
KARAKTERISASI PADUAN AlMgSi UNTUK KELONGSONG BAHAN BAKAR U_3Si_2/Al DENGAN DENSITAS URANIUM $5,2 \text{ gU/cm}^3$

Aslina Br.Ginting, Supardjo, Yanlinastuti, Dian Anggraini, Boybul
Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir – BATAN
Kawasan Puspiptek Serpong Gd.20, Tangerang Selatan, Banten 15314
e-mail: aslina@batan.go.id

(Naskah diterima: 11-01-2018, Naskah direvisi: 28-01-2018, Naskah disetujui: 01-02-2018)

ABSTRAK

KARAKTERISASI PADUAN AlMgSi UNTUK KELONGSONG BAHAN BAKAR U_3Si_2/Al DENGAN DENSITAS URANIUM $5,2 \text{ gU/cm}^3$. Meningkatnya densitas uranium dari $2,96 \text{ gU/cm}^3$ menjadi $5,2 \text{ gU/cm}^3$ bahan bakar U_3Si_2/Al harus diikuti dengan penggunaan kelongsong yang kompatibel. Bahan bakar berdensitas tinggi mempunyai kekerasan yang tinggi, sehingga bila menggunakan paduan AlMg2 sebagai kelongsong dapat menyebabkan terjadi *dogbone* pada saat perolan. Selain fenomena *dogbone*, pada saat bahan bakar tersebut digunakan di reaktor dapat terjadi *swelling* karena meningkatnya hasil fisi maupun *burn up*. Oleh karena itu, perlu dicari pengganti bahan kelongsong untuk bahan bakar U_3Si_2/Al densitas tinggi. Pada penelitian ini telah dilakukan karakterisasi paduan AlMgSi sebagai kandidat pengganti kelongsong AlMg2. Karakterisasi yang dilakukan meliputi analisis termal, kekerasan, mikrostruktur dan laju korosi. Analisis termal dilakukan menggunakan DTA (*Differential Thermal Analysis*) dan DSC (*Differential Scanning Calorimetry*). Analisis kekerasan menggunakan alat uji kekerasan mikro, mikrostruktur menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscope*) dan analisis laju korosi dilakukan dengan pemanasan pada temperatur $150 \text{ }^\circ\text{C}$ selama 77 jam di dalam *autoclave*. Hasil analisis menunjukkan bahwa kelongsong AlMgSi maupun AlMg2 mempunyai kompatibilitas panas dengan bahan bakar U_3Si_2/Al cukup stabil hingga temperatur $650 \text{ }^\circ\text{C}$. Kelongsong AlMgSi mempunyai kekerasan sebesar 115 HVN dan kelongsong AlMg2 sebesar 70,1 HVN. Sementara itu, analisis mikrostruktur menunjukkan bahwa morfologi ikatan antarmuka (*interface bonding*) kelongsong AlMgSi lebih baik dari kelongsong AlMg2, demikian halnya dengan laju korosi bahwa kelongsong AlMgSi mempunyai laju korosi lebih kecil dibanding kelongsong AlMg2. Hasil karakterisasi termal, kekerasan, mikrostruktur dan laju korosi menunjukkan bahwa PEB U_3Si_2/Al densitas $5,2 \text{ gU/cm}^3$ menggunakan kelongsong AlMgSi lebih baik dibanding PEB U_3Si_2/Al densitas $5,2 \text{ gU/cm}^3$ menggunakan kelongsong AlMg2.

Kata kunci: U_3Si_2/Al , densitas $5,2 \text{ gU/cm}^3$, kelongsong AlMgSi dan AlMg2.

ABSTRACT

CHARACTERIZATION OF AlMgSi ALLOY FOR THE CLADDING OF U_3Si_2/Al FUEL WITH 5,2 gU/cm³ DENSITY. Increase in uranium density from 2,96 gU/cm³ to 5,2 gU/cm³ of U_3Si_2/Al fuel requires a compatible cladding. High density fuel possesses high hardness value, and the use of AlMg2 as cladding material may cause dogbone during rolling process. In addition to dogbone phenomena, swelling can also occur during the use of nuclear fuel in the reactor due to rising in fission products and burn up. For this reason, substitution of cladding material should be determined to suit the high density U_3Si_2/Al fuel. This research deals with the characterization of AlMgSi as a candidate for AlMg2 substitution. The characterization includes thermal analysis with DTA (Differential Thermal Analysis) dan DSC (Differential Scanning Calorimetry), hardness test with macrohardness tester, microstructure examination with SEM (Scanning Electron Microscope), and corrosion analysis by heating at 150 °C for 77 hours in an autoclave. Analysis results show that both AlMgSi and AlMg2 share stable heat compatibility with U_3Si_2/Al up to 650 °C. AlMgSi cladding has a hardness value of 115 HVN, higher than that of AlMg2, which is 70,1 HVN. Microstructure examination shows that AlMgSi has better morphology of interface bonding than AlMg2. Corrosion rate analysis also indicates that AlMgSi has lower corrosion rate. The results of thermal, hardness, microstructure and corrosion characterization reveal that the U_3Si_2/Al fuel of 5,2 gU/cm³ suits better with AlMgSi than AlMg2.

Keywords: U_3Si_2/Al , density 5,2 gU/cm³, AlMgSi cladding, AlMg2.

