

## IDENTIFIKASI SENYAWA YANG TERBENTUK AKIBAT REAKSI TERMOKIMIA PADA INGOT BAHAN BAKAR $U_3O_8$ -Al, $U_3Si_2$ -Al DAN $UMo$ -Al MENGGUNAKAN X-RAY DIFFRACTOMETER

Aslina Br. Ginting  
Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir – BATAN, Serpong

### ABSTRAK

**IDENTIFIKASI SENYAWA YANG TERBENTUK AKIBAT REAKSI TERMOKIMIA PADA INGOT BAHAN BAKAR  $U_3O_8$ -Al,  $U_3Si_2$ -Al DAN  $UMo$ -Al MENGGUNAKAN X-RAY DIFFRACTOMETER.** Matrik Al yang terdapat dalam bahan bakar  $U_3O_8$ -Al,  $U_3Si_2$ -Al dan  $UMo$ -Al mengalami reaksi peleburan pada temperatur sekitar 630 °C hingga 645 °C. Lelehan matrik Al tersebut bereaksi secara termokimia eksotermik maupun endotermik dengan masing-masing bahan bakar di atas dan membentuk senyawa baru yang akan mempengaruhi unjuk kerja bahan bakar di dalam reaktor. Sebenarnya kondisi operasi reaktor riset hanya berkisar pada temperatur 140 °C, sehingga kemungkinan lepasnya energi reaksi termokimia  $U_3O_8$ -Al,  $U_3Si_2$ -Al, dan  $UMo$ -Al tidak akan terjadi kecuali bila terjadi kecelakaan LOCA (*Loss of Cooling Accident*). Tetapi hal ini perlu diantisipasi untuk mengetahui unjuk kerja ketiga bahan bakar tersebut, baik pada kondisi operasi normal maupun dalam kondisi LOCA. Analisis reaksi termokimia dilakukan menggunakan DTA yang dilanjutkan dengan analisis identifikasi senyawa menggunakan XRD. Hasil analisis menunjukkan bahwa terjadi pembentukan senyawa  $UO_2$ ,  $Al_2O_3$  pada bahan bakar  $U_3O_8$ -Al dan senyawa metastabil  $U(Al,Si)_x$  pada bahan bakar jenis  $U_3Si_2$ -Al dan  $U(Al,Mo)_x$  pada bahan bakar jenis  $UMo$ -Al. Ketiga jenis bahan bakar tersebut juga menghasilkan senyawa  $UAl_x$  ( $UAl_2$ ,  $UAl_3$ ,  $UAl_4$ ) sebagai hasil akhir dari reaksi termokimia.

**KATA KUNCI:** Reaksi termokimia, Bahan bakar  $U_3O_8$ -Al,  $U_3Si_2$ -Al dan  $UMo$ -Al, X-Ray Diffraction, Matrik aluminium

### ABSTRACT

**IDENTIFICATION OF COMPOUNDS FORMED FROM THERMOCHEMICAL REACTIONS IN  $U_3O_8$ -Al,  $U_3Si_2$ -Al AND  $UMo$ -Al FUEL INGOT USING X-RAY DIFFRACTOMETER.** Aluminium matrix in  $U_3O_8$ -Al,  $U_3Si_2$ -Al, and  $UMo$ -Al fuel experiences melting reaction at the temperature of 630 °C to 645 °C. The melted aluminium matrix reacts thermochemically either in an exothermic or an othermic reaction with each of the above fuels and forms new compounds which will influence the performance of the fuel in the reactor. Research reactor in effect operates at the temperature of 140 °C so the probability of energy release from the thermochemical reaction of  $U_3O_8$ -Al,  $U_3Si_2$ -Al and  $UMo$ -Al will not take place except in case of LOCA (*Loss of Cooling Accident*). Nevertheless, the condition must be anticipated to determine the performance of the three fuels in normal condition as well as in LOCA condition. Thermochemical reaction analysis was performed using DTA followed by identification analysis of the compounds using XRD. The analysis results showed that  $UO_2$ ,  $Al_2O_3$  compound was formed in the  $U_3O_8$ -Al fuel, metastable compound  $U(Al,Si)_x$  in the  $U_3Si_2$ -Al fuel, and  $U(Al,Mo)_x$  in the  $UMo$ -Al fuel. The three fuels also produced  $UAl_x$  ( $UAl_2$ ,  $UAl_3$ ,  $UAl_4$ ) as the end products of the thermochemical reactions.

