

Urania

Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir

Beranda jurnal: <http://jurnal.batan.go.id/index.php/urania/>



KARAKTERISASI TERMAL PELAT ELEMEN BAKAR U-7Mo/Al SEBAGAI BAHAN BAKAR REAKTOR RISET

Sayyidatun Nisa¹, Ariyanti Saputri¹, Sutri Indaryati¹, Novarty¹,
Supardjo¹, Aslina Br. Ginting¹

¹Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir Bahan Bakar Nuklir – BATAN
Kawasan PUSPIPTEK Serpong Gd. 65, Tangerang Selatan, Banten 15314
e-mail: nsayyidatun@batan.go.id

(Naskah diterima: 15–04–2021, Naskah direvisi: 20–05–2021, Naskah disetujui: 28–06–2021)

ABSTRAK

KARAKTERISASI TERMAL PELAT ELEMEN BAKAR U-7Mo/Al SEBAGAI BAHAN BAKAR REAKTOR RISET. Bahan bakar berbasis UMo/Al merupakan kandidat bahan bakar reaktor riset dan sebagai alternatif pengganti bahan bakar U_3Si_2/Al . Hal ini disebabkan karena paduan UMo/Al memiliki densitas uranium yang lebih tinggi yaitu sekitar $16,4 \text{ g/cm}^3$ dibandingkan dengan U_3Si_2/Al sebesar $12,2 \text{ g/cm}^3$. Selain itu, paduan UMo mempunyaiampang lintang serapan neutron rendah dan proses olah ulang relatif mudah. Paduan U-7Mo/Al mampu mempertahankan fasa γ -U selama proses iradiasi, sehingga stabilitas bahan bakar di dalam reaktor tetap terjaga. Paduan U-7Mo telah difabrikasi menjadi mini pelat elemen bakar (PEB) U-7Mo/Al. Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui karakteristik termal dari PEB U-7Mo/Al sebagai masukan kepada fabrikator bahan bakar reaktor riset dalam pembuatan bahan bakar berbasis UMo/Al. Karakterisasi termal dilakukan terhadap logam uranium, molybdenum, paduan UMo dan PEB U-7Mo/Al menggunakan *Differential Scanning Calorimetry* (DSC) Setaram. Hasil karakterisasi termal menunjukkan bahwa PEB U-7Mo/Al stabil terhadap termal hingga $600 \text{ }^\circ\text{C}$, karena pada temperatur $632,962 \text{ }^\circ\text{C}$ PEB U-7Mo/Al telah mengalami reaksi termokimia endotermik dengan $\Delta H = 144,318 \text{ J/g}$. Pada $656,186 \text{ }^\circ\text{C}$ terjadi peleburan matriks Al dan kelongsong AlMg₂ dalam PEB U-7Mo/Al dengan $\Delta H = 144,318 \text{ J/g}$. Pada temperatur $952,810 \text{ }^\circ\text{C}$ hingga $1106,050 \text{ }^\circ\text{C}$, lelehan matriks Al berdifusi dengan UMo membentuk senyawa $U(Mo,Al)_x$ metastabil dan pemanasan hingga temperatur hingga $1211,760 \text{ }^\circ\text{C}$ terbentuk *layer* UAl_x (UAl_2 , UAl_3 dan UAl_4) dengan $\Delta H = -22,721 \text{ J/g}$.

Kata kunci: Sifat termal, DSC, PEB UMo/Al, reaktor riset.

ABSTRACT

THERMAL CHARACTERIZATION OF U-7Mo/Al FUEL ELEMENT PLATE AS RESEARCH REACTOR FUEL. *UMo/Al-based fuel is a candidate for research reactor fuel and as an alternative to U_3Si_2/Al fuel. This is because the UMo/Al alloy has a higher uranium density of 16.4 g/cm^3 compared to U_3Si_2/Al of 12.2 g/cm^3 . In addition, the UMo alloy has a low neutron absorption cross section and its reprocessing process is relatively easy. The U-7Mo/Al alloy is able to maintain the γ -U phase during irradiation process so that the stability of the fuel in the reactor is maintained. The U-7Mo alloy has been fabricated into a U-7Mo/Al mini fuel element plate. The purpose of this study was to determine the thermal characteristics of U-7Mo/Al as inputs to the research reactor fuel fabricator in the manufacture of UMo/Al-based fuel. Thermal characterization was carried out for uranium, molybdenum, UMo and the fuel element plate of U-7Mo/Al using Differential Scanning Calorimetry (DSC). The thermal characterization results show that the U-7Mo/Al fuel element plate is thermally stable up to $600 \text{ }^\circ\text{C}$ because it undergoes an endothermic thermochemical reaction at a temperature of $632.962 \text{ }^\circ\text{C}$ with $\Delta H = 144.318 \text{ J/g}$. At $656.186 \text{ }^\circ\text{C}$, the Al matrix and $AlMg_2$ cladding are fused in the U-7Mo/Al with $\Delta H = 144.318 \text{ J/g}$. At temperatures of $952.810 \text{ }^\circ\text{C}$ to $1106.050 \text{ }^\circ\text{C}$, the molten Al matrix diffuses with UMo to form a metastable $U(Mo,Al)_x$ compound and heating to a temperature of $1211.760 \text{ }^\circ\text{C}$ forms a UAl_x layer (UAl_2 , UAl_3 and UAl_4) with $\Delta H = -22,721 \text{ J/g}$.*

