

PENGARUH KANDUNGAN MOLIBDENUM TERHADAP PERUBAHAN FASA DAN KAPASITAS PANAS INGOT PADUAN UMo

Aslina Br.Ginting⁽¹⁾, Supardjo⁽¹⁾, Agoeng Kadarjono⁽¹⁾, Dian Anggraini⁽¹⁾

1.Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir (PTBN)–BATAN,
Kawasan Puspiptek, Serpong, Tangerang Selatan 15314

Email : aslina@ batan go.id

(Naskah diterima : 05-04-2011, disetujui : 03-05-2011)

ABSTRAK

PENGARUH KANDUNGAN MOLIBDENUM TERHADAP PERUBAHAN FASA DAN KAPASITAS PANAS INgot PADUAN UMo. Telah dilakukan analisis perubahan fasa dan kapasitas panas terhadap paduan UMo variasi 7%Mo, 8%Mo dan 9%Mo. Analisis perubahan fasa dilakukan menggunakan *Differential Thermal Analysis* (DTA) pada temperatur antara 30°C hingga 1400°C dengan kecepatan pemanasan 10°C/menit dan analisis kapasitas panas dilakukan menggunakan *Differential Scanning Calorimetry* (DSC) pada temperatur antara 30°C hingga 450°C dengan kecepatan pemanasan 5°C/menit. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui karakter paduan UMo antara lain perubahan fasa dan kapasitas panas dengan variasi kandungan Mo karena kenaikan kandungan Mo diduga akan mengubah kedua karakter paduan U7%Mo, U-8%Mo dan U-9%. Hasil analisis menunjukkan bahwa paduan 7%Mo, 8%Mo dan 9%Mo mengalami perubahan fasa $\alpha + \delta$ menjadi fasa $\alpha + \beta$ pada temperatur 578,63°C hingga 580,16°C. Pada temperatur 606,50°C hingga 627,58°C mengalami perubahan fasa dari $\alpha + \beta$ menjadi $\beta + \gamma$ yang diikuti dengan reaksi endotermik pada kandungan 9%Mo dengan entalpi $\Delta H = 6,5989$ J/g. Pada temperatur 1075,45°C hingga 1160,51°C terjadi perubahan fasa $\beta + \gamma$ menjadi fasa γ . Kenaikan kandungan Mo hingga pemanasan pada temperatur 1100°C tidak menyebabkan perubahan fasa yang signifikan. Pada temperatur diatas 1177,21°C, kenaikan kandungan Mo menyebabkan terjadinya perubahan fasa dari γ membentuk fasa L+ γ yang diikuti reaksi antara uranium dengan Mo membentuk fasa γ - larutan padat (solid solution). Semakin tinggi kandungan Mo, panas reaksi yang dibutuhkan dan dilepaskan semakin besar. Hasil analisis kapasitas panas diperoleh bahwa kenaikan kandungan Mo dalam paduan U-7%Mo, U-8%Mo, dan U-9%Mo tidak memberikan perbedaan kapasitas panas yang signifikan. Hal ini di buktikan dengan melakukan uji beda (uji F) pada derajat kepercayaan 95%. Hasil Penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai langkah awal untuk mempelajari pembuatan paduan UMo sebagai bahan bakar reaktor riset densitas uranium tinggi.

Kata kunci : Bahan bakar dispersi, paduan UMo, reaktor riset

ABSTRACT

THE EFFECT OF MOLYBDENUM CONTENT WITH CHANGES IN PHASE AND HEAT CAPACITY OF UMo ALLOY. Has done the analysis of phase and heat capacity change of the UMo alloy by

variation of 7% Mo, 8% and 9% Mo. Analysis performed using phase change Differential Thermal Analysis (DTA) at a temperature between 30°C until 1400°C with heating rate 10°C/menit and heat capacity analysis carried out using Differential Scanning Calorimetry (DSC) at a temperature between 30°C to 450°C with heating rate 5°C/menit. The purpose of this study was to determine the character of the UMo alloy include phase change and heat capacity variation with Mo content due to higher content of Mo is expected to change both the character U-7% Mo alloy, U-8% Mo and U-9% Mo. The analysis showed that of 7% Mo, 8% Mo and 9% Mo the combination experiencing $\alpha + \delta$ a phase change becomes $\alpha + \beta$ phase at temperatures of 578.63°C to 580.16°C. At the temperature 606.50°C to 627.58°C having a phase change of $\alpha + \beta$ to $\beta + \gamma$ be followed by the endothermic reaction in the content of 9% Mo with the enthalpy $\Delta H = 6.5989 \text{ J / g}$. At temperatures 1075.45 oC up to 1160.51 oC phase change $\beta + \gamma$ into γ phase. The increase in Mo content to heating at a temperature 1100°C not cause a significant phase change. At temperatures above 1177.21°C, the increase in Mo content leads to changes in the γ phase of forming L + γ phase which followed the reaction of uranium with Mo to form γ phase - solid solution. The higher content of Mo, the reaction heat is needed and released the greater. The results of the analysis of the heat capacity is obtained that the increase in Mo content in the U-7% Mo, U-8% Mo, and U-9% Mo alloy does not give a significant difference in heat capacity. This is attested by doing different test (F test) at 95% degree of confidence. This data is expected to be as a first step to study the manufacture of UMo alloy as a fuel of high uranium density for research reactor.

