

## **PENGARUH FABRIKASI PELAT ELEMEN BAKAR U-7Mo/Al DENGAN VARIASI DENSITAS URANIUM TERHADAP PEMBENTUKAN PORI DI DALAM MEAT DAN TEBAL KELONGSONG**

**Supardjo, Boybul, Agoeng Kadarjono**

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

(Naskah diterima 09-07-2012, disetujui 27-09-2012)

### **ABSTRAK**

**PENGARUH FABRIKASI PELAT ELEMEN BAKAR U-7Mo/Al DENGAN VARIASI DENSITAS URANIUM TERHADAP PEMBENTUKAN PORI DI DALAM MEAT DAN TEBAL KELONGSONG.** Penelitian ini bertujuan untuk mencari parameter proses fabrikasi bahan bakar dispersi U-7Mo/Al tipe pelat yang tepat dalam rangka pengembangan bahan bakar menggunakan uranium pengayaan rendah (<20% <sup>235</sup>U). Serbuk U-7Mo dibuat dengan teknik *hydrid-dehydrid-milling* dari ingot paduan U-7Mo, dan dibentuk menjadi inti elemen bakar/IEB.U-7Mo/Al densitas uranium 3,6; 6,0 dan 7,0 gU/cm<sup>3</sup> dengan kompaksi pada tekanan 15 bar. IEB U-7Mo/Al bersama *frame* dan *cover* pelat AlMg2 (sebagai kelongsong) dibentuk menjadi pelat elemen bakar/PEB.U-7Mo/Al dengan teknik pengerolan panas dan dingin. Pengujian tebal kelongsong PEB U-7Mo/Al dilakukan secara metalografi dan diamati menggunakan mikroskop optik, sedangkan pengukuran volume pori di dalam *meat* PEB dilakukan dengan metode archimides. Hasil uji menunjukkan bahwa makin tinggi densitas uranium, kelongsong PEB U-7Mo/Al semakin tipis, sedangkan volume pori meningkat. Ketebalan kelongsong rerata PEB U-7Mo/Al densitas uranium 3,6; 6,0 dan 7,0 gU/cm<sup>3</sup> adalah 0,470 mm; 0,434 mm dan 0,411 mm dengan tebal minimum 0,323 mm, 0,243 mm dan 0,152 mm. Bila dilihat dari ketebalan kelongsong rerata dari ketiga jenis PEB U-7Mo/Al tersebut masih diatas batas minimal tebal kelongsong yang disyaratkan yaitu >0,25 mm, namun untuk PEB U-7Mo/Al densitas 6,0 dan 7,0 gU/cm<sup>3</sup> terdapat tebal kelongsong minimum 0,243 mm dan 0,152 mm sehingga tidak memenuhi persyaratan. Volume pori di dalam PEB U-7Mo/Al dengan densitas uranium 3,6; 6,0 dan 7,0 gU/cm<sup>3</sup> adalah 16,87%, 17,59% dan 18,63%.

**Kata kunci:** Pelat elemen bakar U-7Mo/Al, tebal kelongsong, volume pori.

### **ABSTRACT**

**EFFECT OF U-7Mo/Al FUEL PLATE FABRICATION WITH VARIATION OF URANIUM DENSITY TO THE PORE FORMING IN MEAT AND CLADDING THICKNESS.** This study is aimed to explore the U-7Mo/Al dispersion fuel plates type fabrication process parameters appropriate for the development of fuel using low-enriched uranium (<20% <sup>235</sup>U). The U-7Mo powder was prepared by hydriding-dehydriding-milling technique of the U-7Mo alloy, and formed the U-7Mo/Al fuel core element with uranium density of 3.6; 6.0 and 7.0 gU/cm<sup>3</sup> by compacting at 15 bar pressure. The U-7Mo/Al fuel core element with frame and cover of AlMg2 plate (as cladding) was formed into a U-7Mo/Al fuel plate element with hot and cold rolling techniques. Cladding thickness testing of the U-7Mo/Al fuel plate was conducted using metallographic and observed using an optical microscope, while the pore volume measurements in the meat of fuel plate is done by the archimides method. The test results showed that the higher density of uranium, U-7Mo/Al fuel plate cladding gets thinner, while the pore volume increases. The average of cladding thickness of U-7Mo/Al fuel plate with the density of uranium 3.6; 6.0 and 7.0 gU/cm<sup>3</sup> is 0.470 mm; 0.434 mm and 0.411 mm with a