Keywords: *Thermal properties, DSC, UMo/Al fuel element plate, research reactor.*

PENDAHULUAN

Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy (RSG-GAS) di Serpong menggunakan bahan bakar U_3Si_2/Al dengan uranium pengayaan rendah yaitu 19,75% ^{235}U . Konversi penggunaan uranium dari pengkayaan tinggi 90% ^{235}U ke pengkayaan rendah <20% ^{235}U merupakan program internasional dalam pengembangan bahan bakar reaktor riset di dunia yang disponsori oleh *Department of Energy* (DOE)-USA[1]. Perubahan penggunaan bahan bakar menjadi uranium pengkayaan rendah (pada desain bahan bakar dan teras reaktor tetap) diperlukan kompensasi peningkatan jumlah uranium. Hal ini dilakukan agar unjuk kerja bahan bakar di dalam reaktor dapat dipertahankan minimal sama dengan ketika menggunakan bahan bakar pengkayaan tinggi [2]. Berkait dengan hal tersebut maka pengembangan bahan bakar baru terus dilakukan, terutama pemilihan bahan bakar dispersi yang memiliki densitas uranium tinggi seperti U-Mo, U-Zr, dan U-Nb sebagai kandidat bahan bakar di masa mendatang.

Paduan U-Mo cocok untuk dipromosikan sebagai bahan bakar dispersi karena selain memiliki densitas tinggi, juga mampu mempertahankan fasa kristal γ -U selama proses iradiasi, sehingga stabilitas bahan bakar di dalam reaktor dapat dipertahankan. Paduan U-Mo adalah paduan biner, bersifat ulet (*ductile*) dan memiliki beberapa kelebihan diantaranya mempunyai struktur kristal bcc (*body cubic center*) di fasa γ , tampang lintang serapan neutron Mo rendah, tahan terhadap korosi, densitas 16,4 g/cm³ (nilai densitas tergantung %Mo), dan proses olah ulang mudah untuk dilakukan [3]. Densitas paduan U-Mo lebih tinggi dibandingkan dengan U_3Si_2 hanya sebesar 12,2 g/cm³ [4]. Penggunaan bahan bakar dispersi berbasis UMo menjadikan densitas uranium di dalam inti elemen bakar dapat ditingkatkan hingga >8 gU/cm³. Densitas uranium tersebut sesuai dengan yang diperlukan oleh reaktor riset terkait pengalihan penggunaan uranium pengkayaan rendah. Oleh karena itu, paduan U-Mo dengan kandungan Mo antara 7 ~ 10 %berat memiliki prospek yang sangat baik untuk digunakan sebagai bahan bakar nuklir dispersi dengan pengkayaan uranium rendah untuk pengganti paduan U_3Si_2 [5].

Logam molybdenum (Mo) merupakan salah satu unsur golongan VI yang dapat digunakan sebagai bahan pemadu logam uranium karena dapat meningkatkan stabilitas

logam uranium. Molybdenum memiliki derajat kelarutan padat γ -U yang tinggi. Jika pendinginan lambat atau paduan mengandung <7%Mo, kesetimbangan paduan U(Mo) dibawah 560 °C berupa campuran fasa αU dan γ -(U₂Mo), sementara larutan padat γUMo terbentuk pada temperatur tinggi [5]. Fasa γ -U paduan UMo sebagai bahan bakar dispersi memiliki unjuk kerja yang baik selama iradiasi, tetapi selama proses iradiasi terbentuk pori yang besar yang menyebabkan terjadinya lapisan/*layer*. *Layer* tersebut merupakan hasil interaksi antara partikel bahan bakar U-Mo dengan matriks Al yang menyebabkan bahan bakar menjadi tidak stabil. Pertumbuhan *layer* hasil interaksi menyebabkan kenaikan temperatur bahan bakar (konduktivitas termal lebih rendah daripada matriks) dan memiliki densitas rendah sehingga pertumbuhan *layer* menyebabkan *meat* bahan bakar terjadi *swelling* cukup signifikan [6].

