

Urania

Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir

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



OPTIMASI PARAMETER METODE PEMISAHAN RADIONUKLIDA ^{95}Zr DALAM LARUTAN PELAT ELEMEN BAKAR $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ TERIRADIASI

Yanlinastuti¹, Noviarty¹, Iis Haryati¹, Ariyanti Saputri¹, Boybul¹,
Supardjo¹, Erlina Noerpitasari¹, Aslina Br. Ginting¹

¹Pusat Riset dan Teknologi Bahan Bakar Nuklir – BRIN

Kawasan PUSPIPTEK Serpong Gd. 20 Tangerang Selatan, Banten 15314

e-mail: yanlinastuti@batan.go.id

(Naskah diterima: 28–09–2021, Naskah direvisi: 10–10–2021, Naskah disetujui: 24–10–2021)

ABSTRAK

OPTIMASI PARAMETER METODE PEMISAHAN RADIONUKLIDA ^{95}Zr DALAM LARUTAN PELAT ELEMEN BAKAR $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ TERIRADIASI. Radionuklida ^{95}Zr adalah salah satu radionuklida hasil belah pemancar radiasi- γ dan berumur paruh pendek sehingga dapat digunakan sebagai indikator *burn up*. Dalam pelat elemen bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ teriradiasi terdapat beberapa radionuklida hasil belah yang memancarkan radiasi α , β dan γ sehingga pada saat pengukuran menggunakan spektrometri- γ , radionuklida ini saling mengganggu mengakibatkan hasil pengukuran tidak akurat. Oleh sebab itu, perlu dilakukan pemisahan ^{95}Zr sehingga pada saat pengukuran dengan spektrometer- γ diperoleh hasil yang akurat. Tujuan penelitian ini untuk mendapatkan parameter yang optimum terhadap pemisahan ^{95}Zr dalam larutan pelat elemen bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ teriradiasi dengan metode kolom penukar ion menggunakan resin Dowex $1x-8\text{Cl}^-$ diameter 100-200 mesh. Parameter optimum yang diperoleh selanjutnya digunakan untuk pemisahan ^{95}Zr dalam larutan pelat elemen bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ teriradiasi. Dari hasil penelitian diperoleh parameter optimum keasaman H_2SO_4 pada umpan dengan konsentrasi 0,5 M, keasaman H_2SO_4 untuk elusi konsentrasi 1,0 M dengan *recovery* 98,20%. Berat resin untuk mengikat radionuklida ^{95}Zr sebanyak 2,0 g dengan *recovery* 78,76%; volum umpan yang dibutuhkan sebanyak 50 μL dengan *recovery* 96,90% dan kecepatan alir sebesar 0,1 mL/menit dengan *recovery* 96,72%. Parameter optimum tersebut digunakan untuk pemisahan larutan pelat elemen bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ teriradiasi dengan kode *Bottom* (B), *Middle* (M) dan *Top* (T). Hasil pengukuran didapat rerata *recovery* pemisahan ^{95}Zr masing-masing untuk kode B-1= 75,078%; B-2= 81,401%; M1=76,850%; M-2=83,806%; T-1=84,433%; dan T-2=81,728% dengan keberterimaan nilai CV *repeatability* lebih kecil dibandingkan dengan nilai CV Horwitz.

Kata kunci: kolom penukar ion, $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ teriradiasi, radionuklida ^{95}Zr , spektrometer- γ , uji Horwitz.

ABSTRACT

PARAMETER OPTIMIZATION IN THE SEPARATION OF ^{95}Zr RADIONUCLIDE IN IRRADIATED $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ FUEL ELEMENT PLATE SOLUTION. Radionuclide of ^{95}Zr is one of the γ -radiation emitter radionuclides which has a short half-life so that it can be used as an indicator of burn up. In the irradiated $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ fuel element plate there are several radionuclides of fission products emitting α , β and γ , and when measuring radiation using γ -spectrometry, these radionuclides may interfere with each other resulting in inaccurate measurement results. Therefore, it is necessary to separate ^{95}Zr for better accuracy in the measurement of γ -radiation with a γ -spectrometer. The purpose of this study was to obtain the optimum parameters for the separation of ^{95}Zr in $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ fuel element plate solution by ion exchange column method using Dowex 1x-8Cf resin of 100-200 mesh in diameter. The optimum parameters obtained were then used for the separation of ^{95}Zr in a solution of irradiated $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ fuel element. It was found that the optimum parameter of acidity of H_2SO_4 in the feed was a concentration of 0.5 M, and the acidity of H_2SO_4 for elution was 1.0 M with a recovery of 98.20%. The weight of the resin to bind ^{95}Zr radionuclide was 2.0 g with a recovery of 78.76%. The required feed volume was 50 μL with a recovery of 96.90% and the optimized flow rate was 0.1 mL/minute with a recovery of 96.72%. The optimum values were used for the separation of the $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ fuel element plate solution irradiated with the code of Bottom (B), Middle (M) and Top (T). The measurement results show that the mean recovery of separation was ^{95}Zr for code B-1 = 75.078%; B-2 = 81.401%; M1 = 76.850%; M-2 = 83.806%; T-1 = 84.433%; and T-2 = 81.728% with the acceptability of the CV repeatability value smaller than the CV Horwitz value.

Keywords: ion exchange column, irradiated $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$, ^{95}Zr radionuclide, γ -spectrometer, Horwitz test

Optimasi Parameter Metode Pemisahan Radionuklida ^{95}Zr Dalam Larutan Pelat Elemen Bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ Teriradiasi (Yanlinastuti, Noviarty, Iis Haryati, Ariyanti Saputri, Boybul, Supardjo, Erlina Noerpitasari, Aslina Br. Ginting)

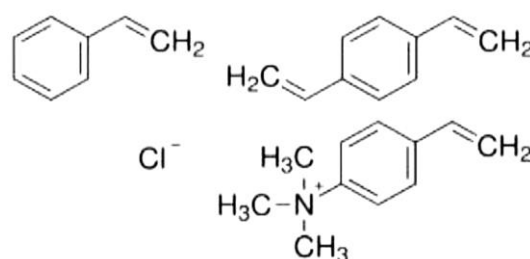
PENDAHULUAN

Penelitian pengembangan bahan bakar nuklir berupa tipe pelat $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ yang disusun berupa elemen bakar yang telah diradiasi di Reaktor Serba Guna G.A.Siwabessy (RSG-GAS) hingga *burn up* 60%. Bahan bakar nuklir $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ yang telah dibuat bertujuan untuk menggantikan bahan bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ densitas $2,96 \text{ gU/cm}^3$ yang pembuatannya sejak tahun 1992 sampai sekarang telah digunakan oleh RSG-GAS hingga *burn up* 56%. Dengan adanya peningkatan densitas uranium dari $2,96$ menjadi $4,8 \text{ gU/cm}^3$ diharapkan dapat meningkatnya kandungan radionuklida ^{235}U yang terdapat dalam dalam bahan bakar menjadi lebih tinggi, dengan demikian mengakibatkan bertambahnya siklus dari pengoperasian reaktor lebih lama, yang dapat mengurangi penggantian bahan bakar (*refuelling*) agar lebih efisiensi dan ekonomis dengan meningkatnya daur bahan bakar[1]. Dengan adanya pengaruh iradiasi terhadap unjuk kerja bahan bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ saat berlangsung dalam teras RSG-GAS sampai *burn up* 60% perlu dilakukan pengujian bahan bakar teriradiasi dengan cara tidak merusak dan merusak di dalam *hotcell* Instalasi Radiometalurgi (IRM). Hasil uji bahan bakar teriradiasi yang dilakukan secara tidak merusak menunjukkan bahwa kinerja bahan bakar tersebut sangat baik karena tidak diperoleh adanya cacat dan sifat anomali pada bahan bakar tersebut[2],[3]. Sementara itu, dari uji pasca iradiasi secara merusak telah dilakukan analisis fisikokimia melalui pemisahan radionuklida hasil belah cesium dan uranium yang digunakan dalam perhitungan *burn up*. Besarnya *burn up* pelat elemen bakar (PEB) $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ diperoleh sebesar $55,059 \pm 0,998\%$ [4].

