

Pemungutan isotop hasil fisi ^{137}Cs dan unsur bermassa berat dari bahan bakar $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ paska iradiasi

Arif Nugroho, Boybul, Aslina Boru Ginting

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir – BATAN Serpong

e-mail: Arif52@batan.go.id

Abstrak

Telah dilakukan pemungutan dan analisis isotop ^{137}Cs dengan unsur bermassa berat yang terkandung di dalam pelat elemen bakar (PEB) $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ paska iradiasi. Tujuan dilakukannya pemungutan adalah untuk mendapatkan kandungan isotop ^{137}Cs , ^{235}U dan ^{239}Pu di dalam PEB $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ paska iradiasi untuk selanjutnya dapat digunakan dalam perhitungan *burn up*. Pemungutan dilakukan dengan metode penukar kation menggunakan zeolit Lampung. Larutan $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ paska iradiasi dipipet sebanyak 150 μL dan dimasukkan ke dalam 4 (empat) buah vial. Ke dalam masing-masing vial tersebut ditambahkan zeolit Lampung dengan variasi berat 300, 400, 500 dan 600 mg. Selanjutnya dilakukan proses penukar kation dengan pengocokan selama 1 jam menggunakan *shaker* dengan kecepatan 20 rpm dan dibiarkan selama 24 jam. Hasil proses penukar kation menunjukkan terpisahnya paduan ^{137}Cs -zeolit sebagai fasa padat dengan isotop U dan Pu sebagai unsur bermassa berat (*heavy element*, HE) dalam fasa cair. Padatan ^{137}Cs -zeolit kemudian ditimbang dan dianalisis dengan spektrometer- γ sehingga diperoleh kandungan isotop ^{137}Cs . Untuk mengetahui kandungan isotop U dan Pu sebagai HE di dalam fasa cair dilakukan pemipetan supernatan sebanyak 250 μL dan dikenakan proses elektrodeposisi menggunakan media *buffer* $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 1M pada kondisi kuat arus 1,2 Ampere dengan jarak elektroda 10 mm selama 2 jam. Selanjutnya dilakukan pengukuran dan analisis isotop U dan Pu menggunakan spektrometer- α . Hasil pengukuran menunjukkan bahwa zeolit Lampung dengan berat 500 mg adalah berat optimum untuk memungut isotop hasil fisi (^{137}Cs) dari HE. Kandungan isotop ^{137}Cs diperoleh sebesar 0,0118 μg , isotop ^{235}U sebesar 0,3110 μg dan unsur HE sebesar 1,5611 μg dengan deviasi pengukuran sebesar 0,00001 μg .

Kata kunci: Pemisahan, $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ paska iradiasi, isotop, zeolit, spektrometer- α/γ

Abstract

It has been done a recovery and analysis of ^{137}Cs isotope and heavy elements which are present in the irradiated $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ fuel plates. The recovery is carried to obtain composition of ^{137}Cs , ^{235}U and ^{239}Pu isotopes which will be used for burn up calculation. The recovery has been done by cation exchange method with Lampung zeolites. About 150 μL of irradiated $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ fuel plates solution has been taken and being placed into 4 vials. Moreover, a number of Lampung zeolites have been added into each vial with a variation of weight about 300, 400, 500 and 600 mg. A process of cation exchange has been carried out with a shaker at 200 rpm for 60 minutes and left it for 24 hours. The result of cation exchange process has indicated that there is separation between ^{137}Cs -zeolite and U-Pu which present in the liquid phase. The ^{137}Cs -zeolite are then weighed and analysed using a spectrometer-alpha. The analysis of U and Pu in the liquid phase has been done by taking 250 μL of supernatant solution and being processed with electrodeposition by using buffer media of $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 1 M with a current of 1.2 Ampere and electrode's distance at 10 mm for 2 hours. After the electrodeposition process, the solution has been analysed using spectrometer alpha to obtain the composition of U and Pu isotopes. The results show that the optimum weight of Lampung Zeolites for the separation from heavy elements in irradiated fuel plates is 500 mg. Furthermore, it has been obtained ^{137}Cs about 0.0118 μg , ^{235}U 0.3110 μg and heavy elements 1.5611 μg with a measurement deviation about 0.00001 μg .

Keywords: Separation, solution of $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ fuel plate irradiated, isotopes, zeolites α/γ spectrometre.

1. Pendahuluan

Pelat elemen bakar (PEB) U_3Si_2 -Al dengan tingkat muat uranium (TMU) $2,96 \text{ gU/cm}^3$ paska iradiasi yang telah mengalami proses pendinginan di kolam reaktor (*fuel storage*) dikirim ke Instalasi Radiometalurgi (IRM) untuk dilakukan analisis *PIE* (*Post Irradiation Examination*). Beberapa analisis *PIE* yang dilakukan terhadap bahan bakar paska iradiasi adalah uji tanpa merusak (*Non Destructive Test, NDT*) yang meliputi ketebalan PEB, distribusi hasil fisi, *swelling*, kelengkungan, cacat secara visual, dan uji merusak (*Destructive Test, DT*) yang meliputi analisis metalografi, mekanik dan analisis *burn up* secara radiokimia. Data *PIE* yang diperoleh digunakan sebagai umpan balik kepada Pusat Reaktor Serba Guna (PRSG) maupun pabrikan bahan bakar PEB tipe U_3Si_2 -Al untuk mengetahui unjuk kerja bahan bakar selama digunakan di teras reaktor dan dari sisi pabrikan. Disamping itu, data-data *PIE* dibutuhkan sebagai persyaratan mutlak untuk mengurus perizinan pengoperasian PRSG dalam meningkatkan daya operasi maupun *burn up* bahan bakar ke Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN). Beberapa penelitian di dunia, data-data *PIE* digunakan sebagai dasar ilmiah untuk penelitian pengembangan dalam mencari bahan bakar maju dengan densitas tinggi, misalnya bahan bakar reaktor riset jenis UMo-Al. Bahan bakar riset jenis UMo-Al mempunyai densitas sekitar $16,8 \text{ g/cm}^3$ dibanding bahan bakar U_3Si_2 yang hanya sekitar $12,2 \text{ g/cm}^3$ [1,2]. Data *PIE* juga dapat digunakan untuk mengetahui keunggulan maupun kelemahan unjuk kerja bahan bakar. Bahan bakar jenis U-Mo mempunyai daerah fasa gamma (γ) relatif besar dan mempunyai kompatibilitas serta stabilitas panas dengan matrik Al relatif baik [3]. Bahan bakar U_3Si_2 -Al mudah difabrikasi dan stabil selama iradiasi di dalam reaktor, tetapi mempunyai kelemahan dalam proses olah ulang (*reprocessing*) gagal pabrikan maupun bahan bakar bekas sangat sulit dilakukan [4]. Salah satu parameter uji dalam penentuan *PIE* adalah *burn up* bahan bakar. Dalam perhitungan *burn up* secara radiokimia, para peneliti bahan bakar di dunia menggunakan beberapa isotop hasil fisi sebagai monitor *burn up*. Di Korea menggunakan isotop Nd, U dan Pu sebagai monitor *burn up*, di Chili

menggunakan isotop ^{95}Zr dan di India maupun Amerika menggunakan isotop Cs, U dan Pu sebagai monitor *burn up* [5,6,7]. BATAN-Indonesia akan menggunakan isotop Cs, U dan Pu dalam perhitungan *burn up* bahan bakar PEB U_3Si_2 -Al paska iradiasi, hal ini sesuai dengan yang pernah dilakukan oleh peneliti sebelumnya yang didukung oleh ASTM E-244-80 [8,9].

