

# Urania

## Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir

Beranda jurnal: <http://jurnal.batan.go.id/index.php/urania/>



### PENGARUH TEMPERATUR DAN KOMPOSISI Nb TERHADAP INTERDIFUSI PADUAN U-Zr-Nb

Maman Kartaman Ajiriyanto<sup>1</sup>, Masrukan<sup>1</sup>, Fajar Al Afghani<sup>1</sup>, Yanlinastuti<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Pusat Riset dan Teknologi Bahan Bakar Nuklir – BRIN

Kawasan PUSPIPTEK Serpong Gd. 20, Tangerang Selatan, Banten 15314

e-mail: makar@batan.go.id

(Naskah diterima: 26–09–2021, Naskah direvisi: 10–10–2021, Naskah disetujui: 18–10–2021)

#### ABSTRAK

**PENGARUH TEMPERATUR DAN KOMPOSISI Nb TERHADAP INTERDIFUSI PADUAN U-Zr-Nb.** Telah dilakukan simulasi percobaan intermik bahan bakar U-Zr-Nb dengan pelat aluminium. Mula-mula dibuat ingot paduan U-6Zr-2Nb, U-6Zr-5Nb, dan U-6Zr-8Nb menggunakan tungku peleburan busur listrik. Ingot yang diperoleh dipotong-potong menjadi berukuran ketebalan 2-3 mm dan diameter sekitar 5-6 mm selanjutnya ditutup menggunakan pelat Al pada salah satu sisinya serta dipress. Setelah dipress, ingot paduan U-6Zr-2Nb, U-6Zr-5Nb, dan U-6Zr-8Nb dipanaskan pada temperature 350 dan 450 °C selama 1 jam. Setelah dipanaskan ingot dikenai beberapa pengujian yaitu mikrostruktur menggunakan mikroskop optik dan *Scanning Electron Microscope* (SEM) yang dilengkapi dengan *Energy Dispersive Spectrometer* (EDS), kekerasan menggunakan uji kekerasan mikro, dan fasa dengan alat *X-ray diffractometer* (XRD). Hasil pemeriksaan mikrostruktur menunjukkan masih terlihat dengan jelas batas antara lapisan (*interface*) U-6Zr-2Nb, U-6Zr-5Nb, dan U-6Zr-8Nb dengan lapisan Al. Semakin tinggi kandungan Nb semakin rapat *interface* antara kedua lapisan. Pada pengujian kekerasan mikro terlihat bahwa kekerasan pada *interface* sulit diukur sedangkan pada daerah U-Zr-Nb menunjukkan kenaikan kekerasan pada pemanasan dari 350 menjadi 450 °C, sedangkan pada bagian Al terjadi penurunan kekerasan pada kenaikan temperatur pemanasan dari 350 menjadi 450 °C. Terbentuk senyawa  $UO_3$  pada semua sampel uji sedangkan fasa  $\gamma$ -U terbentuk pada sampel U-6Zr-2Nb baik yang dipanaskan pada temperatur 350 maupun 450 °C.

**Kata kunci:** Intermik, paduan U-Zr-Nb, aluminium, mikrostruktur, kekerasan, fasa.

## **ABSTRACT**

### **EFFECT OF TEMPERATURE AND Nb COMPOSITION ON U-Zr-Nb ALLOY INTERDIFFUSION.**

*A simulation of U-Zr-Nb intermixed fuel has been carried out with aluminum plates. Initially, U-6Zr-2Nb, U-6Zr-5Nb, and U-6Zr-8Nb alloy ingots were made using an electric arc melting furnace. The ingot obtained was cut into pieces with a thickness of 2-3 mm and a diameter of about 5-6 mm, then it was covered Al plate on one side and pressed. After pressing, the alloy ingots of U-6Zr-2Nb, U-6Zr-5Nb, and U-6Zr-8Nb were heated at temperatures of 350 and 450 °C for 1 hour. The ingot was subjected to several tests, namely microstructure examination using optical microscope and Scanning Electron Microscope (SEM) equipped with Energy Dispersive Spectrometer (EDS), hardness test using microhardness tester, and phase observation using X-ray diffractometer (XRD). The results of microstructure examination show that the boundaries between the U-6Zr-2Nb, U-6Zr-5Nb, and U-6Zr-8Nb layers (interfaces) and the Al layer were clearly visible. The higher of the Nb content, the denser the interface between the two layers. For the microhardness test, we found that the hardness at the interface was difficult to measure, while the U-Zr-Nb region shows an increase in hardness for heating from 350 to 450 °C, while in the Al section there is a decrease in hardness when the heating temperature increases from 350 to 450 °C. UO<sub>3</sub> compounds were formed in all test samples while the  $\gamma$ -U phase was formed in U-6Zr-2Nb samples both heated at temperatures of 350 and 450 °C.*

**Keywords:** *Intermic, U-Zr-Nb alloy, aluminum, microstructure, hardness, phase.*

## PENDAHULUAN

Pengembangan bahan bakar reaktor riset di dunia sedang dikembangkan untuk mengganti bahan bakar yang sudah ada dengan tujuan untuk mendapatkan bahan bakar yang mempunyai densitas tinggi. Pada saat ini reaktor riset RSG Siwabessy yang berada di Serpong, Tangerang Selatan berfungsi untuk menghasilkan produk radiofarmasi dan pengujian material. Reaktor Siwabessy tersebut menggunakan bahan bakar paduan uranium silisida ( $U_3Si_2/Al$ ) dengan kelongsong yang terbuat dari paduan aluminium magnesium ( $Al-Mg_2$ ), tetapi paduan uranium silisida tersebut mempunyai kelemahan dalam mendaur ulang logam Si[1]. Oleh karena itu perlu dicari bahan bakar alternatif sebagai pengganti bahan bakar uranium silisida tersebut. Mengingat hal tersebut, para peneliti berupaya untuk mencari paduan uranium dengan logam lain yang memiliki densitas uranium tinggi, sehingga umur ekonomi bahan bakar di dalam teras reaktor dan siklus penggunaan bahan bakar menjadi lebih lama[2]. Salah satu paduan uranium yang dikembangkan di PTBBN selain paduan berbasis U-Mo yaitu paduan U-Zr. Pengembangan bahan bakar berbasis U-Zr ini didasarkan pertimbangan antara lain : densitas tinggi, serapan neutron rendah, mudah difabrikasi, mudah dilakukan olah ulang[3,4].

