

ANALISIS RADIONUKLIDA ^{235}U DALAM PELAT ELEMEN BAKAR $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ PASCA IRADIASI MENGGUNAKAN METODE SPEKTROMETRI ALFA

Arif Nugroho, Yusuf Nampira, Yanlinastuti

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir-BATAN
Kawasan PUSPIPTEK Gedung 20, Serpong 15314
Email: arif52@yahoo.com

ABSTRAK

ANALISIS RADIONUKLIDA ^{235}U DALAM PELAT ELEMEN BAKAR $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ PASCA IRADIASI MENGGUNAKAN METODE SPEKTROMETRI ALFA. Telah Dilakukan Analisis Radionuklida ^{235}U Dalam Pelat Elemen Bakar (PEB) $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ Pasca Iradiasi. PEB di samping mengandung sisa uranium juga mengandung bahan lain, seperti hasil belah dan hasil biak serta bahan kelongsong elemen bakar nuklir. Kandungan uranium di dalam bahan bakar pasca iradiasi tersebut dianalisis menggunakan metode spektrometri- α . Agar analisis memberikan hasil yang akurat, maka uranium tersebut perlu dipisahkan dari unsur lain yang dapat menyerap radiasi- α dan akan berpengaruh pada pengukuran radioaktivitasnya. Uranium dalam larutan asam kuat HCl membentuk kompleks anion sedangkan bahan yang tercampur lainnya bersifat kation. Uranium dapat dipisahkan menggunakan kolom penukar anion dengan menggunakan resin dowex 1x8 Cl⁻ dan larutan HCl digunakan sebagai eluen. Uranium yang terikat dalam kolom diambil dengan cara melulusi kolom menggunakan aquadest hangat. Efektifitas pemisahan uranium didasarkan pada parameter berat resin dan volume serta konsentrasi HCl dalam eluen. Berat resin dowex 1x8 Cl⁻ yang digunakan dengan variasi 1; 1,2; 1,5 dan 2 g, sedangkan konsentrasi asam kuat HCl 4; 6; 8; 10 M. Radionuklida ^{235}U yang masih berada dalam resin elusi menggunakan aquadest hangat suhu 50°C. Uranium dalam efluen HCl dan air hangat dianalisis menggunakan spektrometer- α . Hasil analisis menunjukkan bahwa kondisi optimum yang diperoleh untuk konsentrasi HCl adalah 6 M dan berat resin dowex 1x8 Cl⁻ yang digunakan sebesar 1,2 g. Kandungan radionuklida ^{235}U yang di dalam sampel larutan uranyl nitrat bebas isotop Cs diperoleh sebesar 0,1966 μg atau setara dengan 743,4 μg didalam 0,036 g sampel PEB $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ densitas 2,96 gU/cm^3 pasca iradiasi.

Kata kunci : analisis radionuklida ^{235}U , spektrometer- α , PEB $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$

ABSTRACT

ANALYSIS OF ^{235}U RADIONUCLIDE IN $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ FUEL ELEMENT PLATE POST IRRADIATED USING ALPHA SPECTROMETER. ^{235}U analysis in $\text{u}_3\text{si}_2\text{-al}$ fuel element plates-post irradiation has been done. The sample of fuel element plates contains not only remaining uranium but also other radionuclides, such as fission product, breeding material, and the fuel cladding material. The content of uranium in the sample of fuel element plates-post irradiation has been analysed by using α -spectrometer. In order to obtain an accurate result, the uranium need to be separated from other elements which able to absorb α -radiation in the sample which will affect its radioactivity measurement. Uranium in the HCl strong acid solution may form anion complex while other materials may behave as cation. The uranium can be separated by using anion exchange column by using resin anion exchange Dowex 1x8Cl⁻ and HCl solution as the eluent. The uranium which has been bonded in the columns has been taken by performing an elution on the columns with warm aquadest. The efficiency of uranium separation has been obtained by the resin weight and volume, and the concentration of HCl in the eluent. The weight of resin was with the variety of weight 1; 1.2; 1.5 and 2 g, while concentration of HCl strong acid 4; 6; 8; 10 M. The ^{235}U radionuclide which is remained in the resin has been eluted by using warm aquadest (at about 50°C). Uranium in the HCl effluent and warm aquadest has been analysed by using α -spectrometer. The result of analysis shows that the optimum condition which has been obtained for HCl is 6M, and the weight of resin dowex 1x8 Cl⁻ which has been used was 1.2 g. The concentration of ^{235}U in the sample has been found in the Cs-free uranyl nitrate was 0.1966 μg or equal to 743.4 μg in 0.036 g of sample of $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ fuel element plates-post irradiation which has density about 2.96 gU/cm^3 .