PEB U_3Si_2 -Al paska iradiasi TMU $2,96 \text{ gr U/cm}^3$ mengandung beberapa hasil fisi seperti isotop ^{137}Cs , ^{144}Ba , dan ^{90}Sr dan unsur bermassa berat (*HE= heavy element*) diantaranya adalah isotop U (^{238}U , ^{235}U , ^{234}U , ^{236}U) dan Pu (^{239}Pu , ^{238}Pu). Isotop ^{144}Ba adalah isotop hasil fisi yang masih dapat meluruh dan menghasilkan isotop lain sebagai hasil fisi yang lebih stabil yaitu ^{90}Sr dan ^{137}Cs [10,11]. Hasil fisi yang digunakan dalam menghitung *burn-up* PEB U_3Si_2 -Al paska iradiasi TMU $2,96 \text{ gr U/cm}^3$ adalah jumlah isotop ^{235}U yang terbakar menjadi beberapa hasil fisi (salah satunya adalah isotop ^{137}Cs) serta ^{235}U sisa yang akan dibandingkan dengan jumlah ^{235}U mula-mula. Namun karena besaran *fission yield* dari isotop ^{137}Cs hanya sekitar 6,2%, menyebabkan kandungan isotop ^{137}Cs di dalam bahan bakar U_3Si_2 -Al paska iradiasi lebih kecil dibandingkan dengan kandungan isotop U sebagai bahan dasar dalam pembuatan elemen bakar nuklir. Umumnya isotop tersebut pemancar radiasi α , β , γ , sehingga untuk menentukan komposisi atom dari isotop tersebut dapat digunakan Spektrometer-massa, namun BATAN belum mempunyai alat tersebut sehingga dilakukan dengan cara pengukuran komposisi isotop radioaktif dengan menggunakan Spektrometri- α maupun Spektrometri- γ [12]. Pengukuran isotop menggunakan metode spektrometri, terlebih dahulu harus dilakukan proses pemisahan antara isotop pemancar gamma dengan isotop pemancar alpha. Tujuan pemisahan adalah untuk mendapatkan kandungan isotop pemancar gamma maupun pemancar alpha secara akurat sekaligus mengurangi paparan radiasi gamma sebagai *background* pada saat preparasi sampel maupun pada saat pengukuran. Beberapa hal yang menyebabkan hasil pengukuran kurang akurat antara lain adalah konsentrasi isotop U dalam bahan bakar lebih besar dari pada isotop Cs. Daya tembus pemancar gamma isotop Cs

lebih besar dibandingkan dengan isotop U dan Pu, walaupun energi antara isotop Cs dengan isotop U dan Pu jauh berbeda. Sehingga pada saat pengukuran dengan spektrometer- α , spektrum isotop U dan Pu masih tertutup oleh isotop Cs sebagai pemancar sinar- γ . Oleh karena itu, sebelum melakukan analisis dengan spektrometri perlu dilakukan pemisahan isotop hasil fisi ^{137}Cs dari isotop U dan Pu sebagai HE. Beberapa metode yang dapat digunakan untuk memungut isotop ^{137}Cs dari bahan bakar nuklir paska iradiasi antara lain adalah metode ekstraksi menggunakan *TBP/OK* [13] dan metode pengendapan langsung sebagai CsClO_4 [12]. Namun pemungutan dengan kedua metode tersebut belum menunjukkan hasil yang baik karena tingkat pemungutan isotop ^{137}Cs yang kecil yaitu masing-masing sebesar $28,03\% \pm 5,33\%$ dan $52,55\% \pm 1,11\%$ untuk metode ekstraksi dan pengendapan [14]. Berdasarkan hasil tersebut maka pada penelitian ini digunakan metode penukar kation menggunakan zeolit Lampung untuk memungut isotop ^{137}Cs di dalam PEB $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ paska iradiasi. Metode penukar kation dipilih karena berdasarkan pada hasil penelitian sebelumnya [15], telah diketahui bahwa zeolit Lampung sangat selektif terhadap isotop ^{137}Cs dibandingkan dengan isotop uranium di dalam larutan bahan bakar $\text{U}_3\text{O}_8\text{-Al}$ paska iradiasi. Untuk mengetahui kemampuan zeolit Lampung mengikat isotop ^{137}Cs di dalam PEB $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ paska iradiasi, maka dilakukan pemisahan isotop ^{137}Cs dari isotop U dan Pu sebagai HE. Agar diperoleh kandungan isotop ^{137}Cs , ^{235}U dan ^{239}Pu secara sempurna, maka dilakukan optimasi pemungutan ^{137}Cs di dalam PEB $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ paska iradiasi dengan cara penambahan zeolit Lampung dengan variasi berat dan waktu kontak proses penukar kation selama 1 jam. Dalam proses pemungutan dengan metode penukar kation, isotop ^{137}Cs akan terikat dengan zeolit dalam bentuk paduan ^{137}Cs -zeolit sebagai fasa padat, sehingga terpisah dengan isotop U dan Pu di dalam fasa cair. Hasil pemungutan isotop ^{137}Cs dengan isotop U dan Pu menggunakan metode penukar kation kemudian dibandingkan dengan hasil pengukuran langsung (tanpa pemisahan) dengan tujuan untuk mengetahui besar pemungutan isotop ^{137}Cs , U dan Pu di dalam larutan PEB

$\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ paska iradiasi. Besar kandungan isotop ^{137}Cs dianalisis dengan menggunakan spektrometer- γ , sedangkan isotop U dan Pu dianalisis dengan spektrometer- α . Hasil pengukuran isotop ^{137}Cs dengan spektrometer- γ dan isotop U dan Pu dengan spektrometer- α diperoleh berupa cacahan per detik (cps), kemudian di evaluasi dengan menggunakan rumus persamaan (1) dan (2) sehingga diperoleh komposisi isotop ^{137}Cs maupun komposisi U dan Pu sebagai HE dengan berat tertentu di dalam sampel bahan bakar nuklir. Komposisi isotop tersebut dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$Eff = \frac{C_i}{Akt \cdot I_i} \quad (1)$$

$$N = \frac{Akt}{Eff \cdot I_{rel} \cdot \lambda} \quad (2)$$

Keterangan:

- C_i : jumlah cacahan, cacah/detik, dihitung dari *net counts* isotop ($C - C_{bg}$)
- I_i : faktor *yield* intensitas dari isotop-i (lihat daftar tabel isotop).
- N : jumlah isotop dalam berat tertentu sampel bahan bakar nuklir
- Akt : keaktifan isotop, dps atau Bq
- Eff : efisiensi detektor
- I_{rel} : Intensitas relatif puncak isotop tertentu pada energi yang diukur
- λ : konstanta peluruhan atau $(\ln 2)/T_{1/2}$
- $T_{1/2}$: waktu paruh dari isotop $^{137}\text{Cs} = 30,17$ tahun dan isotop U, ($^{234}\text{U} = 2,45 \cdot 10^5$ tahun, $^{235}\text{U} = 7,04 \cdot 10^8$ dan $^{238}\text{U} = 4,48 \cdot 10^9$ tahun, isotop $^{239}\text{Pu} = 2,41 \times 10^4$ tahun).

