

PENGARUH DENSITAS URANIUM PADA PROSES PEMBUATAN PELAT ELEMEN BAKAR DISPERSI U-7Mo/Al DAN U-7Mo/Al-Si

Supardjo, Agoeng K, Maman K. A, Boybul

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir - BATAN

Kawasan Puspptek Serpong, Tangerang Selatan, 15314

e-mail : suparjo@batan.go.id

(Naskah diterima tanggal: 30-08-2012, disetujui: 21-09-2012)

ABSTRAK

PENGARUH DENSITAS URANIUM PADA PROSES PEMBUATAN PELAT ELEMEN BAKAR DISPERSI U-7Mo/Al dan U-7Mo/Al-Si. Penelitian ini dilakukan dalam rangka mendapatkan data pengaruh proses pengerolan terhadap karakteristik produk PEB U-7Mo/Al dan U-7Mo/Al-Si densitas uranium 3,6 dan 6,0gU/cm³. Lingkup penelitian meliputi pembuatan inti elemen bakar/IEB dan pelat elemen bakar/PEB U-7Mo/Al dan U-7Mo/Al-Si serta pengujian yang meliputi: strukturmikro, kekerasan dan tebal kelongsong PEB. Pengujian strukturmikro pelat AlMg2 dan AlMgSi1 sebagai kelongsong dan PEB U-7Mo/Al dan U-7Mo/Al-Si dilakukan dengan teknik metalografi, sedangkan kekerasan kelongsong dan meat PEB dengan uji kekerasan vickers. Serbuk U-7Mo yang digunakan sebagai bahan bakar memiliki diameter partikel dengan komposisi -150 μm + 44 μm = 93,2% dan -44 μm = 6,8%. Hasil uji/analisis serbuk U-7Mo memiliki kadar U= 92,926% dan densitas 15,84 g/cm³ dan densitas matriks Al 2,7 g/cm³. Komposisi serbuk U-7Mo dan matriks Al/Al-Si untuk membuat inti elemen bakar/IEB.U-7Mo/Al dan U-7Mo/Al-Si dimensi 25x15x3,15 mm densitas 3,6 dan 6,0gU/cm³ dilakukan dengan perhitungan. Hasil hitung komposisi U-7Mo = 4,4009 g dan matriks Al/Al-Si = 2,0104 g untuk densitas uranium 3,6gU/cm³ serta U-7Mo = 7,3349 g dan matriks Al/Al-Si =1,5101 g untuk densitas uranium 6,0 gU/cm³ dan pengepresan tekanan 15 bar diperoleh ketebalan 3,00 mm dan 3,13 mm. IEB.U-7Mo/Al dan U-7Mo/Al-Si bersama *frame* dan *cover* dirakit menjadi paket rol, kemudian dirol panas pada temperatur 425°C untuk kelongsong AlMg2 dan 450°C untuk kelongsong AlMgSi1 dilanjutkan rol dingin hingga ketebalan 1,40 mm. Pelat elemen bakar hasil rol dipotong pada sisi lebar dan panjang dengan meat berada ditengah-tengahnya. Pengambilan sampel untuk uji strukturmikro, kekerasan *meat* dan kelongsong serta tebal kelongsong dilakukan dengan memotong meat PEB di daerah SD, TG dan SJ kemudian dilakukan preparasi sampel dan pengujian. Hasil uji menunjukkan bahwa partikel U-7Mo cenderung memanjang sesuai arah rol. Kekerasan kelongsong AlMg2 dan AlMgSi masing-masing sekitar 44,620 VHN, sedangkan kekerasan meat untuk PEB U-7Mo/Al/ U-7Mo/Al-Si densitas 3,60 gU/cm³ sebesar 182,245 VHN, sedangkan untuk densitas uranium 6,0gU/cm³ sebesar 209,272 VHN. Kenaikan kekerasan meat PEB menyebabkan pada proses pengerolan terjadi pengumpulan partikel U-7Mo sehingga kelongsong menjadi tipis. Data pengukuran diperoleh bahwa tebal kelongsong PEB U-7Mo/Al dan U-7Mo/Al-Si densitas uranium 3,6 gU/cm³ memenuhi persyaratan karena tebal kelongsong minimum >0,25 mm, sedangkan untuk densitas 6,0 gU/cm³ tidak memenuhi karena terdapat tebal minimum 0,243 mm untuk kelongsong AlMg2 dan 0,106 mm untuk kelongsong AlMgSi1. Untuk mengatasi ketipisan tebal kelongsong tersebut beberapa kemungkinan yang perlu dilakukan adalah

menggunakan serbuk U-7Mo dengan partikel yang lebih halus atau menggunakan bahan kelongsong paduan Al yang memiliki kekerasan lebih tinggi.

Kata kunci : bahan bakar dispersi, pelat elemen bakar U-7Mo/Al dan U-7Mo/Al-Si, densitas uranium, tebal kelongsong.

