

UJI FISIKOKIMIA PEB U_3Si_2/Al DENSITAS $4,8 \text{ gU/cm}^3$ PASCA IRADIASI

Boybul, Yanlinastuti, Sutri Indaryati, Iis Haryati, Arif Nugroho
Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir – BATAN

ABSTRAK

Telah dilakukan pengujian terhadap pelat elemen bakar (PEB) U_3Si_2/Al densitas $2,96 \text{ gU/cm}^3$ pasca iradiasi. Pengujian meliputi pemisahan dan analisis isotop cesium, isotop uranium. Pemisahan isotop-isotop tersebut uranium dari isotop cesium, plutonium dan pengotor lainnya harus dilakukan karena akan mengganggu pengukuran isotop uranium. Tujuan dari kegiatan ini adalah untuk menentukan kandungan isotop cesium dan uranium dalam PEB U_3Si_2/Al pasca iradiasi, yang pada akhirnya data tersebut digunakan untuk menghitung burn-up bahan bakar nuklir. Pemisahan isotop cesium dengan metode pengendapan menggunakan kloroplatinat. Pemisahan isotop uranium dan plutonium dengan metode kolom penukar anion dalam suasana methanol dan sulfat. Hasil pemisahan dengan metode pengendapan kloroplatinat didapatkan hasil recovery pengendapan sebesar 70,46 %, dan larutan supernatan masih mengandung cesium sebesar 2,15 %. Kandungan isotop uranium ^{235}U dengan metode penambahan methanol dalam larutan supernatan volume sampel 500 μL pada posisi bagian atas, tengah dan bawah rata-rata adalah $2,27 \pm 1,20 \mu\text{g}$; $1,18 \pm 0,39 \mu\text{g}$; $2,13 \pm 0,35 \mu\text{g}$ dan kandungan isotop uranium total dalam larutan sampel diperoleh rata-rata berturut-turut sebesar $20,24 \pm 5,10 \mu\text{g}$; $14,96 \pm 3,50 \mu\text{g}$ dan $15,79 \pm 2,12 \mu\text{g}$. Parameter optimal pemisahan uranium dengan penambahan ion sulfat pada konsentrasi pada HCl 9M dan Na_2SO_4 1500 ppm. Penambahan ion sulfat dapat meningkatkan rekoveri pemisahan uranium dari 68,2137 % (hasil penelitian sebelumnya) menjadi 95,7124 %. Hal ini menyebabkan pemungutan uranium di dalam PEB U_3Si_2/Al pasca iradiasi juga meningkat. Kandungan isotop ^{235}U pada PEB U_3Si_2/Al pasca iradiasi potongan bagian atas, tengah dan bawah pelat elemen bakar pasca iradiasi masing-masing diperoleh sebesar $0,0147 \pm 0,0007 \text{ g/g PEB}$; $0,0183 \pm 0,0009 \text{ g/g PEB}$; dan $0,0238 \pm 0,0012 \text{ g/g PEB}$.

Kata Kunci: pemisahan, isotop Cs, isotop U.

PENDAHULUAN

Pengembangan metoda Uji fisikokimia pelat elemen bakar (PEB) U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ pasca iradiasi pada tahun kegiatan 2018 terdiri dari 3 (tiga) sub komponen yaitu:

1. Pemisahan cesium dalam pelat elemen bakar (PEB) U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ pasca iradiasi dengan metode pengendapan Cs($PtCl_6$) dan kolom penukar kation menggunakan resin Dowex
2. Pemisahan uranium dalam PEB U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ pasca iradiasi dengan metode kolom penukar anion menggunakan resin Dowex 1x8 dalam media methanol
3. Pemisahan uranium dari PEB U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ pasca iradiasi dengan metode kolom penukar anion menggunakan resin Dowex 1x8 dalam media sulfat.

