

## KOMPARASI ANALISIS REAKSI TERMOKIMIA MATRIK AI DENGAN BAHAN BAKAR $UMo/Al$ DAN $U_3Si_2/Al$ MENGGUNAKAN *DIFFERENTIAL THERMAL ANALYSIS*

Aslina Br.Ginting <sup>(1)</sup>, Supardjo <sup>(1)</sup>

1. Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir (PTBN)-BATAN  
Kawasan Puspiptek Serpong, Tangerang Selatan 15314  
E-mail: [aslina@batan.go.id](mailto:aslina@batan.go.id)

(Naskah diterima: 29-12-2011, disetujui: 09-01-2012)

### ABSTRAK

**ANALISIS REAKSI TERMOKIMIA TELAH DILAKUKAN ANTARA MATRIK AI DENGAN BAHAN BAKAR  $UMo$  MAUPUN DENGAN  $U_3Si_2$  MENGGUNAKAN *DIFFERENTIAL THERMAL ANALYSIS*.** Pelat elemen bakar  $UMo/Al$  maupun  $U_3Si_2/Al$  dipotong persegi dengan berat masing-masing  $\pm 80$  mg, kemudian dimasukkan ke dalam krusibel alumina. Krusibel tersebut dipanaskan di dalam *DTA rod* dari temperatur ruangan hingga temperatur  $1600^\circ C$  dengan kecepatan pemanasan  $10^\circ C/menit$  dalam media gas argon. Hasil analisis menunjukkan bahwa paduan  $UMo$  mengalami perubahan fasa  $\alpha + \delta$  menjadi fasa  $\alpha + \gamma$  pada temperatur  $580,16^\circ C$  dan hingga temperatur  $600^\circ C$  matrik Al kompatibel dengan bahan bakar  $UMo$ . Pada temperatur  $645,37^\circ C$  hingga  $661,28^\circ C$  matrik Al mengalami pelelehan dan secara langsung berinteraksi dengan bahan bakar  $UMo$ . Interaksi reaksi termokimia antara lelehan matrik Al dengan bahan bakar  $UMo$  menghasilkan senyawa  $U(Al,Mo)_x$  pada temperatur  $679,14^\circ C$  dan senyawa  $UAl_x$  pada temperatur  $1339,11^\circ C$ . Kompatibilitas matrik Al dengan bahan bakar  $U_3Si_2$  juga terjadi hingga temperature  $600^\circ C$ , tetapi pada temperatur  $643,40^\circ C$  bahan bakar  $U_3Si_2/Al$  mengalami reaksi termokimia peleburan matrik Al yang diikuti oleh reaksi eksotermik pada temperatur  $661,94^\circ C$ . Reaksi eksotermik tersebut menunjukkan terjadinya reaksi termokimia antara lelehan matrik Al dengan bahan bakar  $U_3Si_2$  membentuk senyawa  $U(Al,Si)_x$ . Pada kisaran temperatur  $800^\circ C$  hingga  $900^\circ C$  terjadi perubahan fasa dari  $U_3Si_2$  menjadi  $U_3Si$ . Reaksi termokimia terus berlanjut hingga temperatur  $1348,43^\circ C$  yang menunjukkan terjadinya pembentukan senyawa  $UAl_x$  merupakan hasil reaksi penguraian dari senyawa  $U(Al,Si)_x$ . Pada temperatur  $1600^\circ C$  hingga pemanasan selesai bahan bakar  $UMo/Al$  maupun  $U_3Si_2/Al$  tidak mengalami reaksi termokimia. Hasil analisis menunjukkan bahwa bahan bakar  $UMo$  maupun  $U_3Si_2$  stabil hingga temperature  $600^\circ C$ . Data fenomena reaksi termokimia matrik Al dengan bahan bakar  $UMo$  maupun  $U_3Si_2$  dapat digunakan untuk mempelajari karakter kimia fisika dari kedua bahan bakar tersebut.

**Kata Kunci:** reaksi termokimia, matrik Al, bahan bakar  $UMo/Al$  dan  $U_3Si_2/Al$ , DTA.

### ABSTRACT

**THERMOCHEMICAL REACTION ANALYSIS HAS BEEN CARRIED OUT WITH THE AI MATRIX AS WELL AS  $UMo$  AND  $U_3Si_2$  FUELS USING DIFFERENTIAL THERMAL ANALYSIS.** The  $UMo/Al$  or  $U_3Si_2/Al$  fuel plate cut square with the weight of 80 mg each then each put in