ABSTRACT

THE URANIUM DENSITY EFFECT ON PRODUCTION PROCESS U-7Mo/Al AND U-7Mo/Al-Si OF DISPERSION FUEL PLATE. *The research was conducted in order to obtain data on the influence of rolling process and product characteristics of U-7Mo/Al U-7Mo/Al-Si fuel plate with 3.6 and 6.0 gU/cm³ uranium density. The scope of the study includes the manufacture of U-7Mo/Al and U-7Mo/Al-Si fuel core and fuel plate and testing include: microstructure, hardness and fuel plate cladding thickness. The microstructure testing of AlMg2 and AlMgSi1 plate as cladding and U-7Mo/Al and U-7Mo/Al-Si fuel plate done metallographic techniques, while cladding and meat of fuel plate hardness with vickers hardness test. The U-7Mo powder used as a fuel has -150 μm particle with + 44 μm = 93.2% and -44 μm = 6.8% composition. The test results / analysis of U-7Mo powder had 92.926% uranium and a density of 15.84 g/cm³ and 2.7 g/cm³ density of Al matrix. The U-7Mo powder and matrix Al / Al-Si composition to make U-7Mo/Al-Si /U-7Mo/Al fuel core with 25x15x3, 15 mm dimensions and uranium density of 3.6 and 6.0 gU/cm³ done calculations. The results of calculating the composition of U-7Mo = 4.4009 g and the matrix Al / Al-Si = 2.0104 g for uranium density of 3.6 gU/cm³ and U-7Mo = 7.3349 g and the matrix Al / Al-Si = 1,5101 g for uranium density of 6.0 gU/cm³ and pressing pressure of 15 bar is obtained thickness of 3.00 mm and 3.13 mm. The U-7Mo/Al and U-7Mo/Al-Si fuel core with frame and cover are assembled into packets by rollers, then heat rolled at temperatures of 425°C and 450°C for AlMg2 and AlMgSi1 cladding continued cold rolling to a thickness of 1.40 mm. Fuel plate results after rolling is cut on the width and length of the meat position being the middle. Sampling for microstructure test, hardness and meat and cladding thickness is done by cutting the meat of fuel plate in the near side, center and far side then performed sample preparation and testing. The test results show that the U-7Mo particles tend to be elongated the direction of the roll. Hardness of AlMg2 and AlMgSi cladding each about 44.620 VHN, while for U-7Mo/Al / U-7Mo/Al-Si meat of fuel plate with 3.60 gU/cm³ uranium density of 182.245 VHN hardness, while for 6.0 gU/cm³ uranium density amounted to 209.272 VHN. The increase in violence PEB meat causes the rolling process occurs particle collection U-7Mo making a thin cladding. Measurement data obtained by the U-7Mo/Al and U-7Mo/Al-Si fuel plate with uranium density of 3.6 gU/cm³ thick cladding and eligible for minimum cladding thickness > 0.25 mm, while for a 6.0 gU/cm³ uranium density not meet because there are minimum cladding thickness 0.243 mm for AlMg2 cladding and 0.106 mm for the AlMgSi1 cladding. To overcome the thinness of thick cladding are several possibilities that need to be done is to use U-7Mo powder with finer particles or using Al alloy materials that have a higher hardness.*

Key words : dispersion fuel, the U-7Mo/Al and U-7Mo/Al-Si fuel plate, uranium density, cladding thickness.

PENDAHULUAN

Penelitian bahan bakar dispersi tipe pelat U₃Si₂/Al telah dilakukan di Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir/PTBN-BATAN

sejak tahun 1989 yang merupakan pengembangan bahan bakar U₃O₈/Al dengan uranium pengayaan ± 19,75% ²³⁵U. Pelaksanaan kegiatan penelitian bahan bakar U₃Si₂/Al dengan uranium pengayaan ±

19,75% ^{235}U dilakukan menggunakan fasilitas Instalasi Produksi Elemen Bakar Reaktor Riset/IPEBRR dan telah berhasil difabrikasi bahan bakar dispersi $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ tipe pelat dengan spesifikasi sesuai dengan persyaratan bahan bakar dispersi^[1]. Uji iradiasi (bahan bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ densitas uranium $2,96 \text{ gU/cm}^3$) di RSG-GAS hingga *burn-up* sekitar 50 % menunjukkan bahwa stabilitas iradiasi selama di dalam reaktor sangat baik dan tidak terjadi perubahan ketebalan PEB yang berarti yaitu hanya sekitar 0,714 %. Berdasar data penelitian dan kondisi proses yang diterapkan, maka PT. Batan teknologi (persero) yang merupakan satu satunya Badan Usaha Milik Negara/BUMN di Indonesia yang bergerak di Bidang Nuklir menerapkan data penelitian tersebut ke dalam skala produksi untuk tujuan komersial. Berbekal pengalaman dan ketersediaan fasilitas fabrikasi di PT. Batan Teknologi (persero) dan fasilitas uji di BATAN maka penelitian pengembangan perlu dan siap dilakukan.

Paduan berbasis U-Mo merupakan material baru yang sedang diteliti di dunia dalam rangka pengembangan bahan bakar reaktor riset dengan uranium pengayaan $<20\% \text{ }^{235}\text{U}$. Penggunaan material berbasis U-Mo ke dalam bahan bakar jenis dispersi atau monolitik yang di fabrikasi menjadi elemen bakar ke dalam bentuk pelat atau *rod* (batang)^[2]. Bahan bakar monolitik merupakan bahan bakar yang berisi paduan berbasis U-7Mo dan dibungkus dengan kelongsong *stainless steel* atau *zircaloy*^[3], sedangkan bahan bakar dispersi terdiri dari campuran homogen antara serbuk material berbasis U-Mo dan serbuk matrik non fisil (Al, Mg dll), dibungkus dengan kelongsong pelat paduan aluminium. Material berbasis U-Mo dalam bentuk biner atau terner seperti U-Mo-Zr, U-Mo-Ti, U-Mo-Si memiliki berat jenis $> 16 \text{ g/cm}^3$, dan logam Mo, Zr, Ti dan Si mempunyai tampang lintang serapan neutron rendah sehingga berpeluang untuk digunakan sebagai bahan bakar reaktor riset^[4,5]. Selain sifat-sifat tersebut juga stabilitas iradiasi dan kemudahan olah ulang

bahan bakar pasca iradiasi menjadi faktor utama pemilihan material tersebut untuk digunakan sebagai bahan bakar reaktor riset.

Paduan U-7Mo bersifat ulet sehingga untuk pembuatan serbuk perlu dipilih metode yang tepat. Metode proses pembuatan serbuk material yang bersifat ulet seperti U-Mo dapat dilakukan beberapa cara diantaranya: *Mechanical Crushing* (*milling, grinding* atau penambahan unsur pepadu untuk menambah kerapuhan, *cryogenic mechanical crushing, hydride-dehydride* dan proses atomisasi^[6]. Proses produksi serbuk U-Mo adalah dengan membuat dekomposisi fasa $\gamma\text{-U}$ di dalam struktur selular. Struktur ini terdiri dari fasa $\alpha\text{-U}$ dan fasa $\gamma\text{-U}$ diperkaya dengan Mo atau U_2Mo , dimana U_2Mo mula-mula berada pada batas butir (*grain boundary*) fasa $\gamma\text{-U}$ kemudian akan tumbuh melalui pusat butir. Paduan hasil leburan dikondisikan dengan cara *annealing* sehingga diperoleh paduan U-Mo berstruktur selular.

Material berstruktur selular ini kemudian direaksikan dengan hidrogen menggunakan alat hidriding, maka fasa $\alpha\text{-U}$ ditransformasi menjadi UH_3 yang terletak di batas butir sehingga bahan mudah pecah dan terburai menjadi bongkahan-bongkahan antar butir. Melalui proses dehidriding maka fasa $\gamma\text{-U}$ akan diperoleh kembali dengan proses termal, yaitu mengatur suhu proses pada fasa γ . Paduan U-Mo yang diperoleh dalam bentuk butiran kasar kemudian digerus menjadi serbuk halus dengan diameter ukuran partikel $<150 \mu\text{m}$. Serbuk U-Mo yang telah memenuhi persyaratan tersebut dapat dilanjutkan untuk penelitian dalam bentuk pelat elemen bakar.