Key words: ^{235}U analysis, α -spectrometer, $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ fuel element

PENDAHULUAN

Bahan bakar nuklir dengan neutron akan mengalami reaksi pembelahan berantai. Pelat Elemen Bakar (PEB) U_3Si_2-Al yang mengandung ^{235}U dengan pengkayaan 19,75% akan mengalami reaksi pembelahan dan menghasilkan energi, sedangkan ^{238}U akan mengalami pembiakan. Untuk mengetahui energi total yang dihasilkan dari reaksi pembelahan bahan nuklir serta laju pembelahan bahan bakar nuklir, maka perlu dilakukan analisis penentuan derajat bakar (*burn-up*). *Burn-up* dapat dinyatakan sebagai persentasi atau fraksi atom fisi ^{235}U , atau dalam satuan energi (MWD= megawatt day) yang dihasilkan dari proses fisi. Oleh sebab itu penentuan *burn-up* bahan bakar merupakan salah satu kegiatan penting dalam mempelajari anjuk kerja bahan bakar di dalam reaktor. Penghitungan nilai *burn-up* didasarkan pada analisis jumlah hasil belah uranium sisa dan nuklida hasil biak atau unsur-unsur berat seperti plutonium dan uranium (uranium yang terbakar) di dalam bahan bakar nuklir^[1,2].

Reaksi inti uranium dengan neutron akan menyebabkan perubahan komposisi isotop uranium dalam bahan bakar. Diperolehnya radionuklida hasil belah yang mempunyai waktu paro panjang (memancarkan radiasi- γ) dan radionuklida stabil serta radionuklida hasil biak ^{238}U yang meluruh menjadi ^{239}Pu dengan memancarkan radiasi- α . Data-data radionuklida tersebut akan dipakai dalam penentuan *burn-up*. Perhitungan *burn-up* antara lain berdasarkan kepada analisis :

- Komposisi isotop uranium atau analisis nuklida hasil belah yang stabil, yang dapat dianalisis dengan metode spektrometri massa.
- Kandungan nuklida hasil belah pemancar- γ atau α , dianalisis menggunakan metode spektrometri- γ atau spektrometri- α .

Analisis dengan metode spektrometri massa mempersyaratkan bahwa dalam sampel yang dianalisis tidak ada unsur lain dengan massa yang sama dari nuklida yang dianalisis, karena memberikan kontribusi pada tingginya puncak spektrum. Pada metode spektrometri- α unsur-unsur lain yang dapat menyerap radiasi pemancar- α dapat dianalisis. Keadaan ini menyebabkan radioaktifitas yang terukur tidak sesuai dengan radioaktifitas dari radionuklida

yang dianalisis. Guna mengurangi gangguan yang menyebabkan ketidaksesuaian hasil analisis yang disebabkan oleh keadaan sampel maka diperlukan proses penyiapan sampel melalui pemisahan dari pengganggunya.

Dalam larutan HNO_3 atau HCl konsentrasi tinggi, uranium(VI) dan plutonium(IV) membentuk senyawa kompleks anion, yang mempunyai sifat kimia yang berbeda. Sebagian besar ion yang ada di dalam larutan elemen bakar bersifat kation(IV). Perbedaan tersebut akan memudahkan pemisahan uranium dari ion lainnya, dengan menggunakan metode penukar anion. Pemisahan uranium dengan metode kolom penukar anion menyebabkan kompleks uranium akan terserap pada fase padat yang bersifat kation, sedangkan ion lain akan lolos sebagai fase cair (rafinat). Adapun cara untuk memperoleh kondisi pemisahan uranium yang tepat, sehingga diperoleh uranium yang siap analisis, perlu dilakukan penelitian tentang efektifitas pemisahan dan pengambilan uranium dari larutan uranil nitrat. Proses penukar anion yang digunakan dilakukan dengan berbagai konsentrasi eluen (dalam hal ini konsentrasi HCl) dan berat resin.