*FREE TERMS: Thermochemical reaction,  $U_3O_8$ -Al,  $U_3Si_2$ -Al and UMO-Al fuel, X-ray diffractometer, Aluminium matrix*

## I. PENDAHULUAN

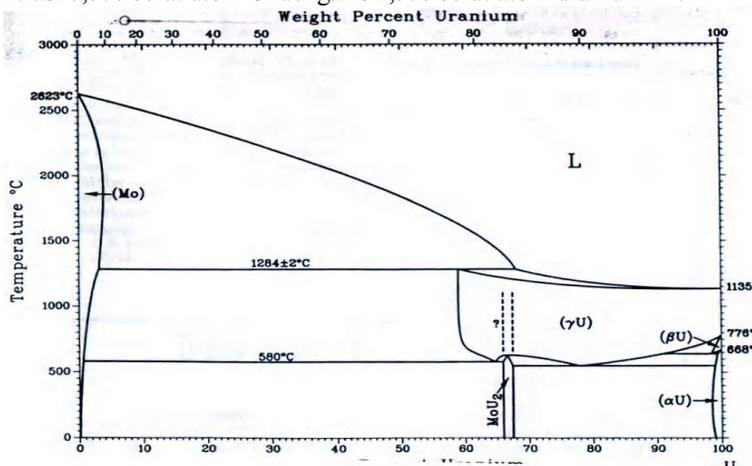
Pada tahun 1997, BATAN bekerja sama dengan INTERATOM-NUKEM Jerman mendirikan instalasi fabrikasi pelat elemen bakar (PEB) reaktor riset di Serpong. Jenis bahan bakar yang pertama diproduksi adalah pelat elemen bakar (PEB) jenis  $U_3O_8$ -Al dengan densitas bahan  $8,56 \text{ g/cm}^3$  dan tingkat muat uranium  $2,9 \text{ g U/cm}^3$ . Setelah bahan bakar tersebut digunakan di teras reaktor G.A.Siwabessy, dapat diketahui bahwa unjuk kerja PEB tersebut cukup baik. Namun kekurangan dari bahan bakar jenis oksida ini adalah tidak dapat dibuat menjadi PEB dengan tingkat muat uranium lebih besar dari  $2,9 \text{ g U/cm}^3$  karena hanya mempunyai densitas bahan sekitar  $8,56 \text{ g/cm}^3$ , sehingga pada saat penggunaannya di dalam reaktor tidak terlalu efektif karena siklus operasi reaktor maksimum hanya 25 hari<sup>[1]</sup>.

Dalam usaha untuk meningkatkan kandungan  $U_{235}$  di dalam bahan bakar maka harus dicari bahan bakar yang mempunyai densitas lebih besar dari bahan bakar  $U_3O_8$ -Al. Salah satu bahan bakar yang mempunyai densitas lebih besar dari bahan bakar  $U_3O_8$ -Al adalah bahan bakar  $U_3Si_2$ -Al yang mempunyai densitas bahan sekitar  $12,5 \text{ g/cm}^3$ . Karena densitas bahannya tinggi sehingga pada tahun 1998 BATAN melakukan fabrikasi terhadap pelat elemen bakar (PEB) jenis silisida  $U_3Si_2$ -Al dengan tingkat muat uranium  $2,9 \text{ g U/cm}^3$  sebagai pengganti elemen bakar lama jenis oksida  $U_3O_8$ -Al. Meningkatnya densitas bahan bakar  $U_3Si_2$ -Al tersebut dapat meningkatkan siklus operasi reaktor dari 25 hari menjadi 40 hari<sup>[1]</sup>. Perpanjangan siklus operasi ini menyebabkan waktu tinggal (*life time*) bahan bakar di dalam reaktor lebih lama yang dapat mengurangi penggantian bahan bakar (*refuelling*) sehingga efisiensi ekonomi bahan bakar akan lebih meningkat<sup>[2]</sup>. Pada September 2002 bahan bakar jenis silisida  $U_3Si_2$ -Al dengan tingkat muat uranium  $2,9 \text{ gU/cm}^3$  telah mengisi seluruh teras Reaktor Serba Guna G.A.Siwabessy dengan daya operasi sebesar 30 MW.

Berdasarkan hasil penelitian sebelumnya<sup>[3,4]</sup>, bahan bakar  $U_3Si_2$ -Al dengan densitas bahan sekitar  $12,5 \text{ g/cm}^3$  dapat dibuat menjadi bahan bakar dengan tingkat muat uranium hingga  $5,2 \text{ g U/cm}^3$ . Namun berdasarkan penelitian dan hasil analisis fabrikator ditunjang dengan keselamatan operasi reaktor bahwa pelat elemen bakar  $U_3Si_2$ -Al dengan tingkat muat uranium  $2,9 \text{ g U/cm}^3$  dan  $3,6 \text{ g U/cm}^3$  sangat baik digunakan sebagai bahan bakar di dalam reaktor<sup>[3]</sup>. Sedangkan untuk tingkat muat uranium  $4,2$  dan  $4,8 \text{ g U/cm}^3$  data analisis fabrikasi menunjukkan bahwa kedua pelat elemen bakar tersebut tidak mengalami kendala dalam proses fabrikasi tetapi penggunaannya di dalam reaktor sedang dalam penelitian. Tetapi untuk bahan bakar  $U_3Si_2$ -Al dengan tingkat muat uranium  $5,2 \text{ g U/cm}^3$  di dalam proses fabrikasi mengalami kendala dalam hal ketebalan kelongsong  $AlMg_2$  yang dipersyaratkan. Bila muatan uranium ditingkatkan menjadi  $5,2 \text{ g U/cm}^3$  maka akan menyebabkan volume inti elemen bakar meningkat sehingga berpengaruh terhadap perubahan ketebalan kelongsong  $AlMg_2$ . Hal ini tidak diinginkan karena tidak sesuai dengan persyaratan fabrikasi pelat elemen bakar reaktor riset karena ketebalan kelongsong bahan bakar yang dipersyaratkan adalah minimum  $0,25 \text{ mm}$  dan maksimum  $0,36 \text{ mm}$ <sup>[4]</sup>. Oleh karena itu dalam meningkatkan muatan uranium, dilakukan penelitian dan pengembangan bahan bakar reaktor riset untuk mencari bahan bakar maju yang mempunyai densitas bahan lebih tinggi dari bahan bakar  $U_3O_8$ -Al maupun  $U_3Si_2$ -Al. Salah satu bahan bakar maju yang mempunyai densitas tinggi sekitar  $18,6 \text{ g/cm}^3$  adalah paduan UMO-Al.

