

Karakterisasi zirconium diborida sebagai bahan lapisan penyerap mampu bakar pada pelet UO_2

Sungkono, Tri Yulianto

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir-BATAN,
Kawasan Puspiptek-Serpong, Tangerang Selatan 15314, Banten, Indonesia
e-mail : sungkhana@gmail.com
(Naskah diterima 07-01-2015 disetujui 24-01-2015)

Abstract

Characterization of a zirconium diborid as a burnable layers on the UO_2 fuel pellet. Integrated fuel burnable absorber hydrophobic developed to improve the efficiency of fuel use in the reactor core-type pressurized water reactors (PWRs). The objectives of this research was to obtain the character of zirconium diboride (ZrB_2) powder as a coating material on UO_2 pellets. The method used is the characterization of physical, chemical, and thermal and microstructural UO_2 powder ZrB_2 . The results of this research show that the character ZrB_2 as a coating material having a hexagonal crystal structure, density of 5.9583 g / cm^3 , ZrB_2 has good thermal stability. ZrB_2 powder has additives i.e V, Al, Fe, Mo, Cr, Zn in small quantities and do not significantly affect the absorption of thermal neutrons. ZrB_2 powder has qualified as a burnable absorber layer of nuclear fuel for PWRs. Pellet of $UO_2 + 0.3\% Cr_2O_3$ dopant, $UO_2 + 0.7\% Nb_2O_5$ dopant; $UO_2 + 0.3\% TiO_2$ dopant after sintering have small grained of qualified for ZrB_2 coated using RF Sputtering machine.

Keywords : zirconium diboride, IFBA coating, UO_2 pellet, chemical composition, thermal properties

Abstrak

Karakterisasi zirconium diborida sebagai bahan lapisan penyerap mampu bakar pada pelet UO_2 . Bahan bakar nuklir berlapis penyerap mampu bakar hidropobik dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi penggunaan bahan bakar di dalam teras reaktor tipe *pressurized water reactors* (PWR). Tujuan penelitian ini adalah mendapatkan karakter serbuk zirconium diborida (ZrB_2) sebagai bahan pelapis permukaan pelet UO_2 . Metode penelitian yang digunakan adalah karakterisasi fisis, kimia dan termal serbuk ZrB_2 serta mikrostruktur UO_2 . Hasil penelitian menunjukkan bahwa karakter ZrB_2 sebagai bahan pelapis mempunyai struktur kristal heksagonal, densitas $5,9583 \text{ g/cm}^3$, stabilitas termal ZrB_2 baik. Serbuk ZrB_2 mempunyai unsur aditif yaitu V, Al, Fe, Mo, Cr, Zn dalam jumlah kecil dan tidak berpengaruh secara signifikan terhadap penyerapan neutron termal. Serbuk ZrB_2 memenuhi syarat sebagai bahan lapisan penyerap dapat bakar dari bahan bakar untuk reaktor daya tipe PWR. Pelet $UO_2 + \text{dopan } 0,3\% \text{ Cr}_2O_3$ sinter; pelet $UO_2 + \text{dopan } 0,7\% \text{ Nb}_2O_5$ sinter; pelet $UO_2 + \text{dopan } 0,3\% \text{ TiO}_2$ sinter yang berbutir kecil memenuhi syarat untuk dilapisi ZrB_2 menggunakan mesin RF *Sputtering*.

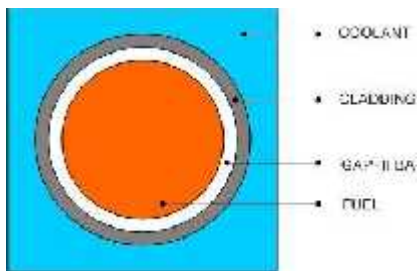
Kata Kunci : zirconium diborida, lapisan *IFBA*, pelet UO_2 , komposisi kimia, sifat termal