Pembuatan bahan bakar dispersi U-7Mo/Al dan U-7Mo/Al-Si dilakukan dengan teknik metalurgi serbuk, sedangkan pembentukan pelat elemen bakar U-7Mo/Al dan U-7Mo/Al-Si dengan teknik pengerolan panas dan dingin. Selama pengerolan, paket rol (susunan *frame, cover* dan inti elemen bakar/IEB) dipanaskan di dalam tungku

pemanas pada temperatur 500°C selama 1 jam, selanjutnya dilakukan pengerolan beberapa tahap hingga terjadi penipisan hingga mendekati ketebalan pelat elemen bakar/PEB standar yaitu sekitar 1,3 mm. Selama fabrikasi bahan bakar, fasa γ U-Mo terdekomposisi menjadi α -U dan γ ^[7]. Terjadinya dekomposisi membentuk fasa baru berpotensi terjadinya perubahan sifat material tersebut.

Pada penelitian ini dilakukan pembuatan PEB U-7Mo/Al dan U-7Mo/Al-Si, yang diawali dari pembuatan paduan U-7Mo dengan teknik peleburan menggunakan tungku busur listrik. Pembuatan serbuk dari ingot paduan U-7Mo dilakukan dengan teknik hidriding-dehidriding-milling, pembuatan inti elemen bakar campuran serbuk U-7Mo dan serbuk matriks Al/Al-Si dengan pengepresan, sedangkan pembuatan PEB mini U-Mo/Al dan U-7Mo/Al-Si dengan pengerolan panas dan dingin. Diharapkan dengan proses tersebut diperoleh data uji PEB mini U-7Mo/Al dan U-7Mo/Al-Si yang memenuhi persyaratan bahan bakar tipe pelat dengan tebal kelongsong $0,38^{+0,05}_{-0,08}$ mm, sehingga dapat digunakan sebagai pedoman penelitian lebih lanjut untuk mendapatkan PEB U-7Mo/Al dan U-7Mo/Al-Si yang memenuhi spesifikasi bahan bakar reaktor riset tipe pelat dan siap uji iradiasi di RSG-GAS^[8]

TATA KERJA

Penelitian dimulai dari pembuatan ingot paduan U-7Mo, serbuk U-7Mo, inti elemen bakar/IEB U-7Mo/Al-Si dan pelat elemen bakar/PEB U-7Mo/Al-Si. Ingot paduan U-7Mo dibuat dengan teknik peleburan menggunakan tungku busur listrik bermedia gas argon terhadap campuran 93% berat U dan 7% berat Mo. Ingot paduan U-7Mo hasil peleburan diubah menjadi serbuk dengan proses hidriding-dehidriding

– milling. Serbuk U-7Mo dan serbuk matriks Al/Al-Si dengan berat masing-masing sesuai dengan densitas uranium 3,6 dan 6,0 gU/cm³, dicampur hingga homogen dan dikompaksi pada tekanan 15 bar hingga terbentuk lempengan IEB U-7Mo/Al dan IEB U-7Mo/Al-Si dengan dimensi 25 x 15 x (\pm 3,15) mm. Selanjutnya IEB dirakit menjadi paket rol menggunakan material *frame* dan *cover* serta inti elemen bakar/IEB yang berbeda. *Frame* dan *cover* (kelongsong) AlMg2 dirakit menjadi paket rol menggunakan IEB U-7Mo/Al, sedangkan *kelongsong* AlMgSi1 menggunakan IEB U-7Mo/Al-Si. Masing-masing paket rol dibentuk menjadi pelat elemen bakar/PEB dengan pengerolan panas dan pengerolan dingin. Paket rol yang berisi IEB U-7Mo/Al dan paket rol yang berisi IEB U-7Mo/Al-Si masing-masing dirol panas pada temperatur 425°C dan 450°C. PEB hasil pengerolan masing-masing dilakukan pengujian terhadap strukturmikro dan kekerasan kelongsong sebelum dan setelah proses pengerolan panas, strukturmikro dan kekerasan *meat* bahan bakar serta tebal kelongsongnya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pelat elemen bakar/PEB U-7Mo/Al dan U-7Mo/Al-Si dibuat dengan teknik pengerolan panas pada temperatur masing-masing 425°C dan 450°C. PEB U-7Mo/Al menggunakan kelongsong pelat AlMg2, sedangkan PEB U-7Mo/Al-Si menggunakan AlMgSi1. Hasil analisis pelat AlMg2 dan AlMgSi1 dilakukan menggunakan AAS, dan diperoleh kadar unsur logam seperti ditampilkan pada Tabel 1. Ditinjau dari data analisis menunjukkan bahwa kedua material tersebut memenuhi persyaratan untuk digunakan sebagai kelongsong bahan bakar reaktor riset tipe pelat^[7].

Tabel 1. Komposisi unsur logam di dalam pelat AlMg2 dan AlMgSi1.

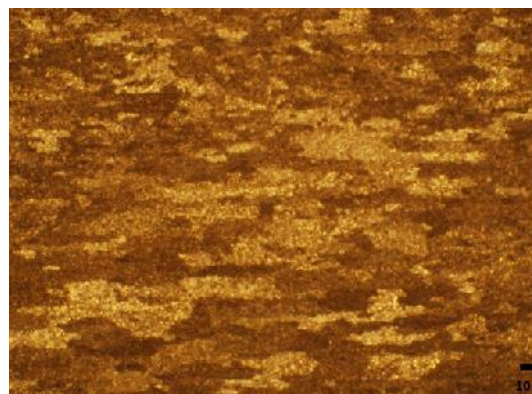
| Unsur logam | Kadar unsur logam, % | |
|-------------|----------------------|---------------|
| | Pelat AlMg2 | Pelat AlMgSi1 |
| Si | Ttd | 1,1500 |
| Mn | 0,0020 | 0,7100 |
| Mg | 1,8000 | 0,9800 |
| Cr | Ttd | 0,0040 |
| Ti | Ttd | Ttd |
| Fe | 0,1300 | 0,2500 |
| B | 0,0002 | 0,0005 |
| Cd | Ttd | Ttd |
| Co | Ttd | Ttd |
| Cu | 12,8400 | 107,0000 |
| Li | Ttd | Ttd |
| Zn | 30,0700 | 210,9300 |