Dalam melakukan pemungutan dan analisis isotop ^{137}Cs dengan isotop ^{235}U maupun ^{239}Pu di dalam bahan bakar $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ paska iradiasi banyak aspek pengerjaan secara sistematis yang dapat menyebabkan penyimpangan hasil perhitungan. Aspek tersebut antara lain adalah proses pemungutan isotop ^{137}Cs yang dilakukan dengan penukar kation menggunakan zeolit Lampung. Dalam usaha untuk mengurangi dampak aspek pemungutan dengan metode penukar kation, dilakukan optimasi parameter proses penukar kation dengan tujuan untuk memahami fenomena proses penukar kation menggunakan variasi berat zeolit Lampung.

Hasil optimasi ini akan diperoleh kandungan isotop ^{137}Cs , ^{235}U dan ^{239}Pu yang lebih akurat ditandai dengan tidak diperolehnya kandungan isotop ^{137}Cs dalam supernatan. Selain aspek pemungutan yang sangat berpengaruh, aspek lainnya adalah aspek proses elektrodeposisi dilakukan dengan mengikuti metode *ASTM C-1000-90* dan *C-1000*, aspek pengukuran dengan spektrometri dan aspek evaluasi spektrum isotop ^{137}Cs isotop ^{235}U dan ^{239}Pu sebagai hasil analisis dengan menggunakan spektrometer- α/γ [16]. Data-data isotop hasil pemungutan selanjutnya akan digunakan untuk perhitungan *burn up* mutlak bahan bakar PEB $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ paska iradiasi TMU $2,96 \text{ grU/cm}^3$.

2. Tata kerja

Sebelum melakukan pemungutan isotop ^{137}Cs di dalam PEB $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ paska iradiasi TMU $2,96 \text{ grU/cm}^3$, terlebih dahulu dilakukan optimasi pemungutan terhadap sampel standar ^{137}Cs dari *NIST (National Institute of Standards Technology)*. Selain penentuan efisiensi detektor spektrometer- γ , optimasi parameter yang penting adalah menentukan besar pemungutan (*recovery*) isotop ^{137}Cs standar dengan metode penukar kation menggunakan zeolit Lampung. Sebelum digunakan zeolit Lampung terlebih dahulu diaktifasi dengan menggunakan NH_4Cl . Tujuan aktifasi adalah membuang senyawa pengganggu proses penyerapan dan menata kembali letak kation yang dapat dipertukarkan (mengubah zeolit *multi*-kation menjadi *uni*-kation zeolit- NH_4) dalam kerangka zeolit. Sedangkan optimasi pengukuran terhadap isotop U dilakukan terhadap sampel standar U_3O_8 yang mengandung isotop ^{238}U , ^{235}U , ^{234}U dan ^{236}U meliputi penentuan efisiensi detektor spektrometer- α maupun parameter proses elektrodeposisi (*ED*). Adapun tahapan penelitian dilakukan seperti langkah-langkah berikut ini.

2.1. Penentuan efisiensi detektor spektrometer - α/γ

Dalam usaha mendapatkan hasil pengukuran yang akurat terhadap isotop ^{137}Cs , ^{235}U dan ^{239}Pu , terlebih dahulu harus diketahui

parameter optimum pengukuran menggunakan spektrometer- γ maupun spektrometer- α . Kalibrasi energi pengukuran spektrometer- γ dilakukan dengan menggunakan sumber standar *point* ^{60}Co dan untuk mengetahui parameter pengukuran dengan spektrometer- γ dilakukan dengan mengukur sampel standar isotop ^{137}Cs . Sedangkan kalibrasi energi pengukuran spektrometer- α dilakukan dengan pengukuran sampel standar isotop *AMR-43* yang mengandung isotop campuran ^{241}Am , ^{243}Cm dan ^{239}Pu [20,21] dan parameter pengukuran dengan spektrometer- α digunakan sampel standar U_3O_8 20%. Hasil pengukuran sampel standar ^{137}Cs dan isotop *AMR-43* masing-masing digunakan untuk mengetahui efisiensi detektor spektrometer- α/γ dan hasil pengukuran terhadap sampel standar U_3O_8 20% digunakan untuk mengetahui besar pemungutan (% *recovery*) isotop ^{235}U dengan perhitungan konsentrasi U dalam larutan berdasarkan sertifikat.

2.2. Penentuan *recovery* isotop standar ^{137}Cs menggunakan metode penukar kation

Besarnya *recovery* pemisahan isotop ^{137}Cs menggunakan metode penukar kation dilakukan dengan memipet $50 \mu\text{L}$ isotop standar ^{137}Cs dari *NIST*. Kemudian ditambahkan zeolit Lampung dan dilakukan proses penukar kation. Hasil proses penukar kation menunjukkan terjadinya pemisahan antara paduan ^{137}Cs -zeolit sebagai fasa padat dengan unsur pengotor di fasa cair dalam fasa cair. Paduan ^{137}Cs -zeolit kemudian diukur dengan menggunakan spektrometer γ , sehingga diperoleh kandungan isotop ^{137}Cs di dalam $50 \mu\text{L}$ isotop standar ^{137}Cs dari *NIST*. Besar *recovery* merupakan perbandingan kandungan isotop standar ^{137}Cs dari sertifikat dengan kandungan isotop ^{137}Cs dari pengukuran.

2.3. Pemungutan isotop ^{137}Cs dalam larutan PEB $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ paska iradiasi

Setelah diperoleh parameter pengukuran yang optimum, kemudian dilanjutkan dengan pemungutan dan analisis isotop ^{137}Cs dengan isotop ^{235}U dan ^{239}Pu dalam larutan PEB $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ paska iradiasi. Pemungutan isotop ^{137}Cs dan

isotop ^{235}U dan ^{239}Pu dilakukan dengan metode penukar kation menggunakan zeolit Lampung. Larutan $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ paska iradiasi dipipet sebanyak 150 μL dan masing-masing dimasukkan ke dalam 4 (empat) buah *vial* yang telah diberi label. Kemudian ke dalam masing-masing *vial* tersebut ditambahkan zeolit Lampung seberat 300, 400, 500 dan 600 mg. Selanjutnya dilakukan proses penukar kation dengan pengocokan selama 1 jam menggunakan *shaker* dengan kecepatan 20 rpm dan didiamkan selama 24 jam. Hasil proses penukar kation menunjukkan terjadinya pemisahan antara paduan ^{137}Cs -zeolit sebagai fasa padat dengan isotop U dan Pu dalam fasa cair [17,18].

