

Urania

Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir

Beranda jurnal: <https://ejournal.brin.go.id/uranial/>



PENGUKURAN BERAT RADIONUKLIDA ^{137}Cs DALAM LARUTAN PELAT ELEMEN BAKAR $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ DENSITAS $4,8 \text{ gU/cm}^3$ PASCA IRADIASI DENGAN METODE KOLOM KROMATOGRAFI

Boybul¹, Yanlinastuti¹, Erlina Noerpitasari¹, Juan Carlos Sihotang¹,
Helmi Fauzi Rahmatullah¹, Arif Nugroho¹, Mohamad Sukron Fajrin Husein²,
Rohmad Sigit¹, Aslina Br. Ginting¹, Susilo Widodo³

¹Pusat Riset Teknologi Bahan Nuklir dan Limbah Radioaktif – BRIN
Kawasan Sains dan Teknologi B.J. Habibie, Gedung 720, Tangerang Selatan, Banten 15314
²Direktorat Pengelola Fasilitas Ketenaganukliran – BRIN
Kawasan Sains dan Teknologi B.J. Habibie Gedung 30, Tangerang Selatan, Banten 15314
³Pusat Riset Teknologi Keselamatan, Metrologi, dan Mutu Nuklir – BRIN
Kawasan Sains dan Teknologi B.J. Habibie, Gedung 720, Tangerang Selatan, Banten 15314
e-mail : boybul@brin.go.id

(Naskah diterima: 14–04–2024, Naskah direvisi: 19–06–2024, Naskah disetujui: 25–06–2024)

ABSTRAK

PENGUKURAN BERAT RADIONUKLIDA ^{137}Cs DALAM LARUTAN PELAT ELEMEN BAKAR $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ DENSITAS $4,8 \text{ gU/cm}^3$ PASCA IRADIASI DENGAN METODE KOLOM KROMATOGRAFI. *Burnup* bahan bakar adalah salah satu parameter untuk mengetahui unjuk kerja bahan bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ setelah digunakan di reaktor. Salah satu isotop indikator *burnup* adalah ^{137}Cs karena mempunyai waktu paruh panjang ($T_{1/2}$) 30,17 tahun dengan *fission yield* 6,26%. Pemisahan ^{137}Cs dilakukan untuk mengetahui jumlah ^{137}Cs dalam larutan bahan bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ pasca iradiasi dengan metode kolom penukar kation menggunakan zeolit dari Lampung beserta besar *recovery*-nya. Larutan bahan bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ pasca iradiasi dari masing-masing potongan *Top* (T), *Middle* (M) dan *Bottom* (B) dipipet sebanyak 50 μL secara duplo dan ditambahkan dengan 2 mL HNO_3 0,1 M, kemudian diukur aktivitasnya menggunakan spektrometer gamma untuk mendapatkan jumlah awal radionuklida ^{137}Cs . Jumlah ^{137}Cs dalam larutan dinyatakan dengan berat ^{137}Cs per gram PEB (Pelat Elemen Bakar). Selanjutnya larutan tersebut dimasukkan ke dalam kolom kromatografi yang berisi zeolit Lampung 700 mg dan dibiarkan mengalir dalam keadaan vakum. Hasil pemisahan berupa ^{137}Cs yang terikat dengan zeolit dalam bentuk fasa padat ^{137}Cs -zeolit, sedangkan isotop lainnya berada dalam fasa cair (supernatan). Padatan ^{137}Cs -zeolit dan supernatan diukur dengan spektrometer gamma untuk mengetahui berat ^{137}Cs yang terikat dengan zeolit. Hasil pengukuran menunjukkan rerata berat awal ^{137}Cs sebelum pemisahan sebesar $7,49 \times 10^{-3} \mu\text{g/gPEB}$ dan $6,97 \times 10^{-3} \mu\text{g/gPEB}$ untuk sampel T1 dan T2 dari potongan *Top*, $10,50 \times 10^{-3} \mu\text{g/gPEB}$ untuk sampel M1 dari potongan *Middle*, serta $8,43 \times 10^{-3} \mu\text{g/gPEB}$ dan $8,76 \times 10^{-3} \mu\text{g/gPEB}$ untuk sampel B1 dan B2 dari potongan *Bottom*. Setelah pemisahan diperoleh berat rerata ^{137}Cs sebesar masing-masing $7,43 \times 10^{-3} \mu\text{g/gPEB}$ dan $6,82 \times 10^{-3} \mu\text{g/gPEB}$ untuk sampel T1 dan T2, $10,10 \times 10^{-3} \mu\text{g/gPEB}$ untuk sampel M1, serta $8,32 \times 10^{-3} \mu\text{g/gPEB}$ dan $8,41 \times 10^{-3} \mu\text{g/gPEB}$ untuk sampel B1 dan B2. Berdasarkan berat ^{137}Cs sebelum dan sesudah pemisahan, didapatkan *recovery* rerata pemisahan dengan metode kolom kromatografi penukar kation menggunakan zeolit sebesar 97,748%. Hal ini menunjukkan bahwa zeolit Lampung sangat selektif untuk menyerap ^{137}Cs di dalam larutan bahan bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ pasca iradiasi.

Kata kunci: $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ pasca iradiasi, ^{137}Cs , metode penukar kation, zeolit.

Pengukuran Berat Radionuklida ^{137}Cs dalam Larutan Pelat Elemen Bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ Densitas $4,8 \text{ gu/cm}^3$ Pasca Iradiasi Dengan Metode Kolom Kromatografi (Boybul, Yanlinastuti, Erlina Noerpitasari, Juan Carlos Sihotang, Helmi Fauzi Rahmatullah, Arif Nugroho, Mohamad Sukron Fajrin Husein, Rohmad Sigit, Aslina Br. Ginting, Susilo Widodo)

