan ukuran 10x10 mm menggunakan *diamond cutting*. Potongan PEB  $U_3Si_2$ -Al dimasukkan ke dalam krusibel alumina dan dipanaskan di dalam tungku DTA dari temperatur 30°C hingga 1500°C dengan kecepatan pemanasan 10°C/menit dalam media gas argon<sup>[4]</sup>. Hasil pengukuran hingga 1500°C diperoleh fenomena reaksi termik berupa termogram DTA yang menyatakan besarnya temperatur reaksi matrik Al dan kelongsong AlMg2 dengan inti elemen bakar atau *meat*

$U_3Si_2$ . Setelah diketahui fenomena reaksi termik yang terjadi pada temperatur 450, 550, 650, 900 dan 1350°C, kemudian disiapkan potongan PEB  $U_3Si_2$ -Al lainnya dengan ukuran 10x10 mm (4 buah) dan dipanaskan dalam tungku DTA pada masing-masing temperatur di atas dengan waktu tunda selama 1 jam. Cuplikan PEB  $U_3Si_2$ -Al hasil pemanasan dengan DTA kemudian *dimounting* dengan resin kemudian dilakukan preparasi metalografi yang mencakup penggerindaan dan pemolesan mulai dari *grit* 200, 400, 800, 1200 dan 2400 sampai permukaan cuplikan menjadi halus dan mengkilap. Setelah permukaan cuplikan halus, dilakukan pengetsaan menggunakan larutan kimia kemudian dilakukan analisis mikrostruktur antara lain interaksi bahan bakar  $U_3Si_2$  dengan matrik Al dan kelongsong AlMg2 menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM-EDS) merek JEOL.

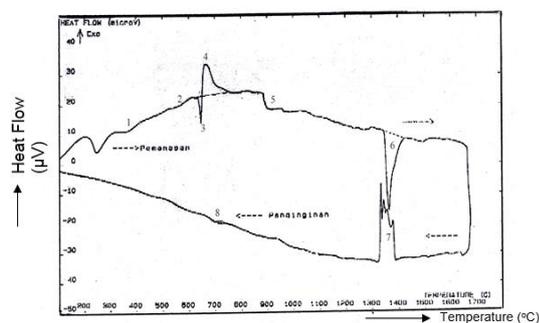
### b. Analisis mikrostruktur PEB $U_3Si_2$ -Al TMU 2,96 gU/cm<sup>3</sup> pasca iradiasi

Analisis mikrostruktur yang dilakukan adalah interaksi kelongsong AlMg2 dengan *meat* bahan bakar  $U_3Si_2$ -Al pasca iradiasi. Kegiatan analisis mikrostruktur diawali dengan pemotongan PEB  $U_3Si_2$ -Al TMU 2,96 gU/cm<sup>3</sup> pasca iradiasi dengan ukuran 2x10 mm sebanyak 3 (tiga) sampel pada bagian *bottom*, *middle* dan *top* dari PEB. Potongan sampel tersebut kemudian dipreparasi dengan tahapan sbb<sup>[5]</sup>.

- proses *mounting* menggunakan resin akrilik dan *hardener*.
- proses penggerindaan menggunakan kertas amplas SiC dengan ukuran bervariasi dari kasar hingga halus yaitu dari *grit* 500, 800, 1200, 2000 dan 2400.
- proses pemolesan menggunakan kain poles dari beludru dan pasta diamond dari ukuran 3 sampai 1 mikron.
- pencucian sampel menggunakan alat *ultrasonic* dalam media alkohol atau air demineral.
- pengamatan mikrostruktur dengan menggunakan mikroskop optik di *hotcell*.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

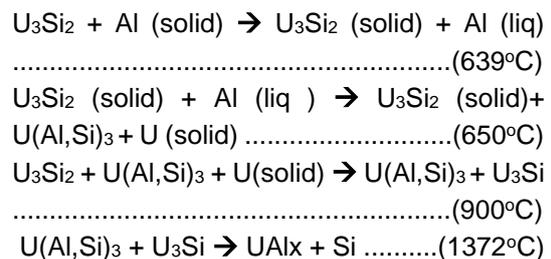
Hasil analisis interaksi termokimia PEB  $U_3Si_2$ -Al TMU 2,96 gU/cm<sup>3</sup> hasil pemanasan hingga 1500°C diperoleh berupa termogram DTA ditunjukkan pada Gambar 1. Gambar 1 pada posisi 1 menunjukkan bahwa pada temperatur 451°C terjadi perubahan aliran panas (*heat flow*) yang menunjukkan titik eutektik paduan AlMg<sub>2</sub>. Pada temperatur 550°C, posisi 2 terjadi perubahan fasa dari fasa  $\alpha$  menjadi fasa (L +  $\alpha$ ) yang ditunjukkan oleh perubahan *base line* aliran panas. Hal ini didukung oleh diagram fasa biner antara Al dengan Mg yang menunjukkan bahwa kemampuan larut padat (*solid solubility*) paduan AlMg<sub>2</sub> terjadi pada temperatur 451°C, sehingga diatas temperatur tersebut kelongsong AlMg<sub>2</sub> telah mengalami perubahan fasa<sup>[5,6]</sup>. Oleh karena itu untuk penyiapan sampel PEB  $U_3Si_2$ -Al untuk analisis mikrostruktur dimulai dari pemanasan 450°C (titik eutektik paduan AlMg<sub>2</sub>).