Paduan UMo dipilih sebagai bahan bakar maju reaktor riset dan sekaligus sebagai pengganti bahan bakar  $U_3O_8$  dan  $U_3Si_2$ . Paduan UMo mempunyai densitas bahan sekitar  $18,6 \text{ g/cm}^3$  dibanding bahan bakar  $U_3Si_2$  yang hanya sekitar  $12,5 \text{ g/cm}^3$  [4,5], sehingga paduan UMo tersebut dengan mudah dapat dibuat menjadi elemen bakar nuklir dengan tingkat muat uranium lebih besar dari  $6 \text{ g U/cm}^3$ . Keunggulan lain yang dimiliki paduan UMo adalah mempunyai daerah fasa gamma ( $\gamma$ ) relatif besar dan mempunyai stabilitas panas dengan matrik Al relatif baik [5] seperti yang terlihat pada Gambar 1 diagram fase paduan UMo. Karena keunggulan yang dimiliki oleh paduan UMo tersebut, maka paduan UMo tersebut merupakan salah satu bahan bakar reaktor riset yang perlu dipelajari dan dilakukan penelitian dan pengembangan teknologi fabrikasinya.

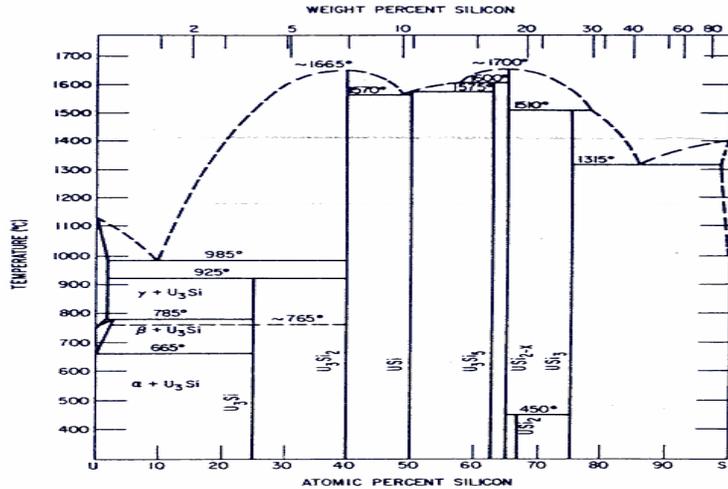
Pada penelitian sebelumnya telah dilakukan analisis termal terhadap ketiga bahan bakar  $U_3O_8$ -Al,  $U_3Si_2$ -Al masing-masing dengan tingkat muat uranium  $2,9 \text{ g U/cm}^3$  dan UMo-Al dengan kandungan Mo 10%. Dari hasil analisis tersebut telah diketahui bahwa ketiga bahan bakar tersebut sangat stabil terhadap panas hingga temperatur  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ . Namun di atas temperatur  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  ketiga bahan bakar tersebut mengalami reaksi termokimia yang ditunjukkan oleh puncak eksotermik dan endotermik [3,4,6,7]. Hal ini didukung oleh diagram fase paduan uranium silisida seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 dimana terlihat jelas bahwa tidak terjadi perubahan fase di bawah  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  pada konsentrasi 7,5% berat atom Si dengan 92,5% berat atom uranium [8,9].



Gambar 1. Diagram Fase Paduan UMo

Terjadinya reaksi termokimia pada bahan bakar tersebut, baik reaksi eksotermik maupun endotermik, akan menyebabkan peleburan matrik Al, kemudian leburan matrik Al tersebut berinteraksi dengan inti elemen bakar membentuk senyawa baru [10]. Senyawa baru yang terbentuk akan mempengaruhi unjuk kerja bahan bakar di dalam reaktor yaitu penyebab terjadinya penggembungan bahan bakar karena memperbanyak produk fisi. Sebenarnya kondisi operasi reaktor riset hanya berkisar pada temperatur  $140 \text{ }^\circ\text{C}$ , sehingga kemungkinan lepasnya energi reaksi termokimia  $U_3O_8$ -Al,  $U_3Si_2$ -Al, dan UMo-Al tidak akan terjadi kecuali bila terjadi kecelakaan LOCA (*Lost of*

Cooling Accident). Tetapi hal ini perlu diantisipasi untuk mengetahui unjuk kerja ketiga bahan bakar tersebut, baik pada kondisi operasi normal maupun dalam kondisi LOCA<sup>[7,10]</sup>.