*minimum thickness of 0.323 mm, 0.243 mm and 0.152 mm. When viewed from the average thickness of the cladding of the three types of U-7Mo/Al fuel plate is still above the minimum required cladding thickness i.e. >0.25 mm, but for the U-7Mo/Al fuel plate with uranium density of 6.0 and 7.0 gU/cm<sup>3</sup> there is a minimum cladding thickness 0.243 mm and 0.152 mm so it does not meet the requirements. The pore volume in the U-7Mo/Al fuel plate with uranium density of 3.6; 6.0 and 7.0 gU/cm<sup>3</sup> is 16.87 %, 17.59% and 18.63%.*

**Keywords:** U-7Mo/Al fuel plate, cladding thickness, pore volume.

## I. PENDAHULUAN

Senyawa U-Mo adalah material paduan uranium yang merupakan alternatif terpilih dalam penelitian pengembangan bahan bakar reaktor riset berbasis U-Mo, baik dalam bentuk bahan bakar dispersi maupun monolitik. Pemilihan paduan U-Mo sebagai bahan bakar dengan pertimbangan antara lain: tampang lintang serapan neutron unsur Mo rendah dan berat jenisnya >16 g/cm<sup>3</sup> sehingga densitas uranium di dalam bahan bakar dispersi dapat ditingkatkan lebih tinggi (>8gU/cm<sup>3</sup>)<sup>[1,2]</sup>. Densitas uranium yang tinggi sangat menguntungkan karena muatan uranium dapat ditingkatkan sehingga umur pemakaian bahan bakar di dalam reaktor dapat lebih lama.

Bahan bakar dispersi U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>/Al densitas uranium 4,8gU/cm<sup>3</sup> merupakan hasil pengembangan bahan bakar reaktor riset pengayaan uranium rendah (<20% <sup>235</sup>U) yang dilakukan oleh para periset di dunia. Stabilitas iradiasi bahan bakar tersebut sangat baik dan telah dikualifikasi serta mendapatkan lisensi penggunaannya oleh US Nuclear Regulatory Commission pada tahun 1988<sup>[3]</sup>. Walaupun stabilitas iradiasi dan fabrikasinya mudah, namun dengan densitas uranium yang hanya 4,8 gU/cm<sup>3</sup> dengan uranium pengayaan rendah, umur pakai di dalam reaktor hanya 53 hari<sup>[4]</sup>. Selain itu, olah ulang bahan bakar U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>/Al sulit, sehingga mendorong untuk dikembangkan material baru yang memiliki densitas uranium tinggi, stabilitas iradiasinya baik, mudah difabrikasi dan mudah dilakukan olah ulang baik gagal fabrikasi maupun bahan bakar pasca iradiasi. Untuk memenuhi

persyaratan tersebut, maka material yang sesuai adalah paduan berbasis U-Mo.

Bagian penting dalam pengembangan bahan bakar nuklir adalah upaya untuk meningkatkan pengetahuan dan perbaikan teknik fabrikasi secara terus menerus untuk menghasilkan produk sesuai persyaratan bahan bakar ditinjau dari kualitas, keselamatan dan keekonomiannya. Bahan bakar dispersi tipe pelat mempunyai karakteristik yang berbeda bila dibandingkan dengan bahan bakar logam. Bahan bakar dispersi dibuat dengan teknik metalurgi serbuk sedangkan pembentukan pelat elemen bakar/PEB dilakukan dengan pencanaan (pengerolan) panas dan dingin. Campuran serbuk partikel bahan bakar fisil dan serbuk matrik (non fisil) dikompaksi pada tekanan tinggi membentuk lempengan *fuel core* (inti elemen bakar/IEB)<sup>[5]</sup>. Pada proses kompaksi terjadi aliran material serbuk partikel bahan bakar dan matriks, dan akibat tekanan ada kemungkinan partikel bahan bakar pecah menjadi fragmen dan terbentuk sejumlah pori di dalam IEB.

Selama proses kompaksi IEB dan pengerolan panas PEB terjadi pergerakan partikel dan pengaturan kembali partikel serbuk tanpa deformasi atau retak, dan terjadi deformasi atau partikel retak. Pergerakan partikel terbesar yang mungkin terjadi adalah selama proses kompaksi dan pengerolan panas tahap pertama. Deformasi dan atau keretakan partikel di dalam zona bahan bakar merupakan faktor terbesar pembentukan pori. Hal ini penting dan menjadi catatan sebagai konsekuensi prosedur fabrikasi bahwa semua PEB terdapat sejumlah pori karena adanya udara yang terjebak.

