

KOMPARASI HASIL ANALISIS KOMPOSISI KIMIA DI DALAM PADUAN U-Zr-Nb DENGAN MENGGUNAKAN TEKNIK XRF DAN AAS

Masrukan⁽¹⁾, Tri Yulianto⁽¹⁾, Anwar Muchsin⁽¹⁾

1. Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir (PTBN)-BATAN
Kawasan Puspiptek, Serpong, Tangerang Selatan 15314

E-mail : Masrukan2006@yahoo.com

(Naskah diterima: 06-09-2011, disetujui: 30-09-2011)

ABSTRAK

KOMPARASI HASIL ANALISIS KOMPOSISI KIMIA DI DALAM PADUAN U-Zr-Nb DENGAN MENGGUNAKAN TEKNIK XRF DAN AAS. Analisis komposisi kimia paduan U-Zr-Nb dengan menggunakan teknik Fluorosepsi Sinar X (XRF) dan Spektroskopi Serapan Atom (AAS) telah dilakukan. Analisis komposisi perlu dilakukan untuk menentukan karakteristik bahan bakar selama proses fabrikasi maupun di dalam reaktor. Penggunaan dua macam teknik analisis agar diperoleh hasil analisis yang akurat. Percobaan ini dilakukan untuk menentukan komposisi unsur utama dan pengotor di dalam paduan U-Zr-Nb. Mula-mula paduan U-Zr-Nb yang bervariasi komposisi Nb berturut-turut 1%, 4%, 7% (U-10%Zr-1%Nb, U-10%Zr-4%Nb dan U-10%-7%Nb) dipotong-potong untuk dilakukan analisis komposisinya. Dari hasil analisis dengan menggunakan teknik XRF diperoleh komposisi kimia paduan U-10%Zr-1%Nb, U-10%Zr-4%Nb dan U-10%Zr-7%Nb) masing-masing mempunyai kandungan unsur sebagai berikut: U(87,8858%), Zr(2,6097%) dan Nb (0,2206%) ; U (87,8556%), Zr (2,6302%), dan Nb (0,6573%); U (84,6334%), Zr (2,5773%) , dan Nb (1,0940 %) berat. Hasil analisis dengan menggunakan teknik AAS pada ketiga sampel diperoleh kadar Zr berturut turut : 9,25 %; 8,90% dan 9,80 % sedangkan kadar Nb tidak terdeteksi. Sementara itu, hasil analisis unsur pengotor pada ketiga sampel diperoleh hampir semua unsur yang ada masih memenuhi persyaratan bahan bakar kecuali unsur Zn. Unsur Zn yang ada pada ketiga sampel paduan U-10%-Zr1%Nb, U-10%Zr-4%Nb dan U-10%-7%Nb adalah 1,3266%; 3,2756 %, dan 1,0927 % berat. Dapat disimpulkan bahwa hasil analisis kandungan unsur dan pengotor di dalam paduan U-Zr-Nb dengan menggunakan kedua teknik XRF dan AAS terlihat bahwa hasil analisis yang lebih mendekati dengan komposisi paduan UZrNb yang direncanakan adalah dengan menggunakan teknik AAS.

Kata kunci : Analisis komposisi, U-Zr-Nb, XRF, dan AAS.

ABSTRACT

COMPARISON OF RESULTS ANALYSIS OF CHEMICAL COMPOSITION OF ALLOYS INSIDE THE U-Zr-Nb BY XRF AND AAS TECHNIQUES. U-Zr-Nb alloy chemical composition analysis using X Ray Fluorescence (XRF) and Atomic Absorption Spectroscopy (AAS) techniques have been conducted, where U-Zr- Nb alloy was chosen as candidates for new high-density fuel for future research reactors . Composition analysis is necessary because the composition of elements in the