Sementara itu, penggunaan aluminium untuk matriks bahan bakar reaktor riset memiliki sejarah panjang, yaitu sejak awal 1950 dengan adanya penelitian dan pengujian reaktor untuk pengembangan reaktor tipe *Material Testing Reactor* (MTR). Keunggulan Al sebagai bahan matriks bahan bakar antara lain mempunyai penampang serapan neutron rendah, murah, dan kompatibel dengan kelongsong paduan Al seperti AlMg₂. Aluminium memiliki konduktivitas termal yang baik, hal ini merupakan parameter yang diperlukan dalam unjuk kerja bahan bakar reaktor riset karena sebagian besar perpindahan panas terjadi melalui matriks [7].

Hasil penelitian sebelumnya yang dilakukan dari [8] menyatakan bahwa kadar Mo 5 – 10% dalam paduan uranium menghasilkan fasa γ yang optimal, sehingga BFBBN-PTBBN memproduksi paduan UMo yang mengandung Mo dengan kadar 7%, 8%, 9% dan 10%. Paduan tersebut telah dianalisis secara termal maupun dengan pengujian lainnya, penambahan logam Mo sebagai pemadu dengan kadar yang berbeda dapat mempengaruhi sifat termal paduan UMo. Semakin tinggi kadar Mo maka fasa γ pada paduan semakin stabil, namun konduktivitas termal dan densitas paduan akan semakin menurun. Selain itu, pada penelitian sebelumnya dalam [9] telah dilakukan analisis perubahan fasa pada paduan UMo variasi kandungan Mo dan telah diketahui entalpi, temperatur lebur dan kapasitas panas dari masing-masing paduan. Hasil analisis

kapasitas panas menunjukkan bahwa paduan U-7Mo mempunyai kestabilan panas lebih baik dibanding dengan paduan U-8Mo dan U-9Mo. Dengan demikian, paduan UMo dengan kandungan Mo sebesar 7% berat telah difabrikasi menjadi bahan bakar pelat elemen bakar (PEB) U-7Mo/Al.

Perbedaan kandungan Mo dan jumlah matrik Al dalam PEB UMo/Al diprediksi mempunyai karakter fasa dan sifat termal yang berbeda sehingga perlu dilakukan analisis karakter termal untuk mengetahui kesetabilan paduan U(Mo) dan terjadinya pembentukan campuran fasa α U, γ (U₂Mo) dan *layer* U(Mo,Al)_x menggunakan DSC. Hal ini bertujuan untuk melengkapi data termal paduan U-Mo dan PEB U-7Mo/Al yang telah diperoleh pada penelitian sebelumnya sehingga data tersebut dapat digunakan sebagai acuan dalam fabrikasi PEB UMo/Al densitas uranium tinggi untuk bahan bakar reaktor riset.

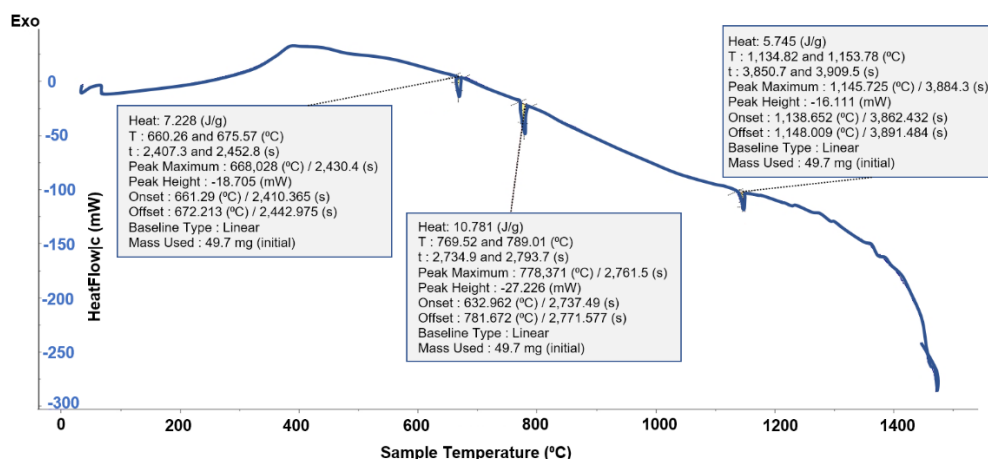
METODOLOGI

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah PEB U-7Mo/Al hasil fabrikasi dari BFBBN, standar logam Mo, dan Al dengan kemurnian 99,99% dari Sigma Aldrich. Karakterisasi termal dilakukan terhadap logam uranium, standar logam Mo, logam Al dan PEB U-7Mo/Al menggunakan *Differential Scanning Calorimetry* (DSC) Labsys Evo dari Setaram-Perancis. Logam uranium ditimbang seberat maksimal 50 mg, kemudian