Gambar 1. Termogram reaksi termokimia PEB  $U_3Si_2$ -Al TMU 2,9 gU/cm<sup>3</sup>

Pada pemanasan 639°C, posisi 3 PEB  $U_3Si_2$ -Al mulai mengalami reaksi termik yang ditunjukkan oleh adanya puncak endotermik dengan menyerap sejumlah panas. Puncak endotermik tersebut menunjukkan terjadinya peleburan matrik Al dan kelongsong AlMg<sub>2</sub> yang diikuti oleh suatu puncak eksotermik pada temperatur 650°C pada posisi 4. Reaksi eksotermik tersebut menunjukkan terjadinya reaksi antara lelehan matrik Al dan AlMg<sub>2</sub> dengan  $U_3Si_2$  yang membentuk senyawa  $U(Al,Si)_x$ . Reaksi eksotermik tersebut berdekatan dengan puncak endotermik (posisi 3), karena terjadi

pengikatan atau difusi lelehan matrik Al dan AlMg<sub>2</sub> ke dalam inti elemen bakar  $U_3Si_2$  secara cepat. Hal ini terjadi karena lelehan matrik Al mempunyai kontak antar muka dengan gaya gerak yang lebih besar sehingga ikatan intermetalik lelehan Al dengan  $U_3Si_2$  terjadi secara simultan dengan reaksi peleburan matrik Al. Reaksi termokimia antara  $U_3Si_2$  dengan matrik Al membentuk senyawa  $U(Al,Si)_x$ <sup>[2,4]</sup> dengan tahapan perubahan fasa sbb :



Pada kisaran temperatur 800 hingga 900°C pada posisi 5 terjadi perubahan fasa dari  $U_3Si_2$  menjadi  $U_3Si$  yang ditunjukkan dengan adanya perubahan aliran panas (*base line*) pada termogram DTA PEB  $U_3Si_2$ -Al pada Gambar 1. Hal ini terjadi karena adanya reaksi antara U *solid state* dengan partikel  $U_3Si_2$  membentuk  $U_3Si$ <sup>[7]</sup>.

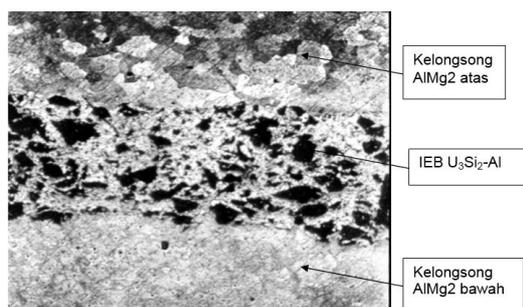
Pada pemanasan 1300°C hingga 1400°C atau pada posisi 6 tampak terjadi perubahan aliran panas yang ditandai adanya puncak endotermik yang menunjukkan terjadinya pembentukan senyawa  $UAl_x$  dalam fasa cair dan peleburan unsur Si. Terbentuknya puncak endotermik pada temperatur tersebut menunjukkan terjadinya pengikatan atau pembentukan senyawa  $U-Al_x$  dan Si bebas dari senyawa  $U(Al,Si)_3$ . Pembentukan senyawa  $UAl_x$  ( $UAl_2, UAl_3$  dan  $UAl_4$ )<sup>[5,7]</sup> sangat dipengaruhi oleh temperatur, waktu, kandungan matrik Al dan kandungan uranium.

Pada proses pendinginan, PEB  $U_3Si_2$ -Al dengan TMU 2,9 gU/cm<sup>3</sup> diperoleh dua puncak eksotermik yang menunjukkan terjadinya reaksi solidifikasi senyawa  $UAl_x$  pada posisi 7. Reaksi solidifikasi tersebut *reversible* dengan reaksi pembentukan senyawa  $UAl_x$  pada temperatur 1439°C atau

pada posisi 6. Reaksi solidifikasi ini menunjukkan bahwa pemanasan pada temperature 1372°C terjadi peleburan dan pembentukan senyawa  $UAl_x$  (fasa cair) dan pada proses pendinginan senyawa  $UAl_x$  kembali menjadi solid (fasa padat). Selain terjadi reaksi solidifikasi senyawa  $UAl_x$  pada posisi 7, pada proses pendinginan juga terjadi reaksi solidifikasi matrik Al pada temperatur 600°C atau pada posisi 8. Hal ini disebabkan karena pada TMU 2,96 gU/cm<sup>3</sup> matrik Al bereaksi dengan uranium membentuk senyawa  $UAl_x$  pada temperatur 1350°C. Namun, matrik Al tidak habis bereaksi membentuk senyawa  $UAl_x$ , sehingga pada proses pendinginan sisa matrik Al mengalami reaksi solidifikasi seperti yang terlihat pada posisi 8 Gambar 1.

