

ANALISIS SIFAT TERMAL PADUAN AlFeNi SEBAGAI KELONGSONG BAHAN BAKAR REAKTOR RISET

Aslina Br.Ginting, M.Husna Al Hasa, Masrukan
Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir – BATAN
Kawasan PUSPIPTEK, Tangerang 15314

ABSTRAK

ANALISIS SIFAT TERMAL PADUAN AlFeNi SEBAGAI KELONGSONG BAHAN BAKAR REAKTOR RISET. Paduan AlFeNi dengan kandungan Fe dan Ni tertentu dapat digunakan sebagai kelongsong bahan bakar reaktor riset. Untuk itu, telah dilakukan penelitian sifat termal terhadap paduan AlFeNi dengan variasi kandungan Fe dan Ni masing-masing mulai 1% hingga 15% menggunakan *Thermal Analyzer*. Hasil analisis menunjukkan bahwa paduan AlFeNi dengan komposisi Ni dan Fe masing-masing 1% hingga 4% mempunyai temperatur lebur, entalpi peleburan, entalpi pembentukan senyawa AlFeAl₃ dan AlNiAl₃ dan kapasitas panas yang relatif sama. Paduan AlFeNi dengan komposisi Fe dan Ni masing-masing 6% hingga 15% mempunyai temperatur lebur hampir sama dengan AlFeNi pada komposisi 1% hingga 4%, namun mempunyai entalpi peleburan yang lebih kecil dan entalpi pembentukan senyawa AlFeAl₃ dan AlNiAl₃ yang cukup besar. Sementara paduan AlFeNi pada komposisi Fe dan Ni masing-masing 1% hingga 4% mempunyai harga kapasitas panas yang lebih besar dibanding paduan AlFeNi pada komposisi Fe dan Ni masing-masing 6% hingga 15%. Hal ini menunjukkan bahwa paduan AlFeNi dengan kandungan Fe dan Ni masing-masing 1% hingga 4% mempunyai karakter termal yang lebih baik. Namun bila dibandingkan dengan karakter termal kelongsong AlMg₂ dapat diketahui bahwa kelongsong AlMg₂ mempunyai temperatur lebur yang hampir sama dengan paduan AlFeNi sekitar 648,63 °C, tetapi mempunyai entalpi peleburan yang berbeda yaitu sebesar 369,32 J/g untuk AlMg₂ dan sekitar 246,939 J/g untuk paduan AlFeNi. Sedangkan paduan AlFeNi dengan kandungan Fe dan Ni 1% sampai 4% mempunyai kapasitas panas lebih besar dibanding kelongsong AlMg₂. Dari sifat termal dapat disimpulkan bahwa paduan AlFeNi dengan kandungan Fe dan Ni 1% hingga 4% mempunyai sifat termal yang lebih baik dibanding AlMg₂, yang dapat dipelajari lebih lanjut untuk dapat digunakan sebagai alternatif kelongsong bahan bakar reaktor riset.

KATA KUNCI: Sifat termal, Paduan AlFeNi, Kelongsong bahan bakar reaktor riset, Temperatur lebur, Entalpi peleburan, Entalpi pembentukan, Kapasitas panas

ABSTRACT

ANALYSIS OF THERMAL CHARACTERISTICS OF AlFeNi ALLOY AS RESEARCH REACTOR FUEL CLADDING. AlFeNi alloy with specific Fe and Ni composition can be used as research reactor fuel cladding. For this purpose, a study has been conducted to investigate the thermal properties of AlFeNi alloy with variations of Fe and Ni composition from 1% to 15% using *Thermal Analyzer*. The results show that AlFeNi alloys with composition of Fe and Ni respectively from 1% to 4% have similar molten temperature, enthalpy of fusion, enthalpy of formation of AlFeAl₃ and AlNiAl₃ compounds, and heat capacity. AlFeNi alloys with composition from 6% to 15% have relatively similar molten temperature with that of AlFeNi at composition from 1% to 4%, but smaller enthalpy of fusion and fairly large enthalpy of formation of AlFeAl₃ and AlNiAl₃ compounds. Meanwhile AlFeNi alloy with composition from 1% to 4% have

greater heat capacity compared to that of AlFeNi alloy with composition from 6% to 15%. This indicates that AlFeNi alloy with Fe and Ni from 1% to 4% have better thermal properties. However, when compared with thermal character of AlMg₂ cladding, the AlMg₂ cladding has similar molten temperature with AlFeNi about 648,63 °C, but different enthalpy of fusion, 369,32 J/g for AlMg₂ cladding and 246,939 J/g for AlFeNi alloy. Meanwhile AlFeNi alloys having Fe and Ni from 1% to 4% have greater heat capacity compared to that of AlMg₂ cladding. From the thermal properties, it can be concluded that AlFeNi alloy with Fe and Ni composition from 1% to 4% have better thermal properties compared to those of AlMg₂, and this requires further study for the alloy to be used as an alternative material for research reactor fuel cladding.