Pelat elemen bakar U_3Si_2/Al yang telah mengalami iradiasi di reaktor akan menghasilkan beberapa hasil fisi diantaranya transuranium (U,Pu), isotop ^{137}Cs dan hasil fisi lainnya (seperti Ba^{2+} , maupun Sr^{2+}). Dalam melakukan analisis *burn-up* (fraksi bakar), banyak larutan hasil analisis elemen bakar nuklir pasca-iradiasi disimpan dalam bilik-panas (*hot cell*) dengan keaktifan yang sangat tinggi^[1]. Larutan elemen bakar nuklir tersebut mengandung isotop-isotop yang dapat dimanfaatkan untuk studi banding dalam rangka untuk memverifikasi, mengevaluasi dan memvalidasi unjuk kerja bahan bakar baik dari sisi pabrikasi maupun di reaktor. Untuk mendukung hal tersebut maka pada kegiatan ini akan dilakukan analisis isotop Cs dan U dalam larutan PEB U_3Si_2-Al yang telah diiradiasi di reaktor G.A.Siwabessy Serpong. Di hot cell HC 104 PEB U_3Si_2-Al pasca irradiasi dipotong dengan ukuran 3 x 3 x 1,37mm HC 109 PEB U_3Si_2-Al dilarutkan, disaring, dan diencerkan.

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir (PTBBN), khususnya Bidang Uji Radiometalurgi (BUR) mempunyai tugas untuk melaksanakan pengembangan teknologi bahan bakar nuklir untuk menyelenggarakan fungsi pengujian radiometalurgi, analisis fisiko kimia dan teknik uji pasca irradiasi. Berdasarkan tugas dan fungsinya serta seiring dengan berjalannya penelitian dan pengembangan bahan bakar nuklir jenis reaktor riset, PTBBN-BATAN telah melakukan beberapa penelitian antara lain adalah teknik uji pasca iradiasi terhadap PEB U_3Si_2-Al dengan tingkat muat uranium (TMU) 2,96 gU/cm³. *Post Irradiation Examination* yang dilakukan di dalam *hot cell* meliputi pemeriksaan atau pengujian secara merusak dan tidak merusak. Data PIE tersebut dapat digunakan sebagai bahan evaluasi dalam pengembangan dan peningkatan kualitas bahan bakar nuklir U_3Si_2-Al baik dari sisi pabrikasi maupun unjuk kerja selama digunakan sebagai bahan bakar reaktor.

Kegiatan uji merusak dalam PIE melakukan analisis fisikokimia untuk penentuan derajat bakar mutlak (*burn-up*). Adanya peningkatan distribusi temperatur di dalam bahan bakar rata-rata sebesar 120°C menjadi 170°C, kadangkala menyebabkan terjadinya *hot spot* pada posisi tertentu di dalam bahan bakar^[1]. Peningkatan distribusi temperatur disebabkan oleh radiasi yang berkorelasi dengan lamanya bahan bakar di dalam reaktor dengan *burn up* tertentu, sehingga menyebabkan kandungan hasil fisi dan unsur bermassa berat (*heavy element*, HE) meningkat. Fenomena ini biasa dikenal dengan reaksi fisi ^{235}U dengan neutron yang mendasari beroperasinya reaktor nuklir dengan *burn up* tertentu. *Burn-up* merupakan persentase atau fraksi atom fisi ^{235}U yang terbakar (%) yang dihasilkan dari proses reaksi fisi ^{235}U dengan neutron. Pada kenyataannya bahwa di dalam reaktor tidak hanya terjadi reaksi fisi ^{235}U saja, namun juga reaksi ^{238}U fertil menghasilkan ^{239}Pu yang selanjutnya mengalami reaksi fisi. Isotop hasil fisi dan HE umumnya sebagai pemancar radiasi α , β dan γ seperti yang terlihat pada Gambar 1^[2].

panjang adalah isotop ^{137}Cs (dengan waktu paroh 30,17 tahun) dan HE dari uranium maupun plutonium yang mempunyai waktu paroh panjang seperti; ^{238}U ($4,47 \times 10^9$ tahun), ^{235}U ($7,04 \times 10^8$ tahun), ^{238}Pu (87,71 tahun) dan ^{239}Pu ($2,41 \times 10^4$ tahun)^[3]. Untuk mendapatkan kandungan isotop hasil fisi secara kuantitatif dan akurat harus dilakukan pemisahan untuk selanjutnya dapat dianalisis dengan menggunakan alat spektrometer- α atau spektrometer- γ . Preparasi pemisahan isotop Cs, U dan Pu harus dilakukan karena isotop tersebut saling mengganggu pada saat pengukuran. Isotop Cs sebagai pemancar sinar γ jika masih terdapat dalam sampel U dan Pu maka akan menutupi spektrum dan mengganggu pengukuran isotop U dan Pu. Demikian pula dengan isotop Pu dan U harus dipisahkan terlebih dahulu sebelum diukur dengan spektrometer- α .