**a. Analisis mikrostruktur PEB  $U_3Si_2$ -Al TMU 2,96 gU/cm<sup>3</sup> pra iradiasi**

Hasil analisis mikrostruktur PEB  $U_3Si_2$ -Al TMU 2,96 gU/cm<sup>3</sup> pra iradiasi pada masing-masing temperatur pemanasan ditunjukkan pada Gambar 2 hingga Gambar 7. Hasil analisis mikrostruktur yang dilakukan terhadap PEB  $U_3Si_2$ -Al TMU 2,96 gU/cm<sup>3</sup> segar (tanpa pemanasan) ditunjukkan pada Gambar 2.

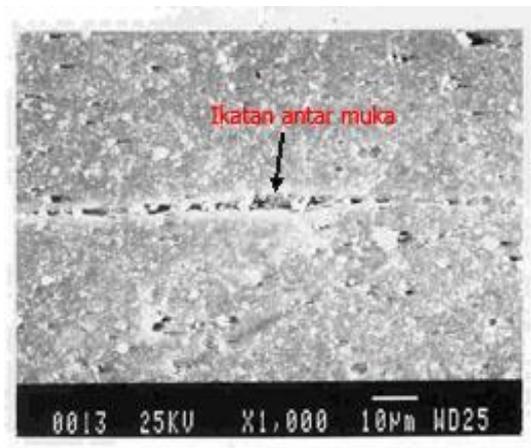


Gambar 2. PEB  $U_3Si_2$ -Al TMU 2,96 g U/cm<sup>3</sup> (tanpa pemanasan)

Gambar 2 terlihat jelas posisi kelongsong AlMg2 berada pada bagian tepi atas dan bawah, sedangkan inti elemen bakar  $U_3Si_2$ -Al terdistribusi secara merata pada bagian tengah PEB  $U_3Si_2$ -Al.

Mikrostruktur PEB  $U_3Si_2$ -Al TMU 2,96 gU/cm<sup>3</sup> pra iradiasi hasil pemanasan pada

temperatur 450°C ditunjukkan pada Gambar 3. Paduan aluminium magnesium atau AlMg tidak dapat dikeraskan melalui perlakuan panas (*non heat treatable alloys*), namun magnesium mempunyai batas kemampuan larut padat (*solid solubility*) dalam aluminium terjadi pada temperatur 451°C. Berdasarkan fenomena inilah, maka analisis mikrostruktur dilakukan terhadap cuplikan PEB  $U_3Si_2$ -Al yang mengalami pemanasan di dalam tungku DTA pada temperatur 450°C dengan waktu tunda selama 1 jam.

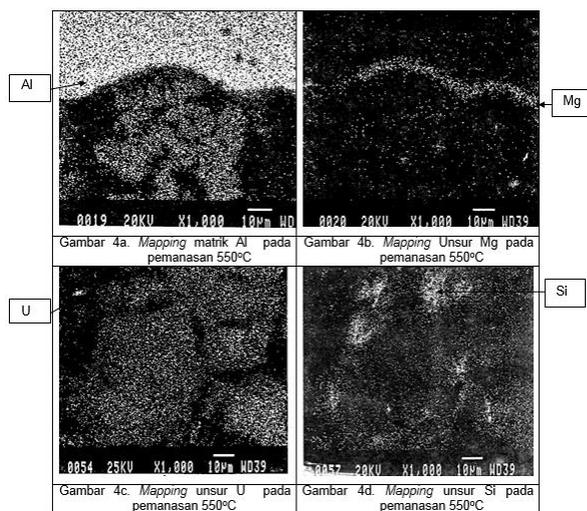


Gambar 3. Ikatan antar muka kelongsong AlMg2 pada pemanasan 450°C

Gambar 3 menunjukkan adanya morfologi ikatan antar muka (*interface bonding*) kelongsong AlMg. Ikatan antar muka terjadi karena temperatur perolan pada 450°C dan proses anil pada temperatur 480°C mampu meningkatkan luas bidang kontak antar muka yang mempercepat difusi atom antar muka, sehingga menghasilkan ikatan antar muka logam yang lebih baik. Mikrostruktur PEB  $U_3Si_2$ -Al pada pemanasan 450°C belum menunjukkan terjadinya interaksi antara kelongsong AlMg2 dengan inti elemen bakar  $U_3Si_2$ -Al.