Kemampuan merubah bentuk partikel tergantung pada tekanan aliran material yang terjadi pada proses kompaksi dan pengerolan. Secara umum tegangan plastis dapat diperkecil di dalam material murni, demikian aliran aluminium seri MD101 lebih mudah daripada seri 718 atau 6061<sup>[6]</sup>. Oleh karena itu, yang dihasilkan aluminium murni mempunyai porositas yang terendah. Perpindahan tekanan antara partikel yang berdekatan tergantung topografi permukaan, ukuran dan bentuknya. Permukaan partikel serbuk yang tidak beraturan akan menyebabkan kenaikan friksi antar partikel, tekanan aliran lebih tinggi dan akhirnya porositas di dalam PEB lebih tinggi. Diharapkan dengan proses tersebut diperoleh data uji PEB mini U-7Mo/Al 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 yang memenuhi spesifikasi bahan bakar reaktor riset tipe pelat dan siap uji iradiasi di RSG-GAS<sup>[5]</sup>.

## II. TATA KERJA

Paduan U-7Mo (93%U+7%Mo) dibuat dengan peleburan di dalam tungku busur listrik bermedia gas argon<sup>[7]</sup>. Ingot paduan U-7Mo dikenai pengujian dan dibuat serbuk dengan teknik *hydriding-dehydriding-milling*, kemudian serbuk yang diperoleh dikenai uji /analisis meliputi kadar U dan unsur pengotor, berat jenis dan komposisi fraksi partikel serbuk.

Data uji/analisis serbuk U-7Mo dan serbuk Al digunakan sebagai data masukan untuk perhitungan komposisi berat U-7Mo dan serbuk Al yang akan dibuat inti elemen bakar/IEB U-7Mo/Al dengan densitas uranium 3,6; 6,0 dan 7,0 gU/cm<sup>3</sup><sup>[7]</sup>. Komposisi berat serbuk U-7Mo dan matriks Al pada setiap densitas uranium masing-masing dihomogenisasi, kemudian dikompaksi menjadi IEB U-7Mo/Al dengan tekanan 15 bar. Selanjutnya masing-masing

IEB U-7Mo/Al dibungkus dengan *frame* dan *cover* pelat AlMg<sub>2</sub>, dan dirol (dicanai) panas pada temperatur 425°C hingga ketebalan ± 1,65 mm dan canai dingin menjadi ± 1,44 mm. Selanjutnya dilakukan pemotongan berukuran 20 x 70 x 1,4 mm dengan *meat* berada tepat di tengah-tengahnya, kemudian dilakukan pengujian lepuhan (*blister*) secara visual dan ultrasonik, bentuk dan dimensi *meat* dengan radiografi sinar-x, *white spots*, porositas *meat* dengan metoda Archimides, dan pengukuran tebal kelongsongnya.

Tabel 1. Komposisi campuran serbuk U-7Mo dan serbuk matriks Al.

No	Densitas U gU/cm <sup>3</sup>	Berat serbuk, g		Volume U-7Mo %
		U-7Mo	Al	
1	3,6	4,252	2,182	23,62
2	6,0	7,598	1,679	39,37
3	7,0	8,865	1,469	45,98

## III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembuatan PEB U-7Mo/Al menggunakan serbuk bahan bakar U-7Mo hasil proses *hydriding-dehydriding-milling* dari ingot paduan U-7Mo. Bentuk partikel serbuk tidak beraturan seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Serbuk U-7Mo hasil proses hidriding-dehidriding-milling dengan diameter partikel <150 µm

Serbuk U-7Mo dicampur dengan serbuk matriks Al dengan komposisi seperti pada Tabel 1, kemudian di kompaksi pada tekanan 15 bar membentuk lempengan IEB

U-7Mo/Al. Selanjutnya bersama dengan *frame* dan *cover* dirakit menjadi paket rol dan dibentuk menjadi PEB U-7Mo/Al dengan pencanaian panas/dingin.

Pelat elemen bakar hasil pencanaian panas pada temperatur  $425^{\circ}\text{C}$  (empat tahap) terhadap paket rol (paket canai) dengan penurunan ketebalan berturut-turut dari 8,55 mm, 7,0 mm, 5,6 mm, 2,6 mm dan 1,65 mm diperoleh PEB cukup baik dan tidak terdapat cacat/retak dipermukaannya. Pengamatan terhadap adanya blister pada permukaan pelat hasil pencanaian panas dilakukan dengan memanaskan kembali di dalam tungku pemanas pada temperatur  $425^{\circ}\text{C}$  selama 1 jam, kemudian diamati secara visual pada seluruh permukaannya. Dari 12 PEB U-7Mo/Al teramati adanya blister pada beberapa PEB, namun jauh dari zona *meat* sehingga masih memenuhi persyaratan kualitas bahan bakar dispersi tipe pelat. Ketebalan 1,65 mm hasil pencanaian panas belum sesuai dengan tebal standar PEB  $1,37^{\pm 0,07}$  mm, sehingga dilanjutkan penipisan dengan pencanaian dingin secara bertahap. Hasil pencanaian diperoleh pelat yang tidak lurus dan meninggalkan tegangan sisa, maka untuk menghilangkan tegangan sisa dilakukan pemanasan pada temperatur  $425^{\circ}\text{C}$ , sedangkan pelurusan PEB menggunakan mesin canai pelurus. Pelat yang telah lurus dan rata pada seluruh permukaannya dikenai pemotongan panjang menggunakan gunting potong, sedangkan pemotongan lebar menggunakan mesin frais. Contoh PEB mini U-7Mo/Al densitas  $7,0 \text{ gU/cm}^3$  ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. PEB U-7Mo/Al, densitas  $7,0 \text{ gU/cm}^3$

Dari Gambar 2. *meat* bahan bakar U-7Mo/Al terlihat pada posisi tengah PEB. Hasil uji ikatan antara kelongsong dan *meat* cukup kuat, hal ini dibuktikan dengan cara membengkokkan potongan PEB (yang tidak berisi *meat*) berulang-ulang dan ternyata ikatan antara *frame* dan *cover* tidak lepas. Ini menunjukkan bahwa ikatan antara *frame* dan *cover* cukup kuat.

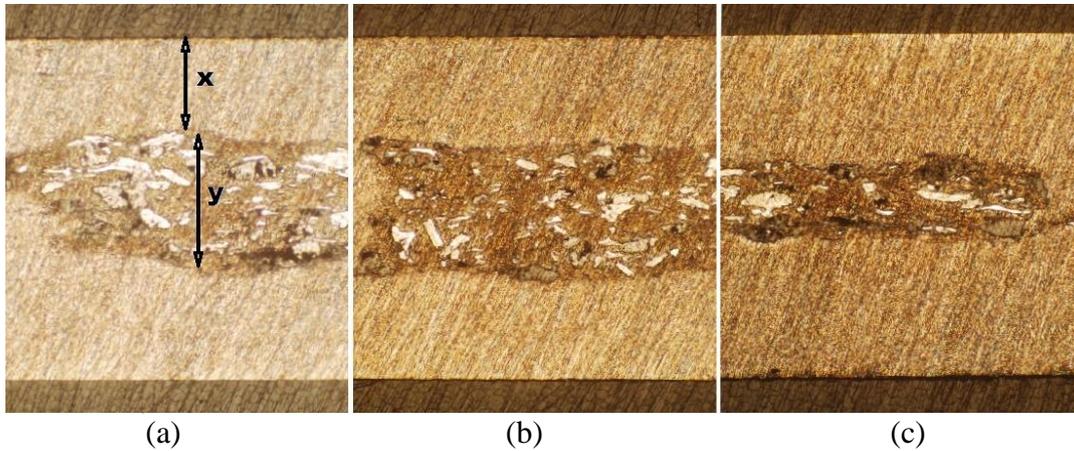
Selama proses pencanaian paket canai terjadi deformasi plastis dan aliran material (*frame*, *cover* dan IEB U-7Mo/Al) sesuai arah canai. Makin tinggi densitas uranium, jumlah serbuk U-7Mo di dalam IEB meningkat sedangkan matriks Al menurun. Perbedaan densitas antara serbuk U-7Mo dan matriks Al cukup jauh yaitu  $16,336 \text{ g/cm}^3$  dan  $2,7 \text{ g/cm}^3$  sehingga pada proses pengerolan panas berpotensi terjadinya aglomerasi partikel U-7Mo di ujung *meat* bahan bakar membentuk *dog bone* sehingga kelongsong menjadi tipis.

Kelongsong bahan bakar dispersi tipe pelat merupakan pembungkus *meat* bahan bakar yang ketebalannya harus memenuhi persyaratan minimal  $0,25 \text{ mm}$ <sup>[8]</sup>. Pengujian tebal kelongsong PEB U-7Mo/Al diambil sampel dengan memotong pada sisi dekat (SD), tengah (TG) dan sisi jauh (SJ). Masing-masing potongan *dimounting* dan diampelas hingga permukaannya halus dan diamati /diukur ketebalannya menggunakan mikroskop optik. Pengukuran tebal kelongsong dilakukan dari titik terluar *meat* dan ditarik garis tegak lurus hingga sisi luar PEB, dan pengukuran dilakukan pada setiap 1 mm. Penampang melintang potongan PEB U-7Mo/Al densitas uranium 3,6; 6,0 dan  $7,0 \text{ gU/cm}^3$  ditampilkan pada Gambar 3, 5 dan 7, sedangkan tebal kelongsong ditampilkan pada Gambar 4, 6 dan 8.