Gambar 2. Diagram fase paduan uranium dengan silisida

Disamping itu data reaksi termokimia dari ketiga bahan bakar tersebut belum diketahui seluruhnya baik secara eksperimen maupun dari pustaka. Namun diduga dengan terjadinya reaksi eksotermik dan endotermik pada temperatur tertentu terhadap ketiga bahan bakar tersebut akan dihasilkan senyawa yang berbeda. Sehingga dipandang perlu untuk melakukan penelitian lanjutan untuk menganalisis senyawa-senyawa yang terbentuk akibat reaksi termokimia yang terjadi.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi masukan kepada fabrikasi bahan bakar reaktor riset untuk memahami karakter bahan dalam mendesain bahan bakar jenis molibdenum, silisida dan oksida.

## II. TATA KERJA

### 2.1 Bahan

Bahan yang digunakan meliputi bahan bakar UMo-Al,  $U_3Si_2$ -Al dan  $U_3O_8$ -Al.

### 2.2 Alat

Alat yang digunakan adalah *Differential Thermal Analysis (DTA)* dan *X-Ray Diffractometer (XRD)*.

### 2.3 Cara Kerja

Ketiga bahan bakar  $U_3O_8$ -Al,  $U_3Si_2$ -Al dan UMo-Al yang mengalami reaksi termokimia pada temperatur tertentu telah dianalisis dengan DTA hingga temperatur 1600 °C. Kemudian dilanjutkan dengan analisis identifikasi senyawa menggunakan XRD. Sampel bahan bakar yang akan dianalisis ditempatkan di atas wadah sampel, kemudian dimasukkan ke dalam *chamber diffractometer*. Selanjutnya dilakukan pengukuran dengan menggunakan target Cu dengan tegangan 30 kV dan kuat arus serta dengan waktu cacah 30 menit. Difraktogram sampel yang terbentuk kemudian dianalisis

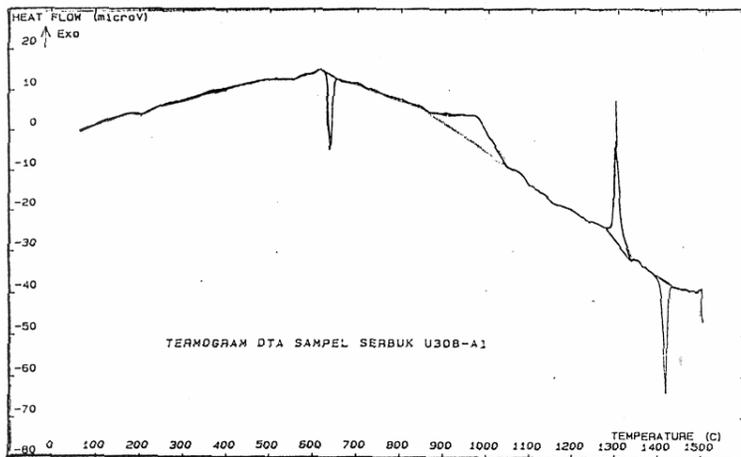
dengan difraktogram sampel standar, sehingga dapat diketahui unsur-unsur yang teranalisis dengan metode komparatif.

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Serbuk Bahan Bakar $U_3O_8$ -Al

Reaksi termokimia yang dialami serbuk bahan bakar  $U_3O_8$ -Al berupa reaksi endotermik dan reaksi eksotermik yang terjadi masing-masing pada temperatur 635,6 °C, 972,4 °C, 1295,4 °C dan 1416,0 °C seperti ditunjukkan pada Gambar 3.

Pada temperatur 635,6 °C terjadi reaksi termokimia endotermik yang menunjukkan terjadinya reaksi peleburan matrik Al. Kemudian diikuti dengan reaksi termokimia eksotermik pada temperatur 972,4 °C yang menyatakan terjadinya reaksi termokimia antara serbuk bahan bakar  $U_3O_8$  dengan lelehan matrik Al membentuk senyawa  $UO_2$  dan  $Al_2O_3$ .

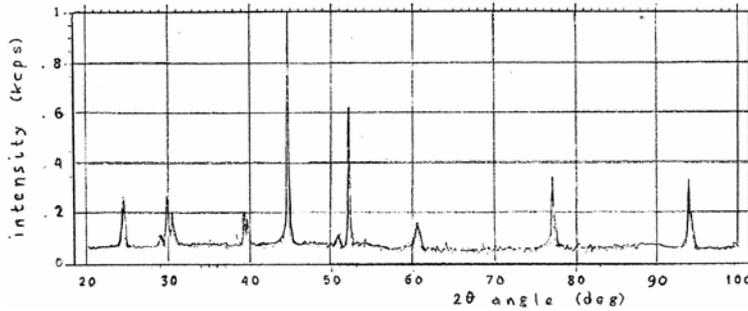


Gambar 3. Termogram reaksi termokimia serbuk bahan bakar  $U_3O_8$ -Al

Terbentuknya senyawa ini didukung oleh analisis identifikasi senyawa melalui analisis dengan menggunakan XRD bahwa senyawa yang terbentuk pada reaksi termokimia eksotermik adalah  $U_3O_8$ ,  $UO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $UAl_4$ , U bebas dan Al seperti yang terlihat pada Tabel 1 dan Gambar 4.