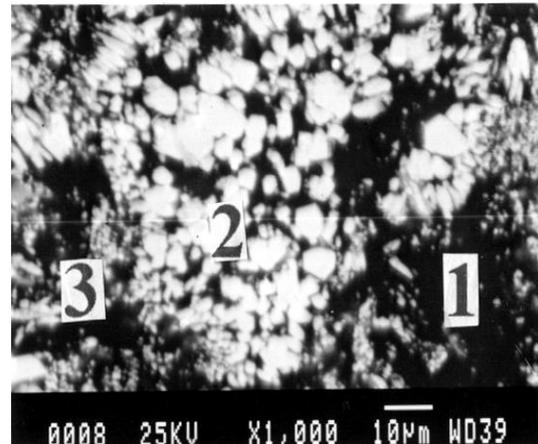
Pemanasan pada temperatur 550°C (di atas temperatur kemampuan larut padat paduan AlMg2) diperoleh mikrostruktur seperti yang terlihat pada Gambar 4. Terjadi migrasi unsur Al, Mg, U dan Si yang diidentifikasi menggunakan SEM-EDS seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4a sampai 4d. Hasil analisis mikrostruktur cuplikan PEB  $U_3Si_2$ -Al

pada pemanasan 550°C dilakukan dengan cara pemetaan (*mapping*) terhadap unsur Al, Mg, U dan Si<sup>[8]</sup>. Pada Gambar 4a, terlihat jelas bahwa unsur Al telah berinteraksi ke dalam inti elemen bakar (IEB) U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> dan unsur uranium maupun unsur Si sebagian telah berinteraksi ke arah kelongsong AlMg<sub>2</sub> seperti yang terlihat pada Gambar 4c dan 4d. Sementara itu, unsur Mg tetap berada dibatas bingkai (*frame*) AlMg<sub>2</sub> seperti yang terlihat pada Gambar 4b.



Hal ini menunjukkan bahwa pada temperatur pemanasan 550°C, telah terjadi ikatan logam (*intermetallik*) antara unsur uranium dengan Al, sedangkan unsur Mg tidak mengalami interaksi dengan unsur uranium karena unsur Mg mempunyai jumlah yang kecil dengan energi yang lebih kecil<sup>[7]</sup>.

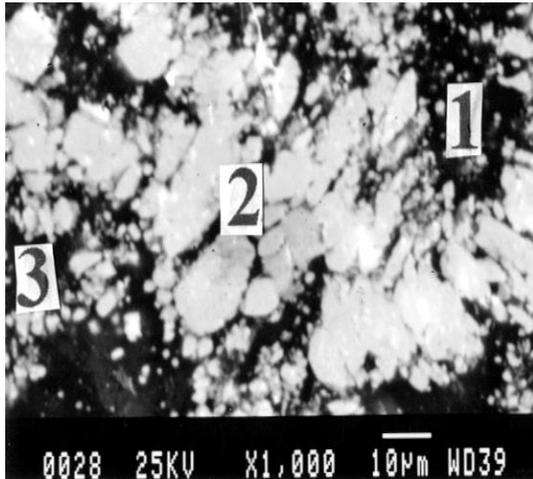
Selain pada pemanasan 450°C dan 550°C, PEB U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>-Al juga mengalami reaksi termokimia pada pemanasan 650°C, 900°C dan 1350°C seperti yang terlihat pada Gambar 1. Hasil analisis mikrostruktur terhadap cuplikan PEB U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>-Al pada pemanasan 650°C menunjukkan terjadinya lelehan matrik Al dan lelehan kelongsong AlMg<sub>2</sub>. Lelehan Al dan AlMg<sub>2</sub> berinteraksi dengan inti elemen bakar U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> membentuk gumpalan kecil atau aglomerat yang mengikuti pola orientasi retakan partikel U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Mikrostruktur PEB U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>-Al pada pemanasan 650°C

Aglomerat yang terbentuk (berwarna putih abu-abu) mempunyai ukuran butir yang kecil dengan jumlah lebih banyak seperti yang terlihat pada Gambar 5 posisi-2. Hasil analisis menggunakan EDS memperlihatkan aglomerat yang terbentuk pada posisi-2 tersebut mempunyai perbandingan atom U : Al : Si = 17,97 : 55,60 : 26,44. Sementara itu, pada Gambar 5, posisi-3 dapat diamati bahwa aglomerat yang terbentuk mempunyai diameter butir lebih kecil dibandingkan dengan aglomerat yang terbentuk pada posisi-2. Hal ini disebabkan karena masih kurang waktu pemanasan hingga menyebabkan daya ikat antar aglomerat masih lemah. Namun dengan pemanasan lebih lanjut, aglomerat pada posisi-3 akan tumbuh menjadi aglomerat dengan ukuran butir lebih besar. Hasil analisis dengan menggunakan EDS menunjukkan aglomerat yang terbentuk pada posisi-3 mempunyai perbandingan atom U : Al : Si = 10,40 : 80,95 : 8,65, sedangkan pada posisi-1 daerah yang berwarna hitam dominan terdiri dari unsur Al dengan perbandingan atom U : Al : Si = 1,65 : 98,02 : 0,38.

Pengamatan mikrostruktur PEB U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>-Al pada pemanasan 900°C terlihat pengikatan inti elemen bakar U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> dengan matrik Al dan kelongsong AlMg<sub>2</sub> semakin besar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6. Fenomena ini terjadi karena pada temperatur tinggi reaksi termokimia terjadi lebih besar karena partikel U dan Al memiliki energi aktivasi yang besar.