Key words: dispersion fuel, UMo alloy, research reactor

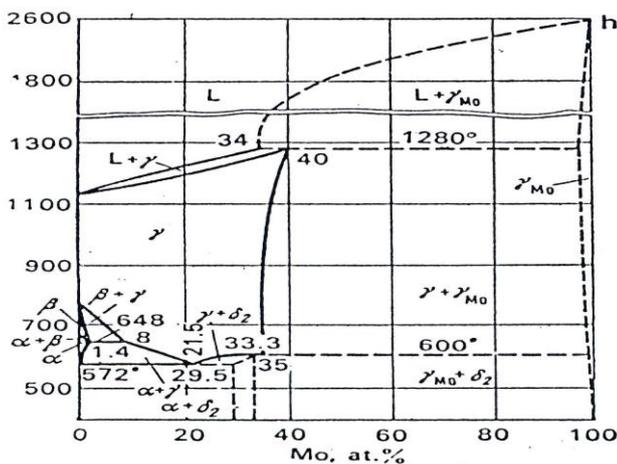
PENDAHULUAN

Reaktor riset G.A. Siwabessy yang ada di Serpong merupakan reaktor jenis *Material Testing Reactor* (MTR) yang berfungsi untuk memproduksi isotop dan pengujian material. Berdasar desain awal, reaktor ini dioperasikan menggunakan bahan bakar dispersi $\text{U}_3\text{O}_8\text{-Al}$ dengan pengayaan uranium 19,75% U^{235} . Keberhasilan penelitian dan pengembangan bahan bakar $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ di BATAN, maka sejak tahun 2001 semua bahan bakar diteras reaktor RSG-GAS telah berhasil digantikan bahan bakar $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ dengan pengayaan sama seperti bahan bakar $\text{U}_3\text{O}_8\text{-Al}$ dan densitas uranium 2,96g U/cm^3 . Bahan bakar dispersi $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ dibuat dengan cara memadukan uranium dengan unsur silikon menjadi senyawa U_3Si_2 dan didispersikan ke dalam serbuk matriks aluminium (Al). Bahan bakar $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ ini memiliki stabilitas yang tinggi selama digunakan sebagai bahan bakar di dalam reaktor, namun densitas uranium yang dapat dicapai maksimum hanya sekitar 4,8g U/cm^3 ,

sehingga umur ekonomi bahan bakar di dalam reaktor sangat pendek. Selain itu olah ulang bahan bakar $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ sangat sulit, sehingga menjadi masalah dalam penyimpanannya. Mengingat bahan bakar paduan U_3Si_2 ini banyak digunakan di reaktor riset di dunia, maka para peneliti berlomba untuk mencari paduan uranium dengan logam lain yang memiliki densitas uranium tinggi, sehingga umur ekonomi bahan bakar di dalam teras reaktor menjadi lebih panjang. Penelitian dan pengembangan bahan bakar reaktor riset berbasis U-Mo dengan pengayaan uranium < 20% U^{235} merupakan program internasional dalam memenuhi densitas uranium antara 8 – 9 g U/cm^3 ^[1].

Paduan UMo adalah sistem biner dengan diagram fasa seperti ditunjukkan Gambar 1. Sifat paduan UMo adalah ulet dan memiliki struktur kristal bcc fasa γ , tampang lintang serapan neutron Mo rendah, tahan terhadap korosi dan berat jenis $\pm 16,4 \text{ g}/\text{cm}^3$ (nilai berat jenis tergantung % Mo). Berat jenis tersebut lebih tinggi dari berat jenis paduan U_3Si_2 sebesar 12,20 g U/cm^3 yang telah

digunakan sebagai bahan bakar dispersi dengan tingkat muat uranium $4,80 \text{ g/cm}^3$. Menggunakan paduan U-Mo sebagai bahan bakar, tingkat muat uranium dapat ditingkatkan hingga 9 g/cm^3 dan proses olah ulang mudah dilakukan^[1]. Selain itu Mo memiliki tampang lintang serapan neutron relatif rendah. Jika fasa metastable γ dapat dipertahankan selama proses produksi bahan bakar dan iradiasi serta memiliki kompatibilitas termal baik dengan matriks Al, maka paduan UMo cocok untuk digunakan sebagai bahan bakar reaktor riset sekaligus sebagai pengganti bahan bakar U_3O_8 dan U_3Si_2 .



Gambar-1. Diagram fasa paduan U-Mo ^[2]

Berdasarkan informasi ilmiah saat ini 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 karena mempunyai densitas sekitar $18,6 \text{ g/cm}^3$ dibanding bahan bakar U_3Si_2 hanya sekitar $12,2 \text{ g/cm}^3$ ^[3,4], sehingga paduan UMo tersebut dengan mudah dapat dibuat menjadi elemen bakar nuklir dengan tingkat muat uranium lebih besar dari 8 - 9 g U/cm³. Keunggulan lain yang dimiliki paduan UMo adalah mempunyai daerah fasa gamma (γ) relatif besar dan mempunyai kompatibilitas serta stabilitas panas dengan matrik Al relatif baik^[5]. Karena keunggulan yang dimiliki oleh paduan UMo tersebut maka paduan UMo merupakan salah satu kandidat bahan bakar reaktor riset yang sedang trend di dunia untuk mempelajari dan melakukan penelitian dan pengembangan teknologi fabrikasinya maupun penggunaannya di dalam reaktor.