Struktur mikro pelat AlMg2 dan AlMgSi1 *fresh material* yang digunakan sebagai kelongsong pelat elemen bakar/PEB. pada Gambar 1., terlihat bahwa AlMg2 terlihat butiran yang bulat sedangkan AlMgSi1 berbentuk pipih. Hasil pengukuran kekerasan pelat AlMg2 dan AlMgSi1 menggunakan metode Vickers dengan beban 2 kgf terhadap sampel uji yang diambil pada posisi sesuai arah rol dan tegak lurus arah rol seperti ditunjukkan pada Tabel 3. Data uji kekerasan pada perbedaan posisi

sampel uji tidak menunjukkan perbedaan kekerasan yang signifikan dengan kekerasan rerata pelat AlMg2 dan AlMgSi1 berturut-turut 47,477 VHN dan 101,697 VHN. Pelat AlMg2 dan AlMgSi1 dibuat *frame* dan *cover* (Gambar 2) dengan teknik pengerolan dan pemesinan. *Frame* berukuran 145 x 180 x 3,15 mm dengan dua lubang masing-masing berukuran 25 x 15 x 3,15 mm dan dua buah *cover* berukuran masing-masing 145 x 180 x 2,68 mm.

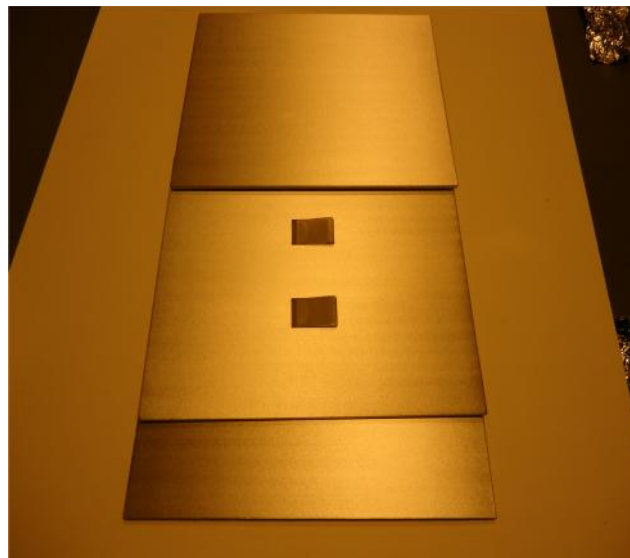


(a)



(b)

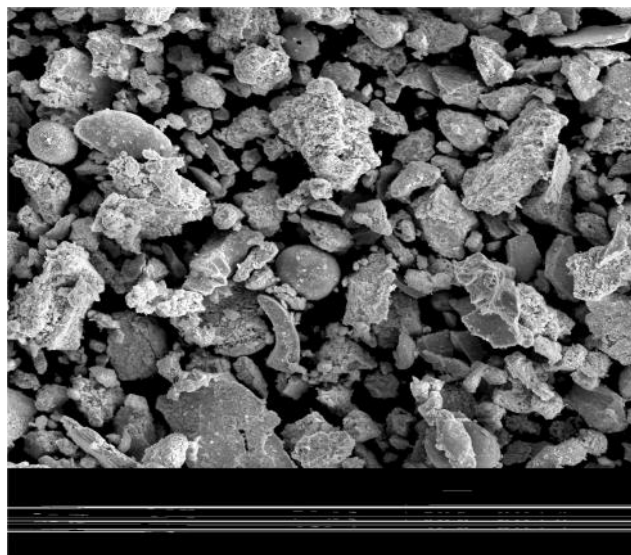
Gambar 1. Struktur mikro fresh material, (a) AlMg2, (b) AlMgSi.



Gambar 2. *Frame dan cover.*

Ingot paduan U-7Mo hasil peleburan sangat ulet dengan kekerasan rerata 240,4 VHN dan tidak dapat diubah langsung menjadi serbuk dengan cara mekanik (*ball-mill*) sehingga pada penelitian ini dilakukan dengan proses hidriding-dehidriding-*milling* Serbuk U-7Mo hasil proses hidriding-dehidriding-*milling* dari ingot paduan U-7Mo dengan diameter partikel $< 150 \mu\text{m}$ ditunjukkan pada Gambar 3. Bentuk partikel butir serbuk U-7Mo tidak beraturan dan pada permukaannya terdapat dua jenis yaitu halus dan kasar mirip dengan serbuk U-Mo hasil penelitian yang dilakukan oleh M. Durazzo et.al.^[9]. Permukaan partikel serbuk kasar merupakan partikel U-7Mo yang kemungkinan pada saat proses hidriding bereaksi dengan hidrogen membentuk senyawa U-7MoH_x yang bersifat rapuh,

sedangkan permukaan partikel halus dan cenderung bulat merupakan partikel yang belum/tidak bereaksi dengan hidrogen. Permukaan partikel yang halus tersebut mengindikasikan bahwa paduan masih ulet sehingga pada proses pembuatan serbuk menggunakan *ring-mill* penumbukan, partikel tidak pecah dan dengan tumbukan yang berulang-ulang menyebabkan permukaan menjadi halus. Proses dehidriding dilakukan pada temperatur $>500^\circ\text{C}$, maka senyawa U-7MoH_x terdisosiasi dan hidrogen lepas dari paduan U-MoH_x (material tetap rapuh) dengan meninggalkan jejak permukaan partikel U-7Mo yang kasar. Bentuk serbuk U-7Mo sangat berpengaruh terhadap mampu alir, homogenitas dengan serbuk matriks Al, pembentukan IEB dan pengerolan PEB.



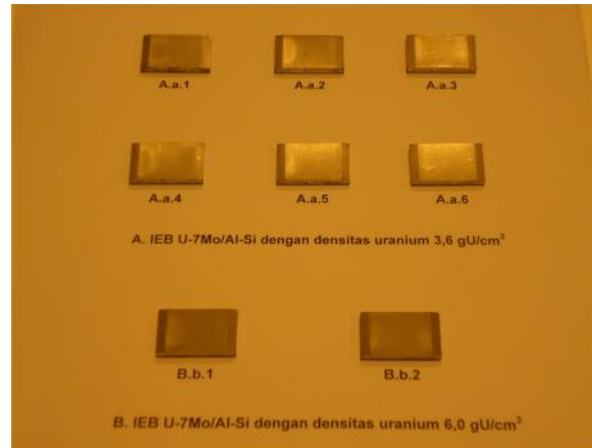
Gambar 3. SEM serbuk U-7Mo hasil proses hidriding - dehidriding - *milling*.