1. Pendahuluan

Dalam rangka meningkatkan daya saing Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) terhadap Pembangkit Listrik berbahan bakar fosil telah dilakukan berbagai usaha diantaranya menaikkan fraksi bakar bahan bakar nuklir, meminimalkan jumlah limbah dan biaya perawatan dengan tanpa mengurangi fitur keselamatan. Operasi PLTN dalam kondisi normal dan terantisipasi, kenaikan fraksi bakar bahan bakar nuklir menyebabkan kenaikan produk gas hasil fisi sehingga terjadi peningkatan pelepasan gas hasil fisi seperti xenon (Xe) dan krypton (Kr) secara signifikan di dalam batang bahan bakar nuklir. Kondisi ini memberikan dampak pada kenaikan tekanan internal batang bahan bakar nuklir yang memungkinkan terjadinya interaksi antara pelet dan kelongsong. Selain itu, kenaikan fraksi bakar menyebabkan kenaikan temperatur, waktu tinggal, perubahan dimensi, meningkatkan laju korosi dan menurunkan ketangguhan material struktur. Dengan demikian, kenaikan fraksi bakar apabila tidak diantisipasi dengan benar dapat berpotensi terjadinya kegagalan bahan bakar nuklir.^[1] Salah satu usaha untuk mencegah terjadinya kegagalan bahan bakar nuklir adalah menggunakan bahan bakar nuklir berlapis penyerap dapat bakar hidropobik (Gambar 1). Bahan bakar tersebut dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi penggunaan bahan bakar di dalam teras reaktor nuklir. Sehubungan hal tersebut, Westinghouse pada tahun 1970-an telah memulai berbagai inovasi untuk mendapatkan material yang berfungsi sebagai penyerap neutron mampu bakar terintegrasi bahan bakar

UO₂ (Integrated Fuel Burnable Absorber/IFBA).

Persyaratan material yang memenuhi kriteria IFBA adalah tampang lintang serapan neutron termal rendah, sifat fisika, mekanik baik, ketahanan aus dan korosi tinggi serta kompatibilitas dengan bahan bakar^[2].



Gambar 1. Penampang bahan bakar berlapis IFBA^[1].

Material yang telah diketahui sebagai penyerap neutron dapat bakar adalah gadolinium oksida (Gd₂O₃) dan zirconium diborida (ZrB₂). Gadolinium oksida mempunyai tampang lintang serapan neutron termal lebih tinggi dibandingkan zirconium diborida (ZrB₂). Gadolinium oksida dan ZrB₂ digunakan sebagai material pelapis bahan bakar dengan maksud untuk menaikkan umur bahan bakar nuklir dalam teras reaktor serta pengendalian reaktivitas reaktor nuklir yang lebih baik. Kelemahan Gd₂O₃ adalah tampang lintang serapan neutron termal tinggi sehingga laju deplesi bahan bakar sangat cepat. Untuk mengatasinya, dibuat campuran homogen uranium dan gadolinium dengan teknik pencampuran serbuk atau sol-gel dan selanjutnya pembentukan serbuk UO₂. Selain

itu, apabila kandungan Gd₂O₃ lebih besar dari 10% akan menurunkan konduktivitas termal dan titik lebur bahan bakar^[3].

Zirconium diborida (ZrB₂) merupakan penyerap dapat bakar paling efisien yang digunakan untuk elemen bakar reaktor daya tipe PWR. Kemampuan ZrB₂ untuk menyerap neutron terbatas sehingga tidak ada dampak penyerapan sisa. Tingkat penyerapan ZrB₂ sesuai dengan penurunan reaktivitas bahan bakar, sehingga pengkayaan uranium dalam bahan bakar bisa diturunkan. Zirconium diborida sebagai bahan IFBA mempunyai kelemahan yaitu fabrikasinya kompleks dan sulit membentuk larutan pada tahap reprocessing karena ketidak-lembaman secara kimiawi zirconium. Selain itu, koefisien pengendalian temperatur moderator yang rendah juga merupakan kelemahan dari bahan bakar nuklir berlapis ZrB₂.^[4] Pada saat pelet bahan bakar nuklir berlapis zirconium diborida diiradiasi dalam teras reaktor, boron dalam lapisan akan terurai menjadi lithium dan helium. Helium yang dihasilkan akan dilepaskan ke dalam plenum di batang bahan bakar. Dengan demikian, penggunaan IFBA menyebabkan tekanan tambahan dalam batang bahan bakar karena generasi helium selama iradiasi, dibandingkan dengan batang bahan bakar standar.

