
PENENTUAN BERAT ISOTOP CESIUM DAN URANIUM DALAM PELAT ELEMEN BAKAR U_3Si_2/Al DENSITAS $4,8 \text{ gU/cm}^3$ *BURN UP 40%*

Yanlinastuti, Sutri Indaryati, Boybul, Supardjo, Aslina Br.Ginting

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir – BATAN

Kawasan PUSPIPTEK Serpong Gd.20 Tangerang Selatan, Banten 15314

e-mail: ellyhasta@yahoo.com

(Naskah diterima: 4-5-2020, Naskah direvisi: 20-5-2020, Naskah disetujui: 31-5-2020)

ABSTRAK

PENENTUAN BERAT ISOTOP CESIUM DAN URANIUM DALAM PELAT ELEMEN BAKAR U_3Si_2/Al DENSITAS $4,8 \text{ gU/cm}^3$ *BURN UP 40%*. Pelat elemen bakar (PEB) U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ telah diiradiasi di Reaktor Serba Guna (RSG-GAS) dengan *burn up* 40%. Selama bahan bakar tersebut diradiasi di reaktor menghasilkan beberapa isotop hasil fisi seperti cesium, uranium dan isotop lainnya. Besarnya isotop hasil fisi tersebut digunakan dalam perhitungan *burn up* untuk mengetahui unjuk kerja bahan bakar selama diradiasi di reaktor. Oleh karena itu, berat cesium dan uranium harus diketahui secara kuantitatif melalui proses pemisahan analisis fisikokimia. Pelat elemen bakar U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ bagian *Middle* dipotong secara duplo dengan berat $M-1=0,056 \text{ g}$ dan $M-2=0,075 \text{ g}$, kemudian dilarutkan menggunakan HCl 6N dan HNO_3 6N. Larutan PEB pasca iradiasi dipipet sebanyak $100 \mu\text{L}$ dimasukkan masing-masing kedalam 2 mL larutan HNO_3 , H_2SO_4 dan HCl 0,1N, selanjutnya dilakukan pemisahan cesium menggunakan metode penukar kation dengan penambahan 1000 mg zeolit Lampung. Hasil pemisahan diperoleh isotop cesium terikat dengan zeolit dalam fasa padat sedangkan uranium berada dalam fasa cair. Isotop cesium dalam fasa padat maupun dalam fasa cair diukur dengan spektrometer- γ selama 10000 detik. Hasil pengukuran diperoleh spektrum ^{134}Cs pada energi $604,7$ dan $795,8 \text{ keV}$ serta isotop ^{137}Cs pada $661,7 \text{ keV}$. Sementara itu, pemisahan uranium dalam fasa cair dilakukan menggunakan metode kolom penukar anion dengan penambahan 1200 mg resin Dowex. Hasil pemisahan diperoleh spektrum isotop ^{238}U pada energi $4,1943 \text{ MeV}$, ^{235}U pada $4,397 \text{ MeV}$, ^{236}U pada energi $4,494 \text{ MeV}$ dan isotop ^{234}U pada $4,777 \text{ MeV}$. Hasil evaluasi dari luas spektrum tersebut diperoleh berat isotop ^{137}Cs dalam $0,056 \text{ g}$ potongan PEB U_3Si_2/Al sebesar $4,08\text{E}-05 \text{ g}$; $4,53\text{E}-05 \text{ g}$ dan $4,53\text{E}-05 \text{ g}$, sedangkan isotop ^{134}Cs sebesar $4,84\text{E}-08 \text{ g}$; $5,30\text{E}-08 \text{ g}$ dan $5,20\text{E}-08$ masing-masing dalam pelarut HNO_3 ; H_2SO_4 dan HCl. Sementara itu, berat isotop ^{137}Cs dalam $0,075 \text{ g}$ potongan PEB U_3Si_2/Al diperoleh sebesar $5,93\text{E}-05 \text{ g}$; $5,90\text{E}-05 \text{ g}$ dan $5,88\text{E}-05 \text{ g}$, sedangkan berat isotop ^{134}Cs sebesar $5,23\text{E}-07 \text{ g}$; $5,29\text{E}-07\text{g}$ dan $5,08\text{E}-07\text{g}$ untuk masing-masing pelarut HNO_3 ; H_2SO_4 dan HCl. Berat isotop ^{238}U , ^{235}U , ^{236}U dan ^{234}U dalam $0,056 \text{ g}$ potongan PEB U_3Si_2/Al diperoleh sebesar $6,45\text{E}-03 \text{ g}$; $2,57\text{E}-03 \text{ g}$; $2,42\text{E}-06 \text{ g}$; dan $1,90\text{E}-05 \text{ g}$, sedangkan dalam $0,075 \text{ g}$ PEB diperoleh sebesar $7,41\text{E}-03 \text{ g}$; $2,40\text{E}-03 \text{ g}$; $2,91\text{E}-06 \text{ g}$; dan $2,17\text{E}-05 \text{ g}$. Berat isotop ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{238}U , ^{235}U , ^{236}U dan ^{234}U dalam $0,056 \text{ g}$ PEB dan $0,075 \text{ g}$ potongan PEB U_3Si_2/Al relatif sama dan selanjutnya digunakan sebagai data masukan untuk perhitungan *burn up*.

Kata kunci: PEB U_3Si_2/Al pasca iradiasi, pemisahan, kation-anion, cesium, uranium.

ABSTRACT

DETERMINATION OF WEIGHT OF CESIUM AND URANIUM ISOTOPES IN IRRADIATED U_3Si_2/Al FUEL PLATE WITH 4.8 gU/cm^3 DENSITY AND 40% BURN UP. The fuel plate of U_3Si_2/Al with a density of 4.8 gU/cm^3 was irradiated in the RSG-GAS multipurpose reactor with 40% burn-up. During irradiation, the amount of isotopes produced by fission reaction, such as cesium, uranium and other isotopes can be used for burn-up calculation to determine the fuel performance. Physicochemical analysis was performed to determine the weight of cesium and uranium isotopes in the irradiated fuel. The irradiated plate of U_3Si_2/Al was cut at the middle section (duplo) with a weight of $M-1 = 0.065\text{ g}$ and $M-2 = 0.075\text{ g}$ and dissolved in $HCl\ 6N$ and $HNO_3\ 6N$. The resulted was pipetted at $100\ \mu\text{L}$ and then added into each of 2 mL solvent of HNO_3 , H_2SO_4 and $HCl\ 0.1N$. The separation of cesium was then carried out with the addition 1000 mg of zeolite from Lampung. Cesium isotope obtained from the separation was bound with zeolite in the solid phase while uranium was in the liquid phase. Cesium isotopes in the solid phase and in the liquid phase were measured by a spectrometer- γ for their radioactivity for 10000 seconds. The measurement was indicated by spectra of ^{134}Cs at 604.7 and 795.8 keV energy and ^{137}Cs at 661.7 keV . Meanwhile, the separation of uranium in the liquid phase was carried out using anion exchange column method with the addition of Dowex resin. The results of the separation were indicated by some spectra of U isotopes at various energies, ^{238}U at $4,1943\text{ MeV}$, ^{235}U at $4,397\text{ MeV}$, ^{236}U at $4,494\text{ MeV}$ and ^{234}U at $4,777\text{ MeV}$. Weight calculation from the measurement data shows that the weight of ^{137}Cs in 0.056 g of the irradiated U_3Si_2/Al fuel samples in HNO_3 , H_2SO_4 and HCl solvent are $4.08E-05\text{ g}$; $4.53E-05\text{ g}$, and $4.53E-05\text{ g}$ respectively, while ^{134}Cs weight are $4,84E-08\text{ g}$; $5,30E-08\text{ g}$ and $5,20E-08\text{ g}$ respectively. Meanwhile, ^{137}Cs isotope weight in 0.075 g fuel plate of U_3Si_2/Al are obtained by $5.93E-07\text{ g}$; $5.90E-05\text{ g}$, and $5.88E-05\text{ g}$, while the isotope weight of ^{134}Cs in HNO_3 , H_2SO_4 and HCl solvent are $5,23E-07\text{ g}$; $5,29E-07\text{ g}$ and $5,008E-07\text{ g}$ respectively. The isotopes weight of ^{238}U , ^{235}U , ^{236}U and ^{234}U in 0.056 g of fuel plate are $6.45E-03\text{ g}$; $2.57E-03\text{ g}$; $2.42E-06\text{ g}$; and $1.90E-05\text{ g}$, and the weight in 0.075 g fuel plate are $7.41E-03\text{ g}$; $2.40E-03\text{ g}$; $2.91E-06\text{ g}$; and $2.17E-05\text{ g}$. The isotopes weight of ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{238}U , ^{235}U , ^{236}U and ^{234}U in 0.056 g and 0.075 irradiated U_3Si_2/Al fuel plate obtained were relatively similarly. Data of isotopes weight are then used as input data for burn up calculation..