Dari Gambar 3 dapat diketahui bahwa pada temperatur 1295,4 °C masih terjadi reaksi termokimia eksotermik yang menunjukkan terjadinya reaksi termik lanjutan dari sisa senyawa  $U_3O_8$ , dan  $UO_2$  dengan matrik Al membentuk senyawa  $UAl_x$ . Menurut pendapat Fliming dan Jhonson dari *Oak Ridge Research Reactor*<sup>[7]</sup>, pembentukan senyawa  $UAl_x$  yang merupakan bagian dari senyawa  $UAl_2$ ,  $UAl_3$  dan  $UAl_4$  terjadi secara bertahap, mulai dari difusi lelehan matrik Al ke dalam serbuk  $U_3O_8$  yang membentuk lapisan  $UAl_2$ ,  $UAl_3$  dan  $UAl_4$  dan dalam pembentukannya sangat dipengaruhi oleh besarnya temperatur pemanasan<sup>[6]</sup>. Hal ini didukung oleh diagram fase uranium dengan aluminium yang ditunjukkan pada Gambar 5, bahwa pada temperatur 733 °C telah terbentuk senyawa  $UAl_4$  dan pada temperatur 1350 °C terbentuk senyawa  $UAl_3$  dan  $UAl_2$  hingga pemanasan pada

temperatur 1416 °C<sup>[8]</sup>. Fenomena ini sesuai dengan hasil analisis reaksi termokimia endotermik pada Gambar 3, dimana masih terjadi reaksi termokimia endotermik pada temperatur 1416 °C yang menunjukkan terjadinya reaksi peruraian dari senyawa  $UAl_x$  menjadi  $UAl_2$ ,  $UAl_3$  dan  $UAl_4$ .



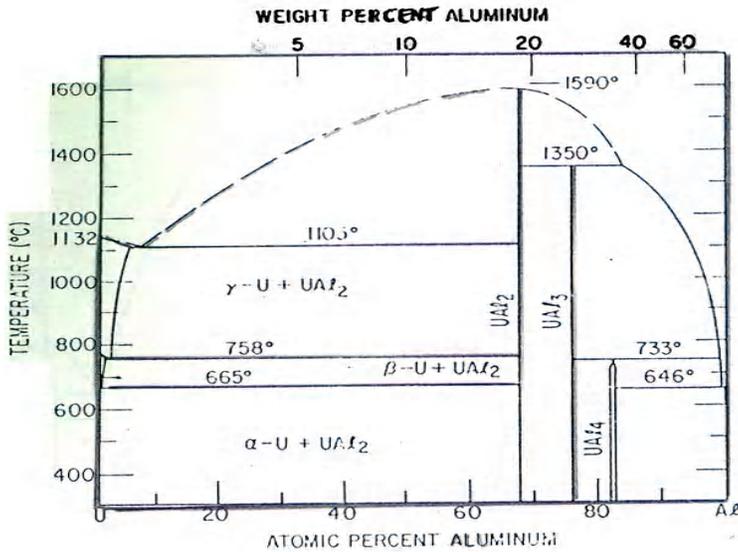
Gambar 4. Difraktogram serbuk bahan bakar  $U_3O_8$ -Al

Tabel 1. Hasil identifikasi senyawa serbuk bahan bakar dengan XRD

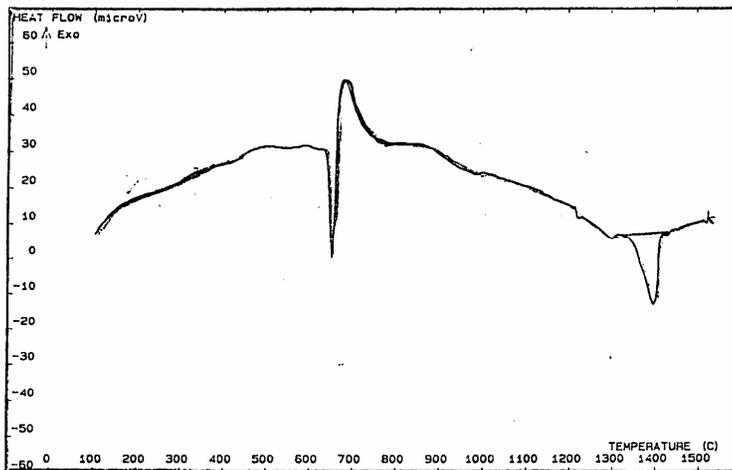
Temperatur (°C)	Serbuk bahan bakar $U_3O_8$ -Al	Serbuk bahan bakar $U_3Si_2$ -Al	Serbuk bahan bakar UMo-Al
580	Tidak terjadi reaksi termokimia	Tidak terjadi reaksi termokimia	Terjadi perubahan fasa ( $\alpha+\delta$ ) menjadi fasa ( $\alpha+\gamma$ )
600 – 650	$Al_{(l)}$ , $U_3O_8$ , $UO_2$ , $Al_2O_3$	$U(Al,Si)_x$ , $Al_{(l)}$ , $U_3Si_2$ , U bebas	$Al_{(l)}$ , UMo
725	$U_3O_8$ , $UO_2$ , $Al_2O_3$	Tidak terjadi reaksi termokimia	Tidak terjadi reaksi termokimia
800 – 900	$U_3O_8$ , $UO_2$ , $Al_2O_3$ , $UAl_x$ , U bebas, Al bebas	$U(Al,Si)_x$ , $U_3Si$ , $U_3Si_2$ , U bebas, Al bebas	$U(Al,Mo)_x$ , UMo
1300 – 1416	$U_3O_8$ , $UO_2$ , $Al_2O_3$ , Al, $UAl_2$ , $UAl_3$ dan $UAl_4$	Si bebas, $UAl_2$ , $UAl_3$ , $UAl_4$ , Al	Mo bebas, $UAl_2$ , $UAl_3$ , $UAl_4$ , Al