dimasukkan ke dalam krusibel alumina. Krusibel sampel dan krusibel blangko dimasukkan ke dalam *chamber* DSC *rod* dan *locking balance* ditutup. Gas argon dialirkan ke dalam *chamber* dengan kecepatan alir sebesar 2 mbar/detik sampai tekanan dalam *chamber* mencapai 1 atm. Air pendingin dialirkan dengan tekanan 2 bar secara terus menerus sampai pengukuran selesai. Logam uranium dalam krusibel dipanaskan di dalam tungku DSC dari temperatur 30 °C hingga 1450 °C dengan kecepatan pemanasan 20 °C/menit. Dengan prosedur yang sama dilakukan pengukuran termal untuk logam Mo dan PEB U-7Mo/Al, sedangkan untuk logam Al pemanasan dilakukan pada temperatur 30 °C hingga 750 °C dengan kecepatan pemanasan 20 °C/menit. Hasil pengukuran karakter termal diperoleh berupa termogram DSC dengan membentuk puncak endotermik atau eksotermik yang menunjukkan besarnya temperatur peleburan, perubahan fasa dan entalpi dari sampel uji. Termogram DSC yang dihasilkan kemudian dievaluasi untuk mengetahui besaran temperatur peleburan, temperatur perubahan fasa dan entalpi dari logam uranium, logam Mo dan PEB U-7Mo/Al.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi termal menggunakan DSC pada pemanasan 30 °C hingga 1450 °C diperoleh hasil bahwa logam uranium mengalami perubahan fasa α , β dan γ seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



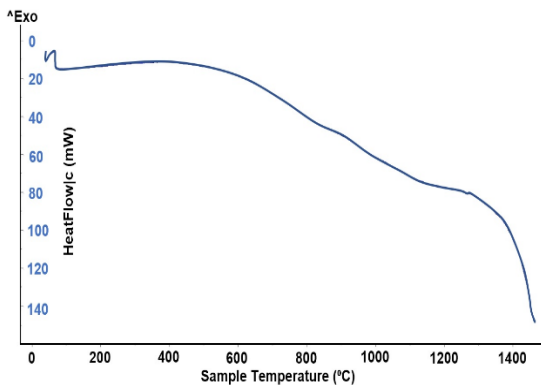
Gambar 1. Termogram logam standar uranium

Perubahan fasa logam uranium ditunjukkan dengan terjadinya reaksi termokimia endotermik pada 661,290 °C, 770,416 °C dan 1138,652 °C. Pada temperatur 661,290 °C terjadi perubahan fasa

α menjadi β dengan membutuhkan sejumlah panas sebesar $\Delta H = 7,228$ J/g serta terjadi perubahan fasa β menjadi γ pada temperatur 770,416 °C dengan panas yang dibutuhkan sebesar $\Delta H = 10,781$ J/g. Pada temperatur

1138,652 °C terjadi peleburan logam uranium dan perubahan fasa dari logam bersifat padat menjadi cair dengan panas yang dibutuhkan sebesar $\Delta H = 5,745 \text{ J/g}$. Hasil karakterisasi termal logam standar uranium yang diperoleh sesuai dengan karakter termal dari literatur[10].

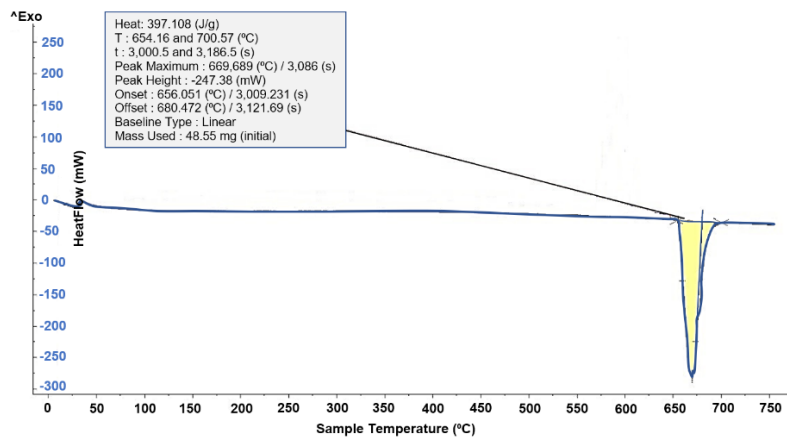
Hasil analisis termal logam Mo sebagai bahan pepaduan uranium dalam bahan bakar UMo ditunjukkan pada Gambar 2.