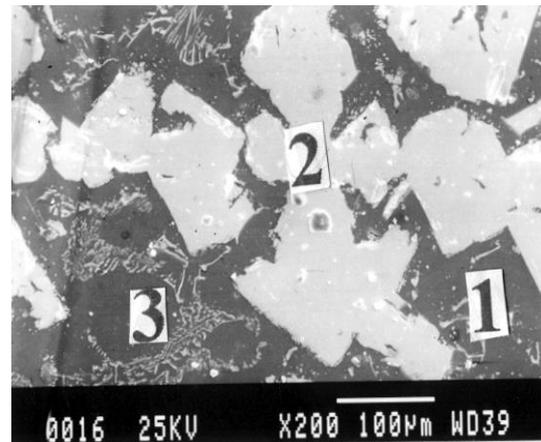


Gambar 6. Mikrostruktur PEB  $U_3Si_2$ -Al pada pemanasan  $900^\circ\text{C}$

Apabila dibandingkan antara pertumbuhan aglomerat yang terjadi pada Gambar 5 dengan aglomerat yang terjadi pada Gambar 6, baik pada posisi 1, 2 dan 3 interaksi terjadi semakin besar. Hal ini dikarenakan terjadi ikatan antar logam *intermetallic* matrik Al dengan  $U_3Si_2$  secara perlahan lahan yang menyebabkan pertumbuhan aglomerat semakin besar dengan naiknya temperatur. Pertumbuhan aglomerat pada pemanasan  $900^\circ\text{C}$  ini terjadi karena proses rekristalisasi senyawa  $U_3Si_2$ -Al. Pada saat proses pabrikan PEB  $U_3Si_2$ -Al, inti elemen bakar  $U_3Si_2$  mengalami deformasi dengan tegangan sisa tertentu, sehingga sewaktu dilakukan pemanasan dalam tungku DTA pada temperatur  $900^\circ\text{C}$  atau di atas temperatur rekristalisasi  $U_3Si_2$ . Inti elemen bakar (*meat*)  $U_3Si_2$ -Al mengalami pengintian yang diikuti pertumbuhan aglomerat dengan arah orientasi yang berbeda-beda. Hasil analisis komposisi dengan menggunakan EDS menunjukkan bahwa aglomerat yang terbentuk pada Gambar 6, posisi-2 mempunyai perbandingan atom  $U : Al : Si = 20,9 : 62,57 : 16,53$ . Pembentukan aglomerat pada posisi-3 mempunyai ukuran butir lebih besar dibandingkan dengan aglomerat pada posisi-2. Aglomerat posisi-3 pada Gambar 6 mempunyai orientasi dan gaya gerak ke arah aglomerat yang terbentuk pada posisi-2. Hal ini menunjukkan bahwa aglomerat dengan ukuran kecil akan berdifusi ke dalam aglomerat

dengan ukuran lebih besar. Hasil analisis dengan menggunakan EDS menunjukkan bahwa aglomerat pada posisi-3 Gambar 6 mempunyai perbandingan atom  $U : Al : Si = 15,08 : 67,95 : 16,97$ , sedangkan pada posisi-1 Gambar 6 terlihat dominan terdiri dari unsur Al dengan perbandingan atom  $U : Al : Si = 5,68 : 93,06 : 1,26$ .

Mikrostruktur PEB  $U_3Si_2$ -Al hasil pemanasan pada temperatur  $1350^\circ\text{C}$  seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7



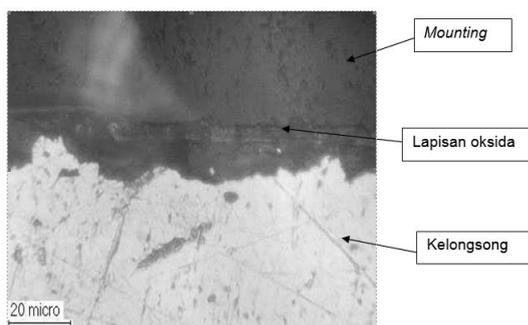
Gambar 7. Mikrostruktur PEB  $U_3Si_2$ -Al pada pemanasan  $1350^\circ\text{C}$