Keywords: fuel element plate of U_3Si_2/Al , separation, cation-anion, cesium, uranium.

PENDAHULUAN

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir (PTBBN) terus melakukan penelitian pengembangan pengkajian dan penerapan (litbangjirap) bahan bakar nuklir untuk reaktor riset. Tujuan litbangjirap untuk mendapatkan bahan bakar nuklir dengan densitas uranium tinggi seperti $UMo/Al, UZr/Al$ dan U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ [1]. Bahan bakar nuklir jenis UMo/Al , dan UZr/Al masih dalam proses penelitian pabrikasi sedangkan elemen bakar uji (EBU) U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ telah berhasil dipabrikasi, bahkan telah diiradiasi dalam reaktor G.A.Siwabessy (RSG-GAS) dengan variasi *burn up* 20, 40 dan 60 %[2]. Pada saat EBU U_3Si_2/Al diiradiasi di RSG-GAS terjadi reaksi fisi antara ^{235}U dengan neutron menghasilkan beberapa hasil fisi (hasil belah) dan unsur-unsur bermassa berat seperti U, Pu, Nd, Cs, Eu, Sr, Ce, Zr, Kr, dan Xe[3]. Besarnya kandungan hasil fisi sangat tergantung kepada *burn up* bahan bakar selama digunakan di reaktor. Oleh karena itu, untuk mengetahui unjuk kerja EBU U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ selama diiradiasi di reaktor, perlu dilakukan uji pasca iradiasi di dalam *hotcell* Instalasi Radiometalurgi (IRM). Kegiatan uji pasca iradiasi meliputi uji tak merusak dan merusak. Uji tak merusak merupakan langkah awal yang dilakukan untuk mengetahui adanya perubahan pada bahan bakar yang disebabkan oleh iradiasi selama di reaktor, seperti pengamatan secara visual, yang bertujuan untuk mengetahui adanya cacat, perubahan warna, *blister* maupun bercak pada bahan bakar, sedangkan uji merusak adalah analisis metalografi dan fisikokimia. Analisis metalografi bertujuan mengetahui perubahan struktur mikro PEB U_3Si_2/Al akibat iradiasi di reaktor, sedangkan analisis fisikokimia bertujuan untuk mengetahui kandungan atau berat isotop ^{134}Cs , ^{137}Cs dan ^{235}U dalam PEB U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ akibat reaksi fisi. Upaya yang dilakukan untuk memperoleh berat isotop ^{134}Cs , ^{137}Cs dan ^{235}U secara kuantitatif, perlu dilakukan

pemisahan dengan metode yang valid. Radionuklida cesium sebagai pemancar radiasi- γ dan uranium pemancar radiasi- α harus dipisahkan terlebih dahulu, sehingga tidak mengganggu isotop pemancar radiasi- α pada saat pengukuran menggunakan spektrometri. Hal ini disebabkan karena uranium sebagai pemancar radiasi- α mempunyai daya tembus yang kecil, sehingga dibutuhkan sampel yang sangat tipis agar dapat terdeteksi oleh detektor. Oleh karena itu, cesium sebagai pemancar- γ dengan daya tembus lebih besar harus dipisahkan dari uranium, sehingga tidak menghambat pengukuran uranium yang mempunyai daya tembus kecil. Berat isotop ^{134}Cs , ^{137}Cs dan ^{235}U selanjutnya digunakan sebagai data masukan dalam perhitungan *burn up*[4,5].

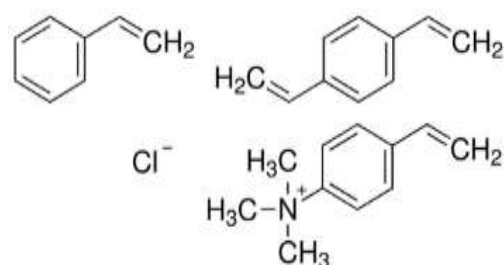
Penelitian sebelumnya[6], telah dilakukan uji tak merusak meliputi pengamatan cacat dan pengukuran dimensi terhadap PEB U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ variasi *burn up* 20,40 dan 60% menggunakan radiografi sinar-X. Hasil uji tak merusak diperoleh citra radiografi dengan resolusi yang baik yang menunjukkan tidak ada cacat maupun kerusakan yang signifikan pada PEB U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ akibat iradiasi[6]. Data uji tak merusak selanjutnya digunakan sebagai data awal untuk menentukan titik-titik (posisi) sampling pemotongan PEB U_3Si_2/Al untuk pengujian merusak khususnya sampel uji analisis fisikokimia. Upaya untuk melengkapi data uji tak merusak tersebut, maka pada penelitian ini dilakukan uji fisikokimia pemisahan radionuklida cesium dengan uranium yang terdapat dalam PEB U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ pasca iradiasi *burn up* 40% pada potongan bagian tengah (*Middle*). Posisi PEB U_3Si_2/Al bagian *Middle* mengalami reaksi fisi paling besar dibanding dengan bagian *Top* dan *Bottom* pada saat diiradiasi di RSG-GAS, sehingga ratio hasil fisi terbentuk paling besar [7,8].