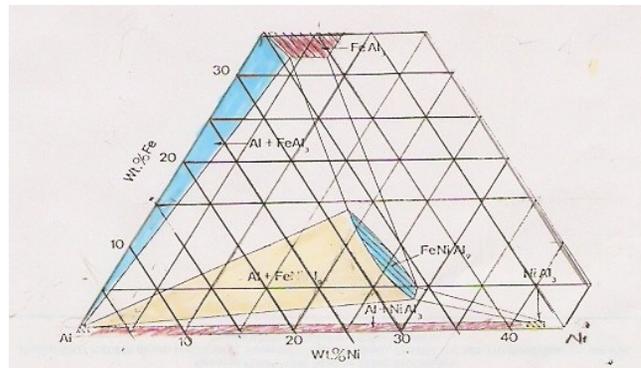
FREE TERMS: Thermal properties, AlFeNi alloy, Research reactor fuel cladding, Molten temperature, Enthalpy of fusion, Enthalpy of formation, Heat capacity

I. PENDAHULUAN

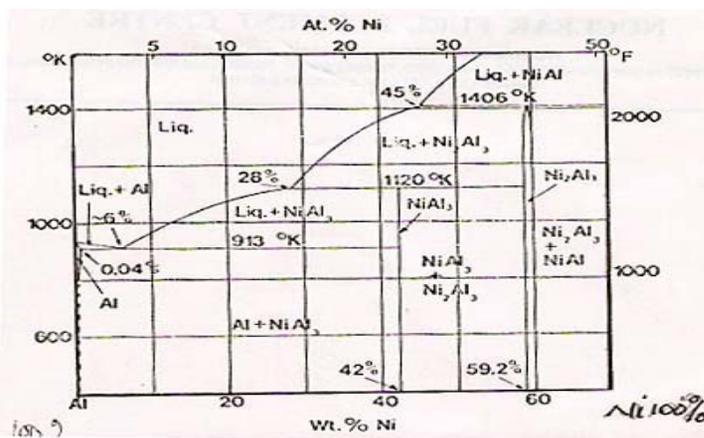
Pencarian bahan bakar nuklir berdensitas tinggi masih terus dilakukan dan dikembangkan oleh RERTR (*Reduced Enrichment for Research and Test Reactor*) untuk digunakan menjadi bahan bakar reaktor riset, khususnya bahan bakar jenis silisida dan molibdenum. Selain dilakukan pengkajian dan pengembangan terhadap bahan bakar nuklir, juga dilakukan pengkajian dan pengembangan terhadap bahan struktur atau kelongsong bahan bakar karena dengan kenaikan tingkat muat uranium di dalam inti elemen bakar dibutuhkan bahan struktur yang kuat dan aman serta tetap memenuhi spesifikasi fabrikasi pelat elemen bakar. Beberapa pihak di dunia telah melakukan penelitian bahan struktur atau kelongsong sejalan dengan pengembangan bahan bakar maju berdensitas tinggi dengan uranium pengayaan rendah^[1]. Pada tingkat pengayaan yang sama, penggunaan bahan bakar nuklir dengan densitas tinggi akan menyebabkan kandungan U₂₃₅ dalam bahan bakar semakin meningkat sehingga dibutuhkan bahan struktur atau kelongsong untuk mengungkung bahan bakar tersebut dengan baik dan aman. Dari hasil penelitian sebelumnya^[2,3], bahan bakar U₃Si₂-Al dengan densitas bahan sekitar 12,5 g/cm³ dapat dibuat menjadi bahan bakar dengan tingkat muat uranium hingga 5,2 gU/cm³. Namun berdasarkan penelitian dan hasil analisis fabrikator ditunjang dengan keselamatan operasi reaktor, pelat elemen bakar U₃Si₂-Al dengan tingkat muat uranium 2,9 gU/cm³ dan 3,6 gU/cm³ sangat baik digunakan sebagai bahan bakar di dalam reaktor^[3]. Sedangkan untuk tingkat muat uranium 4,2 dan 4,8 gU/cm³ data analisis fabrikasi menunjukkan bahwa kedua pelat elemen bakar tersebut tidak mengalami kendala dalam proses fabrikasi meski penggunaannya di dalam reaktor sedang dalam penelitian. Tetapi untuk bahan bakar U₃Si₂-Al dengan tingkat muat uranium 5,2 gU/cm³ mengalami kendala di dalam proses fabrikasi terkait dengan ketebalan kelongsong AlMg₂ yang dipersyaratkan. Bila muatan uranium ditingkatkan menjadi 5,2 gU/cm³, volume inti elemen bakar akan meningkat sehingga berpengaruh terhadap perubahan ketebalan kelongsong AlMg₂. Hal ini tidak diinginkan karena tidak sesuai dengan persyaratan fabrikasi pelat elemen bakar reaktor riset karena ketebalan kelongsong bahan bakar yang dipersyaratkan adalah minimum 0,25 mm dan maksimum 0,36mm^[2,3]. Oleh karena itu, dalam rangka meningkatkan muatan uranium, dilakukan penelitian dan pengembangan bahan bakar reaktor riset untuk mencari bahan struktur sebagai kelongsong bahan bakar densitas lebih tinggi.

