

REAKSI TERMOKIMIA PADUAN AlFeNi DENGAN BAHAN BAKAR U_3Si_2

Aslina Br. Ginting dan M. Husna Al Hasa

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir – BATAN, Serpong

ABSTRAK

REAKSI TERMOKIMIA PADUAN AlFeNi DENGAN BAHAN BAKAR U_3Si_2 . Reaksi termokimia paduan AlFeNi pada komposisi Fe 2,5% dan Ni 1,5% dengan bahan bakar U_3Si_2 serta reaksi termokimia kelongsong AlMg2 dengan bahan bakar U_3Si_2 telah dipelajari. Analisis dilakukan untuk mengetahui fenomena reaksi termokimia paduan AlFeNi dengan U_3Si_2 yang dibandingkan dengan reaksi termokimia kelongsong AlMg2 dengan U_3Si_2 menggunakan metode *Differential Thermal Analysis*. Tujuan analisis ini adalah untuk mengetahui kompatibilitas panas paduan AlFeNi dan AlMg2 dengan bahan bakar U_3Si_2 jika nanti paduan AlFeNi digunakan sebagai kelongsong bahan bakar. Hasil analisis menunjukkan bahwa paduan AlFeNi pada komposisi Fe 2,5% dan Ni 1,5% dengan bahan bakar U_3Si_2 mengalami reaksi endotermik pada temperatur 672,65 °C dengan panas reaksi $\Delta H = 108,1812$ J/g dan mengalami reaksi eksotermik membentuk senyawa pada temperatur 693,24 °C dengan panas reaksi $\Delta H = -117,322$ J/g. Sedangkan pada temperatur 659,20 °C kelongsong AlMg2 dengan bahan bakar U_3Si_2 mengalami reaksi endotermik dengan membutuhkan panas sebesar $\Delta H = 235,4043$ J/g dan pada temperatur 737,66 °C mengalami reaksi eksotermik dengan melepaskan panas sebesar $\Delta H = -47,4639$ J/g. Dari fenomena reaksi termokimia tersebut dapat diketahui bahwa kompatibilitas panas paduan AlFeNi dengan U_3Si_2 sebagai kelongsong bahan bakar hingga temperatur 600 °C relatif baik dan cenderung relatif sama dengan kelongsong AlMg2.

KATA KUNCI: reaksi termokimia, paduan AlFeNi, bahan bakar U_3Si_2 , kelongsong AlMg2, *Differential Thermal Analysis*, entalpi

ABSTRACT

THERMOCHEMICAL REACTION OF AlFeNi ALLOY WITH U_3Si_2 FUEL ELEMENT. The thermochemical reaction between AlFeNi alloy at a composition of 2,5% Fe and 1.5% Ni and U_3Si_2 fuel element and that between AlMg2 cladding and U_3Si_2 fuel element have been studied. Analyses were conducted to determine the thermochemical reaction phenomenon between AlFeNi alloy and U_3Si_2 compared with that between AlMg2 cladding and U_3Si_2 using *Differential Thermal Analysis* method. The purpose of the analyses is to understand the compatibility of AlFeNi alloy and AlMg2 with U_3Si_2 fuel element if later AlFeNi alloy is used as fuel element cladding. Results of the analyses indicate that the AlFeNi alloy with a composition of 2.5% Fe and 1.5% Ni reacted with the U_3Si_2 fuel through an endothermic reaction at a temperature of 672.65 °C with a heat of reaction $\Delta H = 108.1812$ J/g, and an exothermic reaction at a temperature of 693.24 °C with a heat of reaction $\Delta H = -117.322$ J/g. Meanwhile, AlMg2 cladding with U_3Si_2 fuel element underwent an endothermic reaction at a temperature of 659.20 °C with a heat of reaction $\Delta H = 235.4043$ J/g, and an exothermic reaction at a temperature of 737.66 °C with a heat of reaction $\Delta H = -47.4639$ J/g. From the thermochemical reaction phenomena above, it is concluded that the compatibility of AlFeNi alloy with U_3Si_2 as fuel element cladding is relatively satisfactory up to a temperature of 600 °C, and the trend is similar for AlMg2 cladding.