PENDAHULUAN

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir (PTBBN) telah berhasil membuat bahan bakar U_3Si_2/Al densitas 4,8 dan 5,2 gU/cm³ sebagai pengganti U_3Si_2/Al densitas 2,96 gU/cm³[1], bahkan bahan bakar U_3Si_2/Al densitas 4,8 gU/cm³ telah berhasil diiradiasi di dalam reaktor G.A.Siwabessy hingga *burn up* 60%[1]. Hasil uji pasca iradiasi khususnya uji tak merusak menunjukkan bahwa pelat elemen bakar (PEB) U_3Si_2/Al densitas 4,8 gU/cm³ mempunyai unjuk kerja yang baik karena stabil terhadap radiasi[2]. Hasil uji pasca iradiasi PEB U_3Si_2/Al densitas 4,8 gU/cm³ perlu ditindaklanjuti dengan melakukan proses uji iradiasi terhadap PEB U_3Si_2/Al densitas 5,2 gU/cm³. Peningkatan densitas uranium menyebabkan kandungan ²³⁵U di dalam bahan bakar menjadi lebih besar sehingga dapat meningkatkan siklus operasi reaktor karena waktu tinggal (*life time*) bahan bakar di dalam reaktor lebih lama. Hal ini mengurangi penggantian bahan bakar (*refueling*) sehingga efisiensi dan ekonomisasi daur bahan bakar menjadi meningkat[3].

Berdasarkan hasil analisis fabrikator bahan bakar yang didukung oleh hasil uji pasca iradiasi diketahui bahwa PEB U_3Si_2/Al densitas 4,8 gU/cm³ sangat baik digunakan sebagai bahan bakar di dalam reaktor karena tidak diperoleh adanya cacat maupun pengelembungan (*swelling*) selama proses iradiasi[2]. Sementara itu, PEB U_3Si_2/Al densitas 5,2 gU/cm³ pada saat proses fabrikasi mengalami kendala dalam hal mendapatkan ketebalan kelongsong AlMg2 sesuai dengan yang dipersyaratkan (minimal 0,25 mm)[4]. Bila muatan uranium ditingkatkan menjadi 5,2 gU/cm³ kekerasan inti elemen bakar (IEB) meningkat sehingga berpengaruh terhadap proses perolan kelongsong AlMg2. Hal ini tidak diinginkan karena dapat menyebabkan terjadi fenomena *dogbone* pada saat proses perolan [4,5].

Selain fenomena *dogbone*, kemungkinan fenomena *swelling* juga dapat terjadi pada saat bahan bakar tersebut digunakan di reaktor. Terjadinya *swelling* disebabkan oleh perubahan volume bahan bakar akibat meningkatnya hasil fisi maupun *burn up*[5]. Oleh karena itu, penggunaan bahan bakar nuklir densitas tinggi harus didukung oleh penggunaan kelongsong yang kompatibel dengan bahan bakar yang dikungkungnya. Untuk itu, perlu dicari pengganti kelongsong AlMg2 untuk bahan bakar densitas tinggi. Penelitian ini dilakukan untuk mendukung pengembangan penggunaan bahan bakar densitas uranium tinggi baik jenis U_3Si_2/Al UMo/Al maupun UZr/Al, sehingga perlu mengembangkan kelongsong yang lebih kompatibel dengan bahan bakar.

Paduan AlMgSi merupakan paduan aluminium dengan kandungan unsur pepadu utama adalah Mg dan Si yang mudah diperoleh[6]. Penambahan unsur pepadu pada logam aluminium dapat menghasilkan kondisi yang larut padat atau menghasilkan senyawa logam fasa kedua yang menyebabkan terjadinya peningkatan kekuatan dan kekerasan paduan AlMgSi. Penguatan dengan fasa kedua 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*)[6]. Paduan AlMgSi juga termasuk dalam paduan yang dapat dikeraskan dengan perlakuan panas (*heat treatable alloy*)[7]. Selain itu, partikel halus yang terdapat pada paduan AlMgSi dapat dimanfaatkan pula sebagai tempat berkumpulnya cacat titik yang diakibatkan oleh panas atau radiasi, sehingga berdampak baik kepada penurunan elongasi atau *swelling* bahan bakar. Oleh karena itu, paduan AlMgSi sangat baik digunakan sebagai kelongsong bahan bakar nuklir. Kondisi ini merupakan keunggulan paduan AlMgSi dan merupakan perbedaan yang sangat mendasar bila

dibandingkan dengan kelongsong AlMg2 yang *non heat treatable alloy*. 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, fisika dan mekanik [6,7].

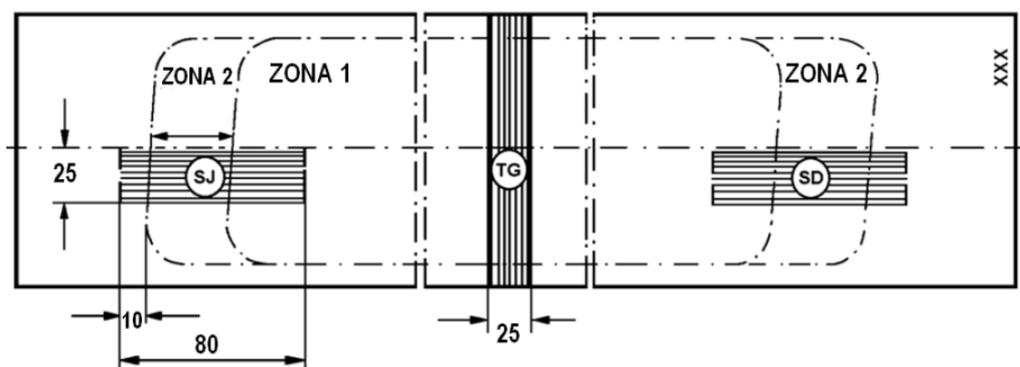
Proses fabrikasi paduan AlMgSi menjadi kelongsong bahan bakar hampir sama dengan proses fabrikasi kelongsong AlMg2. Tahapannya meliputi penyiapan bahan, proses perolan pelat AlMgSi menjadi *figura* dengan dimensi panjang 180 mm, lebar 140 mm dengan ketebalan sekitar 3,15 mm dan ditengahnya dibuat lubang berukuran 100 x 62 mm. Sementara itu, dimensi untuk *cover* panjang 180 mm x lebar 140 mm dengan ketebalan 2,7 mm. Lubang *figura* diisi dengan Inti elemen bakar (IEB) densitas uranium 5,2 gU/cm³, kemudian kedua permukaannya (atas dan bawah) ditutup dengan *cover*. Empat sisi sambungan dilas TIG membentuk paket rol untuk selanjutnya dilakukan proses perolan. Perbedaan proses fabrikasi PEB U₃Si₂/Al menggunakan kelongsong AlMg2 dengan AlMgSi terjadi pada temperatur perolan. Proses perolan kelongsong AlMg2 dilakukan pada temperatur 425 °C sedangkan perolan kelongsong AlMgSi dilakukan pada temperatur 480 °C[8].