Bahan bakar teriradiasi menghasilkan radionuklida hasil belah yang dapat digunakan sebagai indikator *burn up* dengan umur paruh ($T^{1/2}$) panjang dan pendek. Radionuklida yang mempunyai waktu paruh panjang diantaranya adalah ^{235}U , ^{239}Pu , ^{148}Nd , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{90}Sr dan ^{143}Ce , sedangkan radionuklida mempunyai waktu paruh pendek adalah ^{103}Ru , ^{95}Zr dan ^{95}Nb [1],[5]. Pada penelitian sebelumnya telah dilakukan penghitungan *burn up* menggunakan radionuklida ^{137}Cs masing-masing waktu paruh 30,17 tahun dan ^{235}U waktu paruh

$7,04 \times 10^8$ tahun dan diperoleh *burn up* sebesar $55,059 \pm 0,998\%$ [4]. Untuk melengkapi metode pengembangan penentuan *burn up* sebelumnya, maka pada penelitian ini dilakukan penentuan *burn up* berdasarkan hasil belah dengan waktu paruh pendek menggunakan radionuklida ^{95}Zr . Peneliti dari Chile C. Perteda, et.al penentuan *burn up* menggunakan radionuklida ^{95}Zr cukup efisien untuk diterapkan dan sangat mudah pengukurannya dengan menggunakan spektrometer gamma[6],[7]. Dalam larutan pelat elemen bakar teriradiasi mengandung radionuklida hasil belah yang berpengaruh saat pengukuran berlangsung. Berdasarkan hal tersebut, perlu dilakukan pemisahan radionuklida ^{95}Zr dari radionuklida hasil belah yang terdapat dalam larutan PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ teriradiasi. Pemisahan dilakukan menggunakan kolom penukar ion dengan resin dowex.

Metode kolom penukar ion untuk pemisahan zirkonium mempunyai beberapa kelebihan diantaranya lebih sederhana jika dibandingkan dengan cara lainnya, bisa memisahkan unsur dengan konsentrasi rendah (*trace element*) serta menghasilkan limbah dalam jumlah sedikit[8]. Resin penukar ion yang digunakan berupa campuran senyawa kimia ionik, dimana proses pemisahannya terjadi berdasarkan besar kapasitas penukar ion. Kekuatan resin pada pertukaran ion seimbang dengan banyaknya gugus aktif yang terikat pada resin. Resin Dowex yang digunakan berbentuk bahan organik yang sulit larut dan berisikan kumpulan berbentuk polimer hidrokarbon ($\text{Res-N}^+(\text{CH}_3)_3$ sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 1.

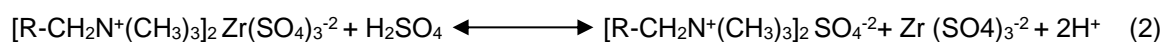


Gambar 1. Komposisi unsur resin penukar anion-Cl[9].

Dalam larutan mengandung gugus fungsional berisi ion yang dapat dipertukarkan dengan ion lainnya. Resin penukaran anion

mempunyai gugus amine yang mengandung ion klorida (Cl⁻) atau ion hidroksil (OH⁻)[9]. Metode yang digunakan dalam pemisahan ⁹⁵Zr adalah kolom penukar anion dengan resin Dowex yang terdiri dari 2 (dua) bentuk umpan. Umpan pertama adalah larutan Zr-sulfat yang dimasukkan ke dalam kolom pertama dan umpan kedua adalah jenis resin Dowex 1x8Cl sebagai fase diam. Resin Dowex 1-X8Cl merupakan jenis resin basa kuat yang mempunyai gugus aktif berlandaskan polystyrene dengan matriks R-CH₂N⁺(CH₃)₃ (resin trimethyl alkyl atau benzyl ammonium type 1) bermuatan Cl yang berupa bola[8,10]. Berdasarkan pustaka[8,10] pemilihan umpan

dalam bentuk Zr-sulfat karena mempunyai faktor pemisah atau koefisien distribusi (Kd) yaitu 7 dibandingkan dalam bentuk Zr-klorida yang mempunyai faktor pisah 1,5. Selanjutnya Zr-sulfat lebih konstan dan tidak mudah mengalami perubahan dibandingkan dengan Zr-Cl. Untuk mendapatkan Zr(SO₄)₃⁻² perlu dilakukan pembuatan zirkonium dalam larutan H₂SO₄ untuk menghasilkan Zr(SO₄)₂.4H₂O, agar zirkonium dapat dipertukarkan dengan resin penukar anion diperlihatkan pada reaksi yang ditunjukkan pada persamaan 1. Selanjutnya, kompleks tersebut dielusi menggunakan H₂SO₄ berdasarkan reaksi pada persamaan 2.



Zirkonium yang dibuat berbentuk anion kompleks berupa ZrO(SO₄)₂⁻² atau Zr(SO₄)₃⁻² atau dalam bentuk anion lainnya. Resin Dowex 1-x8 dapat mengikat lebih kuat terhadap zirkonium anion kompleks, sehingga zirkonium secara mudah dapat terpisah dengan cara elusi yang lebih tinggi menggunakan konsentrasi H₂SO₄[10]. Hasil penelitian sebelumnya[12] telah diperoleh optimasi parameter keasaman umpan 3M, berat resin 1,5 g diperuntukan mengikat radionuklida ⁹⁵Zr, kecepatan alir 0,5 mL/menit dan keasaman elusi yang digunakan untuk melepaskan radionuklida terikat pada resin, pemisahan zirkonium dalam larutan PEB U₃Si₂/Al densitas 2,96 gU/cm³ pra iradiasi yang dan pengukurannya menggunakan spektrofotometri UV-Vis. Pada penelitian lebih lanjut digunakan larutan umpan dari PEB U₃Si₂/Al densitas 4,8 gU/cm³ teriradiasi yang banyak menghasilkan radionuklida-radionuklida, radionuklida ⁹⁵Zr salah satunya, radionuklida tersebut dapat dilakukan pengukurannya menggunakan beberapa peralatan diantaranya ICP-MS dan spektrometer gamma, berhubung di Instalasi Radiometalurgi belum mempunyai peralatan tersebut, sehingga untuk pengukurannya menggunakan spektrometer gamma.