Metode uji yang dapat digunakan untuk pemisahan cesium dari uranium yang

terdapat di dalam larutan PEB U_3Si_2/Al pasca iradiasi antara lain metode pengendapan $CsClO_4$, pertukaran kation menggunakan zeolit Lampung, dan pertukaran kation menggunakan resin Dowex. Hasil validasi metode pemisahan cesium menggunakan larutan standar isotop ^{137}Cs dari Certificate Reference Material (SRM) 4233E menunjukkan bahwa *recovery* pemisahan isotop ^{137}Cs diperoleh sebesar $98,01\% \pm 1,11\%$ dengan metode pengendapan $CsClO_4$, $99,03\% \pm 0,1\%$ dengan metode penukar kation menggunakan zeolit Lampung, dan $98,67\% \pm 0,3\%$ dengan metode penukar kation menggunakan resin Dowex [8]. Berdasarkan hasil validasi metode di atas diperoleh *recovery* pemisahan paling besar dengan metode penukar kation menggunakan zeolit Lampung. Oleh karena itu, pada penelitian ini, pemisahan cesium dari uranium dalam larutan PEB U_3Si_2/Al pasca iradiasi dilakukan dengan menggunakan metode penukar kation menggunakan zeolit Lampung [9,10,11]. Hasil pemisahan cesium dari uranium dengan metode penukar kation menggunakan zeolit Lampung diperoleh cesium berada dalam fasa padat karena cesium terikat dengan zeolit, sedangkan uranium, plutonium dan isotope lainnya dalam fasa cair sebagai supernatan PEB U_3Si_2/Al (SP1rr) [8,9]. Untuk mengetahui kandungan cesium telah terikat dengan zeolit dilakukan pengukuran menggunakan spectrometer- γ terhadap Cs-zeolit maupun supernatan, dan hasilnya dibandingkan dengan sampel standard [10]. Sementara itu, pemisahan uranium dari plutonium dalam fasa cair dilakukan dengan metode kolom penukar anion dari ASTM C-1411-2014 menggunakan resin Dowex [10,11,13]. Metode ini menggunakan dua kolom penukar anion yaitu kolom penukar anion dengan resin Dowex- NO_3 dan kolom penukar anion kedua menggunakan resin Dowex-Cl. Kolom penukar anion pertama digunakan untuk memisahkan uranium dari unsur unsur bermassa berat

lainnya seperti plutonium dan pada kolom kedua digunakan untuk memisahkan uranium dari unsur unsur yang dihasilkan dari hasil fisi isotop ^{235}U seperti ^{238}U , ^{234}U dan ^{236}U [14]. Penggunaan pelarut HCl untuk mengikat uranium, karena uranium memiliki afinitas elektron lebih tinggi dalam larutan HCl daripada dalam larutan HNO_3 [15].

Resin Dowex yang digunakan berupa bahan organik dari yang mengandung gugus fungsional pada suatu kerangka polimer hidrokarbon ($Res-N^+(CH_3)_3$) yang sukar larut seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.

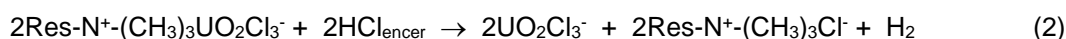
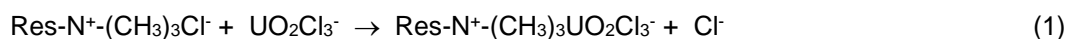


Gambar 1. Struktur molekul resin penukar anion-Cl [7,16].

Gugus fungsional mengandung ion yang dapat dipertukarkan dengan ion lain yang terdapat dalam larutan. Berdasarkan gugus fungsional yang dapat dipertukarkan, resin penukar ion digolongkan menjadi dua yaitu resin penukar kation dan resin penukar anion. Resin penukar kation berisi gugus sulfonat (SO_3H^+), karboksil ($COOH^+$), atau kelompok asam fosfat, sedangkan resin penukar anion memiliki gugus amine yang berisi klorida (Cl^-) atau hidroksil (OH^-). Berdasarkan keberadaan gugus fungsional, resin penukar ion dikelompokkan dalam beberapa klasifikasi, salah satu diantaranya adalah resin penukar anion bersifat basa kuat. Tipe resin ini digunakan dalam pemisahan uranium dalam larutan bahan bakar nuklir pasca iradiasi [17]. Resin jenis basa kuat memiliki gugus aktif berbasis *polystyrene* dengan matriks $Res-N^+(CH_3)_3$ bila direndam dengan HCl akan membentuk resin anion klorida dengan struktur molekul seperti pada Gambar 1.

Sebelum dilakukan pemisahan uranium terlebih dahulu dikenakan proses reduksi dan oksidasi menggunakan larutan $FeSO_4$ dan HNO_3 8M serta dilakukan penambahan metanol dengan volume tertentu. Larutan $FeSO_4$ berfungsi untuk mereduksi uranium valensi U(VI) menjadi U(IV) sehingga diharapkan larutan uranium berada dalam suasana U(IV). Upaya untuk meningkatkan daya serap resin terhadap uranium dilakukan proses oksidasi dengan menambahkan HNO_3 8 M sehingga larutan U(IV) berubah menjadi U(VI) karena resin Dowex mempunyai daya serap optimal dengan senyawa kompleks U(VI) dibandingkan dalam U(IV). Sementara itu, penambahan metanol bertujuan untuk meningkatkan daya adsorpsi resin terhadap kompleks ion logam, sehingga interaksi ion uranium kompleks dengan ligan resin menjadi meningkat[19,20]. Larutan SPIrr U_3Si_2/Al yang telah bercampur dengan metanol digunakan sebagai umpan pada kolom yang telah diberi resin Dowex. Pada penelitian sebelumnya telah diperoleh parameter optimum untuk pemisahan uranium dalam media campuran HNO_3 dan metanol dengan perbandingan 50:50%volume. Campuran ini digunakan sebagai pelarut pada pemisahan kolom pertama, sedangkan pemisahan pada kolom ke dua digunakan larutan campuran HCl 6M dan metanol dengan perbandingan 10:90%[14,20].

Pemisahan uranium dari plutonium yang terkandung dalam supernatan SPIrr



Senyawa kompleks uranium klorida yang terbentuk sangat bervariasi tergantung kepada konsentrasi HCl yang menunjukkan pengaruh molaritas HCl terhadap pembentukan senyawa kompleks U(VI)-Cl seperti yang terlihat pada Tabel 1. Data yang disajikan pada Tabel 1 menunjukkan bahwa

dimasukkan ke dalam kolom sebagai umpan. Pemisahan plutonium dibuat dalam suasana dalam asam NHO_3 8 M dan untuk uranium dalam HCl pekat 6M sehingga akan membentuk senyawa kompleks anion yang mempunyai sifat kimia yang berbeda. Perbedaan tersebut memudahkan proses pemisahan uranium dari plutonium. Pada kolom pertama isotop Pu terikat dengan resin di dalam kolom dalam suasana NHO_3 8 M, sedangkan uranium keluar dari kolom sebagai efluen U. Pada kolom kedua, efluen U digunakan sebagai umpan dalam suasana HCl 6 M dan akan terikat dengan resin, kemudian uranium tersebut dielus dengan larutan HCl konsentrasi rendah 0,15 M. Metode ini sesuai dengan prinsip dasar proses penukar anion yaitu terjadi sistim fasa padat (fasa diam) dan fasa cair (fasa gerak) dengan terjadinya pertukaran anion dalam bahan padat (resin) dengan anion (uranium) dalam larutan SPIrr U_3Si_2/Al [20,21].

