

STRUKTUR MIKRO DAN KARAKTERISTIK MEKANIK PEB U_3Si_2 -Al TMU $2,96 \text{ g/cm}^3$ DAN PASCA PERLAKUAN PANAS SUHU 500°C

Maman Kartaman A, Yusuf Nampira, Junaedi, dan Sri Ismarwanti

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir, BATAN, Kawasan Puspiptek, Serpong 15314
E-mail : makar@batan.go.id

ABSTRAK

STRUKTUR MIKRO DAN KARAKTERISTIK MEKANIK PEB U_3Si_2 -Al TMU $2,96 \text{ g/cm}^3$ PASCA PERLAKUAN PANAS SUHU 500°C . Telah dilakukan karakterisasi struktur mikro dan kekerasan terhadap PEB U_3Si_2 -Al TMU $2,96 \text{ g/cm}^3$ yang dikenakan perlakuan panas pada suhu 500°C selama 1, 3, 5 dan 7 jam. Pengamatan struktur mikro dilakukan menggunakan mikroskop optik dan SEM serta pengujian kekerasan terhadap bahan kelongsong PEB U_3Si_2 -Al menggunakan alat kekerasan makro vickers pada beban 2 Kgf. Mikrograf yang dihasilkan memiliki kualitas cukup baik yaitu bersih dari endapan pengotor baik pada kelongsong maupun inti elemen bakar nuklir dan goresan amplas relatif sedikit sehingga interpretasi atau analisis hasil struktur mikro dapat dilakukan secara benar. Struktur mikro PEB U_3Si_2 -Al kondisi as-polished memperlihatkan adanya deformasi plastis pada bagian tepi akibat pemotongan sedangkan pada bagian inti elemen bakar tidak ada perubahan signifikan. Dispersan U_3Si_2 memiliki bentuk tidak beraturan dengan ukuran bervariasi dari (21,2–115) μm dan tersebar relatif merata pada matrik Al. Pada dispersan teramati retakan mikro dan kenaikan waktu pemanasan tidak menyebabkan pembesaran retakan tersebut. Pengamatan struktur mikro PEB U_3Si_2 -Al pada bagian kelongsong yang telah di etsa menunjukkan adanya perubahan ukuran butir. Semakin lama waktu pemanasan maka ukuran butir relatif semakin membesar dan berdampak pada menurunnya nilai kekerasan kelongsong AlMg₂. Hasil uji kekerasan PEB U_3Si_2 -Al yang telah diberi perlakuan panas pada suhu 500°C selama 0, 1, 3, 5 dan 7 jam berturut-turut 44,62 HV, 34,05 HV, 34,05 HV, 31,47 HV dan 32,07 HV.

Kata Kunci : PEB U_3Si_2 -Al, Struktur mikro, Kekerasan, Perlakuan Panas

ABSTRACT

MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF FUEL ELEMENT U_3Si_2 -Al $2,96 \text{ g/cm}^3$ AFTER HEAT TREATED AT TEMPERATURE 500°C . Microstructure and hardness characterization has been carried out on PEB U_3Si_2 -Al TMU 2.96 g/cm^3 which heat treated at a temperature of 500°C for 1, 3, 5 and 7 hours. Microstructural observations made using SEM and optical microscopy and hardness testing of the cladding material using a macro vickers hardness at 2 kgf load. The resulting micrographs of good enough quality that is clean of sediment impurities both in the core and cladding of fuel elements of nuclear fuel and relatively little sandpaper scratches so the interpretation or analysis of the results of the microstructure can be done correctly. PEB U_3Si_2 -Al microstructure as polished condition showed plastic deformation at the edges due to cutting while in the core fuel elements no significant change. Dispersants U_3Si_2 have irregular shapes with sizes ranging from (21,2–115) μm and spread relatively uniform in the matrix Al. At dispersants observed micro-cracks and increase the heating time does not cause enlargement of the cracks. Microstructural observations U_3Si_2 PEB - Al as-etched in the cladding that has been shows a change in grain size. The longer the time warming the grain size is relatively larger and decrease the hardness value of AlMg₂ cladding. Hardness test results of PEB U_3Si_2 -Al heat treated at a temperature of 500°C for 0, 1, 3, 5 and 7 hours, respectively 44.62 HV; 34.05 HV; HV 34.05; 31.47 HV and 32.07 HV.

Keywords : PEB U_3Si_2 -Al, Microstructure, Hardness, Heat Treatment

PENDAHULUAN

Bahan bakar reaktor riset yang

digunakan di PRS – GAS pada saat ini adalah jenis silisida yaitu U_3Si_2 -Al TMU $2,96 \text{ g/cm}^3$. Selama berada di dalam reaktor, bahan bakar