Pemungutan uranium yang terkandung di dalam uranil nitrat dimasukkan ke dalam resin dowex 1x8 Cl pada kolom penukar anion. Uranium akan terikat di dalam resin dan isotop lainnya akan keluar dari kolom penukar anion sebagai rafinat. Radionuklida ^{235}U yang terikat resin di dalam kolom kemudian dielusi sehingga diperoleh rafinat uranium. Selanjutnya rafinat uranium tersebut dikenakan proses elektrodeposisi untuk dapat dianalisis dengan spektrometer- α .

Analisis uranium menggunakan metoda elektrodeposisi didasarkan kepada proses penguraian suatu larutan elektrolit yang dialirkan arus melalui dua buah elektrode yang terpolarisasi, sehingga terjadi proses pengendapan pelapisan logam secara elektrokimia. Cara pengendapan ini memerlukan arus listrik searah. Bila listrik mengalir antara dua elektrode (anoda dan katoda) di dalam larutan konduktor/larutan elektrolit, maka akan terjadi reaksi kimia pada permukaan elektrode tersebut. Pada fenomena ini kation bergerak menuju katoda dan anion menuju anoda. Basis utama kinetika elektrodeposisi adalah hukum Faraday, yaitu

total perubahan kimia (jumlah logam yang terd deposisi berupa endapan uranium pada elektrodeposisi) sebanding dengan besar arus yang lewat.

Dalam proses elektrodeposisi, cuplikan yang dianalisis dibuat dalam bentuk lapisan tipis dan rata pada permukaan planset. Apabila cuplikan tidak cukup tipis dan rata, maka zarah- α pada lapisan bagian bawah (dalam) akan mengalami penurunan tenaga yang berbeda-beda menurut tebal bahan/lapisan yang dilaluinya. Fenomena ini disebut efek serapan diri (*self absorption*), sehingga zarah-zarah α yang semula mempunyai tenaga sama akan terdeteksi oleh detektor menjadi tidak sama, akibatnya signal pulsa yang sampai ke penganalisis salur ganda (*multiple channel analyser*) tingginya menjadi tidak sama pula. Hal ini nampak pada pelebaran spektrum zarah- α . Untuk membuat cuplikan yang tipis dan rata dapat dilakukan dengan cara elektrodeposisi^[3]

Selanjutnya endapan yang terbentuk pada permukaan planset diukur menggunakan spektrometer- α . Spektrometer- α digunakan untuk menentukan radionuklida pemancar zarah- α dengan jenis detektor semikonduktor sawar muka silikon (*surface barrier detector*) yang mempunyai resolusi tinggi. Zarah- α merupakan suatu zarah yang terdiri atas dua proton dan neutron, sehingga zarah- α tersebut mempunyai massa yang relatif besar akibatnya sangat mudah berinteraksi dengan materi secara efektif. Oleh sebab itu analisis radiasi ini dilakukan dalam ruang yang divakumkan dan mempunyai energi yang tinggi dalam orde MeV. Sifat zarah- α yang demikian ini menimbulkan permasalahan tersendiri dalam penyediaan cuplikan untuk pencacahan. Analisis radionuklida pemancar- α didasarkan pada analisis spektrum yang dihasilkan dari pencacahan radiasi- α sampel. Radiasi yang dipancarkan oleh sampel bersifat diskrit pada energi tertentu. Penetapan energi pada spektrometer- α dilakukan dengan menentukan kesetaraan nomer salur terhadap energi dengan mengukur standar AMR-43, hal ini digunakan untuk analisis secara kualitatif. Pencacahannya tidak dipengaruhi oleh peristiwa radiasi lain sehingga efisiensi detektor sawar muka silikon dianggap sama untuk berbagai macam tenaga zarah alfa. Untuk mengetahui jumlah isotop uraniumnya digunakan bahan standar yang

sudah diketahui jumlahnya sesuai dengan sertifikat yang ada di bahan standar.

METODE

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah larutan uranil nitrat dari PEB U_3Si_2 -Al densitas uranium 2,96 gU/cm³ pasca iradiasi yang sudah dipisahkan isotop Cs-nya, larutan standar campuran AMR 43 (²³⁹Pu, ²⁴¹Am, ²⁴⁴Cm), larutan standar U_3O_8 20% ²³⁵U (²³⁸U, ²³⁵U, ²³⁴U, ²³⁰U) bersertifikat, resin dowex 1x8 CI 100-200 mesh, HCl, HNO₃, (NH₄)₂SO₄, NH₄OH, aquadest.

Peralatan yang digunakan adalah kolom penukar anion, spektrometer- α EG & G ORTEC, alat elektrodeposisi, planset stainless steel, pemanas listrik, timbangan analitik, gelas beker, pipet ependorff.

Cara kerja dibagi menjadi 3 tahapan, yaitu :

1. Penyiapan larutan sampel

Larutan uranil nitrat dari PEB U_3Si_2 -Al densitas uranium 2,96 g/cm³ pasca iradiasi yang sudah dipisahkan isotop Cs-nya dipipet 1 mL, kemudian ditempatkan dalam gelas beker dan dipanaskan hingga mendekati kering. Selanjutnya ditambah larutan HNO₃ 3 M dan 8 M dan dipanaskan hingga mendekati kering. Pada larutan ini di tambah 50 μ L larutan FeSO₄ 0,1 M dan dipanaskan hingga mendekati kering kemudian ditambah 1 mL NHO₃ 16 M dan aquadest sampai volumenya menjadi 2,375 mL.

2. Pemisahan radionuklida ²³⁵U

Proses pemungutan ²³⁵U dilakukan didalam kolom penukar anion. Ke dalam kolom dimasukkan resin dowex 1x8 CI dengan berat 1,2 g yang telah diaktivasi menggunakan HCl 4 M selama 3 jam, laju alir diatur 0,5 mL/menit. Kemudian dipipet 200 μ L larutan sampel dan dimasukkan ke dalam kolom resin kemudian dibiarkan selama 1 jam. Setelah 1 jam sebanyak 30 ml larutan HCl 4 M dialirkan ke dalam resin^[ASTM, 1992]. Efluen yang keluar ditampung dalam gelas beker dan dipanaskan hingga mendekati kering dengan HNO₃ 6M (efluen a). Radionuklida ²³⁵U yang terikat di dalam resin dielusi menggunakan aquadest hangat suhu 50°C. Efluen yang keluar ditampung dalam gelas beker dan dipanaskan hingga mendekati kering dengan HNO₃ 6M (efluen b). Larutan efluen (a) dan (b) kemudian dielektrodeposisi menggunakan larutan

buffer $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ dengan arus 1,2 ampere dan tegangan 6,2 volt selama 2 jam. Endapan yang menempel di planset kemudian dikeringkan menggunakan aseton dan udara atmosfer.

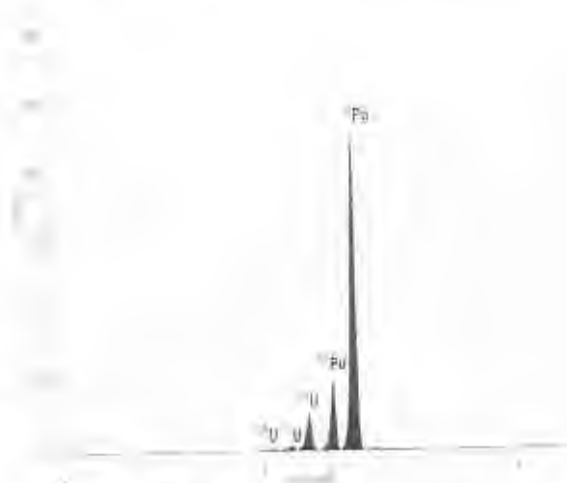
Pengukuran dengan spektrometer- α

Pengukuran dilakukan terhadap standar AMR-43, larutan standar U_3O_8 20% ^{235}U bersertifikat yang telah dilakukan proses elektrodeposisi serta planset sampel efluen radionuklida ^{235}U hasil pemisahan dengan metode penukar ion. Pengukuran radionuklida ^{235}U dilakukan dengan menggunakan spektrometer- α dengan waktu cacah 20000 detik. Hasil pengukuran berupa spektrum akan dievaluasi sehingga diperoleh kandungan radionuklida ^{235}U di dalam sampel.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengukuran standar AMR-43 dimaksudkan untuk analisis secara kualitatif dalam spektrometer- α yang didasarkan pada penentuan tenaga puncak-puncak pada spektrum- α . Tenaga zarah alfa tertentu akan pancarkan oleh radionuklida tertentu. Kalibrasi efisiensi detektor sawar muka silikon dianggap sama untuk berbagai macam tenaga zarah alfa. Besarnya efisiensi detektor- α adalah 16% digunakan untuk mengetahui kandungan radionuklida ^{235}U di dalam sampel EB $\text{U}_3\text{Si}_7\text{-Al}$ densitas $2,96 \text{ gU/cm}^3$ pasca radiasi. Larutan standar U_3O_8 20% ^{235}U bersertifikat digunakan untuk mengetahui efisiensi proses elektrodeposisi yang dilakukan. Nilai Efisiensi elektrodeposisi diperoleh sebesar 78,74%, angka ini optimum mengingat proses yang dilakukan sudah memperhitungkan faktor kandungan radionuklida ^{235}U dan proses elektrodeposisi.

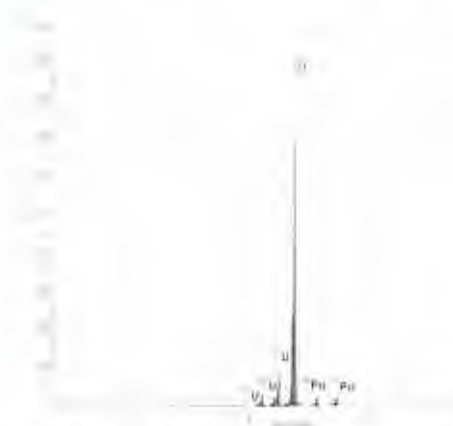
Hasil pencacahan radionuklida dari sampel yang telah dipisahkan dari pengotor terutama hasil belah dan telah dikenakan proses elektrodeposisi (Gambar 1) terlihat ada 5 spektrum isotop U dan 2 isotop Pu pada energi ^{238}U ($E = 4,194 \text{ MeV}$), ^{235}U ($E = 4,397 \text{ MeV}$), ^{234}U ($E = 4,777 \text{ MeV}$), ^{239}Pu ($E = 5,155 \text{ MeV}$), ^{238}Pu ($E = 5,486 \text{ MeV}$) [Aslina *ftc*, Ginbig, 2012].



Gambar 1. Spektrum isotop uranium dan plutonium di dalam sampel uranil nitrat awal

Pada Gambar 1 terlihat bahwa di dalam sampel uranil nitrat mengandung isotop uranium dan plutonium. Puncak spektrum plutonium lebih tinggi dibandingkan dengan puncak-puncak radioisotop uranium. Keadaan ini disebabkan karena waktu paro plutonium sangat pendek dibandingkan dengan waktu paro ^{235}U (^{239}Pu $2,41 \cdot 10^4$ tahun, ^{235}U $7,04 \cdot 10^8$ tahun). Hal ini akan menyebabkan kesalahan dalam pembacaan spektrum, sehingga untuk mendapatkan kandungan radionuklida ^{235}U secara akurat perlu dilakukan pemisahan.

Pemisahan uranium dan plutonium didasarkan pada prosedur ASTM C1411-01. Dalam hal ini isotop uranium diubah dari bentuk kation menjadi bentuk anion menggunakan HCl dan selektif dengan jenis resin dowex $1 \times 8 \text{ CF}$. Aquadest hangat dipakai sebagai bahan eluen yang dapat memperbesar pori resin sehingga uranium yang terikat di dalam resin dapat terlepas lebih banyak. Hasil efluen dilakukan proses elektrodeposisi, dan diperoleh endapan yang menempel pada planset diukur menggunakan spektrometer- α . Hasil pemisahan ini menunjukkan perbandingan tinggi puncak spektrum radioisotop uranium lebih tinggi dari tinggi puncak radioisotop plutonium. Radioisotop plutonium keluar lebih dahulu pada elusi pertama menggunakan HCl sedangkan radioisotop uranium yang terikat resin keluar pada elusi kedua menggunakan aquadest hangat. Hal ini ditunjukkan dalam Gambar 2.

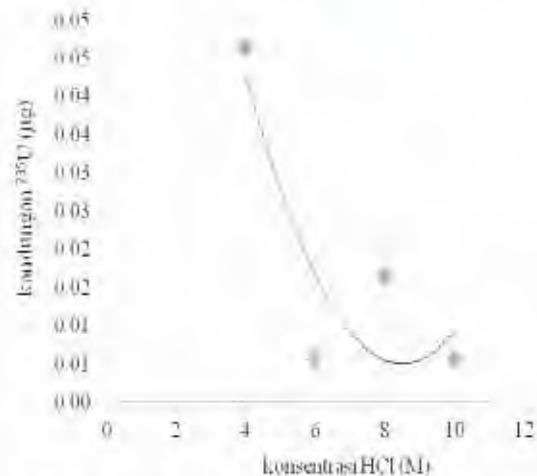


Gambar 2. Spektrum eluen isotop uranium dan plutonium setelah melalui kolom penukar anion

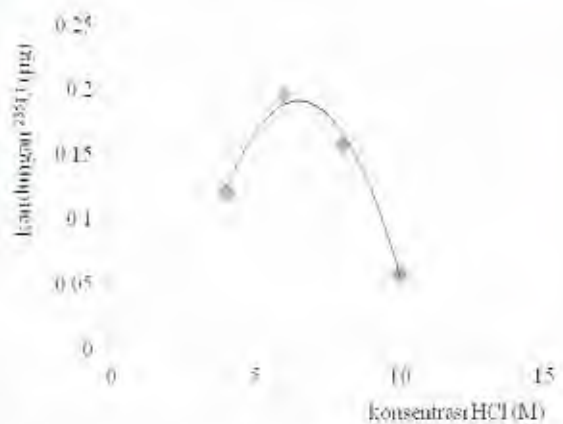
Pengaruh konsentrasi HCl terhadap efektifitas pemisahan diarahkan pada pemisahan antara uranium dengan plutonium di dalam sampel. Fraksi eluen yang sama dan konsentrasi yang lebih encer diharapkan dapat melepaskan uranium secara maksimum yang terikat dengan resin. Konsentrasi HCl optimum yang diperoleh untuk pemisahan ini adalah 6 M, hal ini dapat terlihat dari kandungan radionuklida ^{235}U yang terikat dalam elusi pertama lebih kecil sebesar 0,0055 g dan pada elusi kedua sebesar 0,1966 g. Adapun hasil hubungan antara konsentrasi HCl dengan kandungan ^{235}U dapat dilihat pada Tabel 1, Gambar 3-4.

Tabel 1. Hubungan antara konsentrasi HCl dengan kandungan ^{235}U

No	Konsentrasi HCl (M)	Proses	Kandungan ^{235}U (μg)
1	4	elusi-1	0,0464
		elusi-2	0,1201
2	6	elusi-1	0,0055
		elusi-2	0,1966
3	8	elusi-1	0,0164
		elusi-2	0,1584
4	10	elusi-1	0,0055
		elusi-2	0,0573



Gambar 3. Hubungan antara konsentrasi HCl dengan kandungan ^{235}U pada elusi-1



Gambar 4. Hubungan antara konsentrasi HCl dengan kandungan ^{235}U pada elusi-2

Tabel 2 menunjukkan pengaruh berat resin terhadap kandungan radionuklida ^{235}U yang terlepas pada elusi kedua. Hasil elusi menggunakan aquadest hangat dalam kolom menunjukkan bahwa eluen mengandung uranium lebih banyak dibandingkan dengan kandungan uranium dalam eluen HCl. Semakin berat resin yang digunakan ternyata tidak bisa memisahkan radionuklida ^{235}U secara maksimum pula. Ada batas optimum resin untuk bisa menangkap dan melepaskan radionuklida ^{235}U secara maksimum. Berat resin yang optimum untuk pemisahan isotop uranium adalah 1,2 g, dan kandungan radionuklida ^{235}U yang terdeteksi pada elusi pertama dan kedua sebesar 0,0055 μg dan 0,1966 μg .

Tabel 2. Hubungan antara berat resin dengan kandungan ^{235}U

No	Berat resin (g)	Proses	Kandungan ^{235}U (μg)
1	1,0	elusi-1	0,0191
		elusi-2	0,0901
2	1,2	elusi-1	0,0055
		elusi-2	0,1966
3	1,5	elusi-1	0,0137
		elusi-2	0,0956
4	2,5	elusi-1	0,0137
		elusi-2	0,1065

Pemisahan radionuklida ^{235}U di dalam sampel larutan uranil nitrat bebas isotop Cs menggunakan kolom penukar anion diperoleh kondisi optimum dengan konsentrasi HCl 6 M, dan berat resin dowex 1x8 Cl yang digunakan sebesar 1,2 g. Apabila kandungan radionuklida ^{235}U di kedua proses elusi dijumlahkan diperoleh sebesar 0,2021 μg . Kandungan radionuklida ^{235}U sebesar 0,2021 μg merupakan jumlah kandungan radionuklida ^{235}U yang diperoleh pada sampel 200 μL uranil nitrat. Jumlah ini lebih sedikit dibandingkan dengan kandungan radionuklida ^{235}U pada larutan uranil nitrat awal (sebelum proses penukar anion) sebesar 0,2785 μg . Hal ini menunjukkan bahwa ada selisih berat radionuklida ^{235}U sebesar 0,0764 μg atau 27,4% yang dimungkinkan masih terikat kuat di dalam resin.

Kandungan radionuklida ^{235}U yang di dalam 200 μL sampel larutan uranil nitrat bebas isotop Cs sebesar 0,1966 μg atau setara dengan 743,4 μg didalam 0,036 g sampel PEB $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ densitas 2,96 g/cm^3 pasca iradiasi.

KESIMPULAN

Analisis radionuklida ^{235}U pada larutan uranil nitrat hasil pelarutan PEB $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ pasca iradiasi menggunakan metode penukar anion dapat dilakukan dengan baik. Kondisi optimum pada penelitian ini adalah konsentrasi HCl yang digunakan sebesar 6 M dan berat resin dowex 1x8 Cl- sebesar 1,2 g. Kandungan radionuklida ^{235}U dalam 0,036 g PEB $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ densitas 2,96 g/cm^3 pasca iradiasi diperoleh sebesar 743,4 μg .

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada Ir. Aslina Br Ginting dan Sutri Indaryati atas masukan, diskusi serta kerja

samanya di laboratorium Fisiko Kimia PTBBN BATAN.

DAFTAR PUSTAKA

1. Kihsoo Joe, Young-Shin Jeon, Jung-Suck Kim, Sun-Ho Han, Jong-Gu Kim, and Won-Ho Kim, *Separation of Burnup Monitors in Spent Nuclear Fuel Samples by Liquid Chromatography*, *Bulletin of the Korean Chemical Society*, vol. 26, No. 4, page 569-574., (2005).
2. Jung Suk Kim, Young Shin Jeon, Kwang Soon Choi, Byung Chul Song, Sun Ho Han and Won Ho Kim, *Burnup Measurement of Spent $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ Fuel by Chemical Method Using Neodymium Isotope Monitors*, *Journal of Korea Nuclear Society*, vol. 33, No. 4, page 375-385.,(2001).
3. R. Didiek Herhady, Analisis Hasil Uranium Teriradiasi Dengan Cara Spektrometri- α , Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Bahan Murni dan Instrumentasi Nuklir, Yogyakarta, (1985).
4. American Standard Test Methods, *Standar Practice for The Ion Exchange Separation of Uranium and Plutonium Prior to Isotopic Analysis*: ASTM No C-1411-01, Vol. 12.01., (1992).
5. Aslina Br. Ginting, Dian Anggraini, Boybul, Arif Nugroho, dkk, "Pengembangan Metoda Pengujian Fisiko Kimia Bahan Bakar Nuklir Pasca Iradiasi", *Dokumen Teknis Pusat Teknologi Bahan Bakar nuklir Nasional*, Jakarta, (2012).