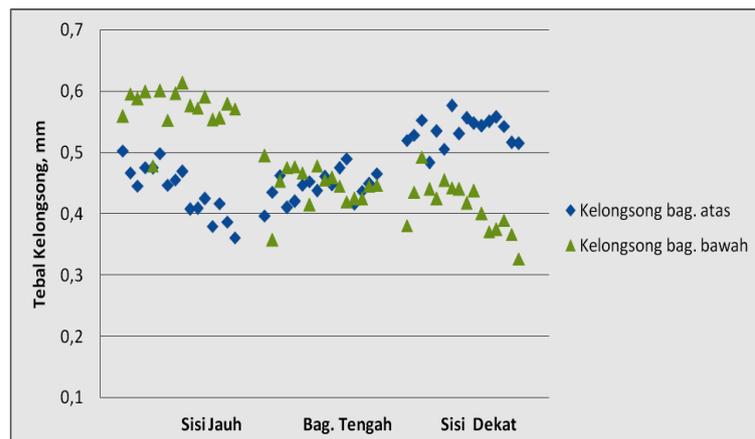
Penampang melintang potongan PEB U-7Mo/Al dengan densitas uranium  $3,6 \text{ gU/cm}^3$  pada Gambar 3 terlihat bahwa permukaan *meat* tidak merata dan bentuk partikel bahan bakar U-7Mo nampak tidak beraturan yang dikelilingi oleh matriks Al. Ketidak rataan permukaan *meat* terlihat jelas

dari hasil pengukuran tebal kelongsong pada Gambar 4 dengan tebal rerata pada SD = 0,459 mm, TG = 0,445 mm dan SJ=0,505

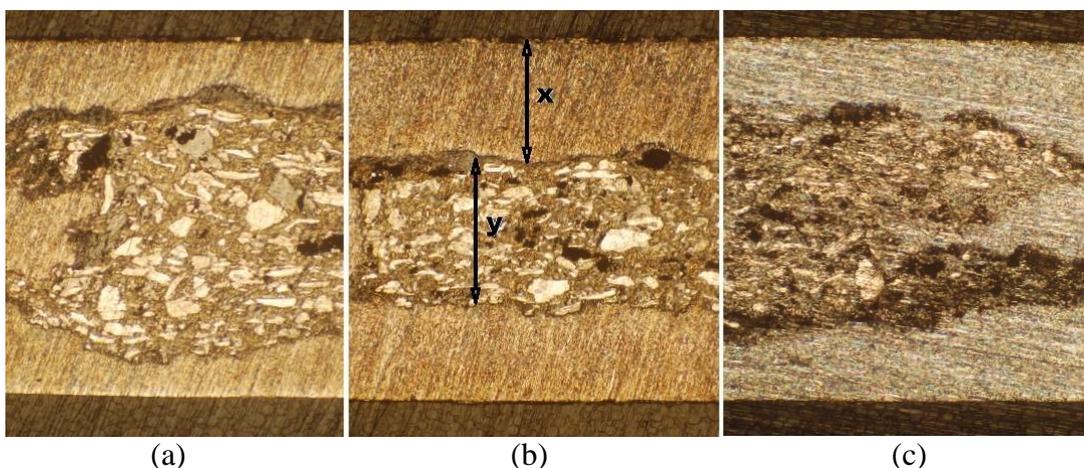
mm dan tebal rerata sepanjang PEB 0,470 mm dengan tebal minimal 0,323 mm di daerah SD.



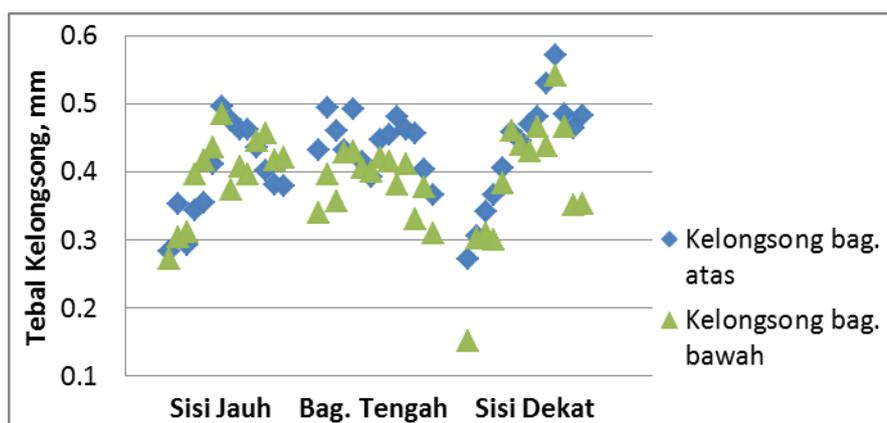
Gambar 3. Penampang melintang potongan PEB U-7Mo/Al, densitas uranium 3,6 gU/cm<sup>3</sup>  
(a) SD, (b) TG, (c) SJ. x = tebal kelongsong, y = tebal meat