Secara keseluruhan kemungkinan reaksi termokimia yang terjadi pada serbuk bahan bakar  $U_3O_8$ -Al sebagai fungsi temperatur adalah sebagai berikut:





Gambar 5. Diagram fase paduan uranium dengan aluminium



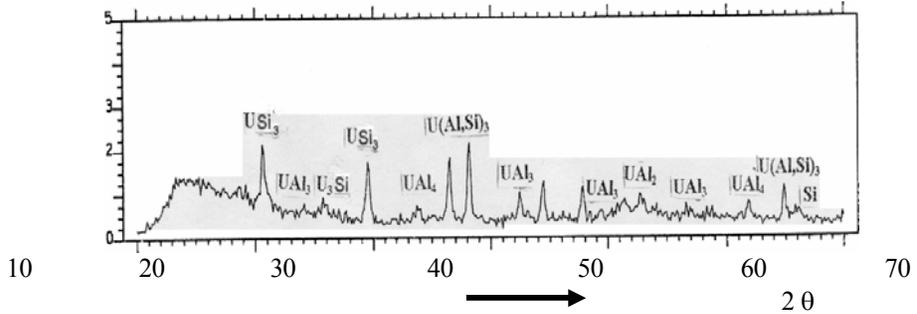
Gambar 6. Termogram reaksi termokimia serbuk bahan bakar  $U_3Si_2-Al$

#### 4.2 Serbuk Bahan Bakar $U_3Si_2-Al$

Hasil analisis reaksi termokimia terhadap serbuk bahan bakar  $U_3Si_2-Al$  yang dilakukan hingga temperatur 1600 °C dapat dilihat pada Gambar 6. Pada temperatur 639,10 °C terjadi peleburan matrik Al yang ditunjukkan oleh reaksi termokimia endotermik yang diikuti oleh terjadinya suatu reaksi termokimia eksotermik secara cepat yang menunjukkan

terjadinya reaksi difusi lelehan matrik Al dengan serbuk bahan bakar  $U_3Si_2$  membentuk senyawa  $U(Al,Si)_x$ . Terjadinya pembentukan senyawa  $U(Al,Si)_x$  dibuktikan dengan analisis senyawa menggunakan XRD seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.

Pada pemanasan antara temperatur 800 °C hingga 900 °C terjadi perubahan fasa dari  $U_3Si_2$  menjadi fasa  $U_3Si$  yang ditunjukkan oleh penurunan aliran panas pada Gambar 6.

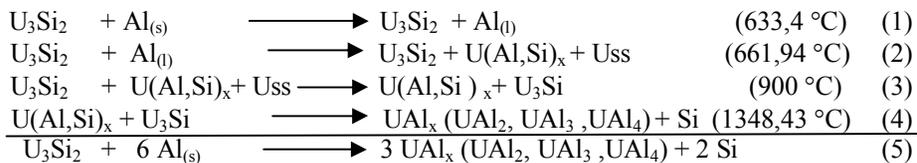


Gambar 7. Difraktogram serbuk bahan bakar  $U_3Si_2$ -Al

Hal ini didukung oleh diagram fase paduan U-Si yang menunjukkan pada temperatur 785 °C hingga 925 °C terbentuk fase  $\gamma + U_3Si$ <sup>[9]</sup>. Sedangkan pada temperatur 1349,70 °C terjadi reaksi termokimia endotermik yang menunjukkan terjadinya reaksi pengikatan senyawa  $U(Al,Si)_x$  dengan matrik Al membentuk senyawa  $UAl_x$  dan  $USi$  yang dilanjutkan dengan pembentukan reaksi termokimia endotermik pada temperatur 1400 °C yang menunjukkan peruraian senyawa  $UAl_x$  menjadi senyawa  $UAl_2$ ,  $UAl_3$  dan  $UAl_4$ . Hasil ini sesuai dengan diagram fase paduan uranium silisida yang ditunjukkan pada Gambar 2 dan diagram fase paduan uranium aluminium pada Gambar 5.

Dari fenomena reaksi termokimia yang terjadi pada serbuk bahan bakar  $U_3Si_2$ -Al hampir sama dengan reaksi termokimia pada serbuk  $U_3O_8$ -Al. Hal ini menyatakan bahwa bahan bakar  $U_3O_8$ -Al maupun bahan bakar  $U_3Si_2$ -Al mempunyai unjuk kerja yang sama yaitu sangat stabil hingga temperatur 600 °C dan menghasilkan senyawa  $UAl_2$ ,  $UAl_3$ ,  $UAl_4$  sebagai hasil akhir dari reaksi termokimia yang terjadi.