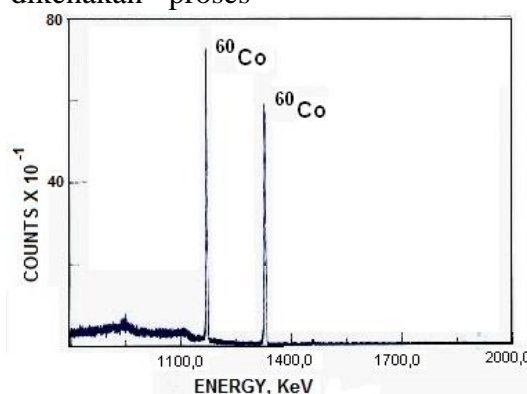
2.4. Pengukuran dan analisis isotop ^{137}Cs isotop U dan Pu dengan spektrometer- α/γ

Padatan paduan ^{137}Cs -zeolit hasil pemisahan kemudian dikeringkan dan ditimbang, selanjutnya untuk mengetahui kandungan isotop ^{137}Cs dilakukan pengukuran menggunakan spektrometer- γ dengan waktu cacah 1500 detik pada jarak detektor 25 cm dari sampel. Penggunaan waktu cacah dan jarak detektor dipilih berdasarkan hasil optimasi yang dilakukan terhadap sampel standar isotop ^{137}Cs dari NIST. Untuk pengukuran isotop U dan Pu yang terdapat di dalam larutan supernatan, dilakukan dengan cara memipet supernatan sebanyak 250 μL untuk dikenakan proses

elektrodeposisi (ED). Proses ED dilakukan dengan menggunakan media *buffer* $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 1M yang dapat diendapkan pada kondisi kuat arus 1,2 Ampere dengan jarak elektroda 10 mm selama 2 jam mengikuti ASTM No C-1411-01 [19,20,21]. Selanjutnya dilakukan pengukuran dan analisis isotop U dan Pu menggunakan spektrometer- α pada *tray* ke-2 dengan waktu cacah 20000 detik. Penggunaan waktu cacah dan jarak *tray* sampel dengan detektor digunakan berdasarkan hasil optimasi yang dilakukan terhadap isotop ^{235}U di dalam standar U_3O_8 . Hasil analisis berupa cacahan per detik (cps) kemudian dievaluasi dengan menggunakan rumus persamaan (1) dan (2). Hasil analisis isotop ^{137}Cs maupun ^{235}U dan ^{239}Pu dengan metode penukar kation dibandingkan dengan kandungan isotop ^{137}Cs , ^{235}U dan ^{239}Pu yang diperoleh secara pengukuran langsung (tanpa dilakukan pemisahan isotop sebelumnya).

3. Hasil dan Pembahasan

Kalibrasi energi alat spektrometer- γ dilakukan dengan menggunakan sumber standar isotop ^{60}Co dengan waktu cacah 1500 detik. Hasil kalibrasi energi menggunakan isotop ^{60}Co terdapat dua spektrum pada energi 1173,24 keV dan 1332,5 keV seperti yang terlihat pada Gb. 1.



Gb. 1. Spektrum ^{60}Co pada energi 1173,24 keV dan 1332,5 keV.

Setelah dilakukan kalibrasi energi, selanjutnya dilakukan penentuan efisiensi detektor dengan melakukan pengukuran terhadap sampel standar larutan isotop ^{137}Cs . Pengukuran dilakukan beberapa kali pengulangan dengan waktu cacah

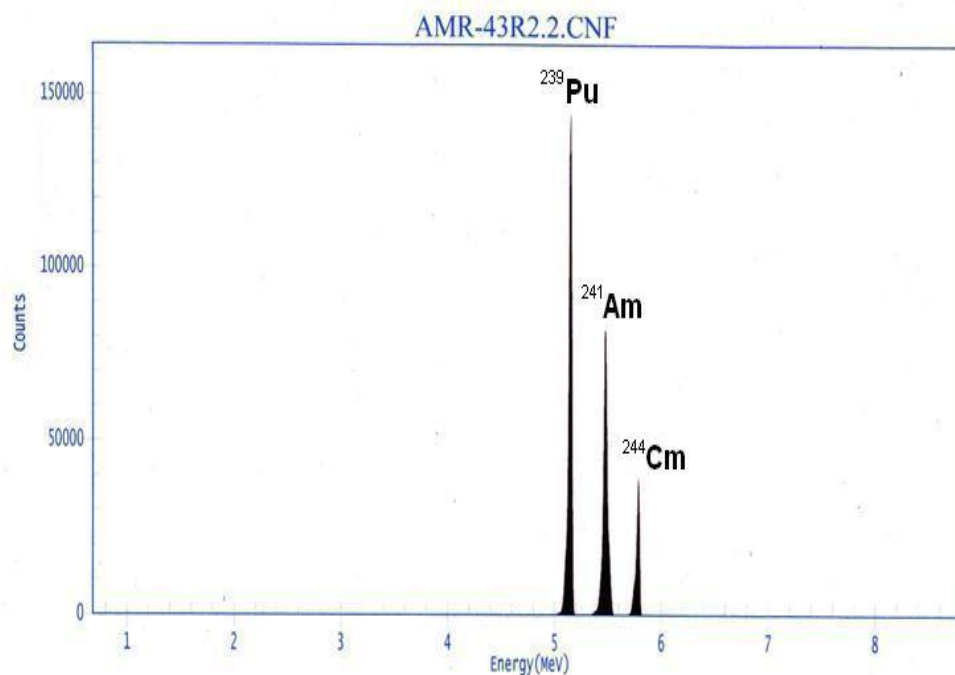
1500 detik dan jarak 25 cm. Hasil cacahan kemudian dihitung dengan menggunakan persamaan (1), sehingga diperoleh besaran efisiensi detektor hasil perhitungan sebesar 0,053 % seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1

Tabel 1. Data perhitungan efisiensi detektor spektrometer- γ

Aktivitas standar ^{137}Cs , (Bq)		Cacahan	Cacah per detik (cps)	I_γ (tabel) (%)	Efisiensi Detektor (%)
Tahun 2009	Tahun 2011				
		21853			
34148	32802,57	22309	14,8613	85,1	0,053
		22714			
		22292			

Perhitungan efisiensi detektor spektrometer- α dilakukan dengan mengukur standar AMR-43. Pengukuran dilakukan 3 (tiga) kali pengulangan dengan waktu cacah 5000 detik

pada tray 2. Hasil pengukuran terhadap AMR-43 diperoleh 3 (tiga) spektrum yaitu ^{241}Am , ^{243}Cm dan ^{239}Pu seperti yang ditunjukkan pada Gb. 2.



Gb.2. Spektrum isotop standar AMR-43 (isotop ^{239}Pu , ^{241}Am , dan ^{244}Cm)

Dari hasil pengukuran ^{241}Am , ^{243}Cm dan ^{239}Pu dilakukan perhitungan efisiensi detektor menggunakan persamaan (1) dan diperoleh

efisiensi detektor sebesar 31,4 % seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Data perhitungan efisiensi detektor spektrometer- α .

Aktivitas Standard AMR-43, (Bq)							Cacah per detik (cps)	I α (tabel) (%)	Efisiensi detektor (%)
<i>Net Area</i> (cacah)									
Tahun	²⁴¹ Am	²⁴⁴ Cm	²³⁹ Pu	²⁴¹ Am	²⁴⁴ Cm	²³⁹ Pu			
1990	1720	1430	2220	1879853	743697	2541846	508,162	73	31,4
2011	1665	654	2216	1876205	744023	2542400			
				1863150	737692	2538179			
				1873069	741804	2540808			

Besaran efisiensi detektor digunakan untuk menghitung besar aktivitas atau konsentrasi isotop ¹³⁷Cs maupun ²³⁸U, ²³⁵U dan ²³⁴U di dalam larutan standar U₃O₈ 20% maupun di dalam larutan PEB U₃Si₂-Al paska iradiasi. Efisiensi detektor dapat juga digunakan untuk mengubah *cps* (*counts per second*) menjadi konsentrasi atau berat isotop ²³⁵U yang terdapat di dalam sampel bahan bakar nuklir dengan cara mengikuti persamaan (2).