ABSTRACT

MEASUREMENT OF THE WEIGHT OF RADIONUCLIDE ^{137}Cs IN $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ FUEL ELEMENT PLATE SOLUTION WITH DENSITY OF 4.8 gU/cm^3 POST IRRADIATION USING THE CATION EXCHANGE COLUMN METHOD. *The burn up value of the fuel is one of the parameters that must be known in the post-irradiation examination. The determination of burn up aims to determine the performance of $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ fuel after being used in the reactor. One of the isotopes that can be used as an indicator of burn up is ^{137}Cs because it has a long half-life ($T_{1/2}$) of 30.17 years with a fission yield of 6.26%. Therefore, in this study, a separation was carried out to determine the amount of ^{137}Cs in the $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ fuel solution post irradiation using the cation exchange column method using zeolit from Lampung along with its recovery rate. The solution of irradiated $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ fuel from Top (T), Middle (M), and Bottom (B) position, was each pipetted in a duplicate manner (duplo) in an amount of $50 \mu\text{L}$ and added with 2 mL of 0.1 M HNO_3 . The solutions were then measured activity using a gamma spectrometer to obtain the initial weight of ^{137}Cs radionuclide. The solution was then inserted into a chromatography column containing 700 mg of zeolit Lampung and allowed to flow under vacuum condition. The separation results showed that ^{137}Cs was bound to the zeolit in the form of ^{137}Cs -zeolit solid phase, while other isotopes remained in the liquid phase. The solid ^{137}Cs -zeolit and ^{137}Cs in the supernatant were then measured with a gamma spectrometer to determine the weight of ^{137}Cs bound to the zeolit. The measurement results showed that the average initial weight of ^{137}Cs (before separation) were $7.49 \times 10^{-3} \mu\text{g/gFEP}$ and $6.97 \times 10^{-3} \mu\text{g/gFEP}$ for T1 and T2 from top section, $10.50 \times 10^{-3} \mu\text{g/gFEP}$ for M1 from Middle section, and $8.43 \times 10^{-3} \mu\text{g/gFEP}$ and $8.76 \times 10^{-3} \mu\text{g/gFEP}$ for B1 and B2 from Bottom section, respectively. After separation, the average weight of ^{137}Cs were $7.43 \times 10^{-3} \mu\text{g/gFEP}$ and $6.82 \times 10^{-3} \mu\text{g/gFEP}$ for T1 and T2, $10.10 \times 10^{-3} \mu\text{g/gFEP}$ for M1, and $8.32 \times 10^{-3} \mu\text{g/gFEP}$ and $8.41 \times 10^{-3} \mu\text{g/gFEP}$ for B1 and B2, respectively. From the weight of ^{137}Cs before and after separation, the average separation recovery with the cation exchange chromatography column method using zeolit was obtained at 97.748%. This recovery value indicates that zeolit Lampung is highly selective for absorbing ^{137}Cs in the solution of irradiated $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ fuel.*

Keywords : Irradiated $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$, ^{137}Cs , cation exchange method, zeolite.

Pengukuran Berat Radionuklida ^{137}Cs dalam Larutan Pelat Elemen Bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ Densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ Pasca Iradiasi Dengan Metode Kolom Kromatografi (Boybul, Yanlinastuti, Erlina Noerpitasi, Juan Carlos Sihotang, Helmi Fauzi Rahmatullah, Arif Nugroho, Mohamad Sukron Fajrin Husein, Rohmad Sigit, Aslina Br. Ginting, Susilo Widodo)

PENDAHULUAN

Pusat Riset Teknologi Bahan Nuklir dan Limbah Radioaktif (PRTBNLR), ORTN-BRIN telah berhasil membuat bahan bakar pelat elemen bakar (PEB) $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ dengan pengkayaan $19,89\%$ ^{235}U . Bahan bakar tersebut diharapkan dapat sebagai pengganti bahan bakar PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ densitas $2,96 \text{ gU/cm}^3$ yang selama ini telah digunakan Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy (RSG-GAS). Peningkatan densitas uranium dari $2,96 \text{ gU/cm}^3$ menjadi $4,8 \text{ gU/cm}^3$ menyebabkan kandungan ^{235}U di dalam bahan bakar menjadi lebih besar sehingga dapat meningkatkan fraksi bakar (*burn up*), memperpanjang siklus operasi reaktor karena waktu tinggal (*life time*) bahan bakar di dalam reaktor lebih lama. Hal ini mengurangi penggantian bahan bakar (*refuelling*) sehingga efisiensi dan ekonomisasi daur bahan bakar meningkat [1].

Selama pengoperasian reaktor nuklir, terjadi reaksi fisi antara ^{235}U dengan neutron termal menghasilkan isotop hasil fisi dari unsur bermassa berat (*heavy element*) seperti isotop ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{238}U , ^{235}U , ^{234}U , ^{236}U , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{148}Nd , ^{95}Kr , dan ^{133}Xe . Hasil fisi tersebut sangat mempengaruhi stabilitas, kompatibilitas dan *burn up* bahan bakar nuklir dan merupakan faktor utama dalam keselamatan pengoperasian reaktor nuklir [2]. Terbentuknya hasil fisi menyebabkan tekanan di dalam *meat* bahan bakar meningkat sehingga dapat terjadi cacat, *swelling* dan kelengkungan pada kelongsong PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ sehingga berpengaruh kepada struktur mikro maupun *burn up* bahan bakar. Untuk mengetahui unjuk kerja bahan bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ selama digunakan di RSG-GAS maka perlu dilakukan uji pasca iradiasi (UPI) di *hot cell* Instalasi Radiometalurgi (IRM). Data UPI yang diperoleh digunakan sebagai umpan balik kepada RSG-GAS dan fabrikator bahan bakar sebagai bahan evaluasi terhadap parameter fabrikasi [2], [3].

Salah satu hasil fisi yang dapat digunakan sebagai indikator *burn-up* adalah isotop cesium. Pemilihan isotop ^{137}Cs sebagai indikator *burn-up* karena mempunyai waktu paruh panjang $T_{1/2}=30,17$ tahun dengan *fission yields* sekitar $6,26\%$ [3]. Oleh karena itu, untuk mendapatkan *burn up* yang akurat, harus diketahui berat ^{137}Cs dalam bahan bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ pasca iradiasi dengan cara melakukan pemisahan ^{137}Cs dari isotop lainnya. Pemisahan cesium

dalam larutan bahan bakar nuklir dapat dilakukan dengan beberapa metode di antara adalah metode pengendapan, penukar kation menggunakan resin Dowex dan metode penukar kation menggunakan zeolit yang berasal dari Lampung. Hasil validasi metode menggunakan larutan standar ^{137}Cs SRM 4233E dari *National Institute of Standards Technology* (NIST) telah diperoleh *recovery* pemisahan isotop ^{137}Cs menggunakan metode pengendapan dengan CsClO_4 sebesar $98,01\%$, metode penukar kation dengan resin Dowex sebesar $93,15\%$ dan metode penukar kation menggunakan zeolit Lampung sebesar $99,03\%$. Berdasarkan hasil validasi metode ini, maka pemisahan cesium dalam bahan bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ dilakukan dengan metode penukar kation menggunakan zeolit Lampung [4]-[7].

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui berat ^{137}Cs dalam larutan bahan bakar PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ pasca iradiasi dan mengetahui *recovery* pemisahan ^{137}Cs dengan metode penukar kation menggunakan zeolit Lampung. Dalam melaksanakan kegiatan penelitian ini, beberapa masalah terkait dengan keselamatan kerja di dalam *hot cell* perlu dilakukan batasan-batasan.

Batasan tersebut antara lain adalah data pemotongan PEB, pelarutan dan pengenceran bahan bakar PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ pasca iradiasi di dalam *hotcell* sehingga dalam penelitian ini digunakan larutan bahan bakar yang sudah tersedia di *hot cell* dan merupakan hasil pelarutan dari PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ pada posisi potongan bagian *Top*, *Middle*, dan *Bottom* seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1. Larutan bahan bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ tersebut telah diencerkan hingga 20 kali hingga memenuhi paparan radiasi $\leq 150 \text{ } \mu\text{Sv/jam}$ sesuai Batas Keselamatan Operasi (BKO) yang ditetapkan oleh Badan Pegawai Tenaga Nuklir (BAPETEN) [8], [9].

Dalam proses pemisahan ^{137}Cs dalam larutan bahan bakar PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ dengan metode penukar kation menggunakan zeolit Lampung, dimana larutan bahan bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ pasca iradiasi sebagai fase gerak dan zeolit Lampung yang telah diaktivasi dengan NH_4Cl sebagai fase diam. Isotop ^{137}Cs akan terikat dengan zeolit membentuk ^{137}Cs -zeolit sebagai fasa padat dan isotop lainnya dalam fasa cair (*supernatan*). Padatan ^{137}Cs -zeolit dan

Pengukuran Berat Radionuklida ^{137}Cs dalam Larutan Pelat Elemen Bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ Densitas $4,8 \text{ gu/cm}^3$ Pasca Iradiasi Dengan Metode Kolom Kromatografi (Boybul, Yanlinastuti, Erlina Noerpitasaki, Juan Carlos Sihotang, Helmi Fauzi Rahmatullah, Arif Nugroho, Mohamad Sukron Fajrin Husein, Rohmad Sigit, Aslina Br. Ginting, Susilo Widodo)

supernatant selanjutnya diukur menggunakan Spektrometer gamma dengan detektor HPGe (*High Purity Germanium*). Pengukuran padatan ^{137}Cs -zeolit untuk mengetahui berat isotop ^{137}Cs yang terikat dengan zeolit,

sedangkan pengukuran supernatant untuk mengetahui berat isotop ^{137}Cs yang tidak terikat dengan zeolit (tersisa dalam fasa cair) [7], [8], [10].

Tabel 1. Data pemotongan, pelarutan dan pengenceran PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ pasca iradiasi di dalam *hot cell* [7]-[9]

Kode sampel	Berat PEB (g)	Larutkan dalam 10 mL (g larutan)	Pipet 0,5 mL (g larutan)	Pengenceran dalam 20 mL (g larutan)	Pipet 50 μL (g larutan)
PEB (T1-1)	0,063	11,589	0,642	20,1311	0,0474
PEB (T1-2)	0,063	11,589	0,642	20,1311	0,0485
PEB (T2-1)	0,050	11,410	0,664	20,1260	0,0451
PEB (T2-2)	0,050	11,410	0,664	20,1260	0,0505
PEB (M1-1)	0,040	11,637	0,678	20,3510	0,0515
PEB (M1-2)	0,040	11,637	0,678	20,3510	0,0502
PEB (B1-1)	0,036	11,799	1,210	20,0077	0,0514
PEB (B1-2)	0,036	11,799	1,210	20,0077	0,0498
PEB (B2-1)	0,037	11,929	1,109	19,754	0,0507
PEB (B2-2)	0,037	11,929	1,109	19,754	0,0505

Sebelum dilakukan pengukuran isotop ^{137}Cs dengan Spektrometer gamma terlebih dahulu harus dilakukan penentuan efisiensi detektor HPGe baik untuk pengukuran sampel padatan ^{137}Cs -zeolit maupun ^{137}Cs dalam supernatant. Penentuan efisiensi detektor HPGe dilakukan dengan menggunakan standar padatan ^{137}Cs maupun standar larutan dari SRM 4233E (C 13701/2015). Hal ini dilakukan salah satu persyaratan preparasi sampel untuk pengukuran menggunakan Spektrometer gamma, dimana sampel yang diukur harus mempunyai bentuk dan geometri yang sama, agar diperoleh hasil yang presisi dan akurat. Rumus yang digunakan untuk menentukan aktivitas standar ^{137}Cs (Bq) dan efisiensi detektor mengikuti persamaan (1) dan (2) [7]-[9].

$$A(t) = A(o) \cdot e^{-\frac{t}{T_{1/2}}} \quad (1)$$

dengan :

At : Aktivitas sumber standar ^{137}Cs saat digunakan (Bq)

A₀ : Aktivitas sumber standar ^{137}Cs (Bq) dari sertifikat SRM 4233E (C 13701 / 2015)

t : Selisih waktu antara dari sertifikat dengan waktu digunakan (tahun)

T_{1/2} : Waktu Paruh isotop ^{137}Cs (30,17 tahun)

$$E_{ff} = \frac{\text{Cacah}}{A(t) \cdot \text{Yield}} \quad (2)$$

dengan :

E_{ff} : Efisiensi detektor HPGe

Cacah : Cacahan netto standar ^{137}Cs

At : Aktivitas sumber standar ^{137}Cs pada saat digunakan (Bq) dari sertifikat SRM 4233E (C 13701/2015)

Yield : Intensitas gamma (I_γ) isotop ^{137}Cs pada energy 661,7 keV sebesar 85,10 % (Tabel).

Setelah diketahui efisiensi detektor HPGe, kemudian nilai tersebut digunakan untuk menentukan aktivitas (Bq) isotop ^{137}Cs di dalam bahan bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ baik sampel larutan pasca iradiasi (LarPIr), larutan supernatant (SPIr), serta padatan ^{137}Cs -zeolit yang telah dicacah dengan menggunakan persamaan (3), sedangkan berat isotop ^{137}Cs ditentukan dengan persamaan (4) dan (5).

$$A(t) = \frac{\text{Cacah}}{E_{ff} \cdot \text{Yield}} \quad (3)$$

$$N = A(t) \cdot T_{1/2} \quad (4)$$

$$m = \frac{N \cdot \text{MR}}{N_A} \quad (5)$$

Pengukuran Berat Radionuklida ^{137}Cs dalam Larutan Pelat Elemen Bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ Densitas $4,8 \text{ gu/cm}^3$ Pasca Iradiasi Dengan Metode Kolom Kromatografi (Boybul, Yanlinastuti, Erlina Noerpitasari, Juan Carlos Sihotang, Helmi Fauzi Rahmatullah, Arif Nugroho, Mohamad Sukron Fajrin Husein, Rohmad Sigit, Aslina Br. Ginting, Susilo Widodo)

dengan :

m : Berat isotop ^{137}Cs

N : Jumlah atom isotop ^{137}Cs

MR : Berat molekul isotop ^{137}Cs adalah 137 gram/mol

N_A : Bilangan Avogadro bernilai $6,023 \times 10^{23} \text{ atom/mol}$

METODOLOGI

Penentuan efisiensi detektor *High Purity Germanium* (HPGe) dilakukan dengan mengukur sampel standar larutan ^{137}Cs dan padatan ^{137}Cs menggunakan Spektrometer gamma dengan waktu cacah 1000 detik, selanjutnya dilakukan pengukuran sampel blanko berupa vial yang berisi larutan HNO_3 $0,1\text{M}$ sebanyak 2 mL dengan waktu cacah 60.000 detik. Preparasi sampel diawali dengan persiapan sampel standar ^{137}Cs dan sampel uji larutan bahan bakar PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ potongan bagian *Top* (T), *Middle* (M), dan *Bottom* (B). Sampel standar ^{137}Cs dan sampel uji dipipet masing-masing sebanyak $50 \mu\text{L}$ (duplo) kemudian dimasukkan ke dalam vial dan ditambahkan larutan HNO_3 $0,1 \text{ M}$ sebanyak 2 mL . Hal ini bertujuan untuk membuat geometri sampel standar dan sampel uji menjadi sama. Larutan standar dan larutan bahan bakar PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ berupa potongan dari bagian *Top* (T), *Middle* (M), dan *Bottom* (B) dicacah/diukur menggunakan Spektrometer gamma selama 500 detik sehingga diperoleh berat awal ^{137}Cs (sebelum pemisahan). Zeolit Lampung dengan berat 700 mg dimasukkan ke dalam tabung kolom kromatografi, kemudian dibilas dengan HNO_3 $0,1 \text{ M}$ dan secara perlahan-lahan larutan $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ pasca iradiasi juga dimasukkan ke dalam kolom kromatografi, sehingga terjadi proses pertukaran kation ^{137}Cs dengan zeolit Lampung [8, 9]. Hasil pemisahan ^{137}Cs dengan metode penukar kation diperoleh isotop ^{137}Cs terikat oleh zeolit Lampung dalam bentuk padatan ^{137}Cs -zeolit dan isotop lainnya berada dalam fasa cair (supernatan). Padatan ^{137}Cs -zeolit dipisahkan dari supernatan kemudian padatan ^{137}Cs -zeolit dikeringkan dan ditimbang. Padatan ^{137}Cs -zeolit kering kemudian diukur menggunakan Spektrometer gamma dengan waktu cacah selama 500 detik, sedangkan ^{137}Cs dalam fasa cair diukur dengan waktu

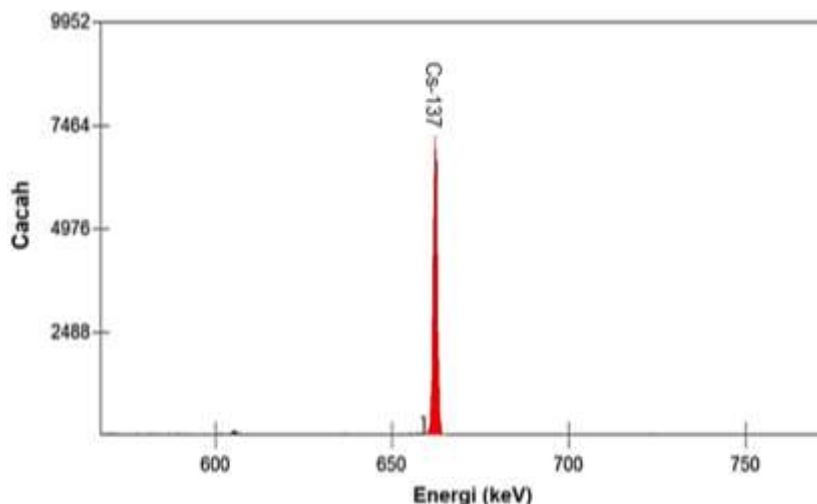
5000 detik masing-masing dengan 3 kali pengulangan. Hasil pengukuran diperoleh cacahan isotop ^{137}Cs (setelah pemisahan) pada sampel uji larutan bahan bakar PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ masing-masing untuk potongan bagian *Top* (T), *Middle* (M), dan *Bottom* (B) dan cacahan ^{137}Cs dalam fasa cair. Berat isotop dalam larutan $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ (sebelum pemisahan), padatan ^{137}Cs -zeolit dan ^{137}Cs dalam fasa cair (setelah pemisahan) dihitung dengan persamaan (3),(4) dan (5), sedangkan untuk mengetahui *recovery* atau efisiensi pemisahan dilakukan dengan cara membandingkan berat ^{137}Cs sebelum dan sesudah pemisahan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

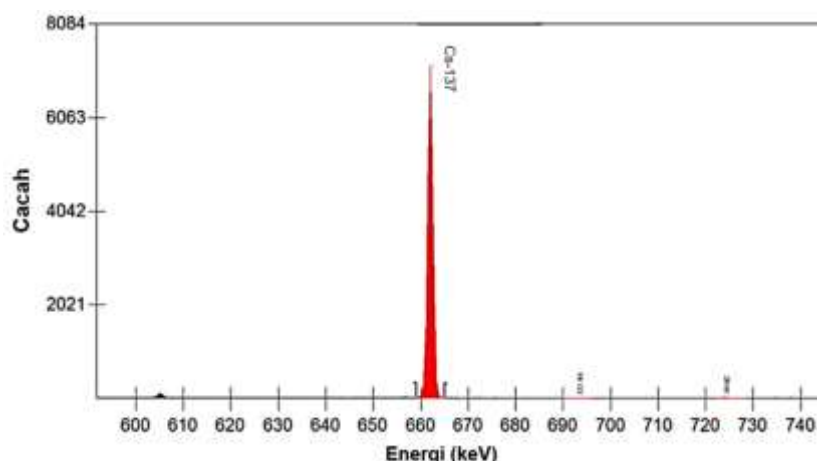
Hasil perhitungan efisiensi detektor HPGe untuk pengukuran sampel standar larutan isotop ^{137}Cs dengan waktu cacah 1000 detik ditunjukkan pada Tabel 2, sedangkan efisiensi detektor untuk sampel standar padatan isotop ^{137}Cs ditunjukkan pada Tabel 3, sedangkan dari Tabel 2 dan 3 diperoleh efisiensi detektor sebesar $0,001795$ dan $0,001783$ masing-masing untuk sampel standar larutan dan sampel padatan isotop ^{137}Cs . Nilai efisiensi detektor ini selanjutnya digunakan untuk mengkonversi cacahan sampel uji larutan bahan bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ dan padatan ^{137}Cs -zeolit menjadi aktivitas (Bq) dan berat ($\mu\text{g/gPEB}$) sesuai persamaan (3) dan (5).

Hasil pengukuran blanko dan sampel larutan bahan bakar PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ potongan bagian *Top* (T), *Middle* (M), dan *Bottom* (B) secara duplo (sebelum pemisahan) ditunjukkan pada Gambar 1 dan Tabel 4. Pencacahan sampel blanko dilakukan selama 60.000 detik sedangkan untuk larutan larutan bahan bakar PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ (Lar PIR) selama 500 detik dengan 3 kali pengulangan. Hasil pemisahan sampel larutan bahan bakar PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ potongan bagian *Top* (T), *Middle* (M), dan *Bottom* (B) secara duplo dengan menggunakan metode kolom kromatografi penukar kation telah diperoleh padatan ^{137}Cs -zeolit. Hasil cacahan padatan ^{137}Cs -zeolit menggunakan Spektrometer gamma dengan waktu cacah 500 detik ditunjukkan pada Gambar 2 dan Tabel 5.

Pengukuran Berat Radionuklida ¹³⁷Cs dalam Larutan Pelat Elemen Bakar U₃Si₂/Al Densitas 4,8 gu/cm³ Pasca Iradiasi Dengan Metode Kolom Kromatografi (Boybul, Yanlinastuti, Erlina Noerpitasaki, Juan Carlos Sihotang, Helmi Fauzi Rahmatullah, Arif Nugroho, Mohamad Sukron Fajrin Husein, Rohmad Sigit, Aslina Br. Ginting, Susilo Widodo)



Gambar 1. Spektrum isotop ¹³⁷Cs dalam larutan bahan bakar LarPIr pada energi 661,7 keV (sebelum pemisahan).



Gambar 2. Spektrum ¹³⁷Cs dalam padatan ¹³⁷Cs-zeolit pada energi 661,7 keV (setelah pemisahan).

Tabel 2. Efisiensi detektor HPGe untuk sampel larutan isotop ¹³⁷Cs

Ao standar ¹³⁷ Cs 02-11-2015 (Bq)	At standar ¹³⁷ Cs 09-11-2023 (Bq)	Net area (cacah)	Net area (cps)	Yeild (I _γ)	Efisiensi detektor
9520	8070,38	12450	12406		
		12408			
	Rerata	12421,33	12,421	0,851	0,001795

Tabel 3. Efisiensi detektor HPGe untuk sampel padatan isotop ¹³⁷Cs

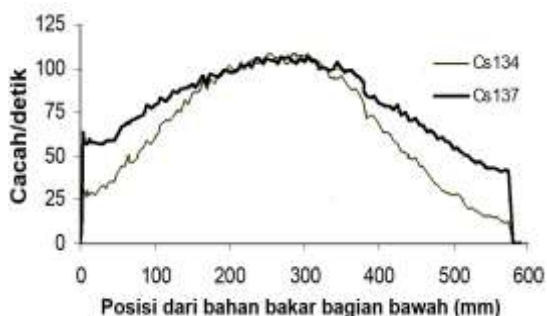
Ao standar ¹³⁷ Cs 02-11-2015 (Bq)	At standar ¹³⁷ Cs 18-11-2023 (Bq)	Net area (cacah)	Net area (cps)	Yeild (I _γ)	Efisiensi detektor
1030	8752,08	13291	13371		
		13363			
	Rerata	13368,90	13,369	0,851	0,001783

Pengukuran Berat Radionuklida ¹³⁷Cs dalam Larutan Pelat Elemen Bakar U₃Si₂/Al Densitas 4,8 gu/cm³ Pasca Iradiasi Dengan Metode Kolom Kromatografi (Boybul, Yanlinastuti, Erlina Noerpitasari, Juan Carlos Sihotang, Helmi Fauzi Rahmatullah, Arif Nugroho, Mohamad Sukron Fajrin Husein, Rohmad Sigit, Aslina Br. Ginting, Susilo Widodo)

Tabel 4. Hasil pencacahan ¹³⁷Cs dalam LarPIr dan blanko HNO₃

Kode sampel	Net Area			Rerata	Cps	Aktivitas (Bq)	Berat (µg/gPEB)
	Cacah 1	Cacah 2	Cacah 3				
LarPIr (T1-1)	16710	16855	16930	16831,67	33,663	21980,236	7,493 × 10 ⁻³
LarPIr (T1-2)	17472	17290	17081	17281,00	34,562	22568,544	7,492 × 10 ⁻³
LarPIr (T2-1)	12173	12027	12016	12072,00	24,144	15748,450	6,958 × 10 ⁻³
LarPIr (T2-2)	13427	13507	13394	13442,67	26,885	17543,051	6,988 × 10 ⁻³
LarPIr (M1-1)	17553	17499	17639	17563,67	35,127	36031,541	10,497 × 10 ⁻³
LarPIr (M1-2)	17096	17052	16966	17038,00	34,076	35343,290	10,451 × 10 ⁻³
LarPIr (B1-1)	22263	22286	22159	22236,00	44,472	29056,078	8,399 × 10 ⁻³
LarPIr (B1-2)	21861	22026	21942	21943,00	43,886	28672,456	8,462 × 10 ⁻³
LarPIr (B2-1)	20867	21208	21244	21106,33	42,213	27577,016	8,945 × 10 ⁻³
LarPIr (B2-2)	21157	21095	21237	21163,33	42,238	27651,209	8,581 × 10 ⁻³
Blanko			5252		0,088		

Berdasarkan data pada Tabel 4 (sebelum pemisahan) dan Tabel 5 (setelah pemisahan) diketahui bahwa berat isotop ¹³⁷Cs paling besar diperoleh pada potongan bagian *Middle*, kemudian pada *Bottom* dan paling kecil pada *Top*. Hal ini sesuai dengan pola distribusi hasil fisi ¹³⁷Cs dari hasil analisis uji merusak [3] dan uji tak merusak menggunakan Gamma scanning seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3 [11], [12].



Gambar 3. Pola distribusi ¹³⁷Cs pada PEB U₃Si₂/Al densitas 4,8 gU/cm³ [12].

Fenomena ini terjadi karena pada saat bahan bakar PEB U₃Si₂/Al digunakan di teras RSG-GAS posisi batang kendali berada diatas sedangkan posisi reflektor berada pada samping bagian tengah. Hal ini yang menyebabkan reaksi fisi terjadi paling kecil pada bagian atas, karena neutron yang terbentuk diserap oleh batang kendali. Reaksi fisi paling besar terjadi pada bagian tengah karena posisi reflektor sebagai pengarah/pengendali neutron berada di posisi tengah sehingga neutron yang terbentuk paling besar pada posisi tengah. Pada bagian bawah reaksi fisi terjadi lebih kecil dibanding bagian tengah. Hal ini disebabkan karena

posisinya agak jauh dari reflector sehingga neutron yang terbentuk pada bagian bawah cenderung terrefleksi ke bagian tengah sehingga jumlah neutron yang terbentuk pada bagian bawah juga lebih kecil dibandingkan bagian tengah [3], [9].

Dari berat ¹³⁷Cs pada Tabel 4 (sebelum pemisahan) dan Tabel 5 (setelah pemisahan) diketahui besar *recovery*/efisiensi pemisahan ¹³⁷Cs menggunakan metode kolom kromatografi penukar kation. Hasil perhitungan *recovery*/efisiensi pemisahan ¹³⁷Cs ditunjukkan pada Tabel 6. Nilai *recovery*/efisiensi pemisahan ¹³⁷Cs yang didapatkan dengan metode kolom kromatografi penukar kation menggunakan zeolit Lampung masing-masing sebesar T1=99,193%, T2=97,756%, M1=96,821%, B1=98,707%, dan B2=95,932% dengan *recovery* rerata sebesar 97,748%. *Recovery* ini sudah mendekati hasil validasi metode menggunakan standar ¹³⁷Cs dari *National Institute of Standards Technology* (NIST). Validasi metode dengan standar dari NIST untuk menggunakan zeolit Lampung diperoleh *recovery* pemisahan ¹³⁷Cs sebesar 99,03% [6]. Namun demikian, walau sudah mendekati nilai dari standar, hasil pengukuran *recovery* dalam penelitian ini masih belum mencapai 99%. Hal ini dapat terjadi karena beberapa faktor, seperti posisi peletakan sampel larutan/padatan yang tidak tepat ditengah saat pencacahan dengan detektor HPGe, sehingga cacahan yang terbaca lebih kecil dari pada yang seharusnya. Pemisahan ¹³⁷Cs menggunakan metoda kolom kromatografi penukar kation menunjukkan bahwa zeolit Lampung yang telah diaktifasi dengan NH₄⁺ sangat selektif terhadap cesium. Hal ini

Pengukuran Berat Radionuklida ^{137}Cs dalam Larutan Pelat Elemen Bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ Densitas $4,8 \text{ gu/cm}^3$ Pasca Iradiasi Dengan Metode Kolom Kromatografi (Boybul, Yanlinastuti, Erlina Noerpitasari, Juan Carlos Sihotang, Helmi Fauzi Rahmatullah, Arif Nugroho, Mohamad Sukron Fajrin Husein, Rohmad Sigit, Aslina Br. Ginting, Susilo Widodo)

dibuktikan dengan diperolehnya isotop ^{137}Cs pada energi 661,7 keV dalam supernatan (SPIr) dengan jumlah sangat kecil dan tidak terlihat adanya spektrum isotop pemancar sinar- γ lainnya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Berat isotop ^{137}Cs yang masih

tersisa dalam supernatan (SPIr) untuk potongan bagian *Top*, *Middle* dan *Bottom* masing-masing sebesar $T = (1,216-1,636) \times 10^{-6} \text{ }\mu\text{g/gPEB}$, $M = 3,156 \times 10^{-6} \text{ }\mu\text{g/gPEB}$ dan $B = (1,156 - 1,934) \times 10^{-6} \text{ }\mu\text{g/gPEB}$ seperti yang ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 5. Hasil pencacahan padatan ^{137}Cs -zeolit (setelah pemisahan)

Kode sampel	Net Area			Rerata	Cps	Aktivitas (Bq)	Berat ($\mu\text{g/gPEB}$)
	Cacah 1	Cacah 2	Cacah 3				
Padatan (T1-1)	16806	16616	16804	16831,67	33,576	21980,236	$7,502 \times 10^{-3}$
Padatan (T1-2)	16749	16715	17145	17281,00	34,474	22568,544	$7,362 \times 10^{-3}$
Padatan (T2-1)	11631	11509	11835	12072,00	24,056	15748,450	$6,764 \times 10^{-3}$
Padatan (T2-2)	13203	12995	13186	13442,67	26,798	17543,051	$6,869 \times 10^{-3}$
Padatan (M1-1)	16922	17131	16739	27563,67	55,040	36031,541	$10,185 \times 10^{-3}$
Padatan (M1-2)	16402	16383	16280	27038,00	53,988	35343,290	$10,097 \times 10^{-3}$
Padatan (B1-1)	21694	21553	21329	22236,00	44,384	29056,078	$8,126 \times 10^{-3}$
Padatan (B1-2)	21969	21920	21928	21943,00	43,798	28672,456	$8,517 \times 10^{-3}$
Padatan (B2-1)	20114	20308	20404	21106,33	42,125	27577,016	$8,650 \times 10^{-3}$
Padatan (B2-2)	20071	20058	19873	21163,00	42,238	27651,209	$8,163 \times 10^{-3}$

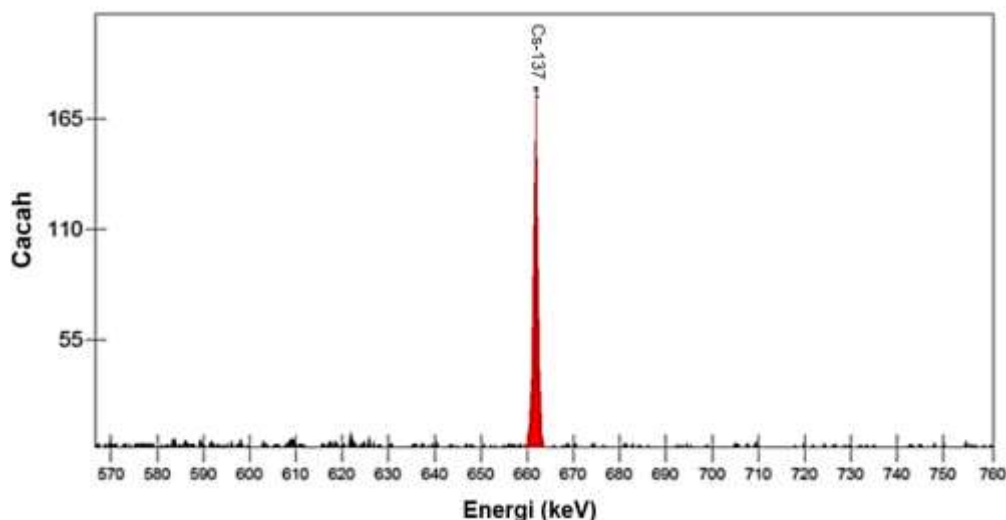
Tabel 6. Data *recovery*/efisiensi pemisahan ^{137}Cs

Kode sampel	Berat ($\mu\text{g/gPEB}$)	Rerata	Berat ($\mu\text{g/gPEB}$)	Rerata	<i>Recovery</i> (%)
	(sebelum pemisahan)		(setelah pemisahan)		
LarPIr (T1-1)	$7,493 \times 10^{-3}$	$7,49 \times 10^{-3}$	$7,502 \times 10^{-3}$	$7,43 \times 10^{-3}$	99,193
LarPIr (T1-2)	$7,492 \times 10^{-3}$		$7,362 \times 10^{-3}$		
LarPIr (T2-1)	$6,958 \times 10^{-3}$	$6,97 \times 10^{-3}$	$6,764 \times 10^{-3}$	$6,82 \times 10^{-3}$	97,756
LarPIr (T2-2)	$6,988 \times 10^{-3}$		$6,869 \times 10^{-3}$		
LarPIr (M1-1)	$10,497 \times 10^{-3}$	$10,50 \times 10^{-3}$	$10,185 \times 10^{-3}$	$10,10 \times 10^{-3}$	96,821
LarPIr (M1-2)	$10,451 \times 10^{-3}$		$10,097 \times 10^{-3}$		
LarPIr (B1-1)	$8,399 \times 10^{-3}$	$8,43 \times 10^{-3}$	$8,126 \times 10^{-3}$	$8,32 \times 10^{-3}$	98,707
LarPIr (B1-2)	$8,462 \times 10^{-3}$		$8,517 \times 10^{-3}$		
LarPIr (B2-1)	$8,945 \times 10^{-3}$	$8,76 \times 10^{-3}$	$8,650 \times 10^{-3}$	$8,41 \times 10^{-3}$	95,932
LarPIr (B2-2)	$8,581 \times 10^{-3}$		$8,163 \times 10^{-3}$		

Tabel 7. Berat isotop ^{137}Cs dalam supernatan dengan waktu cacah 5000 detik

Kode sampel	Cacah	Cps Netto	Rerata Cps	Aktivitas (Bq)	Berat ($\mu\text{g/gPEB}$)
SPIr (T1-1)	23,35	0,00467	0,00447	2,9263	$1,636 \times 10^{-6}$
SPIr (T1-2)	21,35	0,00427			
SPIr (T2-1)	18,35	0,00367	0,00346	2,2657	$1,216 \times 10^{-6}$
SPIr (T2-2)	16,26	0,00325			
SPIr (M1-1)	79,35	0,01587	0,01547	10,1274	$3,156 \times 10^{-6}$
SPIr (M1-2)	75,35	0,01507			
SPIr (B1-1)	36,35	0,00727	0,00687	4,4974	$1,934 \times 10^{-6}$
SPIr (B1-2)	32,35	0,00647			
SPIr (B2-1)	17,35	0,00347	0,00337	2,2062	$1,156 \times 10^{-6}$
SPIr (B2-2)	16,35	0,00327			

Pengukuran Berat Radionuklida ^{137}Cs dalam Larutan Pelat Elemen Bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ Densitas $4,8 \text{ gu/cm}^3$ Pasca Iradiasi Dengan Metode Kolom Kromatografi (Boybul, Yanlinastuti, Erlina Noerpitasari, Juan Carlos Sihotang, Helmi Fauzi Rahmatullah, Arif Nugroho, Mohamad Sukron Fajrin Husein, Rohmad Sigit, Aslina Br. Ginting, Susilo Widodo)



Gambar 4. Spektrum isotop ^{137}Cs dalam supernatant (SPIrr)

KESIMPULAN

Hasil pengukuran ^{137}Cs dalam larutan bahan bakar PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ pasca iradiasi dari potongan bagian *Top*, *Middle* dan *Bottom* menggunakan Spektrometer gamma (sebelum pemisahan) diperoleh berat rerata radionuklida ^{137}Cs masing-masing sebesar $T1 = 7,49 \times 10^{-3} \text{ } \mu\text{g/gPEB}$, $T2 = 6,97 \times 10^{-3} \text{ } \mu\text{g/gPEB}$, $M1 = 10,50 \times 10^{-3} \text{ } \mu\text{g/gPEB}$, $B1 = 8,43 \times 10^{-3} \text{ } \mu\text{g/gPEB}$ dan $B2 = 8,76 \times 10^{-3} \text{ } \mu\text{g/gPEB}$. Setelah dilakukan pemisahan ^{137}Cs dengan metode kolom kromatografi penukar kation diperoleh berat rerata radionuklida ^{137}Cs dalam padatan ^{137}Cs -zeolit masing-masing sebesar $T1 = 7,43 \times 10^{-3} \text{ } \mu\text{g/gPEB}$, $T2 = 6,82 \times 10^{-3} \text{ } \mu\text{g/gPEB}$, $M1 = 10,10 \times 10^{-3} \text{ } \mu\text{g/gPEB}$, $B1 = 8,32 \times 10^{-3} \text{ } \mu\text{g/gPEB}$ dan $B2 = 8,41 \times 10^{-3} \text{ } \mu\text{g/gPEB}$. *Recovery* pemisahan ^{137}Cs dengan metode kolom kromatografi penukar kation menggunakan zeolit Lampung diperoleh sebesar 97,748%. *Recovery* pemisahan yang tinggi ini menunjukkan bahwa zeolit Lampung sangat selektif untuk menyerap ^{137}Cs di dalam larutan bahan bakar PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ pasca iradiasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kegiatan penelitian ini didukung oleh pendanaan RIIM Kompetisi dari Kementerian Keuangan Republik Indonesia dan Badan Riset dan Inovasi Nasional sesuai dengan nomor kontrak B3846/II.7.5/FR.06.00/11/2023 dan B7416/III.2/KU.06.04/11/2023. Terima

kasih juga disampaikan kepada teman teman periset laboratorium IRM - PRTBNLR ORTN dan DPFK, Bapak Junaedi, Basiran, Purwanta dan Setia Permana yang telah membantu melaksanakan preparasi sampel di dalam *hotcell* sehingga penelitian dapat terlaksana dengan baik.

KONTRIBUTOR PENULIS

Kontributor utama dalam makalah ini adalah Boybul, Aslina Br Ginting, Erlina Noerpitasari dan Yanlinastuti.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Supardjo, T. Surbakti, E. P. Hastuti, A. Hamzah and A. B. Ginting, "Teknik pembuatan dan pengujian bahan bakar dispersi $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ densitas uranium tinggi," *Buku Batan Press*, 2019, hal. 64-70.
- [2]. S. K. Jung, S. J. Young, D. P. Soon, K. H. Yeong, S. Kyuseok. "Analysis of high burnup pressurized water reactor fuel using uranium, plutonium, neodymium, and cesium isotope correlations with burnup", *Nuclear Engineering Technology*, vol. 471, pp. 924-933, 2015.
- [3]. 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," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 85, pp. 613-620, 2015, doi: 10.1016/j.anucene.2015.06.016.
- [4]. A. B. Ginting dan D. Anggraini, "Metode pengendapan dan penukar kation untuk

Pengukuran Berat Radionuklida ^{137}Cs dalam Larutan Pelat Elemen Bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ Densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ Pasca Iradiasi Dengan Metode Kolom Kromatografi (Boybul, Yanlinastuti, Erlina Noerpitasari, Juan Carlos Sihotang, Helmi Fauzi Rahmatullah, Arif Nugroho, Mohamad Sukron Fajrin Husein, Rohmad Sigit, Aslina Br. Ginting, Susilo Widodo)

- pemisahan cesium dalam bahan bakar $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ ". *Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir Urania*, vol. 22, no.2, hal 99-110, 2016.
- [5]. A. Nugroho, D. Anggraini, Boybul, S. Indaryati, I. Haryati, R. Kriswarini, A. B. Ginting, "Pemisahan cesium dalam PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ pasca iradiasi dengan metode kolom penukar kation menggunakan resin dowex," *Urania: Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir*, vol. 24, no. 2, hal. 125-134, 2018.
- [6]. A. B. Ginting, Supardjo, Yanlinastuti, S. Indaryati and Boybul, "Perhitungan burnup PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ pasca iradiasi potongan bagian middle," *Urania: Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir*, vol. 25, no. 2, hal. 91-106, 2020.
- [7]. A. B. Ginting, S. Amini, Noviarty, Yanlinastuti, A. Nugroho and Boybul, "Natural zeolit as a replacement for resin in the cation exchange process of cesium on post-irradiated nuclear fuel," *Nukleonika*, vol. 66, no. 1, pp. 11-19, 2021.
- [8]. Yanlinastuti, A. Nugroho, A. B. Ginting, Noviarty, Boybul, I. Haryati, A. Jamaludin, E. Noerpitasari and R. Kriswarini, "Pemisahan dan analisis isotop ^{137}Cs dalam larutan elemen bakar uji $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ menggunakan metode penukar kation," *Urania: Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir*, vol. 28, no. 3, hal. 163-174, 2022.
- [9]. Yanlinastuti, S. Indaryati, Boybul, Supardjo and A. Br. Ginting, "Determination of weight of cesium and uranium isotops in irradiated $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ fuel plate with 4.8 gU/cm^3 density and 40% burn up," *Urania: Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir*, vol. 26, no. 2, pp. 107-120, 2020.
- [10]. M. I. Ojovan, W. E. Lee and S. N. Kalmykov, "Chapter 11 - Short-Lived Waste Radionuclides," in *An Introduction to Nuclear Waste Immobilisation*, Elsevier Ltd. , 2019, pp. 145-154.
- [11]. P. H. Liem, S. Amini, A. G. Hutagaol, and T. M. Sembiring, "Non-destructive burnup verification by gamma-ray spectroscopy of LEU silicide fuel plates irradiated in the RSG GAS multipurpose reactor," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 56, pp. 57–65, 2013. doi: 10.1016/j.anucene.2013.01.013.
- [12]. Y. Nampira and dan Sri Ismarwanti, "Nondestructive test of post-irradiated $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ fuel with uranium density of $4,8 \text{ g/cm}^3$ and burn up of 20% and 40%," *Jurnal Teknologi Bahan Nuklir*, vol. 10, no. 2, pp. 53–63, Jun. 2015.