

BAB 4

Pembuatan Pelat Elemen Bakar Dispersi U-7Mo-xM/Al dalam Ukuran Mini

Supardjo, Agoeng Kadarjono, Boybul

4.1. PENDAHULUAN

4.1.1. Latar belakang

Bahan bakar dispersi UAl_x/Al tipe pelat dengan uranium pengkayaan tinggi ($>90\%$ ^{235}U) telah digunakan sebagai bahan bakar reaktor riset sejak tahun 1950-an. Stabilitas bahan bakar UAl_x/Al selama digunakan di dalam reaktor sangat baik, namun penggunaan uranium pengkayaan tinggi berpotensi untuk disalahgunakan oleh orang-orang yang tidak bertanggung jawab untuk senjata nuklir sehingga dapat mengganggu stabilitas dunia. Adanya kekhawatiran tersebut, *Department of Energy* (DOE) USA mencanangkan program *Reduced Enrichment Research and Test Reactors* (RERTR) yang berisi himbuan agar seluruh reaktor riset di dunia mengubah penggunaan bahan bakarnya dari uranium pengkayaan tinggi ke pengkayaan rendah ($<20\%$ ^{235}U) [1].

Pengalihan pengkayaan uranium tersebut berdampak pada penurunan jumlah ^{235}U di dalam bahan bakar sehingga kinerja reaktor juga menurun. Untuk mempertahankan kinerja reaktor (minimal sama) seperti pada penggunaan bahan bakar dengan uranium pengkayaan tinggi salah satu alternatif yang paling ekonomis adalah menggunakan material baru yang memiliki densitas tinggi. Dengan menggunakan material berdensitas tinggi, maka jumlah ^{235}U dapat ditingkatkan minimal sama dengan bahan bakar pengkayaan tinggi pada desain dimensi bahan bakar yang sama. Secara teoritis, pengalihan penggunaan bahan bakar dengan uranium pengkayaan rendah, densitas uranium minimal yang diperlukan agar sama dengan uranium pengkayaan tinggi adalah >8 gU/cm³ [2,3]. Untuk memenuhi hal tersebut maka dipilih material baru yang memiliki densitas tinggi dan sebagai alternatifnya adalah menggunakan paduan uranium.

Bahan bakar dispersi UAl_x/Al yang semula menggunakan uranium pengkayaan tinggi, dengan beralihnya penggunaan uranium pengkayaan rendah, densitas uranium maksimum yang dapat dicapai dari proses difabrikasinya hanya 2,3 gU/cm³, sedangkan bahan bakar U_3O_8/Al hanya 3,2 gU/cm³ [4]. Densitas uranium tersebut masih jauh lebih rendah dari yang diharapkan, sehingga dikembangkan bahan bakar jenis paduan uranium silisida dalam bentuk senyawa U_3Si_2 dan U_3Si . Senyawa U_3Si_2 telah digunakan sebagai bahan bakar dispersi dalam bentuk U_3Si_2/Al . Bahan bakar tersebut merupakan pengembangan bahan bakar UAl_x/Al berkaitan dengan penggunaan uranium pengkayaan rendah. Dari sisi fabrikasinya bahan bakar U_3Si_2/Al dapat dibuat dengan densitas uranium optimum 4,8 gU/cm³. Bahan bakar tersebut telah mendapatkan lisensi penggunaannya

oleh *US Nuclear Regulatory Commission* pada tahun 1988 [5] dan telah banyak digunakan sebagai bahan bakar reaktor riset di dunia. Bahan bakar U_3Si_2/Al mudah difabrikasi, namun densitas uraniumnya masih lebih rendah dari 8 gU/cm^3 , sehingga menjadi pertimbangan untuk mencari material baru yang lebih sesuai.

Reaktor Serba Guna G.A Siwabessy (RSG-GAS) yang berada di Kawasan Puspiptek, Serpong merupakan reaktor riset tipe *Material Testing Reactor (MTR)*, yang digunakan untuk penelitian material dan produksi radioisotop. Semula RSG-GAS menggunakan bahan bakar dispersi tipe pelat yang berisi U_3O_8/Al dengan pengkayaan uranium sekitar $19,75\%^{235}U$ dan densitas uranium $2,96 \text{ gU/cm}^3$. Sejak tahun 2001 seluruh bahan bakar U_3O_8/Al di dalam teras reaktor diganti dengan bahan bakar U_3Si_2/Al pengkayaan dan densitas uranium sama yang merupakan hasil litbang BATAN [6], sedangkan skala produksinya dilakukan oleh PT. INUKI (persero). Keuntungan bahan bakar U_3Si_2/Al adalah mempunyai stabilitas iradiasi selama digunakan di dalam reaktor sangat baik dengan *swelling* yang rendah, namun mempunyai kekurangan diantaranya densitas uranium dalam bahan bakar maksimum yang dapat dicapai hanya $4,8 \text{ gU/cm}^3$ dan proses olah ulang gagal produk maupun bahan bakar pasca iradiasi sangat sulit dilakukan.

Mengingat proses olah ulang bahan bakar bekas U_3Si_2/Al sangat sulit dan perlu biaya yang mahal, maka Amerika Serikat yang selama ini merupakan salah satu pengolah dan pengelola bahan bakar bekas dari reaktor penelitian yang ada di dunia (tanpa memungut biaya), merencanakan untuk membebaskan biaya penanganan dan pengolahan bahan bakar bekas tersebut kepada negara-negara pengguna bahan bakar jenis U_xSi_y/Al (bentuk U_3Si_2/Al atau U_3Si/Al), termasuk Indonesia. Terkait dengan adanya rencana tersebut, maka penelitian dan pengembangan material bahan bakar baru terus dilakukan dalam rangka menggantikan bahan bakar U_xSi_y/Al di masa mendatang. Beberapa paduan uranium yang menjadi alternatif diantaranya adalah paduan berbasis uranium molybdenum baik dalam bentuk biner, terner, maupun monolitik [7].

4.1.2. Logam uranium

Logam uranium murni pada prinsipnya merupakan bahan bakar yang memiliki berat jenis tinggi ($18,485 \text{ g/cm}^3$) [7], tetapi isotropik fasa γ -U selama iradiasi hanya stabil pada temperatur tinggi, sementara pada temperatur rendah struktur fasa α -U berpotensi *swelling*. Perubahan fasa γ ke α (melalui fasa β) tidak dapat ditahan dengan *quenching* fasa γ -U murni pada temperatur tinggi, tetapi pada rentang temperatur di atas fasa α , β , dan γ menjadi stabil, sehingga sebagai alternatifnya memerlukan penambahan unsur logam pemuat dan membentuk paduan uranium yang memiliki fasa γ -U yang luas [8]. Beberapa paduan uranium yang membentuk fasa γ -U antara lain: U-Cr, U-Mo, U-Nb, U-Re, U-Ru, U-Ti, U-V dan U-Zr [9]. Diantara paduan tersebut yang memiliki rentang fasa γ yang luas adalah paduan berbasis U-Mo baik dalam bentuk biner atau terner dengan menambahkan unsur ketiga.

4.1.3. Paduan berbasis U-Mo

Paduan berbasis U-Mo dapat dibuat dengan proses peleburan terhadap campuran logam U dan Mo menggunakan tungku busur listrik maupun tungku induksi. Proses peleburan dilakukan di dalam media gas inert sehingga paduan U-Mo hasil peleburan yang

biasa disebut ingot, diperoleh dengan kemurnian tinggi dan tidak terkontaminasi dengan unsur/senyawa lainnya yang terbentuk selama proses peleburan. Ingot U-Mo memiliki berat jenis $>16,0 \text{ g/cm}^3$ (tergantung kadar Mo), tahan terhadap korosi dan memiliki daerah γ -U yang luas [9]. Berat jenis paduan uranium berbasis U-Mo lebih tinggi dibandingkan dengan berat jenis paduan uranium/uranium oksida yang telah digunakan sebagai bahan bakar reaktor riset dengan uranium pengkayaan rendah seperti U_3Si_2 , U_3O_8 , dan UAl_x yang masing-masing sebesar 12,2; 8,4; dan $6,7 \text{ g/cm}^3$ [9].