Tujuan kegiatan penelitian ini adalah untuk mengetahui kandungan cesium dan uranium dalam PEB $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ pasca iradiasi dengan metode pemisahan penukar kation dan penukar anion, sehingga diperoleh kandungan uranium secara kuantitatif dan akurat yaitu kandungan isotop tersebut sesuai dengan yang seharusnya ada dalam sampel. Kandungan isotop uranium nantinya akan berguna untuk penentuan selanjutnya digunakan untuk menghitung *burn-up* bahan bakar PEB $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$.

Dalam usaha menjamin kehandalan unjuk kerja PEB $\text{U}_3\text{Si}_2\text{/Al}$ TMU 4,8 gU/cm³ variasi perlu dilakukan beberapa pengujian *Post Irradiation Examination* (PIE) di laboratorium instalasi radiometalurgi (IRM). Pengujian PIE yang dilakukan antara lain adalah uji tidak merusak (*Non Destructive Test*, NDT) dan uji merusak (*Destructive Test*, DT). Salah satu kegiatan uji merusak adalah analisis fisikokimia untuk menentukan *burn up* dari bahan bakar. Namun sebelum melakukan analisis fisikokimia terhadap PEB $\text{U}_3\text{Si}_2\text{/Al}$ TMU 4,8 gU/cm³ variasi 20, 40 dan 60% *burn up*, terlebih dahulu harus dilakukan pembakuan metode analisis fisikokimia khususnya perhitungan *burn up*, sehingga diperoleh hasil analisis yang akurat.

Nilai *burn up* merupakan indikasi jumlah panas yang dihasilkan oleh bahan bakar nuklir. Radionuklida yang berperan dalam perhitungan *burn up* yaitu transuranium (U,Pu) dan radionuklida hasil fisi, antara lain Cs. Pengukuran radionuklida sangat ditentukan oleh kemurnian radionuklida yang akan dianalisis agar diperoleh data analisis yang akurat. Proses pemurnian radionuklida Cs dan U dalam larutan PEB dilakukan dengan metode pengendapan, penukar kation. dan anion.

METODOLOGI

Potongan PEB U_3Si_2/Al pasca iradiasi pada bagian *bottom*, *middle* dan *top* dibuat secara triplo. Potongan PEB U_3Si_2/Al TMU $4,8 \text{ gU/cm}^3$ dengan dimensi tertentu kemudian ditransfer ke HC 109 dan siap untuk dilakukan penimbangan dan pelarutan menggunakan HCl 6M dengan HNO_3 6M. Sampel larutan PEB U_3Si_2/Al TMU $4,8 \text{ gU/cm}^3$ yang diperoleh selanjutnya siap dilakukan pemisahan isotop hasil fisi dengan *heavy element* untuk digunakan dalam perhitungan *burn up*. Parameter uji yang paling utama dalam perhitungan *burn up* mutlak adalah kandungan isotop cesium sebagai hasil fisi dengan isotop uranium dan plutonium sebagai *heavy element*.

a. Pemisahan Isotop Cesium Dengan Metode Pengendapan

Pemisahan cesium dilakukan menggunakan metode pengendapan Cs ($PtCl_6$) yang dikombinasikan dengan metode kolom penukar kation menggunakan resin Dowex. Isotop ^{137}Cs berada dalam fasa padat dalam bentuk endapan $Cs_2(PtCl_6)$, sedangkan isotop uranium berada dalam fasa cair sebagai supernatan. Untuk mengetahui besarnya kandungan ^{137}Cs yang terbentuk di dalam endapan $Cs_2(PtCl_6)$ dilakukan pengukuran dengan spektrometer gamma, sehingga diketahui kandungan ^{137}Cs dalam bahan bakar.