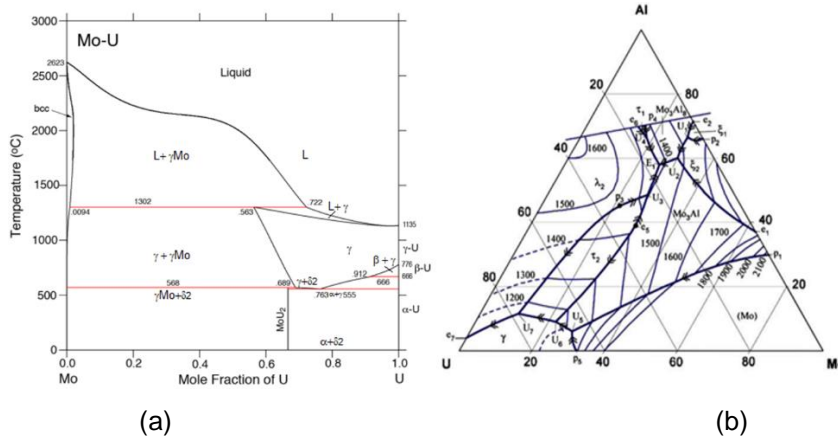
Gambar 2. Termogram logam molybdenum

Gambar 2 menunjukkan bahwa logam Mo sangat stabil dan tidak mengalami perubahan fasa hingga pemanasan 1450 °C. Titik lebur logam Mo berada pada temperatur 2620 °C sehingga proses peleburan logam Mo tidak dapat diamati. Sementara itu, logam Al yang digunakan sebagai matriks bahan bakar PEB UMo/Al, pemanasan hingga temperatur 750 °C menghasilkan reaksi termokimia seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.

Pada Gambar 3 diketahui bahwa terjadi reaksi termokimia endotermik pada temperatur 650,370 °C hingga 656,051 °C. Reaksi endotermik tersebut menunjukkan awal terjadinya perubahan fasa untuk peleburan matriks Al dan perubahan fasa padat menjadi cair dengan membutuhkan sejumlah panas atau entalpi sebesar $\Delta H = 397,108 \text{ J/g}$. Hasil analisis yang diperoleh dari pengukuran logam uranium, Mo, dan matriks Al sesuai dengan diagram fasa dan sifat fisiknya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Gambar 4.a menunjukkan diagram fasa paduan U-Mo dan Gambar 4.b adalah diagram fasa U-Mo-Al.



Gambar 3. Termogram logam Al standar



Gambar 4. Diagram fasa (a) biner paduan U-Mo[11], dan (b) terner U-Mo-Al[12]

Bahan bakar UMo/Al yang terdiri dari partikel U-Mo didispersikan merata dalam matriks aluminium dengan perbandingan 6:1. Akibat adanya pemanasan hingga temperatur 1450 °C menyebabkan terjadi reaksi termokimia paduan U-Mo dengan matriks Al. Hal ini disebabkan oleh adanya pengikatan atau difusi lelehan Al ke dalam bahan bakar U-Mo secara cepat. Lelehan matrik Al

mempunyai kontak antar muka dengan gaya gerak yang lebih besar sehingga terjadi ikatan intermetalik lelehan Al dengan UMo membentuk senyawa $U(Al,Mo)_x$. Peneliti Fliming dan Johnson dari *Oak Ridge Research Reactor* menyatakan bahwa reaksi termokimia pada bahan bakar UMo/Al terjadi dengan tahapan reaksi sebagai berikut [10].