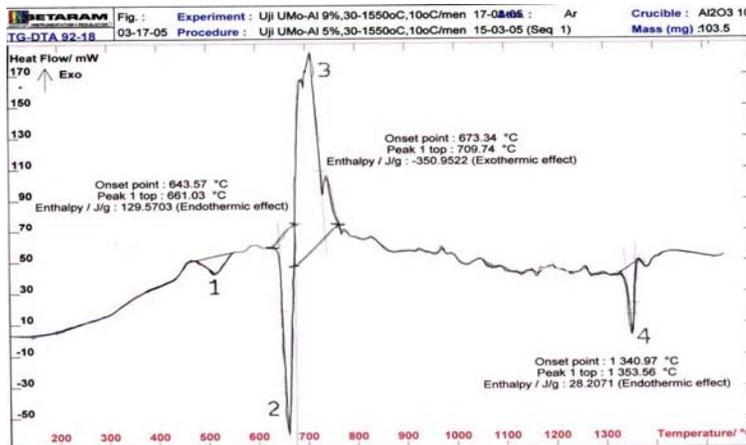
Tahapan reaksi termokimia yang kemungkinan terjadi pada serbuk bahan bakar  $U_3Si_2$ -Al adalah sebagai berikut:



### 4.3 Serbuk Bahan Bakar UMo-Al

Dari hasil analisis reaksi termokimia terhadap bahan bakar UMo-Al menggunakan alat DTA diperoleh hasil bahwa pada temperatur 580,16 °C bahan bakar UMo mengalami perubahan fasa dari fasa  $(\alpha + \delta)$  menjadi fasa  $(\alpha + \gamma)$ <sup>[9]</sup>. Perubahan fasa ini ditunjukkan dengan adanya perubahan aliran panas dari pengukuran pada temperatur

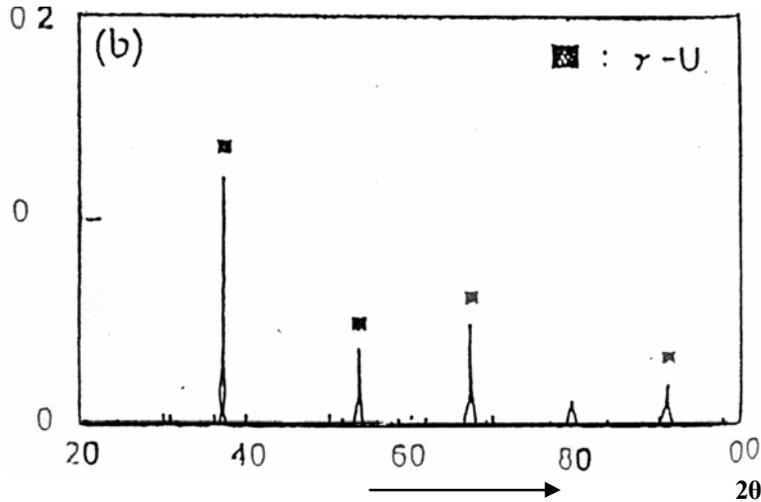
580,16 °C seperti yang terlihat pada puncak 1 Gambar 8. Hal ini sesuai dengan diagram fasa yang terbentuk pada paduan uranium molibdinem yang ditunjukkan pada Gambar 1. Selanjutnya pada temperatur 645,37 °C hingga temperatur 661,28 °C terjadi reaksi termokimia endotermik yang menunjukkan terjadinya peleburan matrik Al yang diikuti oleh suatu reaksi termokimia eksotermik pada temperatur 679,14 °C hingga 719,20 °C. Dari fenomena reaksi termokimia eksotermik pada temperatur 679,14 °C hingga 719,20 °C jelas terlihat bahwa hasil leburan matrik Al secara langsung bereaksi dengan bahan bakar UMO membentuk senyawa  $U(Al,Mo)_x$ <sup>[9]</sup>. Hal ini disebabkan karena adanya pengikatan atau difusi lelehan matrik Al ke dalam bahan bakar UMO secara cepat, yang disebabkan karena lelehan matrik Al mempunyai kontak antar muka dengan gaya gerak yang lebih besar sehingga ikatan intermetalik lelehan Al dengan UMO terjadi secara simultan dengan reaksi peleburan matrik Al<sup>[9]</sup>.



Gambar 8. Termogram reaksi termokimia serbuk bahan bakar UMO-Al

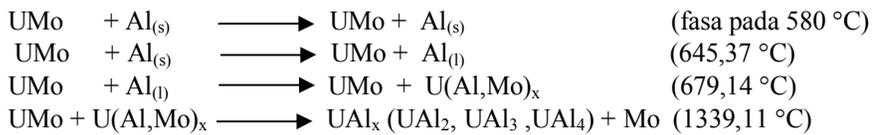
Pembentukan senyawa  $U(Al,Mo)_x$  pada reaksi eksotermik tersebut menunjukkan bahwa pemanasan hingga temperatur 719,20 °C terbentuk dua senyawa  $UAl_x$  dan UMO dalam kondisi metastabil<sup>[9]</sup>. Sehingga pada pemanasan lebih lanjut pada temperatur 1339,11 °C sampai dengan 1346,13 °C terjadi reaksi termokimia endotermik yang menunjukkan terjadinya pembentukan senyawa  $UAl_x$  ( $UAl_4$ ,  $UAl_3$  dan  $UAl_2$ ) dari senyawa  $U(Al,Mo)_x$  seperti yang terlihat pada puncak 4 di Gambar 8.