Proses pembuatan ingot paduan UMo dengan kandungan 7%, 8% dan 9% Mo dilakukan dengan teknik peleburan menggunakan tungku busur listrik. Kadar uranium digunakan sebagai dasar untuk perhitungan penyiapan komposisi pada pembuatan paduan U7%Mo, U-8%Mo dan U-9%Mo. Sebelum paduan dibuat, permukaan logam U dibersihkan dengan asam nitrat beberapa saat hingga unsur logam pengotor yang menempel di permukaan terlepas kemudian dinetralkan/dibilas menggunakan air bebas mineral. Logam U dibilas dengan alkohol dan dikeringkan dalam udara terbuka. Pembuatan porsi paduan U-7%Mo, U-8%Mo dan U-9%Mo dilakukan dengan penimbangan yang didasarkan pada perhitungan persen berat unsur logam pepaduan dengan komposisi paduan seperti ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi U dan Mo dalam paduan U-7%Mo, U-8%Mo dan U-9%Mo

Kadar U (%)	Paduan	Berat penimbangan, g	
		U	Mo
99,94%	U7%Mo	20,0515	1,4816
99,94%	U-8%Mo	20,0085	1,7356
99,94%	U-9%Mo	20,0000	21,9760

Perbedaan kandungan Mo dalam paduan UMo tersebut diprediksi mempunyai karakter fasa dan sifat termal yang berbeda. Oleh karena itu pada penelitian ini akan dilakukan analisis perubahan fasa dan perubahan kapasitas panas terhadap logam U, logam Mo dan paduan UMo dengan variasi kandungan 7%, 8% dan 9%Mo .

METODELOGI PENELITIAN

1. Bahan

Logam U, logam Mo dan paduan UMo dengan variasi kandungan Mo (7%, 8%, dan 9%)

2. Peralatan

Differential Thermal Analysis (DTA)

Differential Scanning Calorimeter (DSC)

3. Cara Kerja

a. Pembuatan paduan U-7%Mo, U-8%Mo dan U-9%Mo

Pembuatan paduan U-7%Mo, U-8%Mo dan U-9%Mo dengan menggunakan teknik peleburan tungku busur listrik. Setiap paduan dilebur menggunakan arus 150A selama satu menit di dalam media gas Argon. Peleburan setiap paduan dilakukan lima kali pengulangan agar diperoleh paduan yang homogen. Contoh ingot paduan UMo hasil peleburan ditampilkan pada Gambar 2, terlihat bahwa ukuran paduan mempunyai diameter ± 18 mm dengan ketebalan ± 5 mm dan secara visual berwarna abu-abu mengkilap.



Gambar-2. Paduan UMo hasil peleburan

b. Analisis perubahan fasa dengan DTA

Disiapkan sampel logam U, logam Mo dan ingot paduan UMo dengan kandungan Mo 7%, 8% dan 9%. Pertama dilakukan analisis termal terhadap sampel logam U dengan cara menimbang sampel logam U sebesar 85 mg, kemudian dimasukkan ke dalam krusibel alumina. Selanjutnya krusibel tersebut diletakkan di dalam *chamber DTA rod* untuk divakumkan hingga tekanan 10^{-1} bar. Setelah tercapai kondisi vakum, selanjutnya *chamber DTA rod* dialiri gas argon dengan tekanan 2,5 bar. Analisis fasa logam U dilakukan mulai dari temperatur ruangan hingga mencapai temperatur 1400°C dengan kecepatan pemanasan $10^{\circ}\text{C}/\text{menit}$ (setiap sampel dilakukan 2x pengulangan pengukuran)^[6]. Langkah pengukuran yang dilakukan terhadap sampel logam U, juga diterapkan untuk logam Mo dan ingot paduan UMo dengan kandungan 7% , 8% dan 9% Mo. Hasil analisis DTA berupa termogram puncak endotermik atau eksotermik dievaluasi . Temperatur mulai terbentuknya puncak disebut *onset temperatur* dan titik akhir terbentuknya puncak disebut *top-temperature* menunjukkan terjadinya perubahan fasa atau fenomena peleburan, sedangkan luas puncak yang terbentuk menunjukkan jumlah panas yang dibutuhkan atau dilepaskan atau entalpi^[6].

c. Analisis kapasitas panas dengan menggunakan DSC

Sampel logam U ditimbang seberat 100 mg, kemudian dimasukkan kedalam krusibel aluminium. Selanjutnya krusibel tersebut diletakkan di dalam *chamber DSC rod* untuk divakumkan hingga tekanan 10^{-1} bar. Setelah kondisi vakum tercapai, selanjutnya *chamber DSC rod* dialiri gas argon dengan tekanan 2,5 bar. Analisis kapasitas panas logam U dilakukan dari temperatur ruangan hingga 450°C dengan kecepatan pemanasan $5^{\circ}\text{C}/\text{menit}$ dan setiap sampel dilakukan 3x pengulangan