b. Pemisahan Isotop U dan Pu Dalam Suasana Metanol

Pemisahan uranium dari unsur Pu dan hasil fisi lain yang terdapat dalam larutan PEB U_3Si_2/Al pasca iradiasi dilakukan menggunakan kolom penukar anion dengan resin dowex 1x8- NO_3 dan dowex 1x8-Cl sebanyak 1,2 g. Untuk meningkatkan daya sorpsi resin maka dilakukan penambahan metanol bervariasi. Penambahan metanol dengan perbandingan HCl 6M yaitu 10:90 % volume media pelarut. Uranium yang berada di dalam larutan supernatan PEB U_3Si_2/Al pasca iradiasi mengandung isotop ^{238}U , ^{235}U , ^{236}U dan ^{234}U dan isotop lainnya selain ^{137}Cs (isotop ^{137}Cs telah terikat dalam fasa padat). Pemisahan ^{238}U , ^{235}U , ^{236}U dan ^{234}U dengan isotop lainnya dilakukan menggunakan metode kolom penukar anion menggunakan resin Dowex 1x8 dalam media methanol. Kandungan isotop U (^{238}U , ^{235}U , ^{236}U dan ^{234}U) sebelum dan sesudah pemisahan dikenakan proses elektrodiposisi pada tegangan 2 volt, kuat arus 1,2 A dengan waktu proses 2 jam sehingga diperoleh deposit uranium diatas plasket *stainless steel* untuk selanjutnya diukur dengan spektrometer alpha dengan waktu cacah 20.000 detik.

c. Pemisahan Isotop U dan Pu Dalam Suasana Ion Sulfat

Pemisahan uranium dari unsur Pu dan hasil fisi lain yang terdapat dalam larutan PEB U_3Si_2/Al pasca iradiasi dilakukan menggunakan kolom penukar anion dengan resin

dowex 1x8-NO₃ dan dowex 1x8-Cl sebanyak 1,2 g. Untuk meningkatkan daya sorpsi resin maka dilakukan penambahan sulfat bervariasi. Ion sulfat divariasikan berdasarkan nilai konsentrasi sulfat yaitu 1500, 2000 dan 2500 ppm. Uranium yang berada di dalam larutan supernatan PEB U₃Si₂/Al pasca iradiasi mengandung isotop ²³⁸U, ²³⁵U, ²³⁶U dan ²³⁴U dan isotop lainnya selain ¹³⁷Cs (isotop ¹³⁷Cs telah terikat dalam fasa padat). Pemisahan ²³⁸U, ²³⁵U, ²³⁶U dan ²³⁴U dengan isotop lainnya dilakukan menggunakan metode kolom penukar anion menggunakan resin Dowex 1x8 dalam media sulfat. Kandungan isotop U (²³⁸U, ²³⁵U, ²³⁶U dan ²³⁴U) sebelum dan sesudah pemisahan dikenakan proses elektrodiposisi pada tegangan 2 volt, kuat arus 1,2 A dengan waktu proses 2 jam sehingga diperoleh deposit uranium diatas piaset *stainless steel* untuk selanjutnya diukur dengan spektrometer alpha dengan waktu cacah 20.000 detik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari analisis fisikokimia telah diperoleh hasil pemisahan isotop cesium dengan isotop uranium dan plutonium dalam supernatan SPIrr PEB U₃Si₂/Al pasca iradiasi potongan bagian *top*, *middle* dan *bottom*. Pemisahan isotop Cs menggunakan metode pengendapan cesiumkloroplatinat, pemisahan isotop U dan Pu dengan metode kolom penukar anion dalam media metanol dan sulfat. Efluen U sebagai hasil pemisahan ditunjukkan pada Gambar 1 dan 2.