Penelitian pengembangan pembuatan bahan bakar berbasis U-Zr telah banyak dilakukan diantaranya oleh Balart dkk[5] yang telah membuat bahan bakar paduan U-4Zr-2Nb dengan densitas 3,17 g U/cm<sup>3</sup>. Berdasarkan hasil uji iradiasi di reaktor, sifat neutronik, dan fabrikasi diperoleh bahwa bahan bakar paduan U-4Zr-2Nb cukup baik sebagai bahan bakar bila densitas paduan mencapai 8,0 gU/cm<sup>3</sup>[5]. Paduan berbasis uranium-zirkonium terutama uranium-zirkonium-niobium menunjukkan banyak keunggulan dan oleh karena itu dapat dianggap sebagai kandidat bahan bakar untuk reaktor cepat berbahan bakar logam. Dilaporkan bahwa paduan U-Nb-Zr menunjukkan resistensi pembengkakan yang jauh lebih unggul daripada U-Nb biner dan paduan U-Zr[6]. Untuk bahan bakar logam, Zr dipilih sebagai elemen paduan karena meningkatkan temperatur solidus dan membantu mengatasi interaksi kimia bahan bakar. Paduan uranium dengan Zr memiliki stabilitas dimensi yang sangat baik selama siklus termal dan membantu menstabilkan fase gamma isotropik pada rentang temperatur yang lebih luas. Paduan terner

U-Zr-Nb dianggap sebagai bahan bakar nuklir yang menarik untuk reaktor penelitian, reaktor fluks tinggi canggih dan reaktor cepat karena banyak sifat yang menguntungkan, seperti konduktivitas termal dan densitas yang lebih tinggi, kemudahan fabrikasi dan kompatibilitas yang baik dengan kelongsong bahan bakar[7]. Logam uranium murni memiliki tiga bentuk alotropik: a-, b- dan fase-g. Fasa-a memiliki struktur ortorombik pusat-dasar dan stabil hingga 941 K; fase-b yang memiliki struktur kristal tetragonal stabil pada daerah dari 941 K hingga 1049 K dan fase-g dengan struktur kubus berpusat badan simetris stabil dari 1049 K hingga titik leleh. Paduan uranium "g-stabilisasi" yang memiliki simetri kubik isotropik selalu menjadi kandidat bahan bakar yang menarik karena menunjukkan perilaku iradiasi yang baik[7]. Secara umum, sistem paduan yang dipertimbangkan harus memiliki tingkat kelarutan yang tinggi dalam fase gamma isotropik, kemampuan untuk menstabilkan fase gamma pada rentang temperatur yang lebih besar daripada logam-U saja, dan penampang tangkapan rendah untuk neutron [8].

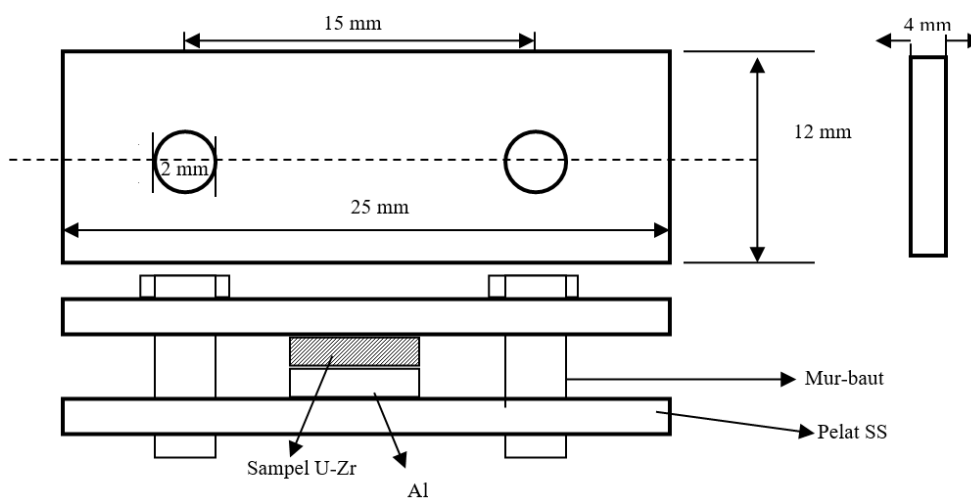
Percobaan pembuatan PEB di PTBBN dengan kandungan Zr sebesar 6% (U-6Zr) dan tingkat muat uranium sebesar 5,2 g/cm<sup>3</sup> dan dikenai pengujian meliputi pengujian tidak merusak maupun merusak telah dilakukan[9]. Pengembangan PEB selanjutnya dilakukan dengan menambahkan unsur Nb ke dalam paduan U-Zr dengan tujuan untuk memperbaiki sifat paduan U-Zr pada temperatur tinggi karena unsur Nb akan memperluas daerah fasa gamma. Dalam kondisi fasa gamma membuat bahan bakar menjadi lebih stabil. Masrukan, dkk telah mencoba melakukan fabrikasi penelitian bahan bakar U-6Zr-5Nb dengan tingkat muat U sebesar 5,2; 6,0; dan 7,0 gU/cm<sup>3</sup> dengan kelongsong AlMg<sub>2</sub>. Hasil percobaan menunjukkan bahwa untuk tingkat muat U sebesar 7,0 mempunyai ketebalan kelongsong kurang dari yang disyaratkan sedangkan untuk tingkat muat U sebesar 5,2 dan 6,0 g/Ucm<sup>3</sup> telah memenuhi persyaratan[10]. Dalam fabrikasi menjadi PEB maupun pemakaian di reaktor, bahan akan berinteraksi dengan kelongsong dalam kondisi panas. Hal ini akan mempengaruhi unjuk kerja bahan bakar pada saat digunakan didalam reaktor. Bahan bakar diusahakan agar tidak berinteraksi dengan bahan kelongsong yang terbuat dari paduan Al sehingga membentuk senyawa atau fasa baru karena terbentuknya fasa baru akan mempengaruhi unjuk kerja bahan bakar yang