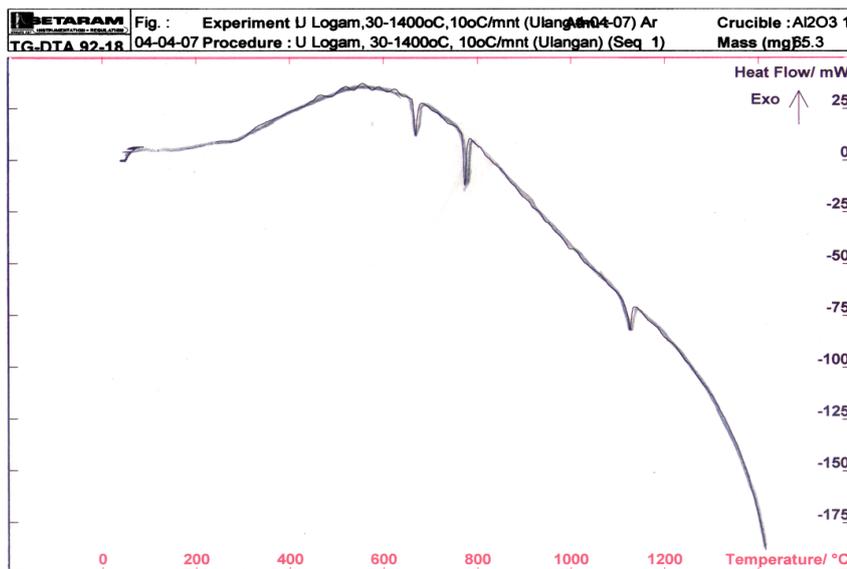
pengukuran^[7]. Langkah pengukuran yang dilakukan terhadap sampel logam U, juga diterapkan untuk logam Mo dan ingot paduan UMo dengan kandungan Mo 7%, 8% dan 9%. Hasil analisis dengan DSC diperoleh data kapasitas panas sebagai fungsi temperatur.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Pengaruh kandungan Mo terhadap komposisi fasa

Analisis fasa telah dilakukan terhadap U logam, serbuk Mo dan paduan ingot UMo dengan kandungan Mo 7%, 8% dan 9%. Hasil analisis fasa dengan DTA menunjukkan bahwa logam uranium mengalami perubahan

fasa sebanyak tiga tahap yaitu pada temperatur 667,16°C; 773,05 °C dan 1125,26 °C seperti yang terlihat pada Gambar 3. Perubahan aliran panas (*heat flow*) pada rentang temperatur tersebut menunjukkan terjadi perubahan fasa α menjadi fasa β dengan entalpi yang dibutuhkan sebesar 9,7203 J/g, pada temperatur 773,05°C mengalami perubahan fasa β menjadi fasa γ dengan panas yang dibutuhkan sebesar 12,0645 J/g serta pada temperatur 1125,26 °C logam uranium tersebut mengalami peleburan menjadi cair dengan panas yang dibutuhkan sebesar 8,9527 J/g. Hasil ini sesuai dengan diagram fasa dan sifat sifat fisis uranium^[8]



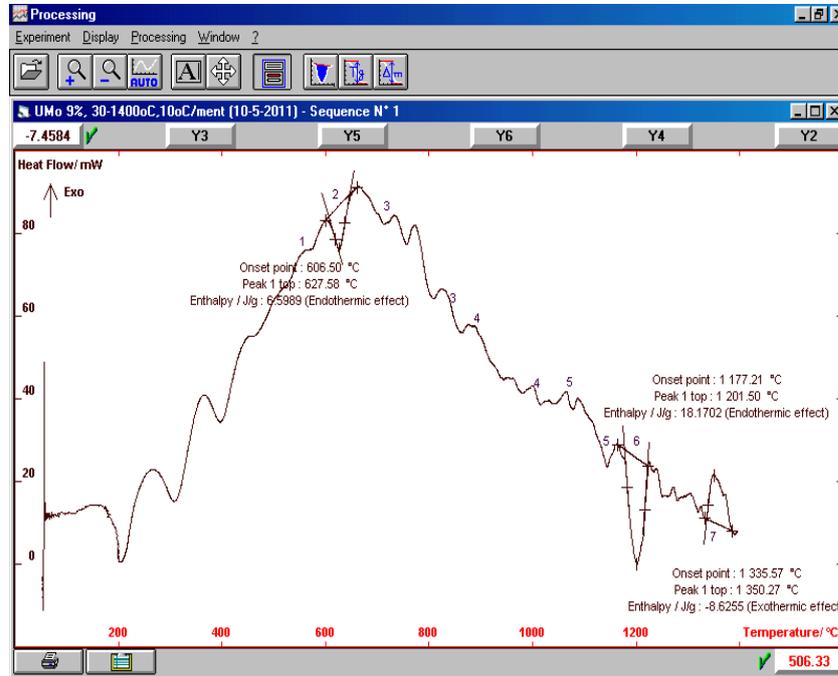
Gambar-3. Termogram DTA logam uranium

Hasil analisis fasa paduan ingot U-9%Mo hingga temperatur 1400°C dengan kecepatan pemanasan 10°C/menit menunjukkan terjadinya beberapa perubahan fasa seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Pada temperatur 578,63°C terjadi perubahan fasa dari $\alpha + \delta$ menjadi fasa $\alpha + \beta$ ^[1,9]. Perubahan fasa ini ditunjukkan dengan adanya perubahan *base line* aliran panas dari