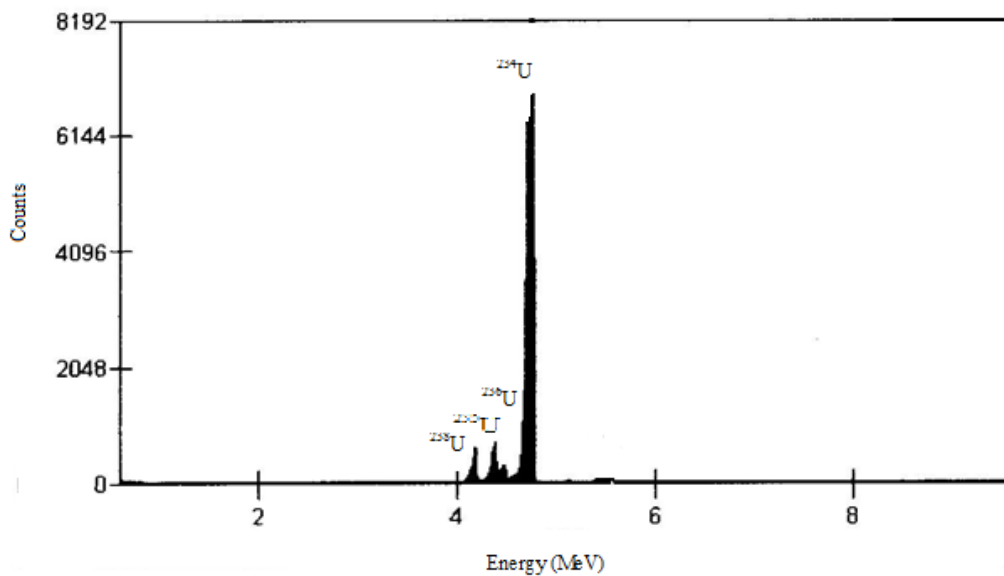


Gambar 1. Efluen U hasil pemisahan dalam media metanol

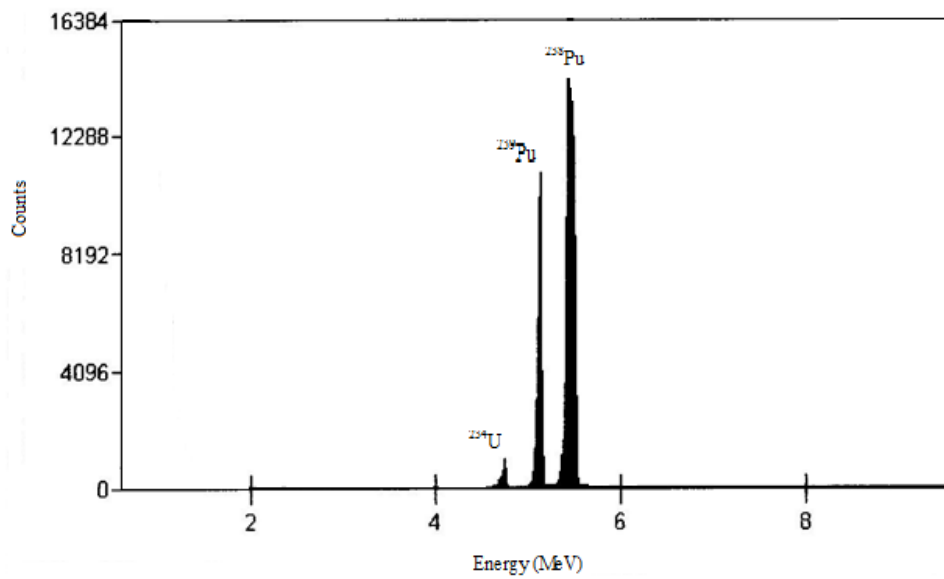


Gambar 2. Efluen U hasil pemisahan dalam media sulfat

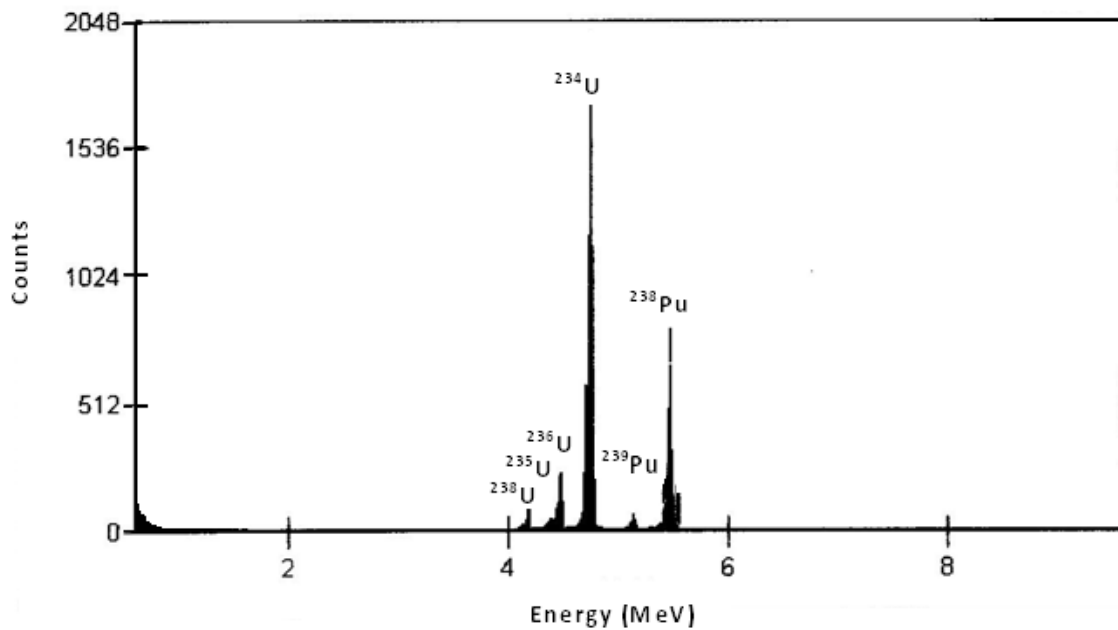
Spektrum hasil pengukuran dengan spektrometer alpha terhadap efluen U dari standar U_3O_8 ditunjukkan pada Gambar 3, sedangkan spektrum U (^{238}U , ^{235}U , ^{236}U dan ^{234}U) dari larutan U_3Si_2/Al pasca iradiasi sebelum dan setelah dipisahkan dengan metode kolom penukar anion ditunjukkan pada Gambar 4, 5 dan 6.