*Alumina crucible and heated in the DTA rod from room temperature until 1600 °C with heating rate 10°C/menit in the Argon gas media. The analysis result showed that UMo alloy change from  $\alpha + \delta$  phase into  $\alpha + \gamma$  phase at a temperature of 580.16 °C. Until temperatures 600 °C the Al matrix is very compatible with the UMo fuel. At temperature 645.37 °C until 661.28 °C that Al matrix meltdown and directly interact with the UMo fuel. Thermochemical reaction with Al molten with UMo fuel to product U(Al,Mo)<sub>x</sub> compound at a temperature of 679.14 °C and the UAl<sub>x</sub> compound at a temperature of 1339.11 °C. Compatibility Al matrix with U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> fuel also occur up to temperatures of 600°C, but at temperatures of 643.40 °C U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>/Al fuel experiencing melting thermochemical reaction f Al followed by an exothermic peak at temperatures of 661.94 °C indicates the occurrence of thermochemical reaction between molten Al with U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> fuel forming compounds U (Al,Si)<sub>x</sub>. In the temperature range 800 °C to 900°C phase change from U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> be U<sub>3</sub>Si. Thermochemical reactions continue until the temperature of 1348.43 °C which showed the formation of compounds UAl<sub>x</sub> thermochemical decomposition reaction of U (Al,Si)<sub>x</sub> compounds. From the results of this analysis can be stated that the UMo and U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> fuel very stable up to temperatures of 600°C. Data phenomenon thermochemical reaction Al with UMo and U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> fuel can be used to study the chemical and physic character of these two fuels.*

**Keywords:** thermochemical reaction, Al matrix, UMo/Al and U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>/Al fuel, DTA.

## PENDAHULUAN

Paduan UMo dipilih sebagai bahan bakar reaktor riset dan sekaligus sebagai pengganti bahan bakar U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>. Berdasarkan informasi ilmiah, paduan UMo dengan kandungan Mo antara 7-10% berat memiliki prospek yang sangat baik untuk digunakan sebagai bahan bakar nuklir dispersi dengan pengayaan uranium rendah (20% <sup>235</sup>U) karena mempunyai densitas sekitar 16,8 g/cm<sup>3</sup> dibanding bahan bakar U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> yang hanya sekitar 12,2 g/cm<sup>3</sup> [1,2], sehingga paduan UMo tersebut dengan mudah dapat dibuat menjadi elemen bakar nuklir dengan tingkat muat uranium lebih besar dari 8 gU/cm<sup>3</sup>. Keunggulan lain yang dimiliki paduan UMo adalah mempunyai daerah fasa gamma ( $\gamma$ ) relatif besar dan mempunyai kompatibilitas serta stabilitas panas dengan matrik Al relatif baik [3]. Berdasarkan keunggulan yang dimiliki oleh paduan UMo tersebut, maka paduan UMo merupakan salah satu bahan bakar reaktor riset yang perlu dipelajari dan dilakukan penelitian serta pengembangan teknologi fabrikasinya sekaligus sebagai pengganti bahan bakar jenis U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>.

Keunggulan penggunaan bahan bakar U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>/Al adalah mudah difabrikasi dan stabil selama iradiasi di dalam reaktor, tetapi bahan bakar U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>/Al mempunyai kelemahan diantaranya adalah proses olah ulang gagal fabrikasi maupun bahan bakar bekas sangat sulit dilakukan dan densitas uraniumnya masih jauh di bawah 8 gU/cm<sup>3</sup>. Paduan UMo selain memiliki keunggulan densitasnya yang tinggi, juga tahan terhadap korosi, proses olah ulang gagal fabrikasi maupun bahan bakar bekas lebih mudah dibandingkan bahan bakar U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>/Al, mempunyai tampang lintang serapan neutron rendah, tetapi paduan UMo mempunyai kelemahan yaitu bersifat ulet (*ductile*) sehingga sulit dibuat menjadi serbuk secara mekanik (*grinding mill/ball mill*).

Proses fabrikasi pembuatan bahan bakar dispersi jenis UMo/Al maupun U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>/Al dilakukan dengan cara mendispersikan serbuk UMo atau U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> ke dalam serbuk matriks Al. Matrik Al tersebut berfungsi sebagai pengungkung partikel serbuk bahan bakar sekaligus sebagai penghantar panas dan untuk mengisi ruangan antara partikel bahan bakar UMo maupun U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>. Distribusi