Dengan menggunakan bahan bakar dispersi berbasis U-Mo, densitas uranium di dalam inti (*meat*) pelat elemen bakar dapat ditingkatkan hingga 8 gU/cm^3 . Densitas uranium tersebut sesuai dengan yang diperlukan reaktor riset terkait penggunaan uranium pengkayaan rendah yang dicanangkan di dalam program RERT. Kelebihan lain bahan bakar berbasis U-Mo adalah proses olah ulang gagal proses fabrikasi maupun pasca iradiasi lebih mudah dilakukan dibandingkan dengan bahan bakar $\text{U}_x\text{Si}_y/\text{Al}$.

Paduan U-Mo dengan kandungan Mo antara 6 ~ 10% berat memiliki prospek yang sangat baik untuk digunakan sebagai bahan bakar nuklir dengan pengkayaan uranium rendah [1,3,10]. Dalam penggunaannya sebagai bahan bakar nuklir dispersi, ingot paduan berbasis U-Mo yang berbentuk padat dan *ductile* (ulet) harus diubah ke dalam bentuk serbuk hingga diameter (\emptyset) partikel serbuk $<150 \mu\text{m}$ [5]. Oleh sebab itu pemilihan teknik pembuatan serbuk yang tepat sangat diperlukan sehingga diperoleh serbuk yang memenuhi persyaratan bahan bakar nuklir.

4.1.4. Serbuk U-Mo

Proses pembuatan serbuk paduan berbasis U-Mo dapat dilakukan dengan beberapa cara diantaranya: *mechanical crushing*, *cryogenic mechanical crushing*, hidriding-dehidriding dan atomisasi. Teknik *mechanical crushing* menghasilkan serbuk yang pipih, pengerjaan sulit, impuritas tinggi sedangkan *cryogenic mechanical crushing* pengerjaan dilakukan pada temperatur sangat rendah (media argon cair) sehingga selain pengerjaannya sulit, impuritas di dalam serbuk cukup tinggi. Teknik hidriding-dehidriding dilakukan dengan mereaksikan paduan dengan gas H_2 di dalam reaktor bermedia gas argon pada temperatur sekitar 350°C [11, 12, 13].

Selama proses tersebut terjadi penyerapan hidrogen dan reaksi dengan logam uranium di dalam paduan membentuk senyawa UH_3 . Terjadinya reaksi ditandai dengan adanya retakan-retakan pada paduan yang menunjukkan adanya penyerapan gas hidrogen dan reaksi antara gas hidrogen dengan logam tersebut. Hal ini yang menyebabkan paduan bersifat rapuh sehingga dapat diubah menjadi serbuk secara mekanik. Bentuk dan ukuran serbuk yang dihasilkan tidak seragam. Sebagian besar serbuk memiliki bentuk lebih beraturan dan cenderung *uqiaxial*, meskipun beberapa serbuk yang lainnya ditemukan mempunyai bentuk *accicular* dan *flake*. Ukuran partikel sangat bervariasi dari ukuran halus hingga relatif kasar [14].

4.1.5. Bahan bakar nuklir berbasis U-Mo.

Molybdenum memiliki derajat kelarutan padat γ -U yang tinggi. Jika pendinginan lambat atau paduan mengandung $<7\%\text{Mo}$, kesetimbangan paduan U(Mo) dibawah 560°C berupa campuran fasa α -U dan γ' (U_2Mo), sementara larutan padat γ -U/Mo terbentuk pada

temperatur tinggi [7]. Walaupun fasa γ -U paduan UMo memiliki unjuk kerja yang baik selama iradiasi, tetapi sebagai bahan bakar dispersi U-Mo/Al terlihat bahwa selama proses iradiasi terbentuk pori yang disebabkan oleh terbentuknya lapisan UAl_x hasil interaksi antara partikel bahan bakar U-Mo dan matriks Al sehingga menjadi tidak stabil [15]. Pertumbuhan lapisan hasil interaksi menyebabkan temperatur bahan bakar naik karena konduktivitas termalnya lebih rendah dari pada matriks. Selain itu lapisan hasil interaksi memiliki densitas lebih rendah dari pada densitas rerata reaktan, sehingga pertumbuhan lapisan menyebabkan terjadinya *swelling meat* bahan bakar yang cukup signifikan.

Untuk menstabilkan bahan bakar dapat dilakukan dengan beberapa cara diantaranya menambahkan unsur logam ke dalam paduan U-Mo dengan unsur logam diantaranya Ti, Zr, dan Si sehingga membentuk paduan U-7Mo-xM, atau menggunakan bahan matriks yang berbeda seperti serbuk Al atau campuran Al dan Si [16]. Unsur logam Ti, Zr, dan Si mempunyai tampang lintang serapan neutron rendah dan keberadaannya di dalam paduan U-Mo tidak menurunkan densitas secara signifikan. Keberadaan unsur-unsur logam tersebut dapat menghambat interaksi antara UMo dengan matriks Al membentuk UAl_x sehingga mengurangi terjadinya *sweeling*. Sebagai gambaran, pada tulisan ini diuraikan cara pembuatan pelat elemen dispersi U-7Mo-xM/Al (M=Ti, Zr, Si) dalam ukuran mini dan pengujiannya.

Pembuatan pelat elemen bakar (PEB) U-7Mo-xM/Al dalam bentuk mini bertujuan untuk mendapatkan parameter proses yang optimal sehingga diperoleh produk PEB yang memenuhi persyaratan bahan bakar dispersi tipe pelat. Bahan baku uranium yang digunakan pada pembuatan bahan bakar U-7Mo-xM adalah uranium depleksi. Parameter proses optimum yang diperoleh selanjutnya akan digunakan sebagai acuan di dalam proses pembuatan bahan bakar dengan ukuran yang sebenarnya dengan menggunakan uranium pengkayaan rendah.