fuel will determine the characteristics of fuel during the fabrication process and in the reactor. The use of two kinds of analysis techniques were designed to obtain accurate analysis results. The experiment was conducted to determine the major element composition and impurities in the alloy U-Zr-Nb. First U-Zr-Nb varying alloy composition Nb were respectively 1%, 4%, 7% (U10% Zr1% Nb, U10% Zr4% Nb and U10% 7% Nb) as results of the melting process of measuring the diameter of 120 mm crushed on the surface bottom. Once on the bottom surface is smooth, then analyzed using XRF techniques. To analyze the elements using AAS techniques, alloy U-Zr-Nb cut into 10 mm x 5 mm then dissolved using HF and nitric acid. Solution that occurred were analyzed using AAS technique. From the analysis using the XRF technique is obtained the alloy U-10% Zr-1% Nb, U-10% Zr-4% Nb and Zr-10% U-7% Nb) had a content of each element as follows: U (87.8858%), Zr (2.6097%) and Nb (0.2206%), U (87.8556%), Zr (2.6302%), and Nb (0.6573%); U (84.6334%), Zr (2.5773%), and Nb (1.0940) weight. Results of analysis using AAS techniques on samples obtained third consecutive Zr content of 9.25%, 8.90% and 9.80% while the content of Nb was not detected. Meanwhile, the results of elemental analysis of impurities in all three samples showed that almost all the elements are still qualify as fuel except Zn element. Element Zn at the three samples of each alloys U-10% Zr-1% Nb, U-10% Zr-4% Nb and U-10% Zr-7%Nb is 1.3266%, 3.2756% and 1.0927% weight. It could be concluded that the results of analysis of elemental content and impurities in the alloy U-Nb-Zr using both XRF and AAS visible that results of the analysis technique which is was approach composition of U-Zr-Nb alloy that planned by using AAS technique.

Keyword : Composition analysis, U-Zr-Nb, XRF, and AAS.

PENDAHULUAN

Pengembangan bahan bakar reaktor riset diarahkan untuk mendapatkan bahan bakar baru yang mempunyai densitas tinggi agar jumlah uranium (U) yang dapat dimuatkan ke dalam bahan bakar menjadi lebih banyak tiap satuan volum. Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir BATAN yang mempunyai tugas mengembangkan bahan bakar baru untuk menggantikan bahan bakar yang sudah ada, dimana pada saat ini sedang mengembangkan beberapa macam bahan bakar yakni U-Mo, U-N dan U-Zr^[1]. Pengembangan bahan bakar U-Mo masih berlangsung dan belum mendapatkan hasil secara final. Oleh karena itu dikembangkan bahan bakar lain jenis U-Zr dan U-N.

Pengembangan bahan bakar paduan U-Zr dengan menambahkan Nb dimaksudkan untuk memperbaiki sifat bahan bakar tersebut terutama sifat ketahanan terhadap korosi. Bruno, dkk telah melakukan penelitian penggunaan U-Zr-Nb sebagai bahan bakar reaktor riset dengan membuat paduan U-

4%Zr-1%Nb dan menggunakan kelongsong yang terbuat dari paduan aluminium^[2]. Pada penam-bahan Nb 1,5 % ke dalam paduan U-5% Zr dapat di*quenched* untuk mendapatkan struktur fasa alpha yang lewat jenuh dimana pada kondisi tersebut paduan U-Zr-Nb mempunyai ketahanan korosi sedang. Penambahan unsur Nb mencapai 7% berat yang di*quenched* menghasilkan fasa gamma metastabil pada temperatur kamar, dimana pada kondisi gamma yang metastabil paduan U-Zr-Nb mempunyai laju korosi uniform yang sangat rendah^[3].