matrik Al yang merata di dalam bahan bakar UMo dan  $U_3Si_2$  dapat menjadi penghantar panas selama digunakan di dalam reaktor sehingga tidak terjadi pengelompokan panas di suatu zona yang akhirnya dapat menyebabkan *swelling* bahan bakar. Kegunaan matrik Al di dalam bahan bakar UMo dan  $U_3Si_2$  sangat penting sehingga perlu dipahami dan diketahui fenomena yang terjadi akibat interaksi matrik Al dengan bahan bakar UMo maupun  $U_3Si_2$ . Fenomena tersebut diduga akan menyebabkan perubahan karakter di dalam bahan bakar. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui kompatibilitas dan kestabilan panas bahan bakar UMo/Al maupun  $U_3Si_2$ /Al. Selain mengetahui kestabilan panas dari bahan bakar tersebut juga perlu diketahui fenomena reaksi termokimia bahan bakar UMo/Al maupun  $U_3Si_2$ /Al beserta besarnya entalpi atau jumlah panas yang diserap (endotermik) maupun panas yang dilepaskan (eksotermik) oleh bahan bakar UMo/Al maupun  $U_3Si_2$ /Al. Analisis ini juga dapat digunakan untuk menentukan temperatur pelelehan matrik Al dan besarnya entalpi interaksi lelehan matrik Al dengan UMo maupun  $U_3Si_2$ .

Beberapa peneliti sebelumnya<sup>[4,5]</sup> telah melakukan penelitian tentang reaksi termokimia bahan bakar  $U_3Si_2$ /Al dan diperoleh hasil bahwa bahan bakar  $U_3Si_2$ /Al sangat stabil terhadap reaksi termokimia hingga temperatur 600 °C, tetapi di atas temperatur 600 °C terjadi reaksi termokimia antara  $U_3Si_2$  dengan matrik Al dan mengeluarkan sejumlah panas (eksotermik). Pada temperatur lebih tinggi, reaksi termokimia yang terjadi menyebabkan terbentuknya fase baru  $U(Al,Si)_3$  dan senyawa UAl. Besarnya pembentukan senyawa baru tersebut sangat dipengaruhi oleh jumlah matrik Al dan  $U_3Si_2$  yang bereaksi. Senyawa yang terbentuk akibat reaksi termokimia ini dapat mempengaruhi unjuk kerja bahan bakar  $U_3Si_2$ /Al di dalam reaktor. Hal ini tidak akan terjadi karena

kondisi reaktor riset selama beroperasi hanya berkisar temperatur 140 °C dan kemungkinan lepasnya energi reaksi termokimia  $U_3Si_2$ /Al tidak akan terjadi kecuali bila terjadi kecelakaan LOCA (*Lost of Cooling Accident*). Namun hal ini perlu diantisipasi untuk mengetahui unjuk kerja bahan bakar UMo/Al maupun  $U_3Si_2$ /Al baik pada kondisi operasi normal maupun dalam kondisi LOCA<sup>[5]</sup>. Data reaksi termokimia bahan bakar UMo/Al maupun  $U_3Si_2$ /Al belum diketahui secara menyeluruh baik secara eksperimen maupun dari literatur<sup>[6]</sup>. Data reaksi termokimia bahan bakar UMo dengan matrik Al dari literatur tidak selengkap data reaksi termokimia bahan bakar  $U_3Si_2$  dengan matrik Al<sup>[6,7,8]</sup>. Oleh sebab itu, dipandang perlu untuk melakukan penelitian analisis reaksi termokimia lebih lanjut terhadap bahan bakar UMo/Al maupun  $U_3Si_2$ /Al. Data analisis termokimia yang diperoleh dapat digunakan oleh pihak fabrikator dan kelompok modelling untuk meningkatkan *design* bahan bakar reaktor riset dengan menggunakan muatan uranium tinggi.

## METODOLOGI

### 1. Bahan

Standar Al 99,99% dan standar Mo 99,99% dari NIST (*National Institute of Standards Technology*), PEB UMo/Al dan  $U_3Si_2$ /Al dari PT.Batan Teknologi Persero.

### 2. Peralatan

Analisis reaksi termokimia dilakukan dengan menggunakan *Differential Thermal Analysis* (DTA'92) Merk SETARAM

### 3. Cara Kerja

PEB UMo/Al dipotong persegi dengan berat  $\pm 80$  mg, kemudian potongan tersebut dimasukkan ke dalam krusibel alumina. Di dalam *chamber DTA rod* krusibel alumina dipanaskan dari temperatur 30 °C hingga 1600 °C dengan

kecepatan pemanasan 10 °C/menit dan waktu tunda selama 1 jam dalam media gas Argon. Pendinginan dilakukan dari temperatur 1600 °C hingga temperatur ruangan dengan kecepatan pendinginan 10 °C/menit. Hasil pengukuran berupa termogram DTA dalam bentuk aliran panas (*heat flow*) dan berupa puncak (*peak*) endotermik maupun puncak eksotermik [7]. Termogram DTA tersebut kemudian dievaluasi dimana luas puncak yang terbentuk merupakan besar entalpi reaksi termokimia yang terjadi serta titik permulaan terbentuknya puncak tersebut (*onset temperature*) menunjukkan besar temperatur peleburan dan temperatur reaksi termokimia bahan bakar UMo/Al. Cara yang sama kemudian dilakukan terhadap PEB U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>/Al sehingga diperoleh fenomena reaksi termokimia dari kedua bahan bakar tersebut.