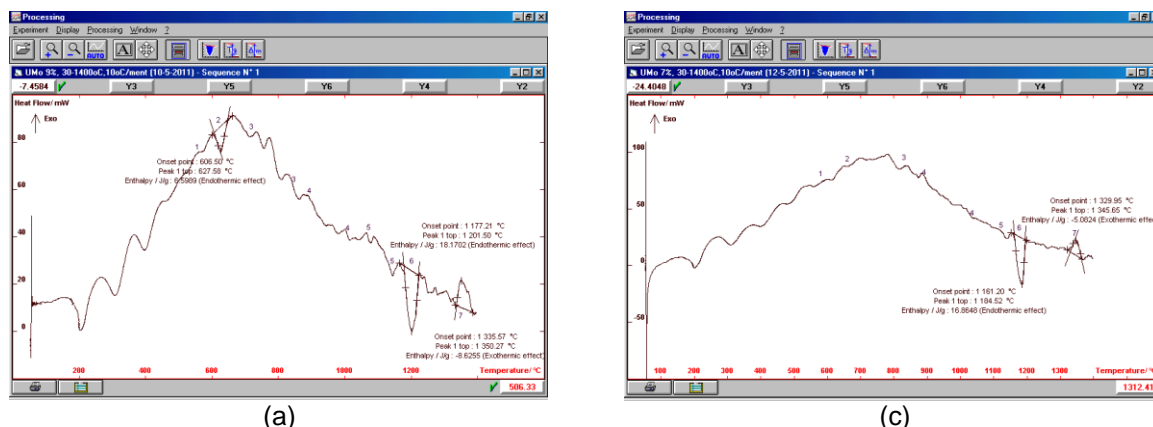
Reaksi termokimia (1) pada temperatur 650,370 °C mulai terjadi perubahan fasa matriks Al. Reaksi termokimia (2) pada temperatur 656,051 °C matriks Al mengalami peleburan dengan membutuhkan panas sebesar $\Delta H = 397,108 \text{ J/g}$ seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Reaksi termokimia (3) terjadi pengikatan atau difusi lelehan matriks Al ke dalam bahan bakar U-7Mo pada temperatur 952,810-1106,050°C. Hal ini disebabkan lelehan matrik Al (fasa cair) mempunyai kontak antar muka dengan gaya gerak yang lebih besar sehingga ikatan intermetalik lelehan Al dengan UMo membentuk senyawa $U(Al,Mo)_x$ metastabil. Pemanasan lebih lanjut yaitu pada temperatur 1155,466 °C terjadi reaksi dekomposisi UAl_x membentuk senyawa baru UAl_4 , UAl_3 dan UAl_2 seperti yang terjadi pada persamaan reaksi (4). Pembentukan senyawa baru ini harus dibuktikan lebih lanjut dengan melakukan analisis mikrostruktur. Hasil penelitian Aslina,dkk yang telah melakukan analisis mikrostruktur terhadap PEB U_3Si_2/Al densitas $2,96 \text{ gU/cm}^3$ pasca iradiasi menunjukkan terbentuknya lapisan UAl_x pada *meat* bahan bakar dengan ketebalan sekitar $1,839 \mu\text{m}$ [13].

Pada penelitian sebelumnya, telah dilakukan karakterisasi termal terhadap paduan UMo dengan variasi kandungan Mo 7%, 8%, dan 9% [9]. Fenomena reaksi termokimia dari ketiga sampel tersebut ditunjukkan pada Gambar 5. Pada masing-masing sampel terjadi perubahan fasa dari $\alpha + \delta$ menjadi $\alpha + \beta$ pada temperatur 578,630°C dan perubahan fasa $\alpha + \beta$ menjadi $\alpha + \gamma$ terjadi pada temperatur 606,500 °C.

Pada temperatur 700,760 °C terjadi perubahan fasa dari $\alpha + \beta$ menjadi $\beta + \gamma$, sedangkan pada temperatur 1075,450°C terjadi perubahan aliran panas (*heat flow*) yang ditunjukkan terjadinya perubahan fasa $\beta + \gamma$ menjadi γ . Pada temperatur 1161,200 °C, paduan UMo 7% mengalami reaksi endotermik dengan panas yang dibutuhkan sebesar $\Delta H = 16,865 \text{ J/g}$ dan pada temperatur 1329,950 °C terjadi reaksi eksotermik dengan melepas panas sebesar $\Delta H = -5,082 \text{ J/g}$. Paduan UMo 8% mengalami reaksi termokimia pada temperatur 1168,900°C dengan menyerap panas sebesar $\Delta H = 17,253 \text{ J/g}$ dan terjadi interaksi antara uranium dengan molybdenum membentuk puncak eksotermik dengan melepas panas sebesar $\Delta H = -6,477 \text{ J/g}$ pada temperatur 1363,910 °C. Sedangkan untuk paduan UMo 9% terjadi reaksi endotermik pada temperatur 1177,210°C dengan membutuhkan panas sebesar $\Delta H = 18,170 \text{ J/g}$ dan melepas panas pada temperatur 1335,570 °C sebesar $\Delta H = -8,625 \text{ J/g}$.

Terdapat perbedaan fenomena reaksi perubahan fasa pada termogram hasil analisis paduan UMo dengan kandungan Mo sebesar 7% (a), 8% (b), dan 9% (c) yaitu puncak ke-2 pada paduan UMo 7% dan 8% tidak disertai dengan reaksi termokimia endotermik. Kandungan Mo 9% mempunyai Mo berlebih untuk menghasilkan reaksi termokimia endotermik dengan panas yang dibutuhkan sebesar $\Delta H = 6,599 \text{ J/g}$. Semakin banyak kadar Mo dalam paduan UMo maka panas reaksi yang dibutuhkan dan dilepaskan semakin meningkat.