Pada pembangkit nuklir dengan fraksi bakar tinggi, siklus bahan bakar dengan pengkayaan uranium yang lebih besar, akan ada kebutuhan untuk kontrol reaktivitas yang lebih besar pada awal siklus bahan bakar. Jika hal ini dicapai dengan peningkatan muatan zirconium diborida, akan ada peningkatan tekanan yang signifikan dalam batang bahan bakar nuklir karena helium yang dihasilkan dari transmisi B-10 selama iradiasi, dan pada gilirannya akan membatasi umur IFBA. Keuntungan lain dari penggunaan IFBA adalah menggabungkan bahan penyerap dalam bahan bakar tanpa meniadakan moderator air.^[5]

Berdasarkan uraian yang telah disebutkan, maka diketahui bahwa karakter ZrB₂ dan mikrostruktur UO₂ memegang peranan penting dalam proses pelapisan pelet UO₂. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan karakterisasi terhadap bahan pelapis permukaan pelet UO₂ dengan tujuan untuk mendapatkan karakter ZrB₂ yang memenuhi syarat sebagai bahan pelapis permukaan pelet UO₂. Metode penelitian yang digunakan adalah karakterisasi fisis, kimia dan termal terhadap serbuk ZrB₂.

2. Metodologi

Bahan yang digunakan dalam penelitian adalah serbuk zirconium diborida dan zinc stearat. Peralatan yang digunakan dalam penelitian adalah autopycnometer untuk

menentukan densitas ZrB₂. Sementara itu, DTA/DSC untuk menentukan sifat termal ZrB₂ dan spektrometer serapan atom (AAS) untuk menentukan komposisi kimia ZrB₂. Target dibuat dari serbuk ZrB₂ dicampur bahan perekat yang digunakan dalam pembuatan pelet UO₂, yaitu zinc-stearat sampai homogen. Untuk keperluan ini, penambahan zinc-stearat ke dalam serbuk ZrB₂ divariasikan yaitu 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 dan 1,0% berat. Campuran homogen ZrB₂ dan zinc-stearat dimasukkan ke dalam cetakan dengan diameter 75 mm, selanjutnya cetakan tersebut ditekan menggunakan penekan hidrolik hingga 9.000 lbf dan ditahan selama 15 menit. Lempengan ZrB₂ + zinc stearat dilepaskan secara hati-hati dari cetakan sehingga diperoleh target dengan diameter 75 mm dan tebal 4 mm. Kompakan tersebut dipanaskan pada 1.700 °C selama 30 menit. Bahan bakar yang akan dilapisi adalah pelet UO₂. Dalam penelitian ini diamati mikrostruktur 3 (tiga) buah pelet yaitu UO₂ + dopan 0,7% Cr₂O₃, UO₂ + dopan 0,7% Nb₂O₅ dan UO₂ + dopan 0,3% TiO₂ yang telah disintering.

3. Hasil dan Pembahasan

Karakter ZrB₂

Karakterisasi serbuk ZrB₂ dilakukan untuk mengetahui karakter ZrB₂ sebagai bahan pelapis permukaan pelet UO₂. Tabel 1 menunjukkan struktur kristal dan densitas ZrB₂.

Struktur kristal ZrB₂ adalah heksagonal dengan parameter kisi : a = 3,17 Å; b = 3,17 Å, c = 3,533 Å. Sementara itu, densitas ZrB₂ teoritis adalah 6,1 g/cm³ sedangkan densitas terukur adalah 5,9583 g/cm³ atau 97,68% TD^[6]. Hal ini berarti serbuk ZrB₂ yang digunakan dalam penelitian sangat padat dengan porositas sekitar 1,32%. Oleh karena porositasnya sangat rendah maka ZrB₂ sangat sulit berinteraksi secara kimiawi dengan lingkungan pada saat proses *sputtering* sehingga lapisan yang terbentuk pada permukaan pelet UO₂ mengandung Zr dan B saja.^[7]

Tabel 1. Struktur kristal dan densitas ZrB₂

No	ZrB ₂	
1	Struktur kristal	Heksagonal a = 3,17 ⁰ Å; b = 3,17 ⁰ Å, c = 3,533 Å
2	Densitas (g/cm ³)	5,958

Komposisi kimia serbuk ZrB₂ yang ditunjukkan pada Tabel 2, diketahui bahwa kandungan unsur utama dalam ZrB₂ adalah Zr sebesar 74, 2048 % dan Boron 23,2183 %

berat. Serbuk ZrB₂ mengandung beberapa unsur seperti V, Al, Fe, Mo, Cr, dan Zn. Unsur-unsur tersebut ditambahkan dengan tujuan untuk meningkatkan ketahanan oksidasi dan kejut termal (*thermal shock*) ZrB₂ pada temperatur tinggi.^[8,9]

Tabel 2. Komposisi kimia dan tampang lintang serapan neutron termal (σ_a), unsur dalam serbuk ZrB₂.