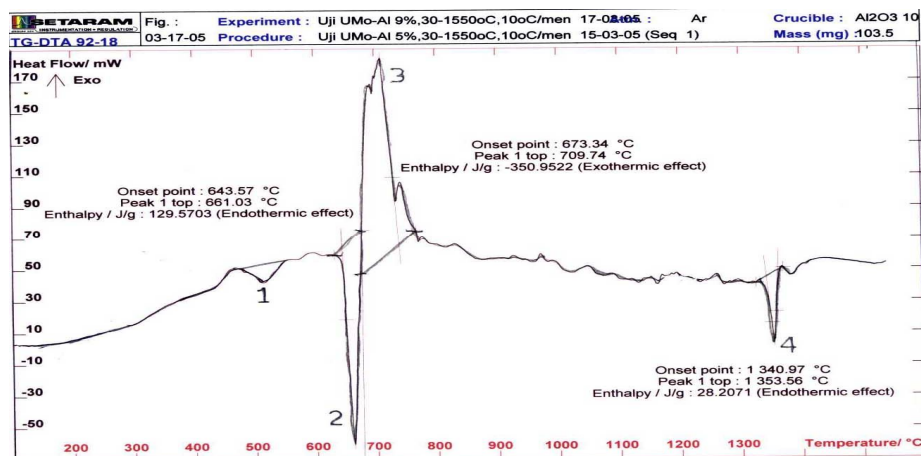
## HASIL DAN PEMBAHASAN

### a. Reaksi termokimia antara matrik al dengan bahan bakar UMo

Reaksi termokimia terjadi antara matrik Al/kelongsong AlMg2 dengan bahan bakar UMo ditandai dengan terjadinya reaksi antara Al dengan UMo yang diindikasikan oleh adanya perubahan aliran

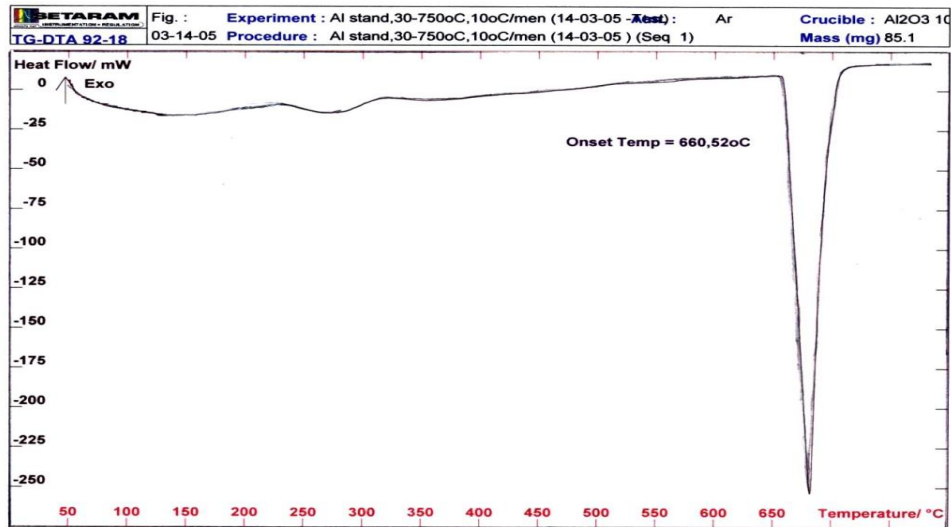
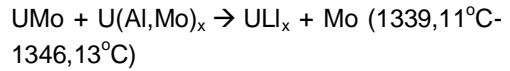
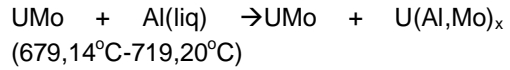
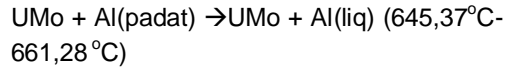
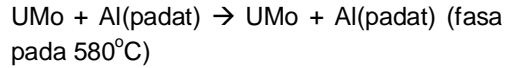
panas membentuk puncak endotermik atau eksotermik. Hasil analisis menunjukkan bahwa paduan UMo/Al dengan kandungan Mo 7% mengalami perubahan fasa dari fasa  $\alpha + \delta$  menjadi fasa  $\alpha + \gamma$  pada temperatur 580,16°C [8]. Perubahan fasa ditunjukkan dengan adanya perubahan *base line* aliran panas dari pengukuran pada temperatur 580,16°C seperti yang terlihat pada Gambar 1, puncak 1. Perubahan fasa yang terjadi pada temperatur 580,16 °C tidak menyebabkan terjadinya puncak endotermik atau interaksi Al dengan bahan bakar UMo. Hal ini dibuktikan dengan hasil analisis termokimia masing-masing serbuk Al 99,999% dan serbuk bahan bakar UMo seperti yang ditunjukkan Gambar 2 dan 3. Hasil analisis terlihat aliran panas untuk serbuk Al 99,999% mulai berubah pada temperatur 660,52°C, sedangkan aliran panas bahan bakar UMo telah berubah pada temperatur 578,63°C.