pengukuran pada temperatur 578,63°C seperti yang terlihat pada puncak 1 Gambar-4. Fenomena ini sesuai dengan diagram fasa UMo dimana pada temperatur 572°C terbentuk fasa $\alpha + \beta$ seperti yang ditunjukkan pada Gambar-4. Pada temperatur 606,50°C hingga 627,58°C terjadi perubahan *base line* aliran panas membentuk puncak endotermik dengan membutuhkan panas reaksi (entalpi)

sebesar $\Delta H = 6,5989$ J/g. Fenomena reaksi termokimia pada temperatur ini menunjukkan terjadinya perubahan fasa $\alpha + \beta$ menjadi fasa

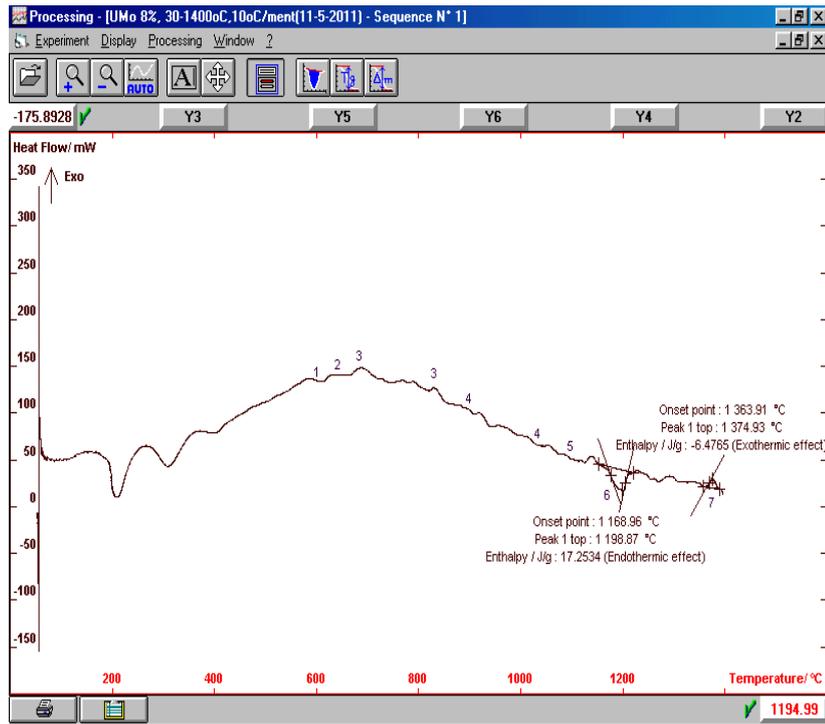
$\alpha + \gamma$ seperti yang terlihat pada puncak 2 Gambar 4. Hal ini didukung oleh data diagram fasa paduan UMo pada Gambar 1.



Gambar-4. Termogram DTA ingot paduan U-9%Mo

Pada temperatur $700,76^{\circ}\text{C}$ hingga $885,81^{\circ}\text{C}$ terjadi perubahan fasa dari $\alpha + \beta$ menjadi $\beta + \gamma$ seperti yang ditunjukkan puncak 3 pada Gambar 4, sedangkan pada puncak 4 dan 5 terjadi perubahan aliran panas (*heat flow*) pada temperatur $1075,45^{\circ}\text{C}$ hingga $1160,51^{\circ}\text{C}$ yang menunjukkan terjadinya perubahan fasa dari $\beta + \gamma$ menjadi γ . Pada temperatur $1177,21^{\circ}\text{C}$ hingga $1201,43^{\circ}\text{C}$ terjadi perubahan fasa dari γ membentuk fasa L+ γ . Terbentuknya fasa ini ditunjukkan oleh terjadinya reaksi termokimia endotermik pada

puncak 6 dengan membutuhkan panas reaksi (entalpi) sebesar $\Delta H = 18,1702$ J/g. Fenomena reaksi termokimia ini berlangsung hingga terjadi interaksi antara uranium dengan molybdenum mengikuti reaksi peritektik membentuk fasa γ -larutan padat (*solid solution*) pada uranium dan molybdenum^[10]. Reaksi peritektik ini terjadi pada temperatur $1335,57^{\circ}\text{C}$ hingga $1350,27^{\circ}\text{C}$ yang ditunjukkan dengan adanya reaksi termokimia eksotermik pada puncak 7 dengan mengeluarkan panas sebesar $\Delta H = -8,6255$ J/g.