Setelah diperoleh efisiensi detektor spektrometer- γ maupun spektrometer- α ,

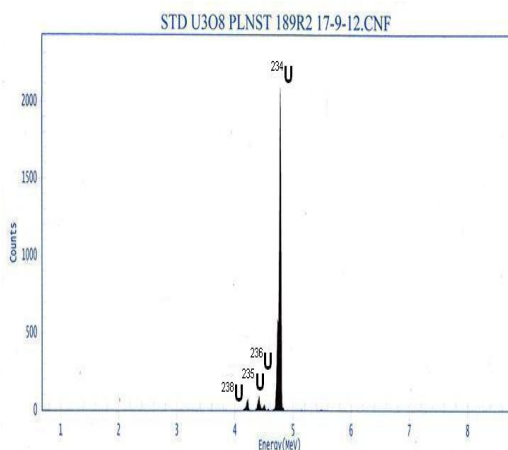
selanjutnya dilakukan pengukuran isotop standar isotop ¹³⁷Cs dan standar U₃O₈ 20% yang mengandung isotop ²³⁸U, ²³⁵U dan ²³⁴U. Tujuan pengukuran standar isotop ¹³⁷Cs adalah untuk mengetahui *recovery* pemungutan, sedangkan pengukuran standar U₃O₈ 20% untuk mengetahui kondisi parameter proses *ED* yang optimal dan besar pemungutan (*recovery*) isotop U dan Pu di dalam bahan bakar. Penentuan *recovery* terhadap standar isotop ¹³⁷Cs diperoleh hasil seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Kandungan isotop ¹³⁷Cs di dalam 50 μ L standar NIST, Waktu cacah =1000 detik, cacah Bg=0,0814 cps.

Jenis Isotop	Cacah	Cacah/ detik (cps)	I γ tabel (%)	Kand. ¹³⁷ Cs pengukuran (μ g)	Kand. ¹³⁷ Cs sertifikat (μ g)	<i>Recovery</i> (%)
¹³⁷ Cs	16052	16,1583	85,1	0,00378	0,00388	97,54
	16335					
	16085					

Tabel 3, menunjukkan bahwa diperoleh *recovery* pemisahan isotop ¹³⁷Cs dengan menggunakan metode penukar kation sebesar 97,54 %. Besar pemungutan isotop uranium dilakukan terhadap standar U₃O₈ 20%. Hasil

analisis kandungan U-total berupa spektrum isotop ²³⁸U, ²³⁵U, ²³⁶U dan ²³⁴U sebagai hasil pengukuran standar U₃O₈ 20% dengan spektrometer- α ditunjukkan pada Gb. 3.



Gb. 3 . Spektrum standar U_3O_8 (isotop ^{238}U , ^{235}U , ^{236}U dan ^{234}U).

Spektrum standar U_3O_8 yang terdiri dari isotop (^{238}U , ^{235}U , ^{236}U dan ^{234}U) diperoleh berupa cacahan per detik (cps) yang selanjutnya

diestimasi menjadi satuan berat (μg) seperti yang terdapat pada Tabel 4.

Tabel 4. Kandungan isotop ^{235}U dalam standar U_3O_8 20% dan *recovery*

Kandungan	Perhitungan (μg)	Pengukuran (μg)	<i>Recovery</i> (%)
U-total	39,1783	33,4482	85,3745
^{235}U	9,7202	8,9992	92,5818

Dalam larutan standar U_3O_8 20 % diperoleh konsentrasi U-total sebesar 39,1783 μg (hasil perhitungan), sedangkan hasil pengukuran dan analisis diperoleh konsentrasi U-total sebesar 33,4482 μg . Demikian juga hasil analisis isotop ^{235}U di dalam larutan standar U_3O_8 20% diperoleh sebesar 9,7202 μg (perhitungan) dan konsentrasi isotop ^{235}U hasil pengukuran standar U_3O_8 20% diperoleh sebesar 8,9992 μg . Tabel 4 menunjukkan konsentrasi U-total dan ^{235}U hasil perhitungan (sertifikat) lebih besar dibandingkan dengan konsentrasi U hasil pengukuran dengan besar pemungutan masing-masing sebesar 85,3745% dan 92,5818 %. Hasil tersebut dianggap telah memenuhi persyaratan karena telah menghasilkan ketepatan hasil atau presisi yang dapat dipercaya pada keberterimaan 95%. Parameter proses ED maupun parameter pengukuran terhadap standar U_3O_8 20% kemudian digunakan untuk menganalisis kandungan isotop U dan Pu di dalam larutan supernatan PEB U_3Si_2 -Al TMU

2,96 gU/cm^3 paska iradiasi. Hasil pemungutan isotop ^{137}Cs , U dan Pu menggunakan metode penukar kation akan dibandingkan dengan hasil pengukuran langsung.

3.1. Pengukuran Langsung

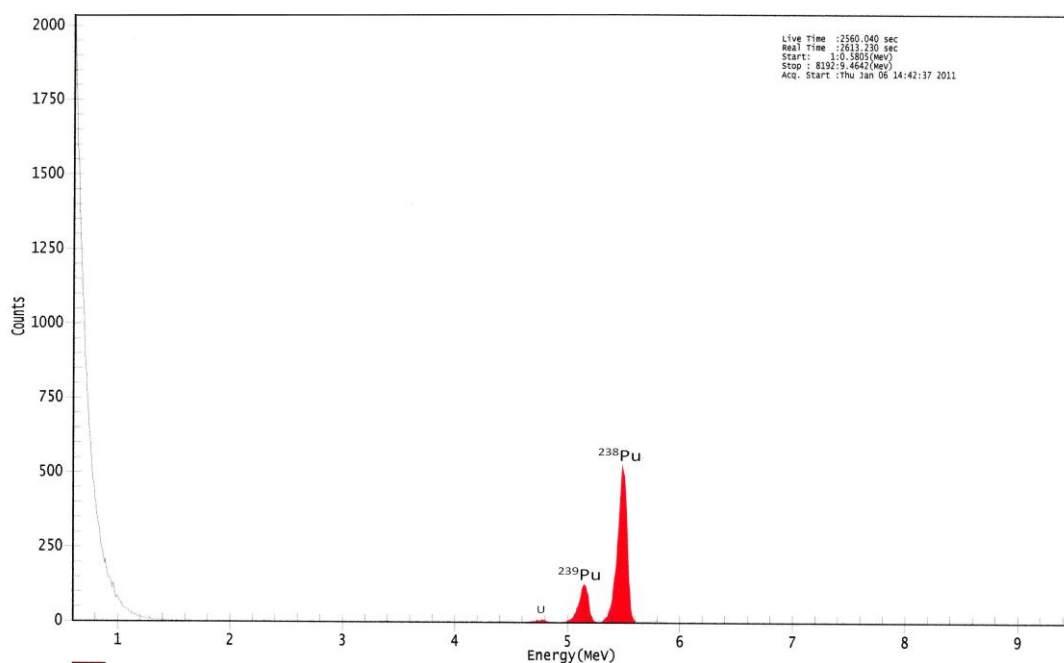
Pengukuran isotop ^{137}Cs dan ^{235}U maupun ^{239}Pu di dalam larutan PEB U_3Si_2 -Al paska iradiasi dilakukan secara pengukuran langsung (tanpa pemisahan). Dalam melakukan analisis isotop ^{137}Cs dipipet 150 μl larutan PEB U_3Si_2 -Al paska iradiasi dan dimasukkan ke dalam vial, selanjutnya diukur langsung dengan menggunakan spektrometer- γ dengan waktu cacah 1500 detik dan jarak detektor 25 cm. Hasil pengukuran dengan 3 (tiga) kali pengulangan menunjukkan kandungan isotop ^{137}Cs di dalam 150 μl PEB U_3Si_2 -Al paska iradiasi sebesar 0,0106 μg seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Kandungan isotop ^{137}Cs di dalam 150 μl PEB $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ paska iradiasi, Waktu cacah =5000 detik , cacah $\text{Bg}=0,0814$ cps