Gambar 1 menunjukkan bahwa bahan bakar UMo sangat kompatibel dengan matrik Al hingga temperatur pemanasan 600°C. Hal ini terbukti karena hingga temperatur tersebut tidak ada reaksi termokimia yang terjadi, tetapi pada temperatur 645,37°C matrik/kelongsong Al telah bereaksi dengan bahan bakar UMo.

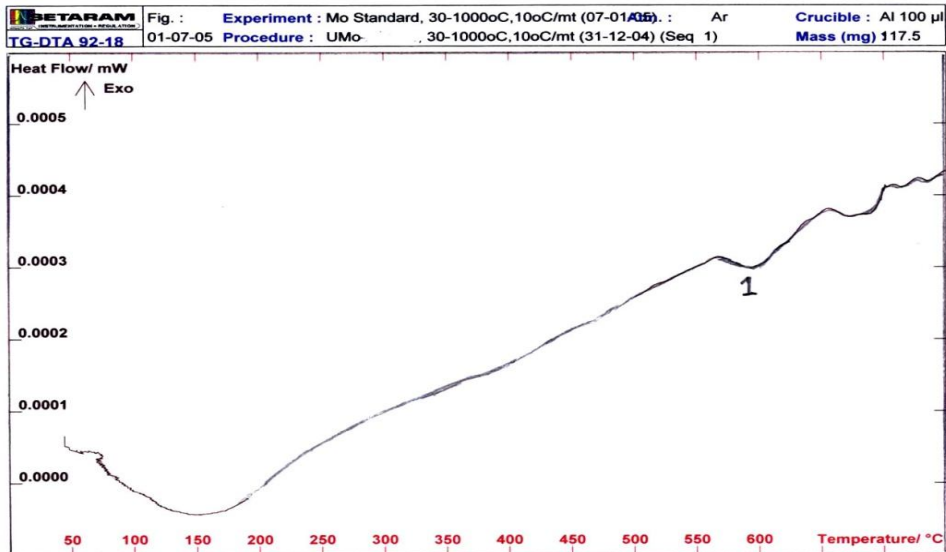


Gambar 1. Reaksi termokimia matriks Al dengan UMo

Data analisis menunjukkan bahwa bahan bakar UMo mengalami reaksi termokimia pada temperatur 645,37°C; 679,14°C dan 1339,11°C dengan besaran entalpi reaksi yang berbeda beda [9]. Peneliti Fliming dan Johnson dari *Oak Ridge Research Reactor* reaksi termokimia yang terjadi pada bahan bakar UMo/Al kemungkinan dengan tahapan reaksi sbb [4]:



Gambar 2. Termogram DTA serbuk Al 99,999%



Gambar 3. Termogram DTA serbuk bahan bakar UMo

Pada temperatur 645,37 °C hingga temperatur 661,28 °C bahan bakar U-7Mo bereaksi dengan matrik Al membutuhkan panas sebesar  $\Delta H = 132,85$  J/g. Fenomena peleburan Al ini diindikasikan dengan terjadinya reaksi termokimia endotermik pada *onset temperature* 645,37°C dan berakhir pada *top temperature* 661,28 °C seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1, puncak 2. Hal tersebut menunjukkan bahwa matrik Al di dalam U-7Mo mulai melebur pada temperatur 645,37 °C dan berakhir pada temperatur 661,28 °C dengan membutuhkan panas sebesar  $\Delta H = 132,85$  J/g.