No	Unsur	Kandungan	(σ _a), barn
1	Zr	74,2048 (%)	0,184
2	Cr	24,352 (ppm)	2,900
3	Fe	53,728 (ppm)	2,530
4	Ni	0,4180 (ppm)	37,200
5	Si	ttd	171,000
6	Mn	1,700 (ppm)	13,300
7	Al	187,820 (ppm)	0,233
8	Ca	17,085 (ppm)	0,430
9	Cd	ttd	2,450
10	Co	12,320 (ppm)	37,200
11	Cu	12,0036 (ppm)	3,780
12	Mg	ttd	0,063
13	Mo	27,5074 (ppm)	2,500
14	Sn	5,0005 (ppm)	0,600
15	Zn	21,3221 (ppm)	1,100
16	V	1077,031 (ppm)	5,060
17	Pb	1,0001 (ppm)	0,171
18	B	<i>Balance</i>	755,000

ttd : tidak terdeteksi

Kandungan dan tampang lintang serapan neutron termal unsur logam aditif masing-masing adalah : V = 1.077,031 ppm dan 5,06 barn; Al = 187,820 ppm dan 0,233 barn; Fe = 53,728 ppm dan 2,53 barn; Mo = 27,5074 ppm dan 2,5 barn; Cr = 24,352 ppm dan 2,9 barn; Zn = 21,3221 ppm dan 1,1 barn. Selain itu, unsur pengotor yang terkandung dalam ZrB₂ sangat rendah yaitu dalam rentang (0,418 – 12,320 ppm). Kondisi tersebut menunjukkan bahwa keberadaan unsur aditif dan unsur pengotor tidak berpengaruh secara signifikan terhadap penyerapan neutron termal. Dengan demikian, serbuk ZrB₂ memenuhi syarat sebagai bahan pelapis penyerap dapat bakar dari bahan bakar nuklir untuk reaktor daya tipe PWR. Pada Tabel 2 juga terlihat bahwa boron mempunyai kandungan 23,2183 % berat dan tampang lintang serapan neutron termal 755 barn. Hal ini berarti keberadaan boron dalam ZrB₂ sangat berpengaruh dalam ekonomi neutron termal. Di sisi lain keberadaan lapisan ZrB₂ dibutuhkan untuk meningkatkan ketangguhan mekanik dan ketahanan korosi bahan bakar nuklir. Oleh karena itu ketebalan lapisan ZrB₂ pada permukaan pelet UO₂ dibatasi yaitu maksimum 5 μm .^[10] Sifat termal serbuk ZrB₂ pada Tabel 3 menunjukkan bahwa entalpi ZrB₂ terjadi reaksi endotermik pada temperatur 266,14 – 305,39 °C dengan

entalpi 6,95 kal/g dan 703,54 – 717,68 °C dengan entalpi 1,25 kal/g. Sementara itu, reaksi eksotermik terjadi pada temperatur antara 539,69 – 561,88 °C dengan entalpi - 2,10 kal/g.

Tabel 3. Entalpi bahan pelapis (ZrB₂)

No	Temperatur Reaksi (°C)	Entalpi (kal/g)	Keterangan
1	266,14 – 305,39	6,95	Reaksi endotermik
2	539,69 – 561,88	2.10	Reaksi eksotermik
3	703,54 – 717,68	1,25	Reaksi endotermik

Kapasitas panas (C_p) serbuk ZrB₂ pada Tabel 4 diketahui bahwa C_p ZrB₂ terendah adalah 0,24 J/g.K pada temperatur 54,71 °C dan C_p ZrB₂ tertinggi 0,54 J/g.K pada 34 °C. Kapasitas panas ZrB₂ adalah antara 0,28 – 0,43 J/g.K pada rentang temperatur antara 75,05 – 437,18 °C). Sifat termal dari ZrB₂ dinyatakan oleh konduktivitas termalnya. Konduktivitas termal ZrB₂ pada temperatur tertentu sebanding dengan densitas, kapasitas panas dan difusivitas termal sesuai dengan persamaan : $\lambda (T) = \alpha (T) \cdot \rho (T) \cdot C_p (T)$ dengan α : difusivitas termal ZrB₂ ($\text{m}^2/\text{s.K}$), ρ : densitas ZrB₂ (kg/m^3) dan C_p : kapasitas panas ZrB₂ ($\text{W}/\text{m.K}$). Ketiga parameter tersebut merupakan fungsi dari temperatur yaitu :

Tabel 4. Kapasitas panas bahan pelapis (ZrB2)