Dalam pembuatan bahan bakar nuklir, bahan bakar tersebut harus mempunyai kandungan unsur pengotor yang sangat rendah sehingga memenuhi standar tingkat nuklir (*nuclear grade*). Oleh karena itu kandungan unsur-unsur pengotor di dalam bahan bakar nuklir perlu diketahui secara pasti baik macam maupun jumlahnya karena dapat mengganggu reaksi antara bahan bakar dengan neutron selama berada di dalam reaktor. Unsur-unsur pengotor yang

menyertai bahan nuklir antara lain adalah : Cu, Cd, Fe, Mn, Mg, Li, Cr, Ni, dan Zn^[3]. Adanya unsur-unsur pengotor yang melebihi dari spesifikasi yang telah ditentukan dapat menurunkan kualitas dari bahan bakar nuklir tersebut. Sebagai contoh unsur Cd yang mempunyai tampang serap neutron yang tinggi, akan mengganggu operasi reaktor. Berkenaan dengan sifat neutronik tersebut maka jumlah kandungan unsur pengotor di dalam bahan bakar harus dibatasi.

Dalam percobaan ini dilakukan analisis paduan U-Zr-Nb dengan menggunakan teknik XRF (Flourosensi sinar X) dan AAS (Spektrometer serapan atom) . Penggunaan lebih dari satu macam teknik analisis ini dimaksudkan untuk memperoleh ketepatan hasil analisis.

Teknik XRF merupakan teknik analisis suatu bahan dengan menggunakan peralatan spektrometer yang dipancarkan oleh sampel hasil efek fotolistrik dari penyinaran sinar x ke sampel. Dalam pengujian dengan menggunakan alat XRF akan diperoleh hubungan dua parameter yaitu energi unsur (keV) terhadap intensitas cacahan per detik (*cps/count per second*) seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Sinar-x yang dianalisis berupa sinar-x karakteristik yang dihasilkan dari tabung X-Ray. Bahan yang dianalisis dapat berupa bahan padat pejal dan serbuk. Unsur yang dapat dianalisis adalah unsur yang mempunyai nomor atom rendah seperti unsur karbon (C) sampai dengan unsur yang mempunyai nomor atom tinggi seperti uranium (U). Unsur C mempunyai sinar x transisi ke kulit K (C-K) sebesar 0,28 keV sedangkan sinar x karakteristik dari kulit L atom U pada 13,61 keV. Oleh karena energi setiap atom terdiri dari energi pada kulit atom K, L, M maka energi yang diambil untuk analisis adalah

energi sinar-x yang dihasilkan oleh salah satu kulit atom tersebut. Pada pengoperasian alat XRF diperoleh bahwa rentang energi sinar x pada peralatan adalah 5 – 50 keV. Oleh karena itu, untuk menganalisis atom U harus diambil pada energi kulit L (13,61 keV) karena energi kulit K sangat besar (97,13 keV) dan berada di luar kemampuan alat. Analisis menggunakan XRF akan menghasilkan suatu spektrum yang menunjukkan kandungan unsur-unsur pada tingkat energi tertentu. Analisis kuantitatif unsur didasarkan sinar x pada energi yang yang bersangkutan. Intensitas sinar x karakteristik dari sampel dibandingkan dengan intensitas sinar x karakteristik dari bahan. Analisis kuantitatif dilakukan menggunakan standar pembanding yang bersertifikat dengan persyaratan untuk menentukan bahan non standar yang akan dianalisis. Persyaratan bahan standar yang digunakan adalah bentuk, matrik dan kondisi pengukuran harus sama dengan bahan yang dianalisis. Analisis secara kuantitatif dilakukan dengan cara mengkonversi hasil yang diperoleh dalam analisis kualitatif yang berupa intensitas dalam satuan cps menjadi satuanprosentasi berat atau ppm (*part per million*)^[4]. Konversi dilakukan dengan menggunakan rumus ^[4]:

$$C\text{-spl} / C\text{-std} = I\text{-spl} / I\text{-std}$$

$$C\text{-spl} = (I\text{-spl}/I\text{-std}) \times C\text{-std} \quad (1)$$

dengan :

