

KEUNGGULAN SIFAT METALURGI DAN LAJU KOROSI PADUAN AlMgSi UNTUK KELONGSONG BAHAN BAKAR U_3Si_2 -Al DENSITAS $4,8 \text{ gU/cm}^3$

Aslina Br.Ginting, Nusin Samosir, Sugondo

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir - BATAN
Kawasan PUSPIPTEK Serpong, Tangerang Selatan 15314, Banten
e-mail: aslina@batan.go.id

(Diterima 17-6-2010, disetujui 15-10-2010)

ABSTRAK

KEUNGGULAN SIFAT METALURGI DAN LAJU KOROSI PADUAN AlMgSi UNTUK KELONGSONG BAHAN BAKAR U_3Si_2 -Al DENSITAS $4,8 \text{ gU/cm}^3$. Bahan bakar U_3Si_2 -Al densitas tinggi mempunyai kekerasan yang lebih tinggi sehingga dalam proses fabrikasinya harus menggunakan kelongsong yang kompatibel dengan bahan bakar yang dikungkungnya. Bila digunakan paduan AlMg₂ sebagai kelongsong bahan bakar densitas tinggi dapat terjadi efek *dogbone* pada saat proses perolan. Oleh karena itu perlu dicari alternatif bahan kelongsong sebagai pengganti kelongsong AlMg₂. Salah satunya adalah paduan AlMgSi yang mempunyai sifat metalurgi dan laju korosi lebih baik dari kelongsong AlMg₂, sehingga paduan tersebut dipandang baik untuk menjadi kelongsong bahan bakar densitas tinggi yaitu $4,8 \text{ gU/cm}^3$. Proses fabrikasi pembuatan bahan bakar U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ dengan paduan AlMgSi sebagai kelongsong hampir sama dengan menggunakan kelongsong AlMg₂ hanya berbeda pada temperatur perolan dan anil. Perolan kelongsong AlMg₂ dilakukan pada temperatur 415 °C dan proses anil pada 425 °C sedangkan perolan kelongsong AlMgSi dilakukan pada temperatur 450 °C dan proses anil pada temperatur 480 °C. Untuk membuktikan kelongsong AlMgSi mempunyai sifat metalurgi dan laju korosi lebih baik dari kelongsong AlMg₂, maka PEB U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ yang menggunakan kelongsong AlMgSi dan PEB U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ yang menggunakan kelongsong AlMg₂ dikenakan pengujian metalurgi yang meliputi analisis mikrostruktur, analisis kekerasan dan analisis uji korosi. Kemudian kedua hasil analisisnya dibandingkan. Dari hasil analisis mikrostruktur diperoleh bahwa morfologi ikatan antar muka (*interface bonding*), kekerasan dan laju korosi kelongsong AlMgSi lebih baik dari kelongsong AlMg₂. Data analisis sifat metalurgi dan laju korosi kelongsong AlMgSi yang diperoleh diharapkan dapat dipakai sebagai perbaikan perancangan fabrikasi bahan bakar reaktor riset PEB U_3Si_2 -Al dengan muatan uranium yang tinggi menggunakan kelongsong AlMgSi.

KATA KUNCI: U_3Si_2 -Al, densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$, kelongsong AlMgSi, metalurgi, korosi

ABSTRACT

IMPROVEMENTS IN METALLURGICAL PROPERTIES AND RATE OF CORROSION OF AlMgSi ALLOY FOR U_3Si_2 -Al FUEL CLADDING WITH A DENSITY OF 4.8 gU/cm^3 . *The utilization of high-density nuclear fuel must be supported by cladding material that is compatible with the fuel it contains considering 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. One of the candidates is AlMgSi alloy which exhibits better metallurgical properties and rate of corrosion compared to AlMg₂ cladding, thus regarded as suitable for high uranium density of 4.8 gU/cm^3 . In addition, the fabrication process of AlMgSi alloy as a cladding for U_3Si_2 -Al fuel plate with a uranium density of 4.8 gU/cm^3 is almost similar to that of the AlMg₂ cladding. The differences are only in the rolling and annealing temperatures, in which the rolling of AlMg₂ cladding is carried out at $415 \text{ }^\circ\text{C}$ and the annealing at $425 \text{ }^\circ\text{C}$ while the rolling of AlMgSi is performed at $450 \text{ }^\circ\text{C}$ and the annealing at $480 \text{ }^\circ\text{C}$. To establish that AlMgSi cladding has better rate of corrosion and metallurgical properties compared to the AlMg₂ cladding, the U_3Si_2 -Al fuel plates having a uranium density of 4.8 gU/cm^3 that employ AlMgSi cladding and the ones that employ AlMg₂ cladding undergo metallurgical testings, which include metallurgy analyses, i.e. microstructure and hardness, and corrosion testing. The results of the two analyses are then compared. From the analysis of the microstructure, it is revealed that the morphology of the interface bonding, hardness and rate of corrosion of the AlMgSi cladding are better than those of the AlMg₂ cladding. The data from the analysis of the metallurgical properties and rate of corrosion of the AlMgSi cladding obtained are expected to serve as a correction to the design of the U_3Si_2 -Al fuel plate for research reactor with a high uranium density using AlMgSi cladding.*

