

ANALISIS TERMAL PADUAN AlMgSi UNTUK KELONGSONG BAHAN BAKAR U_3Si_2 -Al DENSITAS TINGGI

Aslina Br.Ginting

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir –BATAN

Kawasan Puspiptek, Serpong Tangerang

ABSTRAK

ANALISIS TERMAL PADUAN AlMgSi UNTUK KELONGSONG BAHAN BAKAR U_3Si_2 -Al DENSITAS TINGGI. Penggunaan bahan bakar nuklir densitas tinggi harus didukung dengan penggunaan kelongsong yang kompatibel dengan bahan bakar yang dikungkungnya. Hal ini penting mengingat bahan bakar berdensitas tinggi mempunyai kekerasan yang lebih tinggi. Sehingga bila digunakan paduan AlMg2 sebagai kelongsong bahan bakar densitas tinggi dapat terjadi efek *dogbone* pada saat proses perolan. Oleh karena itu perlu mencari alternatif pengganti bahan kelongsong AlMg2 yang digunakan Batan Teknologi pada saat ini. Salah satunya adalah paduan AlMgSi yang mempunyai sifat kimia, dan sifat fisik lebih baik dari kelongsong AlMg2, sehingga paduan tersebut dapat menjadi sebagai alternatif kelongsong bahan bakar densitas tinggi $4,8 \text{ gU/cm}^3$. Pada penelitian ini telah dilakukan analisis sifat kimia dan sifat termal terhadap PEB U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ menggunakan kelongsong AlMgSi dan terhadap PEB U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ menggunakan kelongsong AlMg2. Analisis termal meliputi analisis stabilitas panas, kapasitas panas, entalpi, temperatur lebur, konduktivitas panas, koefisien muai panjang dan selanjutnya kedua hasil analisisnya dibandingkan. Hasil analisis menunjukkan bahwa kelongsong AlMgSi maupun AlMg2 mempunyai kompatibilitas dengan bahan bakar U_3Si_2 -Al cukup baik dan stabil terhadap panas hingga temperatur 650°C , diatas temperatur 650°C kelongsong AlMgSi, AlMg2 maupun PEB U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ telah mengalami reaksi endotermik. Reaksi endotermik tersebut menunjukkan reaksi peleburan kelongsong AlMgSi, AlMg2 maupun matrik Al. Kelongsong AlMgSi maupun AlMg2 mempunyai temperatur lebur dan entalpi peleburan yang tidak jauh berbeda tetapi kelongsong AlMgSi mempunyai kapasitas panas, konduktivitas panas lebih besar serta mempunyai koefisien muai panjang lebih kecil dibanding kelongsong AlMg2. Dari hasil analisis termal menunjukkan bahwa PEB U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ menggunakan kelongsong AlMgSi jauh lebih baik dibanding PEB U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ menggunakan kelongsong AlMg2. Hasil analisis karakter kelongsong AlMgSi ini diharapkan dapat menjadi sebagai masukan kepada kelompok modeling dan fabrikator bahan bakar reaktor riset PEB U_3Si_2 -Al untuk mendesain elemen bakar reaktor riset dengan muatan uranium yang tinggi menggunakan kelongsong AlMgSi.

Kata Kunci : Sifat termal, bahan bakar U_3Si_2 -Al, densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$, Kelongsong AlMgSi.

ABSTRACT

THERMAL ANALYSIS OF AlMgSi ALLOY FOR U_3Si_2 -Al HIGH DENSITY FUEL CLADDING. The utilization of high-density nuclear fuel must be supported by cladding material that is compatible with the fuel it contains considering that high-density fuel possesses greater hardness. If AlMg2 alloy is used as high density fuel cladding, dog bone effect may occur during rolling. For this reason,

alternate cladding material is being investigated to replace the AlMg2 cladding currently employed by Batan Teknologi. One of the candidates is AlMgSi alloy which exhibits better chemical and physical properties compared to AlMg2 cladding, thus the alloy is regarded as suitable for high uranium density of 4.8 gU/cm³. In addition, the fabrication process of AlMgSi alloy as a cladding for U₃Si₂-Al fuel plate with a uranium density of 4.8 gU/cm³ is almost similar as that of the AlMg2 cladding. In this experiment have been done thermal and chemical of properties toward U₃Si₂-Al fuel plates with density of 4.8 gU/cm³ used AlMgSi cladding and U₃Si₂-Al fuel plates used AlMg2 cladding. To establish the better chemical and thermal properties of the AlMgSi cladding compared to the AlMg2 cladding, a range of analyses are performed on U₃Si₂-Al fuel plates having a uranium density of 4.8 gU/cm³ that employ AlMgSi and AlMg2 claddings. These include thermal analyses, i.e. heat stability, heat capacity, melting enthalpy, melting point, thermal conductivity, and coefficient of linear thermal expansion, the two sets of results are compared. It is revealed that both AlMgSi and AlMg2 claddings show good compatibility with U₃Si₂-Al fuel and also good thermal stability up to 650 °C, above which the AlMgSi, AlMg2 cladding and U₃Si₂-Al fuel plate having a uranium density of 4.8 gU/cm³ undergo endothermic reaction. The endothermic reaction signifies melting of AlMgSi, AlMg2 and Al matrix. AlMgSi and AlMg2 claddings have similar melting point and melting enthalpy, but AlMgSi cladding has greater heat capacity, and thermal conductivity as well as smaller coefficient of linear thermal expansion compared to AlMg2 cladding. The results from thermal analysis show that U₃Si₂-Al fuel plate with a uranium density of 4.8 gU/cm³ that employs AlMgSi cladding is significantly better than the one employing AlMg2 cladding. The characteristics of the AlMgSi cladding obtained in this study are expected to serve as inputs to the modeling group and fabricator of research reactor fuel, i.e. U₃Si₂-Al fuel plate, in designing research reactor fuel with a high uranium density using AlMgSi cladding.

Keywords: Thermal properties, U₃Si₂-Al fuel, uranium density of 4.8 g/cm³, AlMgSi, cladding

PENDAHULUAN

Pada tahun 1998 yang lalu Indonesia dalam hal ini BATAN telah melakukan fabrikasi pelat elemen bakar (PEB) jenis silisida U₃Si₂-Al dengan densitas 2,9 g/cm³ sebagai pengganti elemen bakar lama jenis oksida U₃O₈-Al. Pada tahun 2001 BATAN telah berhasil pula memasukkan bahan bakar silisida U₃Si₂-Al dengan densitas 2,9 g/cm³ ke seluruh teras Reaktor Serba Guna G.A.Siwabessy Serpong (*All Indonesian Core*). Dari hasil penelitian yang telah dilakukan yang dikaitkan dengan keselamatan operasi reaktor diperoleh hasil bahwa bahan bakar jenis silisida U₃Si₂-Al dengan densitas 2,9 g/cm³ mempunyai kinerja (*performance*) yang tidak jauh berbeda dengan bahan bakar lama yaitu jenis oksida U₃O₈-Al^[2,3]. Oleh karena itu, Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir (PTBN) terus melakukan penelitian dan pengembangan dan merencanakan pembuatan elemen bakar