mengalami beberapa jenis pembebanan diantaranya yaitu *flux neutron* dan temperatur. Fluk neutron yang diterima bahan bakar sebesar $131,1 \text{ W/cm}^3$ dan temperatur air pendingin maksimal $48,67^\circ\text{C}$, sedangkan temperatur yang diterima pada bagian inti bahan bakar dan antarmuka inti – kelongsong lebih dari 200°C ^[1]. Bahan bakar $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ pada kondisi tersebut dapat mengakibatkan perubahan sifat baik struktur mikro maupun kekuatan mekanik. Untuk itu perlu dilakukan karakterisasi terhadap PEB $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ TMU $2,96 \text{ g/cm}^3$ pra iradiasi yang telah mengalami perlakuan panas antara lain pengamatan struktur mikro dan kekerasan. Pada penelitian sebelumnya telah dilakukan pengujian struktur mikro terhadap PEB $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ TMU $2,96 \text{ g/cm}^3$ yang telah mengalami pengontrolan pada suhu 420°C . Struktur mikro yang dihasilkan belum terlihat adanya fasa baru akibat interaksi dispersan U_3Si_2 dengan matrik Al, meskipun berdasarkan diagram fasa dimungkinkan terbentuknya fasa baru yaitu U(Al,Si)_x pada suhu tinggi^[2]. Pada PEB $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ TMU $2,96 \text{ g/cm}^3$ juga telah dilakukan pengujian pasca iradiasi yang meliputi inspeksi visual dan uji γ -*scanning*. PEB $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ yang telah diiradiasi hingga *burn-up* 60% tidak mengalami kerusakan kelongsong atau distorsi pelat elemen bakar tetapi terdapat kenaikan ketebalan pelat akibat lapisan korosi di permukaan kelongsong yaitu aluminium oksida, dan dilaporkan bahwa ketebalan lapisan oksida (Boehmite) tersebut pada permukaan pelat sekitar $30\text{-}40 \mu\text{m}$ ^[3]. PEB $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ yang telah diiradiasi menunjukkan adanya interaksi antara dispersan U_3Si_2 dengan matrik Al. Terbentuk lapisan pada antar muka dispersan U_3Si_2 dengan matrik Al yaitu lapisan U(Al,Si)_x dengan ketebalan relatif merata^[4]. Pada penelitian ini hanya menggunakan sampel PEB $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ pra iradiasi. Untuk mengetahui fenomena perubahan pada PEB $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ maka dilakukan simulasi pembebanan yaitu hanya pembebanan termal terhadap bahan bakar. Sampel PEB $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ TMU $2,96 \text{ g/cm}^3$ pra iradiasi dikenai perlakuan panas pada suhu 500°C selama rentang waktu dari 1 sampai dengan 7 jam. Pada suhu tersebut dimungkinkan bahan mengalami perubahan struktur dan sifat mekanik. Pada antar muka dispersan U_3Si_2 dan matrik Al akan terjadi interaksi yang menghasilkan fasa baru yang dapat berpengaruh terhadap kompaktilitas

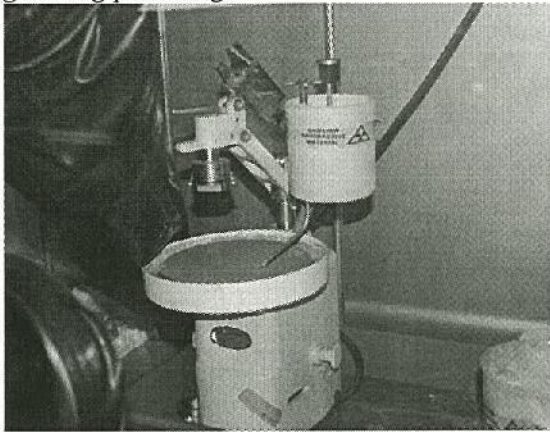
bahan bakar. Hasil analisis termokimia menunjukkan bahwa pada suhu sekitar ($600\text{-}650$) $^\circ\text{C}$ terjadi reaksi antara dispersan U_3Si_2 dengan matrik Al membentuk senyawa U(Al,Si)_x ^[5]. Pada kelongsong PEB $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ akan mengalami perubahan struktur yang berdampak pada penurunan kekuatan atau kekerasan bahan kelongsong. Perubahan kekerasan kelongsong AlMg2 dapat disebabkan oleh pelunakan dengan mekanisme *recovery*, rekristalisasi dan pertumbuhan butir. Ukuran butir kecil berarti memperbesar batas butir dan dapat menghambat pergerakan dislokasi sehingga kekuatan mekanik lebih tinggi termasuk nilai kekerasan^[6].

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui struktur mikro inti elemen bakar dan kelongsong dan hubungannya terhadap kekerasan bahan serta mengetahui interaksi dispersan U_3Si_2 dengan matrik Al. Pada suhu tinggi U_3Si_2 dengan matrik Al dapat terjadi reaksi antarmuka membentuk fasa baru U(Al,Si)_x . Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi masukan bagi pabrikan bahan bakar reaktor riset dan peneliti lain untuk memodifikasi baik permukaan dispersan U_3Si_2 atau matrik Al supaya lapisan U(Al,Si)_x tidak terbentuk pada antarmuka dispersan U_3Si_2 dan matrik Al. Pembentukan lapisan U(Al,Si)_x pada bahan bakar reaktor riset tidak diharapkan karena dapat menyebabkan perubahan dimensi atau *swelling*.