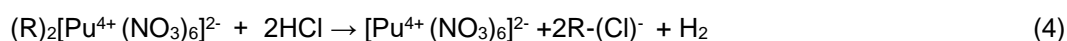
Fenomena atau langkah langkah pemisahan uranium dari plutonium dalam supernatan bahan bakar nuklir dapat dijelaskan sebagai berikut. Pemisahan uranium dengan plutonium menggunakan resin $Res-N^+-(CH_3)_3$ dibuat dalam suasana asam kuat (HCl pekat) sehingga membentuk senyawa $Res-N^+-(CH_3)_3Cl^-$. Uranium berada dalam bentuk kation $(UO_2)^{2+}$ terlebih dahulu diubah menjadi anion uranium kompleks $UO_2Cl_3^-$. Senyawa anion $UO_2Cl_3^-$ dipertukarkan dengan ion Cl^- membentuk senyawa $Res-N^+-(CH_3)_3 UO_2Cl_3^-$ seperti persamaan reaksi (1) dan (2)[22].

senyawa kompleks U dan HCl mulai terbentuk pada konsentrasi HCl lebih besar dari 0,5 M dan pada konsentrasi HCl antara 6-12 M terbentuk senyawa kompleks $UO_2Cl_3^-$ yang dapat teradsorpsi pada resin penukar anion basa kuat[23].

Tabel 1. Senyawa kompleks U(VI) pada berbagai konsentrasi HCl[22].

Molalitas HCl (M)	Senyawa kompleks
0,1 – 0,5	UO ₂ ²⁺
0,5 – 4,0	UO ₂ Cl ⁺
4,0 – 6,0	UO ₂ Cl ₂
6,0 - 12	UO ₂ Cl ₃ ⁻

Dalam pemisahan Pu, isotop Pu dibuat dalam suasana HNO₃ 8 M sehingga membentuk senyawa [Pu⁴⁺(NO₃)₆]²⁻ dan diserap oleh resin Dowex-NO₃ menjadi senyawa kompleks (R)₂[Pu(NO₃)₆] di dalam



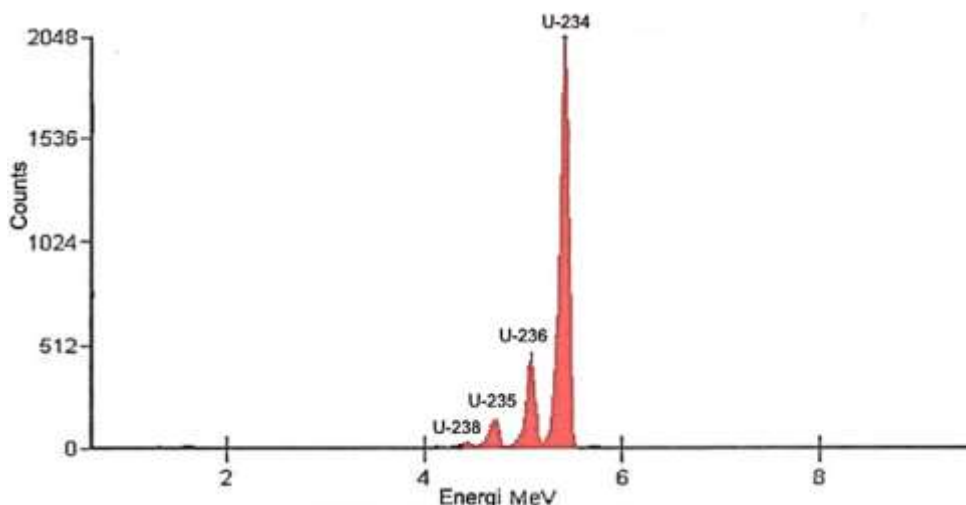
Senyawa UO₂Cl₂ sebagai efluen U yang keluar dari kolom dikenakan proses elektrodeposisi untuk membentuk deposit uranium yang tipis dan merata. Proses elektrodeposisi efluen U menggunakan larutan buffer elektrolit (NH₄)₂SO₄ pada pH 3,5. Kawat platina sebagai anoda dipasang pada jarak 1 cm di atas katoda plasket *stainless steel* (SS) dengan kuat arus 1,2 A yang diatur dari *power supply*. Hasil proses elektrodeposisi diperoleh deposit uranium tipis dan merata di atas plasket SS untuk

kolom dengan mengikuti persamaan reaksi (3)[22,23].

Senyawa anion dalam [Pu⁴⁺(NO₃)₆]²⁻ bertukar anoin dengan anion (NO₃)⁻ di dalam resin 2R-(NO₃)⁻ menjadi senyawa kompleks (R)₂[Pu⁴⁺(NO₃)₆]²⁻ dalam suasana asam nitrat pekat. Upaya untuk mendapatkan isotop Pu⁴⁺ yang murni maka senyawa (R)₂[Pu⁴⁺(NO₃)₆]²⁻ dielusi dengan HCl encer sehingga resin terikat kembali dengan Cl⁻ dalam bentuk senyawa R-(Cl) seperti yang ditunjukkan pada persamaan reaksi (4). Sementara itu, isotop U yang keluar dari kolom terikat kuat dengan HCl mengikuti persamaan reaksi (5).

selanjutnya selanjutnya diukur beratnya menggunakan spektrometer-α [24,25,26].

Metode kolom penukar anion ASTM C-1411-2014 telah diverifikasi menggunakan uranium standar U₃O₈ yang mengandung isotop ²³⁵U sebesar 20% dengan penambahan resin Dowex 1200 mg. Hasil verifikasi metode diperoleh spektrum dari masing masing isotop ²³⁸U, ²³⁵U, ²³⁴U, dan ²³⁶U dengan *recovery* pemisahan uranium sebesar 81,45 % seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 [7,14,16].



Gambar 2. Spektrum isotop ²³⁸U, ²³⁵U, ²³⁴U, dan ²³⁶U dalam standar U₃O₈ [7,14]

METODOLOGI

Sebelum melakukan pemisahan cesium dan uranium dalam PEB U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ pasca iradiasi, terlebih dahulu dilakukan validasi metode dan kalibrasi alat spektrometer- α/γ . Kalibrasi spektrometer- γ menggunakan larutan standar ^{137}Cs dari NIST, sedangkan untuk spektrometer- α menggunakan standar U_3O_8 . Hasil kalibrasi diperoleh efisiensi detektor spektrometer- α/γ . PEB U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ pasca iradiasi dengan *burn up* 40 % dipotong pada bagian tengah (*Middle*) secara duplo dengan berat masing-masing 0,056 g dan 0,075 g PEB dengan kode M-1 dan M-2, kemudian dilarutkan dalam HCl 6N dan HNO_3 6N[27]. Penggunaan sampel uji bagian *Middle* didasarkan pada posisi PEB U_3Si_2/Al bagian *Middle* mengalami reaksi fisi paling besar dibanding bagian *Top* dan *Bottom*[7,8]. Hasil pelarutan diperoleh uranil nitrat $UO_2(NO_3)_2$ yang mengandung isotop hasil fisi seperti ^{134}Cs , ^{137}Cs dan ^{235}U . Larutan $UO_2(NO_3)_2$ pasca iradiasi dipipet 100 μL secara duplo dengan kode M-1(M1-1, M1-2) dan M-2 (M2-1, M2-2), kemudian dilakukan pemisahan ^{134}Cs dan ^{137}Cs dari ^{235}U dengan metode penukar kation menggunakan zeolit Lampung seberat 1000 mg masing-masing dalam media HNO_3 0,1N, H_2SO_4 0,1N, dan HCl 0,1N dengan pH 5-6. Penggunaan variasi media tersebut bertujuan untuk mengetahui pengaruh jenis pelarut terhadap daya serap cesium dalam zeolit dan merupakan pengembangan metode sendiri. Hasil pemisahan diperoleh isotop cesium terikat dengan zeolit Lampung dalam fasa padat dan uranium dalam fasa cair (SPIrr). Isotop cesium terikat dengan zeolit selanjutnya diukur menggunakan spektrometer- γ selama 10000 detik dengan 3 (tiga) kali pengulangan. Sementara itu, pemisahan uranium dalam SPIrr dilakukan dengan metode kolom penukar anion yang mempunyai diameter kolom 0,9 cm dan tinggi 10 cm. Larutan SPIrr dengan kode M-1 (SPIrr M1-1(1), M1-2(1), M1-2(2) dan M-2