Pemisahan radionuklida ⁹⁵Zr dari radionuklida hasil belah yang terdapat dalam bahan bakar setelah di iradiasi diawali dengan menentukan beberapa parameter pemisahan. Parameter pemisahan yang digunakan pada larutan potongan PEB U₃Si₂/Al bagian *Bottom* yaitu dengan jumlah umpan bervariasi mulai

50; 75; 100 dan 150 µL dalam bentuk sulfat konsentrasi 0,0; 0,5; 1,0; 2,0; dan 3,0 M yang dialirkan pada kolom penukar anion dengan kecepatan alir dari 0,1; 0,3; 0,5 dan 0,9 mL/menit. Radionuklida ⁹⁵Zr yang terikat pada resin, selanjutnya dielusi menggunakan H₂SO₄ dengan konsentrasi keasaman 1,0; 2,0; 3,0 dan 4,0 M, dilanjutkan dengan berat resin 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 dan 2,5 g sebagai fasa diam, pengukurannya menggunakan spektrometer gamma. Spesifikasi alat spektrometer gamma Merk Canberra dengan program Genie 2000 dan detektor HPGe. Hasil pengukuran radionuklida ⁹⁵Zr menggunakan spektrometer gamma diperoleh spektrum yang selanjutnya dapat mengetahui parameter optimum pemisahan ⁹⁵Zr menggunakan kolom penukar anion.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat dalam pengembangan metode, terutama pada pemisahan setelah mendapatkan optimasi parameter radionuklida ⁹⁵Zr yang digunakan dalam larutan PEB U₃Si₂/Al densitas 4,8 gU/cm³ teriradiasi dengan cara kolom penukar ion menggunakan resin Dowex. Pengukuran dan penentuan berat radionuklida ⁹⁵Zr dalam larutan PEB U₃Si₂/Al tersebut dilakukan dengan menggunakan spektrometer gamma. Dari berat radionuklida ⁹⁵Zr yang diperoleh pada energi tertentu selanjutnya dilakukan perhitungan presisi. Presisi adalah ukuran yang menunjukkan derajat kesesuaian hasil uji yang diperoleh dari beberapa kali pengulangan pengukuran (*Repeatability*). *Repeatability* adalah nilai ketepatan yang

Optimasi Parameter Metode Pemisahan Radionuklida ^{95}Zr Dalam Larutan Pelat Elemen Bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ Teriradiasi (Yanlinastuti, Noviarty, Iis Haryati, Ariyanti Saputri, Boybul, Supardjo, Erlina Noerpitasi, Aslina Br. Ginting)

didapat jika seluruh pengukuran dihasilkan dalam analisis pada satu periode tertentu, menggunakan sampel yang sama dan peralatan yang sama dalam laboratorium yang sama. Pengulangan pengukuran disiapkan sampel yang sama dan homogen dilakukan pengujian beberapa kali. Pengulangan pengukuran diukur dengan menghitung *Relative Standard Deviation* atau simpangan baku relatif (RSD) dari beberapa pengulangan sampel yang dilakukan. Dari nilai simpangan baku tersebut dapat dihitung nilai koefisien variannya (CV). Nilai CV yang diperoleh dari ulangan pengujian sampel (RSD) dibandingkan dengan CV Horwitz dan CV *Repeatability* berdasarkan persamaan (2)(3) dan (4)[13],[14].

$$\text{CV(RSD)} = \text{RSD} = \frac{\text{SD}}{\text{Xr}} \times 100 \quad (2)$$

SD merupakan standar deviasi kandungan sampel yang diperoleh dari pengulangan percobaan dan Xr adalah rerata *recovery* radionuklida pengulangan percobaan. Perhitungan CV Horwitz dilakukan dengan menggunakan persamaan (3).

$$\text{CV Horwitz} = 2^{-1-0,5 \log C} \quad (3)$$

C menunjukkan *recovery* rerata radionuklida ^{95}Zr dari beberapa kali pengulangan. Syarat keberterimaan dalam pengukuran dilakukan dengan mengetahui nilai CV *Repeatability* yang didapat harus lebih kecil dari 1/2 nilai CV Horwitz dengan persamaan (4) sebagai berikut.

$$\text{CV Repeatability} < 1/2 \text{ CV Horwitz} \quad (4)$$

METODOLOGI

Bahan menggunakan larutan hasil pelarutan PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ teriradiasi potongan bagian *Bottom* (B), *Middle* (M) dan *Top* (T), resin Dowex1-x8-Cl sebagai penukar anion dengan diameter 100-200 mesh, larutan H_2SO_4 pekat 97%, larutan H_2SO_4 dengan konsentrasi 0,5 sampai dengan 4,0 M. Peralatan yang digunakan adalah kolom kromatografi diameter 0,9 cm dengan tinggi 10 cm, neraca analitik, pipet volume, mikro pipet dan Spektrometer gamma.

Preparasi sampel diawali dengan memipet larutan PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ potongan *Bottom* (B), *Middle* (M) dan *Top* (T) sebanyak

1 mL kemudian diencerkan menjadi 20 mL dan selanjutnya dipipet kembali sebanyak 50 μL dan ditambahkan 2 ml air bebas mineral (ABM). Sebelum melakukan pengukuran radionuklida ^{95}Zr terlebih dahulu dilakukan kalibrasi energi spektrometer gamma menggunakan standar ^{152}Eu pada rentang energi 121,78 hingga 1408,01 keV. Spektrum yang diperoleh pada rentang energi 121,78 hingga 1408,01 keV digunakan untuk menentukan efisiensi detektor. Optimasi parameter meliputi variasi keasaman umpan pada 0,0; 0,5; 1,0; 2,0; dan 3,0 M, keasaman elusi pada proses pemisahan dilakukan dengan konsentrasi 1,0; 2,0; 3,0 dan 4,0 M, larutan PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ potongan bagian *Bottom* (B), sebagai umpan mulai 50; 75; 100 dan 150 μL , resin Dowex 1x8 variasi berat 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 dan 2,5 g dan laju alir umpan dari kolom mulai dari 0,1; 0,3; 0,5 dan 0,9 mL/menit. Resin dowex 1x8 seberat 1,5 g dimasukkan ke dalam kolom, kemudian dimasukkan larutan yang mengandung zirkonium 100 μL , dialirkan dengan kecepatan 0,5 mL/menit. Radionuklida ^{95}Zr terikat pada resin kemudian dikeluarkan dengan larutan H_2SO_4 1M, selanjutnya dialirkan dengan kecepatan 0,5 mL/menit hingga habis. Efluen radionuklida ^{95}Zr yang keluar dari kolom dianalisis menggunakan spektrometri gamma. Hasil optimasi parameter selanjutnya digunakan untuk pemisahan radionuklida ^{95}Zr dalam larutan PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ teriradiasi dengan kode *Bottom* (B), *Middle* (M) dan *Top* (T), menggunakan parameter optimum yang diperoleh yaitu larutan umpan sebanyak 50 μL ditambahkan dengan 2,0 mL H_2SO_4 0,5M, kemudian dimasukkan ke dalam kolom yang berisi resin seberat 2,0 g, dan dialirkan dengan kecepatan 0,1 mL/menit, setiap sampel dilakukan pemisahan masing-masing sebanyak 4 (empat) kali pengulangan. Radionuklida ^{95}Zr yang terikat dengan resin, kemudian dielusi menggunakan larutan H_2SO_4 1,0 M masing-masing sebanyak 2 ml secara berulang. Efluen hasil elusi ditampung kemudian dipanaskan hingga volume 2 mL, dan diukur menggunakan spektrometer gamma selama 10000 detik. Presisi dihitung berdasarkan hasil pengukuran yang berulang dengan 4 (empat) kali pemisahan, kemudian dievaluasi sehingga didapat nilai relatif standar deviasinya (RSD) nilai CV Horwitz dan CV *Repeatability* mengikuti persamaan (2),(3) dan (4).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemisahan ^{95}Zr dengan cara kolom penukar ion menggunakan resin dowex 1x8Cl⁻ dalam larutan umpan $\text{PEB U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ telah diperoleh dan efluen yang dihasilkan dapat ditunjukkan pada Gambar 2 dan 3.