Jenis Isotop	Cacahan	Cacahan per detik (cps)	Iy tabel (%)	$T_{1/2}$ (detik)	Kand. ^{137}Cs (μg)	Standar Deviasi
^{137}Cs	22903	15,2193	85,1	952104860	0,0106	0,00001
	22996					
	22954					
	22951					

Pengukuran isotop ^{235}U maupun ^{239}Pu dilakukan dengan cara memipet larutan PEB $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ paska iradiasi sebanyak 250 μL , kemudian dilanjutkan dengan proses ED (mengikuti metoda ASTM E-219-1990) hingga terbentuk endapan tipis di atas planset stainless

steel. Planset tersebut kemudian diukur dengan spektrometer- α pada tray 2 dengan waktu cacah 20000 detik. Hasil pengukuran isotop ^{235}U maupun ^{239}Pu diperoleh 3(tiga) spektrum seperti ditunjukkan pada Gb. 4.



Gb. 4. Spektrum isotop ^{235}U dan Pu (^{239}Pu , ^{238}Pu) dari PEB $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ paska iradiasi dengan pengukuran langsung.

Gb. 4 menunjukkan bahwa selain isotop ^{235}U pada $E_\alpha=4,679$ MeV, masih terdapat isotop-U lainnya (spektrumnya berimpit dan sangat sulit untuk diidentifikasi) yaitu isotop ^{238}U ($E_\alpha= 4,039$ MeV), isotop ^{236}U ($E_\alpha= 4,499$ MeV) dan ^{234}U ($E_\alpha= 4,856$ MeV). Untuk mengetahui jumlah masing-masing isotop-U (^{234}U , ^{235}U , ^{236}U dan ^{238}U) dalam sampel, dilakukan perhitungan cacahan masing-masing

spektrumnya dengan menggunakan persamaan (1) dan (2). Selain isotop U tersebut diperoleh juga 2 (dua) spektrum isotop Pu yaitu ^{239}Pu ($E_\alpha= 5,136$ MeV), ^{238}Pu ($E_\alpha= 5,5251$ MeV) sebagai HE seperti ditunjukkan pada Gb. 4. Hasil analisis dengan pengukuran langsung diperoleh kandungan isotop ^{235}U sebesar 0,2795 μg dan unsur HE sebesar 1,1313 μg seperti yang terlihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Kandungan isotop U dan Pu di dalam 150µL PEB U₃Si₂-Al paska iradiasi

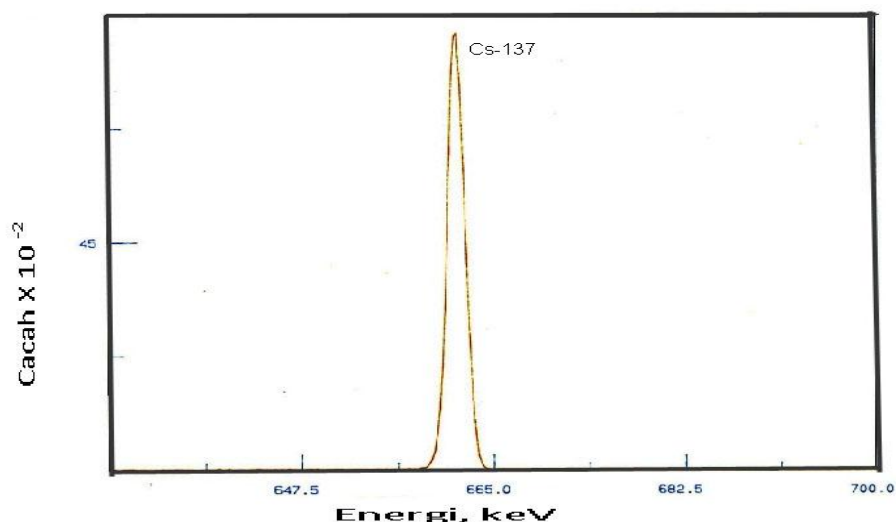
Jenis Isotop	Cacahan	Cacahan per detik (cps)	I α tabel (%)	T _{1/2} (detik)	Kandungan. isotop (µg)
²³⁸ U	55	0,004	77	1,4E+17	1,2264
²³⁵ U	60	0,004	57	2,2E+16	0,2795
²³⁶ U	153	0,010	74	7,4E+14	0,0184
²³⁴ U	6867	0,458	72	7,7E+12	0,0088
²³⁹ Pu	465541	31,036	73	7,6E+11	0,0588
²³⁸ Pu	1041092	69,406	71	2,8E+09	0,0005
HE					1,1313

Bila dibandingkan antara spektrum hasil analisis isotop U dalam standar U₃O₈ 20 % yang terdapat pada Gb. 3 dengan spektrum isotop U yang terdapat di dalam larutan PEB U₃Si₂-Al paska iradiasi pada Gb. 4, menghasilkan spektrum yang berbeda resolusinya. Hal tersebut diduga karena pada Gb. 4 masih ada unsur-unsur logam lain dari PEB (Al dan Mg) yang mungkin dapat berpengaruh pada pelapisan hasil ED terhadap logam U. Di samping itu masih banyak isotop dan hasil fisi lain yang belum terpisahkan dalam larutan PEB U₃Si₂-Al paska iradiasi tersebut. Pengaruh adanya unsur Al sebagai matrik bahan bakar dan konsentrasi uranium dalam sistem ED yang tinggi diduga dapat mempengaruhi pengukuran radioaktifitas sinar- α dari isotop uranium.

3.2. Metode penukar kation dengan zeolit Lampung

Metode yang digunakan untuk memungut isotop hasil fisi (khususnya isotop ¹³⁷Cs) dari isotop ²³⁵U, ²³⁹Pu di dalam larutan PEB U₃Si₂-Al paska iradiasi adalah metode penukar kation dengan penambahan zeolit Lampung. Zeolit akan mengikat isotop cesium dalam fasa padat sehingga isotop Cs terpisah dengan isotop (U

dan Pu) di dalam fasa cair. Proses pertukaran kation terjadi karena zeolit yang telah diaktivasi dalam bentuk NH₄-zeolit mempunyai jari-jari ion sebesar 331 pm, sedangkan Cs⁺ mempunyai jari-jari ion sebesar 329 pm. Hal ini menyebabkan Cs⁺ lebih mudah bertukar dengan NH₄⁺ dalam kerangka zeolit, sedangkan isotop U dan Pu mempunyai jari-jari atom masing-masing Pu⁶⁺ = 81 pm, U⁶⁺ = 97 pm, U⁴⁺ = 80 pm, sehingga pada saat proses pemisahan dengan metode penukar kation isotop U dan Pu tidak terikat di dalam zeolit sebagai fasa padat, namun isotop U dan Pu ikut lolos sebagai supernatan di dalam fasa cair. Fenomena inilah yang terjadi di dalam proses penukar kation untuk memungut isotop ¹³⁷Cs dari U dan Pu dalam bahan bakar paska iradiasi. Isotop ¹³⁷Cs terikat dengan zeolit dalam bentuk padatan paduan ¹³⁷Cs-zeolit, selanjutnya dikeringkan dan dianalisis menggunakan spektrometer- γ . Pengukuran dilakukan dengan waktu cacah 1500 detik pada jarak 25 cm. Spektrum isotop ¹³⁷Cs hasil pengukuran dengan spektrometer- γ ditunjukkan pada Gb. 5 dan besarnya kandungan isotop ¹³⁷Cs di dalam 150 µL dengan variasi penambahan zeolit Lampung ditunjukkan pada Tabel 7 dan Gb. 5.