Pada Gambar 7 jelas terlihat pengikatan ikatan elemen bakar  $U_3Si_2$  oleh lelehan matrik Al dan kelongsong AlMg2 semakin besar. Fenomena ini menyebabkan pembentukan dan pertumbuhan aglomerat semakin besar dengan orientasi yang teratur. Hal ini dapat terjadi karena pertumbuhan aglomerat pada pemanasan  $1350^\circ\text{C}$  mengalami pertumbuhan lebih cepat karena pergerakan atom antar partikel lebih cepat dengan naiknya temperatur pemanasan. Aglomerat yang terbentuk pada pemanasan  $650^\circ\text{C}$  dan  $900^\circ\text{C}$  dengan butir lebih kecil secara teratur berdifusi ke aglomerat yang mempunyai butir lebih besar dan membentuk suatu aglomerat dengan ukuran butir yang lebih besar dengan jarak antar butir semakin kecil seperti yang terlihat pada posisi-2. Mikrostruktur PEB  $U_3Si_2$ -Al pada pemanasan  $1350^\circ\text{C}$  ini selain terjadi pertumbuhan aglomerat juga terbentuk butir dendrit seperti yang terlihat pada Gambar 7, posisi-3. Dendrit

yang terbentuk disebabkan adanya lelehan Al dan pada proses pendinginan mengalami pembekuan melalui mekanisme pengintian dan pertumbuhan butir. Hal ini didukung oleh data analisis dengan menggunakan alat DTA di mana proses pendinginan pada temperatur 600°C terjadi reaksi solidifikasi unsur Al seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Hasil analisis komposisi menggunakan alat SEM/EDS, aglomerat yang terbentuk posisi- 2 pada Gambar 7 mempunyai perbandingan atom U : Al : Si = 58,88 : 22,86: 18,26. Sementara itu, dendrit yang terbentuk pada posisi-3 mengandung unsur Al lebih besar mempunyai yang mempunyai perbandingan atom U: Al : Si = 10,84 : 85,39 : 3,77 yang relatif sama dengan posisi -1 tetapi mempunyai perbandingan atom U : Al : Si = 7,46 : 82,94 : 10,61.

**b. Analisis mikrostruktur PEB  $U_3Si_2$ -Al TMU 2,96 gU/cm<sup>3</sup> pasca iradiasi**

Pengamatan mikrostruktur PEB  $U_3Si_2$ -Al TMU 2,96 gU/cm<sup>3</sup> pasca iradiasi mengalami beberapa kendala. Hal ini disebabkan karena beberapa alat dukung belum siap digunakan dan juga kondisi *hotcell* yang belum bersih dari kontaminasi, sehingga pelaksanaan pengujian mikrostruktur dengan Mikroskop Optik belum dapat dilaksanakan secara optimal.

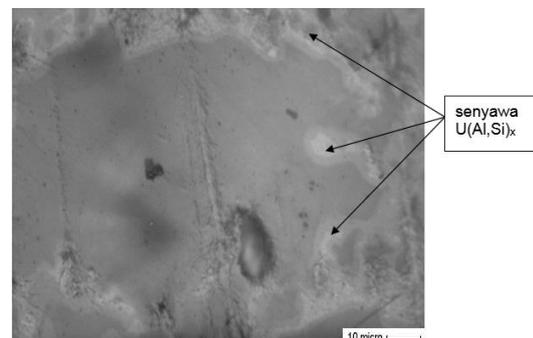


Gambar 8. Mikrostruktur kelongsong PEB  $U_3Si_2$ -Al (bagian atas)

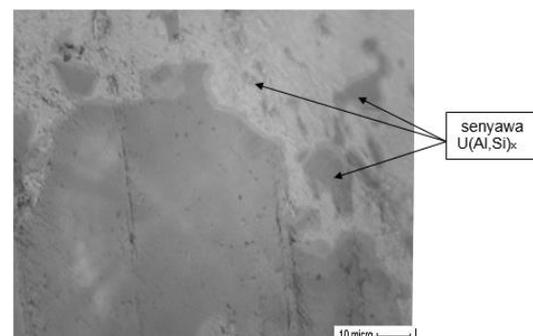
Namun dengan keterbatasan peralatan, preparasi metalografi dapat dilakukan sampai kondisi poles menggunakan pasta intan ukuran 0,25 mikro. Hasil analisis mikrostruktur PEB  $U_3Si_2$ -Al TMU 2,96 gU/cm<sup>3</sup> pasca iradiasi hasil potongan PEB  $U_3Si_2$ -Al

TMU 2,96 gU/cm<sup>3</sup> pasca iradiasi bagian atas (*top*) ditunjukkan pada Gambar 8, sedangkan mikrostruktur hasil potongan bagian tengah (*middle*) dan bawah (*bottom*) masing-masing ditunjukkan pada Gambar 9 dan 10. Dari masing-masing analisis mikrostruktur terlihat adanya penampang lintang lapisan oksida pada permukaan bahan kelongsong. Hal ini terjadi disebabkan oleh proses oksidasi kelongsong AlMg2 dengan udara di dalam kolam air pendingin.