(SPIrr M2-1(1), M2-1(2), M2-2(1) secara triplo masing-masing dipipet sebanyak 300 μL digunakan sebagai umpan dalam larutan HNO_3 dan metanol. Pemisahan dilakukan melalui 2 tahap, pada kolom pertama, isotop plutonium terikat dengan resin pada HNO_3 8M sedangkan uranium dan hasil fisi serta pengotor lainnya berada dalam larutan hasil tampungan (efluen U). Efluent U kemudian dipanaskan hingga kihat dan ditambahkan campuran larutan HCl 6M dan metanol dengan perbandingan 10:90%. Larutan ini digunakan sebagai umpan untuk pemisahan kolom kedua. Larutan umpan dimasukkan ke dalam kolom ke dua dan dialirkan dengan kecepatan 0,5 mL/menit. Uranium yang terikat dengan resin kemudian dielusi menggunakan larutan HCl 0,15M sebanyak 30 mL. Hasil elusi ditampung dalam beaker gelas, kemudian dipanaskan sampai kihat, dan ditambahkan 1 mL HNO_3 pekat, dipanaskan kembali sampai kihat, selanjutnya dilakukan proses elektrodeposisi[24]. Endapan uranium terdepositasi pada plansel *stainless steel* (SS) kemudian diukur menggunakan spektrometer- α selama 25000 detik. Spektrum isotop selanjutnya dievaluasi sehingga diperoleh net area, dan berat isotop uranium (g/gPEB) dalam sampel. Hal yang sama dilakukan terhadap 300 μL SPIrr dengan media H_2SO_4 dan HCl. Untuk membuktikan bahwa yang terikat hanya isotop uranium atau plutonium maka spektrum yang dihasilkan harus dibandingkan dengan spektrum isotop uranium standar. Dalam penelitian ini hasil pemisahan plutonium tidak dilaporkan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

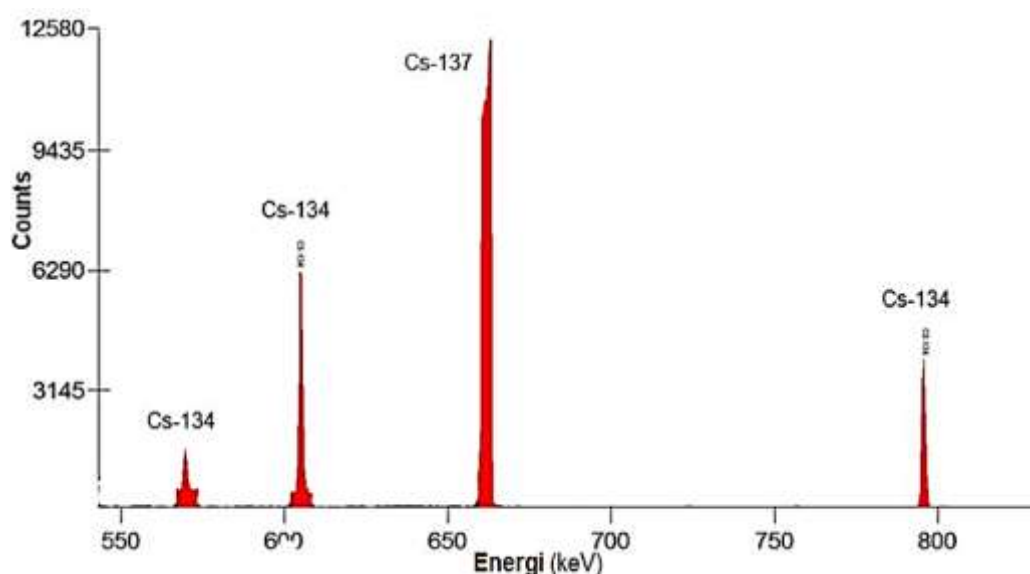
Hasil perhitungan efisiensi detektor, akurasi dan presisi spektrometer- α/γ ditunjukkan pada Tabel 2. Tabel tersebut menunjukkan bahwa nilai akurasi dan presisi yang diperoleh sesuai dengan persyaratan analisis kimia sebesar 5% dalam batas derajat kepercayaan 95%. Hal ini

menunjukkan nilai efisiensi detektor dapat digunakan untuk perhitungan dari cacahan menjadi berat ($W=g$) dalam sampel uji larutan PEB U_3Si_2/Al pasca iradiasi. Hasil

pemisahan cesium menggunakan metode penukar kation diperoleh spektrum isotop seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.

Tabel 2. Data perhitungan efisiensi detektor, akurasi dan presisi

Alat Uji	Standar	Eff.detektor (%)	Akurasi (%)	Presisi (%)
Spektrometer- γ	Larutan ^{137}Cs	0,1859	0,456	1,875
	Padatan ^{137}Cs -zeolit	0,1887	0,632	2,023
Spektrometer- α	Planset ^{235}U	38,85	0,752	3,123



Gambar 3. Spektrum isotop ^{134}Cs dan ^{137}Cs pada berbagai energy [28]

Dari Gambar 3, diperoleh 3 (tiga) spektrum isotop ^{134}Cs masing-masing pada energi 569,3 ; 604,7; dan 795,8 keV dengan *fission yield* 15,43 %, 97,60 % dan 85,45 % serta 1 (satu) spektrum ^{137}Cs pada energi 661,7 keV dengan *fission yield* sebesar 85,10 %. Dalam perhitungan berat (g/gPEB) maupun aktivitas isotop (Bq), *fission yield* digunakan adalah yang terbesar yaitu 97,60% untuk isotop ^{134}Cs dan 85,10 % untuk ^{137}Cs , namun *fission yield* lainnya seperti isotop ^{134}Cs pada energi 569,3 dan 795,8 keV dengan *fission yield* 15,43 %, dan 85,45 % digunakan untuk menelusuri (*trace*) keberadaan isotop

tersebut[28]. Luas spektrum isotop ^{134}Cs pada energi 604,7 keV dan ^{137}Cs pada 661,7 keV seperti Gambar 3, dievaluasi sehingga diperoleh besar cacahan per detik (cps) isotop ^{134}Cs dan ^{137}Cs dalam media HNO_3 , H_2SO_4 dan HCl seperti ditunjukkan pada Tabel 3 [28,29]. Hasil cacahan per detik (cps) isotop ^{134}Cs dan ^{137}Cs dalam masing-masing media pengukuran selanjutnya dievaluasi, untuk mendapatkan kandungan (berat =W) isotop dalam 0,056 g dan 0,075 g potongan PEB U_3Si_2/Al densitas 4,8 gU/cm³. Berat isotop ^{134}Cs dan ^{137}Cs dalam potongan PEB U_3Si_2/Al ditunjukkan pada Tabel 4 dan 5.