uranium silisida dengan densitas yang lebih tinggi dari 2,9 gU/cm³ yaitu 3,6 ; 4,2 ; 4,8 dan 5,2 gU/cm³ sebagai pengganti elemen bakar lama U₃O₈-Al. Dipilihnya bahan bakar jenis uranium silisida karena mempunyai densitas yang lebih tinggi sekitar 12,5 g/cm³ sehingga dapat dimuati dengan kandungan U₂₃₅ hingga tingkat muat uranium 6 gU/cm³, sedangkan elemen bakar lama U₃O₈-Al mempunyai densitas 8,6 g/cm³ sehingga hanya dapat dimuati oleh kandungan U₂₃₅ dengan densitas 2,96 gU/cm³. Selain kehandalannya, proses fabrikasi uranium silisida tidak jauh berbeda dengan fabrikasi elemen bakar tipe pelat U₃O₈-Al menggunakan kelongsong AlMg2 yang ada di Batan Teknologi Persero saat ini. Meningkatnya densitas bahan bakar tersebut dapat meningkatkan siklus operasi reaktor^[2]. Perpanjangan siklus operasi ini menyebabkan waktu tinggal (*life time*) bahan bakar di dalam

reaktor lebih lama yang dapat mengurangi penggantian bahan bakar (*refuelling*) sehingga efisiensi dan ekonomisasi daur bahan bakar akan lebih meningkat.

Berdasarkan penelitian dan hasil analisis fabrikator ditunjang dengan keselamatan operasi reaktor bahwa pelat elemen bakar U_3Si_2 -Al dengan densitas uranium 2,9 dan 3,6 gU/cm³ sangat baik di gunakan sebagai bahan bakar di dalam reaktor^[3,4]. Sedangkan untuk densitas uranium 4,2 dan 4,8 gU/cm³ data analisis fabrikasi menunjukkan bahwa kedua pelat elemen bakar tersebut tidak mengalami kendala dalam proses fabrikasi tetapi penggunaannya di dalam reaktor sedang dalam penelitian. Tetapi untuk bahan bakar U_3Si_2 -Al dengan densitas uranium 5,2 gU/cm³ di dalam proses fabrikasi mengalami kendala dalam hal ketebalan kelongsong AlMg2 yang dipersyaratkan. Bila muatan uranium ditingkatkan menjadi 5,2 gU/cm³ menyebabkan kekerasan inti elemen bakar akan meningkat sehingga akan berpengaruh terhadap proses perolan kelongsong AlMg2. Hal ini tidak diinginkan karena terjadi fenomena *dogbone* pelat elemen bakar reaktor riset^[3,4,5]. Oleh karena itu dalam meningkatkan muatan uranium, dilakukan penelitian dan pengembangan bahan struktur kelongsong bahan bakar densitas lebih tinggi. Seiring dengan berkembangnya penggunaan bahan bakar yang mempunyai densitas lebih tinggi baik jenis U_3Si_2 -Al maupun UMo-Al, maka perlu mengembangkan kelongsong yang lebih kompatibel dengan bahan bakar. Hal ini penting mengingat bahan bakar berdensitas tinggi mempunyai kekerasan yang lebih tinggi, sehingga bila digunakan kelongsong AlMg2 pada saat perolan dapat terjadi efek *dogbone*^[6]. Perkembangan itu, perlu mencari beberapa alternatif bahan kelongsong sebagai pengganti kelongsong AlMg2 yang digunakan Batan Teknologi pada saat ini.

Paduan AlMgSi merupakan paduan aluminium dengan kandungan unsur pepadu utama adalah Mg dan Si yang mudah diperoleh

di pasaran^[7]. Penambahan unsur paduan tersebut pada logam aluminium dapat menghasilkan kondisi yang larut padat atau menghasilkan senyawa logam fasa kedua. Dengan demikian terjadinya peningkatan kekuatan dan kekerasan paduan AlMgSi disebabkan oleh penguatan larut padat dan penguatan fasa kedua. Penguatan dengan fasa kedua yang terjadi pada paduan AlMgSi dapat ditingkatkan lagi dengan cara mengusahakan agar fasa kedua yang terjadi berbentuk partikel halus berupa endapan yang terdistribusi secara merata. Penguatan seperti ini dikenal dengan pengerasan endapan (*precipitation hardening*). Paduan AlMgSi juga termasuk dalam paduan yang dapat dikeraskan dengan perlakuan panas (*heat treatable alloy*)^[8,9] serta partikel halus yang terdapat pada paduan AlMgSi dapat dimanfaatkan pula sebagai tempat berkumpulnya cacat titik yang diakibatkan oleh panas atau radiasi, sebagai akibatnya berdampak baik kepada penurunan elongasi atau *swelling* bahan bakar, sehingga sangat baik digunakan sebagai kelongsong bahan bakar nuklir. Kondisi demikian ini merupakan keunggulan paduan AlMgSi dan merupakan perbedaan yang sangat mendasar bila dibandingkan dengan kelongsong AlMg2 yang *non heat treatable alloy*.

Selain keunggulannya, proses fabrikasi pembuatan paduan AlMgSi menjadi kelongsong hampir sama dengan proses fabrikasi pembuatan kelongsong AlMg2. Tahapannya meliputi penyiapan, perolan dan anil kelongsong AlMgSi menjadi *frame* dan *cover* yang dilanjutkan dengan pembuatan pelat elemen bakar (PEB) U_3Si_2 -Al densitas 4,8 gU/cm³. Perbedaan proses fabrikasi PEB U_3Si_2 -Al menggunakan kelongsong AlMgSi adalah pada temperatur perolan dan anil, proses perolan kelongsong AlMg2 dilakukan pada temperatur 415°C yang di ikuti proses anil pada 425°C sedangkan kelongsong AlMgSi di rol pada temperatur 450°C dan dianil pada 480°C. Disamping itu paduan AlMgSi juga mempunyai keunggulan lain dibanding kelongsong AlMg2

yang sangat erat kaitannya dengan persyaratan yang harus dimiliki oleh kelongsong bahan bakar densitas tinggi yaitu sifat kimia dan sifat fisik, sehingga keunggulan kelongsong AlMgSi perlu dibuktikan dengan cara membandingkan dengan kelongsong AlMg2.

TATA KERJA

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah kelongsong AlMgSi as received, AlMg2 as received, AlMgSi rol, AlMg2 rol, PEB U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ (dengan kelongsong AlMgSi) dan PEB U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ (dengan kelongsong AlMg2). Sebelum PEB U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ di fabrikasi, terhadap bahan baku bahan bakar U_3Si_2 -Al tersebut terlebih dahulu dianalisis komposisi kimianya menggunakan Titroprocessor. Setelah diketahui perbandingan komposisi kimia U_3Si_2 : Al, selanjutnya diproses lebih lanjut menjadi inti elemen bakar (IEB) U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ yang dilanjutkan dengan pembuatan pelat elemen bakar (PEB) U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$. Kemudian dilakukan analisis

termal terhadap kelongsong AlMgSi as received, AlMg2 as received, AlMgSi rol, AlMg2 rol, PEB U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ (dengan kelongsong AlMgSi) dan PEB U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ (dengan kelongsong AlMg2) menggunakan DTA (*Differential Thermal Analysis*) dan DSC (*Differential Scanning Calometry*). Hasil analisis termal berupa termogram DTA dan DSC kemudian di evaluasi sehingga diperoleh sifat termal dari kelongsong dan bahan bakar tersebut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Analisis komposisi kimia

Analisis komposisi kimia telah dilakukan terhadap bahan baku uranium logam, U_3Si_2 dan pelat AlMgSi AlMg2 dan pelat elemen bakar U_3Si_2 -Al dengan densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ menggunakan alat Titroprocessor. Hasil analisis komposisi kimia yang diperoleh dituangkan pada Tabel 1.

Tabel.1 Komposisi kimia paduan AlMgSi, AlMg2, U_3Si_2 dan U Logam

Paduan	Konsentrasi (% berat)					
	Mg	Si	Ti	Cr	Mn	U
AlMgSi	0,5708	0,845	0,0083	0,0014	0,578	
AlMg2	1,965	0,1214	-	-	-	
Logam Uranium	-	-	-	-	-	99,82
U_3Si_2	-	7,50	-	-	-	92,55
Sertifikat AlMgSi	< 1,2	0,7-1,3	$\leq 0,1$	$\leq 0,25$	0,4-1,0	
Sertifikat AlMg2	1,7-2,4	$\leq 0,30$	-	-	-	

Dari hasil analisis komposisi kimia kemudian logam uranium tersebut di potong yang dilanjutkan dengan proses peleburan menjadi serbuk uranium yang kemudian dipadu

dengan logam Si dengan perbandingan logam U : logam Si = 92,5% : 7,5 % . Setelah diketahui perbandingan komposisi kimia U_3Si_2 : Al, selanjutnya diproses lebih lanjut menjadi

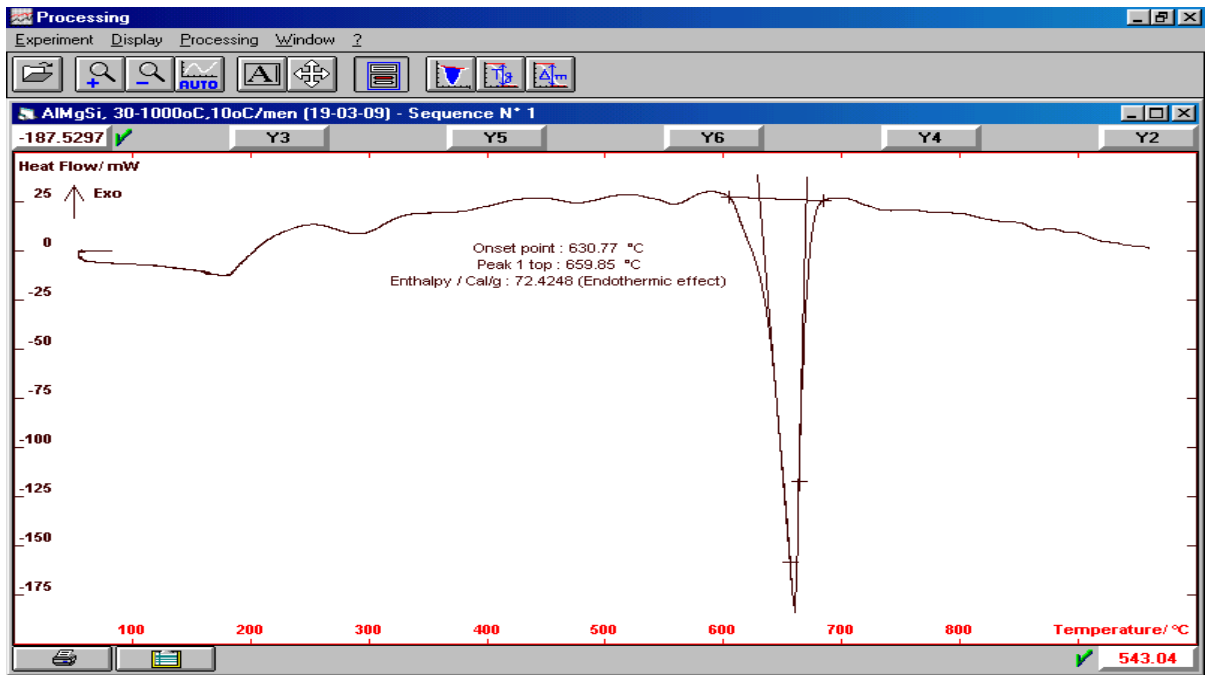
Inti Elemen Bakar (IEB) dan Pelat Elemen Bakar (PEB) U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$.

PEB U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ dengan kelongsong AlMgSi yang telah dibuat, kemudian dilakukan preparasi pemotongan sisi jauh (SJ), sisi dekat (SD) dan bagian tengah (C). Selanjutnya untuk membuktikan bahwa kelongsong AlMgSi lebih baik dibanding kelongsong AlMg2, dikenakan analisis termal yang meliputi stabilitas panas, kapasitas panas, entalpi, temperatur lebur, konduktivitas panas, koefisien muai panjang dan dibandingkan dengan PEB U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ menggunakan kelongsong AlMg2.

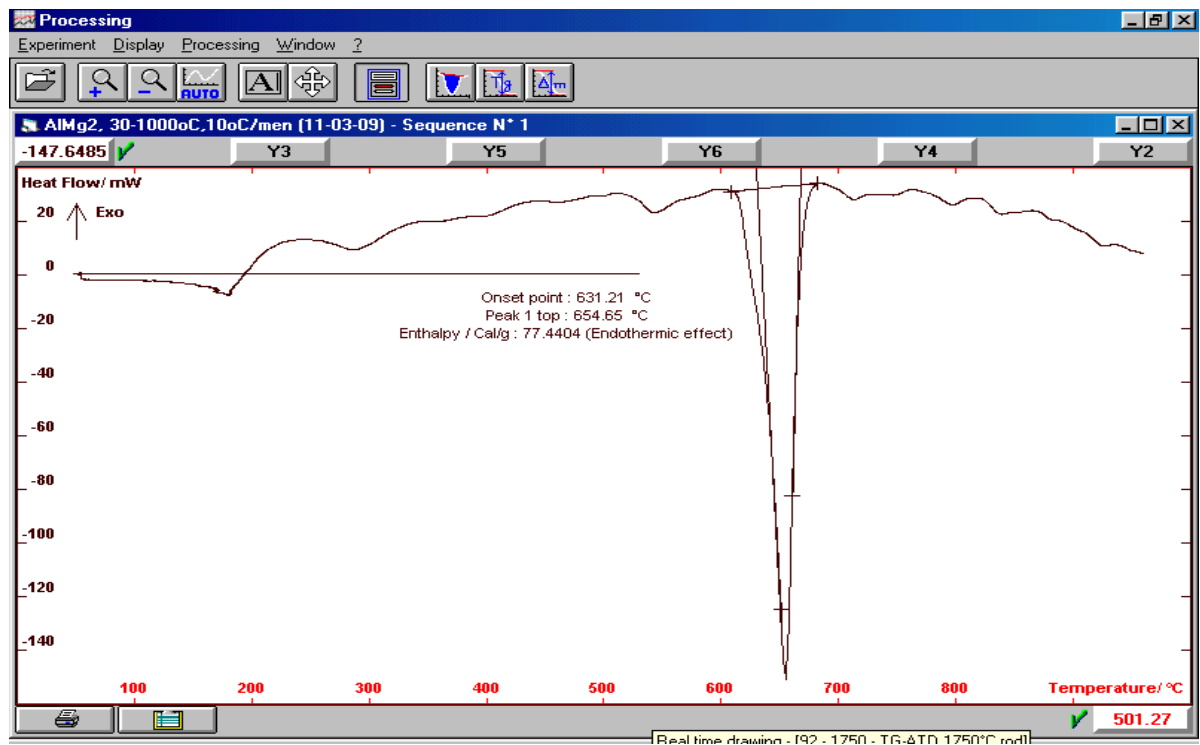
2. Analisis termal

Analisis termal yang dilakukan meliputi temperatur lebur, entalpi, dan analisis kapasitas panas paduan AlMgSi (as received) dan AlMg2 (as received), AlMgSi rol, AlMg2 rol, Inti elemen bakar (IEB) U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$, PEB U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ (kelongsong AlMgSi) dan PEB U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ (kelongsong AlMg2). Analisis temperatur lebur dan entalpi dilakukan menggunakan alat DTA pada kondisi operasi 30°C hingga 1000°C dengan kecepatan pemanasan $10^\circ\text{C}/\text{menit}$ dalam media gas argon UHP (*ultra high purity*). Hasil analisis temperatur lebur dan entalpi peleburan paduan AlMgSi (as received) dan AlMg2 (as received), AlMgSi rol, AlMg2 rol, IEB U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$, PEB U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ (kelongsong AlMgSi) dan PEB U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ (kelongsong

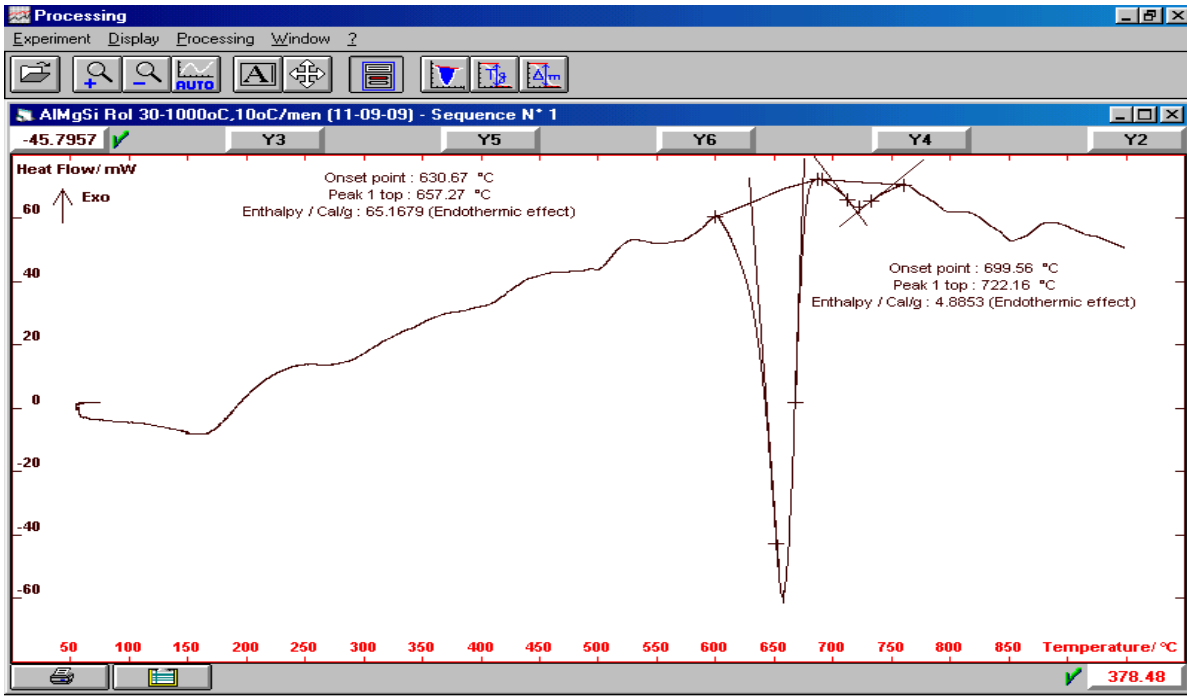
AlMg2) dituangkan pada Gambar 1 sampai dengan Gambar 7 dan Tabel 2. Hasil analisis dengan DTA menunjukkan bahwa baik kelongsong AlMgSi maupun kelongsong AlMg2 stabil terhadap panas hingga temperatur 650°C , hal ini ditunjukkan oleh tidak adanya perubahan *base line* aliran panas hingga temperatur 650°C seperti yang ditunjukkan pada termogram DTA Gambar 1 dan 2. Namun di atas temperatur 650°C kedua kelongsong tersebut telah mengalami peleburan dengan besar entalpi peleburan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2. Kelongsong AlMgSi as received mulai mengalami peleburan pada temperatur $659,85^\circ\text{C}$ yang ditandai dengan terbentuknya puncak endotermik dengan jumlah panas peleburan sebesar $\Delta H = 72,43 \text{ cal/g}$. Puncak endotermik tersebut menunjukkan bahwa titik awal terbentuknya puncak tersebut (*onset temperature*) menyatakan temperatur mulai terjadinya proses peleburan dan titik puncak (*top temperature*) terbentuknya puncak tersebut menyatakan temperatur terjadinya proses peleburan, sedangkan luasan puncak yang terbentuk menunjukkan besarnya panas atau entalpi yang dibutuhkan untuk melakukan proses peleburan tersebut. Kelongsong AlMg2 as received mulai mengalami peleburan pada temperatur $654,65^\circ\text{C}$ dengan panas peleburan sebesar $\Delta H = 77,44 \text{ cal/g}$. Bila dibandingkan temperatur peleburan dan entalpi peleburan kelongsong AlMgSi maupun kelongsong AlMg2 maka kedua bahan kelongsong tersebut tidak mempunyai perbedaan yang signifikan.



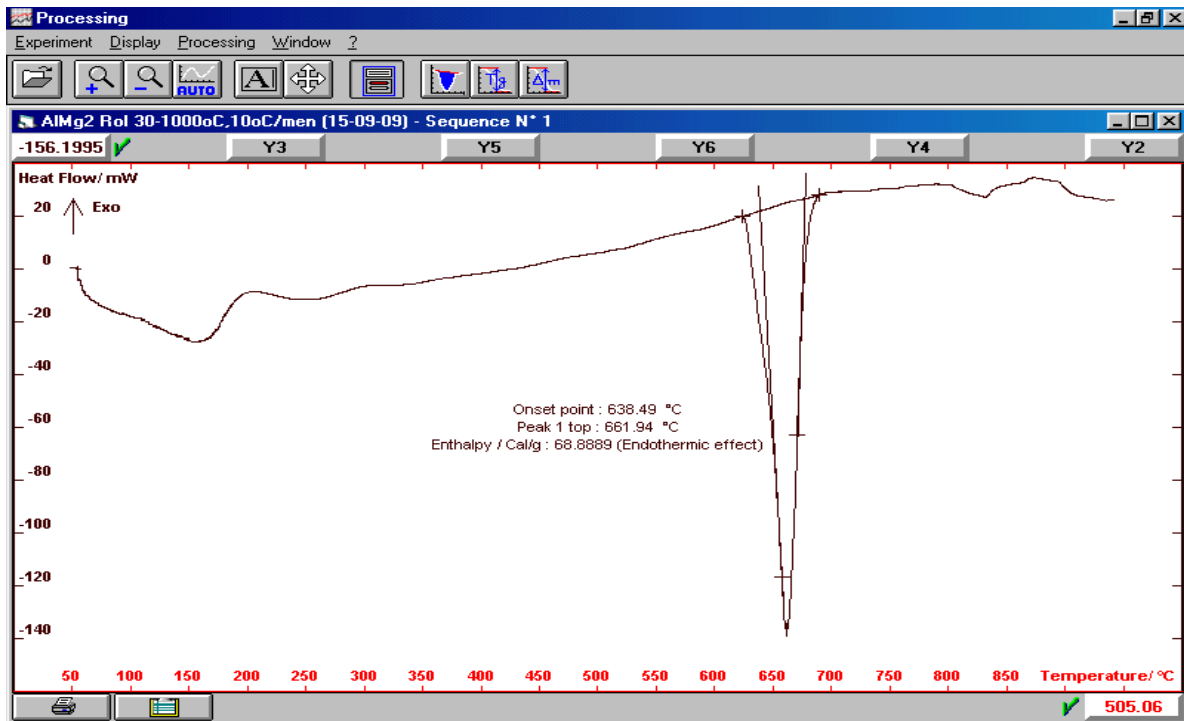
Gambar 1. Termogram DTA AlMgSi as received



Gambar 2. Termogram DTA AlMg2 as received



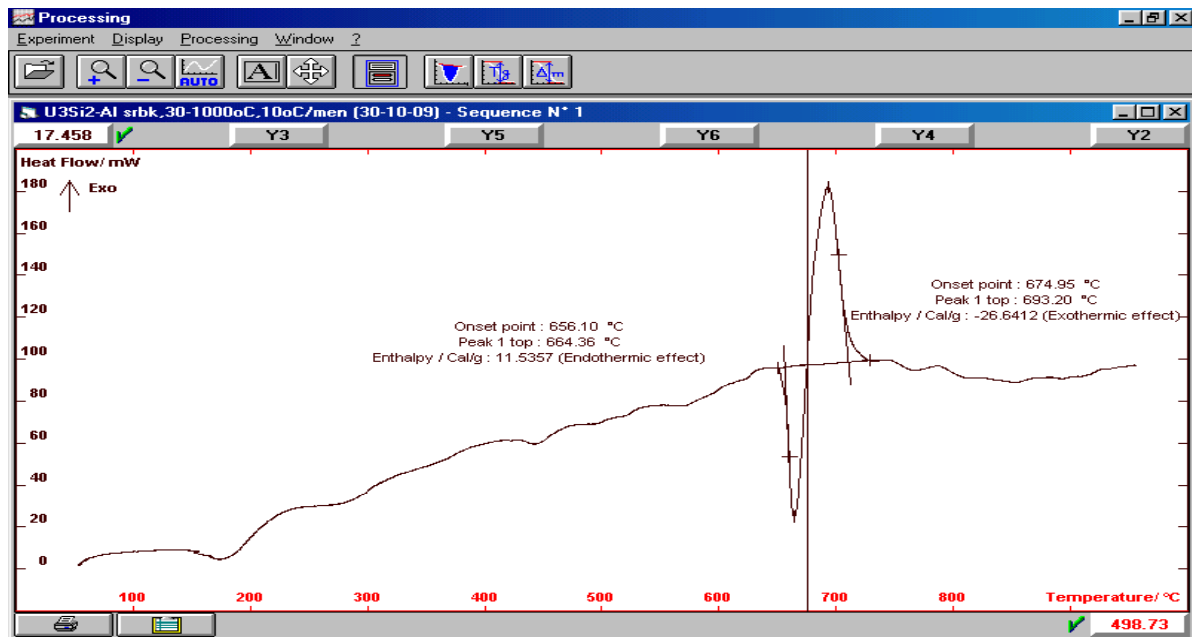
Gambar 3. Termogram DTA AIMgSi Rol



Gambar 4. Termogram DTA AIMg2 Rol

Analisis temperatur lebur dan entalpi peleburan dengan DTA juga dilakukan terhadap kelongsong AlMgSi rol dan AlMg2 rol. Kelongsong AlMgSi rol mulai mengalami peleburan pada temperature $657,27^{\circ}C$ yang ditunjukkan oleh reaksi termokimia endotermik dengan panas peleburan yang dibutuhkan sebesar $\Delta H = 65,17$ cal/g, sedangkan kelongsong AlMg2 rol mulai mengalami proses peleburan pada temperatur $654,94^{\circ}C$ dengan panas peleburan yang dibutuhkan sebesar $\Delta H = 68,89$ cal/g seperti yang terlihat pada termogram DTA Gambar 3 dan 4. Dari hasil analisis ini dapat dinyatakan bahwa proses perolan panas yang dikenakan terhadap kelongsong AlMgSi pada temperatur

$450^{\circ}C$ dan $415^{\circ}C$ terhadap AlMg2 pada saat fabrikasi tidak berpengaruh terhadap temperatur lebur kelongsong AlMgSi maupun AlMg2, tetapi berpengaruh terhadap penurunan besarnya entalpi peleburan kedua kelongsong tersebut. Penurunan entalpi peleburan AlMgSi rol maupun AlMg2 rol disebabkan karena kelongsong AlMgSi dan AlMg2 yang mengalami proses perolan pada saat fabrikasi menyebabkan adanya tegangan sisa didalam kelongsong tersebut yang akan meningkatkan energi dalam (*laten heat*) kedua kelongsong tersebut, sehingga dengan energi atau jumlah panas yang kecil saja kelongsong AlMgSi maupun AlMg2 dapat terjadi proses peleburan.

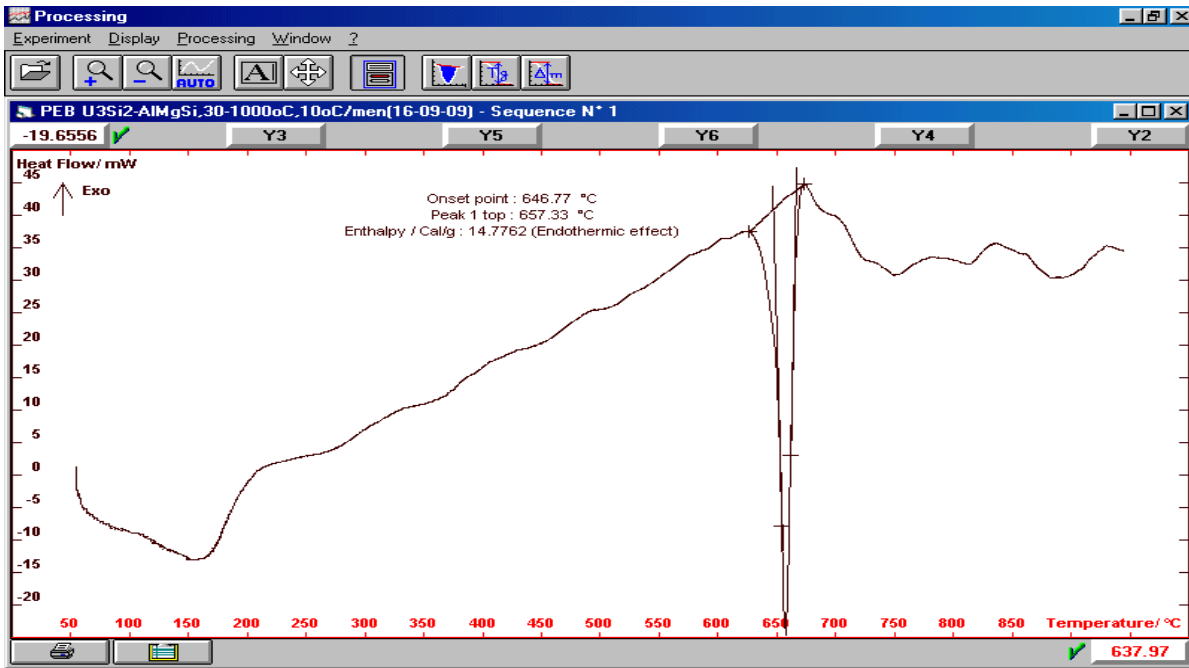
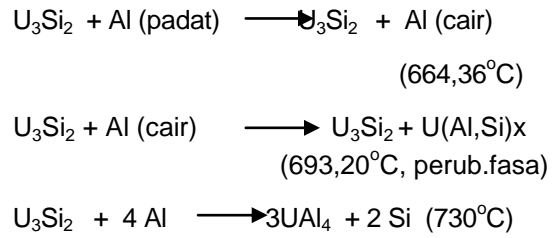


Gambar 5. Termogram DTA IEB U_3Si_2 -Al densitas $4,8$ g/cm³

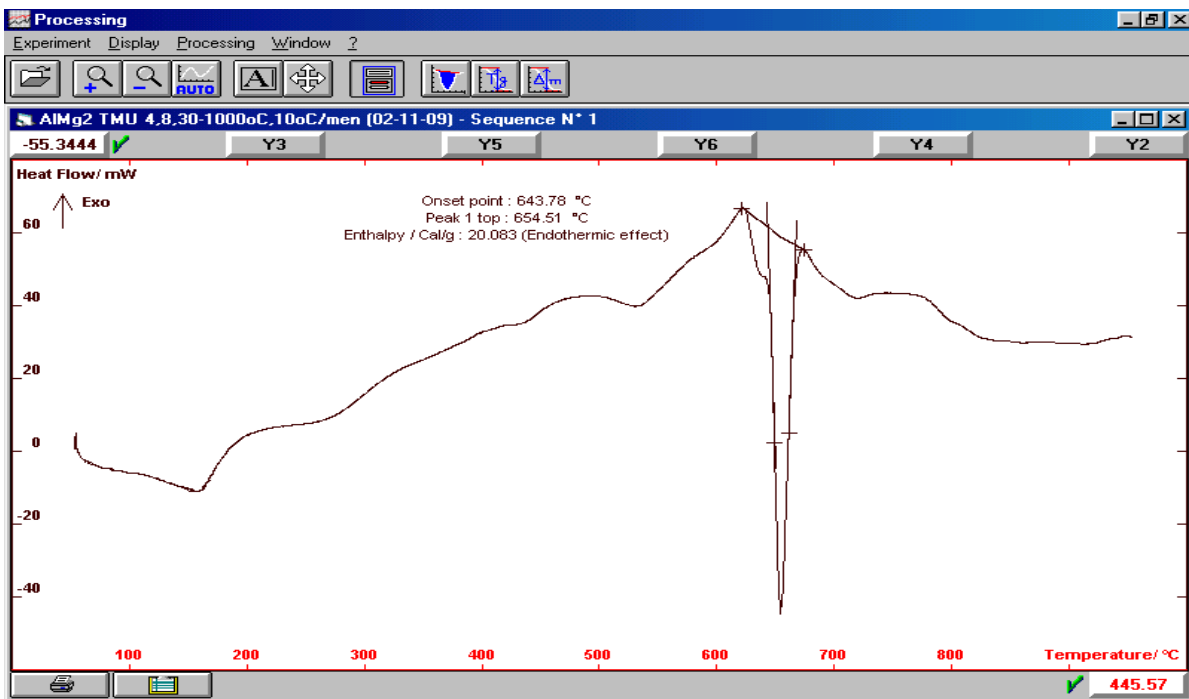
Hasil analisis termal yang dilakukan terhadap IEB U_3Si_2 -Al densitas $4,8$ gU/cm³ menunjukkan bahwa terhadap IEB U_3Si_2 -Al densitas $4,8$ gU/cm³ cukup stabil terhadap panas hingga temperatur $650^{\circ}C$. Pada temperatur $664,36^{\circ}C$ IEB U_3Si_2 -Al densitas $4,8$ gU/cm³ mengalami reaksi termokimia endotermik yang menunjukkan terjadinya pelelehan matrik Al yang terkandung dalam bahan bakar U_3Si_2 -Al dengan besar panas

yang dibutuhkan sebesar $\Delta H = 11,54$ cal/g. Lelehan Al tersebut secara langsung berinteraksi dengan bahan bakar U_3Si_2 secara eksotermik seperti yang terlihat pada termogram DTA Gambar 5. Fenomena ini dapat dijelaskan bahwa terjadinya puncak eksotermik pada temperatur $693,20^{\circ}C$ menunjukkan bahwa secara langsung terjadi interaksi atau reaksi lelehan Al dengan bahan bakar U_3Si_2 dan menyebabkan pembentukan fasa baru $U(Al,Si)_3$

dan senyawa $UAlx$ dengan mengeluarkan sejumlah panas pembentukan sebesar $\Delta H = -26,64$ cal/g. Adapun tahapan reaksi termokimia tersebut adalah sbb^[9] :



Gambar 6. Termogram DTA PEB U_3Si_2 -Al densitas $4,8$ gU/cm³ (kelongsong AlMgSi)



Gambar 7. Termogram DTA PEB U_3Si_2 -Al densitas $4,8$ gU/cm³ (kelongsong AlMg2)

Analisis termal juga telah dilakukan terhadap bahan bakar PEB U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ (AlMgSi) dan PEB U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ (AlMg2) menggunakan DTA. Hasil analisis yang diperoleh menunjukkan bahwa bahan bakar PEB U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ (AlMgSi) maupun PEB U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ (AlMg2) cukup stabil terhadap panas hingga temperatur 650°C . PEB U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ (AlMgSi) mulai mengalami peleburan pada temperatur $657,33^\circ\text{C}$ dengan membutuhkan panas sebesar $\Delta H=14,78 \text{ cal/g}$

sedangkan PEB U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ (AlMg2) mulai mengalami peleburan pada temperatur $654,51^\circ\text{C}$ dengan membutuhkan panas sebesar $\Delta H = 20,08 \text{ cal/g}$ seperti yang terlihat pada Gambar 6 dan 7. Kestabilan panas yang dimiliki bahan bakar PEB U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ (AlMgSi) hingga 650°C menunjukkan bahwa kelongsong AlMgSi mempunyai kompatibilitas panas yang cukup baik dengan bahan bakar U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$, hal ini merupakan persyaratan penting dalam hal pemilihan kelongsong bahan bakar nuklir dengan densitas uranium tinggi.

Tabel 2. Besaran temperatur lebur ($^\circ\text{C}$) dan entalpi ($\text{J/g}^\circ\text{C}$)

Bahan	Temp. peleburan endotermik ($^\circ\text{C}$)	Entalpi peleburan (cal/g)	Temp. P.senyawa eksotermik ($^\circ\text{C}$)	Entalpi P.senyawa (cal/g)
AlMgSi As received	659,85	72,43		
AlMg2 As received	654,65	77,44		
AlMgSi Rol	657,27	65,17		
AlMg2 Rol	661,94	68,89		
IEB U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$	664,36	11,54	693,20	26,64
PEB U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ (AlMgSi)	657,33	14,78		
PEB U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ (AlMg2)	654,51	20,08		

Hasil analisis temperatur lebur dan entalpi peleburan yang dilakukan terhadap paduan AlMgSi (as received) dan AlMg2 (as received), AlMgSi rol, AlMg2 rol, inti elemen bakar (IEB) U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$, PEB U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ (kelongsong AlMgSi) dan PEB U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ (kelongsong AlMg2) secara keseluruhan menunjukkan bahwa baik kelongsong AlMgSi maupun kelongsong AlMg2 cukup stabil terhadap panas hingga temperatur 650°C dan memiliki temperatur lebur dan entalpi peleburan yang tidak berbeda secara

signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa kedua kelongsong tersebut dapat digunakan sebagai kelongsong bahan bakar.

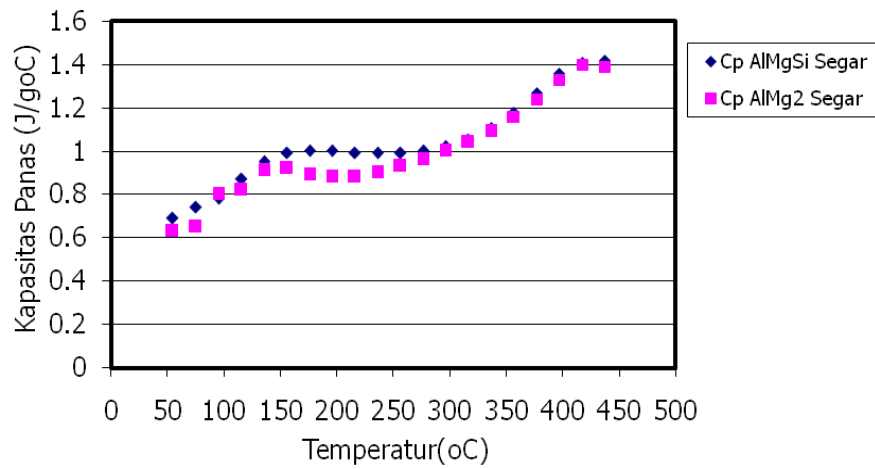
Karakter termal lainnya yang dianalisis adalah kapasitas panas ($C_p = \text{J/g}^\circ\text{C}$) paduan AlMgSi (as received) dan AlMg2 (as received), AlMgSi rol, AlMg2 rol, PEB U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ (kelongsong AlMgSi) dan PEB U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ (kelongsong AlMg2). Analisis dilakukan dengan menggunakan alat *Differential Scanning Calorimetry* (DSC) pada kondisi operasi 30°C

hingga 450°C dengan kecepatan pemanasan 3°C/menit. Hasil analisis kapasitas panas masing-masing paduan di ditampilkan pada Gambar 8 sampai dengan Gambar 10. Dari hasil analisis tersebut dapat diketahui bahwa kelongsong AlMgSi as received, AlMgSi rol maupun PEB U₃Si₂-Al densitas 4,8 gU/cm³ (kelongsong AlMgSi) mempunyai kapasitas panas yang lebih besar dibandingkan dengan kelongsong AlMg2 as received, AlMg2 rol maupun PEB U₃Si₂-Al densitas 4,8 gU/cm³ (kelongsong AlMg2). Hal ini didukung oleh analisis termal lainnya yaitu besaran konduktivitas panas dan koefisien muai panjang seperti yang terlihat pada Tabel 3. Kelongsong AlMgSi mempunyai besaran konduktivitas panas (k) sebesar 201 W/m°C jauh lebih besar dibanding konduktivitas panas kelongsong AlMg2 sebesar 155 W/m°C, disamping itu kelongsong AlMgSi mempunyai besaran koefisien muai panjang sebesar 23 x 10⁻⁶/°C yang lebih kecil dibanding koefisien muai panjang kelongsong AlMg2 sebesar 24 x 10⁻⁶/°C. Kelongsong AlMgSi memiliki konduktivitas panas yang lebih tinggi karena mempunyai unsur Si sebagai pepadu, dimana Si merupakan semikonduktor yang memiliki daya hantar panas baik dan mempunyai mobilitas elektron yang tinggi^[9].

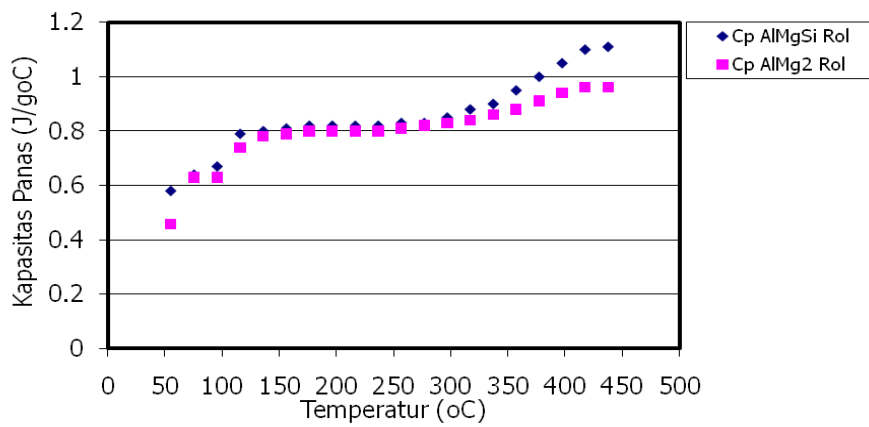
Besaran karakter termal yang meliputi temperatur lebur, entalpi, kapasitas panas, konduktivitas panas dan koefisien muai panjang suatu bahan merupakan sifat termal yang sangat penting diketahui sebelum digunakan menjadi kelongsong bahan bakar. Kelongsong bahan bakar sebaiknya mempunyai temperatur lebur yang tinggi dan kestabilan panas yang baik serta mempunyai kompatibilitas panas yang baik dengan inti elemen bakarnya. Sedangkan dari besaran kapasitas panas dan konduktivitas panas dapat diketahui jumlah panas yang dapat diserap serta jumlah panas yang dapat dihantarkan dari bahan bakar U₃Si₂-Al ke air pendingin melalui kelongsong bahan bakar sehingga tidak terjadi akumulasi panas didalam bahan bakar. Sedangkan persyaratan kelongsong bahan bakar lainnya adalah sebaiknya mempunyai besaran koefisien muai panjang yang kecil karena dari besaran ini dapat digunakan untuk mengetahui berapa besar pertambahan panjang atau perubahan dimensi (*swelling*) pelat elemen bakar akibat panas atau radiasi. Dari hasil analisis sifat termal yang meliputi kapasitas panas, konduktivitas panas serta koefisien muai panjang menunjukkan bahwa kelongsong AlMgSi mempunyai keunggulan dibandingkan dengan kelongsong AlMg2.

Tabel 3. Data konduktivitas panas dan koefisien muai panjang

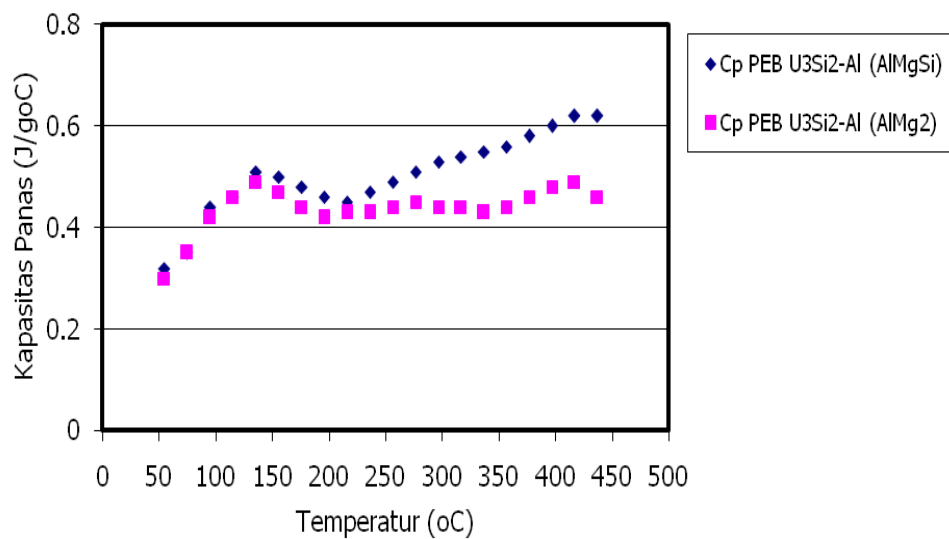
Kelongsong	Konduktivitas panas (W/m°C)	Koef.muai panjang (°C ⁻¹)
AlMg2	155	24 x 10 ⁻⁶
AlMgSi	201	23 x 10 ⁻⁶



Gambar 8. Kapasitas panas AlMgSi as received dan AlMg2 as received



Gambar 9. Kapasitas panas AlMgSi Rol dan AlMg2 Rol



Gambar 10. Kapasitas panas PEB U_3Si_2 -Al densitas 4,8 gU/cm³ (kelongsong AlMgSi) dan (AlMg2)

SIMPULAN

Hasil analisis karakterisasi termal diperoleh bahwa kelongsong AlMgSi maupun AlMg2 mempunyai kompatibilitas dengan bahan bakar U_3Si_2 -Al cukup baik dan stabil terhadap panas hingga temperatur $650^{\circ}C$, di atas temperatur $650^{\circ}C$ kelongsong AlMgSi, AlMg2 maupun PEB U_3Si_2 -Al dengan densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ telah mengalami reaksi endotermik. Kelongsong AlMgSi maupun AlMg2 mempunyai temperatur lebur dan entalpi peleburan yang tidak jauh berbeda tetapi kelongsong AlMgSi mempunyai kapasitas panas dan konduktivitas panas lebih besar serta mempunyai koefisien muai panjang lebih kecil dari kelongsong AlMg2. Hasil analisis ini menunjukkan bahwa PEB U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ dengan kelongsong AlMgSi mempunyai sifat termal yang lebih baik dibanding PEB U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ dengan kelongsong AlMg2.

DAFTAR PUSTAKA

1. SNEGROVE J.L, DOMAGALA R.F, HOFMAN G.L, TWINCEK.C, COPELAND G.L, HOBBS R.W and SENN R.L, "The Use of U_3Si_2 Dispersed Al in Plate Type Fuel Elements for Research and Test Reaktor", ANL / RERTR /TM -11,1987.
2. TIM KESELAMATAN REAKTOR SERBA GUNA "Laporan Analisis Keselamatan Penggantian Elemen Bakar Oksida ke Silisida Densitas $2,96 \text{ g/cm}^3$ ", RSG. OTH/LAK/01/98.
3. ASLINA BR GINTING, 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 1998.
4. ASLINA GINTING," Analisa Termal Pelat Elemen Bakar U_3Si_2 -Al Variasi Tingkat Muat Uranium", Persentasi Peneliti Muda P2TBDU, Serpong 19-20 November 2002.
5. ASLINA BR GINTING," Kompatibilitas Bahan Bakar UMo dengan Matrck Al", Laporan Hasil Penelitian P2TBDU Tahun 2005.
6. MASRUKAN," Karakterisasi AlMgSi Untuk Pelat Sisi Ditinjau Sebagai Kelongsong Bahan Bakar Reaktor Riset" Hasil-Hasi Penelitian Elemen Bakar Nuklir P2TBDU-BATAN, 1989-1999.
7. SUPARDJO, "Karakterisasi Paduan U_xSi_y Pada Daerah Komposisi Antara 6,62 s/d 7,63 Si ", Tesis Magister, Pasca Sarjana, Program Magister Ilmu dan Rekayasa Nuklir, Institut Teknologi Bandung, 1993.
8. ASMEDI SURIPTO," Diskripsi Singkat Proses Pembuatan Elemen Bakar Reaktor Riset Tipe MTR di IPEBRR" Bidang Produksi Elemen Bakar Reaktor Riset-PEBN-BATAN,1989.
9. DOMAGALA R.F,WINCEK T.C, SNELGROVE J.L., HOMA M.I and HEINRICH R.R., "DTA Study of U_3Si_2 - Al and U_3Si_2 - Al Reactions", IAEA - TECDOC - 643(4) ,1992.