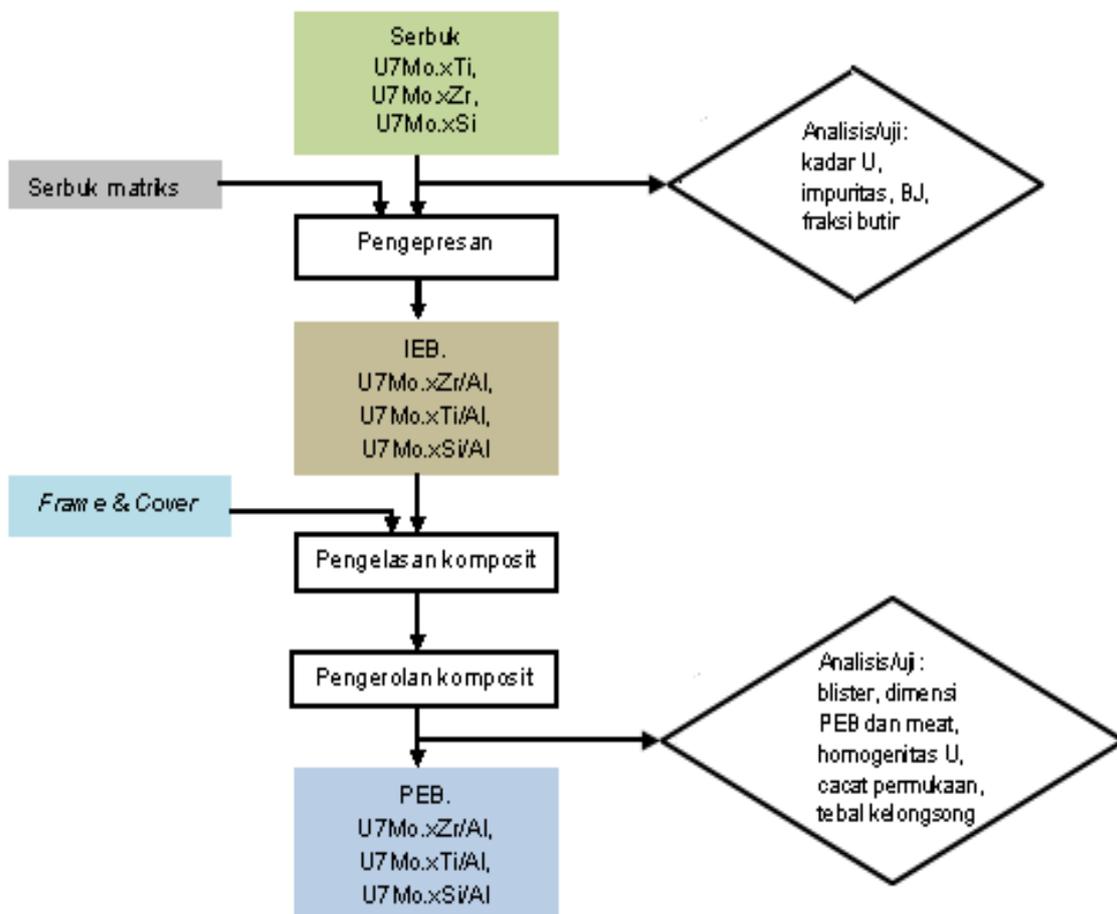
4.2. METODOLOGI

Pembuatan paduan U-7Mo-xM dilakukan dengan teknik peleburan menggunakan bahan baku uranium depleksi. Serbuk bahan bakar paduan U-7Mo-xM (x=1%, 2%, dan 3%), merupakan hasil proses hidriding-dehidriding-*grinding mill* dari paduan hasil proses peleburan. Proses hidriding-dehidriding dilakukan dengan mereaksikan paduan U-7Mo-xM dan gas hidrogen di dalam tabung reaksi yang terbuat dari gelas. Paduan U-7Mo-xM dipanaskan di dalam tabung reaksi pada temperatur 350°C dan divakum hingga tekanan 0,001 mbar. Setelah kondisi tekanan dan temperatur tercapai, kemudian gas hidrogen dialirkan ke dalam reaktor perlahan-lahan hingga mencapai tekanan 1000 mbar. Hasil proses hidriding-dehidriding-*grinding mill* masing-masing dianalisis kadar U dan impuritas serta berat jenisnya.

Data analisis kadar uranium, impuritas berat jenis masing-masing serbuk bahan bakar dan berat jenis serbuk matriks Al digunakan sebagai data masukan dalam perhitungan penentuan komposisi berat serbuk bahan bakar dan matriks Al dalam pembuatan inti elemen bakar (IEB) U-7Mo-xM/Al (M=Ti, Zr, Si) dengan densitas uranium 7 gU/cm³. IEB di desain berukuran mini dengan dimensi panjang 25 mm, lebar 15 mm dan panjang 30 mm, lebar 10 mm dengan ketebalan 3,15^{±0,05} mm yang kedua ujungnya dibuat

tirus. Berdasar data kadar uranium dan berat jenis bahan bakar, matriks Al, volume IEB dan dengan mengasumsikan porositas di dalam IEB sebesar 10%, maka komposisi berat bahan bakar dan matriks Al dapat ditentukan. Masing-masing komposisi bahan bakar dan matriks Al dihomogenisasi dan dipanaskan pada temperatur 100°C selama 3 jam untuk menghilangkan impuritas yang mudah menguap.

Campuran homogen serbuk bahan bakar dan matriks Al dibentuk menjadi IEB U-7Mo-xM/Al dengan pengepresan pada tekanan 10 dan 20 bar. Kualitas IEB U-7Mo-xM/Al hasil pengepresan diamati secara visual, pengukuran panjang, lebar dan tebal serta homogenitas distribusi uranium diuji dengan radiografi sinar-x. IEB U-7Mo-xM/Al hasil pengepresan bersama frame dan cover yang terbuat dari paduan aluminium AlMg₂, dirakit dan diikat dengan las *Tungsten Inert Gas* (TIG) beberapa titik pada keempat sisi sambungannya membentuk paket rol. Paket rol ditipiskan dengan pengerolan panas dan pengerolan dingin hingga terbentuk pelat elemen bakar (PEB) U-7Mo-xM/Al dengan ketebalan $1,37 \pm 0,07$ mm. Hasil dari setiap tahapan proses dikenai pengujian sesuai jenis uji bahan bakar dispersi tipe pelat yang meliputi: blister, dimensi PEB dan meat, cacat permukaan, homogenitas U, dan tebal kelongsong. Data analisis/uji digunakan sebagai bahan evaluasi kesesuaiannya dengan persyaratan. Alur proses pembuatan PEB U-7Mo-xM/Al ukuran mini ditunjukkan pada Gambar 4.1 [11, 12, 13,].



Gambar 4.1. Diagram alir proses fabrikasi PEB U-7Mo-xM/Al berukuran mini [11,12,13]

4.3. DISKUSI

4.3.1. Serbuk U-7Mo-xM

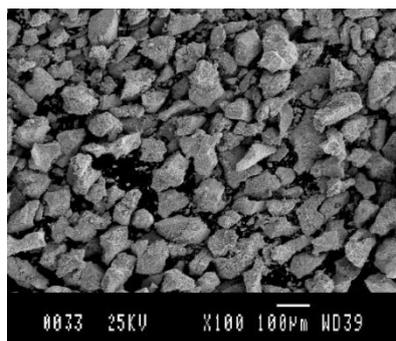
Serbuk bahan bakar U-7Mo-xM merupakan hasil proses hidriding-dehidriding-*grinding mill* dari paduan hasil proses peleburan. Selama proses hidriding terjadi penurunan tekanan di dalam reaktor. Penurunan tekanan menunjukkan telah terjadi penyerapan hidrogen dan reaksi antara gas hidrogen dengan paduan U-7Mo-xM_{H_y}. Paduan U-7Mo-xM_{H_y} hasil proses hidriding dilakukan proses dehidriding dengan memanaskan paduan pada temperatur 500°C selama 10 jam sehingga terjadi disosiasi gas H₂ dan serbuk U-7Mo-xM yang tetap rapuh.

Gambar 4.2. merupakan contoh serbuk U-7Mo-1Ti hasil proses hidriding-dehidriding sebelum proses grinding mill [14], sedangkan untuk serbuk U-7Mo-xZrH_y dan U-7Mo-xSiH_y memiliki kecenderungan yang sama. Metode hidriding-dehidriding menghasilkan fragmentasi paduan U-7Mo-xM. Retakan yang terdapat pada paduan menunjukkan adanya penyerapan gas hidrogen dan telah terjadi reaksi antara gas hidrogen dengan logam tersebut. Retakan cenderung menjalar sepanjang batas butir, hal ini yang menandakan paduan bersifat rapuh sehingga mudah dibuat serbuk dengan cara mekanik.