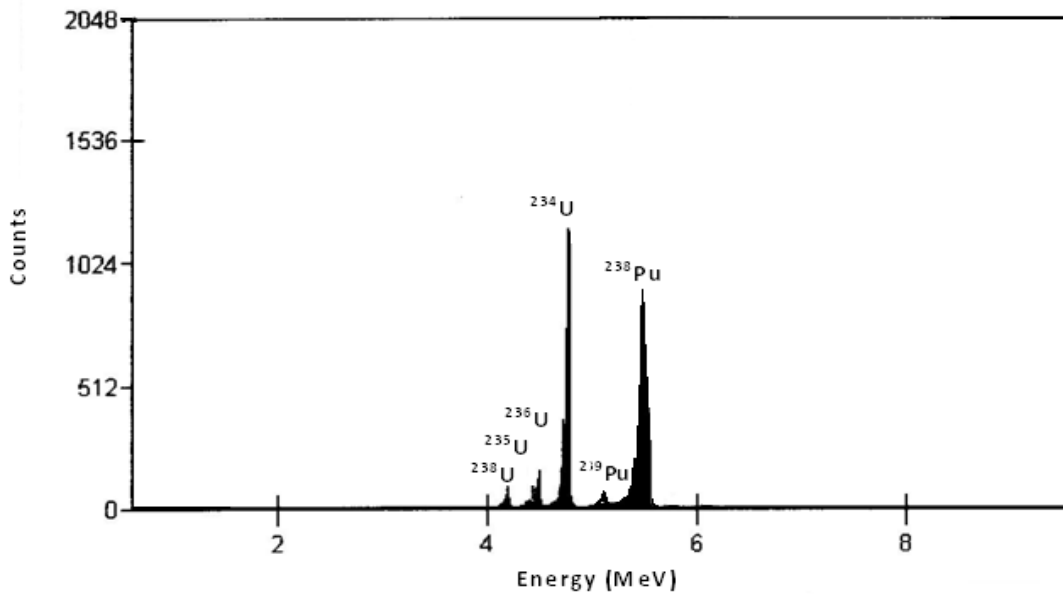
Gambar 3. Spektrum ^{238}U , ^{235}U , ^{236}U dan ^{234}U dari standar U_3O_8



Gambar 4. Spektrum ^{234}U , ^{239}Pu dan ^{238}Pu dari larutan $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ pasca iradiasi sebelum pemisahan



Gambar 5. Spektrum ^{238}U , ^{235}U , ^{236}U , ^{234}U , ^{239}Pu dan ^{238}Pu dari larutan $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ pasca iradiasi hasil pemisahan dengan media pelarut sulfat



Gambar 6. Spektrum ²³⁸U, ²³⁵U, ²³⁶U, ²³⁴U, ²³⁹Pu dan ²³⁸Pu dari larutan U₃Si₂/Al pasca iradiasi hasil pemisahan dengan media pelarut metanol

Hasil pemisahan isotop cesium dalam larutan pasca iradiasi dengan metode pengendapan menggunakan kloroplatinat ditampilkan pada Tabel 1 dan Tabel 2. Hasil pemisahan yang optimum didapatkan recovery sebesar 70,46 % dengan senyawa carrier 0,1036 gram, yang berada pada endapan cesiumkloroplatinat. Penambahan senyawa carrier dengan berat lebih besar dari 0,1036 menyebabkan endapan kloroplatinat yang terbentuk tidak sempurna sebagian larut kembali. Sedangkan cesium yang berada pada fasa cair berupa larutan supernatan masih terdapat kandungan cesium dengan berat 0,00001 g/g PEB atau recovery 2,15 %.