FREE TERMS: U_3Si_2 -Al, uranium density of 4.8 gU/cm^3 , AlMgSi cladding, metallurgy, corrosion

I. PENDAHULUAN

Hasil penelitian dan analisis menunjukkan bahwa pelat elemen bakar U_3Si_2 -Al dengan densitas $2,9$ dan $3,6 \text{ gU/cm}^3$ dengan kelongsong AlMg₂ sangat baik digunakan sebagai bahan bakar di dalam reaktor^[1,2,3,4]. Sedangkan untuk densitas $4,2$ dan $4,8 \text{ gU/cm}^3$ dengan kelongsong AlMg₂ data analisisnya menunjukkan bahwa kedua pelat elemen bakar tersebut tidak mengalami kendala dalam proses fabrikasi, tetapi penggunaannya di dalam reaktor sedang dalam penelitian. Namun untuk bahan bakar U_3Si_2 -Al dengan densitas $5,2 \text{ gU/cm}^3$ di dalam proses fabrikasi mengalami kendala dalam hal ketebalan kelongsong AlMg₂ yang dipersyaratkan. Jika muatan uranium ditingkatkan menjadi

$5,2 \text{ gU/cm}^3$, maka kekerasan inti elemen bakar akan meningkat sehingga berpengaruh pada proses perolan kelongsong AlMg₂. Hal ini tidak diinginkan karena terjadi fenomena *dogbone* pelat elemen bakar reaktor riset^[5,6,7]. Fenomena *dogbone* dapat terjadi apabila kekerasan bahan bakar lebih tinggi dari kelongsong sedangkan fenomena *whisker* terjadi sebaliknya. Adanya *dogbone* maupun *whisker* harus dihindari karena panas akan terlokalisasi di daerah tersebut dan dapat menimbulkan *blister*. 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* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1^[8]. Oleh karena itu perlu dicari beberapa alternatif bahan kelongsong sebagai pengganti kelongsong AlMg₂ yang digunakan Batan Teknologi pada saat ini, salah satunya adalah paduan AlMgSi. Karena data fabrikasi pelat elemen bakar U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ menggunakan kelongsong AlMg₂ sudah tersedia, maka hipotesis penelitian ini mengacu pada pelat elemen bakar U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ menggunakan kelongsong AlMg₂ karena diduga pelat elemen bakar U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ menggunakan kelongsong AlMgSi mempunyai sifat termal, metalurgi, dan laju korosi yang lebih baik dibandingkan kelongsong AlMg₂.



Gambar 1. Fenomena *dogbone* pada bahan bakar U_3Si_2 -Al.

Paduan AlMgSi merupakan paduan aluminium dengan kandungan unsur pepadu utama adalah Mg dan Si yang mudah diperoleh di pasaran^[4,9]. Penambahan unsur paduan tersebut pada logam aluminium dapat menghasilkan kondisi yang larut padat atau menghasilkan senyawa logam fase kedua. Dengan demikian terjadinya peningkatan kekuatan dan kekerasan paduan AlMgSi disebabkan oleh penguatan larut padat dan penguatan fase kedua. Penguatan dengan fase kedua yang terjadi pada paduan AlMgSi dapat ditingkatkan lagi dengan cara mengusahakan agar fase 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*)^[9,10] serta partikel halus yang terdapat pada paduan AlMgSi dapat dimanfaatkan pula sebagai tempat berkumpulnya cacat titik yang diakibatkan oleh panas atau radiasi, yang berdampak baik pada penurunan elongasi atau *swelling* bahan bakar, sehingga sangat baik digunakan sebagai kelongsong bahan bakar nuklir. Kondisi demikian merupakan keunggulan paduan AlMgSi dan merupakan perbedaan yang sangat mendasar bila dibandingkan dengan kelongsong AlMg₂ yang merupakan *non heat treatable alloy*.