Hasil kalibrasi energi menggunakan standar radionuklida ^{152}Eu dapat dilihat pada Gambar 4. Dari Gambar 4 membuktikan bahwa spektrum standar ^{152}Eu mempunyai beberapa energi dimulai dari 121,78; 244,70;

344,28; 778,90; 964,08; 1085,86; 1112,08 dan 1408,01 keV. Berdasarkan kalibrasi energi dan efisiensi detektor dilakukan pengukuran radionuklida ^{95}Zr pada energi 724,2 keV.

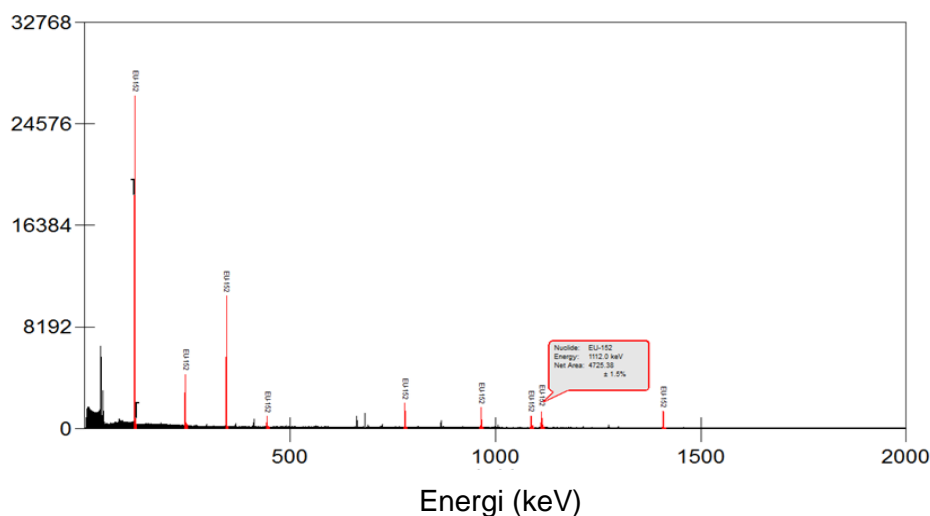
Dari hasil kalibrasi energi terhadap standar Eu-152 digunakan untuk penentuan efisiensi radionuklida ^{95}Zr pada energi 724,2 keV dan diperoleh efisiensinya sebesar 0,0021, untuk mengetahui kandungan radionuklida ^{95}Zr didalam larutan bahan bakar dapat menggunakan efisiensi tersebut.



Gambar 2. Larutan $\text{PEB U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ teriradiasi dengan kode B, M dan T



Gambar 3. Teknik pemisahan penukar ion menggunakan resin Dowex



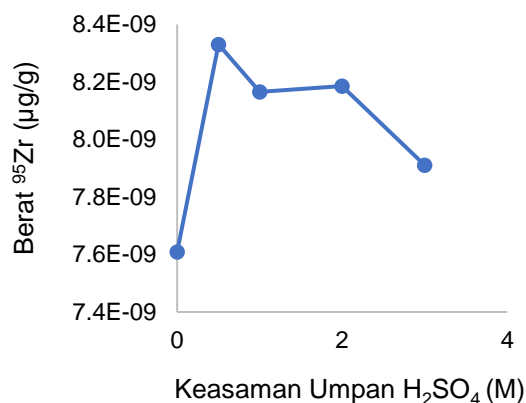
Gambar 4. Spektrum standar radionuklida ^{152}Eu pada berbagai energi

Optimasi Parameter Metode Pemisahan Radionuklida ⁹⁵Zr Dalam Larutan Pelat Elemen Bakar U₃Si₂/Al Teriradiasi (Yanlinastuti, Noviarty, Iis Haryati, Ariyanti Saputri, Boybul, Supardjo, Erlina Noerpitasari, Aslina Br. Ginting)

Hasil optimasi parameter untuk pemisahan ⁹⁵Zr dalam larutan teriradiasi terhadap bahan bakar U₃Si₂/Al densitas 4,8 gU/cm³ menggunakan larutan H₂SO₄ yang bervariasi dalam umpan, keasaman eluen untuk pengelusi, berat resin, volume umpan dan kecepatan alir diuraikan sebagai berikut.

1. Pengaruh keasaman dalam umpan

Hasil pengukuran radionuklida ⁹⁵Zr dengan variasi konsentrasi keasaman H₂SO₄ terhadap berat radionuklida ⁹⁵Zr dapat ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Pengaruh keasaman H₂SO₄ terhadap berat radionuklida ⁹⁵Zr

Gambar 5 membuktikan bahwa hubungan antara berat radionuklida ⁹⁵Zr terhadap keasaman umpan dengan variasi, 0,0; 0,5; 1,0; 2,0 dan 3,0M. Berat radionuklida ⁹⁵Zr yang diperoleh dengan variasi keasaman umpan dapat ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Evaluasi hasil pengukuran dengan berat radionuklida ⁹⁵Zr variasi keasaman umpan

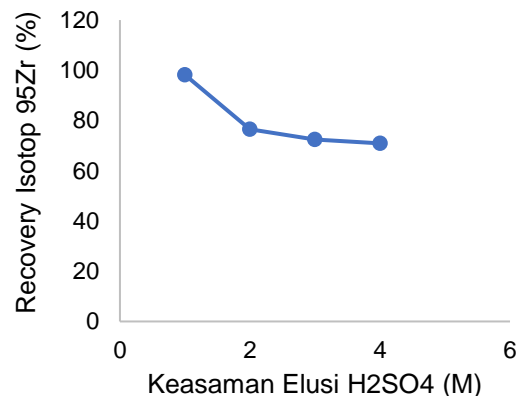
Variasi keasaman H ₂ SO ₄ (M)	Cps	Aktivitas (Bq)	Berat radionuklida (µg/g)
0,0	0,245	272,753	7,609E-09
0,5	0,272	303,084	8,331E-09
1,0	0,261	291,264	8,166E-09
2,0	0,264	294,609	8,186E-09
3,0	0,252	281,005	7,910E-09

Tabel 1 menunjukkan bahwa keasaman umpan H₂SO₄ dapat mempengaruhi berat radionuklida ⁹⁵Zr. Keasaman yang optimum terjadi pada H₂SO₄ konsentrasi 0,5M dengan berat radionuklida ⁹⁵Zr yang diperoleh sebesar

8,331E-09 µg/g. Kandungan radionuklida ⁹⁵Zr semakin menurun yang disebabkan karena adanya peningkatan konsentrasi keasaman. Hal ini disebabkan dengan bertambahnya keasaman, radionuklida ⁹⁵Zr tidak dapat terikat dengan sempurna dalam senyawa Zr(SO₄)₃⁻² sehingga dengan bertambahnya keasaman tidak memberikan hasil pengukuran radionuklida ⁹⁵Zr yang lebih berarti.