TATA KERJA

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah PEB $\text{U}_3\text{Si}_2\text{/Al}$ TMU $2,96 \text{ g/cm}^3$. Bahan tersebut lalu dikenai perlakuan panas pada suhu 500°C selama 1, 3, 5 dan 7 jam. Selanjutnya dilakukan serangkaian tahapan preparasi metalografi di dalam *glove box* R 135. Tahapan preparasi metalografi yang dilakukan adalah pemotongan, *mounting*, *grinding*, *polishing* dan *etching*. Proses *grinding* dengan kertas amplas SiC hingga ukuran mesh 2400 dengan parameter beban tekan $0,73 \text{ kg}$ (posisi tengah) dan kecepatan sekitar 200.rpm. Pada pekerjaan *polishing* digunakan pasta intan dari ukuran 3 sampai $1 \mu\text{m}$ dengan beban tekan sama yaitu $0,73 \text{ kg}$ dan kecepatan putar lebih rendah sekitar 150 rpm. Gambar 1.a menunjukkan alat *grinding* dan *polishing* di dalam *glove box* R 135 dan Gambar 1.b memperlihatkan penempatan dan cara

pengukuran beban tekan proses grinding/polishing.



Gambar 1.a. Alat grinding/polishing di R 135



Gambar 1.b. Penempatan posisi beban dan pengukuran beban tekan

Sampel PEB U_3Si_2/Al yang telah dipoles hingga ukuran $1 \mu m$ kemudian diamati perubahan struktur mikronya menggunakan mikroskop optik dan *Scanning Electron Microscope* (SEM) dengan mode gambar *secondary electron image* (SEI) serta pengujian kekerasan vickers PEB U_3Si_2/Al pada bagian kelongsong. Selain itu juga dilakukan pengamatan struktur mikro pada sampel PEB U_3Si_2/Al yang telah dietsa untuk mengetahui struktur butir pada bagian kelongsong karena sangat terkait dengan sifat kekerasan kelongsong PEB U_3Si_2/Al . Etsa yang digunakan adalah campuran 2 mL HF, 3 mL HCl, 5 mL HNO_3 dan 190 mL air.

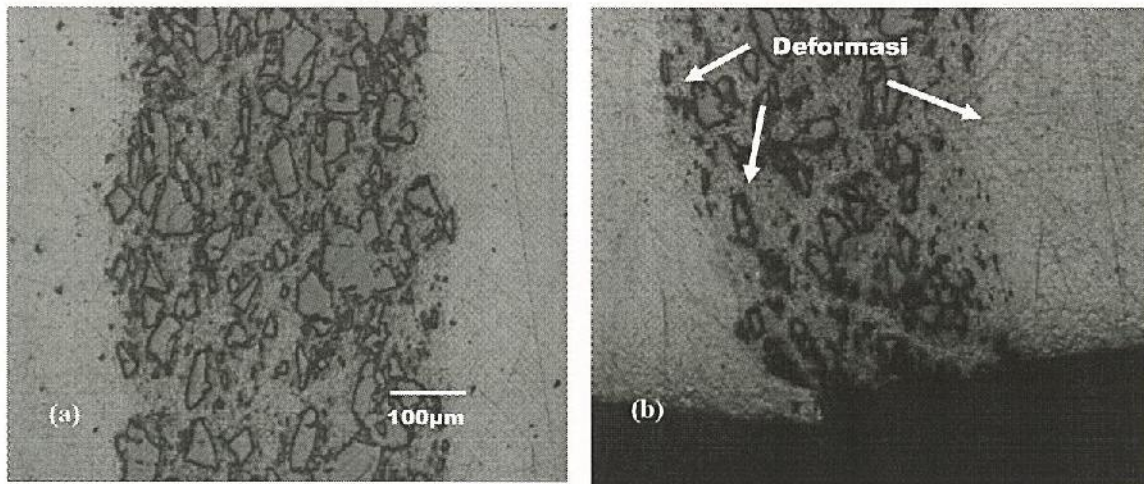
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengamatan struktur mikro