Gambar 4.2. Serbuk U-7Mo-1Ti hasil proses hidriding-dehidriding [14]

Serbuk U-7Mo-1Ti hasil proses hidriding-dehidriding bersifat rapuh dan piroporik (mudah bereaksi dengan oksigen). Sifat piroporik inilah yang menyebabkan pembuatan serbuk harus dilakukan di dalam ruang tertutup (*glove box*) bermedia gas *inert*. Serbuk U-7Mo-1Ti hasil proses mekanik yang diamati menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) ditunjukkan pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3. Morfologi serbuk U-7Mo-1Ti hasil proses grinding mill [14]

Bentuk dan ukuran serbuk tidak seragam, namun sebagian besar memiliki bentuk lebih beraturan dan cenderung *equiaxial*, meskipun beberapa serbuk lainnya mempunyai bentuk *accicular* dan *flake*. Ukuran partikel sangat bervariasi dari ukuran halus hingga relatif besar. Pada partikel dengan ukuran besar terlihat retakan mikro sehingga proses pembuatan serbuk secara mekanik lebih mudah terfragmentasi menjadi ukuran lebih kecil [14]. Bentuk serbuk U-7Mo-xM seperti di atas berpengaruh terhadap kualitas produk bahan bakar hasil fabrikasi diantaranya homogenisasi serbuk U-7Mo-xM dan matriks, kuat ikat, porositas, tebal kelongsong PEB dan kemampuan fabrikasi bahan bakardensitas uranium tinggi. Hasil pengamatan secara visual dan SEM memperlihatkan morfologi serbuk U-7Mo-xZr, dan U-7Mo-xSi hampir sama dengan serbuk U-7Mo-xTi.

4.3.2. Pengujian/analisis serbuk U-7Mo-xM

Serbuk U-7Mo-xM dianalisis/diuji yang meliputi kandungan uranium, impuritas, berat jenis, dan fraksi partikel butir. Analisis kandungan uranium dengan metode titrimetri, impuritas dengan *Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)*, berat jenis dengan metode piknometri, sedangkan fraksi partikel butiran serbuk menggunakan ayakan standar ASTM berukuran lobang 90 μm dan 38 μm . Hasil analisis/uji serbuk U-7Mo-xM masing-masing paduan ditunjukkan pada Tabel 4.1. Semakin tinggi kandungan unsur logam pepadu Ti/Zr/Si di dalam paduan U-7Mo-xM, terlihat bahwa kandungan U dan berat jenis (ρ) paduan semakin menurun.

Tabel 4.1. Data analisis serbuk bahan bakar U-7Mo-xM [11,12,13]

Serbuk	Kandungan U, %	Berat jenis, g/cm^3	Fraksi butir, %	
			-90+38 μm	-38 μm
U-7Mo-xTi				
U-7Mo-1Ti	91,85	17,18	74,48	25,52
U-7Mo-2Ti	90,74	16,71	71,38	28,62
U-7Mo-3Ti	89,10	16,27	56,57	43,43
Serbuk U-7Mo-xZr				
U-7Mo-1Zr	92,19	17,35	85,00	15,00
U-7Mo-2Zr	91,09	17,03	81,5	18,5
Serbuk U-7Mo-xSi				
U-7Mo-1Si	92,16	15,90	68,15	31,85
U-7Mo-2Si	91,39	15,87	72,28	27,72
U-7Mo-3Si	90,67	15,78	51,08	48,92

Penurunan kandungan uranium disebabkan karena unsur logam pepadu Ti, Zr dan Si bertambah banyak. Unsur logam pepadu Ti, Zr, dan Si memiliki berat jenis berturut-turut 4,5 g/cm^3 , 6,4 g/cm^3 dan 2,5 g/cm^3 . Berat jenis tersebut jauh lebih rendah bila dibandingkan dengan paduan U-7Mo ($\pm 16 \text{ g/cm}^3$), sehingga dengan kenaikan kandungan logam pepadu berat jenisnya menurun. Komposisi ukuran dan fraksi butir serbuk bahan bakar sangat berpengaruh terhadap pembentukan porositas dan

konduktivitas panas *meat* bahan bakar. Partikel butir yang diperoleh dari proses *ball mill* dan ayak bervariasi, namun untuk mendapatkan ukuran yang sesuai persyaratan dapat ditentukan dengan mengatur parameter proses pembuatan serbuknya.

4.3.3. Penentuan komposisi berat serbuk U-7Mo-xM dan matriks Al dalam pembuatan IEB U-7Mo-xM/Al ukuran mini.

IEB U-7Mo-xM/Al didesain dan dibuat dalam ukuran mini dengan dimensi 25 mm x 15 mm x 3,15 mm dan 30 mm x 10 mm x 3,15 mm. Ukuran tersebut jauh lebih kecil bila dibandingkan dengan ukuran IEB U₃Si₂/Al untuk bahan bakar RSG-GAS yang berdimensi 100 x 62 x 3,15 mm. Hal tersebut dilakukan dengan pertimbangan untuk penghematan bahan U-7Mo-xM dan serbuk matriks Al yang digunakan. Selain itu berdasarkan perhitungan fisika reaktor bahwa uji iradiasi dengan dimensi tersebut dapat dilakukan di RSG-GAS dengan selamat [17].

Pembuatan IEB U-7Mo-xM/Al dilakukan dengan pengepresan terhadap campuran serbuk bahan bakar U-7Mo-xM dan matriks Al. Penentuan komposisi berat serbuk U-7Mo-xM dan matriks Al dalam pembuatan IEB U-7Mo-xM/Al dilakukan dengan perhitungan menggunakan data masukan : dimensi IEB (volume), kandungan uranium dan berat jenis serbuk bahan bakar, berat jenis serbuk matriks Al, prosen pori (diasumsikan), dan densitas uranium di dalam bahan bakar yang akan dibuat. Data masukan tersebut sangat menentukan terhadap kualitas IEB U-7Mo-xM/Al yang akan dibuat sehingga harus disiapkan dengan teliti. Contoh perhitungan penentuan komposisi berat serbuk U-Mo-1Ti dan matriks Al pada pembuatan bahan bakar U-Mo-1Ti/Al densitas uranium 7,0 gU/cm³ adalah sebagai berikut.

Data masukan/analisis:

- Volume IEB U-7Mo-1Ti/Al = $(25 \times 15 \times 3,15) \text{ mm}^3 - [0,6 \times 2,5 \times 15] \times 2 \text{ mm}^3$
= $1136,25 \text{ mm}^3 = 1,13625 \text{ cm}^3 = 1,136 \text{ cm}^3$
- Kadar U dalam serbuk :
U-7Mo-1Ti = 91,845 %, U-7Mo-2Ti = 90,741%, U-7Mo-3Ti = 89,082%
- Berat jenis :
U-7Mo-1Ti = 17,179g/cm³, U-7Mo-2Ti = 16,710 g/cm³, U-7Mo-3Ti = 16,213 g/cm³
- Berat jenis matriks Al = 2,70 g/cm³

Perhitungan:

- Densitas bahan bakar U-7Mo-1Ti/Al = 7,0 gU/cm³
- Berat U dalam IEB U-7Mo-1Ti/Al = $7,0 \times 1,136 \text{ g} = 7,952 \text{ g}$
- Berat U-7Mo-1Ti = $7,952 / 0,91845 \text{ g} = 8,658 \text{ g}$
- Volume U-7Mo-1Ti = $8,658 / 17,179 \text{ g} = 0,504 \text{ cm}^3$
- Asumsi % pori (10%) = $0,1 \times 1,136 \text{ cm}^3 = 0,114 \text{ cm}^3$
- Volume Al = $1,136 \text{ cm}^3 - (0,504 + 0,114) \text{ cm}^3$
= $0,518 \text{ cm}^3$
- Berat Al = $0,518 \text{ cm}^3 \times 2,70 \text{ g/cm}^3 = 1,400 \text{ g}$

Model perhitungan di atas dapat digunakan untuk menentukan komposisi berat serbuk bahan bakar dan berat serbuk matriks dalam pembuatan bahan bakar dispersi tipe pelat dengan desain volume, jenis bahan bakar dan densitas uranium yang berbeda. Sebagai contoh perhitungan komposisi IEB U-7Mo-2Ti/Al dan U-7Mo-3Ti/Al dengan hasil seperti ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2. Hasil perhitungan IEB U-7Mo-xTi/Al densitas uranium 7,0 gU/cm³ [11].