2. Pengaruh keasaman eluen untuk pengelusi

Pengaruh keasaman eluen H₂SO₄ variasi untuk elusi hasil pemisahan terhadap *recovery* radionuklida ⁹⁵Zr ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Pengaruh keasaman eluen H₂SO₄ terhadap *recovery* radionuklida ⁹⁵Zr

Gambar 6 menunjukkan hubungan antara keasaman eluen untuk elusi menggunakan H₂SO₄ variasi 1,0; 2,0; 3,0 dan 4,0 M dengan *recovery* radionuklida ⁹⁵Zr. Hasil pengukuran diperoleh *recovery* radionuklida ⁹⁵Zr disajikan pada Tabel 2.

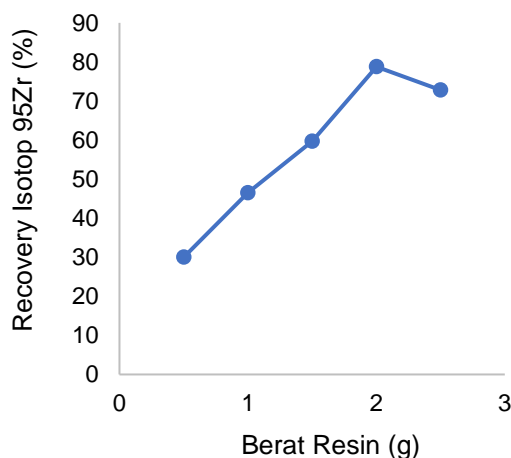
Tabel 2. Evaluasi hasil pengukuran dengan nilai *recovery* radionuklida ⁹⁵Zr variasi keasaman elusi

Variasi keasaman elusi H ₂ SO ₄ (M)	Berat radionuklida (µg/g)		<i>Recovery</i> (%)
	Sebelum pemisahan	Sesudah pemisahan	
1,0	8,275E-09	8,125E-09	98,20
2,0	8,285E-09	6,345E-09	76,58
3,0	7,894E-09	5,721E-09	72,47
4,0	7,996E-09	5,670E-09	70,91

Tabel 2 menunjukkan bahwa keasaman elusi pada resin sangat berpengaruh terhadap besarnya pemungutan ⁹⁵Zr *recovery* yang optimal diperoleh pada keasaman elusi 1 M dengan *recovery* sebesar 98,20%. Semakin tinggi keasaman H₂SO₄ untuk pengelusi diperoleh berat radionuklida ⁹⁵Zr semakin menurun, hal ini disebabkan karena kesetimbangan keasaman dalam resin tidak dapat melepaskan radionuklida ⁹⁵Zr dengan sempurna, hal ini disebabkan kemungkinan resin yang digunakan seberat 2 g, dengan demikian bila konsentrasi keasaman eluen untuk elusi dinaikkan resin tidak dapat mengikat radionuklida ⁹⁵Zr, sedangkan keasaman yang lebih kecil dari 1,0 M tidak dilakukan dalam percobaan ini.

3. Pengaruh berat resin

Pengaruh jumlah resin Dowex 1-x8 yang digunakan untuk mengikat radionuklida ⁹⁵Zr pada pemisahan menggunakan panjang kolom 10 cm berdiameter 0,9 cm ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Hubungan berat resin terhadap *recovery* radionuklida ⁹⁵Zr

Gambar 7 menunjukkan pengaruh variasi resin seberat 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 dan 2,5 g dengan *recovery* radionuklida ⁹⁵Zr. Berat resin yang digunakan sangat mempengaruhi *recovery* pemungutan radionuklida ⁹⁵Zr ditunjukkan pada Tabel 3. Tabel 3 menunjukkan bahwa semakin bertambah berat resin yang digunakan, semakin besar *recovery* ⁹⁵Zr yang diperoleh hingga berat resin 2,0 g dengan *recovery* 78,76% menggunakan diameter kolom 9 mm dan panjang 10 cm. Jika berat resin bertambah

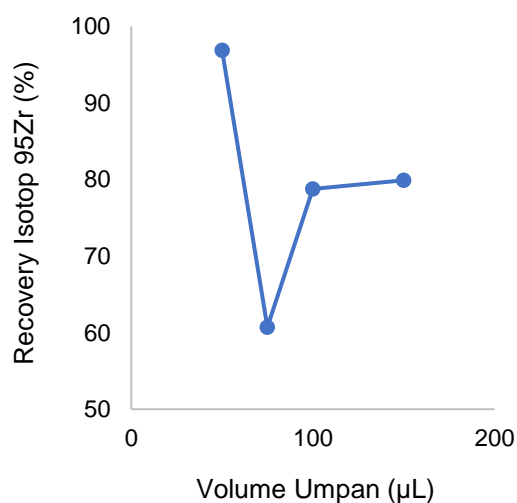
menjadi 2,5 g diperoleh *recovery* ⁹⁵Zr semakin menurun yaitu sebesar 72,79%. Dengan demikian resin tidak dapat melepaskan radionuklida ⁹⁵Zr secara maksimal, sehingga ada batasan berat resin yang mengikat radionuklida ⁹⁵Zr.

Tabel 3. Evaluasi hasil pengukuran dengan nilai *recovery* radionuklida ⁹⁵Zr variasi berat resin

Berat resin (g)	Berat radionuklida (µg/g)		<i>Recovery</i> (%)
	Sebelum pemisahan	Sesudah pemisahan	
0,5	8,633E-09	2,590E-09	30,00
1,0	7,901E-09	3,671E-09	46,46
1,5	7,374E-09	4,400E-09	59,66
2,0	6,989E-09	5,504E-09	78,76
2,5	8,436E-09	6,141E-09	72,79

4. Pengaruh volume umpan

Dalam penelitian volume umpan yang digunakan dengan variasi 50; 75; 100; dan 150 µL dengan berat resin 2,0 g sangat berpengaruh terhadap pemisahan radionuklida ⁹⁵Zr. Hasil pemisahan radionuklida ⁹⁵Zr dengan variasi volume umpan diperoleh *recovery* pemisahan ⁹⁵Zr berturut-turut sebesar 96,90; 60,71; 78,76 dan 79,90% seperti ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Hubungan pengaruh volume umpan terhadap *recovery* pemisahan ⁹⁵Zr

Optimasi Parameter Metode Pemisahan Radionuklida ⁹⁵Zr Dalam Larutan Pelat Elemen Bakar U₃Si₂/Al Teriradiasi (Yanlinastuti, Noviarty, Iis Haryati, Ariyanti Saputri, Boybul, Supardjo, Erlina Noerpitasari, Aslina Br. Ginting)

Gambar 8 menunjukkan bahwa umpan dapat mempengaruhi radionuklida ⁹⁵Zr, dari hasil diperoleh bahwa volume umpan yang baik 50 µL dengan *recovery* pemisahan ⁹⁵Zr sebesar 96,90 % dan kecepatan alir 0,1 mL/menit. Kelebihan volume umpan hingga 75 µL berakibat pada penurunan *recovery* pemisahan ⁹⁵Zr hingga 60 %. Namun demikian, meningkatnya volume umpan 100 µL hingga 150 µL menyebabkan terjadinya peningkatan *recovery* 78,76% hingga 79,90%. Hal ini menunjukkan bahwa resin dowex yang digunakan telah mengalami kejenuhan. Molekul resin bebas yang telah mengalami kejenuhan akan membentuk ion kompleks ⁹⁵Zr-resin, sehingga menurunkan penyerapan ⁹⁵Zr oleh resin. Pengaruh variasi volume umpan terhadap *recovery* pemisahan ⁹⁵Zr ditunjukkan pada Tabel 4.