Gambar-5. Termogram DTA ingot paduan U-8%Mo

Hasil analisis perubahan fasa ingot paduan U-8%Mo menunjukkan adanya perbedaan fenomena reaksi perubahan fasa dengan ingot paduan U-9%Mo. Perbedaan reaksi termokimia terjadi pada puncak 2, 6 dan puncak 7 pada Gambar 5. Pada Gambar 5 puncak 2 dapat diamati bahwa terjadinya perubahan fasa $\alpha + \beta$ menjadi fasa $\alpha + \gamma$ tidak diikuti dengan reaksi termokimia endotermik seperti yang terjadi pada reaksi perubahan fasa pada paduan U-9%Mo (puncak 2 Gambar 3). Hal ini disebabkan karena kandungan Mo sebesar 8% tidak cukup untuk melakukan reaksi endotermik tersebut, tetapi hanya cukup untuk proses perubahan fasa saja, sedangkan kandungan Mo 9% mempunyai Mo berlebih sehingga untuk melakukan perubahan fasa dibutuhkan panas sebesar $\Delta H = 6,5989$ J/g.

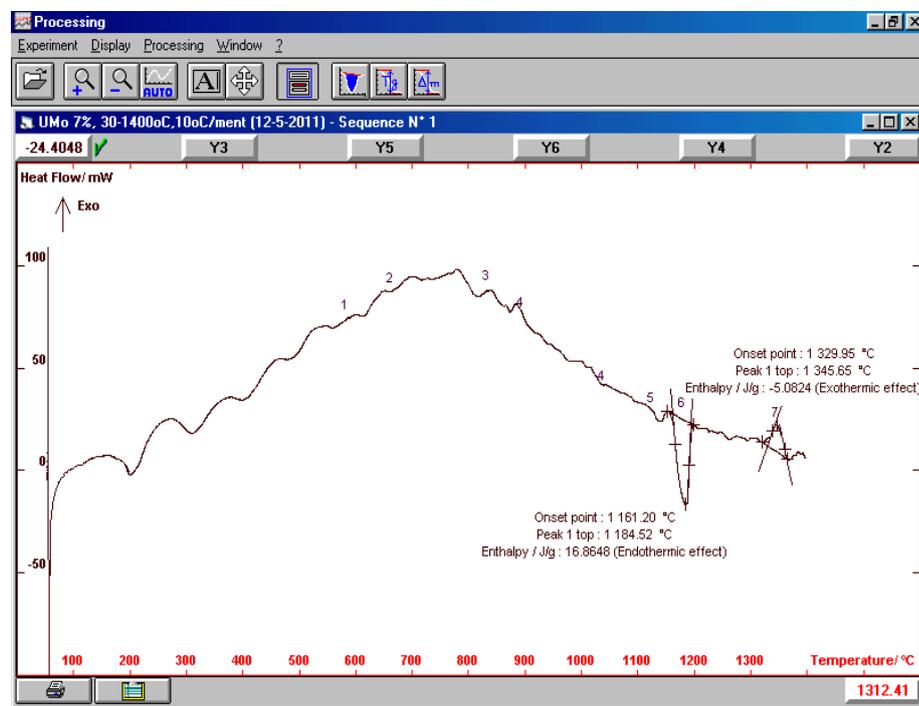
Pada Gambar 5 puncak 6, ingot paduan U-8% Mo mengalami reaksi termokimia pada temperatur 1168,90°C hingga 1198,87°C yang menunjukkan terjadinya pembentukan fasa dari γ menjadi fasa L+ γ dengan membutuhkan panas sebesar

$\Delta H = 17,2534$ J/g. Interaksi antara uranium dengan molybdenum untuk membentuk fasa γ - larutan padat (solid solution) uranium dan molybdenum pada puncak 7 terjadi pada temperatur 1363,91°C hingga 1374,93°C yang ditunjukkan dengan adanya reaksi termokimia eksotermik pada puncak 7 dan mengeluarkan panas sebesar $\Delta H = - 6,4768$ J/g.

Hasil analisis perubahan fasa paduan U-7%Mo menunjukkan adanya persamaan dengan fenomena reaksi perubahan fasa ingot paduan U-8% Mo seperti yang terlihat pada Gambar 6. Pada temperatur 578,63°C terjadi perubahan fasa dari $\alpha + \delta$ menjadi fasa $\alpha + \beta$ ^[9]. Perubahan fasa ini ditunjukkan dengan adanya perubahan *base line* aliran panas termogram DTA pada temperatur 578,63°C seperti yang terlihat pada puncak 1 Gambar-6. Pada temperatur 606,50°C hingga 627,58°C terjadi perubahan fasa $\alpha + \beta$ menjadi fasa $\alpha + \gamma$ seperti yang terlihat pada puncak 2 Gambar 6. Pada temperatur 700,76°C hingga 885,81°C terjadi perubahan fasa dari $\alpha + \beta$ menjadi $\beta + \gamma$ seperti yang ditunjukkan pada puncak 3