Selain keunggulannya mempunyai presipitat dan dapat dikeraskan, proses fabrikasi pembuatan paduan AlMgSi sebagai kelongsong hampir sama dengan menggunakan kelongsong AlMg₂ yaitu meliputi peleburan logam uranium menjadi serbuk uranium, pembuatan inti elemen bakar (IEB), penyiapan dan perolan kelongsong AlMgSi menjadi *frame* dan *cover* yang dilanjutkan dengan pembuatan pelat elemen bakar (PEB) U₃Si₂-Al dengan densitas 4,8 gU/cm³. Perbedaan proses pabrikan PEB U₃Si₂-Al menggunakan kelongsong AlMgSi hanya berada pada temperatur perolan dan anil. Proses perolan kelongsong AlMg₂ dilakukan pada temperatur 415 °C yang diikuti proses anil pada 425 °C sedangkan kelongsong AlMgSi dirol 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 uranium tinggi, yaitu sifat kimia, sifat termal, sifat metalurgi (kekerasan, mikrostruktur, ketahanan korosi)^[10,11,12]. Pada penelitian sebelumnya telah dilakukan analisis kimia dan analisis termal terhadap kelongsong AlMgSi dan kelongsong AlMg₂. Dari hasil analisis kimia dan termal tersebut diperoleh bahwa PEB U₃Si₂-Al dengan densitas 4,8 gU/cm³ menggunakan kelongsong AlMgSi mempunyai sifat termal lebih baik dibandingkan PEB U₃Si₂-Al dengan densitas 4,8 gU/cm³ menggunakan kelongsong AlMg₂.

Pada penelitian ini akan dilakukan analisis mikrostruktur, analisis kekerasan dan analisis laju korosi terhadap PEB U₃Si₂-Al dengan densitas 4,8 gU/cm³ menggunakan kelongsong AlMgSi yang dibandingkan dengan PEB U₃Si₂-Al densitas 4,8 gU/cm³ menggunakan kelongsong AlMg₂. Analisis mikrostruktur dilakukan untuk mengetahui adanya morfologi ikatan antar muka (*interface bonding*) kelongsong AlMgSi dengan bahan bakar U₃Si₂-Al dan distribusi bahan bakar U₃Si₂-Al. Hasil analisis yang diperoleh diharapkan dapat menjadi masukan kepada fabrikator bahan bakar reaktor riset PEB U₃Si₂-Al untuk mendesain elemen bakar reaktor riset dengan muatan uranium 4,8 gU/cm³ menggunakan kelongsong AlMgSi.

II. TATA KERJA

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah kelongsong AlMgSi, AlMg₂, AlMgSi rol, AlMg₂ rol, PEB U₃Si₂-Al densitas 4,8 gU/cm³ (dengan kelongsong AlMgSi) dan PEB U₃Si₂-Al densitas 4,8 gU/cm³ (dengan kelongsong AlMg₂). Sebelum PEB U₃Si₂-Al densitas 4,8 gU/cm³ difabrikasi, bahan baku bahan bakar U₃Si₂-Al tersebut terlebih dahulu dianalisis komposisi kimianya menggunakan titroprosesor. Setelah perbandingan komposisi kimia U₃Si₂ : Al diketahui, selanjutnya diproses lebih lanjut menjadi Inti Elemen Bakar (IEB) U₃Si₂-Al densitas 4,8 gU/cm³ yang dilanjutkan dengan pembuatan Pelat Elemen Bakar (PEB) U₃Si₂-Al densitas 4,8 gU/cm³. Untuk mengetahui keunggulan penggunaan paduan AlMgSi sebagai kelongsong PEB U₃Si₂-Al kemudian dibandingkan paduan AlMg₂ dengan melakukan beberapa analisis meliputi analisis mikrostruktur dengan menggunakan SEM, analisis kekerasan dengan kekerasan mikro dan analisis laju korosi dilakukan di dalam *autoclave* dengan pemanasan 150 °C. Analisis mikrostruktur, analisa kekerasan dan laju korosi dikenakan terhadap kelongsong AlMgSi, AlMg₂, AlMgSi rol, AlMg₂ rol, PEB U₃Si₂-Al densitas 4,8 gU/cm³ menggunakan kelongsong AlMgSi dan PEB U₃Si₂-Al densitas 4,8 gU/cm³ menggunakan kelongsong AlMg₂. Hasil ketiga analisis kemudian dievaluasi dan dibandingkan sehingga diperoleh sifat mikrostruktur, kekerasan dan laju korosi dari kelongsong AlMgSi, AlMg₂ dan PEB U₃Si₂-Al.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Analisis Komposisi Kimia

Analisis komposisi kimia telah dilakukan terhadap bahan baku uranium logam, U₃Si₂ dan pelat AlMgSi AlMg₂ dan pelat elemen bakar U₃Si₂-Al dengan densitas 4,8 gU/cm³ menggunakan titroprosesor. Hasil analisis komposisi kimia yang diperoleh dituangkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi kimia paduan AlMgSi, AlMg₂, U₃Si₂ dan logam U.

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

Dari hasil analisis komposisi kimia kemudian logam uranium tersebut dipotong 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 kekerasan, mikrostruktur dan laju korosi kemudian dibandingkan dengan PEB U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ menggunakan kelongsong AlMg₂.