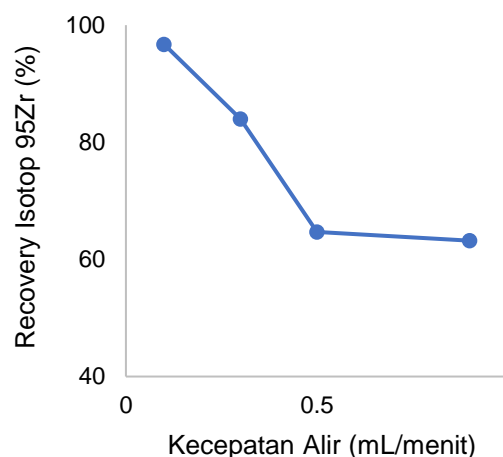
Tabel 4. Evaluasi hasil pengukuran dengan nilai *recovery* radionuklida ⁹⁵Zr variasi volume umpan

Volume sampel (µL)	Berat radionuklida (µg/g)		<i>Recovery</i> (%)
	Sebelum pemisahan	Sesudah pemisahan	
50	8,058E-09	7,808E-09	96,90
75	9,454E-09	5,740E-09	60,71
100	6,989E-09	5,504E-09	78,76
150	4,121E-09	3,293E-09	79,90

5. Pengaruh kecepatan alir

Kecepatan alir dari kolom sangat berpengaruh dalam proses pemisahan radionuklida ⁹⁵Zr. Tampak variasi kecepatan alir 0,1; 0,3; 0,5; dan 0,9 mL/menit terhadap *recovery* hasil pemisahan ⁹⁵Zr ditampilkan pada Gambar 9. Gambar 9 menunjukkan hubungan antara pengaruh variasi kecepatan laju alir dengan *recovery* pemisahan ⁹⁵Zr. Variasi kecepatan laju alir sangat penting dalam pemisahan ⁹⁵Zr menggunakan resin dowex. Gambar 9 menunjukkan bahwa semakin tinggi kecepatan alir diperoleh *recovery* pemisahan ⁹⁵Zr semakin menurun. Keseimbangan reaksi optimal terjadi pada kecepatan alir yang sangat lambat yaitu 0,1 mL/menit dengan *recovery* sebesar 96,72%. Bila kecepatan alir ditingkatkan menyebabkan resin dowex tidak dapat melepaskan radionuklida ⁹⁵Zr secara baik. Semakin

meningkat kecepatan alir semakin sedikit radionuklida ⁹⁵Zr yang terlepas dari resin yang ditunjukkan dengan menurunnya *recovery* pemisahan ⁹⁵Zr dari 96,72% menjadi 84,00 % dan menurun terus hingga 63,20% seperti ditunjukkan pada Tabel 5. Fenomena ini menunjukkan bahwa batas optimum berat resin dan kecepatan alir yang digunakan untuk pelepasan radionuklida ⁹⁵Zr dari resin secara maksimum

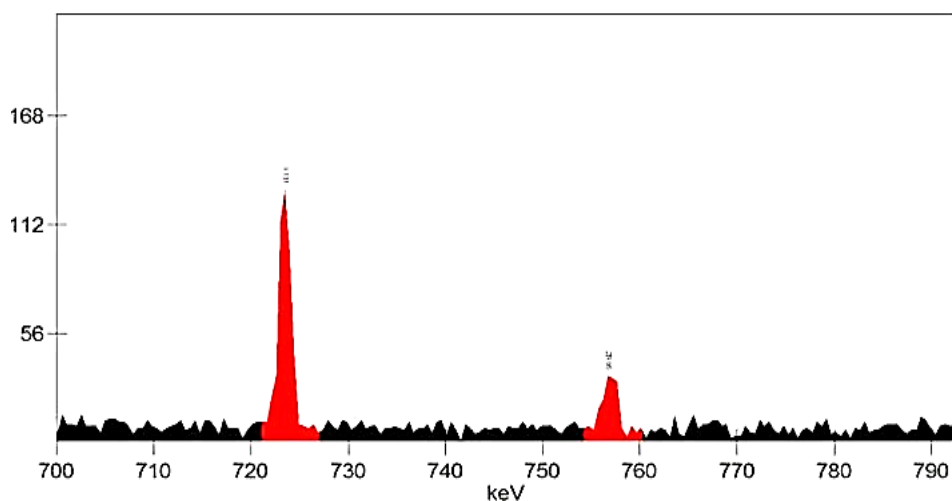


Gambar 9. Hubungan pengaruh variasi kecepatan alir terhadap *recovery* pemisahan ⁹⁵Zr

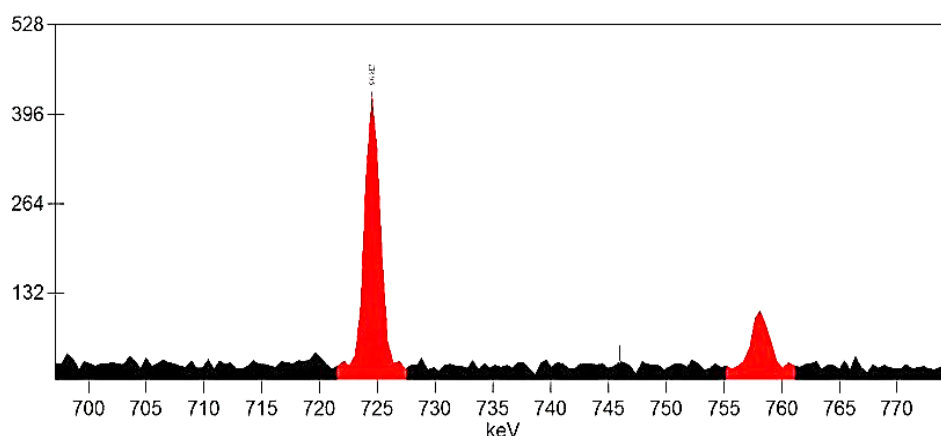
Tabel 5. Evaluasi hasil pengukuran dengan nilai *recovery* radionuklida ⁹⁵Zr variasi kecepatan alir

Kecepatan alir (mL/menit)	Berat radionuklida (µg/g)		<i>Recovery</i> (%)
	Sebelum pemisahan	Sesudah pemisahan	
0,1	7,698E-09	7,445E-09	96,72
0,3	9,600E-09	8,064E-09	84,00
0,5	9,332E-09	6,035E-09	64,67
0,9	7,808E-09	4,935E-09	63,20

Parameter optimum yang diperoleh meliputi keasaman dalam umpan, keasaman eluen untuk pengelusi, berat resin, volume umpan dan kecepatan alir selanjutnya digunakan untuk pemisahan radionuklida ⁹⁵Zr di dalam larutan bahan bakar PEB U₃Si₂/Al pasca iradiasi dengan kode *Bottom* (B), *Middle* (M) dan *Top* (T). Spektrum hasil pengukuran radionuklida ⁹⁵Zr menggunakan spektrometer gamma sebelum dan sesudah pemisahan yang ditampilkan pada Gambar 10 dan 11.