Tabel 3. Data cacahan per detik (Cps) isotop ^{134}Cs dan ^{137}Cs dalam 2 mL media HNO_3 , H_2SO_4 dan HCl 0,1N

Kode sampel	Cacahan per detik (cps) dalam 2 mL media					
	HNO_3		H_2SO_4		HCl	
	^{134}Cs	^{137}Cs	^{134}Cs	^{137}Cs	^{134}Cs	^{137}Cs
M1-1	1,7405	85,1788	1,7312	86,5081	1,7305	86,7887
M1-2	1,6176	83,2841	1,7442	86,9205	1,8444	90,0587
M2-1	2,3623	110,1943	2,2822	109,6518	2,3240	110,8787
M2-2	2,3187	109,5287	2,2331	107,5828	2,2537	108,7851

Tabel 4. Berat isotop ^{137}Cs dan ^{134}Cs dalam 0,056 g potongan PEB U_3Si_2/Al

Kode Sampel	Media HNO_3		Media H_2SO_4		Media HCl	
	$W=^{137}Cs$	$W=^{134}Cs$	$W=^{137}Cs$	$W=^{134}Cs$	$W=^{137}Cs$	$W=^{134}Cs$
	(g/0,056g PEB)	(g/0,056g PEB)	(g/0,056g PEB)	(g/0,056g PEB)	(g/0,056g PEB)	(g/0,056g PEB)
(M1-1)	0.0000458	5.455E-08	0.0000454	5.299E-08	0.0000456	5.307E-08
(M1-2)	0.0000359	4.232E-08	0.0000452	5.295E-08	0.0000451	5.090E-08
Rerata	0.0000408	4.843E-08	0.0000453	5.297E-08	0.0000453	5.199E-08

Tabel 5. Berat isotop ^{137}Cs dan ^{134}Cs dalam 0,075 g potongan PEB U_3Si_2/Al

Kode Sampel	Media HNO_3		Media H_2SO_4		Media HCl	
	$W=^{137}Cs$	$W=^{134}Cs$	$W=^{137}Cs$	$W=^{134}Cs$	$W=^{137}Cs$	$W=^{134}Cs$
	(g/0,075g PEB)	(g/0,075g PEB)	(g/0,075g PEB)	(g/0,075g PEB)	(g/0,075g PEB)	(g/0,075g PEB)
(M2-1)	0,0000596	7.448E-08	0,0000591	7.180E-08	0,0000590	7.212E-08
(M2-2)	0,0000590	9.717E-07	0,0000588	9.864E-07	0,0000586	9.436E-07
Rerata	0,0000593	5.231E-07	0,0000590	5.291E-07	0,0000588	5.078E-07

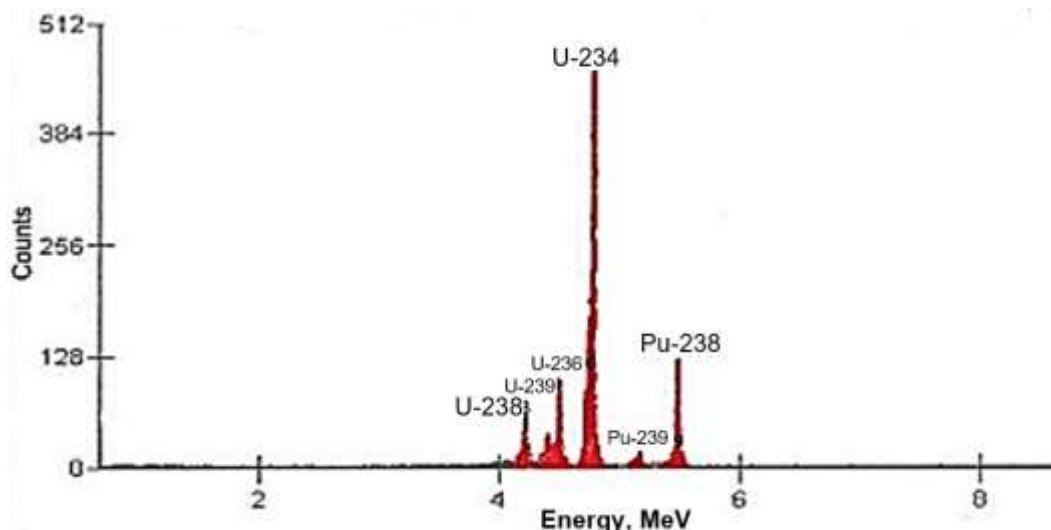
Dari Tabel 4 diketahui dalam 0,056 gPEB potongan PEB U_3Si_2/Al diperoleh berat rerata isotop ^{137}Cs sebesar 0,0000408 g; 0,0000453 g dan 0,0000453 g, sedangkan isotop ^{134}Cs sebesar 4,843E-08g; 5,297E-08 g dan 5,199E-08 masing-masing dalam media HNO_3 ; H_2SO_4 dan HCl. Sementara itu, berat isotop ^{137}Cs dalam 0,075 g potongan PEB U_3Si_2/Al diperoleh sebesar 0,0000593 g, 0,0000590 g dan 0,0000588 g, sedangkan berat isotop ^{134}Cs sebesar 5,231E-07 g, 5,291E-07 g dan 5,078E-07 g untuk masing-masing media HNO_3 ; H_2SO_4 dan HCl seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5. Dari Tabel 4 dan 5 diketahui bahwa tidak ada perbedaan berat isotop ^{137}Cs dan ^{134}Cs yang signifikan

dengan penggunaan variasi media larutan HNO_3 , H_2SO_4 dan HCl sebagai larutan pengemban. Hal ini disebabkan karena konsentrasi dan pH dari ketiga media pengemban adalah sama yaitu 0,1N pada pH 5-6.

Hasil pemisahan isotop uranium dengan metode kolom penukar anion menggunakan resin Dowex diperoleh spektrum isotop U (^{238}U , ^{235}U , ^{236}U dan ^{234}U) pada energi masing-masing seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Terlihat dengan jelas pada Gambar 4 bahwa spektrum isotop ^{238}U pada energi 4,1943 MeV, ^{235}U pada energi 4,397 MeV, ^{236}U pada energi 4,494 MeV dan isotop ^{234}U pada energi 4,777 MeV

serta masih diperoleh spektrum isotop ^{239}Pu pada 5,155 MeV dan ^{238}Pu pada 5,499 MeV walaupun dalam jumlah yang kecil[28]. Hal ini disebabkan karena pada saat pemisahan uranium, isotop ^{239}Pu dan ^{238}Pu masih terbawa dalam larutan efluen U. Pada saat pemisahan tahap pertama, isotop Pu masih lolos karena resin tidak mampu menahan isotop tersebut sehingga terikut ke efluen uranium[15,20]. Upaya untuk menanggulangi fenomena ini, maka pada penelitian berikutnya akan digunakan kolom yang lebih tinggi dari 10 cm, sehingga waktu kontak Pu dengan resin terjadi lebih lama dan akan terikat lebih kuat sehingga pada saat dielusi,

isotop Pu tidak keluar dari kolom. Spektrum isotop ^{238}U , ^{235}U , ^{236}U dan ^{234}U pada Gambar 4, selanjutnya dievaluasi sehingga diperoleh cacahan isotop pada masing masing energi untuk PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ dengan berat 0,056 g PEB dan 0,075 g PEB seperti yang ditunjukkan pada Tabel 6 dan 7. Selanjutnya untuk hasil cacahan isotop ^{238}U , ^{235}U , ^{236}U dan ^{234}U kemudian dievaluasi untuk mendapatkan kandungan (berat =W) isotop di dalam 0,056 g dan 0,075 g potongan PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ densitas 4,8 gU/cm³. Berat isotop ^{238}U , ^{235}U , ^{236}U dan ^{234}U dalam potongan PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ bagian *Middle* ditunjukkan pada Tabel 8 dan 9.