Inti Elemen Bakar/IEB U-7Mo/Al atau U-7Mo/Al-Si densitas uranium 3,6 dan 6 gU/cm³, merupakan campuran homogen antara serbuk bahan bakar U-7Mo dan serbuk matriks Al / Al-Si yang dibentuk melalui proses kompaksi pada tekanan 15 bar. Desain IEB berukuran 25 x 15 x ± 3,15 mm (volume = 1,13625 cm³) dan berdasar volume tersebut dan hasil analisis kadar U dalam U-7Mo= 92,926%, berat jenis U-7Mo = 15,84 g/cm³, berat jenis matriks Al = 2,70 g/cm³, maka komposisi campuran serbuk bahan bakar U-7Mo dan matriks serbuk Al/Al-Si dapat dihitung dengan hasil seperti ditunjukkan pada Tabel 2. Dari Tabel 2 terlihat bahwa makin tinggi densitas uranium jumlah bahan bakar U-7Mo meningkat

sedangkan berat matriks Al/Al-Si makin sedikit. Gambar 4 merupakan IEB U-7Mo/Al-Si hasil kompaksi dengan dimensi 25 x 15 x 3,0 mm untuk densitas 3,6 gU/cm³ dan 25 x 15 x 3,13 mm untuk densitas 6,0 gU/cm³. Ketebalan IEB dengan densitas uranium 6,0 gU/cm³ lebih tinggi dibandingkan dengan densitas 3,6 gU/cm³. Hal ini disebabkan makin tinggi densitas uranium, maka jumlah serbuk bahan bakar U-7Mo makin banyak sedangkan jumlah matriks Al makin sedikit sehingga dengan kekerasan U-7Mo (240,4 VHN) yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan Al (47,477 VHN) maka pada tekanan kompaksi yang sama, ketebalannya lebih tinggi.

Tabel 2. Komposisi berat serbuk U-7Mo dengan matriks Al/Al-Si

| Jenis Bahan bakar | Densitas Uranium, gU/cm ³ | Berat serbuk U-7Mo, g | Berat serbuk matriks Al, g | Berat serbuk matriks Si, g |
|-------------------|--------------------------------------|-----------------------|----------------------------|----------------------------|
| U-7Mo/Al | 3,6 | 4,4009 | 2,0104 | - |
| | 6,0 | 7,3349 | 1,5101 | - |
| U-7Mo/Al-Si | 3,6 | 4,4009 | 1,9099 | 0,1005 |
| | 6,0 | 7,3349 | 1,4346 | 0,0755 |

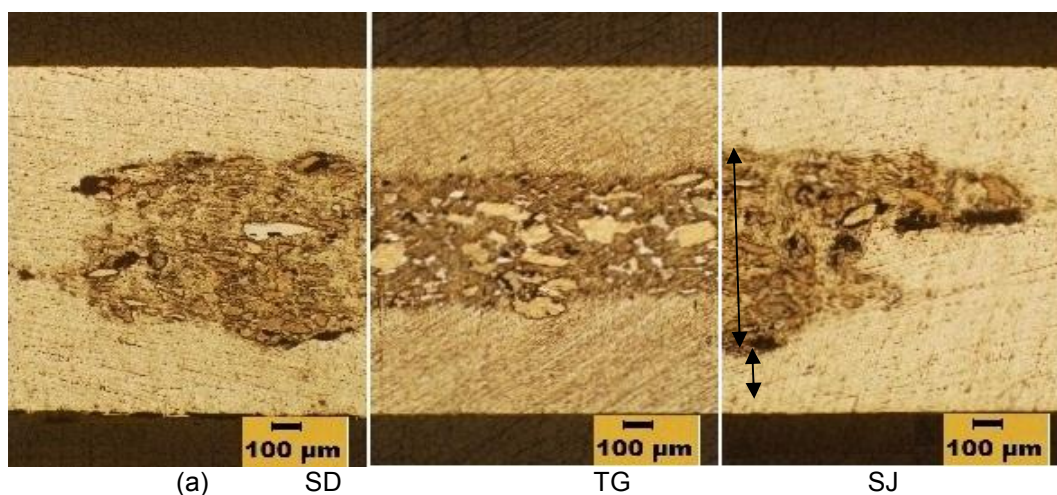


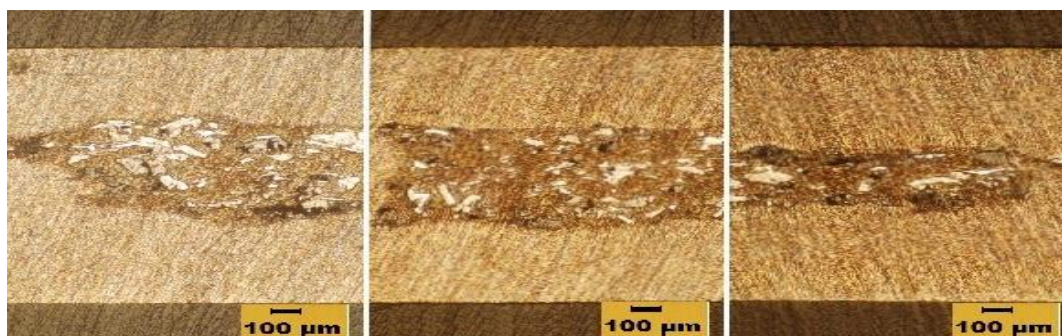
Gambar 4. Inti elemen bakar U-7Mo/Al-Si

Inti elemen bakar/IEB U-7Mo/Al densitas 3,6 dan 6 gU/cm³ dibungkus menggunakan *frame* dan *cover* (kelongsong) pelat AlMg₂, sedangkan IEB U-7Mo/Al-Si densitas 3,6 dan 6 gU/cm³ dibungkus dengan kelongsong pelat AlMgSi₁. Pembentukan pelat elemen bakar PEB U-7Mo/Al-Si dengan pengerolan panas pada temperatur 450°C dan PEB U-7Mo/Al pada temperatur 425°C ditampilkan pada Gambar 5. dan 6. Secara ideal partikel U-7Mo tersebar dikelilingi serbuk matriks Al-Si, namun pada praktiknya sulit diperoleh, walaupun sebelum proses kompaksi partikel serbuk U-7Mo dan matriks Al-Si sudah

dihomogenisasi. Hal ini disebabkan perbedaan densitas serbuk U-7Mo dan matriks campuran Al-Si yang cukup jauh yaitu masing-masing 15,84 g/cm³ dan ± 2,7 g/cm³ sehingga pada waktu memasukkan ke dalam lubang dies mesin press terjadi kecenderungan partikel U-7Mo mengumpul di bagian bawah sehingga berpengaruh terhadap homogenitas IEB U-7Mo/Al-Si hasil pres.