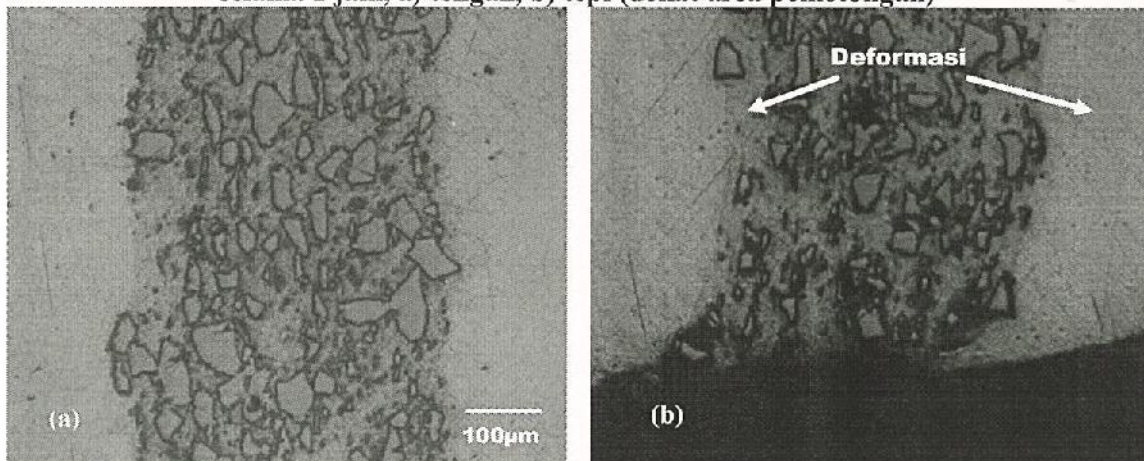
sampel PEB U_3Si_2/Al yang telah dipoles ditunjukkan pada Gambar 2 sampai dengan Gambar 5. Pengamatan Struktur mikro PEB U_3Si_2/Al dilakukan pada bagian kelongsong dan inti elemen bakar. Pengamatan pada bagian kelongsong adalah untuk mengetahui kualitas hasil preparasi metalografi menggunakan alat *grinding/polishing* semi otomatis dan pada bagian inti elemen bakar U_3Si_2/Al untuk mengetahui morfologi dispersan U_3Si_2 serta interaksi antar muka dispersan U_3Si_2 dan matrik Al. Secara keseluruhan terlihat bahwa pada Gambar 2 sampai Gambar 5 yang merupakan sampel kondisi *as-polished* masih terdapat *scratch* atau gores dari kertas amplas meskipun dengan jumlah relatif sedikit. Idealnya sampel yang telah dipoles (*as-polished*) mempunyai permukaan yang bebas goresan amplas. Goresan atau jejak amplas masih terlihat setelah di poles dapat disebabkan aliran atau *flowrate* pendingin air kurang besar dan juga posisi sampel dalam *specimen holder* masih dapat bergerak bebas sehingga arah goresan atau amplas tidak searah. Kekerasan partikel U_3Si_2 dan bahan kelongsong $AlMg_2$ yang berbeda merupakan salah satu penyebab hasil poles kurang sempurna. Partikel U_3Si_2 yang relatif lebih keras dapat menggores bahan *cladding* pada saat proses pengamplasan dan juga bila pembersihan kurang baik maka partikel U_3Si_2 dapat menempel dalam bahan kelongsong. Meskipun goresan pada kelongsong tidak berpengaruh pada pengamatan struktur mikro di bagian inti elemen bakar (*meat*), namun demikian goresan harus diminimalkan supaya tidak mengganggu atau menyebabkan salah interpretasi. Pemotongan sampel PEB U_3Si_2/Al menggunakan alat yang seperti alat potong di ZG 102. Pada bagian yang dipotong mengalami deformasi plastis dengan kedalaman rata-rata sekitar (0,75-1) mm seperti ditunjukkan pada Gambar 2.b s.d Gambar 5.b yang merupakan struktur mikro dengan mikroskop optik. Bagian yang terdeformasi akibat pemotongan awal ini tidak boleh ada karena dapat mempengaruhi interpretasi struktur mikro sebenarnya. Oleh karena itu bagian sampel yang mengalami deformasi tersebut harus dihilangkan dengan cara pemotongan menggunakan *diamond cutting* atau dengan pengamplasan. Gambar 2 sampai dengan Gambar 5 memperlihatkan dispersan U_3Si_2 tersebar merata pada matrik Al dan tidak

terdapat pengelompokan/*clustering* pada titik tertentu. Pemanasan terhadap PEB U_3Si_2 -Al pada suhu $500^\circ C$ dengan variasi waktu 1, 3, 5 dan 7 jam tidak memperlihatkan perubahan baik pada dispersan U_3Si_2 maupun matrik Al. Hal ini dapat disebabkan waktu tahan masih

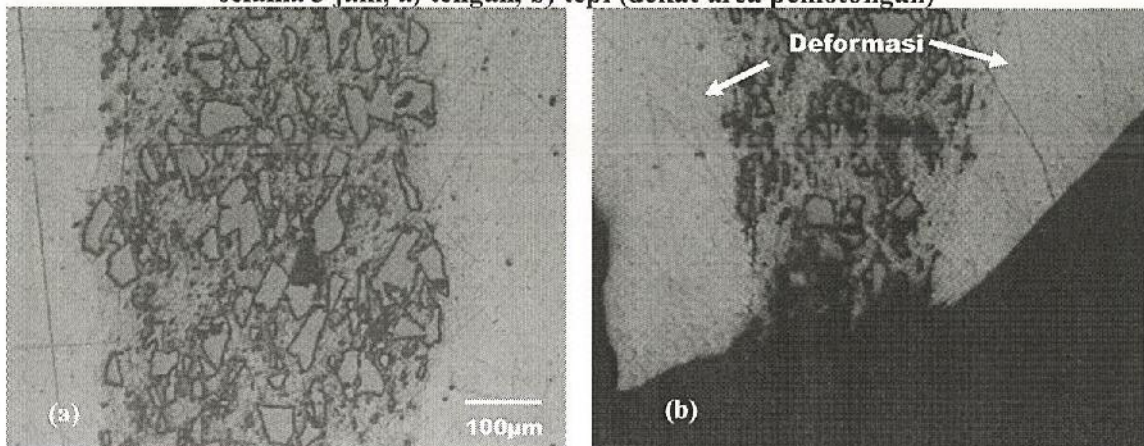
relatif singkat. Hasil penelitian lain memperlihatkan bahwa waktu pemanasan dari (1-5) hari dapat menyebabkan retakan pada dispersan dimana semakin lama waktu pemanasan maka retakan semakin besar [7].