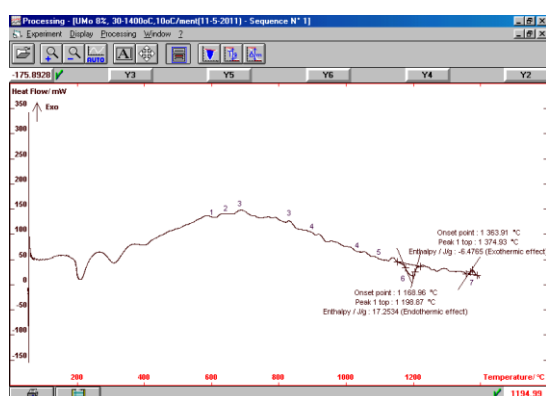
Karakterisasi Termal PEB U-7Mo/Al Sebagai Bahan Bakar Reaktor Riset (Sayyidatun Nisa, Ariyanti Saputri, Sutri Indaryanti, Noviarty, Supardjo, Aslina Br. Ginting)



(a)

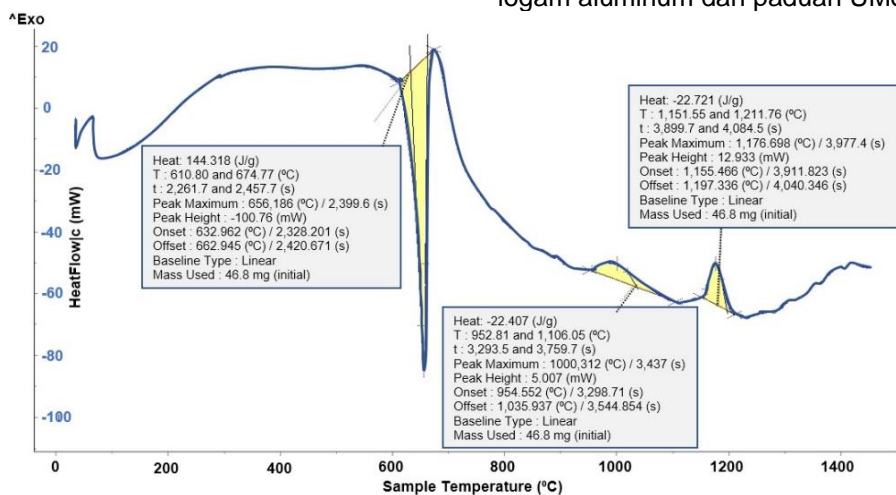
(c)

Gambar 5. Termogram paduan UMo dengan kandungan Mo (a) 7% (b) 8% (c) 9%[9].



(b)

Hasil karakterisasi termal PEB U-7Mo/Al menggunakan DSC hingga temperatur 1450 °C diperoleh termogram yang ditunjukkan pada Gambar 6. Kondisi operasi normal pada reaktor riset berkisar pada temperatur 140 °C namun untuk mempelajari kemungkinan lepasan energi reaksi termokimia bila terjadi kecelakaan maka dilakukan pemanasan hingga 1450 °C sesuai dengan fenomena perubahan fasa yang terjadi pada uranium. Reaksi termokimia yang terjadi pada PEB U-7Mo/Al menunjukkan adanya persamaan dengan fenomena reaksi termokimia pada logam aluminium dan paduan UMo.



Gambar 6. Termogram PEB U-7Mo/Al.

Gambar 6 menunjukkan bahwa pada temperatur 610,800 °C terjadi titik rekristalisasi matrik Al dan kelongsong AlMg₂. Pada 632,962 °C mulai terjadi perubahan fasa yang diikuti oleh reaksi termokimia endotermik pada 662,945 °C yang menunjukkan terjadinya peleburan matriks Al dan kelongsong AlMg₂ dengan menyerap panas

sebesar $\Delta H = 144,318$ J/g. Reaksi peleburan matriks Al dalam PEB U-7Mo/Al sama dengan fenomena peleburan pada standar Al. Lelehan matriks Al mengikat dan berdifusi dengan U-7Mo membentuk fasa baru yaitu fasa metastabil U(Al,Mo)_x pada temperatur 952,810-1106,050 °C dengan melepas sejumlah panas $\Delta H = -22,407$ J/g [13].

Fenomena difusi matriks Al dengan paduan U-7Mo menyebabkan terjadi pembentukan senyawa baru UAl_x seperti UAl_2 , UAl_3 dan UAl_4 dan UMo yang lebih stabil pada temperatur 1155,466 °C sampai dengan 1211,760 °C dengan melepas panas sebesar $\Delta H = -22,721$ J/g. Fenomena reaksi termokimia yang terjadi pada PEB U-7Mo/Al sama dengan reaksi termokimia yang disampaikan oleh peneliti Fliming dan Johnson dari *Oak Ridge Research Reactor*[10].