digunakan[11]. Untuk mengetahui keadaan yang dapat terjadi akibat interaksi antara bahan bakar dengan kelongsong maka dalam penelitian ini dilakukan simulasi dengan cara memanaskan bahan bakar U-Zr-Nb yang dibungkus dengan pelat Al dan dikenai pemanasan. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan gambaran yang terjadi pada interface antara bahan bakar U-Zr-Nb dengan kelongsong akibat pemanasan pada proses fabrikasi bahan bakar. Bahan bakar dan pelat Al yang telah dipanaskan selanjutnya dikenai beberapa pengujian diantaranya pemeriksaan mikrostruktur, sifat mekanik, dan fasa yang terbentuk. Maman K, dkk telah melakukan percobaan yang sejenis tetapi menggunakan bahan yang berbeda yakni bahan bakar U-7Mo/Al dengan mengamati pengaruh temperatur pada interdifusi antara lapisan Al dengan bahan bakar U-7Mo/Al yang dipanasi pada temperatur 500 dan 550 °C selama 24 jam[12]. Pada percobaan interdifusi antara bahan bakar U-Zr-Nb dengan Al ini dilakukan pada temperatur 350 dan 450 °C, dimana hal ini dilakukan agar pemanasan pada sampel uji jauh dari titik lebur aluminium yang hanya sekitar 660 °C tetapi masih diatas temperatur rekristalisasi Al. Dari penelitian ini diharapkan dapat diperoleh data yang dapat digunakan untuk pengembangan penggunaan paduan U-Zr-Nb sebagai kandidat bahan bakar mendatang.

### METODOLOGI

Pembuatan paduan U-6Zr-2Nb, U-6Zr-5Nb, dan U-6Zr-8Nb dengan cara melebur logam U deplesi, Zr sponge dan logam Nb di dalam tungku peleburan busur listrik menggunakan arus listrik 150 A dan dilengkapi dengan sistem pendingin air.

Paduan U-6Zr-2Nb, U-6Zr-5Nb, dan U-6Zr-8Nb dipotong-potong dengan dimensi ketebalan 2-3 mm dan diameter sekitar 5-6 mm serta dirangkai untuk percobaan intermik terhadap kelongsong Al seperti pada Gambar 1. Setelah sampel dirakit selanjutnya dilakukan pemanasan di dalam tungku pemanas dengan temperatur pemanasan bervariasi yakni 350 dan 450 °C selama 1 jam. Sampel paduan U-6Zr-2Nb, U-6Zr-5Nb, dan U-6Zr-8Nb yang telah dipanasi dikarakterisasi untuk mengetahui mikrostruktur, sifat mekanik (kekerasan) dan fasa yang terbentuk. Pemeriksaan mikrostruktur menggunakan mikroskop optik dan *Scanning Electron Microscope* (SEM) yang dilengkapi dengan *Energy Dispersive Spectrometer* (EDS), kekerasan menggunakan uji kekerasan mikro sedangkan fasa dengan menggunakan teknik difraksi sinar X (XRD). Untuk dapat dikenai pemeriksaan mikrostruktur dan kekerasan, sampel paduan U-6Zr-2Nb, U-6Zr-5Nb, dan U-6Zr-8Nb *dimounting* dan dihaluskan menggunakan mesin gerindra dari *grit* 240 hingga 1000 serta dipolish dengan pasta alumina ukuran 1 µm. Setelah permukaan halus, selanjutnya diuji menggunakan campuran larutan HNO<sub>3</sub> dan HF sehingga siap dikenai pengujian-pengujian yang sesuai. Pemeriksaan mikrostruktur dilakukan menggunakan mikroskop optik dengan perbesaran 200 kali, pemeriksaan dengan SEM pada perbesaran 5000 kali, sedangkan pengujian fasa menggunakan XRD dari sudut 2θ dari 30 hingga 80°. Hasil pengujian menggunakan peralatan XRD diolah dengan *software HighScore Plus*.



Gambar 1. Skema percobaan intermik pemanasan U-Zr-Nb.

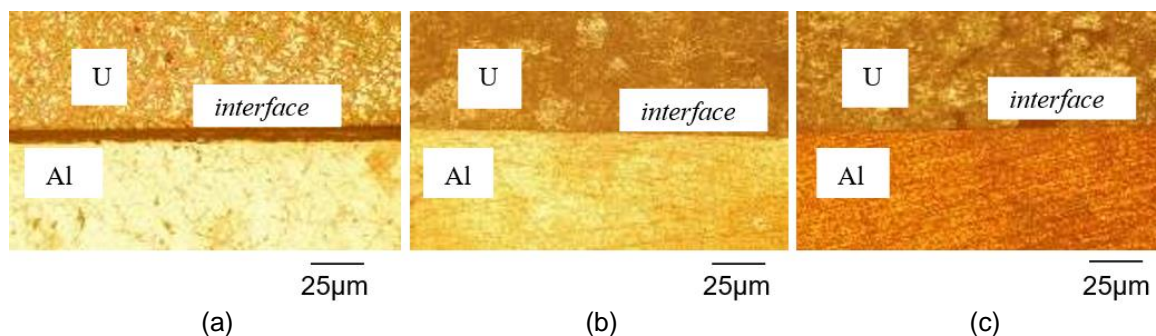
**HASIL DAN PEMBAHASAN**

Hasil pemeriksaan mikrostruktur yang terbentuk ditampilkan pada Gambar 2.a, b dan c serta Gambar 3.a, b, dan c. Hasil pengujian kekerasan ditampilkan pada Gambar 6 a dan b, Tabel 1 dan 2 pada Lampiran, sedangkan hasil pengujian XRD ditampilkan pada Gambar 7.a, b, dan c serta Gambar 8.a, b, dan c.

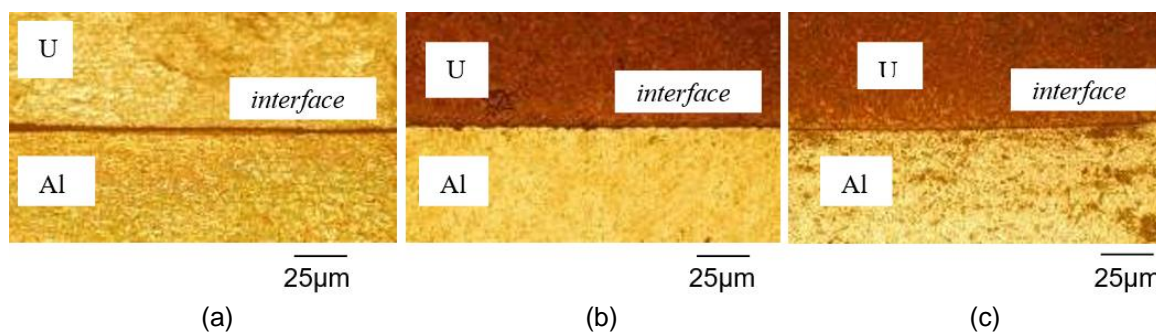
**a. Mikrostruktur**

Gambar 2.a, b dan c untuk sampel U-6Zr-2Nb, U-6Zr-5Nb, dan U-6Zr-8Nb yang dipanaskan pada temperatur 350 °C terlihat bahwa *interface* antara logam U-Zr-Nb dan Al semakin rapat bila kandungan Nb semakin tinggi sedangkan mikrostruktur pada bagian logam U-Zr-Nb maupun Al tidak terlihat jelas karena sulitnya mengetsa dua logam yang berbeda. Demikian pula pada Gambar 3.a, b, dan c untuk sampel uji U-6Zr-2Nb, U-6Zr-5Nb, dan U-6Zr-8Nb yang dipanaskan pada temperatur 450 °C terlihat bahwa *interface* yang terjadi antara lapisan U-Zr-Nb dan Al semakin rapat bila kandungan Nb

semakin tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa pada kandungan unsur Nb yang semakin tinggi pada saat dipanaskan maka semakin besar dorongan logam Nb ke arah *interface* sehingga *interface* yang terbentuk semakin rapat. Namun, *interface* yang terbentuk masih memperlihatkan dengan jelas jarak antara lapisan U-Zr-Nb. Hal ini menunjukkan bahwa kedua bagian lapisan atau tekanan press antara bahan bakar U-Zr-Nb dan pelat Al kurang tinggi atau waktu kontak dalam keadaan panas kurang lama sehingga membuat kedua lapisan belum menyatu. Apabila dilihat dari temperatur pemanasan yang dikenakan, terlihat bahwa jarak antara lapisan U-Zr-Nb dan Al pada masing-masing sampel menunjukkan bahwa pada temperatur yang lebih tinggi yakni 450 °C lebih rapat dibandingkan pada temperatur 350 °C. Keadaan ini disebabkan dengan semakin tinggi temperatur pemanasan maka pergerakan lapisan menjadi semakin jauh dan saling mendekat sehingga terbentuk *interface* yang semakin rapat.



Gambar 2. Mikrostruktur hasil pemanasan sampel pada temperatur 350 °C  
a. U-6Zr-2Nb; b. U-6Zr-5Nb; c. U-6Zr-8Nb



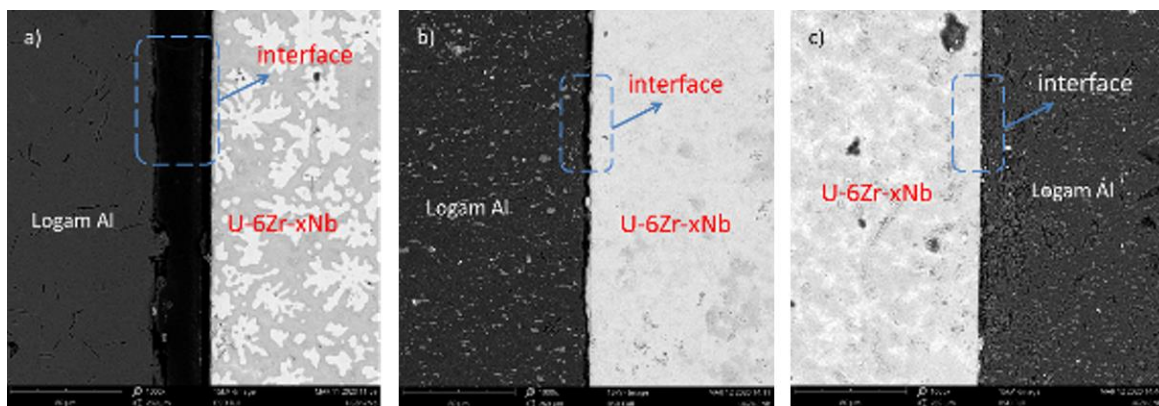
Gambar 3. Mikrostruktur hasil pemanasan sampel pada temperatur 450 °C  
a. U-6Zr-2Nb; b. U-6Zr-5Nb; c. U-6Zr-8Nb

Gambar 4.a sampai 4.c adalah mikrostruktur pada area *interface* antara paduan U-6Zr-2Nb, U-6Zr-5Nb, U-6Zr-6Nb

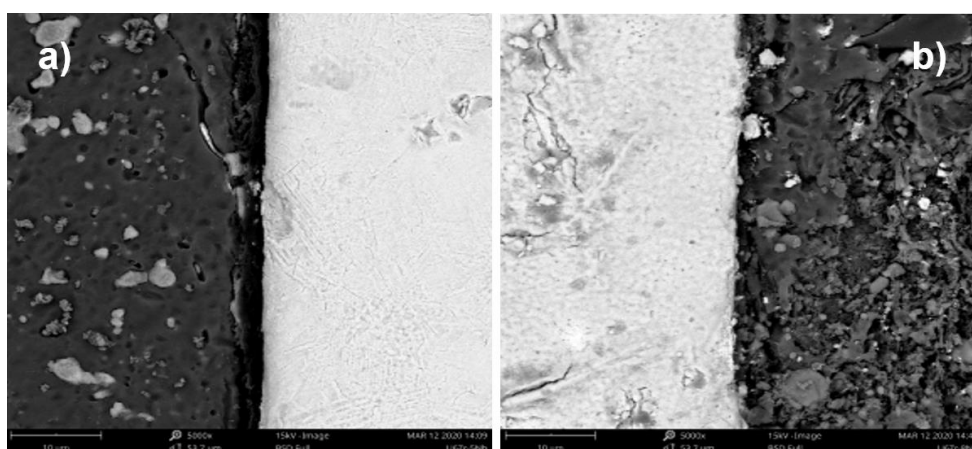
dan logam Al. Pengamatan mikrostruktur menggunakan SEM mode *backscatter image*(BS) dan *secondary electron image*

(SE) pada perbesaran > 5000 kali. Sampel U-6Zr-2Nb dan Al yang dipanaskan pada temperatur 350°C menunjukkan mikrostruktur U-6Zr-2Nb/Al. Perbedaan kontras fasa paduan U-6Zr-2Nb dan Al terlihat secara jelas. Pengamatan menggunakan FE-SEM dengan mode BSD menghasilkan perbedaan warna yang kontras dan jelas antara kedua jenis paduan. Elemen atau unsur dengan nomor atom lebih tinggi akan menghasilkan gambar lebih terang dibanding fasa dengan elemen atau unsur nomor atom rendah. Pada Gambar 5.a terlihat mikrostruktur paduan U lebih terang dibanding logam Al. Pada interface tidak terlihat fasa baru yang dimungkinkan terbentuk akibat reaksi U dan Al pada temperatur pemanasan 350°C. Pada temperatur tinggi, paduan U dan Al akan berreaksi membentuk fasa baru atau senyawa antar muka yaitu UAl<sub>x</sub>. Namun pada kondisi pemanasan temperatur 350°C masih belum terlihat fasa baru akibat reaksi antara U dan

Al. Hal ini dimungkinkan ketika proses penekanan antara U dan Al masih terdapat celah sehingga kontak antara kedua material tidak terjadi secara sempurna. Celah atau gap terlihat jelas pada Gambar 5.a. Area berwarna hitam pada sekitar *interface* merupakan resin yang masuk kedalam celah tersebut. Hasil identifikasi elemen menggunakan EDS pada area berwarna hitam menunjukkan kadar karbon cukup tinggi yaitu sekitar 73 %wt. Faktor lainnya adalah dimungkinkan pada temperatur 350°C kedua material masih sangat stabil sehingga tidak terjadi reaksi pembentukan fasa UAl<sub>x</sub>. Untuk sampel U-6Zr-5Nb dan U-6Zr-8Nb menunjukkan kondisi mikrostruktur relatif sama dengan paduan U-6Zr-2Nb/Al terutama pada bagian interfacenya. Pada interface paduan U-6Zr-5Nb dan U-6Zr-8Nb tidak menunjukkan adanya fasa baru hasil reaksi antara paduan U dan logam Al.



Gambar 4. Mikrostruktur hasil pemanasan sampel pada temperatur 350 °C, perbesaran 6000 kali  
a. U-6Zr-2Nb; b. U-6Zr-5Nb; c. U-6Zr-8Nb

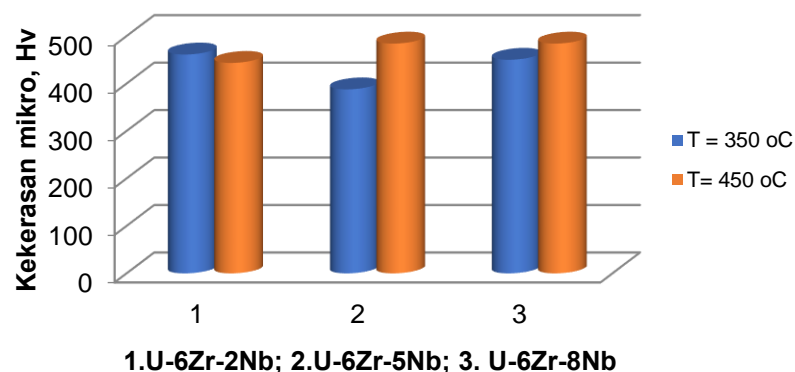


Gambar 5. Mikrostruktur hasil pemanasan sampel pada temperatur 350°C perbesaran 5000 kali  
a. U-6Zr-5Nb, dan b. U-6Zr-8Nb

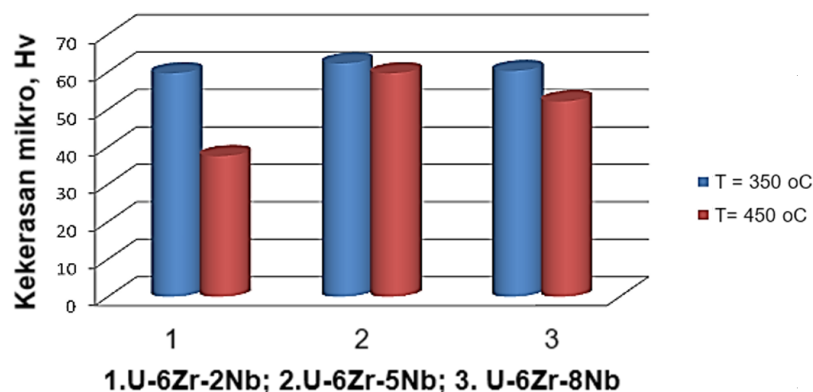
**b. Sifat mekanik (kekerasan)**

Gambar 6 a. dan b, Tabel 1 dan Tabel 2 pada Lampiran yang menampilkan hasil uji kekerasan mikro pada bagian logam U-Zr-Nb dan Al setelah mengalami pemanasan pada temperature 350 dan 450 °C. Pada sampel uji U-6Zr-2Nb, U-6Zr-5Nb, dan U-6Zr-8Nb yang dipanaskan pada temperature 350 °C akan mengalami penurunan kekerasan dari 461,125 menjadi 387,7 HV bila kandungan Nb naik dari 2 menjadi 5% kemudian turun menjadi 450,025 Hv pada kandungan Nb 8%. Untuk bagian logam Al terjadi kenaikan kekerasan dari 59,65 menjadi 62,275 dan turun menjadi 60,275 HV bila kandungan Nb di dalam sampel uji U-6Zr-2Nb, U-6Zr-5Nb, dan U-6Zr-8Nb naik dari 2 menjadi 5 dan 8%. Pada pengujian kekerasan sampel uji U-6Zr-2Nb, U-6Zr-5Nb, dan U-6Zr-8Nb yang dipanaskan pada temperature 450 °C terlihat pada bagian logam U-Zr-Nb mengalami kenaikan kekerasan dari 443,46 menjadi 484,12 HV bila kandungan Nb naik dari 2 menjadi 5 dan 8%. Sementara itu, pada bagian logam Al terjadi kenaikan kekerasan dari 37,55 menjadi 59,66 HV kemudian turun

menjadi 52,18 HV. Hal ini disebabkan pada proses pemanasan selama pengepresan sampel setelah dipanaskan didinginkan dengan cara membiarkan terjadi pendinginan alamiah didalam tungku. Keadaan ini menimbulkan pendinginan antara logam paduan U-Zr-Nb dan logam Al yang berbeda dimana pada logam paduan U-Zr-Nb panas yang terjadi lebih lama tersimpan dan akan lebih lambat mejadi dingin dibandingkan logam Al yang lebih mudah melepaskan panas sehingga lebih cepat menjadi dingin. Oleh karena pada paduan U-Zr-Nb lebih lambat menjadi dingin sehingga terjadi penurunan kekerasan. Penurunan kekerasan terjadi karena adanya perbesaran butir yang menyebabkan hambatan gerak dislokasi berkurang rintangannya. Di lain pihak, pada logam Al yang lebih cepat menjadi dingin kan terjadi penghalusan butir dimana butir yang terbentuk menjadi lebih banyak yang menyebabkan kenaikan kekerasan karena gerak dislokasi menjadi lebih sulit bergerak. Apabila gerakan dislokasi sulit bergerak maka paduan akan mejadi keras.



a.

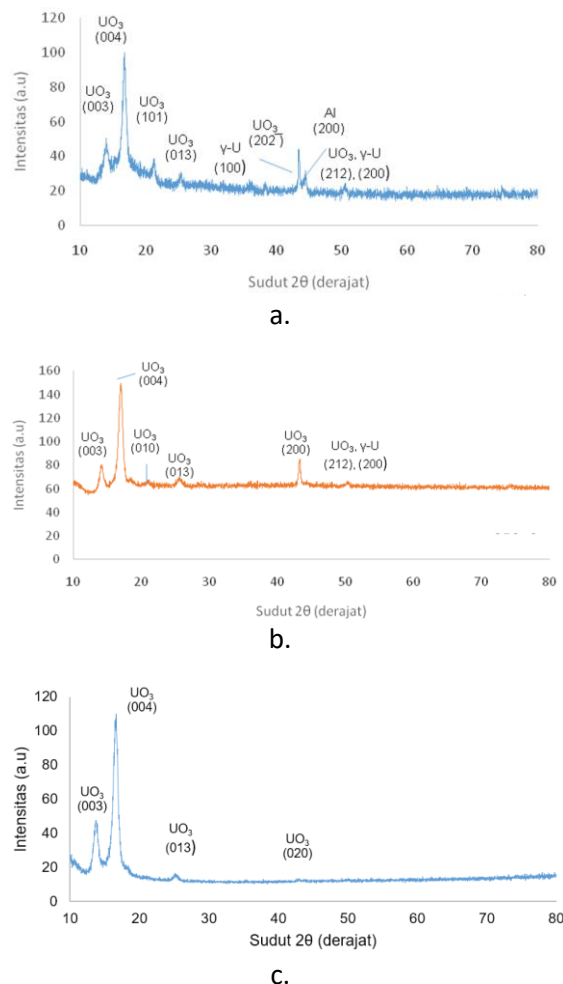


b.

Gambar 6. Grafik hasil uji kekerasan mikro setelah dipanaskan pada temperatur 350 °C dan 450 °C pada: a. Lapisan U; dan b. Lapisan Al

### c. Pembentukan Fasa

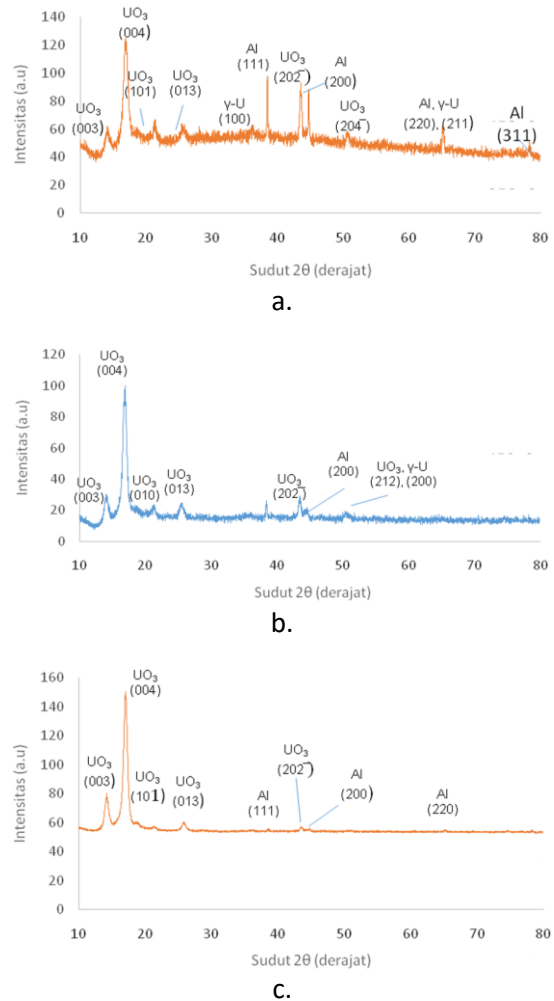
Gambar 7.a, b, dan c yang menampilkan hasil pengujian fasa dari sampel yang dipanaskan pada temperatur 350 °C dengan menggunakan peralatan XRD dan diolah datnya menggunakan program *High Score Plus* menunjukkan terbentuknya oksida  $UO_3$ , fasa  $\gamma U$  dan fasa Al. Senyawa  $UO_3$  terbentuk pada semua sampel uji fasa  $\gamma U$  pada sampel U-6Zr-2Nb dan U-6Zr-5Nb sedangkan logam Al hanya pada U-6Zr-2Nb. Senyawa  $UO_3$  muncul pada sudut  $2\theta$  berturut-turut 14,02, 16,76 dan 43,45°; fasa  $\gamma U$  muncul pada sudut  $2\theta$  sebesar 36,05 dan 50,45° sedangkan Al muncul pada sudut  $2\theta$  sebesar 44,37°.



Gambar 7. Pola difraksi hasil pemanasan sampel pada temperatur 350°C  
a. U-6Zr-2Nb  
b. U-6Zr-5Nb  
c. U-6Zr-8Nb

Gambar 8.a, b, dan c yang merupakan hasil pemanasan pada temperatur 450 °C menunjukkan terbentuknya senyawa

$UO_3$ , fasa  $\gamma U$  dan Al ( $\alpha$ ). Senyawa  $UO_3$  dan Al ( $\alpha$ ) pada semua sampel uji sedangkan fasa  $\gamma U$  hanya pada sampel U-6Zr-2Nb. Senyawa  $UO_3$  muncul pada sudut  $2\theta$  berturut-turut sebesar 14,02; 16,76 dan 43,45 °; logam Al muncul pada sudut  $2\theta$  sebesar 44,37° sedangkan fasa  $\gamma U$  muncul pada sudut  $2\theta$  sebesar 36,05 dan 50,45°.



Gambar 8. Pola difraksi sampel hasil pemanasan pada temperatur proses 450°C  
a. U-6Zr-2Nb  
b. U-6Zr-5Nb  
c. U-6Zr-8Nb

Munculnya senyawa  $UO_3$  disebabkan terjadinya oksidasi baik pada saat preparasi sampel maupun pada saat pemanasan yang terbuka sehingga oksigen dari udara dalam kondisi panas mengoksidasi logam U. Fasa  $\gamma U$  terbentuk karena adanya penambahan logam Nb ke dalam paduan U-Zr, dimana keberadaan logam Nb akan memperluas daerah fasa Unsur-unsur seperti Mo, Nb, Ti, dan Zr adalah sering digunakan sebagai



bahan pengganti untuk menstabilkan fase  $\gamma$ -U pada temperatur rendah. Fase dari uranium murni tidak dapat dipertahankan dalam kondisi metastabil pada temperatur rendah yaitu, pada temperatur di mana adalah fase kesetimbangan. Lebih-lebih lagi, elemen-elemen ini memiliki penampang neutron termal rendah dan kelarutan tinggi dalam fase  $\gamma$ -U. Unsur-unsur seperti Mo, Nb, Ti, dan Zr sering digunakan sebagai bahan pengganti untuk menstabilkan fase  $\gamma$ -U pada temperatur rendah. Fase dari uranium murni tidak dapat dipertahankan dalam kondisi metastabil pada temperatur rendah yaitu, pada temperatur di mana adalah fase  $\alpha$  dalam kesetimbangan. Lebih-lebih lagi, unsur-unsur tersebut memiliki penampang neutron termal rendah dan kelarutan tinggi dalam fase  $\gamma$ -U[13]. Dari pengujian menggunakan peralatan XRD tidak terlihat adanya interaksi antara U-Zr-Nb dengan Al yang dapat membentuk  $UAl_3$ . Terbentuknya senyawa  $UAl_3$  sedapat mungkin dihindari di dalam bahan bakar. Pembentukan  $UAl_3$  memberikan kontribusi pembentukan *swelling* tetapi tidak merupakan faktor yang dominan[10]. Hal ini menunjukkan bahwa pemanasan pada temperature 350 °C hingga 450 °C tidak menyebabkan timbulnya senyawa yang dapat mengganggu kinerja bahan bakar.

## SIMPULAN

Hasil pengujian intermik antara bahan bakar U-Zr-Nb menunjukkan bahwa temperatur pemanasan pada kedua permukaan antara bahan bakar U-Zr-Nb dengan kelongsong Al mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap kualitas permukaan antara dua lapisan. Hasil pengujian pada permukaan kedua permukaan antara bahan bakar U-Zr-Nb dengan kelongsong Al belum menghasilkan ikatan yang rapat antara bahan bakar U-6Zr-2Nb, U-6Zr-5Nb, dan U-6Zr-8Nb dengan pelat Al yang dipanaskan pada temperatur 350 dan 450 °C. Semakin tinggi kandungan Nb semakin rapat ikatan antara bahan bakar U-Zr-Nb dengan pelat Al. Kekerasan pada *interface* sulit diukur sedangkan pada daerah U-Zr-Nb menunjukkan kenaikan kekerasan pada pemanasan dari 350 menjadi 450 °C rata-rata sebesar 52,37 HV, sedangkan pada bagian Al terjadi penurunan kekerasan rata-rata sebesar 11,812 HV pada kenaikan temperatur pemanasan dari 350 menjadi 450 °C. Terbentuk senyawa  $UO_3$  pada semua sampel uji sedangkan fasa  $\gamma$ -U terbentuk pada

sampel U-6Zr-2Nb baik yg dipanaskan pada temperature 350 maupun 450 °C..

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada Bapak Slamet Pribadi, Suyoto dan Dedy Haryadi serta seluruh pegawai PRTBBN terutama personel IEBE atas bantuannya hingga penelitian ini dapat diselesaikan.

## PERNYATAAN KONTRIBUTOR

Kontributor utama dalam makalah ini adalah Masrukan dan Maman Kartaman Ajiriyanto. Sebagai kontributor anggota adalah Fajar Al Afghani dan Yanlinastuti.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Supardjo, H Suwarno, A. Kadarjono, "Karakteristik paduan U-7%Mo dan U-7%Mo-x%Si (x=1, 2 dan 3%) hasil peleburan dalam tungku busur listrik," *Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir Urania*, vol. 15, no. 4, hal. 171-232, 2009.
- [2] Suwardi, "Performance prediction of high density nuclear fuel plate containing U-7%Mo/Al", *Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir Urania*". vol.18, no.3, hal. 163-171, 2012.
- [3] H. Naini, F. Monado, Meni, "Studi parameter burnup sel bahan bakar berbasis Prosiding Semirata Bidang uranium metalik (UZr) pada reaktor cepat berpendingin helium", MIPA, Jambi, 12-14 Mei 2017, hal. 1029-1036.
- [4] R. W. D. Pais, A. M. dos Santos, "Isothermal phase transformation of U-Zr-Nb alloys for advanced nuclear fuels", *Physical Sciences, Engineering and Technology, Intech Open Book Series*, 2013.
- [5] Balart, *et.all*, "Progress on LEU very high density fuel and target development Argentina", *RFM Meeting*, 30 April-3 May 2006, Sofia, Bulgaria.
- [6] K. Ghoshal, S. Kaity, S. Mishra, "Microstructural investigation of uranium rich U-Zr-Nb ternary alloy system", *Journal of Nuclear Materials*, vol. 446, pp. 217-223, 2014.
- [7] S. Kaity, J. Banerjee, S.C. Parida, "Structural, microstructural and thermal analysis of U- (6-x)Zr -xNb alloys (x ¼ 0, 2, 4, 6), *Journal of Nuclear Materials*, vol. 504, pp. 234-250, 2018.
- [8] D. A Lopes, T. Augusto, G. Restivo, A. F. Padilha, "Mechanical and thermal behaviour of U-Mo and U-Nb-Zr Alloys",

- Journal of Nuclear Materials*, vol. 440, no.1–3, pp. 304-309, 2013.
- [9] Masrukan, "Pembuatan pelat elemen bakar mini U-6Zr/Al untuk bahan bakar reaktor riset", *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah (PPIS)*, Badan Standarisasi Nasional (BSN), Bali, 8 Mei 2012. ISSN: 0853-9677.
- [10] Masrukan, M.H. Al Hasa, E. Yusnitha. "Fabrication of Fuel Element Core (FEC) of U-6Zr-5Nb/Al to be Fuel Element Plate (FEP) With Variation of Uranium Density," *Journal of Material Research and Technology*, vol 10, pp. 216-224, 2021.
- [11] Supardjo, "Studi sifat bahan bakar uranium silisida akibat iradiasi. Prosiding Pesentasi Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir II PEBN-BATAN, Jakarta, 19-20 Nopember 1996.
- [12] M. K. Ajiriyanto, A. B. Ginting, Supardjo, Boybul, "Pengaruh temperatur dan iradiasi terhadap interdifusi partikel bahan bakar jenis U-7Mo/Al", *Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir Urania*, vol. 22 No. 1, hal. 1 – 64, 2016,
- [13] A. S. Ferreira, F. R. Longen, R. A. M Gotardoc, "Synthesis and Structural Characterization of U-Zr-Nb Alloys", *Journal of Materials Research*, vol. 21 no. 1, 2018.

## Lampiran

Tabel 1. Kekerasan mikro pada bagian logam U dan Al

No	Sampel	d1	d2	Hv	Rata-rata
U-6Zr-5Nb, 450 °C					
1	U	20,10	20,28	352,7	461,125
2		22,20	22,07	531,7	
3		21,54	23,41	528,6	
4		21,82	21,11	431,5	
U-6Zr-8Nb, 450 °C					
1	Al	61,82	60,03	50	52,18
2		58,88	59,75	52,7	
3		57,22	59,45	52,7	
4		59,01	60,31	52,1	
5		57,13	60,68	53,4	
U-6Zr-2Nb, 450 °C					
1	U	17,13	18,13	596,6	484,12
2		18,13	20,35	500,9	
3		19,60	21,24	444,7	
4		19,99	20,60	450,2	
5		20,85	20,77	428,2	
U-6Zr-8Nb, 450 °C					
1	Al	54,4	52,36	64,9	59,66
2		55,88	56,51	58,7	
3		54,95	55,76	60,5	
4		55,75	57,56	57,8	
5		56,85	57,79	56,4	
U-6Zr-2Nb, 450 °C					
1	Al	70,95	69,80	37,4	37,55
2		69,66	70,62	37,7	
U-6Zr-5Nb, 450 °C					
1	U	20,19	20,70	443,6	443,46
2		23,17	22,44	356,6	
3		19,13	19,16	494,0	
4		18,5	20,92	477,3	
5		19,99	20,80	445,8	

Tabel 2. Kekerasan mikro pada bagian logam U dan Al

No	Sampel	d1	d2	HV	Rata-rata
U-6Zr-5Nb, 350 °C					
1	U			441,7	393,88
2				370,1	
3				367,1	
4				402,5	
5				389	
U-6Zr-8Nb, 350 °C					
1	Al			66,5	59,65
2				66,9	
3				50,4	
4				54,8	
U-6Zr-2Nb, 350 °C					
1	U			394,0	387,7
2				364,0	
3				414,8	
4				378,8	
1	Al			57,2	62,275
2				64,2	
3				63,2	
4				64,5	
U-6Zr-2Nb, 350 °C					
1	Al			57,8	60,275
2				60,7	
3				64,7	
4				57,9	
1	U			451,3	450,025
2				489,2	
3				418,1	
4				441,5	