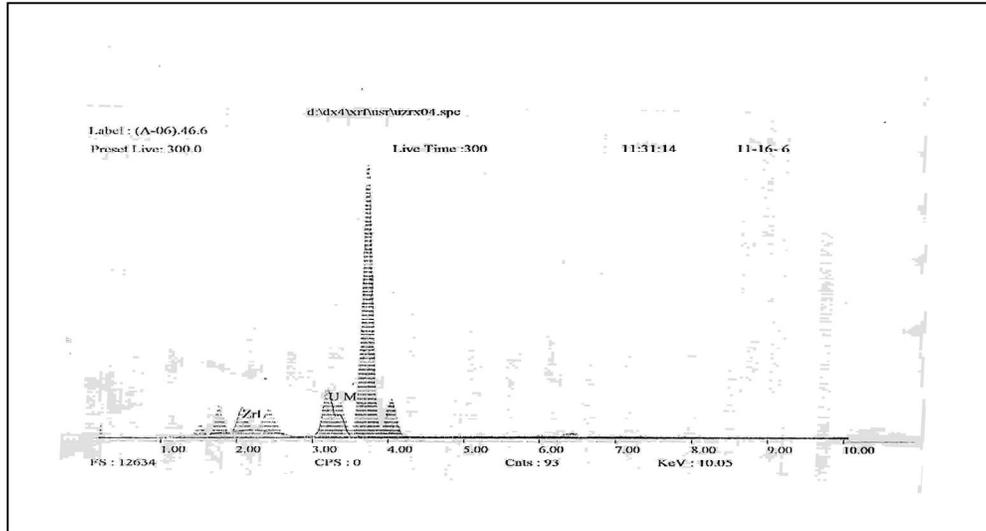
C-spl = konsentrasi bahan yang dianalisis/
sampel (%berat, ppm)

I-spl = intensitas/cacahan sampel (cps)

I-std = intensitas standar (cps)

C-std = konsentrasi standar (%berat, ppm)

Intensitas sampel dan intensitas standar diperoleh dari hasil pengukuran, sedangkan konsentrasi standar diperoleh dari sertifikat (pabrik).



Gambar 1. Contoh kurva hubungan energi unsur terhadap intensitas dari paduan U-Zr^[4]

Teknik AAS adalah suatu metode yang dapat digunakan untuk analisis unsur-unsur dalam suatu bahan berdasarkan penyerapan energi oleh atom-atom yang berada pada tingkat dasar untuk mengeksitasi elektron terluar, proses penyerapan energi terjadi pada panjang gelombang yang spesifik dan karakteristik untuk tiap unsur^[6]. Prinsip utama dari metode AAS adalah bila suatu larutan dari senyawa tertentu diaspirasikan ke dalam nyala maka senyawa ini akan menguap lalu akan terurai menjadi uap-uap atom bebas (*proses atomisasi*). Uap-uap atom bebas tersebut akan menyerap energi radiasi yang berasal dari lampu katoda cekung pada panjang gelombang yang khas dan karakteristik untuk setiap unsur. Akibat dari proses penyerapan radiasi tersebut elektron dari atom-atom bebas tereksitasi ke tingkat energi yang lebih tinggi. Intensitas radiasi yang diserap sebanding dengan jumlah atom dalam contoh sehingga dengan mengukur intensitas radiasi yang diserap (absorbansi) atau mengukur intensitas radiasi yang diteruskan (transmitasi), maka konsentrasi unsur di dalam cuplikan dapat ditentukan. Hubungan serapan dengan

konsentrasi atom dirumuskan dalam hukum Lambert Beer yaitu^[5]:

$$\text{Log } I_0/I_t = a \cdot m \cdot b \cdot c = A \quad (2)$$

dengan :

- I_0 = Intensitas mula-mula
- I_t = Intensitas sinar yang diteruskan
- a = koefisien serapan media
- b = panjang burner
- c = kepekatan atom-atom yang mengabsorpsi

Karena a dan b merupakan suatu yang tetap, maka serapan contoh dapat langsung dibandingkan dengan serapan larutan standar yang telah diketahui konsentrasinya dengan membuat suatu grafik antara konsentrasi dan absorbansi.