Gambar 4. Spektrum isotop uranium (^{238}U , ^{235}U , ^{236}U dan ^{234}U) pada berbagai energi

Tabel 6. Data cacahan isotop uranium dalam 300 μL larutan PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ berat 0,056 g

Kode sampel	Berat (glar)	Waktu cacah (detik)	Cacahan			
			^{238}U	^{235}U	^{236}U	^{234}U
SPIrr M1-1(1)	0,3027	22636,5	9	54	116	723
SPIrr M1-1(2)	0,3048	19415,88	28	27	157	1192
SPIrr M1-2(2)	0,3024	25000	33	55	194	1700

Tabel 7. Data cacahan isotop uranium dalam 300 μL larutan PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ berat 0,075 g

Kode sampel	Berat (glar)	Waktu cacah (detik)	Cacahan			
			^{238}U	^{235}U	^{236}U	^{234}U
SPIrr M 2-1(1)	0,3636	23152	20	24	87	789
SPIrr M 2-1(2)	0,3636	14303	25	22	155	1125
SPIrr M 2-2(2)	0,3016	21201	23	66	234	1583

Tabel 8. Berat isotop ^{238}U , ^{235}U , ^{236}U dan ^{234}U dalam 0,056 g PEB U_3Si_2/Al

Kode Sampel	$W=^{238}U$ (g/0,056g PEB)	$W=^{235}U$ (g/0,056g PEB)	$W=^{236}U$ (g/0,056g PEB)	$W=^{234}U$ (g/0,056g PEB)
SPIrr M1-1(1)	0,00244102	0,00307905	0,00000178	0,00001131
SPIrr M1-1(2)	0,00879300	0,00178253	0,00000279	0,00002160
SPIrr M1-2 (2)	0,00811229	0,00284240	0,00000270	0,00002411
Rerata	0,00644877	0,00256799	0,00000242	0,00001901

Tabel 9. Berat isotop ^{238}U , ^{235}U , ^{236}U dan ^{234}U dalam 0,075 g PEB U_3Si_2/Al

Kode Sampel	$W=^{238}U$ (g/0,075g PEB)	$W=^{235}U$ (g/0,075g PEB)	$W=^{236}U$ (g/0,075g PEB)	$W=^{234}U$ (g/0,075g PEB)
SPIrr M 2-1(1)	0,00519017	0,00130935	0,00000128	0,00001181
SPIrr M 2-1(2)	0,01050154	0,00194280	0,00000369	0,00002727
SPIrr M 2-2 (2)	0,00653429	0,00394192	0,00000376	0,00002595
Rerata	0,00740867	0,00239803	0,00000291	0,00002168

Tabel 8 dan 9 menunjukkan berat isotop ^{238}U , ^{235}U , ^{236}U dan ^{234}U dalam potongan PEB U_3Si_2/Al bagian M-1 (berat 0,056 g PEB) dan M-2 (berat 0,075 g PEB) relatif sama. Berat rerata isotop ^{238}U , ^{235}U , ^{236}U dan ^{234}U dalam 0,056 g potongan PEB U_3Si_2/Al diperoleh sebesar 0,00644877 g, 0,00256799 g, 0,00000242 g, dan 0,00001901 g, sedangkan dalam berat 0,075 g PEB diperoleh berat rerata sebesar 0,00740867 g, 0,00239803 g, 0,00000291 g, dan 0,00002168 g masing-masing untuk isotop ^{238}U , ^{235}U , ^{236}U dan ^{234}U .

SIMPULAN

Dari analisis fisikokimia dengan metode penukar kation menggunakan zeolit Lampung telah diperoleh berat rerata isotop ^{137}Cs dan ^{134}Cs dalam 0,056 g dan 0,075 g PEB U_3Si_2/Al , sedangkan dengan metode kolom penukar anion menggunakan resin Dowex telah diperoleh berat rerata isotop ^{238}U , ^{235}U , ^{236}U dan ^{234}U dalam 0,056 g dan 0,075 g PEB U_3Si_2/Al . Berat rerata isotop ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{238}U , ^{235}U , ^{236}U dan ^{234}U dalam potongan PEB U_3Si_2/Al bagian *Middle* dengan berat 0,056 g PEB dan 0,075 g PEB relatif sama. Dari hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa metode penukar kation dengan zeolit Lampung cukup selektif

digunakan untuk pemisahan cesium sedangkan metode kolom penukar anion menggunakan resin Dowex untuk pemisahan uranium masih perlu dilakukan kembali optimasi parameter terutama volume umpan, tinggi dan diameter kolom.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini terlaksana dengan dukungan dana DIPA-PTBBN BATAN Tahun Anggaran 2019. Ucapan terima kasih disampaikan kepada Ibu Iis Haryati, Samsul Fatimah dan Ariyanti Saputri yang telah membantu melaksanakan uji fisikokimia PEB U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ pasca iradiasi sehingga pembuatan makalah ini dapat terwujud.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Supardjo, A. Kadarjono, Isfandi, Y. D. A. Susanto, S. Permana, dan Guswardani, "Percobaan pembuatan pelat elemen bakar U-7Mo-xSi/Al dalam ukuran Mini," *URANIA*, Vol. 25, no. 3, hal. 141-152, 2019.
- [2] Y. Nampira, Supardjo, dan Sri Ismarwanti, "Uji tidak merusak bahan bakar U_3Si_2/Al tingkat muat uranium $4,8 \text{ gU/cm}^3$ pasca iradiasi fraksi bakar 20% dan 40%." *Prosiding Hasil Penelitian*

- Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir, 2013.
- [3] M. K. Ajiriyanto, A. B. Ginting, dan Junaedi, "Analisis metalografi pelat elemen bakar U_3Si_2/Al ," *URANIA*, Vol. 24, no. 1, hal. 39–50, 2018.
- [4] A. B. Ginting, Yanlinastuti, Noviarthy, Boybul, A. Nugroho, D. Anggraini, dan R. Kriswarini, "Penentuan *burn up* mutlak pelat elemen bakar U_3Si_2-Al tingkat muat uranium $2,96\text{ gU/cm}^3$ Pasca Iradiasi," *Jurnal Teknologi Bahan Nuklir*, Vol.11, No.2, hal.83-98, 2015.
- [5] A. B. Ginting and P. H. Liem, "Absolute burnup measurement of LEU silicide fuel plate irradiated in the RSG GAS multipurpose reactor by destructive radiochemical technique," *Annals Nuclear Energy*, vol. 85, pp. 613–620, 2015.
- [6] R. Artika, dkk, "Uji tak merusak pelat elemen bakar U_3Si_2/Al densitas uranium $4,8\text{ gU/cm}^3$ menggunakan radiografi sinar-x digital." *URANIA*. Vol. 26, No.1, 2020.
- [7] A. K. Dewi, Sukarsono, Supardjo, Masrukan, dan A.B Ginting, "Penguasaan Teknologi Pembuatan Bahan Bakar Reaktor Suhu Tinggi Dan Reaktor Riset", Buku Bunga Rampai. Jakarta: Batan Press, Oktober 2018, pp.68-77.
- [8] P. H. Liem, S. Amini, A. G. Hutagaol, and T. M. Sembiring, "Nondestructive burn-up verification by gamma-ray spectroscopy of LEU silicide fuel plates irradiated in the RSG GAS multipurpose reactor," *Annals Nuclear Energy*, vol. 56, pp. 57–65, 2013.
- [9] Boybul, Yanlinastuti, D. Anggraini, A. Nugroho, R. Kriswarini, dan A.B. Ginting. "Analisis kandungan cesium dan uranium dalam bahan bakar U_3Si_2/Al pasca iradiasi." *URANIA*, Vol.23, No.2, hal. 108 –122. 2017
- [10] A. B. Ginting, and D. Anggraini. "Metode pengendapan dan penukar kation untuk pemisahan cesium dalam bahan bakar U_3Si_2/Al ," *URANIA*, Vol. 22, No. 2, hal. 99 – 10, 2016.
- [11] ASTM C-1411. Standard Practice for The Ion Exchange Separation of Uranium and Plutonium Prior to Isotopic Analysis. 2014.
- [12] M. A. Rahman, M. O. Raruk, and Shanfiqul, "Application of the anion exchange resin for the separation of metal in Tert-butyl-Alcohol waterformic acid medium", *Journal Science*, Vol. 60, No.1, pp. 15– 20, 2012.
- [13] Y. Fujii, J. Fukuda and Hidetake, "Separation of uranium isotopes using ion-exchange chromatography isotope effects in U(IV) and U(VI) exchange Reaction," *Journal of Nuclear Science And Technology*, vol. 15, no. 10, pp. 745– 752. 1978.
- [14] Boybul, Yanlinastuti, I. Haryati, and S. Indaryati, "Pemisahan uranium dari PEB U_3Si_2/Al densitas $2,96\text{ gU/cm}^3$ pasca iradiasi dengan metode kolom penukar anion menggunakan resin Dowex 1x8 dalam media sulfat," Prosiding Hasil-Hasil Penelitian PTBBN, 2018.
- [15] Boybul, Yanlinastuti, S. Indaryati, I. Haryati, dan A. Nugroho, "Penentuan kandungan isotop ^{235}U dalam PEB U_3Si_2-Al TMU $2,96\text{ gU/cm}^3$ untuk perhitungan burn-up," *URANIA*, Vol. 21 No. 3, hal. 141– 150, 2015.
- [16] K. Sawada, Y. Enokida, M. Kamiya, T. Koyama, and K. Aoki, "Distribution coefficient of U(VI), nitric acid and FP elements in extraction from concentrated aqueous solution of nitrates by 30% Tri-n Butylphosphate solution," *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 46, No. 1, 2009.
- [17] A. Ahmadvour, M. Zabihia, M. Tahmasbi, and T. Rohani Bastami. "Effect of Adsorbents and Chemical Treatments on the Removal of Strontium from Aqueous Solutions." *Journal of Hazardous Materials*, Vol.182, pp. 552– 556, 2010.

- [18] S. Usuda, "Studies on Rapid Ion Exchange Separation of Transplutonium Elements With Mineral Acid-Metanol Mixed Media," Technical Report, JAERI 1315, 1989.
- [19] A. Bharadwaj and S. D. Bharadwaj, "Anion Exchange Separation of Some Lanthanide Ions with Uranium (VI) Using Nitrate Complexing Media," *International Journal of Chemical Sciences*, Vol.1 no.1, pp. 67 – 72, 2003.
- [20] D. Anggraini, Boybul, Yanlinastuti, A. Nugroho, R. Kriswarini, dan A.B. Ginting, "Pengaruh pelarut organik pada proses pertukaran anion dalam pemisahan uranium dari larutan U_3Si_2/Al pasca iradiasi." *URANIA*, Vol. 23, No. 2, hal. 97– 106, 2017.
- [21] S. A. Abo-Farha, N. A. Badawy, A. A. Emam and N. M. Moursy. "Anion exchange behavior of some elements in acetic acid-hydrochloric acid media." *Journal of American Science*. Vol.6, No.10, 2010.
- [22] D. Alan, H. Risto H, N. Jon, and P. Martyn, "Cation exchange isotherms and the measurement of radioisotope distribution coefficients for an MCM-22 phase containing aluminium." *Journal of Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 135, pp.21– 29, 2010.
- [23] V.C. Jessica, "Separation of actinides from spent nuclear fuel." *Journal of Hazardous Materials*, vol. 318, pp. 266– 281.
- [24] Yanlinastuti, Boybul, A.B. Ginting, dan D. Anggraini, "Pengaruh parameter proses elektrodeposisi terhadap penentuan berat isotop ^{235}U dalam PEB U_3Si_2/Al pasca iradiasi," *URANIA* Vol. 22, No. 2, 65 – 132, 2016.
- [25] L. S. Alexandre, E. B. C. Marcel, and A. F. P. Maria, "An overview of spectrometric techniques and sample preparation for the determination of impurities in uranium nuclear fuel grade." *Journal Microchemical*, vol. 106, pp.194– 201, 2013.
- [26] A. Nugroho, Y. Nampira, dan Yanlinastuti, "Analisis radionuklida ^{235}U dalam pelat elemen bakar U_3Si_2-Al pasca iradiasi menggunakan metode spektrometri alfa," Seminar Nasional IX SDM Teknologi Nuklir Yogyakarta, 31 Oktober 2013. ISSN 1978-0176.
- [27] A. Nugroho, Boybul, S. Indaryati, I. Haryati, R. Kriswarini, dan A.B. Ginting, "Pemisahan cesium dalam PEB U_3Si_2/Al densitas $2,96 \text{ gU/cm}^3$ pasca iradiasi dengan metode pengendapan chloroplatinate." *URANIA*, Vol. 25, No. 2, hal.103 – 114, 2019.
- [28] Table of Radionuclides, Monographic BIPM-5, Available: https://www.bipm.org/utis/common/pdf/monographieRI/Monographie_BIPM-5_Tables_Vol5.pdf.
- [29] Yanlinastuti, Boybul, I. Haryati, S. Indaryati, S. Fatimah, dan A.B. Ginting, "Pemisahan uranium dalam PEB U_3Si_2/Al densitas $2,96 \text{ gU/cm}^3$ pasca iradiasi dengan metode kolom penukar anion." *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir (SENTEN) 2019*. Padang, 18 September 2019, hal. 139, ISSN: 2355-7524.