SIMPULAN

PEB U-7Mo/Al stabil terhadap termal hingga temperatur 600 °C, pemanasan lebih lanjut dapat mengakibatkan pembentukan fasa baru akibat *interaction layer* antara paduan UMo dengan matriks Al. Pembentukan *layer* UAl_x (UAl_2 , UAl_3 dan UAl_4) harus dibuktikan lebih lanjut dengan analisis mikrostruktur menggunakan SEM. Dari hasil yang diperoleh bahan bakar U-7Mo/Al bila dioperasikan hingga temperatur sekitar 140 °C tidak akan mengalami peleburan matriks Al sehingga tidak terjadi reaksi interdifusi dengan paduan UMo.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih diucapkan kepada Bapak Setia Permana, Isfandi, Ibu Yanlinastuti, Iis Haryati, dan teman-teman kelompok Fisikokimia yang telah membantu pelaksanaan penelitian ini sehingga penulisan makalah ini dapat terwujud.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Kadarjono dan A. B. Ginting, "Pembuatan pelat elemen bakar mini UMo-Al dengan densitas uranium 6 dan 7 gU/cm^3 ," *Jurnal Teknologi Bahan Nuklir*, vol 7, no 2, hal. 107–121, 2011.
- [2] A. B. Ginting, Supardjo, Yanlinastuti, D. Anggraini, dan Boybul, "Karakterisasi paduan AlMgSi untuk kelongsong bahan bakar U_3Si_2/Al densitas uranium 5,2 gU/cm^3 ," *Urania Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir*, vol 24, no 1, hal. 27–38, 2018.
- [3] A. B. Ginting dan Supardjo, "Komparasi analisis reaksi termokimia matriks Al dengan bahan bakar UMo/Al dan U_3Si_2/Al menggunakan differential thermal analysis," *Urania Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir*, vol 18, no 1, hal. 12–20, 2012.
- [4] Yanlinastuti, S. Indaryati, dan Rahmiati, "Analisis sifat termal logam uranium, paduan UMo dan UMoSi menggunakan differential thermal analyzer," *Jurnal Forum Nuklir*, vol 4, no 2, hal. 141–148, 2010.
- [5] Supardjo dkk., "Pengembangan teknologi bahan bakar reaktor riset berbasis U-Mo / Al [fabrikasi dan pengujian pelat elemen bakar U-Mo-xM (M=Ti, Zr, Si)]," 2017.
- [6] Supardjo, A. Kadarjono, Boybul, dan A. B. Ginting, "Pengaruh unsur Zr terhadap perubahan sifat termal bahan bakar dispersi U-7Mo-xZr/Al," *Urania Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir*, vol 22, no 1, hal. 13–24, 2016
- [7] T. W. Cho, "Measurements and modeling of thermal conductivity of U-Mo / Al dispersion fuel for research reactor department of nuclear engineering," UNIST, 2018.
- [8] M. H. Alhasa, Masrukan, dan J. Setiawan, "Pengaruh kadar Mo terhadap fasa g-UMo, sifat termal dan densitas paduan UMo" *GANENDRA Majalah IPTEK Nuklir*, vol. 20, no. 1, hal. 31, 2017,
- [9] A. B. Ginting, Supardjo, A. Kadarjono, dan D. Anggraini, "Pengaruh kandungan molibdenum terhadap perubahan fasa dan kapasitas panas ingot paduan UMo," *Urania Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir*, vol 17, no 2, pp. 76–86, 2011.
- [10] A. E. Pasto, G. L. Copeland and M. M. Martin. "Quantitative differential thermal analysis study of the UMo/Al thermite reaction". *Oak Ridge National Lab*, vol. 61, No 4, 1992.
- [11] P. Turchi dan A. Landa, "Thermodynamic database, lower length scale, PART II: Thermodynamic assessment of Al–Mo–Si–U," 2012. [Daring]. Tersedia pada: <https://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/696912.pdf>.
- [12] X. Zhang, *et al.*, "Thermodynamic assessment of the U-Mo-Al system," *J. Nucl. Mater.*, vol. 402, no 1, pp. 15–24, 2010.
- [13] M. K. Ajriyanto, A. B. Ginting, S. Supardjo, dan B. Boybul, "Pengaruh Temperatur Dan Iradiasi Terhadap Interdifusi Partikel Bahan Bakar Jenis U-7Mo/Al," *Urania Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir*, vol 22, no 1, pp. 1–12, 2016.