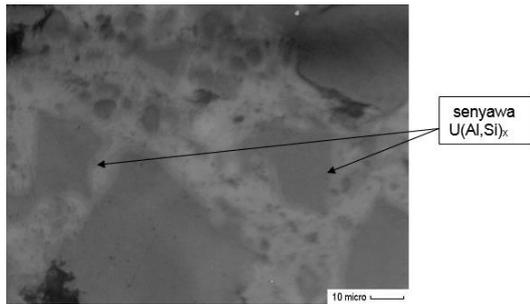
Gambar 9a, 9b dan 9c menunjukkan mikrostruktur pada zona inti elemen bekar (IEB) terlihat partikel  $U_3Si_2$  berinteraksi dengan matrik Al membentuk fasa baru atau senyawa intermetalik  $U(Al,Si)_x$ <sup>[10]</sup>. Fasa baru tersebut ditunjukkan dengan warna abu-abu terang dengan ketebalan sekitar 1-3 mikron. Adanya fasa baru senyawa  $U(Al,Si)_x$  tersebut diperjelas dengan melakukan pengamatan mikrostruktur pada zona inti  $U_3Si_2$ -Al seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9a dan 9c.



Gambar 9a. Layer senyawa  $U(Al,Si)_x$  pada inti  $U_3Si_2$ -Al (bagian tengah)<sup>[11]</sup>

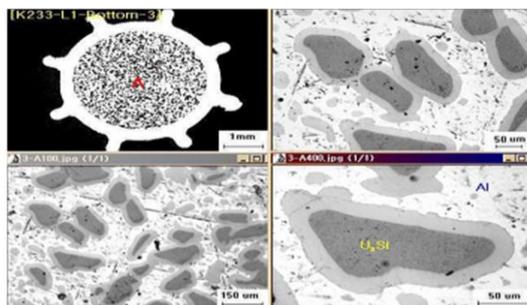


Gambar 9b. Layer  $U(Al,Si)_x$  di inti  $U_3Si_2$ -Al (bagian tengah)<sup>[10]</sup>



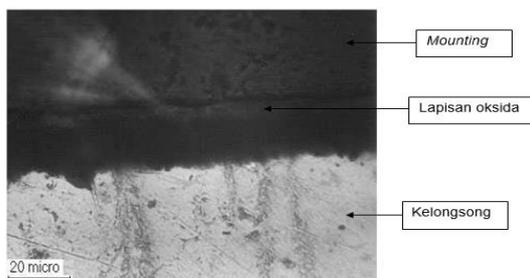
Gambar 9c. Layer  $U(Al,Si)_x$  pada inti  $U_3Si_2$ -Al (bagian tengah)<sup>[11]</sup>

Penelitian lain menyatakan bahwa untuk bahan bakar  $U_3Si$ -Al yang telah mengalami iradiasi hingga *burn-up* 60% mengalami interaksi antara partikel bahan bakar  $U_3Si$  dengan matrik Al<sup>[12]</sup>. Mikrostruktur bahan bakar yang diamati menggunakan mikroskop optik menunjukkan adanya reaksi antara partikel  $U_3Si$  dengan matrik Al seperti ditunjukkan pada Gambar 9d. Ketebalan *layer* yang dihasilkan sekitar 5 mikron untuk *burn-up* 40% dan 20 mikron untuk *burn-up* 80%



Gambar 9d. Mikrostruktur partikel bahan bakar  $U_3Si$  dengan matrik Al<sup>[12]</sup>

Mikrostruktur PEB  $U_3Si_2$ -Al TMU 2,96  $gU/cm^3$  pasca iradiasi hasil potongan PEB  $U_3Si_2$ -Al TMU 2,96  $gU/cm^3$  pasca iradiasi bagian bawah (*bottom*) ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Mikrostruktur kelongsong PEB  $U_3Si_2$ -Al (bagian bawah)<sup>[11]</sup>

Analisis mikrostruktur PEB  $U_3Si_2$ -Al TMU 2,96  $gU/cm^3$  pasca iradiasi hasil potongan PEB  $U_3Si_2$ -Al TMU 2,96  $gU/cm^3$  pasca iradiasi bagian bawah (*bottom*) dan bagian atas (*top*) menunjukkan hasil yang hampir sama. Pada permukaan bahan kelongsong AlMg2 terlihat adanya penampang lintang lapisan oksida yang terjadi karena adanya interkasi kelongsong AlMg2 dengan air pendingin di dalam kolam reaktor.

Hasil pengamatan mikrostruktur PEB  $U_3Si_2$ -Al pasca iradiasi diatas memperlihatkan bahwa pengamatan dan pengujian mikrostruktur dengan mikroskop optik mampu menunjukkan perilaku bahan selama iradiasi. Lapisan oksida pada permukaan kelongsong dan juga senyawa intermetalik  $U(Al,Si)_x$  pada antarmuka dispersan  $U_3Si_2$  dengan matrik Al dapat terlihat dengan jelas. Untuk itu pada pengujian mikrostruktur yang akan dilakukan di IRM terhadap bahan bakar PEB  $U_3Si_2$ -Al TMU 4,8 maupun 5,2  $gU/cm^3$ , secara keseluruhan dapat dilakukan dengan mengikuti tahapan preparasi metalografi hingga sampel kondisi poles sampei 1 atau  $\frac{1}{4}$  mikron dan pengamatan menggunakan mikroskop optik pada perbesaran optimum hingga perbesaran 500 atau 1000 kali.