No	Data Masukan	U-7Mo-1Ti/Al	U-7Mo-2Ti/Al	U-7Mo-3Ti/Al	Keterangan
1	Volume cetakan IEB, cm ³	1,136	1,136	1,136	desain
2	Kadar U dalam serbuk U-7Mo-xTi, %	91,845	90,741	89,082	hasil analisis
3	Berat jenis serbuk U-7Mo-xTi, g	17,179	16,710	16,213	hasil uji
4	Berat jenis serbuk matriks Al, g/cm ³	2,70	2,70	2,70	hasil uji
5	Berat U dalam IEB, g	7,952	7,952	7,952	hasil hitung
6	Berat U-7Mo-xTi, g	8,658	8,763	8,927	hasil hitung
7	Volume U-7Mo-xTi, cm ³	0,504	0,524	0,551	hasil hitung
8	Volume U-7Mo-xTi, %	44,366	46,127	48,503	hasil hitung
9	Pori (asumsi 10%), cm ³	0,114	0,114	0,114	asumsi
10	Volume Al, cm ³	0,518	0,498	0,471	hasil hitung
11	Berat matriks Al, g	1,400	1,345	1,272	hasil hitung

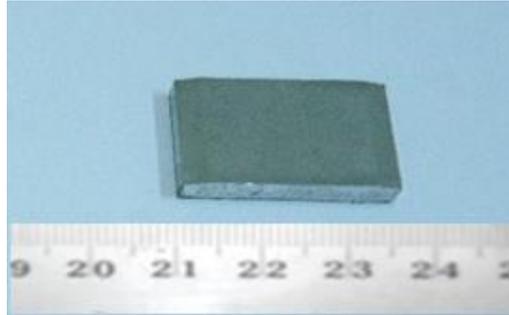
Hasil perhitungan pada Tabel 4.2. menunjukkan bahwa kenaikan kandungan Ti di dalam paduan U-7Mo-xTi menyebabkan kandungan dan berat uraniumnya menurun, demikian juga berat jenisnya. Dengan metode yang sama diterapkan untuk perhitungan komposisi berat bahan bakar U-7Mo-xZr/U-7Mo-xSi dan matriks Al dengan menggunakan data masukan dari masing-masing bahan bakar dan matriks yang digunakan. Hasil perhitungan komposisi bahan bakar U-7Mo-xZr dan U-7Mo-xSi ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3. Komposisi berat serbuk U-7Mo-xSi dan U-7Mo-xZr dengan matriks Al [11,13]

Jenis bahan bakar	Berat serbuk, g		Volume pori, %	Desain vol IEB, cm ³
	Bahan bakar	Al		
U-7Mo-1Si/Al	6,9503	1,0432	10	0,915
	6,9501	1,0429	10	0,915
U-7Mo-2Si/Al	7,0085	1,0312	10	0,915
	7,0087	1,0310	10	0,915
U-7Mo-3Si /Al	7,0640	1,0148	10	0,915
	7,0645	1,0147	10	0,915
U-7Mo-1Zr/Al	5,6622	1,2801	8	0,870
U-7Mo-2Zr/Al	6,2246	1,3608	8	0,870

4.3.4. IEB U-7Mo-xM/Al ukuran mini

Pembuatan IEB U-7Mo-xM/Al dilakukan dengan pengepresan terhadap campuran serbuk U-7Mo-xM dan matriks Al. Serbuk bahan bakar dan matriks Al dengan komposisi seperti yang tercantum di dalam Tabel 4.2 dan 4.3, masing-masing dicampur hingga homogen, selanjutnya dipress pada tekanan antara 10-20 bar. Hasil pengepresan berbentuk lempengan seperti contoh IEB U-7Mo-1Ti/Al yang ditunjukkan pada Gambar 4.4, sedangkan hasil pengukuran dimensi dan berat masing-masing IEB U-7Mo-xM/Al ditunjukkan pada Tabel 4.4.



Gambar 4.4. Contoh IEBU-7Mo-1Ti/Al [11]

Tabel 4.4. Hasil pengukuran dimensi IEB U-7Mo-xM/Al [11,12,13].

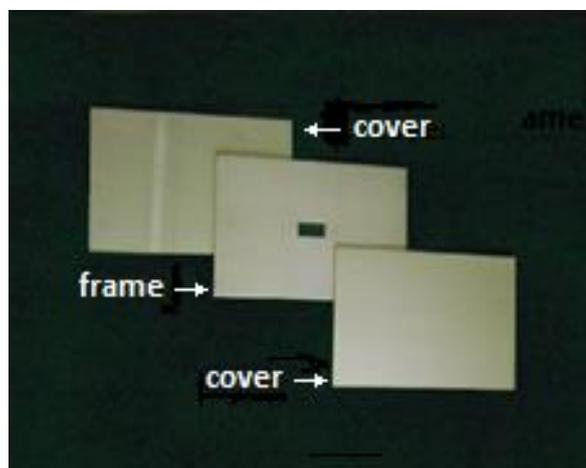
Berat serbuk, g		Berat IEB, g	Dimensi IEB, mm	Tekanan, Bar
U-7Mo-1Ti	Al			
8,658	1,323	9,92	25x15x3,17	20
8,658	1,323	9,85	25x15x 3,17	20
U-7Mo-2Ti	Al			
8,763	1,304	9,96	25x15x 3,07	20
8,763	1,304	9,88	25x15x 3,07	20
U-7Mo-3Ti	Al			
8,927	1,277	10,10	25x15x 3,57	20
8,927	0,852	9,71	25x15x 2,87	20
8,927	1,062	9,91	25x15x 3,05	20
U-7Mo-1Zr	Al			
5,6622	1,2801	6,1	30x 10 x 3,36	10
U-7Mo-2Zr	Al			
6,2246	1,2801	7,52	30x 10 x 3,42	10
		7,53	30x 10 x 3,41	10
U-7Mo-1Si	Al			
6,9503	1,0432	8,0511	30 x 10 x 3,15	10
6,9501	1,0429	8,0323	30 x 10 x 3,15	10
U-7Mo-2Si	Al			
7,0085	1,0312	8,1210	30 x 10 x 3,15	10
7,0087	1,0310	7,9860	30 x 10 x 3,05	10
U-7Mo-3Si	Al			
7,0640	1,0148	8,0885	30 x 10 x 3,23	10
7,0645	1,0147	8,1066	30 x 10 x 3,24	10

Hasil pengamatan secara visual terhadap seluruh IEB U-7Mo-xM/Al menunjukkan bahwa tidak teramati adanya cacat berupa retak atau pecah. Distribusi uranium hasil uji dengan radiografi sinar-X cukup homogen dan tidak teramati adanya aglomerasi uranium yang lebih besar dari 1 mm. Sementara itu hasil pengukuran panjang dan lebar seluruh IEB U-7Mo-xM/Al sesuai dengan ukuran desain, namun ketebalan IEB berbeda-beda dan terdapat beberapa yang tidak sesuai spesifikasi yaitu sebesar $3,15^{\pm 0,05}$ mm [18].

Berdasar hasil beberapa kali percobaan pembuatan IEB dengan komposisi campuran antara bahan bakar dan matriks serta tekanan pengepresan yang sama menunjukkan bahwa sulit diperoleh ketebalan yang sama. Oleh karena itu pertimbangan utama yang diambil dalam pembuatan IEB adalah jumlah/berat uraniumnya (hasil pengujian), apakah sudah sesuai dengan densitas uranium yang akan dibuat atau belum. Hal ini diperlukan karena data uji jumlah uranium di dalam IEB U-7Mo-xM/Al selanjutnya digunakan sebagai dasar untuk perhitungan fisika reaktor. Apabila terdapat IEB yang memiliki ketebalan yang tidak sesuai spesifikasi tetapi jumlah uraniumnya sudah sesuai/memenuhi, maka upaya yang dilakukan pada pembuatan IEB selanjutnya adalah dengan menambah atau mengurangi berat matriks Al nya. Penambahan atau pengurangan matriks Al dilakukan dengan perhitungan. Oleh karena itu dalam pembuatan IEB selalu diawali dengan pembuatan beberapa contoh untuk digunakan sebagai sampel uji. Setelah data uji terhadap contoh IEB sesuai dengan yang diharapkan, dapat dilanjutkan untuk pembuatan yang lebih banyak.

4.3.5. *Frame dan cover*

Frame dan *cover* merupakan material kelongsong bahan bakar tipe pelat yang terbuat dari paduan AlMg2. *Frame* didesain berukuran 180 x 140 x 3,15 mm dan dibagian tengahnya dibuat lobang berukuran 25 x 15 x 3,15 mm, sedangkan *cover* berukuran 180 x 140 x 2,7 mm. Ketebalan *frame* disesuaikan dengan ketebalan IEB U-7Mo-xM/Al sehingga pada proses pengerolan, material IEB U-7Mo-xM/Al tetap terkungkung di dalam lobang *frame* dan tidak terbentuk *blister* dan *white spots*. *Frame* dan *cover* seperti yang ditunjukkan Gambar 4.5 berfungsi sebagai kelongsong PEB U-7Mo-xTi/Al, U-7Mo-xSi/Al dan U-7Mo-xZr/Al.



Gambar 4.5. *Frame dan cover* IEB [12].

4.3.6. Komposit rakitan PEB U-7Mo-xM/Al

IEB U-7Mo-xM/Al dimasukkan ke dalam lobang *frame*, kemudian kedua permukaannya ditutup dengan *cover* sehingga menjadi rakitan dengan tebal sekitar ++8,55 mm. Selanjutnya pada keempat sisi sambungannya dilas beberapa titik menggunakan las *Tungsten Inert Gas (TIG)* sehingga membentuk komposit rakitan PEB U-7Mo-xM/Al seperti ditunjukkan pada Gambar 4.6. Jejak las berfungsi sebagai pengikat rakitan komposit agar pada proses pengerolan posisi *meat* dapat dipertahankan berada di tengah-tengahnya. Pengelasan hanya dilakukan beberapa titik pada keempat sisi sambungannya sehingga masih terdapat celah yang tersisa. Hal ini dimaksudkan agar pada proses pengerolan udara yang terdapat di daerah zona bahan bakar terdesak keluar melalui celah antar titik las sehingga tidak ada udara yang terjebak di dalam PEB hasil rol dalam bentuk *blister*.



Gambar 4.6. Komposit rakitan PEB U-7Mo-xM/Al [12].

4.3.7. Pelat elemen bakar U-7Mo-xM/Al ukuran mini

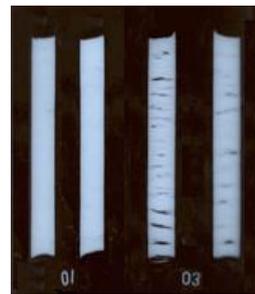
Komposit PEB U-7Mo-xM/Al merupakan rakitan yang terdiri dari *frame*, IEB U-7Mo-xM/Al dan 2 *cover* yang memiliki ketebalan sekitar 8,55 mm. Rakitan tersebut selanjutnya ditipiskan hingga ketebalan sekitar 1,40 mm dengan teknik pengerolan secara bertahap. Penipisan komposit dari ketebalan sekitar 8,55 mm hingga menjadi pelat dengan ketebalan sekitar 1,65 mm menggunakan teknik pengerolan panas pada temperatur 425°C. Pada temperatur tersebut material aluminium/paduannya bersifat plastis sehingga hasil pengerolan tidak terjadi *crack*/retak. Pelat hasil pengerolan panas dengan ketebalan 1,65 mm selanjutnya ditipiskan dengan pengerolan dingin yang dilakukan berulang-ulang sehingga terjadi penipisan pelat dengan ketebalan akhir sekitar 1,40 mm.

Permukaan pelat hasil pengerolan dingin tidak rata dan cenderung bergelombang/melengkung, sehingga perlu dilakukan pelurusan menggunakan mesin rol pelurus. Pelat yang telah lurus dan permukaannya rata, selanjutnya posisi *meat* diamati dengan penayangan menggunakan radiografi sinar-X yang dilengkapi pola sablon untuk mendapatkan ukuran dan posisi *meat* pelat elemen bakar yang sesuai. Hasil penayangan radiografi sinar-X digunakan sebagai acuan untuk melakukan pemotongan sisi panjang dan lebar sehingga *meat* bahan bakar berada pada bagian tengah seperti ditunjukkan

pada Gambar 4.7, 4.8 dan 4.9. Selama proses pengerolan terjadi penipisan ketebalan pelat yang diikuti penipisan IEB yang ada di dalamnya sehingga terjadi pemanjangan *meat* sesuai arah pengerolan. Permukaan PEB cukup baik dan tidak teramati adanya cacat berupa retakan maupun lobang yang melebihi $80\ \mu\text{m}$ sesuai yang dipersyaratkan di dalam PEB.



(a)

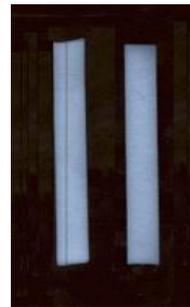


(b)

Gambar 4.7. PEB U-7Mo-xTi/Al (b) hasil radiografi PEB U-7Mo-xTi/Al [12]



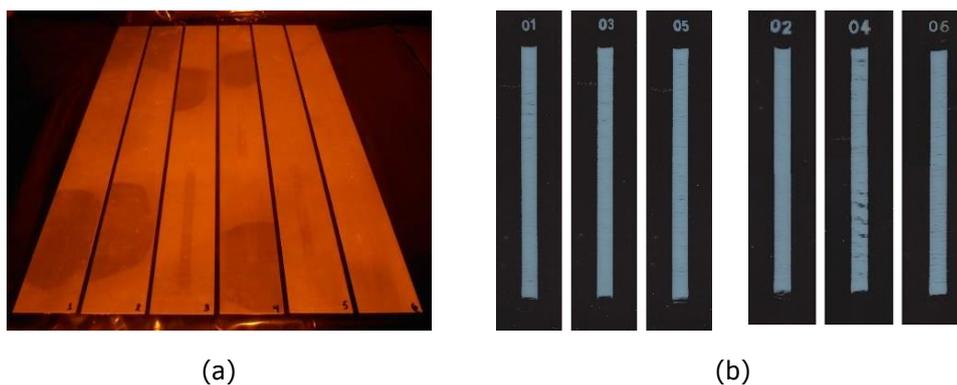
(a)



(b)



Gambar 4.8. (a) PEB U-7Mo-1Zr/Al dan hasil radiografi
(b) PEB U-7Mo-2Zr/Al dan hasil radiografi [11]



Gambar 4.9. (a) PEB U-7Mo-xSi/Al (b) hasil radiografi PEB U-7Mo-xSi/Al [13].

Hasil radiografi PEB menunjukkan bahwa terjadi pemanjangan *meat* sekitar 6 kali dari panjang IEB U-7Mo-xTi/Al mula-mula, sedangkan lebarnya tidak mengalami perubahan. Pada daerah *meat* terdapat bercak hitam yang merupakan pengelompokan matriks Al. Hal ini menunjukkan bahwa campuran bahan bakar U-7Mo-xTi dengan matriks Al kurang homogen. Kemungkinan lain disebabkan matriks Al masih mengandung uap air sehingga pada proses pencampuran dengan serbuk U-7Mo-xTi terjadi pengelompokan yang menyebabkan proses pengerolan menjadi tidak homogen. Berkaitan dengan hal tersebut maka perlu dilakukan proses *anil* terhadap serbuk U-7Mo-xTi dan matriks Al sebelum dilakukan pembuatan IEB. Selain itu proses pencampuran perlu dilakukan lebih lama. Pengamatan secara visual terhadap seluruh PEB di daerah *meat* tidak teramati adanya *blister*.

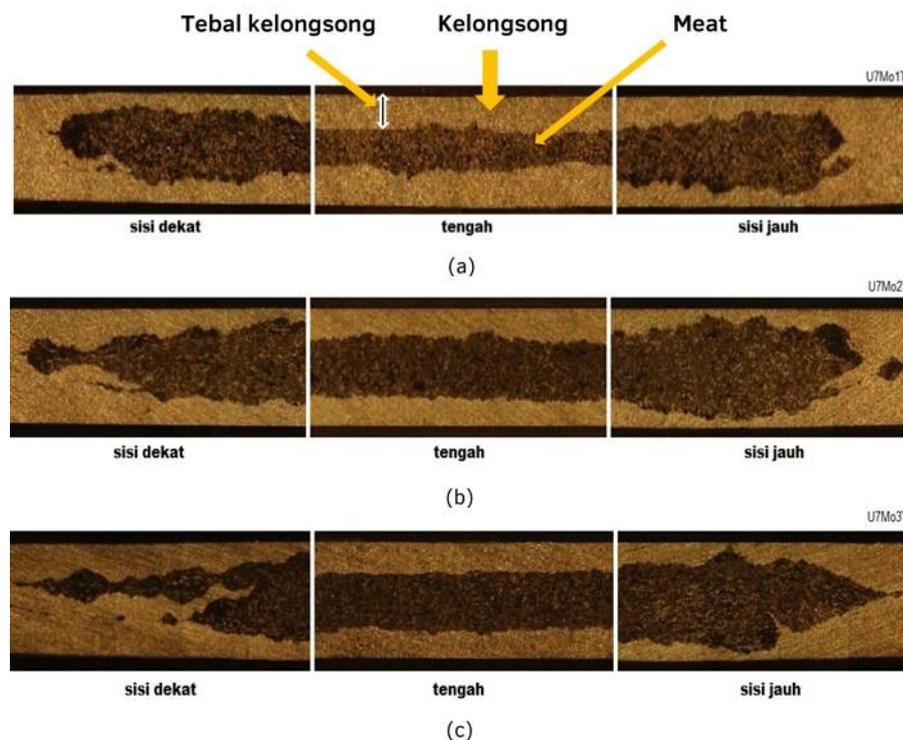
4.3.8. Pengukuran ketebalan kelongsong

Bahan bakar tipe pelat pada saat digunakan di dalam reaktor mengalami reaksi fisi yang menghasilkan produk fisi dalam bentuk padat maupun gas. Semakin lama bahan bakar digunakan di dalam reaktor, produk fisinya semakin banyak sehingga tekanan di dalam kelongsong bertambah. Upaya untuk menghindari agar produk fisi tidak keluar dari zona bahan bakar dan tetap terkungkung di dalam kelongsong, maka kelongsong harus mempunyai ketebalan tertentu minimal 0,25 mm.

Pengujian ketebalan dilakukan secara merusak dengan cara memotong PEB sebanyak 3 (tiga) sampel pada bagian tengah dan kedua ujungnya. Pemotongan bagian tengah PEB tegak lurus arah rol, sedangkan kedua ujungnya searah rol. Potongan bagian tengah diberi kode TG, bagian ujung yang dekat dengan penomoran PEB dengan kode sisi dekat (SD), sedangkan bagian ujung yang jauh dari nomor dengan kode sisi jauh (SJ). Masing-masing potongan PEB *dimounting* kemudian diampelas sampai halus. Permukaan PEB yang sudah halus diamati ketebalan kelongsong menggunakan mikroskop optik yang dilengkapi fasilitas alat ukur ketebalan. Pengamatan dan pengukuran ketebalan kelongsong dilakukan pada sampel dengan jarak pengukuran setiap 1 mm dengan contoh hasil pengukuran ketebalan kelongsong PEB U-7Mo-xTi/Al densitas uranium 7 gU/cm³ ditunjukkan pada Gambar 4.10 [18].

Pada Gambar 4.10. terlihat bahwa pada seluruh ujung *meat* PEB terbentuk *dogbone* yang berakibat ketebalan kelongsong menjadi tipis. Terjadinya *dogbone* disebabkan oleh semakin tinggi densitas uranium menyebabkan jumlah bahan bakar meningkat sedangkan

jumlah matriks Al menurun sehingga pada proses pengerolan terjadi aglomerasi bahan bakar di kedua ujung PEB. Ketebalan kelongsong rerata 0,40 mm, tetapi dari tiga PEB terdapat beberapa titik pengukuran dengan ketebalan berturut-turut 0,17 mm; 0,11 mm dan 0,11 mm. Dalam bahan bakar dispersi tipe pelat walaupun ketebalan kelongsong rerata $>0,25$ mm namun dengan adanya beberapa titik pengukuran yang $< 0,25$ mm maka PEB tersebut tidak memenuhi persyaratan.



Gambar 4.10. Ketebalan kelongsong PEB densitas uranium 7 gU/cm³ (a) PEB U-7Mo-1Ti/Al, (b) PEB U-7Mo-2Ti/Al, (c) PEB U-7Mo-3Ti/Al [18]

4.4. KESIMPULAN

Tahapan dan hasil pembuatan pelat elemen bakar dispersi U-7Mo-xM/Al dalam ukuran mini telah diuraikan. Pembuatan IEB U-7Mo-xM (M=Ti, Zr, Si) dengan pengepresan pada tekanan 10 dan 20 bar diperoleh IEB hasil *press* cukup baik dan tidak terjadi kerusakan/retak. Dimensi panjang dan lebar IEB sesuai dengan desain, namun ketebalannya terdapat beberapa IEB yang di luar desain ($3,15^{\pm 0,05}$ mm). Pengamatan secara visual terhadap seluruh PEB menunjukkan hasil pembuatan yang cukup baik dan tidak terdapat *blister*, cacat dalam bentuk *crack*/lobang.

Data uji radiografi tidak teramati adanya *white spots* yang keluar dari zona *meat*, namun terdapat beberapa PEB dengan distribusi uranium yang kurang homogen. Ketidakhomogenan tersebut kemungkinan disebabkan serbuk matriks masih mengandung uap air sehingga untuk selanjutnya sebelum dibentuk menjadi IEB harus dipanaskan terlebih dahulu. Secara keseluruhan terjadi pemanjangan *meat* sekitar 6 kalinya, sedangkan lebar tidak mengalami perubahan. Ketebalan kelongsong rerata untuk ketiga

jenis PEB adalah sekitar 0,40 mm, namun terdapat beberapa titik yang memiliki ketebalan <0,25 mm, sehingga belum memenuhi persyaratan. Untuk mengatasi masalah ketebalan kelongsong ini perlu digunakan material kelongsong yang lebih keras dibanding paduan AlMg2, dan sebagai alternatifnya menggunakan paduan aluminium seri 6061.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Soba a, A. Denis a, b. An Interdiffusional Model for Prediction of the Interaction Layer Growth in the System Uranium-Molybdenum/Aluminum. *Journal of Nuclear Materials* 360 (2007) 231-241.
- [2] M. Cornen., M. Rodier, X. Iltis, S. Dubois, P. Lemoine. About the Effects of Si and/or Ti Additions on the UMo/Al Interactions. RRFM, Hamburg, Germany, 2008.
- [3] Supardjo, Agoeng K, dan Wisnu Ariadi, Pembentukan Single Phase Paduan U-7Mo-xTi dengan Teknik Peleburan Menggunakan Tungku Busur Listrik. *Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir, URANIA*. Oktober 2010; Vol.16 No.3.p: 145-154.
- [4] D.J. Senior, D Burkes. Fuel Fabrication Capability Research and Development Plan. Global Threat Reduction Initiative-Convert Program, Juni 2013.
- [5] Supardjo, Boybul, Agoeng Kadarjono. Pengaruh Fabrikasi Pelat Elemen Bakar U-7Mo/Al dengan Variasi Densitas Uranium Terhadap Pembentukan Pori didalam meat dan Tebal Kelongsong. *Jurnal Teknologi Bahan Nuklir*. Juni 2012; Vol. 8, No.2; p : 79-87.
- [6] Aslina Br. Ginting, Supardjo, Agoeng Kadarjono, Dian Anggraini. Pengaruh Kandungan Molibdenum Terhadap Perubahan Fasa dan Kapasitas Panas Paduan UMo. *Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir URANIA*. Juni 2011, 17(2). pp: 76-86.
- [7] Supardjo, Agoeng K., Boybul, Maman K.A. Karakterisasi Ingot Paduan U-7Mo.xTi Hasil Proses Peleburan Menggunakan Tungku Busur Listrik. *Jurnal Teknologi Bahan Bakar Nuklir*. Juni 2013, Vol. 9, No.2; p: 67-76.
- [8] John Thomas Creacy. Thermal Properties Of Uranium-Molybdenum Alloys Phase Decomposition Effect Of Heat Treatment. Thesis, Master Of Science, Texas A &M University; 2011.
- [9] Supardjo, Agoeng Kadarjono, Aslina Br Ginting, Pembuatan Pelat Elemen Bakar Mini UMo-Al Dengan Densitas Uranium 6 dan 7 gU/cm³,” *Jurnal Teknologi Bahan Nuklir*, Juni 2011;Vol 7 No 2, p:107-121.
- [10] Van Den Berghe Sven, Leenaers Ann, Koonen Edgar and Sannen Leo. From High to Low Enriched Uranium Fuel in Research Reactor *Advances in Science and Technology*. 2010, Vol 73, pp: 78-90.
- [11] Supardjo. Pembuatan Prototipe Bahan Bakar Dispersi U-Mo-Zr/Al Tipe Pelat untuk Bahan Bakar Reaktor Riset. Laporan akhir Program Insentif Peningkatan Kemampuan Peneliti dan Perakayasa. Nomor: 08/SEK/IPKPP/PPK/III/2011, Batan 24 Oktober 2011.
- [12] Supardjo. Laporan Akhir Insentif Riset Sistem Inovasi Nasional: Pembuatan dan Karakterisasi Pelat Elemen Bakar Dispersi U-7Mo-Ti/Al dan U-7Mo-Ti/Al-Si Sebagai Kandidat Bahan Bakar Nuklir Reaktor Riset Tipe *Material Testing Reactor (MTR)*. 2013.

- [13] Agoeng Kadarjono. Laporan Akhir Insentif Riset Sistem Inovasi Nasional: Pembuatan dan Karakterisasi Pelat Elemen Bakar Dispersi U-7Mo-xSi/Al Sebagai Kandidat Bahan Bakar Nuklir Reaktor Riset Tipe Material Testing Reactor (MTR). 2015.
- [14] Maman Kartaman, Supardjo, Boybul, Agung Kadaryono, Pengaruh Unsur Ti Pada Paduan U-7Mo-xTi Terhadap Morfologi Serbuk Hasil Hidriding-Dehidriding. Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir, URANIA, Oktober 2013; Vol. 19 No, 3.
- [15] Jong Man Park, Ho Jin Ryu, Jae Soon Park, Seok Jin Oh, Chang Kyu Kim, Yeon Soo Kim, Gerard L. Hofman. Phase Stability of UMoTi Alloys and Interdiffusion Behaviors of UMoTi/AlSi. The International Meeting on RERTR. Prague, Czech Republic, 2007.
- [16] Luis Olivares, Jorge Maren, Mario Barera, Gonzalo Torres and Jaime Lisboa. Nuclear Fuel Development Based on UMo Alloys under Irradiation Evaluation of LEU U₃Si₂ - 4,8 gU/cm³ Test Fuel. The RERTR-2007 International Meeting on RERTR, Prague, Czech Republic, September 2007.
- [17] Endiah Pudji Hastuti, Tagor Malem Sembiring, Supardjo dan Suwardi. Pengembangan Bahan bakar U₃Si₂/Al Densitas Tinggi, Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir, Laporan Analisis Keselamatan. No. Ident: PR40J19001, Rev 03, Agustus 2008.
- [18] Supardjo. Pengembangan Bahan Bakar Dispersi U-7Mo-xTi/Al Tipe Pelat Untuk Bahan Bakar Reaktor Riset. Presentasi Ilmiah Jabatan Peneliti Utama Bidang Bahan Bakar Reaktor Riset, Serpong, Oktober 2016.

BIOGRAFI PENULIS



Supardjo, lahir di Yogyakarta pada tanggal 17 Oktober 1956. Memperoleh gelar sarjana Teknik Kimia dari Fakultas Teknik UGM pada tahun 1984 dan pasca sarjana dalam bidang Teknik Rekayasa Nuklir, Fakultas Teknik Mesin, ITB tahun 1993. Pada tahun 1979 menjadi PNS BATAN dan pada tahun 1994 s.d. 1996 menduduki jabatan Ka. Sub. Bidang Kendali Kualitas Produk Elemen Bakar Nuklir di PEBN. Dari tahun 1996 s.d 2006 diperbantukan di PT. Batan Teknologi (persero) sebagai Manajer Produksi Bahan dan EBN (1996 s.d. 2000), Manajer Jaminan Kualitas (2000 s.d.2004) dan Manajer Kendali Kualitas (2004 s.d. 2006). Masuk fungsional peneliti tahun 1997 sebagai peneliti pertama, tahun 1999 peneliti muda, dan dari tahun 2006 hingga sekarang menduduki jabatan Peneliti Ahli Madya dengan spesialisasi bahan bakar dispersi untuk reaktor riset. Penelitian dimulai tahun 1989 dengan pengembangan bahan bakar dispersi U_3Si_2/Al tipe pelat, dan bahan bakar dispersi berbasis UMo hingga saat ini.



Agoeng Kadarjono, lahir di Gresik 27 Desember 1963, memperoleh gelar sarjana Teknik Kimia dari Universitas Pembangunan Nasional 'Veteran' Surabaya pada tahun 1989. Tahun 1991 menjadi PNS BATAN pada Bidang Produksi Elemen Bakar Reaktor Riset PEBN-BATAN (tahun 1991-1996), dipekerjakan sebagai Asisten Manajer Proses Konversi pada PT. Batan Teknologi (persero) (tahun 1996 s.d. 2004), menjadi staf Bidang Jaminan Mutu di P2TBDU-BATAN dari tahun 2004 s.d. 2006, menjadi Peneliti Pertama Bidang Konversi Bahan Bakar Nuklir dari tahun 2007 s.d. 2012, dan menjadi Peneliti Muda Bidang Fabrikasi Bahan Bakar Nuklir dari tahun 2012 hingga sekarang. Penelitian difokuskan pada pengembangan bahan bakar maju untuk reaktor riset.



Boybul, lahir di Payakumbuh Sumatra Barat, 27 September 1960. Menyelesaikan pendidikan Sarjana Muda Kimia Analisis di Akademi Kimia Analisis Bogor Tahun 1984, dan Diploma IV Kimia Analisis di Sekolah Tinggi Teknologi Tekstil Bandung Tahun 1991. Pada Tahun 1987 mulai bekerja di Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) Bidang Produksi Elemen Bakar Reaktor Riset pada bagian Kendali Kualitas. Pada tahun 2005 menjadi Peneliti Pertama pada Bidang Pengembangan Radiometalurgi, PTBBN dan saat ini sebagai Peneliti Ahli Madya bidang Kimia Analitik.