Reaksi pembentukan senyawa U(Al,Mo)<sub>x</sub> ditunjukkan dengan terjadinya reaksi termokimia eksotermik secara cepat setelah terjadi reaksi peleburan Al. Pembentukan senyawa U(Al,Mo)<sub>x</sub> mulai terjadi pada *onset temperature* 679,14 °C dan berakhir pada *top temperature* 719,20 °C dengan mengeluarkan sejumlah panas sebesar  $\Delta H = 358,64$ J/g seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1, puncak 3. Reaksi termik eksotermik pada puncak 3 terjadi berdekatan dengan puncak endotermik peleburan Al yang terjadi pada puncak 2. Hal ini disebabkan oleh adanya pengikatan atau difusi lelehan Al ke dalam bahan bakar U-7Mo 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 Al<sup>[13]</sup>. Pada Gambar 1, puncak 3 reaksi eksotermik pembentukan senyawa U(Al,Mo)<sub>x</sub> menunjukkan bahwa pemanasan hingga temperatur 719,20 °C membentuk senyawa UAl<sub>x</sub> dan UMo dalam kondisi meta stabil.<sup>[9,10]</sup> Hal ini ditunjukkan oleh fenomena pemanasan lebih lanjut pada temperatur 1339,11 °C sampai dengan 1346,13 °C terjadi reaksi termokimia membentuk puncak endotermik. Fenomena reaksi endotermik tersebut menunjukkan adanya pembentukan senyawa UAl<sub>x</sub> (UAl<sub>4</sub>,

UAl<sub>3</sub> dan UAl<sub>2</sub>) dari senyawa U(Al,Mo)<sub>x</sub> dengan membutuhkan panas sebesar  $\Delta H = 21,14$  J/g seperti yang terlihat pada Gambar 1, puncak 4. Pembentukan senyawa UAl<sub>x</sub> (UAl<sub>4</sub>, UAl<sub>3</sub> dan UAl<sub>2</sub>) terjadi disebabkan oleh pengikatan logam uranium dengan lelehan matrik Al membentuk senyawa tersebut<sup>[9,10]</sup>.

Dari termogram DTA pada Gambar 1, terlihat bahwa pemanasan hingga temperatur 1600 °C bahan bakar UMo/Al tidak mengalami reaksi termokimia lagi karena tidak terjadi perubahan aliran panas (*base line*). Secara keseluruhan fenomena reaksi termokimia matrik Al dengan bahan bakar U-7Mo ditampilkan pada Tabel 1.

#### **b. Reaksi termokimia matrik Al dengan bahan bakar U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>**

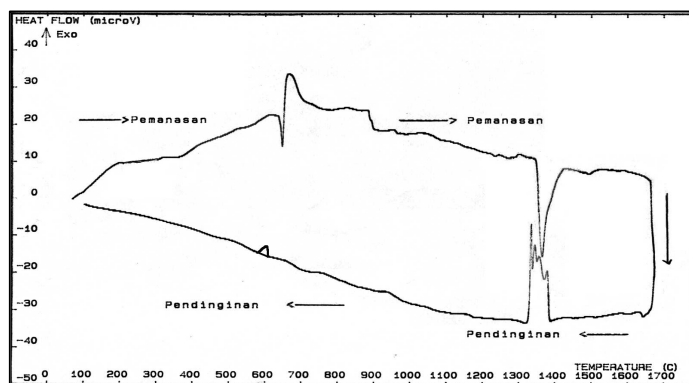
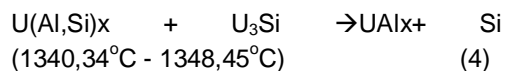
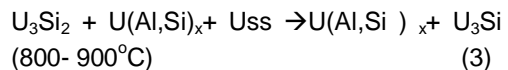
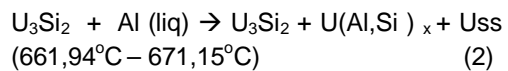
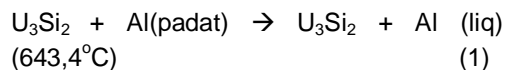
Hasil analisis menunjukkan bahwa bahan bakar U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>/Al cukup stabil terhadap reaksi termokimia pada temperatur dibawah 600 °C. Hal ini terlihat dari termogram DTA bahan bakar U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>/Al yang ditunjukkan pada Gambar 4, dimana tidak terdapat adanya perubahan aliran panas (*heat flow*) dibawah temperatur 600 °C, tetapi pada temperatur 643,4 °C bahan bakar U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>/Al mulai mengalami reaksi termokimia yang ditunjukkan oleh adanya puncak endotermik dengan menyerap panas sebesar  $\Delta H = 292$  J/g. Puncak endotermik tersebut menunjukkan terjadinya peleburan matrik Al yang diikuti oleh suatu puncak eksotermik pada temperatur 661,94 °C. Puncak eksotermik pada temperatur 661,94 °C menunjukkan terjadinya reaksi termokimia antara lelehan matrik Al dengan bahan bakar U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> membentuk senyawa U(Al,Si)<sub>x</sub> dan mengeluarkan panas sebesar  $\Delta H=163,48$  J/g. Terjadinya reaksi termokimia pada puncak eksotermik yang berdekatan dengan puncak endotermik menunjukkan adanya pengikatan atau difusi lelehan Al ke dalam bahan bakar U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> secara cepat. Hal