Tabel 1. Kandungan isotop Cs-137 dalam fasa padat cesium kloroplatinat hasil pemisahan PEB U₃Si₂/Al pasca iradiasi dengan metode pengendapan

No.	Berat Carier CsNO ₃ (g)	Kandungan Isotop Cs-137 (g/g PEB)	Recovery (%)
1.	0,1036	0,000328	70,464
2.	0,2064	0,000282	60,915
3.	0,3020	0,000188	38,065
4.	0,4017	0,000142	28,719
5.	0,5005	0,000134	27,140
6.	0,6104	0,000107	21,673
7.	0,7035	0,000105	21,353

Tabel 2. Kandungan isotop Cs-137 dalam larutan supernatan hasil pemisahan PEB U_3Si_2/Al pasca iradiasi dengan metode pengendapan pasca iradiasi

No.	Berat Carier $CsNO_3$ (g)	Kandungan Isotop Cs-137 (g/g PEB)	Recovery (%)
1.	0,1036	0,000010	2,1464
2.	0,2064	0,000072	15,4693
3.	0,3020	0,000228	46,2186
4.	0,4017	0,000234	47,3356
5.	0,5005	0,000273	55,2238
6.	0,6104	0,000344	69,9576
7.	0,7035	0,000305	61,8688

Larutan supernatan hasil pemisahan larutan pasca iradiasi ini diharapkan sudah tidak mengandung isotop cesium lagi, namun demikian hal tersebut masih belum bisa dicapai untuk sampai benar-benar semua isotop cesium terpisah 100 %, oleh karena itu penelitian ini masih berlanjut untuk mencari parameter lain yang mempengaruhi proses pengendapan cesium sehingga diperoleh hasil yang maksimum. Larutan supernatan yang mengandung isotop uranium dan plutonium dilakukan pemisahan lagi untuk memisahkan keduanya sebelum dilakukan analisis masing-masing isotop tersebut. Pemisahan isotop uranium dan plutonium dilakukan dengan metode penukar anion dalam suasana methanol dan ion sulfat. Data hasil pemisahan isotop uranium dan plutonium ditampilkan pada Tabel 3 dan Tabel 4.

Tabel 3. Kandungan isotop uranium dalam supernatan hasil pemisahan dengan metode penambahan methanol

Kode Sampel	Kandungan isotop U dalam sampel (ug)							
	^{238}U		^{235}U		^{236}U		^{234}U	
T	17,86	± 3,86	2,27	± 1,20	0,10	± 0,04	0,009	± 0,004
M	13,57	± 3,56	1,18	± 0,39	0,19	± 0,08	0,012	± 0,004
B	11,33	± 2,17	2,13	± 0,35	0,21	± 0,07	0,018	± 0,004

Kandungan isotop uranium ^{235}U dengan metode penambahan methanol dalam larutan supernatan volume sampel 500 μL pada posisi bagian atas, tengah dan bawah adalah $2,27 \pm 1,20 \mu\text{g}$; $1,18 \pm 0,39 \mu\text{g}$; $2,13 \pm 0,35 \mu\text{g}$.

Tabel 4. Kandungan isotop uranium pada PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ pasca iradiasi dengan metode penambahan ion sulfat

Kode sampel	Kandungan isotop U (g/g PEB)			
	^{238}U	^{235}U	^{234}U	^{236}U
T	$0,0940 \pm 0,0047$	$0,0147 \pm 0,0007$	$0,0008 \pm 0,00004$	$0,00006 \pm 0,000003$
M	$0,0984 \pm 0,0049$	$0,0183 \pm 0,0009$	$0,0018 \pm 0,00009$	$0,0001 \pm 0,000006$
B	$0,0980 \pm 0,0049$	$0,0238 \pm 0,0012$	$0,0015 \pm 0,00007$	$0,0001 \pm 0,000006$