TATA KERJA

1. Analisis dengan menggunakan XRF

Sebelum dilakukan analisis perlu dilakukan kalibrasi energi. Bahan yang digunakan untuk kalibrasi adalah paduan $\text{Al}(\text{Al}_2\text{O}_3)_4$. Kalibrasi energi dilakukan agar unsur yang terkandung dalam suatu bahan tepat pada energi yang semestinya. Kalibrasi

dilakukan pada kondisi tegangan 14 kV dan arus 100 μ A dan kevakuman 300 mTorr. Bahan yang digunakan adalah logam U dan Zr yang telah diketahui konsentrasinya. Hasil kalibrasi pengukuran tersebut selanjutnya digunakan untuk menentukan daerah pengukuran sampel uji.

2. Analisis dengan menggunakan AAS

Sampel uji dipotong-potong dan diambil potongan sebanyak 0,1g untuk setiap sampel uji kemudian dilarutkan dalam 20 mL larutan HF dan diuapkan dengan cara dipanaskan selanjutnya didinginkan. Larutan yang terjadi diencerkan dalam HNO₃ 6M hingga volume mencapai 50 mL. Langkah selanjutnya, masing-masing larutan dipipet sebanyak 25 mL dan diekstraksi dengan menggunakan campuran larutan TBP dan Hexan dalam perbandingan 7:3. Langkah tersebut guna memisahkan unsur pengotor dari uraniumnya. Campuran kedua fasa didiamkan selama 5 menit sehingga fasa air dan fasa organik terpisah dengan baik.

Fasa air yang telah terpisah diambil sebanyak 25 mL selanjutnya dimasukkan ke dalam beker gelas. Sebelum menganalisis sampel uji, terlebih dahulu larutan standar tiap-tiap unsur yang telah diketahui konsentrasinya diaspirasikan ke dalam nyala api. Karena pemanasan, larutan standar tersebut menjadi uap atom-atom bebas. Proses selanjutnya menganalisis sampel dengan cara mengaspirasikan sampel uji ke dalam nyala api sehingga menjadi uap-uap atom bebas. Uap atom bebas tersebut akan menyerap energi radiasi yang berasal dari lampu katoda cekung pada panjang gelombang yang khas dan karakteristik untuk setiap unsur. Dengan mengukur intensitas radiasi yang diserap (absorbansi) atau mengukur intensitas radiasi yang diteruskan (transmisi), maka konsentrasi unsur di dalam sampel uji dapat ditentukan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Analisis dengan menggunakan teknik XRF

Hasil analisis komposisi kimia dengan menggunakan teknik XRF ditampilkan dalam Tabel 1. Tabel 1 memperlihatkan adanya selisih hasil analisis untuk kadar U yang direncanakan dengan kadar U pada hasil uji yang tidak berbeda jauh yakni antara 1,25 hingga 2,15 %. Pada analisis untuk menentukan kandungan Zr diperoleh hasil yang jauh berbeda antara yang direncanakan dengan hasil uji yakni antara 73 % hingga 74 %. Sementara itu pada analisis untuk menentukan kandungan Nb di dalam paduan U-Zr-Nb diperoleh selisih hasil analisis yang besarnya antara 77,94 % hingga 84,371%. Melihat hasil tersebut dapat dikatakan bahwa analisis dengan XRF menghasilkan hasil yang tepat bila digunakan untuk menentukan kandungan U. Hal ini dapat dimengerti mengingat di dalam paduan U-Zr-Nb, logam U merupakan matriks sehingga hampir semua tempat dapat ditembus oleh sinar fluoresensi yang digunakan sehingga mengeluarkan intensitas sinar yang cukup besar. Berbeda dengan logam U, untuk logam Zr dan Nb yang jumlahnya sedikit dan tidak merata sehingga sinar fluoresensi sulit mengenai logam Zr maupun Nb yang terdapat di dalam paduan U-Zr-Nb sehingga intensitas sinar yang dikeluarkanpun sangat kecil. Selain faktor tersebut, faktor keberhasilan analisis dengan menggunakan XRF juga dipengaruhi oleh keadaan permukaan sampel uji yang digunakan. Semakin halus permukaan sampel uji maka hasil pengujian semakin akurat karena pada permukaan sampel uji yang halus intensitas sinar akan muncul lebih jelas. Apabila intensitas sinar yang dikeluarkan cukup jelas maka hasil analisis juga akan lebih akurat.