No	Temperatur (° C)	Cp (J/g.K)
1	34	0.54
2	54.71	0.24
3	75.05	0.28
4	95.31	0.31
5	115.51	0.35
6	135.61	0.39
7	155.8	0.42
8	175.97	0.42
9	196.11	0.42
10	216.21	0.41
11	236.28	0.41
12	256.43	0.41
13	276.6	0.41
14	296.67	0.42
15	316.68	0.43
16	336.8	0.43
17	356.93	0.42
18	377.02	0.39
19	397.07	0.36
20	417.19	0.33
21	437.18	0.30

$$Cp = 66.96 + 5.67.10^{-3}T + 1.43.10^{-6}T^2 - 0.15.10^{-9}T^3 - 1.84.10^6T^2 \quad (1)$$

$$(T) = 4.654676.10^{-10}T + 6.844813.10^{-6} \quad (2)$$

$$(T) = 2.6693.10^{-8}T^3 - 6.0102.10^{-5}T^2 + 3.0995.10^{-2}T + 3.6168.10^{+1} \quad (3)$$

Dari persamaan (1), (2) dan (3) terlihat bahwa kapasitas panas, difusivitas termal relatif stabil pada berbagai temperatur sehingga konduktivitas termal ZrB2 relatif stabil pada temperatur tinggi.^[11,12] Dengan demikian stabilitas termal ZrB2 dikatakan baik. Hal ini berarti ZrB2 mampu menerima beban termal sebagai dampak reaksi fisi yang terjadi di dalam bahan bakar UO₂ selama PWR beroperasi normal dan terantisipasi.

Target ZrB2

Dari 5 (lima) variasi bahan target yang telah dibuat diketahui bahwa target ZrB2+0,8% zinc-stearat (Gambar 2) yang terbaik karena kompakannya padat dan tidak retak. Hal ini menjadi salah satu persyaratan karena proses sputtering membutuhkan energi tinggi untuk memaksa atom-atom keluar dari material target yang selanjutnya terdeposit melalui uap kimia (plasma) pada permukaan substrat (pelet UO₂). Oleh karena target merupakan bahan keramik dan bersifat penghantar listrik yang kurang baik, maka target direkatkan pada permukaan lempeng tembaga yang telah diolesi lem konduktif (*silver paint*). Hal ini bertujuan agar target bersifat konduktor sehingga proses sputtering dapat berlangsung dengan baik.

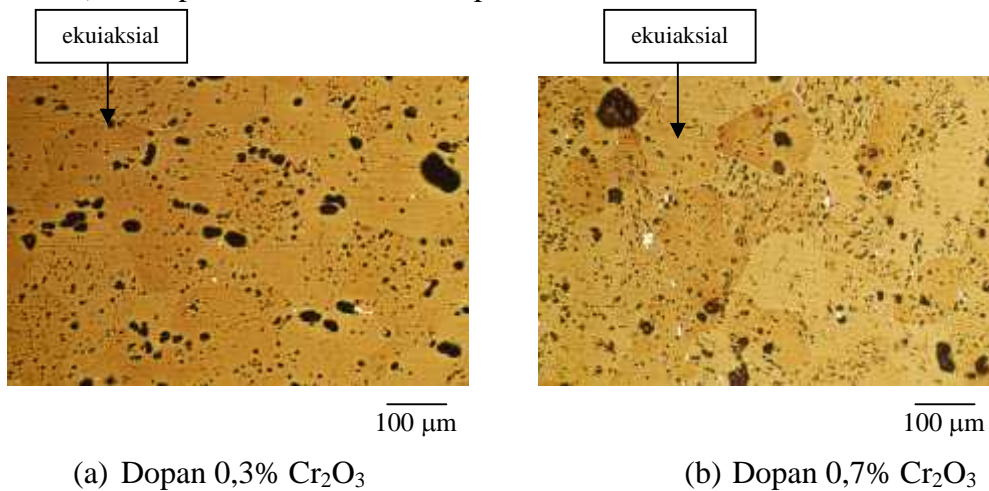
Gambar 2. Target ZrB₂+0,8% zinc-stearat

Mikrostruktur Pelet UO₂ Sinter

Pelet UO₂ sinter yang akan dilapisi ZrB₂ ada 3 (tiga) macam yaitu pelet UO₂ + dopan Cr₂O₃, pelet UO₂ + dopan Nb₂O₅, dan pelet UO₂ + dopan TiO₂ yang menggunakan bahan uranium alam. Penambahan dopan dimaksudkan untuk memperoleh mikrostruktur UO₂ dengan butir besar, yang dibutuhkan untuk meminimalkan pelepasan gas hasil fisi ke dalam ruang batang bahan bakar.^[6,13]