3.2. Hasil Analisis Kekerasan

Analisis kekerasan telah dilakukan terhadap paduan AlMgSi (segar) dan AlMg₂ (segar), 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) dengan 7 kali pengulangan masing-masing pada 3 posisi. Analisis dilakukan dengan menggunakan alat Mikro Hardness Merk Leitz metode Vickers. Hasil analisis menunjukkan bahwa kelongsong AlMgSi, AlMgS rol, dan PEB U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ (kelongsong AlMgSi) mempunyai kekerasan yang lebih besar dibandingkan dengan kelongsong AlMg₂, AlMg₂ rol dan PEB U_3Si_2 -Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ (kelongsong AlMg₂) seperti yang terlihat pada Tabel 2 dan 3.

Kelongsong AlMgSi mempunyai kekerasan sebesar 115 HVN lebih besar dibanding kelongsong AlMg₂ yang mempunyai kekerasan sebesar 50,9 HVN, sedangkan 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. Kelongsong AlMgSi yang dikenakan proses perolan pada temperatur pada $450 \text{ }^\circ\text{C}$ dan proses anil pada $480 \text{ }^\circ\text{C}$ atau di atas titik rekristalisasinya menurunkan kekerasan kelongsong AlMgSi dari 115 HVN menjadi 70,1 HVN sedangkan kelongsong AlMg₂ yang dikenakan proses perolan pada temperatur $425 \text{ }^\circ\text{C}$ menurunkan kekerasannya dari 50,9 HVN menjadi 47,3 HVN seperti yang terlihat pada Tabel 2. Penurunan kekerasan AlMgSi rol maupun AlMg₂ rol disebabkan karena perolan panas tersebut menyebabkan terjadinya proses rekristalisasi spontan dengan

deformasi plastis sehingga kelongsong AlMgSi maupun AlMg₂ menjadi lunak dan menurunkan kekerasan kedua kelongsong tersebut^[11,12].

Tabel 2. Kekerasan kelongsong AlMgSi, AlMg₂, AlMgSi rol dan AlMg₂ rol.

No	Bahan	Uji kekerasan Vickers : HV2 (F = 1,96 N), ASTM						
		Posisi 1		Posisi 2		Posisi 3		HVN rerata
		d rerata	HV	d rerata	HV	d rerata	HV	
1	AlMgSi	0,18	115	0,18	115	0,18	115	115
2	AlMg ₂	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	AlMg ₂ rol SD	0,28	47,3	0,28	47,3	0,28	47,3	47,3
6	AlMg ₂ rol SJ	0,28	46	0,28	48	0,29	47,2	47,1

Tabel 3. Kekerasan PEB U₃Si₂-Al densitas 4,8 gU/cm³ (AlMgSi dan kelongsong AlMg₂).

No	Bahan	Uji kekerasan Vickers : HV2 (F = 1,96 N), ASTM						
		Sisi dekat (SD)		Tengah (C)		Sisi jauh (SJ)		HVN rerata
		d rerata	HV	d rerata	HV	d rerata	HV	
1	PEB U ₃ Si ₂ -Al kelongsong AlMgSi	0,24	64,4	0,25	59,30	0,24	64,4	62,70
2	PEB U ₃ Si ₂ -Al kelongsong AlMg ₂	0,30	41,35	0,28	45,70	0,29	47,3	44,78

Dari Tabel 3 juga dapat diketahui bahwa PEB U₃Si₂-Al densitas 4,8 gU/cm³ menggunakan kelongsong AlMgSi mempunyai kekerasan sebesar 62,70 HVN lebih besar dibandingkan dengan PEB U₃Si₂-Al densitas 4,8 gU/cm³ menggunakan kelongsong AlMg₂ dengan kekerasan sebesar 44,78 HVN. Dari hasil analisis kekerasan terhadap kedua kelongsong bahan bakar tersebut dapat dinyatakan bahwa paduan AlMgSi lebih kuat digunakan sebagai kelongsong bahan bakar U₃Si₂-Al densitas 4,8 gU/cm³ dibanding paduan AlMg₂.

Disamping keunggulan yang telah diperoleh dari sifat termalnya (pada penelitian sebelumnya), kelongsong AlMgSi juga mempunyai kekerasan yang lebih baik dibanding kelongsong AlMg₂. Hal ini merupakan persyaratan penting menjadi kelongsong bahan bakar nuklir densitas tinggi.