Tabel 1. Hasil analisis komposisi kimia dengan menggunakan XRF

No	Item		Konsentrasi		
			U (%)	Zr (%)	Nb (%)
1	U-10%Zr-1%Nb	Direncanakan	89	10	1
		Hasil uji	87,8858	2,6097	0,2206
		Selisih	1,251	73,903	77,94
2	U-10%Zr-4%Nb	Direncanakan	86	10	4
		Hasil uji	87,8556	2,6302	0,6573
		Selisih	2,15	73,698	83,5675
3	U-10%Zr-7%Nb	Direncanakan	83	10	7
		Hasil uji	84,6334	2,5773	1,0940
			1,96	74,227	84, 37142

2. Analisis komposisi kimia dengan menggunakan AAS

Hasil analisis dengan menggunakan teknik AAS tertera dalam Tabel 2 dan 3. Dari Tabel 2 dan 3 diperoleh hasil analisis kandungan Zr dimana selisih antara yang direncanakan dengan hasil uji menunjukkan selisih yang bervariasi yaitu antara 2 % hingga 11 %. Selisih hasil uji dengan yang direncanakan mempunyai nilai terkecil yakni 2 % pada paduan U-Zr-Nb dengan kandungan Nb 7%. Selisih hasil analisis Zr dengan yang direncanakan di dalam paduan U-Zr-Nb masing-masing sebesar 7,5%; 11,0% ; dan 2,0%. Melihat hasil tersebut maka paduan U-Zr-Nb dengan kandungan Nb sebesar 7% menunjukkan hasil analisis yang mendekati yang direncanakan (tepat). Hasil analisis dengan menggunakan AAS salah satunya dipengaruhi oleh pengerjaan sampel/preparasi sampel, dimana sampel uji harus dilarutkan hingga homogen. Hasil yang tidak tepat tersebut diduga disebabkan dari pelarutan sampel yang tidak homogen. Karena ketidak homogenan proses pelarutan maka unsur-unsur yang seharusnya terdeteksi menjadi berkurang karena atom-

atom dari unsur yang seharusnya memancarkan sinar tidak terdeteksi. Apabila dilihat dari hasil analisis unsur pengotor yang ada terlihat bahwa hampir semua sampel yang diuji menunjukkan hasil yang masih dalam batas unsure yang diijinkan sebagai bahan bakar reaktor riset kecuali unsur Ca dan Zn. Unsur Ca yang ada pada masing-masing paduan adalah sebesar 68,2 ; 74,431 dan 98,08 ppm sedangkan yang dipersyaratkan tidak lebih dari 50 ppm. Keberadaan unsur Ca yang melebihi persyaratan tersebut disebabkan pada pembuatan logam U dari proses kalsiatermik menggunakan Ca sebagai reduktor terhadap UF_4 sebagai bahan baku. Logam Ca masih ada yang tersisa di dalam logam U hasil reduksi kalsiatermik sehingga mengotori logam U. Reaksi yang terjadi pada proses reduksi adalah sebagai berikut^[6]:



Sementara itu, logam Zn diperkirakan berasal dari cawan atau krusibel dalam peleburan U dengan Zr dan Nb dimana krusibel telah digunakan untuk melebur logam-logam selain logam U.