Pada Gambar 3 terlihat bahwa mikrostruktur pelet UO₂ + 0,3% dopan Cr₂O₃ (Gambar 3 a) dan pelet UO₂ + 0,7% dopan

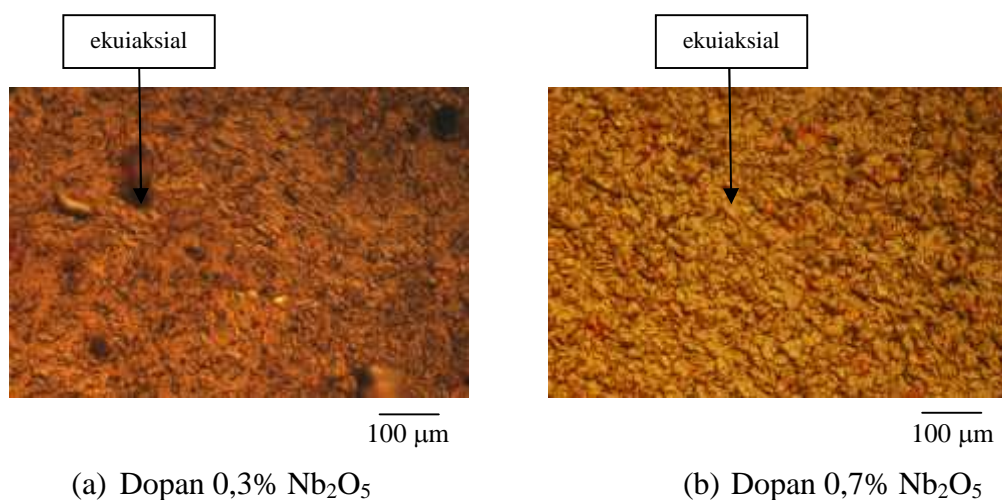
Cr₂O₃ (Gambar 3 b) pasca sinter mempunyai bentuk butir yang sama yaitu butir ekuiaksial. Gambar 3 tersebut juga memperlihatkan bahwa mikrostruktur pelet UO₂ +0,7% dopan Cr₂O₃ sinter mempunyai ukuran butir relatif lebih besar dibandingkan pelet UO₂ + 0,3% dopan Cr₂O₃ sinter. Hal ini berarti bahwa semakin besar Cr₂O₃ yang ditambahkan maka semakin besar ukuran butirnya.



Gambar 3. Mikrostruktur pelet UO₂ + dopan Cr₂O₃ sinter.

Apabila dopan Cr_2O_3 yang ditambahkan semakin besar, maka ukuran butir ekuiaksial bertambah besar pula sehingga kebolehdijadian terjadinya pengurangan pelepasan gas hasil fisi pelet UO_2 bertambah besar. Hal ini berdampak pada bergesernya distribusi ukuran pori sehingga probabilitas terperangkapnya

pori bertambah besar^[6]. Mikrostruktur pelet $\text{UO}_2 + 0,3\%$ dopan Nb_2O_5 sinter (Gambar 4 a) dan pelet $\text{UO}_2 + 0,7\%$ dopan Nb_2O_5 sinter (Gambar 4 b) memperlihatkan kecenderungan bentuk butir serupa yaitu butir ekuiaksial.



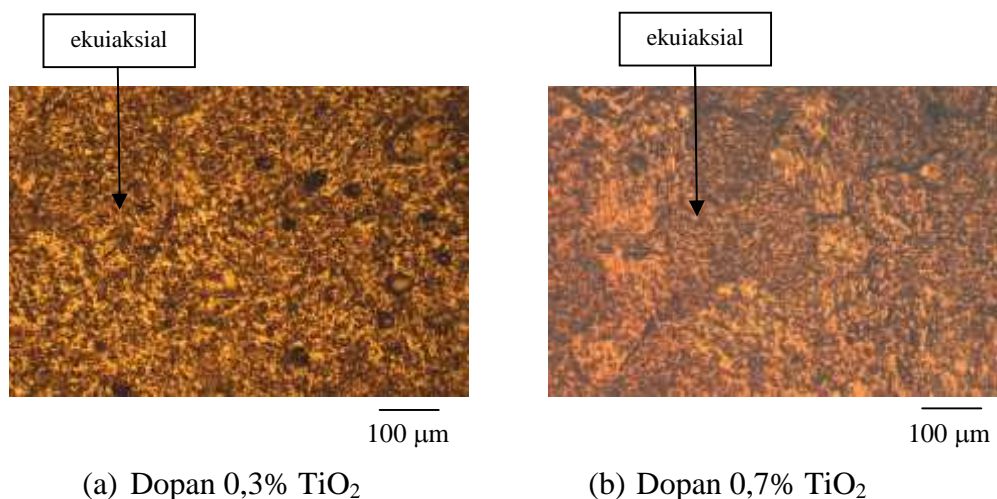
Gambar 4. Mikrostruktur pelet $\text{UO}_2 + \text{dopan Nb}_2\text{O}_5$ sinter.