## SIMPULAN

Interaksi termokimia pada PEB  $U_3Si_2$ -Al TMU 2,96 pra iradiasi terjadi antara bahan bakar  $U_3Si_2$  dengan matrik Al maupun kelongsong AlMg2 mulai pada temperatur pemanasan 550°C. Pada temperatur 630°C terjadi peleburan matrik Al dan kelongsong AlMg2 dan lelehan matrik Al dan kelongsong AlMg2 secara langsung berinteraksi dengan  $U_3Si_2$  membentuk aglomerat dengan senyawa baru  $U(Al,Si)_x$  dan  $UAl_x$  pada temperatur 900°C dan 1350°C. Dari analisis mikrostruktur diketahui bahwa pembentukan aglomerat terjadi semakin besar dengan meningkatnya temperatur pemanasan. Sementara itu, dari analisis mikrostruktur PEB  $U_3Si_2$ -Al TMU 2,96 pasca iradiasi, terlihat

jelas adanya lapisan oksida serta interaksi partikel  $U_3Si_2$  dengan matrik Al membentuk fasa baru atau senyawa intermetalik  $U(Al,Si)_x$ . Fasa baru tersebut ditunjukkan dengan warna abu-abu terang dengan ketebalan sekitar 1-3 mikron.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. P. Hastuti, T.M. Sembiring, Suparjo, Suwardi, (2010), "LAK Inseri Elemen Bakar Uji Silisida 3 Pelat Tingkat Muat 4,8 dan 5,8 gU/cm<sup>3</sup> di Teras RSG-GAS", PRSG-BATAN.
- [2] R.F. Domagala, T.C. Wincek, J.L. Snelgrove, M.I. Homa and R.R. Heinrich, (1992), "DTA Study of  $U_3Si_2$  - Al and  $U_3Si_2$  - Al Reactions", IAEA - TECDOC - 643(4).
- [3] A. Br. Ginting, D. Anggraini, Boybul, A. Nugroho, R. Kriswarini, (2014), Bunga Rampai, Prosiding Hasil penelitian Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir, Pusat Teknologi Bahan bakar Nuklir-BATAN, ISBN: 978-602-71975-0-3.
- [4] P. Toft, A. Jensen, (1995), "Differential Thermal Analysis and Metallographic Examination of  $U_3Si_2$  Powder,  $U_3Si_2/Al$  (38w/o) Miniplates", IAEA- TECDOC 643(4), page 15-122.
- [5] A. Soba, A. Denis, (2007), "An Interdiffusional Model for Prediction of the Interaction Layer Growth in the System Uranium-Molybdenum/Aluminium" *Journal of Nuclear Materials*.
- [6] E. Perez, Y. H. Sohn, D.D. Keiser, (2008), "U-Mo/Al Alloys Diffusion Couples Fuel/ Cladding Interactions", *NIST Diffusion Workshop, May 12, 2008, Idaho National Laboratory, University of Central Florida*.
- [7] C. Kyu Rhee, S. Pyun and I. Hiun Kuk, (2011), "Phase Formation and Growth at Interface Between  $U_3Si$  and Aluminium" *Korea Atomic Energy Institute, Daejeon 305-606, Korea, April*.
- [8] J. Allenou, O. Tougaard, M. Pasturel, X. Iltis, F. Charollais, M.C. Anselmet, P. Lemoine, (2011), "Interdiffusion Behaviors in Doped Molybdenum Uranium and Aluminium or Aluminium Silicon Dispersion Fuel: Effects of the Microstructure", *Journal of Nuclear Materials*.
- [9] J. Gan, B. Miller, D. Keiser, A. Robinson, P. Medvedev, D. Wachs, (2010), "TEM Characterization of Irradiated  $U_3Si_2/Al$  Dispersion Fuel", *RERT 2010-32nd, International Meeting On Reduced Enrichment For Research and Test Reactor, Idaho National Laboratory, P.O. Box 1625, Idaho Falls, ID 83415, USA*.
- [10] S. Van Den Berghe, A. Leenaers, E. Koonen, P. Jacquet, L. Sannen, (2010), "Microstructure Of  $U_3Si_2$  Fuel Plates Submitted To A High Heat Flux", *SCK•CEN, Reactor Materials Research, Boeretang 200, B-2400 Mol Belgium, RERT 2010-32nd, International Meeting On Reduced Enrichment For Research and Test Reactor, Idaho National Laboratory, P.O. Box 1625, Idaho Falls, ID 83415, USA*.
- [11] F. Wang, B. Wen, L. Ren, L. Jiang, G. Li and Y. Zhou, (2011), *PIE of LEU Fuel Elements With T6061 Cladding, Water Reactor Fuel Performance Meeting Chengdu, China, Sept. 11-14, 2011*.
- [12] G. Ruggirello, H. Calabroni, M. Sanchez and G. Hofman, (2009), "Post-Irradiation Examination of  $U_3Si_x$ -Al Fuel Element Manufactured And Irradiated In Argentina.