Gambar 4. Tebal keleongsong PEB U-7Mo/Al, densitas uranium 3,6 gU/cm<sup>3</sup>



Gambar 7. Penampang melintang potongan PEB U-7Mo/Al, densitas uranium 7,0 gU/cm<sup>3</sup>  
(a) SD, (b) TG, (c) SJ; x = tebal kelongsong, y = tebal meat



Gambar 8. Tebal keleongsong PEB U-7Mo/Al, densitas uranium 7,0g U/cm<sup>3</sup>

Penampang melintang potongan PEB U-7Mo/Al dengan densitas uranium 6,0 gU/cm<sup>3</sup> pada Gambar 5 terlihat bahwa permukaan *meat* tidak merata dan bentuk partikel bahan bakar U-7Mo nampak tidak beraturan yang dikelilingi oleh matriks Al. Ketidak rataan permukaan *meat* terlihat jelas dari hasil pengukuran tebal kelongsong pada Gambar 6 dengan tebal rerata pada SD = 0,430 mm, TG = 0,446 mm dan SJ= 0,425 mm dengan tebal rerata sepanjang PEB 0,434 mm dan terdapat tebal minimal 0,243 mm di daerah SD.

Hasil pengukuran tebal kelongsong dari ketiga jenis PEB U-7Mo/Al densitas uranium 3,6; 6,0 dan 7,0 gU/cm<sup>3</sup> memiliki tebal kelongsong rerata berturut-turut 0,470 mm, 0,434 mm dan 0,411 mm, dengan tebal minimum namun 0,323 mm 0,243 mm dan 0,152 mm di daerah SD. Bila mengacu tebal kelongsong rata-ratanya, seluruh PEB memenuhi persyaratan (syarat tebal kelongsong minimum 0,25 mm), namun pada PEB U-7Mo/Al densitas uranium 6 dan 7 gU/cm<sup>3</sup> terdapat tebal kelongsong pada suatu titik <0,25 mm sehingga tidak memenuhi persyaratan. Untuk mengatasi ketipisan kelongsong maka sebagai alternatifnya perlu digunakan bahan kelongsong yang lebih keras dari AlMg2 dan atau tekanan kompaksi pada pembuatan IEB U-7Mo/Al dinaikkan diatas 15 bar.

Hasil pengukuran tebal *meat* PEB U-7Mo/Al rerata yang ditunjukkan pada Tabel 2. terlihat bahwa makin tinggi densitas

uranium, ketebalan *meat* meningkat. Untuk PEB U-7Mo/Al dengan densitas uranium 3,6 gU/cm<sup>3</sup>, *meat* pada bagian TG PEB lebih tebal dibanding kedua ujungnya, sedangkan untuk densitas uranium 6,0 dan 7,0 gU/cm<sup>3</sup>, *meat* pada bagian tengah lebih tipis dibanding kedua ujungnya. Makin tinggi densitas uranium, jumlah partikel serbuk U-7Mo bertambah sedangkan matriks Al menurun sehingga pada proses pengerolan terjadi aglomerasi partikel serbuk U-7Mo diujung *meat*. Pada densitas uranium 6 gU/cm<sup>3</sup> terlihat bahwa kedua ujung *meat* lebih tebal dibandingkan dengan bagian tengah, hal ini mengindikasikan bahwa mulai terbentuk *dogbone* akibat aglomerasi partikel U-Mo pada proses pengerolan. Ketebalan *meat* bahan bakar dipengaruhi oleh komposisi fraksi partikel butir U-7Mo dan tekanan pengepresan saat pembuatan IEB U-7Mo/Al.

Tabel 2. Tebal *meat* PEB U-7Mo/Al.

Densitas uranium, gU/cm <sup>3</sup>	Tebal <i>meat</i> , mm			
	Posisi SJ	Posisi TG	Posisi SD	Rerata
3,6	0,434	0,549	0,522	0,502
6,0	0,611	0,549	0,590	0,583
7,0	0,650	0,611	0,633	0,631

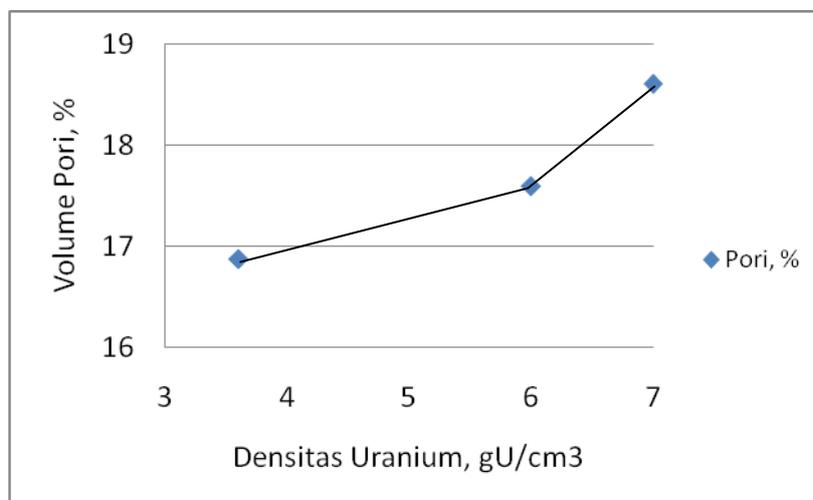
Porositas di dalam *meat* PEB U-7Mo/Al yang terbentuk selama proses pengerolan dilakukan pengukuran dengan metode archimides. Data penimbangan IEB U-

7Mo/Al, PEB U-7Mo/Al dan kawat yang ditunjukkan pada Tabel 3, digunakan sebagai data masukan perhitungan volume pori dengan cara seperti pada Lampiran 1. Hasil perhitungan volume pori di dalam *meat* PEB U-7Mo/Al ditunjukkan pada Gambar 9. Makin tinggi densitas uranium jumlah partikel serbuk U-7Mo meningkat (jumlah matriks menurun) persentase volume pori

juga naik. Beberapa kemungkinan kenaikan volume pori di dalam *meat* dapat disebabkan adanya penurunan ukuran partikel serbuk sehingga luas permukaan partikel meningkat, kenaikan kekuatan matriks, penurunan temperatur pengerolan, penurunan ketebalan *meat* dan kenaikan persen bahan bakar dalam *meat*.

Tabel 3. Data penimbangan IEB, PEB U-7Mo/Al dan kawat.

Kode PEB	Densitas U, gU/cm <sup>3</sup>	Berat, g				
		IEB	PEB di udara	PEB & kawat dlm air	kawat dlm air	PEB dlm air
A.a.2	3,6	3,23	37,57	24,21	0,04	24,17
A.b.2	3,6	3,35	37,20	24,00	0,04	23,86
B.a	6,0	9,23	60,60	40,23	0,04	40,19
B.b	6,0	9,25	60,46	40,09	0,04	40,05
C.a	7,0	10,20	61,51	41,14	0,04	41,10
C.b	7,0	10,32	62,15	41,56	0,04	41,52



Gambar 9. Hubungan densitas uranium U-7Mo/Al vs persentase volum

#### IV. KESIMPULAN

Evaluasi data uji tebal kelongsong PEB U-7Mo/Al dengan densitas uranium 3,6; 6,0 dan 7,0 gU/cm<sup>3</sup> menunjukkan bahwa tebal kelongsong rerata ketiga PEB tersebut berturut-turut 0,470 mm, 0,434 mm dan 0,411 mm dengan tebal minimum 0,323 mm, 0,243 mm dan 0,152 mm. Bila dilihat tebal kelongsong reratanya menunjukkan bahwa

semua PEB memenuhi persyaratan (tebal kelongsong minimum 0,25 mm), namun PEB U-7Mo/Al densitas 6,0 dan 7,0 gU/cm<sup>3</sup> terdapat tebal kelongsong <0,25 mm di daerah SD akibat terbentuknya *dogbone* diujung *meat*, sehingga tidak memenuhi persyaratan. Kenaikan densitas uranium juga berpengaruh pada volume pori di dalam *meat* PEB U-7Mo/Al. Makin tinggi densitas uranium volume pori naik berturut-turut

16,87%, 17,59% dan 18,63%, hal ini kemungkinan disebabkan dengan kenaikan densitas uranium jumlah partikel U-7Mo bertambah, sedangkan jumlah serbuk matriks Al berkurang sehingga serbuk Al tidak dapat mengisi ruangan antar partikel secara optimal.

## V. SARAN

Makin tinggi densitas uranium di dalam PEB U-7Mo/Al, jumlah uranium bertambah dan matriks berkurang sehingga kekerasan *meat* meningkat, dan pada proses pencanaian akan terjadi aglomerasi diujung *meat* PEB membentuk *dog bone* yang berakibat kelongsong menjadi tipis dan tidak memenuhi persyaratan. Untuk menanggulangi hal tersebut salah satunya disarankan menggunakan bahan kelongsong yang lebih keras seperti paduan aluminium 6061 atau yang sepadan.

## VI. UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada DR. Ir. Kusnanto selaku Direktur Produksi PT. Batan Teknologi (Persero) atas dukungan dan bantuan fasilitas fabrikasi serta anggota tim penelitian bahan bakar reaktor riset berbasis U-Mo yang telah banyak membantu hingga penelitian dapat diselesaikan

## VII. DAFTAR PUSTAKA

1. L. Olivares, J. Marin, J. Lisboa and M. Barrera, 2010, "Microstructural

Characterization Of dispersion Fuel Miniplates Made Of Hydrided U+&wt% Mo Powder," International Meeting on RERTR, Portugal.

2. Supardjo dan Masrukan, 2008, "Pembuatan dan Karakterisasi Paduan U-Mo Sebagai Kandidat Bahan bakar nuklir Tipe Dispersi," Jurnal Teknologi Bahan Nuklir, Vol. 4 No.2.
3. U.S. Nuclear Regulatory Commission Safety Evaluation Report Related to the Evaluation of Low Enrichment Uranium Silicide luminum Dispersion Fuels for Use in Non Power Reactors, U.S. Nuclear Regulatory Commission Report NUREG -1313 (July 1988).
4. J.Guidez, 2000, "What is the Interest for Research Reactor to Use the New MTR Fuel UMo?," 4<sup>th</sup> International Topical Meeting on research Reactor Fuel Management, Ens RRFM, France.
5. Batan Teknologi (persero)," Proses fabrikasi dan Kendali Kualitas bahan Bakar U3Si2/Al".
6. T.C. Wiencek, 1986, "A Study of the Effect of Fabrication Variables on the Quality of Fuel Plates", International Meeting on RERTR, ANL.
7. Supardjo, Agoeng K, Aslina Br.Ginting, 2011," Pembuatan Pelat elemen Bakar Mini U-Mo/Al Dengan densitas Uranium 6 dan 7 gU/cm<sup>3</sup>," Jurnal Teknologi Bahan Nuklir, Vol. 7 No.2.
8. Jurgen Deckers,1985 "Minimum Cladding Thickness of Material Test Reactor Fuel Plate", RERTR, Netherlands.

## VIII. LAMPIRAN

### Perhitungan volume pori di dalam meat PEB.U-7Mo/Al

PEB ditimbang di udara, kemudian ditimbang di dalam air dengan tahapan sbb:

- ❖ Berat PEB di udara = A g
- ❖ Berat PEB + kawat dalam air = B g
- ❖ Berat kawat dalam air = C g
- ❖ Berat PEB dalam air (B-C) = D g
- ❖ Berat air yang dipindahkan oleh PEB, (A-D) = E g
- ❖ Densitas air, F g/cm<sup>3</sup> (diukur dengan areometer)
- ❖ Volume PEB, (E/F) = G cm<sup>3</sup>
- ❖ Densitas PEB, (A/G) = H cm<sup>3</sup>

### Perhitungan Porositas dalam PEB.U-7Mo/Al :

Data :

- ❖  $\rho \cdot \text{AlMg2} = 2,68 \text{ g/cm}^3$
- ❖  $\rho \cdot \text{Al} = 2,70 \text{ g/cm}^3$
- ❖  $\rho \cdot \text{U-7Mo} = 16,336 \text{ g/cm}^3$

### Simbul-simbul dalam perhitungan :

- ❖ Berat PEB U-7Mo/Al, g = W(fp)
- ❖ Volume PEB U-7Mo/Al, cm<sup>3</sup> = V(fp)
- ❖ Densitas PEB U-7Mo/Al, (g/cm<sup>3</sup>) =  $\rho$ (fp)
- ❖ Berat U-7Mo dalam IEB U-7Mo/Al, g = W(f)
- ❖ Berat serbuk Al dalam IEB U-7Mo/Al, g = W(Al)

### Perhitungan :

- ❖ Volume serbuk Al dalam zona bahan bakar
  - $V(\text{Al}) = W(\text{Al}) : \rho(\text{Al})$
- ❖ Volume U-7Mo dalam zona bahan bakar
  - $V(\text{f}) = W(\text{f}) : \rho(\text{f})$
- ❖ Berat AlMg2
  - $W(\text{AlMg2}) = W(\text{fp}) - \{W(\text{Al}) + W(\text{f})\}$
- ❖  $V(\text{AlMg2}) = W(\text{AlMg2}) : \rho(\text{AlMg2})$
- ❖ Volume Zona Bahan Bakar
- ❖  $V. (\text{fz}) = V (\text{fp}) - V(\text{AlMg2})$
- ❖ Volume Porositas
- ❖  $V. (\text{void}) = V(\text{fz}) - \{V(\text{Al}) + V(\text{f})\}$
- ❖ Prosen porositas =  $V(\text{void})/V.(\text{fz}) \times 100\%$