Gambar 6, sedangkan pada puncak 4 dan 5 terjadi perubahan aliran panas (*heat flow*) pada temperatur 1075,45°C hingga 1160,51°C yang menunjukkan terjadinya perubahan fasa dari $\beta + \gamma$ menjadi fasa γ . Pada temperatur 1161,20°C hingga 1184,52°C terjadi perubahan fasa dari γ membentuk fasa L+ γ . Terbentuknya fasa ini ditunjukkan oleh terjadinya reaksi termokimia endotermik pada puncak 6 yang membutuhkan panas reaksi (entalpi) sebesar $\Delta H=16,8648$ J/g. Fenomena reaksi termokimia ini berlangsung hingga

terjadi interaksi antara uranium dengan molybdenum mengikuti reaksi peritektik membentuk fasa γ - larutan padat (solid solution) uranium dan molybdenum. Reaksi peritektik ini terjadi pada temperatur 1329,95°C hingga 1345,65°C yang ditunjukkan dengan adanya reaksi termokimia eksotermik pada puncak 7 dengan mengeluarkan panas sebesar $\Delta H= - 5,0824$ J/g.



Gambar-6. Termogram DTA ingot paduan U-7%Mo

Dari fenomena perubahan fasa yang terjadi pada paduan UMo dapat diketahui bahwa kenaikan kandungan Mo hingga temperatur 1100°C tidak menyebabkan perubahan fasa yang signifikan. Pada temperatur diatas 1177,21°C, kenaikan kandungan Mo menyebabkan terjadinya reaksi termokimia perubahan fasa dari γ membentuk fasa L+ γ yang diikuti reaksi antara uranium

dengan molybdenum membentuk fasa γ - larutan padat (solid solution)^[9]. Semakin besar kandungan Mo, maka reaksi termokimia endotermik maupun reaksi eksotermik yang terjadi semakin besar pula. Secara sistematis terjadinya perubahan fasa hingga temperatur 1400°C terhadap ingot paduan U-7%Mo, U-8%Mo dan U-9%Mo ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Perubahan fasa paduan UMo pada temperatur ruangan hingga 1400°C

Rentang Temperatur (°C)	Perubahan Fasa		
	U-7%Mo	U-8%Mo	U-9%Mo
≤ 500	$\alpha + \delta$	$\alpha + \delta$	$\alpha + \delta$
578,63	$\alpha + \gamma$	$\alpha + \gamma$	$\alpha + \gamma$
606,50 - 627,58	$\alpha + \beta$	$\alpha + \beta$	$\alpha + \beta$ ($\Delta H = 6,5989$ J/g)
700,76 - 885,81	$\beta + \gamma$	$\beta + \gamma$	$\beta + \gamma$
1075,45-1160,51	$\beta + \gamma \rightarrow \gamma$	$\beta + \gamma \rightarrow \gamma$	$\beta + \gamma \rightarrow \gamma$
1177,21-1201,43	$\gamma \rightarrow L + \gamma$ ($\Delta H = 16,8648$ J/g)	$\gamma \rightarrow L + \gamma$ ($\Delta H = 17,2534$ J/g)	$\gamma \rightarrow L + \gamma$ ($\Delta H = 18,1702$ J/g)
1335,57-1350,27	fasa γ - larutan padat ($\Delta H = -5,0824$ J/g)	fasa γ - larutan padat ($\Delta H = -6,4768$ J/g)	fasa γ - larutan padat ($\Delta H = -8,6255$ J/g)

2. Analisis kapasitas panas

Data pengujian kapasitas panas paduan U-7%Mo, U-8%Mo, dan U-9%Mo menggunakan DSC yang dilakukan pada temperatur 25°C sampai 450°C dengan kecepatan pemanasan 5°C/menit ditunjukkan pada Tabel 3. Hasil analisis menunjukkan bahwa semakin besar kandungan Mo dalam paduan UMo, kapasitas panas paduan UMo semakin besar. Data pengukuran tersebut didukung oleh besaran kapasitas panas uranium maupun molibdenum dari literatur dengan persamaan kapasitas panas uranium adalah $C_p U = 6,64 \text{ cal/}^\circ\text{C mol}$ atau $0,1172 \text{ J/g}^\circ\text{C}$ dan persamaan kapasitas panas molybdenum adalah $C_p Mo = 5,69 + 0,001887T - 5,0300/T^2 \text{ cal/mol } ^\circ\text{C}$ atau $0,2506 \text{ J/g}^\circ\text{C}^{[perry]}$. Dari persamaan tersebut diketahui bahwa kapasitas panas uranium lebih kecil dari molibdenum, sehingga besaran kapasitas panas hasil pengukuran paduan UMo

dominan dipengaruhi kandungan Mo. Kenaikan kandungan Mo dalam paduan UMo, maka kapasitas panas paduan tersebut semakin besar, namun kapasitas panas dari ketiga paduan tersebut tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Hal ini di buktikan dengan melakukan uji beda (uji F) terhadap paduan U-7%Mo, U-8%Mo, dan U-9%Mo. Uji F dilakukan terhadap kapasitas panas U-7% Mo dibanding kapasitas panas U-8%Mo dengan hasil sebesar 0.7069 dan uji F kapasitas panas paduan U-8%Mo dibanding kapasitas panas U-9%Mo dengan hasil sebesar 0.8991. Hasil uji F kapasitas panas dari pengukuran dibandingkan dengan uji F dari Tabel ANOVA^[11] pada derajat kepercayaan $\alpha = 0,05$ sebesar 3,49, sehingga diperoleh nilai uji F pengukuran < F Tabel dan dapat dinyatakan bahwa paduan UMo dengan variasi kandungan 7%, 8% dan 9% Mo tidak mempunyai perbedaan kapasitas panas yang signifikan.