ini terjadi karena Al yang telah meleleh pada temperatur 633,4 °C mengalami kontak antar muka dengan gaya gerak yang lebih besar sehingga terjadi ikatan intermetalik lelehan Al dengan U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> secara simultan. Pada kisaran temperatur antara 800 °C hingga 900 °C terjadi perubahan fasa dari U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> menjadi U<sub>3</sub>Si yang ditunjukkan adanya perubahan aliran panas (*base line*) bahan bakar U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>-Al seperti pada termogram DTA, Gambar 4. Hal ini terjadi karena adanya reaksi antara U bebas dengan partikel U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> membentuk U<sub>3</sub>Si<sup>[10,11]</sup>, sedangkan pada temperatur 1348,43 °C terjadi perubahan aliran panas yang ditandai oleh puncak endotermik dengan menyerap panas sebesar ΔH = 286,17 J/g. Reaksi termokimia membentuk puncak endotermik pada temperatur 1348,43 °C menunjukkan terjadinya pembentukan senyawa UAl<sub>x</sub> dan peleburan unsur Si yang disebabkan oleh pecahnya ikatan senyawa U(Al,Si)<sub>3</sub>. Pembentukan senyawa UAl<sub>x</sub> sangat dipengaruhi oleh temperatur, waktu, kandungan Al dan uranium dalam bahan bakar tersebut<sup>[10,11,12]</sup>. Hasil analisis dengan menggunakan XRD yang dilakukan pada penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa senyawa yang terjadi pada pemanasan sampai dengan 1600 °C dengan kecepatan pemanasan 10 °C/menit adalah UAl<sub>2</sub>, UAl<sub>3</sub>, UAl<sub>4</sub> dan Si bebas<sup>[9]</sup>. Terbentuknya senyawa baru ini tidak dikehendaki dalam bahan bakar

karena akan mempengaruhi unjuk kerja di dalam reaktor.

Pada proses pendinginan, bahan bakar U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>/Al diperoleh dua puncak eksotermik yaitu pada temperatur 1410 °C dan 610 °C. Hal ini menunjukkan bahwa pada proses pendinginan masih terjadi reaksi termokimia yaitu proses solidifikasi yang reversibel dengan reaksi pembentukan senyawa UAl<sub>x</sub> dan peleburan Si. Hal ini disebabkan karena di dalam bahan bakar U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>/Al tingkat muat uranium 2,9 g/cm<sup>3</sup> mengandung matrik Al lebih besar dibanding dengan tingkat muat uranium lainnya. Dari termogram DTA pada Gambar 4, pemanasan hingga temperatur 1600 °C bahan bakar U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>/Al tidak mengalami reaksi termokimia karena tidak terjadi perubahan aliran panas (*baseline*).

Menurut Domagala dari ANL (*Argon National Laboratory*) reaksi termokimia bahan bakar U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>/Al yang dilakukan dengan DTA diperoleh tahapan reaksi termokimia sbb<sup>[11,12,13]</sup>:



Gambar 4. Reaksi termokimia matrik Al dengan U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>

Tabel 1. Reaksi termokimia matrik Al dengan bahan bakar UMo maupun  $U_3Si_2$ 

Bahan Bakar	Temperatur (°C)	Fenomena	Entalpy(J/g)
UMo	580,16	Perubahan fasa $\alpha + \delta \rightarrow \alpha + \gamma$	-
	645,37 - 661,28	Peleburan matrik Al	132,85
	679,14 – 719,20	Reaksi lelehan matrik Al dengan UMo membentuk $U(Al,Mo)_x$	358,64
	1339,11 – 1346,13	Pembentukan senyawa $UAl_x + Mo$	21,14
$U_3Si_2$	hingga 600	Stabil terhadap termal	-
	643,4- 661,94	Peleburan matrik Al	292
	661,94 – 671,15	Reaksi lelehan matrik Al dengan $U_3Si_2$ membentuk $U(Al,Si)_x$	163,48
	800 - 900	Perubahan fasa $U_3Si_2 \rightarrow U_3Si$	-
	1340,43-1348,45	Pembentukan senyawa $UAl_x + Si$	286,17
	1420,45-1600	Tidak ada reaksi termokimia	-

Bila dievaluasi hasil analisis kompatibilitas matrik Al dengan bahan bakar UMo pada kandungan 7% Mo dan dibandingkan dengan analisis terhadap bahan bakar  $U_3Si_2/Al$  dapat dinyatakan bahwa kedua bahan bakar tersebut sangat kompatibel dengan matrik Al hingga temperature 600 °C. Bahan bakar UMo/Al mulai berinteraksi dengan matrik Al sekitar temperatur 645,37 °C dan bahan bakar  $U_3Si_2/Al$  pada temperatur 6443,4 °C. Fenomena reaksi termokimia yang terjadi antara matrik Al dengan bahan bakar UMo maupun  $U_3Si_2$  dituangkan pada Tabel 1.