Gb. 5. Spektrum isotop ^{137}Cs dalam 150 μL PEB $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ paska iradiasi dengan metode penukar kation.

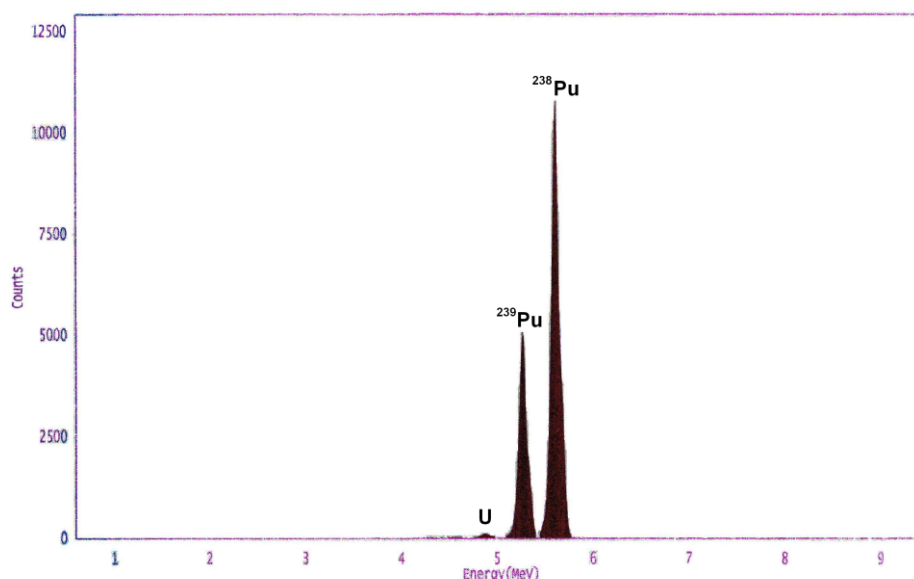
Tabel 7. Kandungan isotop ^{137}Cs dengan variasi berat zeolit Lampung

Berat Zeolit (mg)	Net Area (cacahan)	Cacahan per detik (cps)	I_γ (%)	$T_{1/2}$ (detik)	Kandungan ^{137}Cs (μg)	Standar Deviasi
300	20810	13,8489	85,1	952104860	0,0095	0,00002
	20748					
	20762					
400	23127	15,3670	85,1	952104860	0,0107	0,00003
	23209					
	23182					
500	25735	17,0728	85,1	952104860	0,0118	0,00001
	25734					
	25725					
600	25150	16,7684	85,1	952104860	0,0116	0,00002
	25148					
	25160					

Hasil pemungutan isotop ^{137}Cs dengan menggunakan variasi berat zeolit Lampung menunjukkan bahwa kandungan isotop ^{137}Cs paling banyak terikat dengan zeolit dengan berat 500 mg. Tabel 7 menunjukkan bahwa kandungan isotop ^{137}Cs terikat semakin besar dengan zeolit dengan bertambahnya berat zeolit. Fenomena ini terlihat mulai dari berat zeolit 300 mg, 400 mg hingga berat zeolit 500 mg, namun penggunaan zeolit dengan berat 600 mg, terjadi sedikit penurunan kandungan isotop ^{137}Cs dari 0,0118 μg (untuk berat zeolit 500 mg) menjadi 0,0116 μg . Hal ini disebabkan karena kapasitas tukar kation (KTK= meq/g zeolit) untuk 600 mg telah berlebih untuk mengikat isotop ^{137}Cs yang terkandung di dalam 150 μL larutan PEB $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ paska

iradiasi, sehingga kelebihan berat zeolit tidak berpengaruh terhadap proses penyerapan isotop ^{137}Cs .

Analisis kandungan isotop U dan Pu di dalam supernatan PEB $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ dilakukan dengan melakukan pemipetan 250 μL . Selanjutnya dikenakan proses elektrodiposisi (ED) dan dilakukan pengukuran dengan spektrometer- α dengan waktu cacah 20000 detik dan sampel diletakkan pada tray ke-2. Hasil pengukuran berupa cacahan kemudian dievaluasi untuk mengetahui besar kandungan isotop U dan Pu di dalam PEB $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ paska iradiasi. Hasil pengukuran diperoleh spektrum ^{235}U dan 2 (dua) spektrum isotop Pu yaitu (^{239}Pu dan ^{238}Pu) seperti yang ditunjukkan pada Gb.6.



Gb. 6. Spektrum isotop ^{235}U dan Pu (^{239}Pu , ^{238}Pu) dari supernatan $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ paska iradiasi dengan penukar kation.

Tabel 8. Kandungan isotop U dan Pu di dalam 250 μl PEB $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ paska iradiasi

Berat zeolit (mg)	Kandungan isotop (μg)					
	^{238}U	^{235}U	^{236}U	^{234}U	^{239}Pu	^{238}Pu
300	1,1985	0,1677	0,0165	0,0084	0,0672	0,0005
HE(μg)			1,2911			
400	1,2896	0,1910	0,0185	0,0085	0,0795	0,0005
HE(μg)			1,3956			
500	1,4266	0,3110	0,0255	0,0105	0,0979	0,0006
HE(μg)			1,5611			
600	1,3884	0,2710	0,0212	0,0095	0,0850	0,0005
HE(μg)			1,5046			

Dari Gb. 7 terlihat jelas spektrum isotop ^{235}U dan Pu (^{239}Pu , ^{238}Pu), namun selain itu masih terdapat spektrum isotop U lainnya yang mempunyai resolusi atau daya pisah yang sangat kecil. Spektrum isotop U dan Pu tersebut, kemudian dievaluasi dengan cara menghitung cacahan dan luas puncak masing-masing sehingga diperoleh kandungan isotop ^{235}U dan HE seperti yang ditunjukkan pada Tabel 8. Tabel 8 menunjukkan bahwa setelah dilakukan pemungutan isotop Cs dengan isotop U, Pu menggunakan metode penukar kation, diperoleh hasil kandungan ^{235}U maupun HE lebih besar bila dibandingkan dengan kandungan ^{235}U maupun HE dengan pengukuran langsung. Hal ini disebabkan karena pada pengukuran langsung masih terjadi kompetisi isotop Cs yang mempunyai daya

tembus pemancar sinar- γ lebih besar dibanding isotop U dan Pu, sehingga pada saat pengukuran dengan spektrometer- α , spektrum isotop U dan Pu masih tertutup oleh isotop Cs sebagai pemancar sinar- γ yang mempunyai daya tembus lebih besar. Fenomena ini membuktikan bahwa zeolit Lampung selektif terhadap isotop ^{137}Cs dibandingkan dengan isotop lainnya yang terdapat di dalam bahan bakar paska iradiasi. Namun demikian, dalam melakukan analisis isotop U dan Pu di dalam larutan PEB $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ paska iradiasi masih diperoleh hasil yang belum tepat karena terkadang spektrum isotop-U dengan energi (MeV) yang berdekatan tidak terpisah dengan baik. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh preparasi sampel yang belum sempurna dan masih harus terus dipelajari. Zeolit Lampung

dengan berat 500 mg adalah berat yang optimum digunakan untuk memungut isotop hasil fisi (^{137}Cs) dari U dan Pu di dalam 150 μL larutan PEB $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ paska iradiasi.