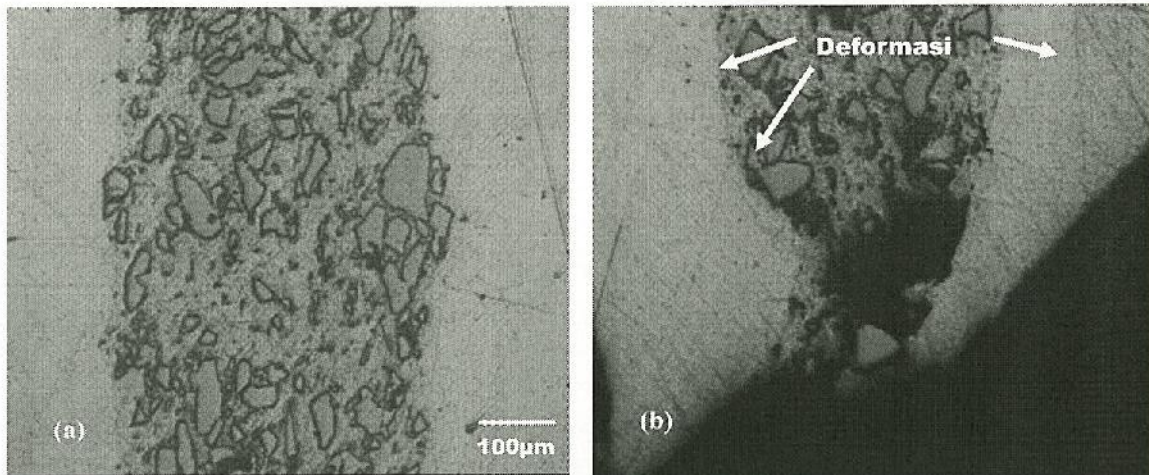
Gambar 2. Struktur mikro PEB U_3Si_2 -Al (*As-Polished*) pada pemanasan $500^\circ C$ selama 1 jam, a) tengah, b) tepi (dekat area pemotongan)



Gambar 3. Struktur mikro PEB U_3Si_2 -Al (*As-Polished*) pada pemanasan $500^\circ C$ selama 3 jam, a) tengah, b) tepi (dekat area pemotongan)



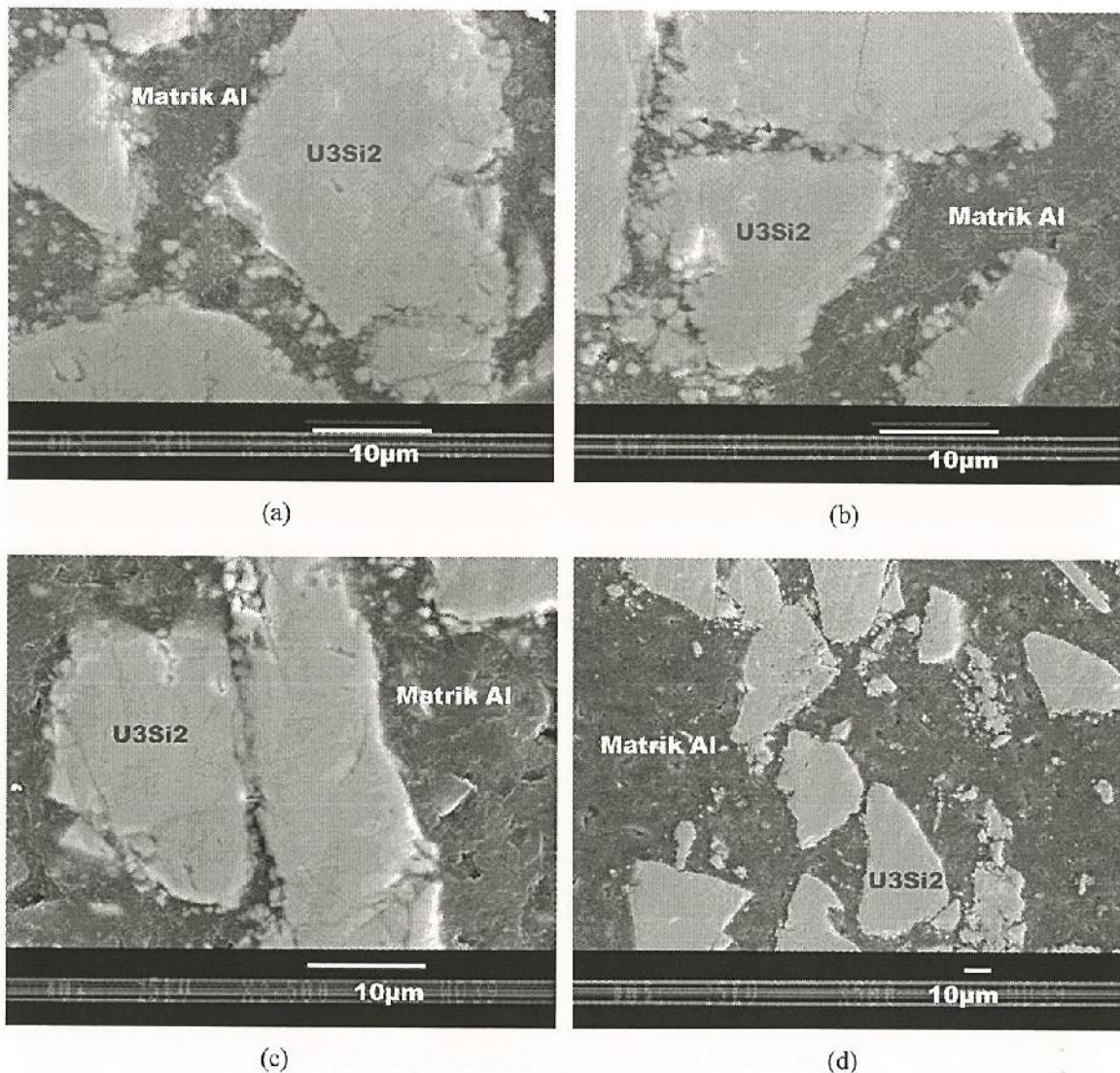
Gambar 4. Struktur mikro PEB U_3Si_2 -Al (*As-Polished*) pada pemanasan $500^\circ C$ selama 5 jam, a) tengah, b) tepi (dekat area pemotongan)



Gambar 5. Struktur mikro PEB U_3Si_2 -Al (As-Polished) pada pemanasan $500^\circ C$ selama 7 jam, a) tengah, b) tepi (dekat area pemotongan)

Mikrograf yang dihasilkan menggunakan SEM untuk sampel PEB U_3Si_2 -Al TMU $2,96 \text{ g/cm}^3$ pada pemanasan $500^\circ C$ selama 1, 3, 5 dan 7 jam ditunjukkan pada Gambar 6.a sampa dengan Gambar 6.d. Pada gambar terlihat morfologi dispersan U_3Si_2 secara detail yaitu bentuk dan ukuran dispersan, dan kondisi antarmuka dispersan dan matrik. PEB U_3Si_2 -Al dengan tingkat muat TMU $2,96 \text{ gr/cm}^3$ memiliki distribusi partikel cukup homogen dengan ukuran dari sekitar (21,2–115) μm dan rata-rata sebesar $69,5 \mu\text{m}$. Dispersan U_3Si_2 terdispersi secara merata dalam matrik. Dispersan U_3Si_2 berwarna abu-abu sedangkan matrik Al berwarna lebih gelap. Partikel dispersan mempunyai bentuk tidak beraturan (*irregular*) dan pada dispersan terdapat retakan mikro lebih disebabkan oleh proses *milling* dan *rolling*. Bentuk partikel dispersan yang tidak beraturan merupakan karakteristik dari pembuatan serbuk secara mekanik. Pada dispersan terdapat retakan-retakan mikro dan fragmentasi partikel menjadi ukuran lebih kecil akibat proses *milling* dan pengerolan. Pada antarmuka dispersan dengan matrik Al tidak terdapat adanya fasa baru. Pemanasan

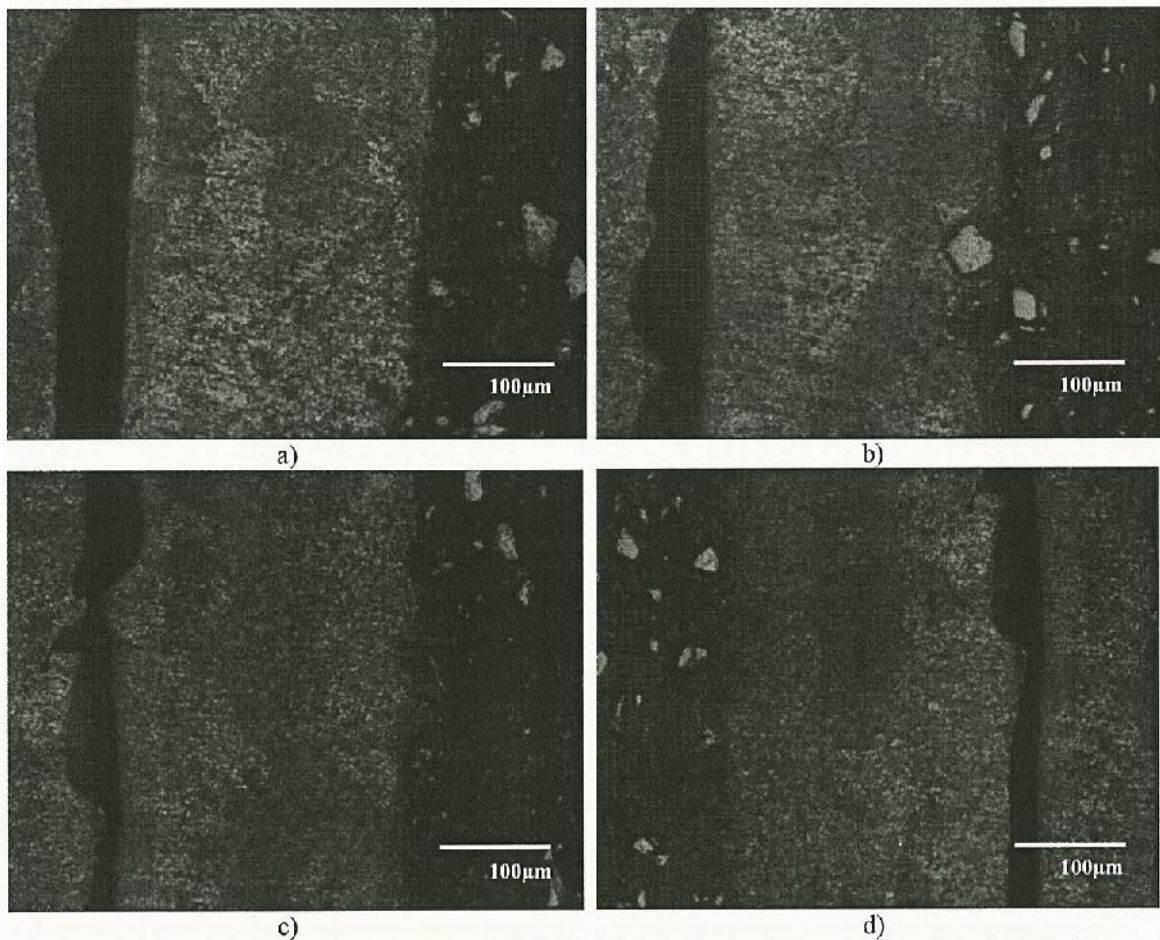
pada suhu $500^\circ C$ selama (1-7) jam tidak menyebabkan perubahan struktur mikro secara signifikan terutama pada antar muka partikel dengan matrik Al. Hal ini menunjukkan bahwa PEB U_3Si_2 /Al mempunyai kestabilan fasa dan kompatibilitas sangat baik. Pada daerah antarmuka/*interface* antara dispersan-matrik tidak ditemukan *disbonding* sehingga kompatibilitas bahan bakar cukup baik. Aluminium dan paduannya umumnya memiliki sifat *wettability* atau kemampuan membasahi rendah terhadap berbagai jenis keramik dan senyawa antar logam termasuk U_3Si_2 , sehingga proses pencampuran keramik dengan aluminium *melalui* fasa cair menghasilkan *gap* atau rongga pada antarmuka pertikel keramik dan matriknya. Tetapi karena pada pembuatan atau fabrikasi PEB U_3Si_2 -Al menggunakan metode metalurgi serbuk atau tidak murni melalui peleburan maka kendala *wettability* Al terhadap partikel keramik yang rendah dapat diatasi. Antarmuka partikel U_3Si_2 dan matrik Al tidak terdapat rongga yang dapat menurunkan kekuatan mekanik dan integritas bahan bakar.



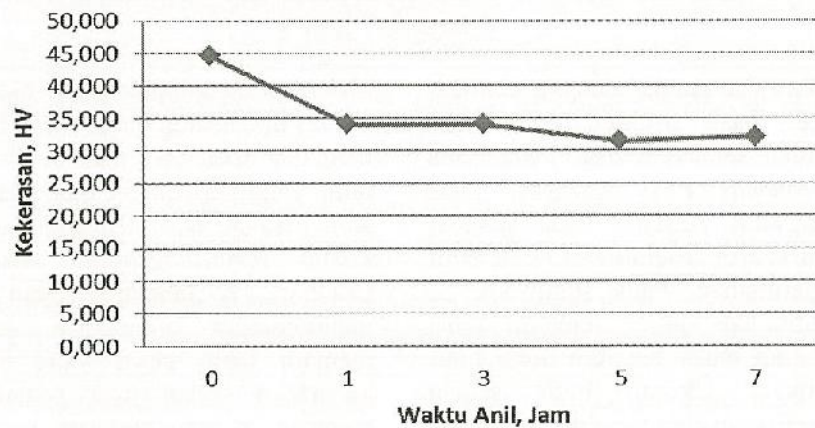
Gambar 6. Mikrograf PEB U_3Si_2/Al setelah pemanasan $500\text{ }^{\circ}C$ waktu a) 1 jam, b) 3 jam, c) 5 jam, d) 7 jam