## SIMPULAN

Bahan bakar jenis UMo dan  $U_3Si_2$  kompatibel dengan matrik Al hingga temperature 600 °C. Di atas temperatur tersebut bahan bakar UMo telah berinteraksi dengan matrik Al membentuk senyawa  $U(Al,Mo)_x$  dan senyawa  $UAl_x$ , sedangkan bahan bakar  $U_3Si_2$  dengan matrik Al di atas temperatur 600 °C mengalami interaksi dengan menghasilkan senyawa  $U(Al,Si)_x$  dan  $UAl_x + Si$ . Data fenomena reaksi termokimia matrik Al dengan bahan bakar UMo maupun  $U_3Si_2$  menunjukkan bahwa kedua bahan bakar tersebut mempunyai *performance*

yang sama yaitu stabil terhadap panas hingga temperatur 600 °C. Hasil analisis reaksi termokimia dari bahan bakar UMo/Al dan  $U_3Si_2/Al$  belum cukup untuk mengetahui keunggulan dari kedua bahan bakar tersebut sehingga perlu dilakukan penelitian lebih lanjut.

## SARAN

Dalam hal mengetahui dan memahami keunggulan lain bahan bakar UMo/Al dibanding bahan bakar  $U_3Si_2/Al$  maka perlu dilakukan analisis lebih lanjut yaitu karakterisasi sifat mekanik, struktur mikro dan analisis termal lainnya.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1]. M.HUSNA AL HASA, A.SURIPTO. (1999). Karakterisasi Mekanik dan Mikrostruktur UMo Sebagai Kandidat Bahan Bakar Reaktor Riset. Prosiding Persentasi Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir V, Jakarta.
- [2]. T.C. WIENCEK AND I.G.PROKOFIEV. (2000). Low-Enriched Uranium-Molybdenum Fuel Plate Development.



- RERTR, Las Vegas, Nevada on October.
- [3]. KI HWAN KIM et.al. (1996). Development of High Loading Alloy Fuel by Centrifugal Atomization. RERTR, Korea.
- [4]. A.E.PASTO, G.L.COPELAND AND M.M.MATIN. (1992). Quantitative Differential Thermal Analysis Study of the UMo/Al Thermite Reaction. Oak Ridge National Lab, Vol 61, No.4.
- [5]. G.L .COPELAND and J.L. SNELGROVE. (1987). Examination of Irradiation High U-Loaded U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>-Al fuels Plates. Proceeding of the International Meeting on Research and Test Reactor Core Conversations from HEU to LEU Fuels, ANL-USA.
- [6]. F.B.VAZ DE OLIVEIRA, et.al. (2007). Powder Formation of  $\gamma$ -Uranium-Molybdenum Alloys Via Hydration-Dehydration. RERTR, Czech Republic, September 23-27.
- [7]. ANONYMOUS. (1992). Manual Operation for Differential Thermal Analyzer Type 92. SETARAM. France.
- [8]. T.B.MASSALSKI. (1992). Binary Alloy Phase Diagrams. Second Edition Volume 3, USA.
- [9]. CHANG-KYU KIM et.al. (1999). An Investigation on  $\gamma$ -U Phase stability and Thermal Compatibility of dispersion Fuel Meats Prepared with Atomized U-16 at.%Mo, U-14at.%Moat-2at.%Ru and U-14at.%Mo-2at%Os. RERTR, AEKI Hungary, October 4.
- [10]. A. BR GINTING. (1998). Perbedaan Reaksi Termokimia Bahan Bakar U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>-Al Dengan U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>-Al. Prosiding Pertemuan Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan Dan Teknologi Nuklir, Yogyakarta.
- [11]. R.F DOMAGALA, T.C.WINCEK, J.L. SNELGROVE, M.I.HOMA and R.R. HEINRICH. (1992). DTA Study of U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> - Al and U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> - Al Reactions. IAEA - TECDOC - 643(4).
- [12]. J.L. SNEGROVE, R.F.DOMAGALA, G.L.HOFMAN, T.C.WINCEK, G.L. COPELAND, R.W.HOBBS and R.L.SENN. (1987). The Use of U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> Dispersed Al in Plate Type Fuel Elements for Research and Test Reaktor. ANL / RERTR /TM -11.
- [13]. CHANG-KYU RHEE, SU-II PYUN and II-HIUN KUK. (1991). Phase Formation and Growth at Interface Between U<sub>3</sub>Si and Aluminium. Korea Atomic Energy Institute, Daejon 305-606, Korea.