Gambar 10. Spektrum radionuklida ^{95}Zr sebelum pemisahan dalam larutan PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ pasca iradiasi



Gambar 11. Spektrum radionuklida ^{95}Zr setelah pemisahan dalam larutan PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ teriradiasi

Gambar 10 dan 11 menunjukkan bahwa radionuklida ^{95}Zr mempunyai 2 (dua) spektrum yaitu masing-masing pada energi 724,2 dan 756,7 keV. Besarnya berat radionuklida ^{95}Zr dalam bahan bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ teriradiasi bagian *Bottom* (B), *Middle* (M) serta *Top* (T) dievaluasi hanya pada energi 724,2 keV, karena radionuklida ^{95}Zr pada energi 724,2 keV mempunyai *fission yield* 0,437% lebih kecil dibandingkan pada energi 756,7 keV sebesar 0,553%, namun memberikan hasil pencacahan yang lebih besar dan stabil bila dilakukan pengukuran dengan waktu yang tidak terlalu lama. Berat radionuklida ^{95}Zr dalam larutan bahan bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ teriradiasi iradiasi bagian *Bottom* (B), *Middle* (M) dan *Top* (T) sebelum dan setelah pemisahan dengan 4

(empat) kali pengulangan ditunjukkan pada Tabel 6 hingga 8.

Tabel 6a. Data berat radionuklida ^{95}Zr pada energi 724,2 keV dalam efluen *Bottom* (B1)

No	Kode sampel	Berat radionuklida ($\mu\text{g/g}$)		Recovery (%)
		Sebelum pemisahan	Sesudah pemisahan	
1	B1-1	8,430E-09	6,302E-09	74,760
2	B1-2	7,901E-09	6,178E-09	78,196
3	B1-3	9,193E-09	6,933E-09	75,411
4	B1-4	9,326E-09	6,710E-09	71,946
Rerata				75,078

Optimasi Parameter Metode Pemisahan Radionuklida ^{95}Zr Dalam Larutan Pelat Elemen Bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ Teriradiasi (Yanlinastuti, Noviarty, Iis Haryati, Ariyanti Saputri, Boybul, Supardjo, Erlina Noerpitasari, Aslina Br. Ginting)

Tabel 6b. Data berat radionuklida ^{95}Zr pada energi 724,2 keV dalam efluen *Bottom* (B2)

No	Kode sampel	Berat radionuklida ($\mu\text{g/g}$)		Recovery (%)
		Sebelum pemisahan	Sesudah pemisahan	
1	B2-1	3,636E-09	2,552E-09	70,179
2	B2-2	3,766E-09	2,993E-09	79,483
3	B2-3	3,296E-09	3,200E-09	97,087
4	B2-4	4,304E-09	3,394E-09	78,857
Rerata				81,401

Tabel 7a. Data berat radionuklida ^{95}Zr pada energi 724,2 keV dalam efluen *Top* (T-1)

No	Kode sampel	Berat radionuklida ($\mu\text{g/g}$)		Recovery (%)
		Sebelum pemisahan	Sesudah pemisahan	
1	T1-1	7,700E-10	6,099E-10	79,200
2	T1-2	8,719E-10	6,303E-10	72,289
3	T1-3	6,316E-10	5,970E-10	94,527
4	T1-4	8,310E-10	7,621E-10	91,714
Rerata				84,433

Tabel 7b. Data hasil pengukuran radionuklida ^{95}Zr pada energi 724,2 keV dalam efluen *Top* (T-2)

No	Kode sampel	Berat radionuklida ($\mu\text{g/g}$)		Recovery (%)
		Sebelum pemisahan	Sesudah pemisahan	
1	T2-1	8,856E-10	7,069E-10	79,820
2	T2-2	1,014E-09	7,707E-10	76,000
3	T2-3	8,239E-10	7,456E-10	90,494
4	T2-4	8,404E-10	6,773E-10	80,597
Rerata				81,728

Tabel 8a. Data berat radionuklida ^{95}Zr pada energi 724,2 keV dalam efluen *Middle* (M-1)

No	Kode sampel	Berat radionuklida ($\mu\text{g/g}$)		Recovery (%)
		Sebelum pemisahan	Sesudah pemisahan	
1	M1-1	4,484E-09	3,462E-09	77,203
2	M1-2	4,675E-09	3,479E-09	74,400
3	M1-3	4,440E-09	3,347E-09	75,385
4	M1-4	4,578E-09	3,681E-09	80,411
Rerata				76,850

Tabel 8b. Data berat radionuklida ^{95}Zr pada energi 724,2 keV dalam efluen *Middle* (M-2)

No	Kode sampel	Berat radionuklida ($\mu\text{g/g}$)		Recovery (%)
		Sebelum pemisahan	Sesudah pemisahan	
1	M2-1	5,988E-09	4,519E-09	75,470
2	M2-2	5,634E-09	4,237E-09	75,205
3	M2-3	4,893E-09	4,712E-09	96,301
4	M2-4	5,027E-09	4,437E-09	88,250
Rerata				83,806

Pada Tabel 6 sampai dengan 8 diperoleh berat radionuklida ^{95}Zr pada larutan efluen PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ teriradiasi masing-masing untuk potongan *Bottom*, *Middle* dan *Top* dengan *recovery* pemisahan yang bervariasi. Pemisahan radionuklida ^{95}Zr pada energi 724,2 keV dengan metode kolom penukar ion menggunakan resin diperoleh *recovery* masing-masing untuk potongan dengan kode B-1=75,078%, B-2=81,401%, T-1=84,433%; T-2=81,724%, M-1=76,850%; dan M-2= 83,806%. Perbedaan *recovery* pemisahan disebabkan karena berat sampel dari masing-masing pengukuran berbeda sehingga pada saat pemisahan menggunakan resin, berat radionuklida ^{95}Zr yang terikat juga bervariasi. Pada proses elusi, radionuklida ^{95}Zr dalam resin tersebut tidak dapat lepas dengan sempurna, sehingga mempengaruhi hasil pengukuran yang menyebabkan *recovery* dari radionuklida ^{95}Zr bervariasi.

Berat radionuklida ^{95}Zr pada larutan efluen PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ teriradiasi untuk potongan *Bottom*, *Middle* dan *Top* selanjutnya dievaluasi untuk mengetahui presisi pengukuran. Perhitungan presisi dilakukan dari beberapa pengulangan pengukuran dengan menghitung uji CV Horwitz dan CV *Repeatability* menggunakan persamaan (2), (3) dan (4). Data presisi pengukuran radionuklida ^{95}Zr dalam larutan PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ pasca iradiasi potongan bagian *Bottom*, *Middle* dan *Top* ditunjukkan pada Tabel 9. Dari Tabel 9 diketahui bahwa nilai CV *Repeatability* masing-masing pengukuran radionuklida ^{95}Zr dengan 4 (empat) kali pengulangan masih dalam kriteria keberterimaan. Hal ini dibuktikan dengan nilai CV *Repeatability* yang diperoleh lebih kecil dari 1/2 dari nilai CV Horwitz dan semakin kecil nilai CV *Repeatability* menunjukkan keberulangan pengukuran menjadi semakin baik.