FREE TERMS: thermochemical reaction, AlFeNi alloy, U₃Si₂ fuel element, Differential Thermal Analysis, enthalpy

I. PENDAHULUAN

Pada penelitian sebelumnya telah dilakukan analisis termal paduan AlFeNi dengan variasi kandungan Fe dan Ni masing-masing 1% hingga 15%, dimana dalam bahasannya dijelaskan bahwa paduan AlFeNi dapat digunakan sebagai kelongsong bahan bakar reaktor riset^[1]. Karakterisasi termal yang dilakukan meliputi analisis temperatur lebur, entalpi lebur, entalpi pembentukan senyawa Al-FeAl₃ dan Al-NiAl₃, dan analisis kapasitas panas. Analisis dilakukan dengan menggunakan alat *Thermal Gravimetry – Differential Thermal Analysis (TG-DTA)* dan *Differential Scanning Calorimetry (DSC)*^[2,3]. Hasil analisis menunjukkan bahwa paduan AlFeNi dengan komposisi Fe 1% dan Ni 4% mempunyai temperatur lebur sebesar 647,68 °C dan entalpi lebur sebesar $\Delta H = 246,228$ J/g. Peleburan Al menyebabkan terjadinya interaksi lelehan Al dengan Fe dan Ni sehingga terjadi pembentukan senyawa Al-FeAl₃ atau Al-NiAl₃ dengan entalpi sebesar $\Delta H = -90,143$ J/g hingga $\Delta H = -94,851$ J/g dan kapasitas panas sebesar 0,67 J/g °C hingga 1,12 J/g °C pada rentang temperatur 50 °C hingga 450 °C. Sedangkan paduan AlFeNi dengan komposisi Fe dan Ni 6% hingga 15% mempunyai temperatur lebur yang hampir sama dengan AlFeNi pada komposisi 1% sampai 4%, namun mempunyai entalpi peleburan dan kapasitas panas lebih kecil serta mempunyai entalpi pembentukan senyawa Al-FeAl₃ dan Al-NiAl₃ yang cukup besar. Paduan AlFeNi dengan komposisi 6% sampai 15% mempunyai entalpi peleburan sebesar $\Delta H = 172,134$ J/g hingga $\Delta H = 225,047$ J/g, entalpi pembentukan senyawa Al-FeAl₃ dan Al-NiAl₃ sebesar $\Delta H = -268,150$ J/g dan $\Delta H = -681,43$ J/g serta mempunyai kapasitas panas sebesar 0,41 J/g °C hingga 0,68 J/g °C pada rentang temperatur 50 °C hingga 450 °C. Besarnya reaksi eksotermik atau entalpi reaksi pembentukan senyawa paduan AlFeNi pada komposisi 6% sampai 15% sangat dipengaruhi oleh besarnya lelehan Al yang berinteraksi dan bereaksi secara langsung dengan Fe dan Ni. Lelehan Al secara langsung bereaksi dengan Fe dan Ni membentuk senyawa Al-FeAl₃ dan Al-NiAl₃ secara eksotermik dengan melepaskan panas yang cukup besar yang menyebabkan terjadinya penurunan kapasitas panas. Fenomena ini dalam kelongsong bahan bakar tidak diinginkan karena dapat mengurangi kekuatan mekanik dan mengubah sifat bahan kelongsong AlFeNi karena dapat menyebabkan paduan AlFeNi yang berfungsi sebagai kelongsong atau pembungkus bahan bakar menjadi tidak kompatibel.

Dari hasil analisis tersebut dapat dinyatakan bahwa paduan AlFeNi dengan kandungan Fe dan Ni sekitar 1% sampai 4% mempunyai sifat termal yang lebih baik jika dibandingkan dengan paduan AlFeNi dengan komposisi Fe dan Ni sebesar 6% sampai 15%. Untuk mengetahui apakah paduan AlFeNi dengan komposisi Fe dan Ni masing-masing 1% sampai 4% dapat digunakan sebagai alternatif kelongsong bahan bakar U₃Si₂-Al, pada penelitian lanjutan ini akan dipelajari besarnya reaksi termokimia paduan AlFeNi pada komposisi Fe 2,5% dan Ni 1,5% dengan bahan bakar U₃Si₂-Al, karena besaran reaksi termokimia kelongsong dengan bahan bakar menunjukkan kompatibilitas kelongsong tersebut dengan bahan bakar yang dikungkung.

Hasil kajian yang dilakukan di beberapa negara menunjukkan bahwa paduan AlFeNi memiliki sifat kestabilan panas, sifat mekanik dan ketahanan korosi yang baik. Namun dari pustaka belum diketahui karakter paduan AlFeNi secara menyeluruh, khususnya karakter termal^[4,5]. Untuk itu perlu dilakukan analisis kemampuan reaksi termokimia paduan AlFeNi

dengan U_3Si_2 -Al dan akan dibandingkan dengan reaksi termokimia kelongsong AlMg2 dengan U_3Si_2 -Al. Tujuan kedua analisis tersebut adalah untuk mengetahui kompatibilitas panas kedua paduan tersebut dengan bahan bakar U_3Si_2 -Al jika nanti paduan AlFeNi digunakan sebagai kelongsong bahan bakar. Reaksi termokimia yang dialami oleh bahan bakar U_3Si_2 -Al diduga akan berpengaruh terhadap kompatibilitas bahan bakar dengan kelongsong. Hipotesis ini diambil berdasarkan fenomena terjadinya peleburan Al dari paduan AlFeNi, dimana lelehan Al tersebut secara langsung berinteraksi dengan bahan bakar U_3Si_2 secara eksotermik membentuk senyawa UAl_x , sedangkan dengan AlFeNi akan membentuk senyawa $AlFeAl_3$ dan $AlNiAl_3$ ^[5]. Pembentukan senyawa tersebut akan mempengaruhi kompatibilitas kelongsong AlFeNi dengan bahan bakar U_3Si_2 .

Hasil analisis ini diharapkan dapat digunakan sebagai suatu langkah awal untuk mengetahui dan mempelajari karakter paduan AlFeNi apabila digunakan sebagai kelongsong bahan bakar nuklir pengganti AlMg2.

II. TATA KERJA

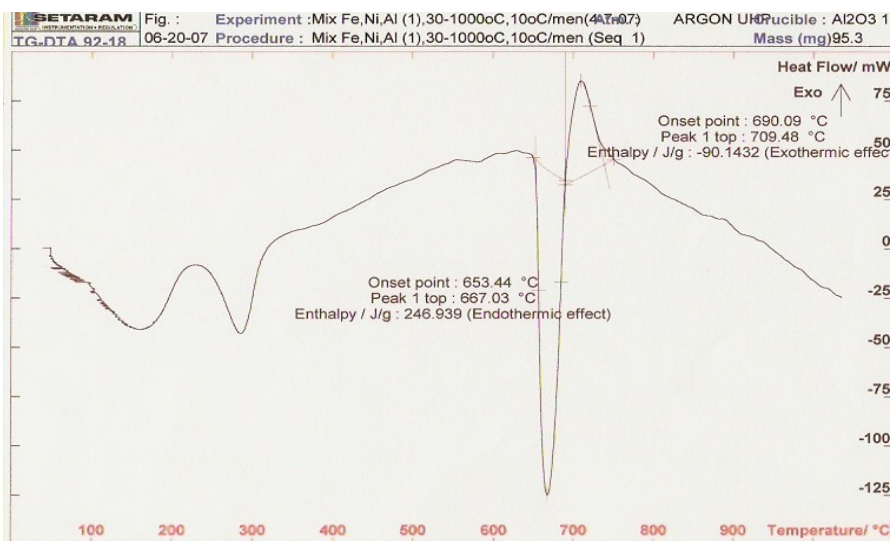
Penelitian ini menggunakan bahan paduan AlFeNi dengan komposisi Fe 2,5% dan Ni 1,5%, bahan bakar U_3Si_2 -Al dengan tingkat muat uranium 2,96 g/cm³ dan kelongsong AlMg2 dari Batan Teknologi Persero. Alat yang digunakan untuk mengerjakan penelitian ini adalah seperangkat peralatan *Thermal Gravimetry – Differential Thermal Analysis (TG-DTA)* merk SETARAM dan timbangan analitik.

Paduan AlFeNi dengan kandungan Fe 2,5% dan Ni 1,5 % ditimbang seberat 100 mg, kemudian ditambahkan bahan bakar U_3Si_2 seberat 50 mg. Bahan yang sudah diketahui komposisi dan beratnya dimasukkan ke dalam krusibel alumina dan kemudian diletakkan di dalam *chamber TG-DTA rod*. *Chamber* selanjutnya divakum sampai tekanan 10^{-2} bar. Setelah vakum tercapai, gas argon UHP dialirkan dengan tekanan 2,5 bar. Selanjutnya *DTA rod* dipanaskan dengan temperatur 30 °C sampai 1000 °C dengan kecepatan pemanasan 10 °C/menit. Hasil analisis berupa termogram *DTA* dievaluasi untuk mengetahui temperatur lebur, entalpi, kestabilan panas, perubahan fase dan temperatur reaksi termik. Hal yang sama dan kondisi operasi yang sama dilakukan terhadap kelongsong AlMg2, bahan bakar U_3Si_2 , dan dilakukan evaluasi terhadap interaksi paduan AlFeNi dengan U_3Si_2 maupun interaksi kelongsong AlMg2 dengan U_3Si_2 .

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

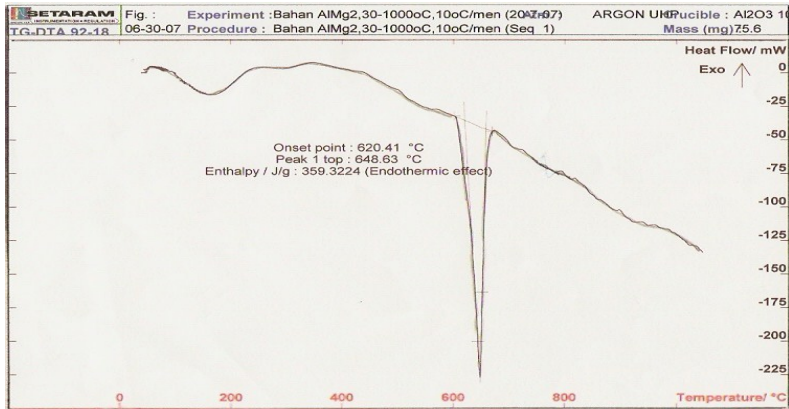
Telah dilakukan analisis reaksi termokimia terhadap paduan AlFeNi dengan kandungan Fe 2,5% dan Ni 1,5%, kelongsong AlMg2, bahan bakar U_3Si_2 , paduan AlFeNi dengan U_3Si_2 , dan kelongsong AlMg2 dengan U_3Si_2 . Hasil analisis yang diperoleh berupa besaran entalpi, temperatur lebur, dan pembentukan senyawa yang ditandai dengan adanya perubahan aliran panas (*heat flow*) dengan terjadinya pembentukan puncak endotermik dan eksotermik pada termogram *DTA* dari AlFeNi dengan kandungan Fe 2,5% dan Ni 1,5%, kelongsong AlMg2, bahan bakar U_3Si_2 , paduan AlFeNi dengan U_3Si_2 , dan kelongsong AlMg2 dengan U_3Si_2 seperti yang terlihat pada Gambar 1 – 6. Dari Gambar 1, dapat diketahui bahwa untuk paduan AlFeNi dengan kandungan Fe 2,5% dan Ni 1,5% terlihat adanya puncak endotermik yang terjadi pada temperatur 180 °C. Hal ini tidak menunjukkan adanya fenomena reaksi termokimia tetapi merupakan karakteristik kemampuan *DTA rod* 1750 °C yang digunakan mulai stabil pada

temperatur 200 °C. Pada temperatur 300 °C paduan AlFeNi mengalami reaksi endotermik, yang menunjukkan adanya perubahan aliran panas paduan AlFeNi dimana kemungkinan paduan AlFeNi mengalami perubahan struktur kristal ortorombik dan monoklinik. Hal ini lebih lanjut harus dibuktikan dengan *XRD*. Pada temperatur 653,44 °C hingga 667,03 °C, paduan AlFeNi mengalami reaksi peleburan membentuk puncak endotermik dengan membutuhkan panas sebesar $\Delta H = 246,939$ J/g. Reaksi endotermik tersebut menunjukkan terjadinya peleburan unsur Al yang terkandung di dalam paduan AlFeNi. Lelehan unsur Al tersebut secara langsung bereaksi dengan unsur Fe dan Ni pada temperatur 690,09 °C hingga temperatur 709,48 °C pada titik eutektiknya dan membentuk senyawa Al-FeAl₃ dan Al-NiAl₃^[1,3]. Adanya reaksi antara lelehan Al dengan Fe dan Ni ditunjukkan oleh reaksi eksotermik yang terjadi secara langsung dengan melepaskan sejumlah panas sebesar $\Delta H = -90,1432$ J/g.



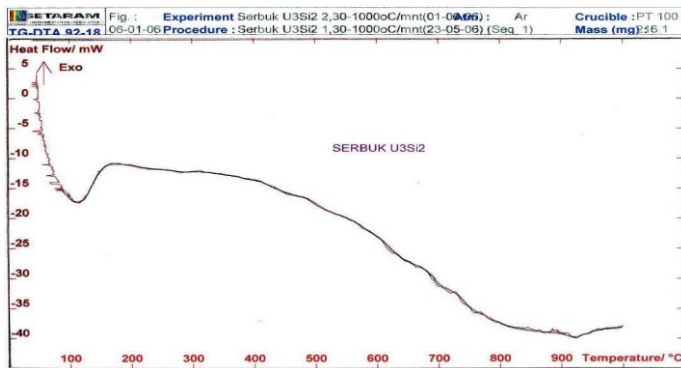
Gambar 1. Termogram DTA paduan AlFeNi dengan kandungan Fe 2,5% dan Ni 1,5%

Hasil analisis termal terhadap kelongsong AlMg₂ menunjukkan bahwa paduan AlMg₂ cukup stabil terhadap panas hingga temperatur 600 °C, namun di atas temperatur 600 °C kelongsong AlMg₂ mengalami reaksi peleburan pada temperatur 648,63 °C dengan membutuhkan panas untuk melakukan reaksi peleburan tersebut sebesar $\Delta H = 359,32$ J/g, seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Setelah mengalami peleburan, kelongsong AlMg₂ mengalami penurunan kapasitas panas hingga temperatur pengukuran berakhir pada temperatur 1000 °C. Penurunan kapasitas panas jelas terlihat dengan terjadinya penurunan aliran panas (*heat flow*) kelongsong AlMg₂, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Terjadinya penurunan aliran panas disebabkan oleh tumbukan antar atom menjadi berkurang karena bentuk logam AlMg₂ padat telah berubah menjadi AlMg₂ amorf^[6,7].

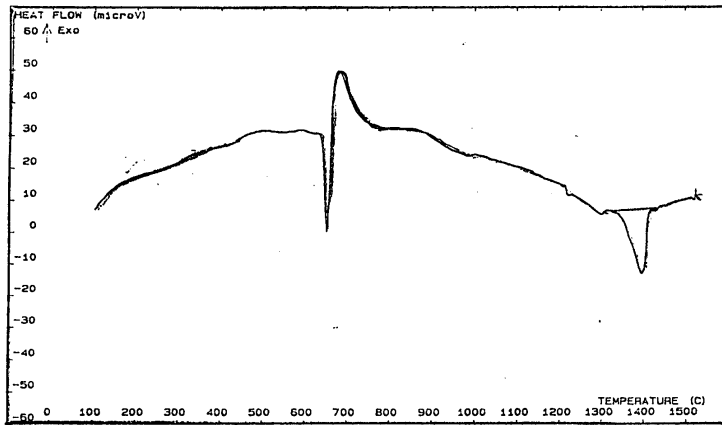


Gambar 2. Termogram DTA paduan AlMg2

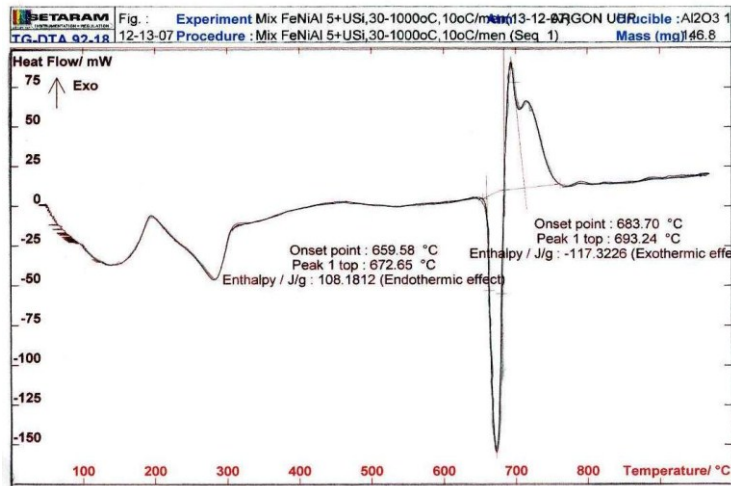
Hasil analisis termal yang dilakukan terhadap bahan bakar U_3Si_2 menunjukkan bahwa serbuk U_3Si_2 tidak mengalami reaksi termokimia hingga temperatur 1000 °C, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Namun dari termogram DTA tersebut terlihat jelas bahwa terjadi pengurangan aliran panas (*heat flow*). Hal ini menunjukkan bahwa bahan bakar U_3Si_2 mengalami penurunan konduktivitas panas dan kapasitas panas. Penurunan konduktivitas panas dan kapasitas panas dalam bahan bakar U_3Si_2 tidak diinginkan, sehingga penting untuk ditanggulangi dengan cara penambahan matrik Al ke dalam bahan bakar U_3Si_2 . Matrik Al dapat meningkatkan konduktivitas panas maupun kapasitas panas bahan bakar sehingga aliran panas dari inti elemen bakar dapat dihantarkan dengan baik ke air pendingin reaktor melalui kelongsong bahan bakar. Hal ini dibuktikan dengan analisis termal terhadap bahan bakar U_3Si_2 -Al seperti yang terlihat pada Gambar 4. Penambahan matrik Al ke dalam bahan bakar U_3Si_2 menyebabkan aliran panas semakin meningkat hingga temperatur 600 °C, tetapi pada temperatur 658 °C bahan bakar U_3Si_2 -Al mengalami peleburan matrik Al sehingga menyebabkan terjadinya reaksi endotermik yang diikuti oleh reaksi termokimia eksotermik yang menunjukkan terjadinya interaksi lelehan matrik Al dengan U_3Si_2 membentuk senyawa UAl_x , seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 3. Termogram DTA bahan bakar U_3Si_2



Gambar 4. Termogram *DTA* bahan bakar U_3Si_2-Al

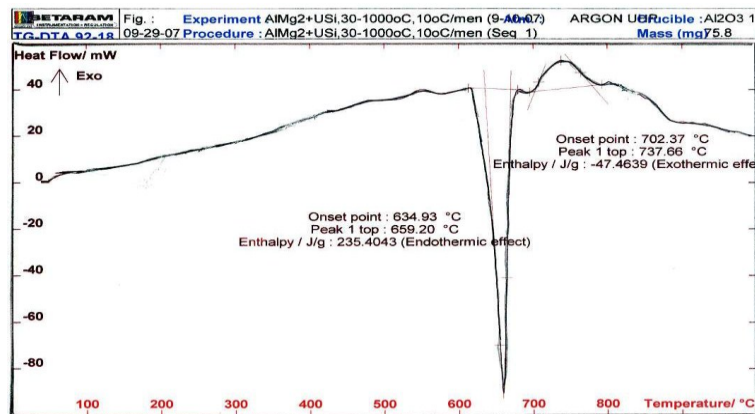


Gambar 5. Termogram *DTA* paduan AlFeNi dengan bahan bakar U_3Si_2

Dari Gambar 5 dapat diketahui bahwa paduan AlFeNi dengan bahan bakar U_3Si_2 mengalami reaksi termokimia endotermik pada temperatur 300 °C. Reaksi termokimia pada temperatur tersebut menunjukkan adanya temperatur perubahan paduan AlFeNi yang kemungkinan mengalami struktur kristal ortorombik dan monoklinik^[8]. Hal ini perlu dibuktikan dengan *XRD*. Selain itu dimungkinkan juga terjadi reaksi peleburan unsur-unsur pengotor sebagai kontaminan dalam paduan AlFeNi yang mempunyai titik cair relatif lebih rendah. Pada temperatur 672,65 °C terjadi reaksi endotermik yang menunjukkan terjadinya reaksi peleburan Al yang terdapat dalam paduan AlFeNi dengan membutuhkan panas sebesar $\Delta H = 108,1812$ J/g. Reaksi endotermik tersebut diikuti oleh reaksi termokimia eksotermik yang menunjukkan terjadinya reaksi antara lelehan unsur Al dengan unsur Fe dan Ni secara langsung pada temperatur 683,70 °C hingga

temperatur 693,24 °C pada titik eutektiknya^[1,2]. Terjadinya reaksi termokimia eksotermik tersebut menyebabkan terjadinya pembentukan senyawa Al-FeAl₃ dan Al-NiAl₃ dengan melepaskan panas sebesar $\Delta H = -117,322$ J/g. Selain terjadi pembentukan senyawa Al-FeAl₃ dan Al-NiAl₃^[1], reaksi termokimia eksotermik tersebut juga menunjukkan terjadinya reaksi pembentukan senyawa UAl_x yang merupakan hasil interaksi lelehan Al dengan bahan bakar U_3Si_2 ^[3]. Hal ini terlihat dari termogram DTA pada Gambar 5, dimana puncak reaksi termokimia eksotermik berlangsung dalam 2 tahap. Reaksi eksotermik tahap pertama menunjukkan terjadi reaksi pembentukan senyawa Al-FeAl₃ dan Al-NiAl₃, dan reaksi eksotermik tahap kedua menunjukkan terjadinya reaksi pembentukan senyawa UAl_x .

Dari Gambar 5 diketahui pula bahwa aliran panas setelah mengalami reaksi termokimia eksotermik relatif stabil. Hal ini menandakan sifat hantaran panas paduan AlFeNi + U_3Si_2 tidak mengalami perubahan pada temperatur relatif tinggi hingga 1000 °C. Fenomena ini sangat berbeda bila dibandingkan dengan termogram DTA dari AlFeNi seperti yang terlihat pada Gambar 1, dimana terlihat aliran panas paduan AlFeNi menurun setelah mengalami reaksi eksotermik membentuk senyawa Al-FeAl₃ dan Al-NiAl₃. Fenomena ini menunjukkan konduktivitas panas paduan AlFeNi tersebut berkurang setelah mengalami reaksi termokimia eksotermik tersebut.



Gambar 6. Termogram DTA kelongsong AlMg2 dengan bahan bakar U_3Si_2

Analisis termal juga dilakukan terhadap paduan kelongsong AlMg2 dengan bahan bakar U_3Si_2 dimana diperoleh hasil bahwa hingga temperatur 600 °C paduan tersebut sangat stabil terhadap panas, seperti yang terlihat pada Gambar 6. Namun pada temperatur 659,20 °C terjadi reaksi termokimia endotermik yang menunjukkan terjadinya peleburan kelongsong AlMg2 dengan panas yang dibutuhkan sebesar $\Delta H = 235,4043$ J/g. Reaksi endotermik tersebut diikuti oleh reaksi eksotermik pada temperatur 702,37 °C hingga temperatur 737,66 °C yang menunjukkan terjadinya reaksi difusi antara lelehan Al dengan bahan bakar U_3Si_2 membentuk senyawa $U(Al,Si)_x$ dengan mengeluarkan panas sebesar $\Delta H = -47,4639$ J/g. Reaksi pembentukan senyawa $U(Al,Si)_x$ tersebut terjadi sangat kecil. Hal ini terlihat dari puncak eksotermik yang terbentuk sangat kecil dan kandungan Al di dalam paduan AlMg2 juga terikat dengan Mg cukup stabil. Namun setelah mengalami reaksi termokimia eksotermik dan membentuk senyawa $U(Al,Si)_x$, paduan AlMg2 +

U_3Si_2 tersebut mengalami penurunan aliran panas yang menunjukkan hantaran panas dalam paduan menjadi berkurang dibanding dengan sebelum paduan tersebut mengalami reaksi termokimia endotermik, seperti yang terlihat pada Gambar 6 di atas.

IV. KESIMPULAN

Paduan AlFeNi pada komposisi Fe 2,5 % dan Ni 1,5 % dengan bahan bakar U_3Si_2 mengalami reaksi endotermik pada temperatur 672,65 °C dengan membutuhkan panas sebesar $\Delta H = 108,1812$ J/g. Pada temperatur 683,70 °C hingga temperatur 693,24 °C terjadi reaksi termokimia eksotermik yang menunjukkan terjadinya reaksi antara lelehan unsur Al dengan unsur Fe dan Ni secara langsung membentuk senyawa Al-FeAl₃ dan Al-NiAl₃. Selain terjadi pembentukan senyawa Al-FeAl₃ dan Al-NiAl₃ juga terjadi reaksi pembentukan senyawa UAl_x. Sedangkan kelongsong AlMg₂ dengan bahan bakar U_3Si_2 tidak mengalami reaksi termokimia hingga temperatur 600 °C. Namun pada temperatur 659,20 °C bahan tersebut mengalami reaksi endotermik yang menunjukkan terjadinya peleburan kelongsong AlMg₂ dengan panas yang dibutuhkan sebesar $\Delta H = 235,4043$ J/g. Selain terjadi reaksi peleburan pada temperatur 702,37 °C hingga temperatur 737,66 °C, terjadi pula reaksi termokimia eksotermik yang relatif kecil yang menunjukkan adanya reaksi difusi antara lelehan Al dengan bahan bakar U_3Si_2 membentuk senyawa U(Al,Si)_x dengan mengeluarkan panas sebesar $\Delta H = -47,4639$ J/g. Dari kedua reaksi termokimia tersebut dapat diketahui bahwa kompatibilitas paduan AlFeNi dengan U_3Si_2 sebagai kelongsong bahan bakar hingga temperatur 600 °C relatif baik dan cenderung relatif sama dengan kelongsong AlMg₂. Namun di atas temperatur 600 °C, kompatibilitas paduan AlFeNi dengan U_3Si_2 kurang baik karena telah terjadi interaksi kelongsong AlFeNi dengan bahan bakar U_3Si_2 membentuk senyawa baru.

V. DAFTAR PUSTAKA

11. ASLINA GINTING, “Analisis Sifat Termal Paduan AlFeNi sebagai Kelongsong Bahan Bakar Reaktor Riset”, Jurnal Teknologi Bahan Nuklir, PTBN-BATAN, No ISSN 1907-2635, 2008.
12. ASLINA GINTING, “Analisa Termal Pelat Elemen Bakar U_3Si_2 -Al Variasi Tingkat Muat Uranium”, Presentasi Peneliti Muda P2TBDU, Serpong, 19-20 November, 2002.
13. ASLINA BR. GINTING, “Kompatibilitas Bahan Bakar UMo dengan Matrik Al”, Laporan Hasil Penelitian P2TBDU-BATAN, Serpong, 2005.
14. BALLAGNY, A., “Main Technical of the Jules Horowitz Reactor Project to Achieve High Flux Performances and High Safety Level”, <http://www.anl.gov>, akses 2007.
15. BALLAGNY, A., “Situation of Technological Irradiation Reactor. A Progress Report on the Jules Horowitz Reactor Project”, <http://www.anl.gov>, akses 2007.
16. MONDOLFO, L.E., “Aluminium Alloy Structure and Properties”, Butterworths, London-Boston, 1976, pp.532-945.
17. HATCH, J.E., “Aluminium Properties and Physical Metallurgy”, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1984, p.154 .
18. SMITH, W. F., “Principle of Materials Science and Engineering”, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, 1976, pp.134-243.