Pada Gambar 4 terlihat bahwa ukuran butir dalam mikrostruktur pelet $\text{UO}_2 + 0,3\%$ dopan Nb_2O_5 sinter relatif lebih besar dibandingkan mikrostruktur pelet $\text{UO}_2 + 0,7\%$ dopan Nb_2O_5 sinter. Hal ini berarti semakin besar persentase berat dopan Nb_2O_5 yang ditambahkan maka semakin kecil ukuran butir UO_2 . Dengan demikian diketahui bahwa untuk memperoleh mikrostruktur UO_2 dengan butir besar maka Nb_2O_5 yang ditambahkan harus lebih rendah dari 0,7% berat. Gambar 5 menunjukkan mikrostruktur pelet $\text{UO}_2 + 0,3\%$ TiO_2 sinter

(Gambar 5 a) dan pelet $\text{UO}_2 + 0,7\%$ TiO_2 sinter (Gambar 5 b). Mikrostruktur pelet $\text{UO}_2 + 0,3\%$ TiO_2 sinter dan pelet $\text{UO}_2 + 0,7\%$ TiO_2 sinter mempunyai kecenderungan serupa yaitu butirnya berbentuk ekuiaksial baik dalam arah longitudinal maupun transversal. Pada Gambar 5 tersebut juga terlihat bahwa ukuran butir ekuiaksial dalam mikrostruktur pelet $\text{UO}_2 + 0,3\%$ TiO_2 sinter lebih kecil dibandingkan mikrostruktur pelet $\text{UO}_2 + 0,7\%$ TiO_2 sinter.

Ditinjau dari sisi proses pelapisan melalui plasma maka uap kimia ZrB₂ akan lebih mudah memasuki pelet UO₂ + 0,7% dopan Cr₂O₃ sinter atau pelet UO₂ + 0,3% dopan Nb₂O₅ sinter atau pelet UO₂ + 0,7% TiO₂ sinter yang berbutir lebih besar dan terdeposit menjadi lapisan IFBA. Lapisan akan kuat dan kompak pada permukaan pelet UO₂ + 0,7% dopan Cr₂O₃ atau pelet UO₂ + 0,3% dopan

Nb₂O₅ sinter atau pelet UO₂ + 0,7% TiO₂ sinter, namun permasalahannya adalah semakin banyak ZrB₂ terdifusi maka semakin banyak unsur boron yang berfungsi sebagai penyerap neutron termal. Padahal neutron termal ini yang dibutuhkan untuk berlangsungnya reaksi fisi di teras reaktor PWR.



Gambar 5. Mikrostruktur pelet UO₂ + dopan TiO₂ sinter.

Apabila terjadi hal demikian maka sangat merugikan secara ekonomi neutron dan ini tidak diinginkan. Di lain pihak apabila butir dalam pelet UO₂+dopan sinter kecil maka proses pelapisannya relatif sulit dan membutuhkan tekanan lebih tinggi. Dengan demikian hasil proses pelapisan pada pelet UO₂+dopan sinter adalah lapisan tipis IFBA yang kompak dan kuat di permukaan pelet. Oleh karena lapisan IFBA tipis maka kandungan Boron dalam lapisan rendah sehingga kebolehdadian menyerap neutron

termal rendah dan hal ini tidak merugikan secara ekonomi neutron bahan bakar nuklir dalam teras reaktor tipe PWR.

Berdasarkan bahasan tersebut di atas maka pelet UO₂+dopan Cr₂O₃ sinter; pelet UO₂+dopan Nb₂O₅ sinter; pelet UO₂+dopan TiO₂ sinter berbutir kecil yang memenuhi kriteria IFBA. Dengan demikian pelet yang akan dilapisi ZrB₂ menggunakan mesin RF Sputtering adalah pelet UO₂+dopan 0,3% Cr₂O₃ sinter; pelet UO₂+dopan 0,7% Nb₂O₃ sinter; pelet UO₂+dopan 0,3% TiO₂ sinter.