4. Kesimpulan

Kandungan isotop ^{137}Cs di dalam 150 μL larutan PEB $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ paska iradiasi sebesar 0,0118 μg , isotop ^{235}U sebesar 0,3110 μg dan unsur HE sebesar 1,5611 μg dengan deviasi pengukuran sebesar 0,00001 μg . Hasil ini lebih besar bila dibandingkan dengan cara pengukuran langsung yang diperoleh kandungan isotop ^{137}Cs sebesar 0,0106 μg , isotop ^{235}U sebesar 0,2795 μg dan unsur HE sebesar 1,1313 μg dengan deviasi pengukuran sebesar 0,00001 μg . Hasil percobaan menunjukkan bahwa metode penukar kation menggunakan zeolit Lampung mampu memisahkan dan memungut isotop ^{137}Cs sebagai hasil fisi dari isotop U, Pu di dalam PEB $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ paska iradiasi.

Ucapan terima kasih

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada teman-teman kelompok Fisika Kimia Bidang Uji Radiometalurgi Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir yang telah banyak membantu dalam penelitian ini, Semoga bermanfaat.

Daftar pustaka

- [1] M.H.A.Hasa, A.Suripto, Fathurrahman, Martoyo, Achmad Paid, N. Samosir, Karakterisasi Mekanik dan Mikrostruktur U-Mo Sebagai Kandidat Bahan Bakar Reaktor Riset, Prosiding Pertemuan dan Persentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir, Yogyakarta, 7-8 Agustus, (2001)180-186.
- [2] T.C. Wiencek and I.G. Prokofiev, "Low-Enriched Uranium-Molybdenum Fuel Plate Development", Proceedings, RERTR, Las Vegas, Nevada on October,(2000), http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/42/024/42024823.pdf . Retrieved 12-12-2013.
- [3] K. H. Kim et.al, , Development of High Loading Alloy Fuel by Centrifugal Atomization, Proceedings, RERTR, Korea. 1996, <http://www.rertr.anl.gov/FUELS96/KHKIM96.html>. Retrieved 10-12-2013.
- [4] R.F Domagala, T.C. Wincek, J.L. Snelgrove, M.I. Homa and R.R. Heinrich, , DTA Study of $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ and $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ Reactions, IAEA - TECDOC - 643(4), 1992
- [5] J.S. Kim, S.H. Han, M. Y.I Suh, K. S. Joe and T. Y. Eom, Burn up Measurement of Irradiated Uranium Oksida Fuel by Chemical Methods, J. Korean Nucl. Soc., 21(1989) 277-286.
- [6] C.Pereda, C.Henriquez, J.Medel, J.Klein, G.Navaro, Zr-95 Fuel Burn up Measurement using Gamma Spectrometry Technique, Commission Chilena de Energia, Santiago de Chile,Chile, Universidad Diego Portales, Escuela de Ingenieria, Santiago de Chile, Chile, 2002.
- [7] N. Sivaraman, S. Subramaniam, T.G. Srinivasan, P.R. Pasudeva Rao, Burn up Measurement on Nuclear Spent Fuel using Performance Liquid Chromatography, Fuel Chemistry Division, Chemical Group, Indira Gandhi Center for Atomic Research Kalpakkam-India, 2001.
- [8] S. Amini, L. Hakim, A. Gogo, H. Hastowo, A. Hamzah, J.S. Pane, Analisis Fraksi Bakar Elemen Bakar Silisida (RISIE2) Secara Pengukuran $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$, Prosiding Seminar Sains dan Teknologi Nuklir, PPTN-BATAN, Bandung 21-22 Maret, (1995) 55-60.
- [9] Anonymous, American Standar Test Methods, ASTM-E 244-80, Standar Test Methods for Atom Percent Fission in Uranium and Plutonium Fuel, Standar Test Method For Nuclear Material, USA, Vol. 12.02, 1990.
- [10] S. Amini, Studi Zeolit Untuk Penukaran Ion Cs, Sr dan U, Hasil-Hasil Penelitian Elemen Bakar Nuklir P2TBDU-BATAN, ISSN 0854-5561, Serpong, (1998) 123-125.
- [11] S. Amini, Keselektifan Zeolit Lampung Terhadap Kation-kation Matrik Hasil Fisi Uranium, Jurnal Zeolit Indonesia, Vol. 2 No. 1, November 2003. ISSN 1411-6723.

- [12] A. Ginting, Pembuatan Standar Isotop ^{137}Cs Dari Limbah Bahan Bakar Nuklir $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ Paska Iradiasi Untuk Digunakan Dalam Penelitian Maupun Industri, Laporan Insentif Peningkatan Kemampuan Peneliti Dan Reakayasa (PKPP) Ristek-BATAN, 2012.
- [13] A.Nugroho, D.Anggraini, Noviarthy, Optimasi Penentuan Isotop ^{137}Cs Dalam Pelat Elemen Bakar $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ Densitas 2,96 g/cm³ Paska Iradiasi, Seminar Nasional VI SDM Teknologi Nuklir, Yogyakarta, 18 November, (2010) 789-794.
- [14] Anonymous, American Standar Test Methods, ASTM-E 320-79, Standar Test Methods for Cesium-137 in Nuclear Fuel Solutions by Radiochemical Analysis, Standar Test Method For Nuclear Material, USA, Vol. 12.1, 1990
- [15] A.B. Ginting, Pemisahan dan Analisis Radionuklida ^{137}Cs di Dalam PEB $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ Tingkat Muat Uranium 2,96gU/cm³ Paska Iradiasi, Jurnal Teknologi Bahan Nuklir-PTBN-BATAN, 8(1)(2012) 27-38.
- [16] Anonymous, American Standar Test Methods, ASTM-E 692-00, Standar Test Methods for Determining The Content Of Cesium-137 In Irradiated Nuclear Fuels By High Resolution Gamma-Ray Spectral Analysis, Standar Test Method For Nuclear Material, USA, Vol. 12.1., 2000.
- [17] K.V. Chetty, P.M. Mapara, A.G. Godbole, R. Swaup, Effect of Mixed Solvent Media on The Sorption and Separation of Uranium and Plutonium on Macroporous Resins, Fuel Chemistry Division Bhabha Atomic Research Center, Trombay, Bombay 400-085, India 16, 1997.
- [18] m.h. lee, c.j. kim, b.h. boo, Electrodeposition of Alpha-Emitting Nuclides from Ammonium Oxalate-Ammonium Sulfate Electrolyte, Bull. Korean Chem.Soc., 21(2000)175-177.
- [19] Anonymous, American Standar Test Methods, (1992), Standar Practice for The Ion Exchange Separation of Uranium and Plutonium Prior to Isotopic Analysis: ASTM No C-1411-01. Vol. 12.01, 1992.
- [20] Anonymous, American Standar Test Methods, (1992), Standar Test Method for Radiochemical Determination of Uranium Isotopes in Soil by alpha Spectrometry, Designation: C 1000-90. Vol. 12.01, 1992, pp. 521-524.
- [21] Anonymous, American Standar Test Methods, Standar Test Methods for ^{238}Pu Isotopic Abundance By Alpha Spectrometry, ASTM No C- 1415-01. Vol. 12.1, 1992.