Parameter optimal pemisahan uranium dengan penambahan ion sulfat pada konsentrasi pada HCl 9M dan Na_2SO_4 1500 ppm. Penambahan ion sulfat dapat meningkatkan rekovery pemisahan uranium dari 68,2137 % (hasil penelitian sebelumnya) menjadi 95,7124 %^[4]. Ion sulfat dapat meningkatkan penyerapan ke dalam resin dimana ion sulfat membentuk senyawa kompleks dengan uranium. Resin Dowex 1x8 ^-Cl dengan gugus fungsional yang bermuatan positif ($-\text{CH}_2-\text{N}(\text{CH}_3)^{3+}$) akan mengikat senyawa kompleks $[\text{UO}_2(\text{SO}_4)^3]^{4-}$ lebih kuat dari pada ion Cl^- atau ion UCl_6^{2-} ^[4]. Kandungan isotop ^{235}U pada PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ pasca iradiasi potongan bagian atas, tengah dan bawah pelat elemen bakar pasca iradiasi masing-masing diperoleh sebesar $0,0147 \pm 0,0007$ g/g PEB; $0,0183 \pm 0,0009$ g/g PEB; dan $0,0238 \pm 0,0012$ g/g PEB.

KESIMPULAN

Pemisahan isotop cesium dengan metode pengendapan menggunakan kloroplatinat didapatkan hasil *recovery* pengendapan sebesar 70,46 %, dan larutan supernatant masih mengandung cesium sebesar 2,15 %. Kandungan isotop uranium ^{235}U dengan metode penambahan methanol dalam larutan supernatan volume sampel 500 μL pada posisi bagian atas, tengah dan bawah rata-rata adalah $2,27 \pm 1,20 \mu\text{g}$; $1,18 \pm 0,39 \mu\text{g}$; $2,13 \pm 0,35 \mu\text{g}$ dan kandungan isotop uranium total dalam larutan sampel diperoleh rata-rata berturut-turut sebesar $20,24 \pm 5,10 \mu\text{g}$; $14,96 \pm 3,50 \mu\text{g}$ dan $15,79 \pm 2,12 \mu\text{g}$. Parameter optimal pemisahan uranium dengan penambahan ion sulfat pada konsentrasi

pada HCl 9M dan Na₂SO₄ 1500 ppm. Penambahan ion sulfat dapat meningkatkan rekoveri pemisahan uranium dari 68,2137 % (hasil penelitian sebelumnya) menjadi 95,7124 %. Kandungan isotop ²³⁵U pada PEB U₃Si₂/Al pasca iradiasi potongan bagian atas, tengah dan bawah pelat elemen bakar pasca iradiasi masing-masing diperoleh sebesar 0,0147 ± 0,0007 g/g PEB; 0,0183 ± 0,0009 g/g PEB; dan 0,0238 ± 0,0012 g/g PEB.

DAFTAR PUSTAKA

1. Aslina B.Ginting, Boybul., Arif N., Dian A. , Rosika.. Analisis Isotop¹³⁷Cs dan ²³⁵U Untuk Penentuan *Burn Up* Pelat Elemen Bakar U₃Si₂/Al Tingkat Muat Uranium 2,96 gU/cm³Pasca Iradiasi. Journal Teknologi Bahan. Nuklir; Juni 2015; 11 (2) :83-98.
2. Boybul, Yanlinastuti, Dian A., Arif N., Rosika K., Aslina B. G. Analisis Kandungan Cesium Dan Uranium Dalam Bahan Bakar U₃Si₂/Al Pasca Iradiasi. URANIA-Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir . Juni 2017; 23 (2) : 108 – 122.
3. Dian Angraini, Boybul, Yanlinastuti, Arief N, Rosika K, Aslina B G. Pengaruh Pelarut Organik Pada Proses Pertukaran Anion Dalam Pemisahan Uranium Dari Larutan U₃Si₂/Al Pasca Iradiasi. URANIA-Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir. Juni 2017; 23 (2): 97 – 106.
4. Boybul, Yanlinastuti, Dian Angraini, Aslina Br. Ginting, Arif Nugroho, Rosika Kriswarini. Pengaruh Penambahan Ion Sulfat Terhadap Rekoveri Pemisahan Uranium Menggunakan Metode Kolom Penukar Anion. URANIA-Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir. Oktober 2017; 23 (3) : 108 – 122.