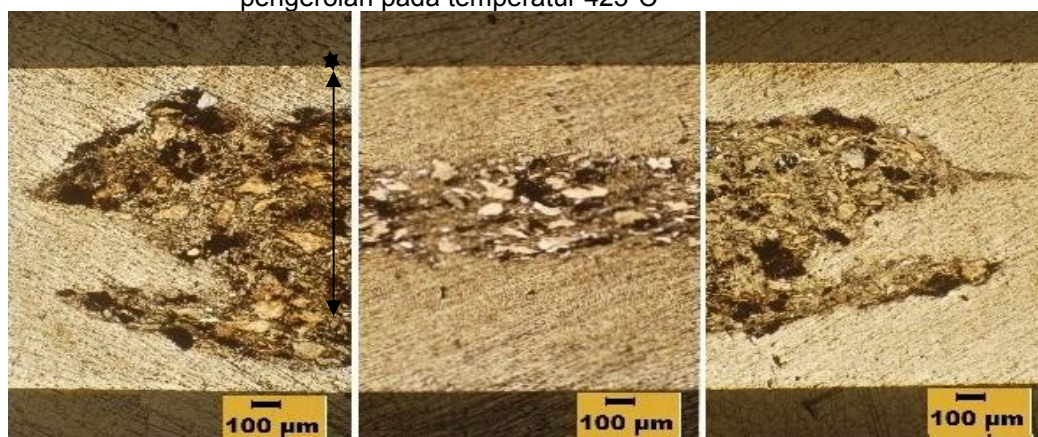
Proses pengerolan panas dilakukan 4 tahap hingga terjadi penurunan ketebalan dari ± 8,41 mm menjadi 1,65 mm dan dilanjutkan pengerolan dingin beberapa tahap dan diperpleh ketebalan ± 1,40 mm.



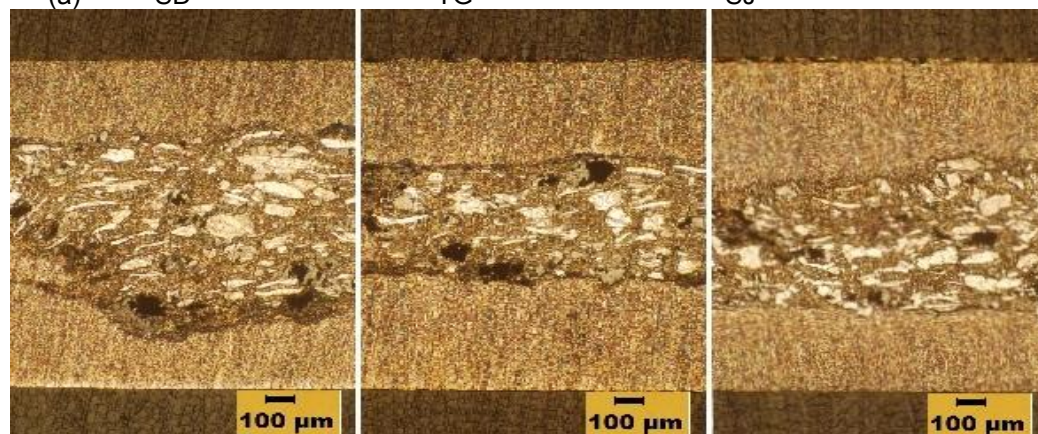


(b) SD TG SJ
Gambar 5. (a) PEB U-7Mo/Al-Si densitas $3,6 \text{ gU/cm}^3$, kelongsong AIMgSi1 dan pengerolan pada temperatur 450°C

(b) PEB U-7Mo/Al densitas $3,6 \text{ gU/cm}^3$, kelongsong AIMg2 dan pengerolan pada temperatur 425°C ^[10]



(a) SD TG SJ



(b) SD TG SJ
Gambar 6. PEB U-7Mo/Al-Si densitas uranium $6,0 \text{ gU/cm}^3$ dengan kelongsong:
(a) AIMgSi1 hasil pengerolan panas pada temperatur 450°C
(b) AIMg2 hasil pengerolan panas pada temperatur 425°C ^[10]

Dari Gambar 5 dan 6 terlihat bahwa partikel U-7Mo berbentuk pipih akibat pengerolan dan dikelilingi matriks Al. Secara ideal partikel U-7Mo di dalam *meat* dikelilingi matriks secara homogen, namun hal ini sulit dicapai karena sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya: bentuk partikel,

teknik pengerolan dan densitas uraniumnya. Pengerolan bertahap dengan reduksi tebal yang berbeda-beda dengan tujuan agar terjadi aliran campuran U-7Mo dan Al yang merata dan tidak keluar dari lubang *frame* selama proses berlangsung. Bentuk partikel serbuk yang tidak beraturan dapat menghambat aliran material selama proses

pengerolan karena terjadi friksi yang lebih tinggi dibanding partikel halus. Hal ini yang menyebabkan distribusi partikel U-7Mo di dalam matriks kurang homogen. Makin tinggi densitas uranium di dalam *meat* PEB, jumlah bahan bakar bertambah, sedang jumlah matriks berkurang (Tabel 2), sehingga dengan perbedaan densitas U-7Mo ($15,84 \text{ g/cm}^3$) dan Al ($2,7 \text{ g/cm}^3$) yang cukup jauh, maka pada proses pengerolan terjadi aglomerasi di kedua ujung bahan bakar membentuk *dogbone*. Terbentuknya *dogbone* berdampak kelongsong menjadi tipis seperti ditampilkan pada Tabel 3. Data uji pada Tabel 3 terlihat bahwa secara rerata tebal kelongsong keempat jenis PEB memenuhi persyaratan ($>0,25 \text{ mm}$), namun untuk PEB U-7Mo/Al-Si dengan kelongsong AlMgSi1 dan PEB U-7Mo/Al dengan

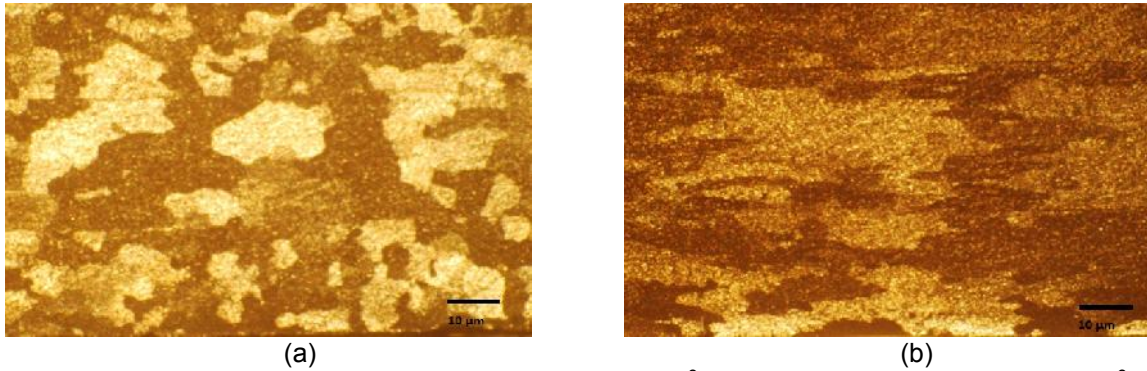
kelongsong AlMg2 densitas uranium $6,0 \text{ gU/cm}^3$ tidak memenuhi persyaratan karena terdapat beberapa titik pengukuran yang memiliki ketebalan $< 0,25 \text{ mm}$. Bila dibandingkan terhadap kedua jenis PEB dengan densitas uranium $6,0 \text{ gU/cm}^3$, maka PEB U-7Mo/Al dengan kelongsong AlMg2 terbentuk *dogbone* di daerah SD dengan tebal kelongsong minimum $0,243 \text{ mm}$, sedangkan PEB U-7Mo/Al-Si dengan kelongsong AlMgSi1 terbentuk *dogbone* di kedua ujungnya yaitu pada SD dengan tebal kelongsong minimum $0,171 \text{ mm}$, sedang pada SJ $0,106 \text{ mm}$. Kedua PEB tersebut tidak memenuhi spesifikasi tetapi dari proses pembuatan yang sama, maka dengan parameter proses yang diterapkan menggunakan kelongsong AlMg2 lebih baik daripada AlMgSi1.

Tabel 3. Ketebalan kelongsong densitas uranium 3,6 dan $6,0 \text{ gU/cm}^3$.

| Posisi pengukuran PEB | Ketebalan PEB U-7Mo/Al-Si, mm Kelongsong AlMgSi1 | | | | Ketebalan PEB U-7Mo/Al, mm Kelongsong AlMg2 | | | |
|-------------------------------|--|----------------|--------------------------------|----------------|---|----------------|--------------------------------|----------------|
| | Densitas $3,6 \text{ gU/cm}^3$ | | Densitas $6,0 \text{ gU/cm}^3$ | | Densitas $3,6 \text{ gU/cm}^3$ | | Densitas $6,0 \text{ gU/cm}^3$ | |
| | rerata | min. | rerata | min. | rerata | min. | rerata | min. |
| Sisi Dekat : Atas bawah | 0,432 0,424 | 0,376 0,314 | 0,416 0,436 | 0,244 0,171 | 0,509 0,409 | 0,428 0,323 | 0,386 0,474 | 0,243 0,365 |
| Tengah : Atas bawah | 0,431 0,468 | 0,372 0,416 | 0,402 0,542 | 0,342 0,438 | 0,444 0,447 | 0,384 0,358 | 0,447 0,444 | 0,302 0,398 |
| Sisi Jauh : Atas bawah | 0,444 0,442 | 0,359 0,300 | 0,398 0,419 | 0,106 0,217 | 0,430 0,576 | 0,361 0,536 | 0,361 0,488 | 0,316 0,437 |

Struktur mikro kelongsong pelat AlMg2 dan AlMgSi1 pengerolan panas masing-masing pada temperatur 425°C dan 450°C ditunjukkan pada Gambar 7. Dibandingkan dengan strukturmikro AlMg2

dan AlMgSi1 *fresh* material (Gambar 1) terlihat bahwa untuk AlMg2 terjadi pertumbuhan butir, sedangkan AlMgSi1 tetap pipih.



Gambar 7. Struktur mikro. (a) AIMg2 (*as-rolled*) pada 425°C, (b) AIMgSi1 (*as-rolled*) pada 450°C.

Hasil pengukuran kekerasan *fresh* material dan setelah pengerolan panas yang pada Tabel 4. terlihat bahwa setelah pengerolan panas kedua jenis kelongsong mengalami penurunan. Penurunan

kekerasan AIMg2 akibat pertumbuhan butir, sedangkan AIMgSi1 penurunan kekerasan cukup jauh, yang kemungkinan diakibatkan hilangnya tegangan sisa pada proses pengerolan.

Tabel 4. Kekerasan Pelat AIMg2 dan AIMgSi1 sebelum dan setelah pengerolan pada temperatur 425°C dan 450°C.

| Sampel | Kekerasan rerata, VHN | | STDEV (SD) |
|-------------------------------|-----------------------|----------------------------|------------|
| | <i>Fresh</i> material | Pengerolan pada temperatur | |
| AIMg2 (tegak lurus arah rol) | 47,477 | 44,620 (425°C) | 0,901 |
| AIMg2 (sesuai arah rol) | | 44,620 (425°C) | |
| AIMgSi (tegak lurus arah rol) | 101,697 | 44,620 (450°C) | 0,901 |
| AIMgSi (sesuai arah rol) | | 45,141 (450°C) | |

Meat bahan bakar merupakan campuran partikel bahan bakar U-7Mo yang terdistribusi kedalam matriks serbuk Al/campuran Al-Si. Kekerasan *meat* bahan bakar tidak bisa dilakukan pengukuran menggunakan uji brinnel karena diameter bola sebagai indenter minimum 1,2 mm, sedangkan tebal *meat* hanya ±0,6 mm. Oleh karena itu pengukuran kekerasan *meat* dilakukan dengan mengukur kekerasan ingot paduan U-7Mo hasil peleburan dan matriks Al/Al-Si di dalam *meat* pelat elemen

bakar/PEB U-7Mo/Al dan U-7Mo/Al-Si. Kekerasan matriks Al di dalam *meat* PEB U-7Mo/Al dan U-7Mo/Al-Si diukur dengan metode Vickers dan diperoleh kekerasan seperti ditunjukkan pada Tabel 5. Dari data kekerasan ingot U-7Mo sebesar 240,4 VHN yang dapat dianggap sebagai kekerasan serbuk U-7Mo. Data komposisi serbuk bahan bakar U-7Mo dan matriks Al/Al-Si serta uji kekerasan matriks di dalam *meat* PEB pada Tabel 5, maka kekerasan *meat* dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$\text{Kekerasan Meat} = \frac{(\text{berat U-7Mo} \times \text{kekerasan U-7Mo}) + (\text{berat matriks Al} \times \text{kekerasan matriks Al})}{(\text{berat serbuk U-7Mo} + \text{Al})}$$