4. Kesimpulan

Zirconium diborida sebagai bahan pelapis penyerap dapat bakar mempunyai karakter yaitu struktur kristal heksagonal, densitas : $5,9583 \text{ g/cm}^3$, entalpi : $6,95 \text{ kal/g}$ ($T = 266,14\text{-}305,39 \text{ }^\circ\text{C}$); $2,10 \text{ kal/g}$ ($T = 539,69 - 561,88 \text{ }^\circ\text{C}$), dan $1,25 \text{ kal/g}$ ($T = 703,54\text{-}717,68 \text{ }^\circ\text{C}$), stabilitas termal baik. Komposisi kimia serbuk ZrB₂ adalah Zr sebesar 74,2048 % dan B = 23,2183 % berat dengan unsur aditif yaitu V (1.0077,031 ppm); Al (187,820 ppm); Fe (53,728 ppm); Mo (27,5074 ppm); Cr (24,352 ppm); Zn (21,3221 ppm).

Pelet UO₂+dopan 0,3% Cr₂O₃ sinter; pelet UO₂+dopan 0,7% Nb₂O₅ sinter; pelet UO₂+dopan 0,3% TiO₂ sinter yang berukuran kecil memenuhi kriteria IFBA untuk dilapisi ZrB₂ menggunakan mesin RF Sputtering.

5. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Edi Indarto, A.Md, Ade Mahpudin, Isfandi, A.Md, Asminar, Ngatijo, A.Md. dan Sutri Indaryati, A.Md yang telah membantu pelaksanaan karakterisasi ZrB₂ dan pengamatan mikrostruktur pelet UO₂.

6. Daftar Pustaka

1. P. R. Rudling, et al. (2008). High Burnup Fuel Issues, *J. Nucl. Eng. and Tech.*, 40 (1), 1-8.
2. H. H. Durmazucar and G. Gunduz (2000). Boron Coating on Boron Nitride Coated Nuclear Fuels by Chemical Vapor Deposition, *J. of Nucl. Mater.* 282, 239-244.
3. K. C. Radford (1988). Coating a Nuclear Fuel with a Burnable Poison, US Patent EP 0137675 B1.
4. L. Tengdelius (2013). Growth and Characterization of ZrB₂ Thin Films, Thesis No. 1614, Linkoping University, Sweden.
5. C. Sironen (2014). Neutronic Characteristics of Using Zirconium Diboride and Gadolinium in a Westinghouse 17x17 Fuel Assembly, Dissertation No. 1509920,, University of South Carolina.
6. Futichah, T. Yulianto (2013). Pembesaran Ukuran Butir UO₂ Dengan Penambahan Dopan Untuk Mengurangi Pelepasan Gas Fisi, *J. Teknologi Bahan Nuklir*, 9 (1), 1-11.
7. R. Jovani-Abril (2014). Synthesis and Characterization of Nanocrystalline UO₂ Ceramics, Dissertation, Universidad de Santiago de Compostela, Spain, 171-179.

8. P. Liu, P. Zhang, X. Pang, Q. Wang, T. Liu (2012). A Study on Fabrication Technique of ZrB₂ Target, *Procedia Engineering*, 27, 1305-1312.
9. M. J. Thompson, W. G. Fahrenholz and G.E. Hilmas (2012). Elevated Temperature Thermal Properties of ZrB₂ with Carbon Additions, *J. of the American Ceramic Soc.*, 1077-1085.
10. M. J. Thompson (2012). Densifications and Thermal Properties of Zirconium Diboride Based Ceramics, Dissertation, Missouri University of Science and Technology, 20-31.
11. G. J. K. Harrington (2012). Effect of Solid Solution and Second Phase on The Thermal Conductivity of Zirconium Diboride Ceramics, Dissertation, Missouri University of Science and Technology, 34-45.
12. J M. Lonergan, W. G. Fahrenholz and G. E. Hilmas (2014). Zirconium Diboride with High Thermal Conductivity, *J. of the American Ceramic Society*, 1689-1691.
13. V. Peres, L. Favergeon, M. Andrieu, J. C. Palussiere, J. Baland, C. Delafoy, M. Pijolat (2012). High Temperature Chromium Volatilization from Cr₂O₃ Powder and Cr₂O₃-Doped UO₂ Pellets in Reducing Atmospheres, *J. of Nuclear Materials*, 423, 93-101.