Tabel 2. Analisis komposisi kimia dengan menggunakan AAS

No	Item	Konsentrasi		
			Zr (%)	Nb (%)
1	U-10%Zr-1%Nb	Direncanakan	10	1
		Hasil uji	9,25	Ttd
		Selisih	7,5	-
2	U-10%Zr-4%Nb	Direncanakan	10	4
		Hasil uji	8,90	Ttd
		Selisih	11,0	-
3	U-10%Zr-7%Nb	Direncanakan	10	7
		Hasil uji	9,80	ttd
		Selisih	2,0	-

Tabel 3. Hasil analisis unsur pengotor U-Zr-Nb dengan menggunakan teknik AAS

No	Unsur	Hasil analisis (ppm)			Persyaratan (ppm)	Limit deteksi
		U10%Zr1%Nb	U10%Zr4%Nb	U10%Zr7%Nb		
1	Cd	< LD	<LD	<LD	0,2	0,003
2	Cu	Ttd	Ttd	Ttd	20	0,003
3	Fe	28,581	27,1887	25,0816	100	
4	Mg	149,7492	132,665	142,4346	150	
5	Cr	Ttd	Ttd	Ttd	25	0,0031
6	Ca	68,2	74,431	98,08	50	
7	Mo	-	-	-	4	
8	Mn	Ttd	Ttd	Ttd	10	0,003
9	Ni	6,1911	11,2309	6,565	30	
10	Al	11,633	9,633	38,407	50	
11	Zn	1,3266	3,2756	1,0927		
12	Co	Ttd	Ttd	Ttd		0,0031

SIMPULAN

Dari hasil analisis paduan U-Zr-Nb dengan menggunakan dua macam teknik dapat disimpulkan bahwa analisis dengan XRF menghasilkan hasil yang tepat bila digunakan untuk menentukan kandungan U. Terdapat selisih hasil analisis untuk kadar U yang direncanakan dibandingkan hasil uji yang hampir tidak berbeda jauh yakni antara 1,25 hingga 2,15 %. Dalam analisis untuk

menentukan kandungan Zr terdapat selisih hasil yang cukup jauh antara yang direncanakan dengan hasil uji yakni antara 73 % hingga 74 % sedangkan analisis untuk menentukan kandungan Nb di dalam paduan U-Zr-Nb terdapat selisih hasil analisis yang besarnya antara 77,94 % hingga 84,371%. Hasil analisis kandungan Zr dengan menggunakan AAS terdapat selisih antara yang direncanakan dengan hasil uji yang

bervariasi yaitu antara 2 % hingga 11 %. Selisih hasil uji dengan yang direncanakan mempunyai nilai terkecil pada paduan U-Zr-Nb dengan kandungan Nb 7% yakni 2 %. Hasil analisis kandungan unsur dan pengotor di dalam paduan U-Zr-Nb dengan menggunakan kedua teknik terlihat hasil analisis yang lebih mendekati dengan yang direncanakan untuk membuat paduan U-Zr-Nb adalah dengan menggunakan teknik AAS.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. ANONYMOUS, (2010) Renstra Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir-BATAN (2010-2014), Serpong Tangerang.
- [2]. BRUNO, dkk, (2007), "Methodology of UZrNb Alloy Powder Passivation Obtained by Hydride Dehydride", International Nuclear Atlantic Conference –INAC, (29 September – 5 Oktober). Santos. Brazil.
- [3]. KAUFMAN A, (1972). Nuclear Reactor Fuel Elements, Metallurgy and Fabrication, U.S Atomic Energy Commission, New York Interscience Publishers, Jhon Wiley and Sons. Halaman-82.
- [4]. VARIAN. (1984), Analytical Methods for Flame Atomic Absorption Spectroscopy, Varian Techtron Limited Springfield.
- [5]. MASRUKAN DAN ROSIKA K, (2008). Perbandingan Analisis Bahan Bakar U-Zr Dengan Menggunakan Teknik XRF dan SSA. Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir " Urania", Vol 14 No1 Januari 2008. Halaman 17-25. ISSN 0852-4777. Akreditasi No. 71/Akreditasi LIPI/P2MBI/5/2007.
- [6]. AGOENG KADARYONO DAN SUPARDJO. (2008), Pembuatan Logam Uranium Dari UF₄ Dengan Metoda Proses Reduksi Kalsiotermik, Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir, Urania Vol 16 No 3 Juli 2008. Halaman 17-25. ISSN 0852-4777. Akreditasi No. 71/Akred-LIPI/ P2MBI/5/2007.