Hasil perhitungan diperoleh bahwa kekerasan *meat* PEB U-7Mo/Al-Si densitas uranium 3,6 gU/cm³ sebesar 182,245 VHN, sedangkan densitas uranium 6,0 gU/cm³ sebesar 209,272 VHN. Makin tinggi densitas uranium kekerasan *meat* PEB meningkat.

Hal ini disebabkan kenaikan densitas uranium jumlah serbuk U-7Mo bertambah, sedangkan jumlah matriks menurun, sehingga dengan kenaikan serbuk U-7Mo kekerasan meningkat.

Tabel 5. Kekerasan matriks Al di dalam *meat* PEB U-7Mo/Al.

| Densitas U, gU/cm ³ | Berat bahan bakar dan matriks dalam <i>meat</i> , g | | Posisi pengukuran kekerasan dalam <i>meat</i> PEB | Kekerasan matriks Al, VHN | Rerata, VHN |
|--------------------------------|---|-----------------|---|---------------------------|-------------|
| | Serbuk U-7Mo | Serbuk Al/Al-Si | | | |
| 3,6 | 4,4009 | 2,0104 | Tengah | 53,82 | 54,94 |
| | | | Sisi jauh | 57,82 | |
| | | | Sisi dekat | 53,18 | |
| 6,0 | 7,3349 | 1,5101 | Tengah | 52,20 | 55,83 |
| | | | Sisi jauh | 59,36 | |
| | | | Sisi dekat | 55,94 | |

SIMPULAN

Struktur mikro *meat* PEB U-7Mo/Al dan U-7Mo/Al densitas uranium 3,6 dan 6,0 gU/cm³ terlihat bahwa bentuk partikel bahan bakar U-7Mo pipih dan memanjang sesuai arah rol yang dikelilingi matriks Al. Homogenitasnya cukup baik, dan makin tinggi densitas uranium jumlah bahan U-7Mo bertambah, sedangkan jumlah matriks Al/Al-Si berkurang. Kekerasan *meat* PEB U-7Mo/Al atau U-7Mo/Al-Si dengan densitas uranium 3,6 dan 6,0 gU/cm³ berturut-turut 54,94 VHN dan 55,83 VHN, sedangkan kekerasan kelongsong AlMg₂ / AlMgSi₁ ± 44,62 VHN. Perbedaan kekerasan *meat* dan kelongsong yang cukup jauh tersebut yang menyebabkan terbentuknya *dogbone* diujung *meat* PEB sehingga kelongsong menjadi tipis. Hasil uji tebal kelongsong keempat jenis PEB memenuhi persyaratan (>0,25 mm), namun untuk PEB U-7Mo/Al-Si dengan kelongsong AlMgSi₁ dan PEB U-7Mo/Al dengan kelongsong AlMg₂ densitas uranium 6,0 gU/cm³ tidak memenuhi persyaratan karena terdapat beberapa titik pengukuran yang memiliki ketebalan <0,25 mm. Untuk mengatasi ketipisan tebal kelongsong tersebut beberapa kemungkinan yang perlu dilakukan adalah menggunakan serbuk U-7Mo dengan partikel yang lebih halus atau menggunakan bahan kelongsong paduan Al yang memiliki kekerasan lebih tinggi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Atas terlaksananya penelitian dan dituangkan di dalam karya tulis ini, ucapan terima kasih disampaikan kepada DR. Ir. Kusnanto selaku Direktur Produksi PT. Batan teknologi (persero) beserta staf dan karyawan PTBN atas kontribusinya pada penelitian ini.

PUSTAKA

- [1]. Spesifikasi bahan bakar dispersi tipe pelat U₃Si₂/Al RSG-GAS.
- [2]. G.A. Moore, et.al, (2008). *Monolithic Fuel Fabrication Process Development at the Idaho National Laboratory*. RERTR, Washington, D.C. USA.
- [3]. E.E. Pasqualini. (2006). *Advances and Perspectives in U-Mo Monolithic and dispersed fuels*. The 28th RERTR, Republic of South Africa.
- [4]. Luis Olivares, et.al. (2007). Nuclear Fuel Development Based On UMo Alloys Under Irradiation Evaluation Of LEU U₃Si₂ – 4,8 gU/cm³ test Fuel. The RERTR International Meeting On RERTR, Czech Republic.
- [5]. L. Olivares, J. Marin, J. Lisboa and Barrera. (2009). *Manufacturing And Characterization Of LEU Dispersion Miniplates Based On Hydrided UMo Powders*. RERTR 2009-31st

-
- International Meeting On RERTR, Beijing, China.
- [6]. SOLONIN, M.I., et.al. (2000). *Development of the Method of High Density Fuel Comminution by Hydride-Dehydride Processing*. International RERTR Meeting Program, Las Vegas, Nevada.
- [7]. D.D. Keiser, JR., A.B. Robinson, D.E. Janney, and J.F. Jue. (2008). *Results Of Recent Microstructural Characterization Fuels With Al Alloy Matrices That Contain Si*. RRFM, Hamburg, Germany.
- [8]. PT. Batan Teknologi (persero). (n.d). Proses fabrikasi dan Kendali Kualitas bahan Bakar U_3Si_2/Al .
- [9]. M. Durazzo, C.J.Rocha, J. Mestnik Filho, R.M. Leal Neto. (2010). *Powdering Ductile U-Mo Alloys For Nuclear Dispersion Fuels*. Transactions, RRFM, Marrakech, Morocco.
- [10]. Supardjo, Boybul, Agoeng Kadarjono. (2012). *Pengaruh Fabrikasi Pelat elemen Bakar U-7Mo/Al Dengan Variasi Densitas Uranium Terhadap Pembentukan Pori di dalam Meat dan Tebal Kelongsong*. Jurnal Teknologi bahan Nuklir, Vol.8 No.2.