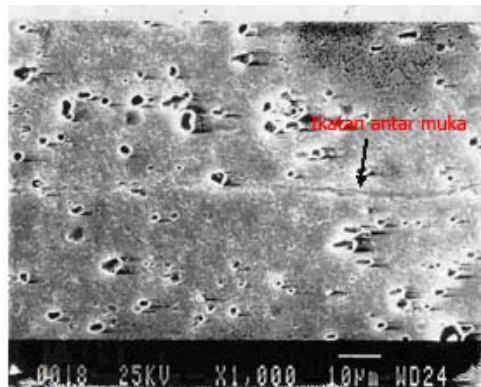
3.3. Analisis Mikrostruktur

Analisis mikrostruktur telah dilakukan terhadap AlMgSi dan AlMg₂, IEB U₃Si₂-Al densitas 4,8 gU/cm³, PEB U₃Si₂-Al densitas 4,8 gU/cm³ menggunakan kelongsong AlMgSi dan PEB U₃Si₂-Al densitas 4,8 gU/cm³ menggunakan kelongsong AlMg₂. Analisis dimulai dengan pemotongan sampel yang dilanjutkan dengan preparasi metalografi meliputi *mounting* dengan resin, gerinda dan poles seperti yang terlihat pada Gambar 2. Setelah

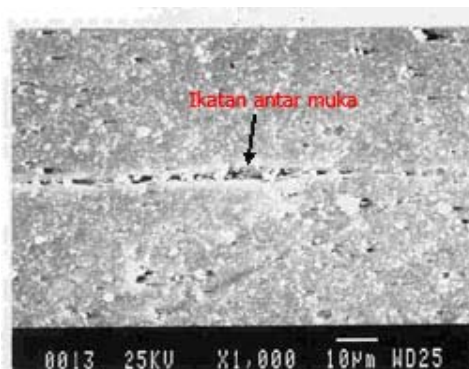
permukaan sampel halus dan mengkilap, sampel kemudian dietsa dengan bahan kimia tertentu, dan selanjutnya dianalisis mikrostrukturnya dengan menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscope*).



Gambar 2. Sampel metalografi siap dianalisis dengan SEM.



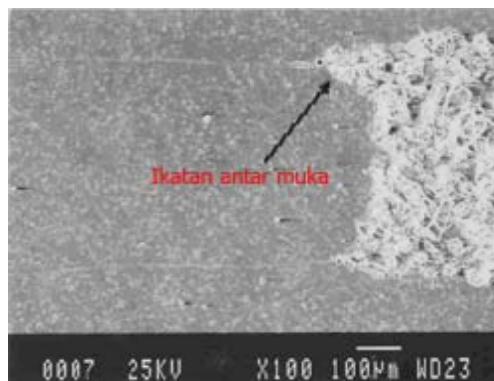
Gambar 3. Mikrostruktur ikatan antar muka kelongsong AlMgSi.



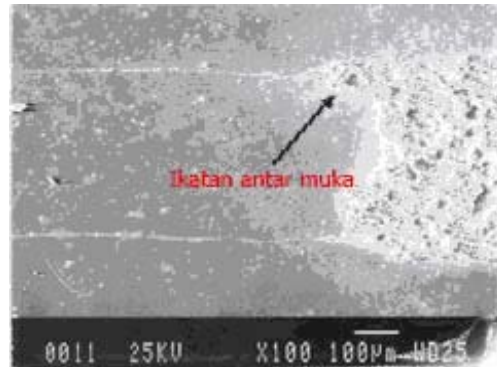
Gambar 4. Mikrostruktur ikatan antar muka kelongsong AlMg₂.

Dari hasil analisis mikrostruktur kelongsong AlMgSi dan AlMg₂, terlihat jelas perbedaan morfologi ikatan antar muka (*interface bonding*) kelongsong AlMgSi dengan ikatan antar muka kelongsong AlMg₂ seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3 dan Gambar 4. Proses fabrikasi kelongsong AlMgSi pada temperatur perolan 450 °C menghasilkan morfologi ikatan antar muka relatif lebih sempurna dibandingkan dengan morfologi ikatan antar muka kelongsong AlMg. Hal ini disebabkan temperatur perolan pada 450 °C yang dilanjutkan dengan proses anil pada temperatur 480 °C mampu meningkatkan luas bidang kontak antar muka yang mempercepat difusi atom antar muka sehingga menghasilkan ikatan antar muka logam yang relatif lebih baik.

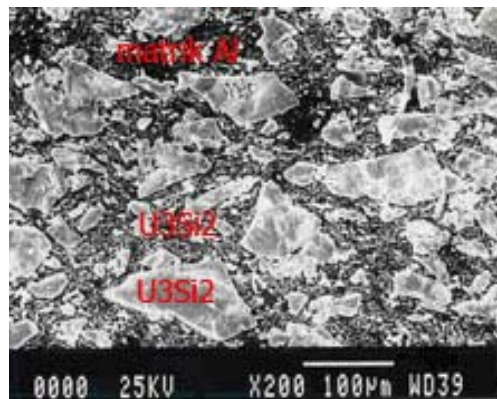
Dari Gambar 5 dan 6 dapat diketahui bahwa proses perolan pada temperatur 450 °C dan proses anil pada 480 °C yang dikenakan terhadap kelongsong AlMgSi menghasilkan ikatan antar muka IEB U_3Si_2 -Al dengan kelongsong AlMgSi lebih baik dibandingkan dengan ikatan antar muka IEB U_3Si_2 -Al dengan kelongsong AlMg₂ yang mengalami perolan pada temperatur 415 °C dan proses anil pada 425 °C. Hal ini disebabkan karena proses perolan pada temperatur 480 °C selain dapat meningkatkan kerapatan ikatan antar muka kelongsong AlMgSi yang lebih baik melalui peningkatan deformasi, dapat juga mengurangi atau memperkecil perbedaan kekerasan antar muka bahan bakar U_3Si_2 dengan kelongsongnya. Pengurangan perbedaan kekerasan ini diharapkan mampu mengeliminasi dan mencegah kemungkinan terjadinya *dogbone*^[13].



Gambar 5. Mikrostruktur ikatan antar muka kelongsong AlMgSi dengan U_3Si_2 -Al.

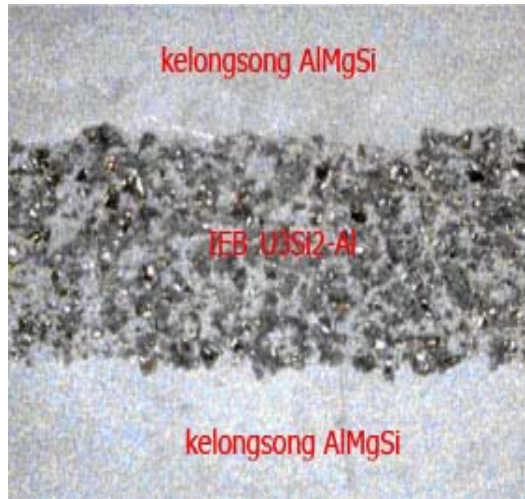


Gambar 6. Mikrostruktur ikatan antar muka kelongsong AlMg₂ dengan U₃Si₂-Al.

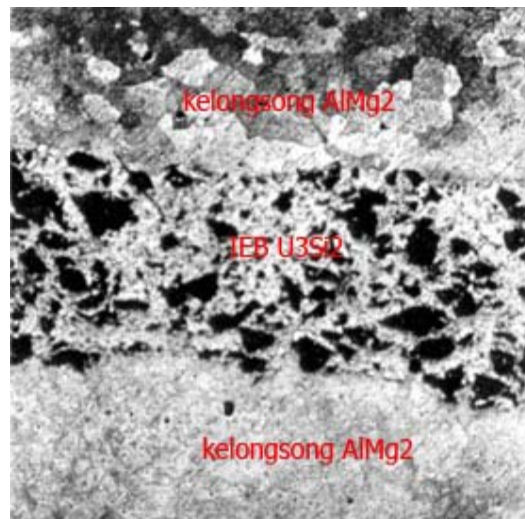


Gambar 7. Mikrostruktur IEB U₃Si₂-Al.

Dari analisis mikrostruktur terhadap IEB U₃Si₂-Al densitas 4,8 gU/cm³ pada Gambar 7 dapat diketahui distribusi butiran serbuk U₃Si₂ dan matrik Al. Morfologi partikel U₃Si₂ yang berwarna abu-abu terlihat dengan ukuran sekitar <90 µm dan >40 µm serta distribusi matrik Al berwarna hitam.



Gambar 8. Mikrostruktur PEB U_3Si_2 -Al (kelongsong AlMgSi).



Gambar 9. Mikrostruktur PEB U_3Si_2 -Al (kelongsong AlMg₂).

Analisis mikrostruktur juga dilakukan terhadap 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) menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscope*). Hasil analisis mikrostruktur menunjukkan terlihat jelas adanya perbedaan antara posisi inti elemen bakar U_3Si_2 -Al dengan posisi kelongsong AlMgSi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8 serta perbedaan posisi inti elemen bakar U_3Si_2 -Al dengan kelongsong AlMg₂ seperti yang terlihat pada Gambar 9. Posisi

kelongsong AlMgSi maupun kelongsong AlMg₂ berada di bagian tepi atas dan bawah sedangkan inti elemen bakar U₃Si₂-Al terdistribusi secara merata di bagian tengah PEB U₃Si₂-Al.

3.4. Analisis Laju Korosi

Analisis laju korosi juga telah dilakukan terhadap kelongsong AlMgSi, AlMg₂, AlMgSi rol, AlMg₂ rol PEB U₃Si₂-Al densitas 4,8 gU/cm³ menggunakan kelongsong AlMgSi dan PEB U₃Si₂-Al densitas 4,8 gU/cm³ menggunakan kelongsong AlMg₂. Analisis dilakukan dengan cara memotong sampel dengan ukuran panjang, lebar dan tinggi tertentu, kemudian sampel ditimbang untuk menentukan berat awal (W₀) seperti yang terlihat pada Tabel 4. Selanjutnya sampel yang sudah dipotong dipanaskan pada temperatur 150 °C selama 77 jam di dalam *autoclave*. Sampel hasil pemanasan selanjutnya ditimbang kembali untuk menentukan berat setelah korosi (W₁). Hasil analisis besarnya laju korosi dari kelongsong AlMgSi segar, AlMg₂ segar maupun rol dan PEB U₃Si₂-Al densitas 4,8 gU/cm³ dituangkan pada Tabel 4.

Dari Tabel 4 diketahui bahwa kelongsong AlMgSi mempunyai laju korosi sebesar 0,0666 g/dm² lebih kecil dibanding kelongsong AlMg₂ yang mempunyai laju korosi sebesar 0,0720 g/dm². Kecilnya laju korosi kelongsong AlMgSi disebabkan paduan AlMgSi mengalami larut padat membentuk senyawa Mg₂Si yang lebih banyak. Fenomena ini terjadi karena sebagian besar unsur Mg dengan kadar <1% yang larut padat dalam AlMgSi telah diikat oleh unsur Si terlebih dahulu membentuk senyawa Mg₂Si, dan unsur Mg tidak cukup untuk mengikat Al membentuk senyawa Mg₂Al₃. Pembentukan senyawa Mg₂Si tidak bersifat anodik terhadap matriknya sehingga tidak mengubah potensial elektrode kelongsong AlMgSi. Sedangkan pada kelongsong AlMg₂ kemungkinan terbentuknya fase Mg₂Al₃ relatif lebih besar. Kehadiran fase ini tidak diharapkan karena sifatnya yang relatif lebih anodik dari pada fase matriknya. Fenomena seperti ini tidak menguntungkan karena fase Mg₂Al₃ berpotensi untuk terkorosi pada daerah batas butir apabila berada di dalam media korosif. Fase Mg₂Al₃ ini juga mempercepat terjadinya proses korosi tegangan (*stress corrosion*) apabila mengalami perlakuan panas yang mengakibatkan terbentuk endapan yang lebih banyak pada batas butir.

Tabel 4. Data korosi selama 77 jam pada temperatur 150 °C.

No	Sampel	Kode	Selimut (dm ²)	W ₀ (g)	W ₁ (g)	ΔW (g)	Laju korosi (g/dm ²)	Rerata (g/dm ²)
1	AlMgSi	1.1	0,0160	0,1850	0,1861	0,0011	0,0686	0,0666
		1.2	0,0161	0,1828	0,1838	0,0010	0,0621	
		1.3	0,0159	0,1702	0,1713	0,0011	0,0692	
2	AlMg ₂	1.1	0,0161	0,1781	0,1794	0,0013	0,0807	0,0720
		1.2	0,0169	0,2152	0,2160	0,0008	0,0473	
		1.3	0,0159	0,1612	0,1626	0,0014	0,0880	
3	AlMgSi rol	1.1	0,0148	0,1874	0,1879	0,0005	0,0338	0,0508
		1.2	0,0146	0,1838	0,1846	0,0008	0,0548	
		1.3	0,0141	0,1799	0,1808	0,0009	0,0638	
4	AlMg ₂ rol	1.1	0,0137	0,1724	0,1731	0,0007	0,0511	0,0688
		1.2	0,0137	0,1721	0,1730	0,0009	0,0657	
		1.3	0,0134	0,1659	0,1671	0,0012	0,0896	
5	PEB U ₃ Si ₂ Al AlMgSi (SJ)	1.1	0,0145	0,1830	0,1832	0,0002	0,0138	0,0347
		1.2	0,0134	0,1635	0,1640	0,0005	0,0373	
		1.3	0,0142	0,1761	0,1769	0,0008	0,0563	
6	PEB U ₃ Si ₂ Al AlMgSi (SD)	1.1	0,0141	0,1757	0,1762	0,0005	0,0355	0,0359
		1.2	0,0137	0,1728	0,1734	0,0006	0,0438	
		1.3	0,0141	0,1763	0,1767	0,0004	0,0284	
7	PEB U ₃ Si ₂ Al AlMg ₂ (SJ)	1.1	0,0143	0,1747	0,1755	0,0008	0,0559	0,0589
		1.2	0,0140	0,1742	0,1751	0,0009	0,0643	
		1.3	0,0141	0,1761	0,1769	0,0008	0,0567	
8	PEB U ₃ Si ₂ -Al AlMg ₂ (SD)	1.1	0,0142	0,1788	0,1796	0,0008	0,0563	0,0585
		1.2	0,0141	0,1771	0,1779	0,0008	0,0567	
		1.3	0,0144	0,1796	0,1805	0,0009	0,0625	

Catatan: W₀ = berat awal, W₁ = berat setelah korosi, ΔW = W₁ – W₀, Laju korosi = g/dm²

Proses perolan yang dikenakan terhadap kelongsong AlMgSi maupun AlMg₂ menurunkan laju korosi kedua kelongsong tersebut. Hal ini disebabkan karena proses perolan kelongsong AlMgSi pada temperatur 450 °C menyebabkan terjadinya deformasi elongasi, dislokasi kemudian diikuti proses anil pada 480 °C atau di atas temperatur rekristalisasi menyebabkan terjadinya penataan ulang (*recovery*) menuju kondisi yang lebih stabil. Fenomena ini

berlaku juga terhadap kelongsong AlMg₂ yang mengalami proses perolan pada temperatur 415 °C dan anil pada 425 °C.

IV. KESIMPULAN

Dari analisis kekerasan diperoleh hasil bahwa kelongsong AlMgSi mempunyai kekerasan lebih kuat dibandingkan kelongsong AlMg₂ sebesar 115 HVN dan 70,1 HVN untuk masing – masing AlMgSi dan AlMgSi rol dan 50,9 HVN dan 47,1 HVN untuk kelongsong AlMg₂ dan AlMg₂ rol. Dari analisis laju korosi diperoleh kelongsong AlMgSi, AlMgSi rol mempunyai laju korosi masing masing sebesar 0,0666 g/dm² dan 0,0508 g/dm² lebih kecil dibanding kelongsong AlMg₂ segar dan AlMg₂ rol yaitu sebesar 0,0720 g/dm² dan 0,0688 g/dm², sedangkan dari analisis mikrostruktur diperoleh morfologi ikatan antar muka (*interface bonding*) kelongsong AlMgSi lebih baik dari kelongsong AlMg₂. Dari hasil analisis kekerasan, laju korosi dan mikrostruktur menunjukkan bahwa PEB U₃Si₂-Al densitas 4,8 gU/cm³ menggunakan kelongsong AlMgSi jauh lebih baik dibanding PEB U₃Si₂-Al densitas 4,8 gU/cm³ menggunakan kelongsong AlMg₂.

V. DAFTAR PUSTAKA

1. Tim Keselamatan Reaktor Serba Guna. (1998). Laporan Analisis Keselamatan Penggantian Elemen Bakar Oksida ke Silisida Densitas 2,96 g/cm³. RSG. OTH/LAK/01/98.
2. Masrukan. (1989-1999). Karakterisasi AlMgSi Untuk Pelat Sisi Ditinjau Sebagai Kelongsong Bahan Bakar Reaktor Riset. Hasil-Hasi Penelitian Elemen Bakar Nuklir, P2TBDU-BATAN, Serpong.
3. Benjamin, M.MA. (1983). Nuclear Reactor Materials and Applications. USA: VNR Company Inc.
4. Altenpohl. (1982). Aluminium Viewed From Within. Springer Verlag. German: Dusseldorf-FRG.
5. Mondolfo, L.F. (1976). Aluminium Alloys Structure and Properties. London Boston: Butterworths.
6. Hollingsworth, E.H. (1988). Corrosion of Aluminium and Aluminium Alloys. ASM.
7. Fontana, M.G. (1987). Corrosion Engineering. New York: McGraw-Hill.
8. Suropto, A. (1989). Deskripsi Singkat Proses Pembuatan Elemen Bakar Reaktor Riset Tipe MTR di IPEBRR. Serpong: Bidang Produksi Elemen Bakar Reaktor Riset, PEBN-BATAN.

9. Snelgrove, J.L., Domagala, R.F., Hofman, G.L., Wincek, T.C., Copeland, G.L., Hobbs, R.W., & Senn, R.L. (1987). The Use of U_3Si_2 Dispersed Al in Plate Type Fuel Elements for Research and Test Reactor. ANL/RERTR/TM-11.
10. Rhee, C.K., Pyun, S.I., & Kuk, I.H. (1991). Phase Formation and Growth at Interface between U_3Si and Aluminium. Korea Atomic Energy Institute, Daejon 305-606, Korea.
11. Siswosuwarno, M. (1985). Teknik Pembentukan Logam Jilid I. Institut Teknologi Bandung: Jurusan Mesin Fakultas Teknologi Industri.
12. Cahoon, J.R. (2006). Microstructure and Phase Constituents in the Interface Zone of Mg/Al Diffusion Bonding. Department of Mechanical and Manufacturing Engineering, University of Manitoba. Canada.
13. ASTM. (1992). Annual Book of ASTM Standards, 14.02, 658-665.