Dari pustaka^[4,5,6] diketahui bahwa paduan AlFeNi dengan komposisi sebesar 1,5% Fe dan 2% Ni dapat digunakan sebagai kelongsong bahan bakar nuklir karena mempunyai

ketahanan korosi cukup baik di dalam uap jenuh^[4]. Hal ini didukung oleh diagram fasa AlFeNi seperti yang terlihat pada Gambar 1 dan diagram fasa paduan Al-Ni seperti pada Gambar 2. Dari diagram fasa tersebut dapat diketahui bahwa temperatur campuran dari ketiga unsur masih di bawah titik eutektiknya^[4].



Gambar 1. Diagram fasa paduan AlFeNi



Gambar 2. Diagram fasa paduan Al-Ni

Berdasarkan hasil pustaka tersebut paduan AlFeNi dengan kandungan Fe dan Ni tertentu dapat digunakan sebagai suatu materi alternatif pengganti kelongsong AlMg₂. Fungsi penambahan unsur Fe dan Ni dengan kandungan tertentu pada paduan AlFeNi adalah memberi kekuatan pada bahan, ketahanan terhadap korosi dan juga menambah ketahanan pada temperatur tinggi tanpa menurunkan konduktivitas panasnya, sehingga baik untuk digunakan sebagai kelongsong bahan bakar nuklir^[5,6]. Kajian yang dilakukan oleh beberapa negara menunjukkan hasil bahwa paduan AlFeNi memiliki kestabilan panas, sifat mekanik dan ketahanan korosi yang baik. Namun dari pustaka belum diketahui karakter paduan AlFeNi secara menyeluruh khususnya karakter termal sehingga perlu dilakukan analisis komposisi untuk mengetahui seberapa besar kandungan Fe, Ni dan Al yang harus ditambahkan ke dalam

paduan AlFeNi, agar dapat digunakan sebagai kelongsong bila dikaji dari sifat termalnya. Perbandingan komposisi Al, Fe dan Ni yang dianalisis sifat termalnya diberikan pada Tabel 1. Hasil analisis termal dari beberapa komposisi Fe, Ni dan Al akan dibandingkan dengan data kelongsong AlMg₂ dengan tujuan untuk mengetahui sifat termal yang lebih baik bila digunakan sebagai kelongsong bahan bakar.

Sifat termal yang dianalisis pada penelitian ini adalah pengaruh komposisi Al, Fe dan Ni terhadap sifat termal yang meliputi kapasitas panas, kestabilan panas, entalpi, temperatur lebur dan perubahan fasa, yang dilakukan menggunakan metode *Thermal Analyzer* dan ASTM terkait^[7,8,9]. Hasil analisis ini diharapkan dapat digunakan sebagai langkah awal untuk mengetahui dan mempelajari karakter paduan AlFeNi bila digunakan sebagai kelongsong bahan bakar nuklir sebagai pengganti AlMg₂.

II. TATA KERJA

2.1. Bahan

Bahan AlMg₂ pembanding diperoleh dari PT. BATAN Teknologi Persero. Paduan AlFeNi variasi kandungan Al, Fe dan Ni dari standar NIST dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Paduan AlFeNi variasi kandungan Fe dan Ni

No	Komposisi		
	Fe (%)	Ni (%)	Al (%)
1	Serbuk Fe 99,999	-	-
2	-	Serbuk Ni 99,999	-
3	-	-	Serbuk Al 99,999
Mix 1	1,5	1	97,5
Mix 2	1,5	2	96,5
Mix 3	1,5	2,5	96
Mix 4	1	1,5	97,5
Mix 5	2,5	1,5	96,5
Mix 6	3,5	1,5	95
Mix 7	2	1	97
Mix 8	2	3	95
Mix 9	2	4	94
Mix 10	6	6	84
Mix 11	10	10	80
Mix 12	15	15	70

2.2. Alat

Alat yang digunakan adalah *Thermal Gravimetry – Differential Thermal Analysis* (TG-DTA), SETARAM,1992, dan *Differential Scanning Calorimetry* (DSC), SETARAM ,1992.

2.3. Cara Kerja

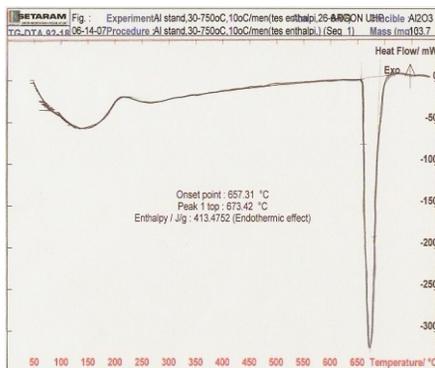
Paduan AlFeNi divariasikan komposisinya dan berat totalnya ditimbang sebanyak 100 mg. Paduan AlFeNi yang sudah diketahui komposisi dan beratnya dimasukkan ke dalam krusibel alumina kemudian diletakkan di dalam *chamber* TG-DTA *rod* dan divakum sampai tekanan

10^{-2} bar. Setelah vakum tercapai, *chamber* dialiri dengan gas argon UHP pada tekanan 2,5 bar. Kemudian DTA *rod* dipanaskan pada temperatur 30 °C sampai 1000 °C dengan laju pemanasan 10 °C/menit. Hasil analisis berupa termogram TG-DTA dievaluasi untuk mengetahui entalpi, kestabilan terhadap panas, perubahan fasa dan temperatur reaksi termik. Sedangkan untuk mengetahui sifat kapasitas panas paduan AlFeNi, dilakukan analisis menggunakan DSC pada kondisi operasi 30 °C sampai 450 °C dengan laju pemanasan 5 °C/menit. Caranya adalah paduan AlFeNi yang sudah diketahui komposisi dengan berat 100 mg dimasukkan ke dalam krusibel aluminium, kemudian diletakkan di dalam *chamber* DSC dan dialiri gas argon 2,5 mbar. Dari hasil analisis dengan DSC akan diperoleh besaran kapasitas panas sebagai fungsi temperatur.

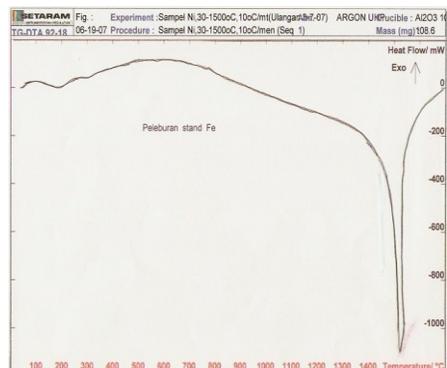
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Analisis Entalpi, Temperatur Lebur, Kestabilan Panas dan Perubahan Fasa

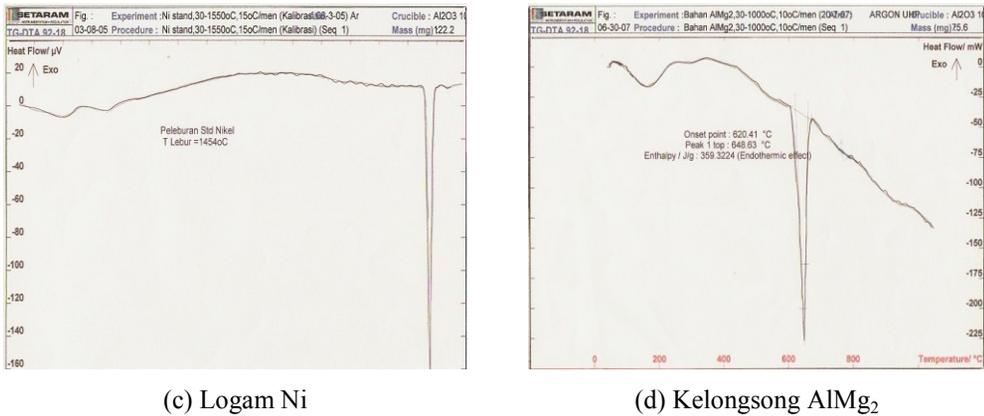
Analisis entalpi, temperatur lebur, kestabilan panas dan perubahan fasa dari bahan Al 99,999%, Fe 99,999%, Ni 99,999%, kelongsong AlMg₂ dan paduan AlFeNi variasi kandungan Fe dan Ni telah dianalisis menggunakan TG-DTA. Hasil analisis yang diperoleh berupa besaran entalpi dan temperatur lebur ditandai dengan adanya perubahan aliran panas dengan terjadinya pembentukan puncak endotermik pada termogram DTA Al 99,999%, Fe 99,999%, Ni 99,999% dan kelongsong AlMg₂ seperti terlihat pada Gambar 3(a) sampai 3(d), sedangkan besaran temperatur lebur dan entalpinya dituangkan pada Tabel 2. Dari Gambar 3(a) dapat diketahui bahwa Al 99,999% sangat stabil terhadap panas sampai 650 °C. Di atas temperatur tersebut, dari termogram DTA diketahui bahwa logam Al 99,999% mengalami reaksi peleburan pada temperatur 657,31 °C yang ditandai dengan pembentukan reaksi endotermik dengan panas yang dibutuhkan sebesar 399,45 J/g. Unsur Fe 99,999% dan Ni 99,999% masing-masing mempunyai kestabilan panas hingga 1530 °C dan 1450 °C sedangkan di atas temperatur tersebut masing masing unsur Fe 99,999% dan Ni 99,999% telah mengalami peleburan.



(a) Logam Al.



(b) Logam Fe



(c) Logam Ni

(d) Kelongsong AlMg₂

Gambar 3. Termogram DTA

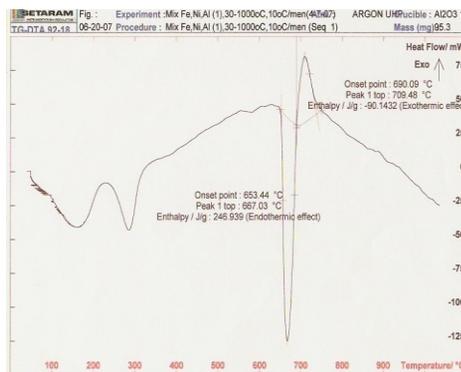
Tabel 2. Temperatur lebur dan entalpi logam Al, Fe dan Ni

Unsur	Temperatur lebur sertifikat NIST (°C)	Entalpi sertifikat NIST (J/g)	Temperatur lebur pengukuran (°C)	Entalpi pengukuran (J/g)	Akurasi (%)
Al 99,999%	658,5	396,90	657,31	399,45	99,35
Fe 99,999%	1530	267,54	1535,2	273,84	97,65
Ni 99,999%	1452	300,30	1454	303,24	99,02
AlMg ₂	650,5	374,48	648,63	369,32	98,62

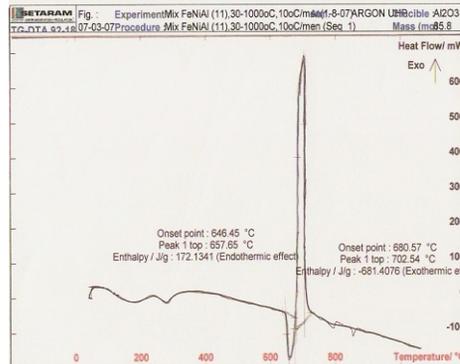
Logam Fe 99,999% mengalami reaksi peleburan pada temperatur 1535,2 °C yang membutuhkan panas sebesar 273,84 J/g. Logam Ni 99,999% mengalami reaksi peleburan yang ditunjukkan oleh pembentukan reaksi endotermik pada temperatur 1454 °C yang membutuhkan panas sebesar 303,24 J/g, sedangkan kelongsong AlMg₂ mengalami reaksi peleburan pada temperatur 648,63 °C dan membutuhkan panas untuk melakukan peleburan tersebut sebesar 369,32 J/g seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3(a) – 3(d). Dari hasil di atas dapat diketahui bahwa besaran entalpi dan temperatur lebur dari logam Al 99,999%, Fe 99,999% dan Ni 99,999% sesuai dengan besaran temperatur lebur dan entalpi dari sertifikat NIST dan besaran temperatur lebur dan entalpi kelongsong AlMg₂ sesuai dengan sertifikat PT. BATAN Teknologi Persero. Hal ini dibuktikan oleh besaran akurasi yang diperoleh secara keseluruhan yang berada di atas nilai 95% seperti yang dipersyaratkan oleh fabrikasi *Thermal Analyzer* SETARAM Perancis^[7,10,11].

Analisis termal yang dilakukan terhadap paduan AlFeNi dengan variasi Fe dan Ni seperti yang terdapat pada *mix* 1 hingga *mix* 9 mengalami reaksi termokimia membentuk puncak endotermik pada temperatur 647,76 °C hingga 653,44 °C dengan membutuhkan panas sekitar 236,228 J/g hingga 293,419 J/g seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4 dan Tabel 3. Reaksi endotermik tersebut menunjukkan terjadinya peleburan unsur Al dalam paduan AlFeNi. Lelehan

unsur Al tersebut secara langsung bereaksi dengan unsur Fe dan Ni pada temperatur 685,52 °C hingga temperatur 696,79 °C pada titik eutektiknya dan membentuk senyawa AlFeAl_3 dan AlNiAl_3 ^[4] seperti yang terlihat pada diagram fasa AlFeNi pada Gambar 1 dan Gambar 2. Adanya reaksi lelehan Al dengan Fe dan Ni ditunjukkan oleh reaksi eksotermik yang terjadi secara langsung dengan melepaskan sejumlah panas sekitar 92,837 J/g sampai 97,514 J/g yang ditabulasikan pada Tabel 3. Dari hasil ini dapat diketahui bahwa paduan AlFeNi dengan komposisi paduan pada *mix* 1 sampai *mix* 9 mempunyai temperatur lebur dan besaran entalpi yang hampir sama, baik untuk reaksi endotermik maupun reaksi eksotermik. Hal ini menunjukkan bahwa paduan *mix* 1 sampai *mix* 9 mempunyai karakteristik termal yang hampir sama, sedangkan paduan AlFeNi dengan komposisi pada *mix* 10 sampai *mix* 12 mempunyai temperatur lebur yang sama yakni 647,97 °C tetapi besaran entalpi reaksi endotermik dan entalpi reaksi eksotermik yang berbeda. Besaran entalpi reaksi endotermik atau entalpi peleburan sangat dipengaruhi oleh komposisi unsur Al di dalam paduan AlFeNi^[12,13]. Sedangkan entalpi reaksi eksotermik atau entalpi reaksi pembentukan senyawa sangat dipengaruhi besarnya lelehan Al yang berinteraksi dan bereaksi dengan Fe dan Ni. Lelehan Al secara langsung bereaksi dengan Fe dan Ni membentuk senyawa AlFeAl_3 dan AlNiAl_3 secara eksotermik dengan melepaskan sejumlah panas yang cukup besar masing masing -268,150 J/g, -376,777 J/g dan -681,408 J/g seperti yang terlihat pada Gambar 5 dan Tabel 3. Reaksi eksotermik pembentukan fasa AlFeAl_3 dan AlNiAl_3 ^[4] didukung oleh diagram fasa AlFe Ni seperti yang terlihat pada Gambar 1 dan Gambar 2. Fenomena dalam kelongsong bahan bakar ini tidak diinginkan karena dapat mengurangi kekuatan mekanik dan mengubah sifat bahan kelongsong AlFeNi. Terjadinya reaksi eksotermik pada paduan AlFe Ni dengan komposisi paduan *mix* 10 sampai *mix* 12 yang mengeluarkan panas cukup besar disebabkan karena adanya perbedaan energi potensial atau tegangan karena panas dari paduan AlFeNi. Hal ini dapat menyebabkan paduan AlFeNi yang fungsinya sebagai kelongsong atau pembungkus bahan bakar tidak kompatibel lagi dengan bahan bakar.



Gambar 4. Termogram DTA paduan AlFeNi *mix* 1



Gambar 5. Termogram DTA paduan AlFe Ni mix 12

Tabel 3. Temperatur dan entalpi reaksi termokimia paduan AlFeNi

Paduan	Fe (%)	Ni (%)	Al (%)	Temperatur reaksi endotermik (°C)	Entalpi reaksi endotermik (J/g)	Temperatur reaksi eksotermik (°C)	Entalpi reaksi eksotermik (J/g)
Mix 1	1,5	1	97,5	653,44	246,939	690,09	-90,143
Mix 2	1,5	2	96,5	652,09	246,038	691,29	-97,417
Mix 3	1,5	2,5	96	651,60	246,550	690,63	-96,596
Mix 4	1	1,5	97,5	647,97	265,178	685,07	-97,514
Mix 5	2,5	1,5	96,5	647,78	254,468	686,86	-95,574
Mix 6	3,5	1,5	95	647,68	246,228	686,25	-94,851
Mix 7	2	1	97	649,15	261,580	696,79	-95,888
Mix 8	2	3	95	648,60	245,773	692,45	-92,837
Mix 9	2	4	94	647,76	243,419	692,45	-94,421
Mix 10	6	6	88	647,97	225,047	685,52	-268,150
Mix 11	10	10	80	647,47	212,553	685,97	-376,777
Mix 12	15	15	70	647,11	172,134	685,68	-681,408

3.2. Analisa Kapasitas Panas

Hasil analisis kapasitas panas dilakukan terhadap logam Al 99,999%, Fe 99,999%, Ni 99,999%, dan kelongsong $AlMg_2$ yang dituangkan dalam Tabel 4. Sedangkan hasil analisis kapasitas panas paduan AlFeNi variasi kandungan Fe dan Ni seperti pada Tabel 1 ditunjukkan pada Tabel 5. Hasil analisis yang diperoleh menunjukkan bahwa kapasitas panas logam Al, logam Fe, logam Ni dan kelongsong $AlMg_2$ tidak jauh berbeda dengan besaran kapasitas panas dari pustaka^[10,11], yaitu kapasitas panas Al 99,999% sebesar 0,950 J/g °C, Fe 99,999% sebesar 0,484 J/g °C, logam Ni sebesar 0,457 J/g °C dan kelongsong $AlMg_2$ sebesar 0,67 J/g °C pada temperatur 95,81 °C seperti terlihat pada Tabel 4. Sedangkan hasil analisis kapasitas panas paduan logam AlFeNi variasi kandungan Fe dan Ni ditabulasikan pada Tabel 5(a) dan 5(b). Dari tabel tersebut terlihat bahwa besaran panas paduan AlFeNi sangat dipengaruhi oleh kandungan Al yang terdapat dalam paduan tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan kandungan Fe dan Ni masing-masing sebesar 1% hingga 4% seperti pada *mix* 1 hingga *mix* 9 tidak mengubah besaran kapasitas panas dari paduan AlFeNi tersebut secara signifikan. Hasil ini menunjukkan bahwa paduan AlFeNi dengan variasi Fe dan Ni yang terdapat pada *mix* 1 hingga *mix* 9 tidak mempunyai

perbedaan kapasitas panas hingga temperatur 450 °C, tetapi besaran kapasitas panas di atas temperatur 450 °C terhadap paduan AlFeNi masih perlu diteliti lebih lanjut. Penambahan kandungan Fe dan Ni masing-masing sebesar 6 % hingga 15% seperti pada *mix* 10 hingga *mix* 12 mengubah besaran kapasitas panas paduan AlFeNi tersebut seperti yang terlihat pada Tabel 5(b). Hasil ini menunjukkan bahwa paduan AlFeNi dengan variasi Fe dan Ni pada *mix* 10 hingga *mix* 12 memberikan besaran kapasitas panas yang lebih kecil dari paduan AlFeNi yang terdapat pada *mix* 1 sampai *mix* 9. Hal ini didukung oleh analisis entalpi dengan DTA yang menunjukkan bahwa terjadi pelepasan panas yang lebih besar pada paduan AlFeNi dengan *mix* 9 sampai *mix* 12 sehingga menyebabkan kapasitas panas menurun. Penurunan kapasitas panas paduan AlFeNi tidak diinginkan jika digunakan sebagai kelongsong bahan bakar karena dapat mengurangi hantaran panas dari inti elemen bakar ke air pendingin melalui kelongsong AlFeNi dan juga menyebabkan kemungkinan terjadinya akumulasi panas di dalam bahan bakar yang dapat mengakibatkan terjadinya *swelling*.

Tabel 4. Kapasitas panas (J/g °C) Al 99,999%; Fe 99,999%; Ni 99,999%; dan AlMg₂

Temperatur (°C)	Al 99,999%	Fe 99,999%	Ni 99,999%	AlMg ₂
55,45	0,70	0,48	0,45	0,65
75,65	0,81	0,49	0,47	0,66
95,81	0,95	0,49	0,44	0,66
115,91	0,97	0,52	0,46	0,67
136,15	1,00	0,58	0,50	0,72
156,22	1,05	0,56	0,49	0,72
176,31	1,09	0,53	0,46	0,72
196,66	1,12	0,52	0,44	0,73
216,66	1,14	0,52	0,43	0,73
236,73	1,15	0,55	0,45	0,73
256,85	1,15	0,58	0,48	0,75
276,96	1,15	0,61	0,50	0,76
297,03	1,15	0,63	0,52	0,77
317,21	1,16	0,65	0,53	0,77
337,30	1,16	0,66	0,53	0,77
357,37	1,16	0,69	0,52	0,79
377,51	1,16	0,72	0,53	0,82
397,61	1,21	0,76	0,53	0,87
417,73	1,25	0,80	0,54	0,89
437,78	1,22	0,80	0,53	0,89

Tabel 5 (a). Kapasitas panas (J/g °C) paduan AlFeNi variasi kandungan Fe dan Ni

Temperatur (°C)	Mix 1	Mix 2	Mix 3	Mix 4	Mix 5	Mix 6
55,45	0,76	0,74	0,75	0,69	0,68	0,67
75,65	0,78	0,76	0,76	0,78	0,72	0,74
95,81	0,87	0,70	0,76	0,77	0,74	0,78
115,91	0,89	0,80	0,88	0,88	0,85	0,82
136,15	0,95	0,87	0,95	0,94	0,94	0,92
156,22	0,99	0,93	0,99	0,98	1,00	1,01
176,31	1,03	0,98	1,03	1,02	1,04	1,03
196,66	1,07	1,03	1,07	1,06	1,07	1,08
216,66	1,10	1,06	1,11	1,09	1,09	1,09
236,73	1,10	1,07	1,12	1,10	1,09	1,10
256,85	1,09	1,05	1,11	1,09	1,07	1,06
276,96	1,05	1,01	1,08	1,05	1,04	1,05
297,03	1,01	0,97	1,04	1,01	1,01	1,03
317,21	0,98	0,93	1,02	0,97	0,99	0,99
337,30	0,98	0,92	1,01	0,96	0,99	0,98
357,37	1,01	0,94	1,04	0,98	1,02	1,01
377,51	1,07	1,00	1,10	1,04	1,09	1,10
397,61	1,14	1,06	1,17	1,11	1,16	1,16
417,73	1,18	1,09	1,21	1,15	1,20	1,18
437,78	1,10	1,00	1,13	1,09	1,13	1,12

Tabel 5 (b). Kapasitas panas (J/g °C) paduan AlFeNi variasi kandungan Fe dan Ni

Temperatur (°C)	Mix 7	Mix 8	Mix 9	Mix 10	Mix 11	Mix 12
55,45	0,67	0,68	0,67	0,66	0,42	0,41
75,65	0,75	1,03	0,81	0,71	0,45	0,43
95,81	0,79	1,01	0,78	0,65	0,47	0,45
115,91	0,90	1,01	0,88	0,78	0,59	0,49
136,15	0,97	1,04	0,95	0,85	0,66	0,56
156,22	1,02	1,09	1,00	0,89	0,68	0,62
176,31	1,06	1,16	1,04	0,92	0,69	0,65
196,66	1,09	1,21	1,07	0,96	0,71	0,68
216,66	1,12	1,23	1,10	0,98	0,74	0,71
236,73	1,13	1,23	1,10	0,99	0,76	0,73
256,85	1,12	1,19	1,08	0,97	0,76	0,74
276,96	1,10	1,14	1,05	0,94	0,74	0,76
297,03	1,06	1,08	1,00	0,89	0,71	0,74
317,21	1,04	1,03	0,97	0,86	0,68	0,67
337,30	1,03	1,01	0,96	0,86	0,67	0,65
357,37	1,06	1,02	0,98	0,89	0,69	0,65
377,51	1,10	1,06	1,03	0,95	0,73	0,69
397,61	1,15	1,11	1,10	1,04	0,79	0,73
417,73	1,17	1,14	1,14	1,08	0,83	0,71
437,78	1,10	1,09	1,08	1,00	0,77	0,68

IV. KESIMPULAN

Dari analisis termal yang dilakukan menggunakan alat DTA dan DSC, dapat disimpulkan bahwa paduan AlFeNi dengan komposisi Fe dan Ni masing-masing 1% sampai 4% mempunyai temperatur lebur, entalpi peleburan, entalpi pembentukan senyawa AlFeAl_3 dan AlNiAl_3 dan kapasitas panas yang relatif sama. Paduan AlFeNi dengan komposisi Fe dan Ni masing-masing 6% sampai 15% mempunyai temperatur lebur yang hampir sama dengan AlFeNi pada komposisi Fe dan Ni masing-masing 1% sampai 4%, namun mempunyai entalpi peleburan lebih kecil dan entalpi pembentukan senyawa AlFeAl_3 dan AlNiAl_3 yang cukup besar. Paduan AlFeNi dengan komposisi Fe dan Ni masing-masing 1% sampai 4% mempunyai harga kapasitas panas yang lebih besar dibanding paduan AlFeNi dengan komposisi Fe dan Ni 6% sampai 15%. Hal ini menunjukkan bahwa paduan AlFeNi dengan kandungan Fe dan Ni 1% sampai 4% mempunyai karakter termal yang sama. Namun bila dibandingkan dengan karakter termal kelongsong AlMg_2 dapat diketahui bahwa kelongsong AlMg_2 mempunyai temperatur lebur yang hampir sama dengan paduan AlFeNi sekitar 648,63 °C, tetapi mempunyai entalpi peleburan yang berbeda yaitu sebesar 369,32 J/g untuk AlMg_2 dan 246,939 J/g untuk paduan AlFeNi. Kapasitas panas paduan AlFeNi dengan kandungan Fe dan Ni 1% sampai 4% lebih besar dari kelongsong AlMg_2 . Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa paduan AlFeNi dengan kandungan Fe dan Ni sekitar 1% sampai 4% mempunyai sifat termal yang lebih baik dibanding AlMg_2 , yang dapat dipelajari lebih lanjut untuk digunakan sebagai alternatif kelongsong bahan bakar reaktor riset.

V. DAFTAR PUSTAKA

1. ANONYMOUS, "Reduced Enrichment for Research and Test Reactor", Proceeding of the 18th International Meeting, Paris, 17-21 September 1995.
2. ASLINA BR. GINTING, "Analisa Termal Pelat Elemen Bakar U_3Si_2 -Al Variasi Tingkat Muat Uranium", Presentasi Peneliti Muda P2TBDU, Serpong, 19-20 Nopember 2002.
3. ASLINA BR GINTING, "Kompatibilitas Bahan Bakar Umo dengan Matrik Al", Laporan Hasil Penelitian P2TBDU, 2005.
4. MONDOLFO, L.E., "Aluminium Alloy Structure and Properties", Butterworths, London-Boston, 1976, pp. 532 and 945.
5. BALLAGNY, A., "Main Technical of the Jules Horowitz Reactor Project to Achieve High Flux Performances and High Safety Level", <http://www.anl.gov>.
6. BALLAGNY, A., "Situation of Technological Irradiation Reactor", A Progress Report on the Jules Horowitz Reactor Project, <http://www.anl.gov>.
7. SETARAM, Manual Operation TGDTA-DSC, France, 1992.
8. ANONIM, "Thermal Methods of Analysis", Analytical Chemistry Measurement for Thermal Analysis, 1979.
9. ASTM STANDARD, "Determining Specific Heat Capacity by Differential Scanning Calorimeter", No. E 1269-01, Vol.14-02, 2002.
10. ROBERT, L.A., "Practical Statistic of Analytical Chemist", Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1987, p.135.
11. ROBERT, P.H., "Chemical Engineers Handbook", 6th ed., McGraw-Hill, Chapter 3, Table 3-18, 1984.
12. HATCH, J.E., "Aluminium Properties and Physical Metallurgy", American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1984, p.154.
13. SMITH, W.F., "Principle of Materials Science and Engineering, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, 1976, pp. 134 and 243.