Pembentukan senyawa  $UAl_x$  ( $UAl_4$ ,  $UAl_3$  dan  $UAl_2$ ) yang terjadi disebabkan oleh pengikatan logam uranium dengan lelehan matrik Al membentuk senyawa tersebut<sup>[9]</sup>. Senyawa yang terbentuk akibat reaksi termokimia lelehan matrik Al dengan bahan bakar UMO dianalisis menggunakan XRD dan hasil analisisnya ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Difraktogram serbuk bahan bakar UMo-Al

Reaksi termokimia yang terjadi pada bahan bakar UMo-Al kemungkinan dengan tahapan sebagai berikut<sup>[4,9]</sup>:



## V. KESIMPULAN

Dari hasil analisis reaksi termokimia dengan DTA yang didukung oleh analisis identifikasi senyawa dengan XRD telah dapat diketahui bahwa terjadi interaksi lelehan matrik Al dengan bahan bakar  $U_3O_8$ ,  $U_3Si_2$  dan UMo membentuk senyawa baru. Terjadi pembentukan senyawa  $UO_2$ ,  $Al_2O_3$  pada bahan bakar  $U_3O_8$ -Al, senyawa metastabil  $U(\text{Al},\text{Si})_x$  pada bahan bakar jenis  $U_3Si_2$ -Al dan  $U(\text{Al},\text{Mo})_x$  pada bahan bakar jenis UMo-Al. Ketiga jenis bahan bakar tersebut menghasilkan senyawa  $UAl_x$  ( $UAl_2$ ,  $UAl_3$ ,  $UAl_4$ ) sebagai hasil akhir dari reaksi termokimia. Dari hasil analisis ini dapat diketahui bahwa ketiga bahan bakar di atas mempunyai unjuk kerja hampir sama bila ditinjau dari sifat pembentukan senyawa akibat proses reaksi termokimianya.

## VI. SARAN

Untuk memahami unjuk kerja ketiga bahan bakar lebih terperinci, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut tentang sifat struktur mikro dan sifat neutroniknya sebagai simulasi unjuk kerjanya di dalam reaktor.

---

## VII. DAFTAR PUSTAKA

1. TIM KESELAMATAN REAKTOR SERBA GUNA, “Laporan Analisis Keselamatan Penggantian Elemen Bakar Oksida ke Silisida Densitas  $2,96 \text{ g/cm}^3$ ”, RSG. OTH/LAK/01/98.
2. SNEGROVE, J.L., DOMAGALA, R.F., HOFMAN, G.L., WINCEK, T.C., COPELAND, G.L., HOBBS, W.R., SENN, R.L., “The Use of  $\text{U}_3\text{Si}_2$  Dispersed Al in Plate Type Fuel Elements for Research and Test Reactor”, ANL/RERTR/TM-11, 1987.
3. ASLINA BR. GINTING, “Analisa Termal Pelat Elemen Bakar  $\text{U}_3\text{Si}_2$ -Al Variasi Tingkat Muat Uranium”, Persentasi Peneliti Muda P2TBDU, Serpong, 2002.
4. ASLINA BR GINTING, “Kompatibilitas Bahan Bakar UMo dengan Matrik Al”, Laporan Hasil Penelitian P2TBDU, 2005.
5. M. HUSNA AL HASA, dan ASMEDI S., “Karakterisasi Mekanik dan Struktur Mikro UMo Sebagai Kandidat Bahan Bakar Reaktor Riset”, Prosiding Presentasi Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir V, Jakarta, 1999.
6. RHEE, C.K., PYUN, SU-II, and KUK, II-HIUN, “Phase Formation and Growth at Interface between  $\text{U}_3\text{Si}_2$  and Aluminium”, Korea Atomic Energy Institute, Daejeon 305-606, Korea, 1991.
7. COPELAND G.L., and SNEGROVE, J.L., “Examination of Irradiation High U-Loaded  $\text{U}_3\text{O}_8$ -Al Fuels Plates”, Proceeding of the International Meeting on Research and Test Reactor Core, Conversions from HEU to LEU Fuels, ANL, 1987.
8. DWIGHT, A.E, “Study of the Uranium Silicon System”, Argonne National Laboratory, Illinois, USA.
9. MASSALSKI, T.B., “Binary Alloy Phase Diagrams”, 2<sup>nd</sup> ed., Vol. 3, USA, 1992.
10. DOMAGALA, R.F., WINCEK, T.C., SNEGROVE, J.L., HOMA, M.I., and HEINRICH, R.R., “DTA Study of  $\text{U}_3\text{Si}_2$ -Al and  $\text{U}_3\text{Si}_2$ -Al Reactions”, IAEA – Tec TECDOC-643(4), 1992.