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakter paduan AlMgSi sebagai bahan pengganti kelongsong AlMg2.

Karakterisasi yang dilakukan meliputi analisis termal, analisis mikrostruktur, analisis kekerasan dan laju korosi PEB U₃Si₂/Al dengan densitas 5,2gU/cm³ menggunakan kelongsong AlMgSi dan dibandingkan dengan menggunakan kelongsong AlMg2. Hasil karakterisasi PEB U₃Si₂/Al densitas 5,2gU/cm³ menggunakan kelongsong AlMgSi diharapkan dapat dimasukkan kepada fabrikator bahanbakar reaktor riset untuk mendesain elemen bakar reaktor riset U₃Si₂/Al densitas uranium tinggi menggunakan kelongsong AlMgSi.

METODOLOGI

Bahan yang digunakan adalah kelongsong AlMgSi dan AlMg2 segar (tanpa perlakuan), AlMgSi rol dan AlMg2 rol (kelongsong AlMgSi dan AlMg2 hasil perolan), PEB U₃Si₂/Al densitas 5,2 gU/cm³ dengan kelongsong AlMgSi dan PEB U₃Si₂/Al densitas 5,2 gU/cm³ dengan kelongsong AlMg2. Analisis termal meliputi temperatur dan entalpi peleburan menggunakan DTA (*Differential Thermal Analysis*) serta analisis kapasitas panas menggunakan DSC (*Differential Scanning Calorimetry*). PEB U₃Si₂/Al densitas 5,2 gU/cm³ dengan kelongsong AlMgSi maupun AlMg2 dipotong dengan dimensi tertentu pada sisi jauh (SJ), sisi dekat (SD) dan bagian tengah (TG) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Potongan PEB U₃Si₂/Al pada sisi dekat (SD), tengah (TG) dan sisi jauh (SJ)[4]

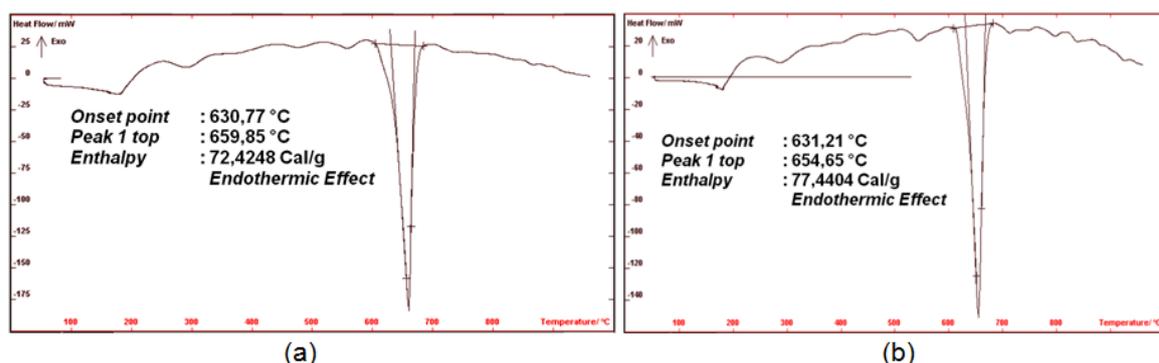
Analisis kekerasan menggunakan alat uji kekerasan mikromerk Leitz dengan metode Vickers dan analisis mikrostruktur menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscope*). Sementara itu, analisis laju korosi dilakukan dengan cara memotong sampel dengan berat awal (W_0) dan dipanaskan pada temperatur 150 °C selama 77 jam di dalam *autoclave*. Sampel hasil pemanasan ditimbang kembali beratnya (W_1) sehingga diperoleh selisih berat, $\Delta W = W_1 - W_0$. Hasil analisis termal, mikrostruktur, kekerasan dan laju korosi paduan AlMgSi kemudian dibandingkan dengan paduan AlMg2 sebagai kelongsong PEB U₃Si₂/Al densitas 5,2 gU/cm³.

HASIL DAN PEMBAHASAN

a) Analisis termal untuk penentuan temperatur dan entalpi peleburan

Hasil analisis termal menggunakan DTA menunjukkan kelongsong AlMgSi maupun kelongsong AlMg2 (tanpa perlakuan) stabil terhadap panas hingga temperatur 650 °C. Hal ini diindikasikan dengan tidak adanya perubahan *base line* aliran panas hingga temperatur 650 °C seperti yang ditunjukkan pada termogram

DTA Gambar 2. Di atas temperatur 650 °C kedua kelongsong tersebut telah mengalami peleburan dengan besar entalpi seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1. Kelongsong AlMgSi mulai mengalami peleburan pada temperatur 659,85 °C yang ditandai dengan terbentuknya puncak endotermik dan membutuhkan sejumlah panas peleburan sebesar $\Delta H = 72,43$ cal/g. Reaksi endotermik dengan terbentuknya puncak (*onset temperature*) menyatakan temperatur mulai terjadinya reaksi peleburan dan titik puncak (*top temperature*) menyatakan temperatur berakhirnya reaksi peleburan. Sementara itu, luasan puncak menunjukkan jumlah panas yang dibutuhkan (entalpi) untuk melakukan reaksi peleburan. Kelongsong AlMg2 mengalami peleburan pada temperatur 654,65 °C dengan panas peleburan sebesar $\Delta H = 77,44$ cal/g. Bila dibandingkan temperatur dan entalpi peleburan kelongsong AlMgSi maupun kelongsong AlMg2 maka kedua bahan kelongsong tersebut tidak mempunyai perbedaan temperatur dan entalpi peleburan yang signifikan. Hal disebabkan karena unsur utama (*base matriks*) paduan tersebut adalah aluminium.



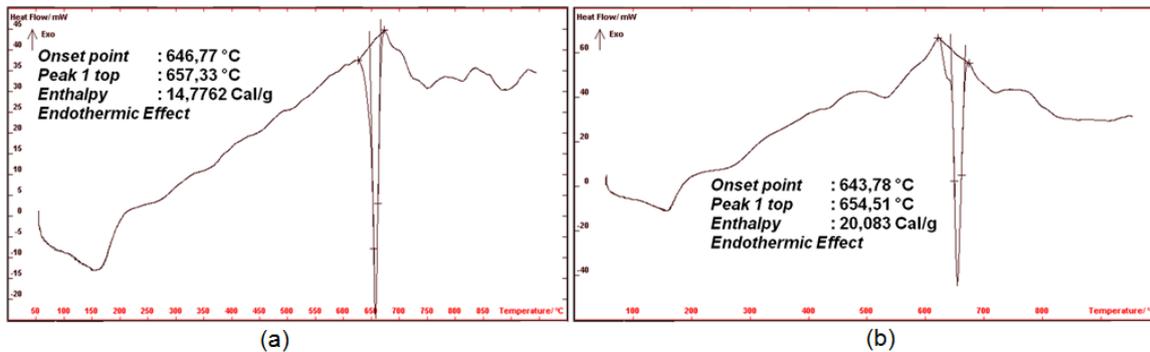
Gambar 2. (a) Termogram paduan AlMgSi tanpa perlakuan
(b) Termogram paduan AlMg2 tanpa perlakuan[9]

Sementara itu, hasil analisis termal PEB U₃Si₂/Al densitas 5,2 gU/cm³ dengan kelongsong AlMgSi maupun dengan kelongsong AlMg2 menunjukkan cukup stabil terhadap panas hingga temperatur

650°C. PEB U₃Si₂/Al densitas 5,2 gU/cm³ dengan menggunakan kelongsong AlMgSi mulai mengalami proses peleburan pada temperatur 657,33°C dengan membutuhkan panas sebesar $\Delta H = 14,78$ cal/g, sedangkan

PEB U_3Si_2/Al densitas $5,2 \text{ gU/cm}^3$ dengan kelongsong $AlMg_2$ mulai mengalami proses peleburan pada temperatur $654,51^\circ\text{C}$ dan

membutuhkan sejumlah panas sebesar $\Delta H = 20,08 \text{ cal/g}$ seperti yang terlihat pada Gambar.3.



Gambar 3. Termogram PEB U_3Si_2/Al densitas $5,2 \text{ gU/cm}^3$
(a) dengankelongsong $AlMgSi$
(b) dengan kelongsong $AlMg_2$

PEB U_3Si_2/Al densitas $5,2 \text{ gU/cm}^3$ dengan kelongsong $AlMgSi$ mempunyai kestabilan panas yang baik hingga 650°C . Fenomena ini menunjukkan bahwa kelongsong $AlMgSi$ mempunyai kompatibilitas panas cukup baik dengan bahan bakar U_3Si_2/Al densitas $5,2 \text{ gU/cm}^3$. Kestabilan panas merupakan persyaratan penting dalam hal pemilihan

kelongsong bahan bakar nuklir dengan densitas uranium tinggi. Hasil analisis termal paduan $AlMgSi$ dan $AlMg_2$ (tanpa perlakuan), PEB U_3Si_2/Al dengan densitas $5,2 \text{ gU/cm}^3$ menggunakan kelongsong $AlMgSi$ dan PEB U_3Si_2/Al densitas $5,2 \text{ gU/cm}^3$ menggunakan kelongsong $AlMg_2$ dituangkan di dalam Tabel 1.

Tabel 1. Temperatur lebur dan entalpi paduan $AlMgSi$ dan $AlMg_2$ [9]

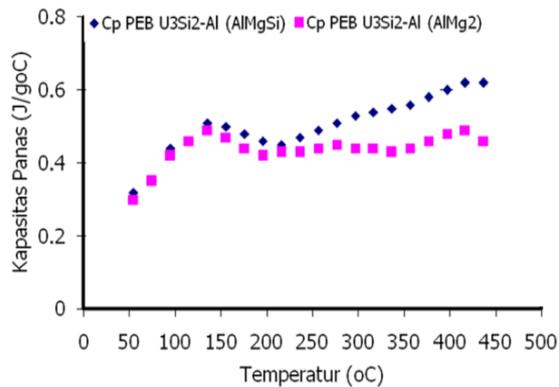
Bahan	Temperatur peleburan ($^\circ\text{C}$)	Entalpi peleburan(cal/g)
$AlMgSi$ (tanpa perlakuan)	659,85	72,43
$AlMg_2$ (tanpa perlakuan)	654,65	77,44
$AlMgSi$ rol(hasil perolan)	657,27	65,17
$AlMg_2$ rol (hasil perolan)	661,94	68,89
PEB U_3Si_2/Al $5,2 \text{ gU/cm}^3$ dengan kelongsong $AlMgSi$	657,33	14,78
PEB U_3Si_2/Al $5,2 \text{ gU/cm}^3$ dengan kelongsong $AlMg_2$	654,51	20,08

Tabel 1 menunjukkan bahwa kelongsong $AlMgSi$ maupun kelongsong $AlMg_2$ cukup stabil terhadap panas hingga temperatur 650°C dan keduanya memiliki temperatur lebur dan entalpi peleburan yang tidak berbeda secara signifikan. Hal ini disebabkan karena matrik utama dari paduan tersebut adalah logam aluminium. Dari analisis entalpi dan temperatur lebur maka kedua bahan tersebut dapat

digunakan sebagai kelongsong bahan bakar U_3Si_2/Al densitas tinggi.

b) Analisis termal untuk kapasitas panas

Hasil analisis kapasitas panas PEB U_3Si_2/Al densitas $5,2 \text{ gU/cm}^3$ dengan kelongsong $AlMgSi$ maupun PEB U_3Si_2/Al densitas $5,2 \text{ gU/cm}^3$ dengan kelongsong $AlMg_2$ ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Kapasitas panas PEB U_3Si_2/Al densitas $5,2 \text{ gU/cm}^3$ dengan kelongsong AlMgSi dan AlMg2.

Gambar 4 menunjukkan bahwa PEB U_3Si_2/Al densitas $5,2 \text{ gU/cm}^3$ dengan kelongsong AlMgSi mempunyai kapasitas panas yang lebih besar dibandingkan dengan PEB U_3Si_2-Al densitas $5,2 \text{ gU/cm}^3$ dengan kelongsong AlMg2. Analisis termal meliputi temperatur lebur, entalpi peleburan dan kapasitas panas didukung oleh analisis konduktivitas panas dan koefisien muai panjang seperti yang terlihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Data konduktivitas panas dan koefisien muai panjang kelongsong[10]

Bahan Kelongsong	Konduktivitas panas ($W/m^{\circ}C$)	Koef.muai panjang ($^{\circ}C^{-1}$)
AlMg2	155	24×10^{-6}
AlMgSi	201	23×10^{-6}

Tabel 2 menunjukkan bahwa kelongsong AlMgSi mempunyai konduktivitas panas (k) sebesar $201 \text{ W/m}^{\circ}C$ jauh lebih besar bila dibandingkan dengan konduktivitas panas kelongsong AlMg2 sebesar $155 \text{ W/m}^{\circ}C$. Sementara itu, kelongsong AlMgSi mempunyai koefisien muai panjang sebesar $23 \times 10^{-6}/^{\circ}C$ dan lebih kecil dibanding koefisien muai panjang kelongsong AlMg2

sebesar $24 \times 10^{-6}/^{\circ}C$. Kelongsong AlMgSi memiliki konduktivitas panas yang lebih tinggi karena unsur Si sebagai pemadu merupakan semikonduktor yang memiliki daya hantar panas baik dan mempunyai mobilitas elektron yang tinggi[11].

Karakter termal kapasitas panas, konduktivitas panas dan koefisien muai panjang paduan AlMgSi dan AlMg2 merupakan sifat termal yang sangat penting diketahui sebelum digunakan menjadi kelongsong bahan bakar. Kapasitas panas dan konduktivitas panas dapat memberikan informasi tentang jumlah panas yang dapat diserap serta jumlah panas yang dapat dihantarkan dari bahan bakar U_3Si_2/Al ke air pendingin melalui kelongsong bahan bakar sehingga tidak terjadi akumulasi panas di dalam *meat* bahan bakar. Persyaratan kelongsong bahan bakar lainnya adalah mempunyai koefisien muai panjang yang kecil dan nilai ini digunakan untuk mengetahui pertambahan panjang atau perubahan dimensi (*swelling*) kelongsong akibat proses radiasi. Hasil analisis termal meliputi kapasitas panas, konduktivitas panas serta koefisien muai panjang menunjukkan bahwa kelongsong AlMgSi mempunyai keunggulan dibandingkan dengan kelongsong AlMg2.

c) Analisis kekerasan kelongsong AlMgSi dan AlMg2

Hasil analisis kekerasan menunjukkan bahwa kelongsong AlMgSi (tanpa perlakuan), AlMgSi rol dan PEB U_3Si_2/Al densitas $5,2 \text{ gU/cm}^3$ dengan kelongsong AlMgSi mempunyai kekerasan yang lebih besar dibandingkan dengan kelongsong AlMg2 (tanpa perlakuan), AlMg2 rol dan PEB U_3Si_2/Al densitas $5,2 \text{ gU/cm}^3$ dengan kelongsong AlMg2 seperti yang terlihat pada Tabel 3 dan 4.

Tabel 3. Kekerasan kelongsong AlMgSi dan AlMg2 (tanpa perlakuan), AlMgSi dan AlMg2 rol

No	Jenis sampel	Uji kekerasan						HVN rerata
		SD		C		SJ		
		d rerata	HVN	d rerata	HVN	d rerata	HVN	
1	AlMgSi	0,18	115	0,18	115	0,18	115	115
2	AlMg2	0,27	50,9	0,27	50,9	0,27	50,9	50,9
3	AlMgSi rol SD	0,23	70,1	0,23	70,1	0,23	70,1	70,1
4	AlMgSi rol SJ	0,23	70,1	0,23	70,1	0,23	70,1	70,1
5	AlMg2 rol SD	0,28	47,3	0,28	47,3	0,28	47,3	47,3
6	AlMg2 rol SJ	0,28	47,0	0,28	48,0	0,28	47,2	47,1

Tabel 4. Kekerasan PEB U_3Si_2/Al densitas $5,2 \text{ gU/cm}^3$ dengan kelongsong AlMgSi dan AlMg2

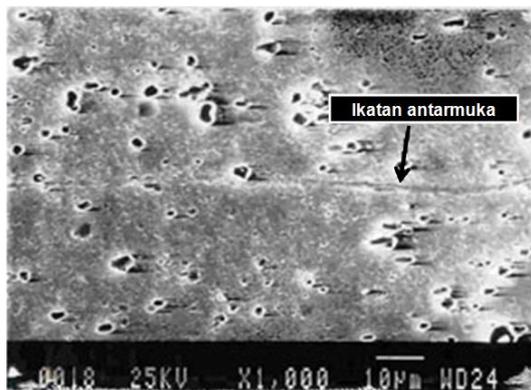
No	Jenis sampel	Uji kekerasan						HVN rerata
		(SD)		(C)		(SJ)		
		d rerata	HV	d rerata	HV	d rerata	HV	
PEB U_3Si_2/Al								
1	dengan kelongsong AlMgSi	0,24	64,40	0,25	59,30	0,24	64,4	62,70
PEB U_3Si_2/Al								
2	dengan kelongsong AlMg2	0,30	41,35	0,28	45,70	0,29	47,3	44,78

Tabel 3 menunjukkan bahwa kelongsong AlMgSi (tanpa perlakuan) mempunyai kekerasan sebesar 115 HVN lebih besar bila dibandingkan dengan kelongsong AlMg2 (tanpa perlakuan) yang mempunyai kekerasan sebesar 50,9 HVN. Peningkatan kekerasan paduan AlMgSi disebabkan karena adanya unsur Si yang ditambahkan ke dalam paduan tersebut. Sementara itu, kelongsong AlMgSi rol dan AlMg2 rol masing-masing mempunyai kekerasan sebesar 70,1 HVN dan 47,3 HVN. Proses perolan panas pada saat fabrikasi bahan bakar sangat berpengaruh terhadap kekerasan kelongsong AlMgSi maupun AlMg2. Proses perolan kelongsong AlMgSi pada temperatur $480 \text{ }^\circ\text{C}$ atau diatas titik rekristalisasinya menurunkan kekerasan kelongsong AlMgSi dari 115 HVN menjadi 70,1 HVN[12]. Sementara itu, kelongsong AlMg2 yang dikenai proses perolan pada temperatur $425 \text{ }^\circ\text{C}$ dapat menurunkan kekerasannya dari 50,9 HVN menjadi

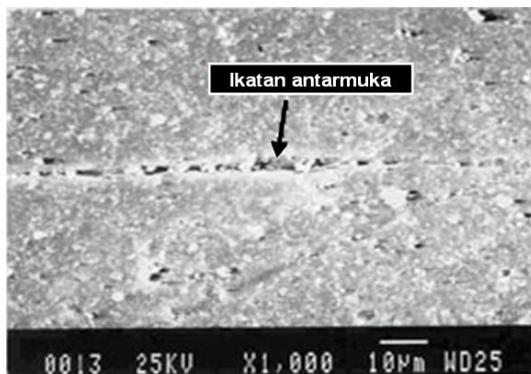
47,3 HVN seperti terlihat pada Tabel 3. Penurunan kekerasan AlMgSi rol maupun AlMg2 rol diipengaruhi oleh temperatur perolan panas. Proses perolan panas menyebabkan terjadinya rekristalisasi dan deformasi plastis sehingga kelongsong AlMgSi maupun AlMg2 menjadi lunak dan menurunkan kekerasan kedua kelongsong tersebut[13]. Sementara itu, dari Tabel 4 dapat diketahui bahwa PEB U_3Si_2/Al densitas $5,2 \text{ gU/cm}^3$ dengan kelongsong AlMgSi mempunyai kekerasan sebesar 62,70 HVN lebih besar dibandingkan dengan PEB U_3Si_2/Al densitas $5,2 \text{ gU/cm}^3$ menggunakan kelongsong AlMg2 dengan kekerasan sebesar 44,78 HVN. Hasil analisis kekerasan kedua kelongsong bahan bakar tersebut dapat dinyatakan bahwa paduan AlMgSi lebih kuat untuk digunakan sebagai kelongsong bahan bakar U_3Si_2/Al densitas $5,2 \text{ gU/cm}^3$ dibanding paduan AlMg2.

(a) Analisis mikrostruktur kelongsong AlMgSi dan AlMg2

Pada hasil analisis mikrostruktur kelongsong AlMgSi dan AlMg2 (tanpa perlakuan) terlihat jelas perbedaan morfologi ikatan antarmuka (*interfacebonding*) kelongsong AlMgSi dengan kelongsong AlMg2 seperti ditunjukkan pada Gambar 5 dan 6.



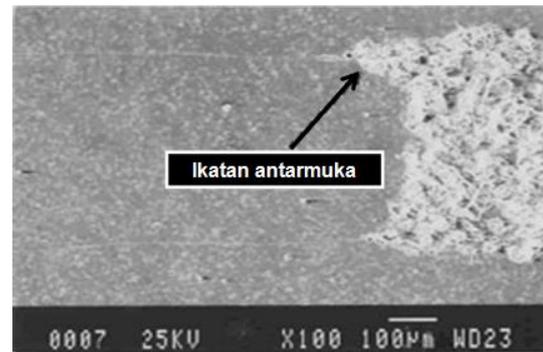
Gambar 5. Mikrostruktur ikatan antarmuka kelongsong AlMgSi



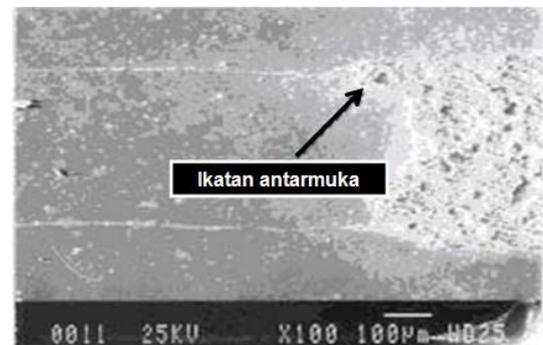
Gambar 6. Mikrostruktur ikatan antarmuka kelongsong AlMg2

Proses perolan kelongsong AlMgSi pada temperatur 480 °C menghasilkan morfologi ikatan antarmuka relatif lebih sempurna dibandingkan dengan morfologi ikatan antarmuka kelongsong AlMg2. Hal ini disebabkan karena temperatur perolan pada 480 °C (diatas temperatur rekristalisasi) mampu meningkatkan luas bidang kontak antarmuka yang mempercepat difusi atom antarmuka sehingga menghasilkan ikatan antarmuka logam yang lebih baik [12,13].

Proses perolan pada temperatur 480 °C selain dapat meningkatkan kerapatan ikatan antarmuka kelongsong AlMgSi dapat juga mengurangi perbedaan kekerasan antarmuka bahan bakar U_3Si_2 dengan kelongsongnya. Pengurangan atau perbedaan kekerasan antara kelongsong dengan bahan bakar U_3Si_2 diharapkan mampu mengeliminasi dan mencegah kemungkinan terjadinya *dogbone* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7 dan 8.



Gambar 7. Mikrostruktur ikatan antarmuka kelongsong AlMgSi dengan U_3Si_2/Al



Gambar 8. Mikrostruktur ikatan antarmuka kelongsong AlMg2 dengan U_3Si_2/Al

d) Analisis laju korosikelongsong AlMgSi dan AlMg2

Hasil analisis laju korosi merata yang dihitung berdasarkan perubahan berat secara triplo untuk kelongsong AlMgSi dan AlMg2 (tanpa perlakuan) maupun AlMgSi dan AlMg2 rol serta PEB U_3Si_2/Al densitas 5,2 gU/cm³ dituangkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Laju korosi kelongsong AlMgSi dan AlMg2

No.	Jenis sampel	Laju korosi rerata (g/dm ²)
1.	AlMgSi (tanpa perlakuan)	0,0666
2.	AlMg2 (tanpa perlakuan)	0,0720
3.	AlMgSi rol	0,0508
4.	AlMg2 rol	0,0688
5.	PEB U ₃ Si ₂ /Al dengan AlMgSi (SJ)	0,0347
6.	PEB U ₃ Si ₂ /Al dengan AlMgSi (SD)	0,0359
7.	PEB U ₃ Si ₂ /Al dengan AlMg2 (SJ)	0,0589
8.	PEB U ₃ Si ₂ -Al dengan AlMg2 (SD)	0,0585

Dari Tabel 5 diketahui bahwa kelongsong AlMgSi (tanpa perlakuan) mempunyai laju korosi rerata sebesar 0,0666 g/dm² dan lebih kecil dibanding kelongsong AlMg2 yang mempunyai laju korosi sebesar 0,0720 g/dm². Kecilnya laju korosi kelongsong AlMgSi (tanpa perlakuan) disebabkan karena paduan AlMgSi mengalami larut padat membentuk senyawa Mg₂Si lebih banyak. Fenomena ini terjadi karena konsentrasi Mg <1% berat larut padat dalam AlMgSi dan sebagian besar telah diikat oleh unsur Si terlebih dahulu untuk membentuk senyawa Mg₂Si, sedangkan unsur Mg yang hanya 2% dapat mengikat unsur Al membentuk senyawa Mg₂Al₃[14,15]. Senyawa Mg₂Si tidak bersifat anodik terhadap matriknya sehingga tidak mengubah potensial elektrode kelongsong AlMgSi. Sementara itu, pada kelongsong AlMg2 kemungkinan terbentuk fasa Mg₂Al₃ relatif lebih besar[14,15]. Kehadiran fasa ini tidak diharapkan karena sifatnya relatif lebih anodik dari pada fasa matriknya. Fenomena seperti ini tidak menguntungkan karena fasa Mg₂Al₃ berpotensi untuk terkorosi pada daerah batas butir apabila berada di dalam media korosif. Fasa Mg₂Al₃ juga dapat mempercepat terjadinya proses korosi tegangan (*stress corrosion*) apabila mengalami perlakuan panas mengakibatkan terbentuk presipitat yang lebih banyak pada batas butir.

SIMPULAN

Karakterisasi termal menunjukkan bahwa kelongsong AlMgSi maupun AlMg2 mempunyai kompatibilitas dengan bahan bakar U₃Si₂/Al cukup baik dan stabil terhadap panas hingga temperatur 650 °C serta mempunyai temperatur lebur dan entalpi yang tidak jauh berbeda. PEB U₃Si₂/Al dengan kelongsong AlMgSi mempunyai kapasitas panas dan konduktivitas panas lebih besar dibandingkan PEB U₃Si₂/Al dengan kelongsong AlMg2. Sementara itu, kelongsong AlMgSi mempunyai kekerasan 115 HVN lebih besar dibanding kelongsong AlMg2 70,1 HVN. Morfologi ikatan antarmuka (*interface bonding*) kelongsong AlMgSi lebih baik dari kelongsong AlMg2, hal ini dipengaruhi oleh temperatur perolan panas. Laju korosi kelongsong AlMgSi (tanpa perlakuan) AlMgSi rol dan PEB U₃Si₂/Al dengan kelongsong AlMgSi lebih kecil dibanding kelongsong AlMg2 (tanpa perlakuan), AlMg2 rol dan PEB U₃Si₂/Al dengan kelongsong AlMg2. Dari hasil analisis termal, kekerasan, mikrostruktur dan laju korosi diketahui bahwa PEB U₃Si₂/Al densitas 5,2 gU/cm³ menggunakan kelongsong AlMgSi jauh lebih baik dibanding PEB U₃Si₂/Al densitas 5,2 gU/cm³ menggunakan kelongsong AlMg2 sehingga dapat dinyatakan bahwa paduan AlMgSi baik digunakan untuk kelongsong PEB U₃Si₂/Al densitas uranium 5,2 gU/cm³.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih disampaikan kepada Ka. PTBBN dan Ka. BUR yang telah menyediakan dana DIPA untuk membiayai penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Ibu. Sutri Indaryati yang telah banyak membantu melakukan analisis termal dan kepada semua pihak yang membantu pelaksanaan penelitian ini, sehingga penulisan makalah dapat terwujud.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. H. Indiah, T. M. Sembiring, Supardjo, dan Suwardi, "LAK insersi elemen bakar uji silisida 3 pelat tingkat muat uranium 4,8 dan 5,2 gU/cm³ di teras RSG-GAS," No. Identifikasi PR 40J19001, Rev.03, Agustus, PRSG-BATAN, 2008.
- [2] Y. Nampira, Supardjo, dan S. Ismarwanti, "Uji tidak merusak bahan bakar U_3Si_2/Al tingkat muat uranium 4,8 gU/cm³ pasca iradiasi fraksi bakar 20% dan 40%," *Jurnal Teknologi Bahan Nuklir*, vol. 10, no.2, hal. 53-63, 2014.
- [3] A. Abdeldjalil, K. Mourad, and B. Rabah, "Non destructive testing as a tool for post irradiation examination," *17th World Conference on Non destructive Testing*, 25-28 October 2008, China.
- [4] Supardjo, H. Nasution, A. Rojak, B.G. Susanto, Boybul, dan E.P. Hastuti, "Percobaan pembuatan pelat elemen bakar (PEB) U_3Si_2-Al densitas uranium 4,8 dan 5,2 g/cm³ dengan pengkayaan 19,89% ²³⁵U untuk sampel uji iradiasi," Prosiding Seminar Nasional Daur Bahan Bakar, 27 Agustus 2003, Serpong.
- [5] F. Wang, B. Wen, L. Ren, L. Jiang, G. Li, and Y. Zhou. "PIE of LEU fuel elements with T6061 cladding", *Water Reactor Fuel Performance Meeting*, Sept. 11-14th, 2011, China,.
- [6] E. Linardia, R. Haddada, and L. Lanzania. "Stability analysis of the Mg₂Si phase in AA 6061 aluminum alloy," *Procedia Materials Science*, vol. 1, pp. 550-557, 2012.
- [7] Z. Li, C. Li, Y. Liu, L. Yu, Q. Guo, and H. Li, "Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of Al-10%Mg₂Si Alloy," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 663, pp. 16-19, 2016.
- [8] A. B. Ginting, "Pembuatan PEB U_3Si_2/Al TMU 4,8 gU/cm³ dan 5,2 gU/cm³ menggunakan kelongsong AlMgSi", *Program Blok Grant Bidang IPTEK Nuklir*, DIKTI-BATAN, Desember 2009.
- [9] A. B. Ginting, "Analisis termal paduan AlMgSi untuk kelongsong bahan bakar U_3Si_2/Al ," *Jurnal Daur bahan Bakar URANIA*, vol. 16, no.2, hal 176-187, 2010.
- [10] J. T. White, A. T. Nelson, J. T. Dunwoody, D. D. Byler, D. J. Safarik, and K. J. McClellan, "Thermophysical properties of U_3Si_2 to 1773 K". *Journal of Nuclear Materials*, vol. 464, pp. 275-280, 2015.
- [11] A. Serizawa, T. Sato, and M. K. Miller. "Effect of cold rolling on the formation and distribution of nano clusters during pre-aging in an Al-Mg-Si alloy. *Journal Materials Science and Engineering*, vol. 561, pp. 492-497, 2013
- [12] J. R. Cahoon, "Microstructure and phase constituents in the interface zone of Mg/Al diffusion bonding," Department of Mechanical and Manufacturing Engineering, University of Manitoba, Canada, 2007.
- [13] J. N. Mark, M. B. Theodore, A. David, C. M. Simon, and C. Aleksander, "Phase equilibria in the U-Si system from first principles calculations", *Journal of Nuclear Materials*, vol. 479, pp. 216-223, 2016.

- [14] Z. Fengli, W. Zhongling, L. Jinfeng, L. Chaoxing, Z. Zhao and Z. Ziqiao, “Corrosion mechanism associated with Mg_2Si and Si particles in Al–Mg–Si Alloys,” *Transaction of Non Ferrous Metal*, vol. 21, no. 12, pp. 2559–2567, 2011
- [15] Y. Zou, Q. Liu, Z. Jia, Y. Xing, L. Ding, and X. Wang, “The intergranular corrosion behaviour of 6000-series alloys with different Mg/Si and Cu content,” *Journal Applied Surface Science*. vol. 405, pp. 489–496, 2017.