Tabel 3. Data uji kapasitas panas paduan UMo menggunakan DSC

Temperatur (°C)	Cp (J/g°C)		
	U-7%Mo	U-8%Mo	U-9%Mo
34.39	0.06	0.07	0.07
54.76	0.08	0.08	0.09
75.02	0.09	0.09	0.10
95.31	0.09	0.10	0.11
115.46	0.13	0.12	0.14
135.58	0.15	0.12	0.16
155.8	0.14	0.13	0.15
175.94	0.13	0.13	0.15
196.04	0.12	0.14	0.14
216.14	0.12	0.14	0.14
236.36	0.12	0.15	0.15
256.5	0.13	0.16	0.15
276.57	0.13	0.16	0.16
296.67	0.12	0.16	0.16
316.78	0.11	0.15	0.16
336.9	0.11	0.14	0.16
356.97	0.11	0.14	0.17
377.09	0.11	0.15	0.18
397.04	0.11	0.17	0.19
417.13	0.12	0.18	0.19
437.25	0.15	0.16	0.19
SD	0.0220	0.0262	0.0276

SIMPULAN

Pemanasan paduan UMo hingga temperatur 1100°C dengan perbedaan kadar Mo tidak menyebabkan perubahan fasa yang signifikan. Pada temperatur diatas 1177,21°C, kenaikan kandungan Mo menyebabkan terjadinya perubahan fasa dari γ membentuk fasa L+ γ yang diikuti reaksi antara uranium dengan molybdenum membentuk fasa γ - larutan padat (*solid solution*). Semakin besar kandungan Mo, panas reaksi yang dibutuhkan dan yang dilepaskan semakin besar juga. Demikian juga dengan kenaikan kandungan Mo dalam paduan U-7%Mo, U-8%Mo, dan U-9%Mo tidak

mempunyai perbedaan kapasitas panas yang signifikan. Hal ini dibuktikan dengan melakukan uji beda (uji F) pada derajat kepercayaan 95%.

SARAN

Dalam hal untuk mengetahui komposisi fasa secara kuantitatif sebaiknya analisis perubahan fasa paduan UMo dilakukan dengan menggunakan alat XRD, dan untuk memahami keunggulan lain bahan bakar UMo-Al masih perlu dilakukan analisis lebih lanjut yaitu karakterisasi sifat mekanik, strukturmikro dan analisis lainnya.

DAFTAR PUSATAKA

- [1]. JM.HAMY et.al, (2002), "Status as of March 2002 of The UMo Development Program", 6th International Topical meeting on Research Reactor Fuel Management, Belgium ,March 17 to 20.
- [2]. OS INANOV, (1983) " Phase Diagrams of Uranium Alloys" Amerind Publishing Co.PVT.LYD,New Delhi-Bombay – Calcutta- New York.
- [3]. R.F DOMAGALA, T.C.WINCEK, J.L. SNELGROVE, M.I.HOMA and R.R. HEINRICHh, (1992) "DTA Study of U₃Si₂ - Al and U₃Si₂ - Al Reactions", IAEA - TECDOC - 643(4).
- [4]. SNEGROVE, J.L., DOMAGALA, R.F., HOFMAN, G.L., WINCEK, T.C., COPELAND, G.L., HOBBS R.W., and SENN , R.L., 1987, "The Use of U₃Si₂ Dispersed Al in Plate Type Fuel Elements for Research and Test Reaktor", ANL / RERTR /TM -11.
- [4]. M.HUSNA ALHASA, ASMEDI SURIPTO,(1999)," Karakterisasi Mekanik dan Mikrostruktur UMo Sebagai Kandidat Bahan Bakar Reaktor Riset" Prosiding Persentasi Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir V, Jakarta.

-
- [5]. SETARAM,(1992),” Manual Operation for Differential Thermal Analyzer Type 92”, France.
- [6]. SETARAM,(1992),” Manual Operation for Differential Scanning Calorimetry Type 92”, France.
- [7]. ASLINA BR GINTING, (1998), Perbedaan Reaksi Termokimia Bahan Bakar U_3O_8 -Al Dengan U_3Si_2 -Al, ”Prosiding Pertemuan Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan Dan Teknologi Nuklir”, Yogyakarta, 26-27 Mei.
- [8]. CHANG-KYU RHEE, SU-II PYUN and II-HIUN KUK ,(1991), ”Phase Formation and Growth at Interface Bitween U_3Si and Aluminium” Korea Atomic Energy Institute, Daejon 305-606, Korea.
- [9]. THADDEUS B. MASSAL SKI, (1992), ”Binary Alloy Phase Diagrams” Second Edition, Volume 3, USA.
- [10]. ROBERT .ANDERSON, (1997), ”Practical Statistics for Analytical Chemists” Van Nostrand Reinhold Company, New York.