Gambar 7.a sampai dengan Gambar 7.d merupakan hasil struktur mikro PEB U_3Si_2/Al kondisi setelah dietsa. Pengetsaan dilakukan terhadap PEB U_3Si_2/Al pada bagian kelongsong $AlMg_2$. Pada gambar terlihat bahwa secara keseluruhan besar butir mengalami perubahan. Pada suhu $500\text{ }^{\circ}C$ terjadi pertumbuhan butir. Semakin lama waktu pemanasan maka semakin besar butir yang dihasilkan. Ukuran butir sangat berpengaruh terhadap sifat keseluruhan bahan termasuk termasuk kekerasannya. Semakin kecil ukuran butir maka semakin tinggi kekuatan atau kekerasan bahan $AlMg_2$. Hal ini disebabkan ukuran butir kecil memiliki banyak batas butir dan batas butir tersebut menjadi penghambat dislokasi sehingga bahan menjadi lebih kuat. Batas butir bertindak sebagai penghalang dislokasi slip (*slip dislocation*) yang menyebabkan

dislokasi menumpuk pada bidang slip (*slip plane*) dibelakang batas butir. Dislokasi yang mencoba melewati dari butir yang satu ke butir yang berdekatan mengalami perubahan arah gerakan dan menyebabkan misorientasi kristal (*crystallographic misorientation*)^[8]. Gambar 7.a sampai dengan Gambar 7.d menunjukkan perubahan ukuran butir menjadi lebih besar yang mengakibatkan kekerasan bahan juga semakin menurun. Gambar 8 menunjukkan kurva kekerasan terhadap waktu anil yang memperlihatkan penurunan nilai kekerasan seiring dengan bertambahnya waktu anil. Nilai kekerasan pada pemanasan suhu $500\text{ }^{\circ}C$ selama 0, 1, 3, 5 dan 7 jam berturut-turut 44,62 HV; 34,05 HV; 34,05 HV; 31,47 HV dan 32,07 HV. Semakin lama waktu pemanasan atau *aniling* maka kekerasan bahan cenderung semakin menurun.



Gambar 7. Struktur mikro kelongsong PEB U_3Si_2/Al setelah proses anil suhu $500\text{ }^{\circ}C$, waktu anil a) 1 jam, b) 3 jam, c) 5 jam, d) 7 jam



Gambar 8. Kekerasan kelongsong PEB U_3Si_2/Al setelah pemanasan pada suhu $500\text{ }^{\circ}C$

KESIMPULAN

Preparasi metalografi terutama grinding dan polishing yang dilakukan menghasilkan struktur mikro *as-polished* cukup baik, meskipun pada permukaan

sampel *as-polished* masih terdapat goresan namun relatif kecil dan tidak mengganggu interpretasi struktur mikro yang dihasilkan. Permukaan sampel tidak menunjukkan adanya cacat-cacat hasil proses *grinding* dan

polishing yang dapat mengganggu interpretasi gambar seperti endapan air, dan endapan pengotor lainnya yang berasal dari dalam bahan atau dari luar bahan. Struktur mikro PEB U_3Si_2/Al tidak mengalami perubahan signifikan. Pada daerah dekat pemotongan dengan pelat terdapat deformasi plastis. Struktur mikro sampel PEB U_3Si_2-Al yang telah dietsa pada kelongsong $AlMg_2$ mengalami perubahan ukuran butir. Nilai kekerasan pada pemanasan suhu $500\text{ }^\circ C$ selama 0, 1, 3, 5 dan 7 jam berturut-turut 44,62 HV; 34,05 HV; 34,05 HV; 31,47 HV dan 32,07 HV. Semakin lama pemanasan, maka ukuran butir menjadi lebih besar dan berdampak pada penurunan kekerasan.

DAFTAR PUSTAKA

1. Suwardi., *Performance Prediction Of High Density Nuclear fuel Plate Containing U-7%Mo/Al*. Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir Urania. Vol.18 No.3 , Oktober 2012: 163-171. (2012)
2. Suripto, Asmedi., Sarjono., Martoyo., Prospek Bahan Bakar Uranium Silisida Dengan Si Hipostokiometrik (Kadar Si<3,7%). Prosiding Presentasi daur Bahan Bakar Nuklir PEBN-BATAN, Jakarta 18-19 Maret 1996. (1996)
3. Suripto, A., Sugondo., Nasution, H., Hofman GL., *Post Irradiation Examination Of A Low Enriched U3Si2-Al Fuel Element manufactured And Irradiated At BATAN, Indonesia*. International Meeting on reduced Enrichment For research and test Reactors. Virginia, USA. (1994)
4. Kim, Ycon Soo., Hofman, Gerard L. *Interdiffusion in U₃Si-Al, U₃Si₂-Al, and USi-Al Dispersion Fuels During Irradiation*. Journal of Nuclear Materials. (2011)
5. Ginting, Aslina Br., . Identifikasi Senyawa Yang Terbentuk Akibat reaksi termokimia Pada Ingot Bahan Bakar U_3O_8-Al , U_3Si_2-Al dan $UMo-Al$ menggunakan *X-ray Diffractometer*. Jurnal Teknologi Bahan Bakar Nuklir. Vol.2 No.2 Juni 2006 : 56-115. (2006)
6. Mangonon, Pat L. *The Principles of Material Selection for Engineering Design*. Prentice-Hall International, Inc. (1999)
7. Samosir, Nusin. Karakterisasi Struktur Mikro PEB U_3Si_2-Al Dengan Menggunakan Scanning Electron Microscope. Presentasi Peneliti Muda Bidang Metalurgi, PTBN – BATAN, Serpong. (2005)
8. Sugondo., (2012), Kinetika Pertumbuhan Butir Paduan Zry-4Sn Rendah. Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir URANIA. Vol.18 No.3, Oktober 2012: 103-141. (2012)