Tabel 9. Data radionuklida ⁹⁵Zr dalam larutan PEB U₃Si₂/Al terhadap presisi pengukuran

No	Kode sampel	Rerata <i>recovery</i> radionuklida ⁹⁵ Zr (%)	SD	RSD (%)	CV Horwitz	CV Repeatability
1	B-1	75,078	2,565	3,417	1,044	0,522
2	B-2	81,401	11,287	13,865	1,031	0,516
3	M-1	76,850	2,643	3,439	1,040	0,520
4	M-2	83,806	10,318	12,31	1,027	0,514
5	T-1	84,433	10,484	12,418	1,026	0,513
6	T-2	81,728	6,180	7,562	1.031	0,515

KESIMPULAN

Telah diperoleh parameter optimal untuk pemisahan radionuklida ⁹⁵Zr dalam larutan PEB U₃Si₂/Al teriradiasi menggunakan resin dowex dengan cara kolom penukar anion. Parameter optimum yang diperoleh meliputi keasaman umpan H₂SO₄ 0,5M; keasaman eluen H₂SO₄ untuk pengelusi 1 M; resin dowex dengan berat 2,0 gram; volume umpan sebesar 50 µL dan kecepatan alir 0,1 mL/menit. Penggunaan parameter tersebut untuk pemisahan ⁹⁵Zr pada larutan PEB U₃Si₂/Al densitas 4,8 gU/cm³ pasca iradiasi dengan kode sampel *Bottom* (B), *Middle* (M) dan *Top* (T), diperoleh rerata *recovery* radionuklida ⁹⁵Zr pada energy 724,2 masing-masing sebesar untuk B-1=75,078%; B-2=81,401%; M-1=76,850%; M-2=83,806%; T-1= 84,433%; dan T-2= 81,724%. Batas keberterimaan metode ini diuji dengan perhitungan presisi menggunakan CV Horwitz dan CV *Repeatability*. Hasil uji menunjukkan pemisahan ⁹⁵Zr pada energi 724,2 keV mempunyai nilai CV *Repeatability* lebih kecil dibandingkan dengan uji CV Horwitz, dengan demikian dapat disimpulkan bahwa metode kolom penukar anion dapat digunakan untuk pemisahan radionuklida ⁹⁵Z dalam larutan PEB U₃Si₂/Al densitas 4,8 gU/cm³ pasca iradiasi.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala PTBBN dan Kepala Bidang Uji Radiometalurgi yang telah memberikan anggaran DIPA 2020, dan kepada rekan-rekan Fisikokimia yang telah membantu hingga selesainya penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. A. B. Ginting, Supardjo, Yanlinastuti, S. Indaryati, Boybul, "Perhitungan *burn up* PEB U₃Si₂/Al densitas 4,8 gU/cm³ pasca iradiasi potongan bagian *middle*," *Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir Urania*, vol. 25, no.2, hal.91-105, 2020.
- [2]. R. Artika, R. Sigit, H. F. Rahmatullah, Supardjo, A. B. Ginting, "Uji tak merusak pelat elemen bakar U₃Si₂/Al densitas uranium 4,8 gU/cm³ menggunakan radiografi sinar-x digital," *Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir Urania*, vol. 25, no.2, hal.49-56, 2020.
- [3]. A. B. Ginting, Boybul, A. Nugroho, D. Anggraini., R. Kriswarini, "Pemisahan dan analisis ¹³⁷Cs dan ²³⁵U dalam PEB U₃Si₂-Al pasca iradiasi untuk penentuan *burn up*," *Jurnal Teknologi Bahan Nuklir*, vol.11, no.2, 2015.
- [4]. Supardjo, H. Nasution, A. Rojak, B. G. Susanto., Boybul dan E. P. Hastuti., "Percobaan pembuatan pelat elemen bakar (PEB) U₃Si₂-Al densitas uranium 4,8 dan 5,2 g/cm³ dengan pengkayaan 19,89% ²³⁵U untuk sampel uji iradiasi", *Prosiding Seminar Nasional Daur Bahan Bakar*, 27 Agustus 2003, Serpong.
- [5]. S. Indaryati, "Pemilihan beberapa jenis pelarut untuk PEB U₃Si₂-Al pasca iradiasi", *Prosiding Hasil Penelitian*, Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir-BATAN, Serpong, 2009.
- [6]. C. Perteda, C. Henriquez, J. Merdel, J. Klein, G. Navarro, "Zr-95 fuel burn up measurements using gamma spectrometry technique," *Universidad Diego Portales, Santiago de Chile, Chile*, 2004.

Optimasi Parameter Metode Pemisahan Radionuklida ^{95}Zr Dalam Larutan Pelat Elemen Bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ Teriradiasi
(Yanlinastuti, Noviarty, Iis Haryati, Ariyanti Saputri, Boybul, Supardjo, Erlina Noerpitasari, Aslina Br. Ginting)

- [7]. S. K. Jung, S.J. Young, D.P. Soon, K.H. Yeong, S. Kyuseok, "Analysis of high burnup pressurized water reactor fuel using uranium, plutonium, neodymium, and cesium radionuclides correlations with burnup," *Nuclear Engineering Technology*, vol. 47, pp. 924–933, 2015.
- [8]. E. Susiantini, M. Setyadji, "Pemisahan Zr-Hf dalam asam sulfat dengan resin penukar anion," *J.Tek. Bhn. Nukl.*, vol. 8 no. 2, hal. 67 – 122, 2012.
- [9]. Yanlinastuti, S. Indaryati, Boybul, Supardjo, A. B. Ginting, "Penentuan berat radionuklida cesium dan uranium dalam pelat elemen bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ densitas 4,8 gU/cm³ burn up 40%," *Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir Urania*, vol. 26, no. 2, hal. 69 – 130, 2020
- [10]. K. T. Basuki, D. Biyantoro, "Kinetika reaksi pemisahan Zr-Hf pada ekstraksi cair-cair dalam media asam nitrat," *J.Tek Bhn Nuklir*, vol. 7, no. 1, hal. 1-73 2011.
- [11]. E. Susiantini, "Pembuatan $\text{Zr}(\text{SO}_4)_2 \cdot x \text{H}_2\text{O}$ melalui jalur zirconium basic sulphate (ZBS) sebagai umpan pada continuous annular chromatography (CAC)," *J.Tek. Bhn. Nukl.*, vol. 9, no. 2, hal. 55 – 113, 2013.
- [12]. Yanlinastuti, Noviarty, I. Haryati, S. Fatimah, Boybul, A. B. Ginting, "Optimasi parameter pemisahan Zr dalam PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ pra iradiasi menggunakan metode kromatografi penukar anion," *Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir Urania*, vol. 25, no. 2, hal. 71–140, 2019.
- [13]. A. R. Utami, L. Mahmudah, "Verifikasi metode pengujian NO_2 dan SO_4 dalam udara ambient," *Jurnal Teknologi Proses dan Inovasi Industri*, vol 4, no.1, 2019.
- [14]. A. R. Utami "Verifikasi metode pengujian sulfat dalam air dan air limbah sesuai SNI 6989.20:2009," *Jurnal Teknologi Proses Dan Inovasi Industri*, vol. 2, no. 1, 2017.

HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN