
PERHITUNGAN *BURN UP* PEB U_3Si_2/Al DENSITAS $4,8 \text{ gU/cm}^3$ PASCA IRADIASI POTONGAN BAGIAN *MIDDLE*

Aslina Br. Ginting, Supardjo, Yanlinastuti, Sutri Indaryati, Boybul
Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir - BATAN
Kawasan PUSPIPTEK Serpong Gd.20 Tangerang Selatan, Banten 15314
e-mail: aslina@batan.go.id

(Naskah diterima: 28-4-2020, Naskah direvisi: 14-5-2020, Naskah disetujui: 31-5-2020)

ABSTRAK

PERHITUNGAN *BURN UP* PEB U_3Si_2/Al DENSITAS $4,8 \text{ gU/cm}^3$ PASCA IRADIASI POTONGAN BAGIAN *MIDDLE*. Upaya untuk mengetahui unjuk kerja bahan bakar selama dirradiasi di Reaktor Serba Guna G.A.Siwabessy (RSG-GAS) adalah melakukan uji pasca iradiasi baik secara tak merusak maupun merusak. Salah satu parameter uji pasca iradiasi secara merusak adalah penentuan *burn up*. Penentuan *burn up* bertujuan untuk mengetahui kandungan ^{235}U yang terbakar selama digunakan di dalam pengoperasian RSG-GAS, sekaligus untuk membuktikan kesesuaian besar *burn up* yang diperoleh secara merusak dengan *burn up* yang dihitung menggunakan *Origen Code* oleh RSG-GAS. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan perhitungan *burn up* PEB U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ secara merusak melalui analisis fisikokimia. Analisis fisikokimia bertujuan untuk mengetahui kandungan isotop ^{235}U sisa dalam PEB U_3Si_2/Al serta ^{134}Cs dan ^{137}Cs yang terbentuk akibat reaksi fisi selama digunakan dalam reaktor. PEB U_3Si_2/Al dipotong pada bagian tengah (*middle*) secara duplo dengan berat masing-masing $M-1=0,056 \text{ gPEB}$ dan $M-2=0,075 \text{ gPEB}$. PEB U_3Si_2/Al dengan berat tersebut kemudian dilarutkan menggunakan HCl 6 N dan HNO_3 6N. Hasil pelarutan diperoleh uranil nitrat $UO_2(NO_3)_2$ yang mengandung uranium dan isotop hasil fisi seperti cesium, dan plutonium. Larutan $UO_2(NO_3)_2$ dipipet 1 mL kemudian ditransfer dari *hotcell* ke R.135 (diluar *hot cell*) untuk dilakukan pemisahan ^{134}Cs dan ^{137}Cs dari ^{235}U dengan metode penukar kation menggunakan zeolit Lampung. Larutan $UO_2(NO_3)_2$ dipipet 100 μL ke dalam vial secara duplo kemudian ditambahkan zeolit Lampung 1000 mg dan dilakukan proses penukar kation dengan pengadukan selama 1 jam. Hasil pemisahan diperoleh isotop ^{134}Cs dan ^{137}Cs dalam fasa padat, sedangkan isotop uranium (^{238}U , ^{235}U , ^{234}U) dan plutonium (^{239}Pu , ^{238}Pu) serta isotop lainnya dalam fasa cair. Pemisahan uranium, plutonium dari isotop lainnya dilakukan dengan metode kolom penukar anion menggunakan resin Dowex 1200 mg. Besarnya kandungan isotop ^{235}U , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{239}Pu dan ^{238}Pu selanjutnya diukur menggunakan spektrometer- α/γ dan digunakan untuk perhitungan *burn up*. Hasil perhitungan *burn up* PEB U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ pasca iradiasi potongan bagian *middle* diperoleh sebesar $41,6560 \pm 1,6870\%$. Besar *burn up* ini tidak jauh berbeda dengan *burn up* yang diperoleh dari perhitungan menggunakan *Origen Code* sebesar 40%.

Kata kunci: U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$, cesium, uranium, pemisahan, *burn up*.

ABSTRACT

BURN UP CALCULATION OF THE MIDDLE PART OF IRRADIATED U_3Si_2/Al FUEL PLATE WITH 4.8 gU/cm^3 DENSITY. Post-irradiation examination with non-destructive and destructive methods is required to study the performance of U_3Si_2/Al fuel during irradiation at the G. A. Siwabessy Multipurpose Reactor (RSG-GAS). The purpose of the burn-up calculation is to discover the ^{235}U content that burned in a fuel plate of U_3Si_2/Al during use in RSG-GAS and to prove the burn-up obtained using destructive method by calculation using Origen Code. Therefore, this research performed a burn-up calculation of U_3Si_2/Al fuel plate (with a density of 4.8 gU/cm^3) using destructive method through physicochemical analysis. The physicochemical analysis was aimed to determine the isotope content of ^{235}U , ^{134}Cs , and ^{137}Cs in the irradiated U_3Si_2/Al fuel plate. The fuel plate was cut at the middle using a diamond cutting machine in a hot cell to obtain a sample cut with a weight of $M-1 = 0.056\text{ g}$, and a duplicate cut was also prepared with a weight of $M-2 = 0.075\text{ g}$. The sample was then dissolved using $HCl\ 6\ N$ and $HNO_3\ 6N$. The results of dissolution was $UO_2(NO_3)_2$ solution containing isotopic fission such as cesium and uranium. The solution of $UO_2(NO_3)_2$ was pipetted at 1 mL and then transferred from the hot cell to R.135 (outside the hot cell) to separate ^{134}Cs and ^{137}Cs from ^{235}U by a cation exchange method using zeolite from Lampung. The solution of $UO_2(NO_3)_2$ was pipetted at $100\ \mu\text{L}$ into a vial in duplicates and then 1000 mg zeolite was added. The cation exchange process was then carried out by stirring for 1 h . The separation process resulted in ^{134}Cs and ^{137}Cs isotopes in the solid phase, while uranium isotopes (^{238}U , ^{235}U , ^{234}U), plutonium (^{239}Pu , ^{238}Pu) and other isotopes were in the liquid phase. Separation of uranium from other isotopes was done by anion exchange column method using 1200 mg of Dowex resin. The isotope content of ^{235}U , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{239}Pu , and ^{238}Pu was then measured using α/γ - spectrometer, the values of which were subsequently used for burn-up calculation. The result of the burn up calculation is $41.6565 \pm 1.687\%$. The value of burn-up is not significantly different from the burn-up obtained from the calculation using Origen Code, which is 40% .

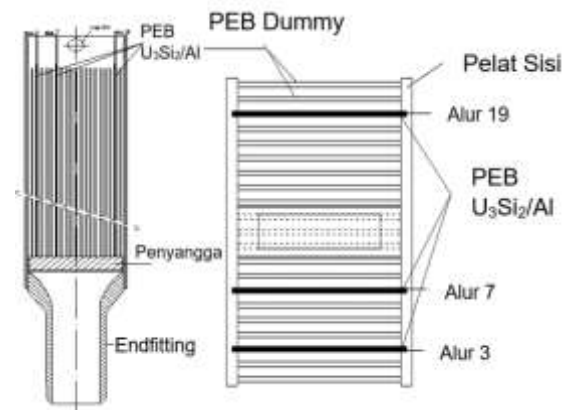
Keywords: U_3Si_2/Al density $4,8\text{ gU/cm}^3$, cesium, uranium, separation, burn up.

PENDAHULUAN

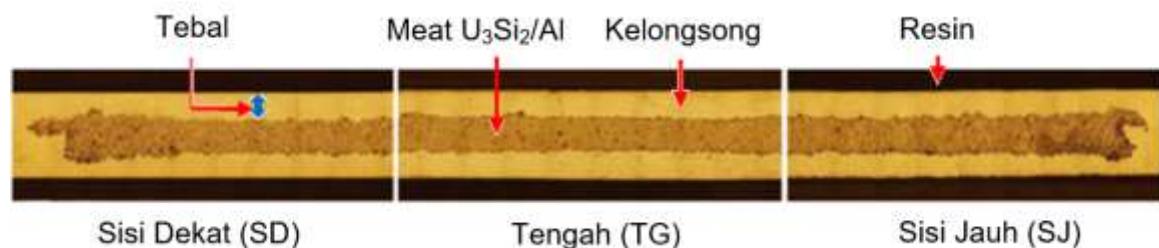
Pengalihan pengkayaan uranium dari $>90\%$ ^{235}U menjadi $<20\%$ ^{235}U yang digagas oleh *Department of Energy (DOE)*-USA berdampak pada penurunan jumlah ^{235}U di dalam bahan bakar sehingga kinerja reaktor juga menurun[1]. Upaya untuk mempertahankan kinerja reaktor (minimal sama) seperti pada penggunaan bahan bakar dengan uranium pengkayaan tinggi ($>90\%$ ^{235}U), salah satu alternatif yang dilakukan adalah menggunakan bahan bakar baru yang memiliki densitas uranium tinggi sehingga jumlah ^{235}U dapat ditingkatkan dalam bahan bakar tanpa merubah desain maupun dimensi bahan bakar tersebut[1,2]. 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 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[2,3].

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir (PTBBN) telah mendesign dan membuat elemen bakar uji (EBU) U_3Si_2/Al dengan densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ untuk penelitian dan

pengembangan (litbang) bahan bakar reaktor riset densitas uranium tinggi. Bahan bakar ini diharapkan sebagai pengganti pelat elemen bakar (PEB) U_3Si_2/Al densitas uranium $2,96 \text{ gU/cm}^3$ yang digunakan oleh Reaktor Serba Guna-G.A.Siwabessy (RSG-GAS). Desain EBU U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ terdiri dari 3 (tiga) PEB seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1, sedangkan morfologi irisan terdiri dari *meat* U_3Si_2/Al yang terdistribusi merata disepanjang PEB dan kelongsong $AlMg_2$ dengan dimensi PEB, panjang (P) $634 \pm 0,2 \text{ mm}$, lebar (L) $70,75 \pm 0,15 \text{ mm}$ dan tebal (t) $1,3 \pm 0,07 \text{ mm}$ ditunjukkan pada Gambar 2[4].



Gambar 1. Elemen Bakar Uji U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ [4]

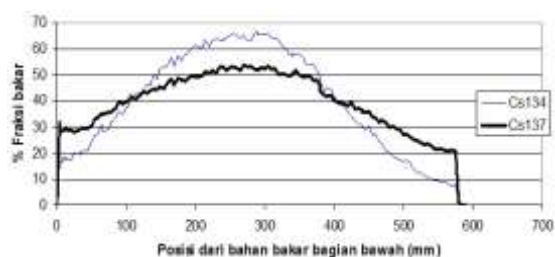


Gambar 2. Morfologi irisan PEB U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ [4]

Pada tahun 2010, EBU U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ telah diirradiasi di RSG-GAS dengan variasi *burn up* 20% , 40% , dan hingga 60% . Besar *burn up* bahan bakar ditentukan melalui perhitungan menggunakan *Origen Code*. Oleh karena itu, untuk mengetahui unjuk kerja EBU tersebut selama

diradiasi di RSG-GAS dengan *burn up* 20% , 40% , dan 60% , perlu dilakukan pembuktian besar *burn up* yang diperoleh melalui *Origen code* dengan cara membandingkan besar *burn up* yang diperoleh secara fisikokimia (merusak). Elemen bakar uji U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ *burn up* 20% , 40% , dan 60% ,

dikirim ke *hot cell* Instalasi Radiometalurgi (IRM)-PTBBN untuk pengujian pasca iradiasi atau *Post Irradiation Examination* (PIE). Uji pasca iradiasi yang dilakukan meliputi pengujian tak merusak dan merusak untuk analisis *burn up*. Pada penelitian sebelumnya telah dilakukan uji tak merusak menggunakan radiografi sinar-X. Hasil uji tak merusak diperoleh citra radiografi dengan resolusi baik yang menunjukkan bahwa tidak ada perubahan warna, cacat, *swelling* maupun kerusakan yang signifikan (anomali) pada kelongsong maupun PEB U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ akibat iradiasi[5,6]. Selain itu telah dilakukan uji tak merusak lainnya, yaitu distribusi isotop hasil fisi $^{134}Cs/^{137}Cs$ ratio bahan bakar PEB U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ menggunakan spektrometer gamma[7]. Hasil uji tersebut menunjukkan bahwa PEB U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ mempunyai distribusi hasil fisi khususnya isotop $^{134}Cs/^{137}Cs$ ratio yang baik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3[7,8].



Gambar 3. Distribusi isotop $^{134}Cs/^{137}Cs$ PEB U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ dengan *burn up* 40% [7]

Gambar 3 menunjukkan bahwa distribusi isotope hasil fisi $^{134}Cs/^{137}Cs$ bahan bakar PEB U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ terjadi paling besar pada posisi bagian tengah (*middle*) pada panjang $P=300 \text{ mm}$ [7]. Hal ini disebabkan karena pada saat reaktor beroperasi, posisi bahan bakar bagian *middle* dikelilingi oleh reflektor sebagai pengendali neutron. Neutron terbentuk secara terus menerus dan terrefleksi ke bagian *middle* bahan bakar sehingga menyebabkan reaksi fisi terjadi paling besar pada bagian *middle*. Fenomena ini yang menyebabkan *burn up*

bahan bakar terjadi paling besar pada bagian *middle*[9,10]. Data uji tak merusak yang diperoleh dengan metode radiografi sinar-X dan distribusi hasil fisi $^{134}Cs/^{137}Cs$ dengan spektrometer gamma selanjutnya digunakan sebagai data awal untuk menentukan titik-titik sampling yang harus dipotong pada PEB U_3Si_2/Al untuk pengujian dan analisis *burn up* secara merusak.

Hasil uji cara tak merusak seperti perubahan warna, data dimensi, *swelling*, cacat dan data secara merusak seperti *burn up* digunakan untuk mengetahui unjuk kerja (*performance*), dan kehandalan untuk menjamin keselamatan bahan bakar PEB U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ selama digunakan sebagai bahan bakar dalam RSG-GAS. Kehandalan dan keselamatan bahan bakar diindikasikan dengan tidak adanya anomali seperti perubahan warna, perubahan dimensi, terjadinya *swelling*, cacat dari hasil uji tak merusak serta data *burn up* dari hasil uji merusak mempunyai kesesuaian dengan data *burn up* yang dihitung menggunakan *Origen Code*[8,18].

Upaya untuk melengkapi data uji pasca iradiasi PEB U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ tersebut, maka pada penelitian ini dilakukan uji merusak melalui analisis fisikokimia untuk penentuan *burn up*. Analisis fisikokimia bertujuan untuk mengetahui kandungan isotop ^{235}U sisa dan hasil fisi isotop ^{134}Cs , ^{137}Cs maupun isotope lainnya yang disebabkan oleh reaksi fisi selama di dalam reaktor dengan cara pemisahan [11]. Metode yang dapat digunakan untuk pemisahan hasil fisi isotop ^{134}Cs , ^{137}Cs dari ^{235}U dalam bahan bakar nuklir diantara adalah metode pengendapan $CsClO_4$, penukar kation menggunakan resin Dowex (resin sintesis) dan metode penukar kation menggunakan zeolite Lampung [12,13].

Hasil validasi metode menggunakan standar ^{137}Cs SRM 4233E dari *National Institute of Standards Technology* (NIST) telah diperoleh *recovery* pemisahan isotop ^{137}Cs menggunakan metode pengendapan sebesar

98,01%, metode penukar kation dengan resin Dowex sebesar 93,15% dan metode penukar kation menggunakan zeolite Lampung sebesar 99,03%[12,13]. Dari hasil validasi metode tersebut, maka pemisahan cesium dengan uranium dalam PEB U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ dilakukan dengan metode penukar kation menggunakan zeolit Lampung. Ada beberapa pertimbangan terkait dengan penggunaan ketiga metode tersebut. Metode pengendapan $CsClO_4$ mempunyai kelarutan rendah pada temperatur $0^\circ C$, sehingga proses pengendapan isotop ^{137}Cs dengan penambahan larutan $HClO_4$ harus dilakukan di dalam pengangas es (*ice bath*) pada temperatur $-4^\circ C$ agar terbentuk endapan $^{137}CsClO_4$ secara sempurna. Hal ini menjadi hambatan karena harus menjaga endapan $^{137}CsClO_4$ berada pada temperatur di bawah $0^\circ C$. Sementara itu, metode penukar kation menggunakan resin Dowex tidak ada kendala dalam proses pemisahan, namun harga resin sintesis sangat mahal dan perlu pengadaan

dari luar negeri. Oleh karena itu, dalam penelitian ini, pemisahan ^{134}Cs dan ^{137}Cs dilakukan dengan metode penukar kation menggunakan zeolit alam dari Lampung [12,13]. Ke depan diharapkan zeolit alam Lampung dapat menggantikan fungsi resin sintesis untuk pemisahan ^{134}Cs dan ^{137}Cs dalam bahan bakar nuklir pasca-iradiasi karena harga zeolit alam sangat murah.

Selain validasi metode, untuk mendapatkan validitas hasil uji yang akurat dilakukan juga penentuan efisiensi detektor spektrometer- γ menggunakan sampel standar larutan ^{137}Cs SRM 4233E ($Cs13704.2015$) dan padatan ($Cs13703.2015$), sedangkan untuk efisiensi detektor spektrometer- α menggunakan standar U_3O_8 yang mengandung isotop ^{235}U sebesar 20% dengan 7(tujuh) kali pengulangan[14]. Hasil perhitungan efisiensi detektor spektrometer- α/γ diperoleh akurasi dan presisi rerata seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data perhitungan efisiensi detektor, akurasi dan presisi[12,13,14]

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

Tabel 1 menunjukkan bahwa nilai akurasi dan presisi yang diperoleh sesuai dengan persyaratan analisis kimia sebesar 5% dalam batas $\pm 2 \text{ SD}$ dengan derajat kepercayaan 95%. Hal ini menunjukkan nilai efisiensi detektor dapat digunakan untuk perhitungan aktivitas isotop dari cacah menjadi Becquerel (Bq/g) dalam sampel uji pasca iradiasi dengan menggunakan persamaan (1) dan (2)[15,16].

$$Eff = \frac{C_i}{Akt \times Yield} \quad (1)$$

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

dengan:

- Eff : Efisiensi detektor
- C_i : Jumlah cacahan, dihitung dari *net counts* isotop ($C - C_{bg}$)
- Yield: Faktor intensitas dari isotop (Tabel)
- Akt : Keaktifan isotop , dps atau Bq
- N : Jumlah isotop dalam berat tertentu dalam sampel bahan bakar nuklir
- I_{rel} : Intensitas relatif puncak isotop pada energi yang diukur (Tabel)
- λ : Konstanta peluruhan ($\ln 2/T_{1/2}$)

Kandungan isotop ^{134}Cs , ^{137}Cs dan ^{235}U dalam bahan bakar bagian *middle* selanjutnya digunakan untuk perhitungan *burn up*. Perhitungan *burn up* dapat dilakukan dengan

menggunakan perbandingan kandungan ^{235}U terbakar dengan ^{235}U mula-mula ($^{235}\text{U}_i/^{235}\text{U}_o$) rasio seperti yang terlihat pada persamaan (3)[15,16].

$$\% BU = \frac{U_o - U_i}{U_o} \times 100\% \quad (3)$$

dengan,

BU : *Burn up* (%)

$$\% BU = \frac{[N^{137}\text{Cs}/\text{Yield}^{137}\text{Cs}]}{[\text{HE}(U_i, \text{Pu})] + [N^{137}\text{Cs}/\text{Yield}]} \times 100\% \quad (4)$$

dengan,

BU : Fraksi bakar (%)

$N^{137}\text{Cs}$: Jumlah atom isotop ^{137}Cs

Y : Faktor intensitas dari masing masing isotop (Tabel)

HE : *Heavy element* (unsur bermassa berat seperti U dan Pu)

U_i : Jumlah isotop ^{235}U yang sisa

Beberapa jenis isotop yang dapat dijadikan sebagai indikator *burn up* diantaranya yang paling populer adalah ratio ^{235}U terbakar (U_i) dengan ^{235}U mula mula (U_o) atau yang umum ditulis dalam bentuk ratio (U_i/U_o). Isotop ^{235}U mula mula (U_o) adalah kandungan ^{235}U yang terdapat dalam bahan bakar pada saat difabrikasi. Selain ratio (U_i/U_o), ratio $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ juga sering digunakan sebagai indikator *burn up*[8]. Dasar pemilihan ratio $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ sebagai indikator *burn up* karena isotop ^{134}Cs dan ^{137}Cs merupakan isotop yang berada pada daerah mayoritas intensitas gamma (I_γ) yang besar dalam reaksi fisi (pembelahan) ^{235}U , mempunyai tampang serapan neutron (σ) kecil dan umur paro

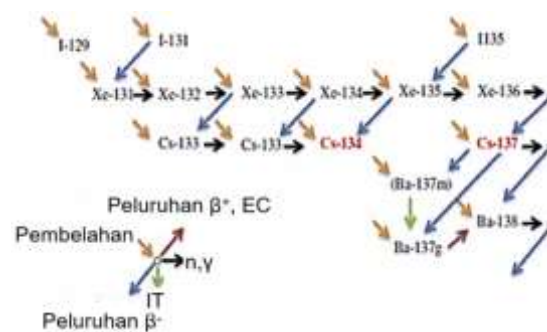
U_o : Jumlah atom ^{235}U awal (data fabrikasi)

U_i : Jumlah atom ^{235}U yang sisa

U_o-U_i : Jumlah atom ^{235}U yang terbakar

Selain melalui perbandingan kandungan ^{235}U terbakar dengan ^{235}U mula-mula, perhitungan *burn up* total juga dapat ditentukan melalui kandungan isotop cesium dengan uranium maupun plutonium seperti pada persamaan (4)[16,17].

panjang seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2[17,18]. Selain itu, ^{137}Cs merupakan isotop stabil seperti yang ditunjukkan pada deret peluruhan ^{137}Cs dan ^{134}Cs seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Dari Tabel 2 diketahui bahwa isotop ^{134}Cs mempunyai beberapa energi dengan intensitas gamma bervariasi, namun dalam perhitungan *burn up* yang digunakan adalah isotope yang mempunyai intensitas gamma yang terbesar yaitu isotop ^{134}Cs pada energi 604,8 keV yang mempunyai intensitas gamma $I_\gamma = 97,6\%$ [19].



Gambar 4. Deret pembentukan dan peluruhan hasil fisi ^{137}Cs dan ^{134}Cs [18,19]

Tabel 2. Spesifikasi isotop ^{134}Cs dan ^{137}Cs [19]

Isotope	Energi E_γ (keV)	Umur paro $T_{1/2}$ (tahun)	Tampang lintang σ (barn)	Intenstas gamma I_γ (%)
^{134}Cs	604,8	2,1	24,3	0,976
^{134}Cs	795,8	2,1	24,3	0,854
^{137}Cs	661,8	30,1	0,05	0,851

Jung Suk Kim, e.t., [16] mengatakan bahwa selain isotop ^{235}U dan ^{137}Cs , isotop ^{148}Nd sangat baik digunakan untuk perhitungan *burn up*, karena ^{148}Nd merupakan isotop hasil fisi yang stabil dan tidak mudah menguap, sehingga tidak bermigrasi di dalam bahan bakar. Unsur Nd bukan bahan radioaktif sehingga tidak memerlukan koreksi waktu peluruhan, mempunyai luas tampang lintang serapan neutron yang kecil. Pengukuran isotop Nd harus menggunakan peralatan *Thermal Ionization Mass Spektrometer* karena isobar dengan Ce. Isotop ^{144}Ce mengganggu pengukuran ^{144}Nd , hal ini penting dilakukan untuk mengoreksi adanya kontaminasi Nd alam yang dapat mempengaruhi hasil perhitungan *burn up* [8]. Namun hingga saat ini, PTBBN belum memiliki alat *Mass Spektrometer* sehingga perhitungan *burn up* dilakukan melalui pemisahan ^{235}U , ^{137}Cs dan ^{239}Pu di dalam bahan bakar U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ dan pengukuran menggunakan spektrometer- α/γ . Terdapat beberapa kendala penentuan komposisi isotop hasil fisi secara kuantitatif menggunakan spektrometer- α/γ antara lain menangani sampel uji dengan berat yang kecil dan paparan radiasi tinggi, sesuai dengan Batas Keselamatan Operasi (BKO) yang ditetapkan oleh Badan Pegawai Tenaga Nuklir (BAPETEN). Kendala berikutnya adalah harus memisahkan isotop pemancar radiasi- α (uranium) dengan pemancar radiasi- γ (cesium) dan beberapa isotop yang tidak dapat dianalisis menggunakan spektrometer- α/γ seperti Nd dan Ce (isobar). Metode dan langkah pemisahan isotop sangat panjang sehingga berpotensi menghasilkan data yang kurang akurat. Oleh karena itu, proses pemisahan isotop harus dilakukan secara berulang (7x pengulangan). Sementara itu, penentuan komposisi isotop hasil fisi secara kuantitatif menggunakan spektrometer massa, pengukurannya dilakukan berdasarkan nomor massa, tidak perlu melakukan pemisahan isotop pemancar- γ dengan pemancar- γ lainnya, cepat dan akurat serta selektif terhadap isotop stabil seperti Ce dan Nd.

Pemisahan cesium dari uranium dalam larutan PEB U_3Si_2/Al digunakan zeolit Lampung sebagai bahan penukar kation. Kemampuan pertukaran kation dari zeolit merupakan parameter utama dalam menentukan kualitas zeolite, yang biasanya dikenal sebagai kemampuan tukar kation (KTK). Nilai KTK adalah jumlah meq ion logam yang dapat dipertukarkan maksimum oleh 1 gram zeolit dalam kondisi kesetimbangan [22,23]. Oleh karena itu, sebelum zeolit Lampung digunakan sebagai bahan penukar kation untuk cesium terlebih dahulu zeolit diaktifasi dengan NH_4Cl agar terbentuk monokationik zeolit (NH_4Z) [20,23,24]. Sementara itu, isotop ^{134}Cs dan ^{137}Cs dalam bahan bakar nuklir akan terikat dengan zeolit dalam bentuk padatan Cs-zeolit [25,26]. Pertukaran kation (*cation exchange*) antara NH_4 -zeolite dengan cesium baik dalam bentuk isotop (^{134}Cs dan ^{137}Cs) maupun dalam ion (Cs^+) adalah sama karena mempunyai sifat kimia yang sama. Perbedaannya adalah pada saat pengukuran menggunakan spektrometer gamma yang terdeteksi adalah hanya isotop cesium sebagai pemancar radiasi gamma sedangkan ion Cs^+ dan zeolite tidak terukur (bukan pemancar radiasi gamma). Kation NH_4^+ dalam senyawa NH_4 -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 NH_4^+ dalam kerangka zeolit dibandingkan dengan isotop U^{6+} maupun Pu^{6+} yang mempunyai jari-jari ion masing-masing 97 pm dan 81 pm [27]. Proses pemisahan dengan metode penukar kation, isotop ^{137}Cs terikat di dalam zeolit dalam bentuk ^{137}Cs -zeolit sebagai fasa padat sedangkan isotop U^{6+} dan Pu^{6+} tidak terikat di dalam zeolit, tetapi lolos sebagai supernatan di dalam fasa cair [27]. Fenomena inilah yang terjadi di dalam proses penukar kation untuk memisahkan isotop ^{137}Cs dari ^{235}U dalam PEB U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ pasca iradiasi.

Pada penelitian ini perhitungan *burn up* dilakukan dengan persamaan (4)

menggunakan data kandungan isotop ^{235}U mula mula (fabrikasi), ^{235}U sisa, ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{239}Pu , dan ^{238}Pu . Data *burn up* yang diperoleh digunakan sebagai umpan balik kepada RSG-GAS dan fabrikator bahan bakar untuk mengetahui unjuk kerja bahan bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ dan sebagai bahan evaluasi terhadap parameter fabrikasi.

METODOLOGI

PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ pasca iradiasi dengan *burn up* 40 % dipotong pada bagian tengah (*middle*) dengan dimensi $3 \times 3 \times 1,37 \text{ mm}$ secara duplo dengan berat masing-masing $0,056 \text{ gPEB}$ dan $0,075 \text{ gPEB}$. Berat PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ hasil pemotongan harus memenuhi nilai BKO yang dipersyaratkan oleh BAPETEN untuk pengoperasian *hotcell* 109 yaitu sebesar $\leq 1 \text{ g}$ untuk bahan bakar tipe pelat. PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ dengan berat tersebut ditransfer ke *hot cell* 109 untuk pelarutan menggunakan HCl 6 N dan HNO_3 6N[13]. Pelarutan dilakukan dalam 2 (dua) tahap, tahap pertama PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ dengan berat $0,056 \text{ g}$ dan $0,075 \text{ g}$ dimasukkan ke dalam masing-masing erlemeyer (kode M-1 dan M-2), kemudian ditambahkan 5 mL larutan HCl 6 N dan ditunggu selama 1 (satu) hari agar kelongsong AlMg2 maupun matriks Al larut sempurna. Tahap ke dua, setelah AlMg2 dan matriks Al larut kemudian ditambahkan 5 mL larutan HNO_3 6 N ke dalam erlemeyer untuk melarutkan U_3Si_2 dan dibiarkan selama 3 (tiga) hari agar larut sempurna. Pelarutan PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ menghasilkan larutan uranil nitrat $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ yang mengandung isotop hasil fisi seperti ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{235}U dan isotop ^{239}Pu . Larutan $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ dipipet 1 mL ditransfer dari *hotcell* 109 ke R.135 (luar *hot cell*) kemudian diencerkan hingga 25 mL. Larutan $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ dipipet masing-masing $100 \mu\text{L}$ ke dalam vial secara duplo kemudian diukur langsung menggunakan spektrometer- γ dengan waktu pencacahan 10000 detik. Pengukuran langsung menggunakan spektrometer- γ bertujuan untuk mengetahui jenis radionuklida yang terdapat dalam larutan bahan bakar serta

untuk mengetahui kandungan ^{134}Cs dan ^{137}Cs sebelum pemisahan. Pengananan sampel uji untuk penentuan *burn up* harus memenuhi persyaratan BAPETEN sesuai dengan BKO di luar *hotcell* yaitu paparan radiasi $\leq 150 \mu\text{Sv/jam}$. Oleh karena itu volume sampel harus sekecil sehingga volume limbah radioaktif yang dihasilkan juga sekecil mungkin. Selain itu, untuk mendapatkan hasil pemotongan dan pipet yang akurat (karena menggunakan tangan manipulator) maka dimensi potongan PEB (mm) dan volume larutan (mL) harus ditimbang dan dikonversi ke satuan berat. Data pemotongan, penimbangan, pelarutan, pengenceran dan pencuplikan larutan seperti ditunjukkan pada Tabel 3. Setelah dilakukan pengukuran langsung, ke dalam masing masing vial ditambahkan zeolit Lampung seberat 1000 mg dan dilakukan proses penukar kation dengan pengadukan selama 1 jam menggunakan *sheaker* dengan kecepatan 1000 rpm, dan dibiarkan selama 24 jam sehingga terpisah fasa padat dengan fasa cair. Hasil proses penukar kation diperoleh isotop cesium terikat dengan zeolit dalam bentuk Cs-zeolit sebagai fasa padat sedangkan isotop ^{235}U dan ^{239}Pu berada dalam fasa air (supernatan). Pemisahan uranium dengan isotop lainnya dalam supernatan (SPIrr) $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ dengan metode kolom penukar anion menggunakan resin Dowex dengan berat 1200 mg [28]. Efluen uranium keluar dari kolom, sedangkan isotop lainnya terikat dengan resin di dalam kolom. Efluen uranium sebagai hasil pemisahan dikenakan proses elektrodeposisi sehingga diperoleh deposit isotop uranium (^{238}U , ^{235}U , ^{236}U , 234) dan plutonium (^{239}Pu , ^{238}Pu) pada planset *stainless steel* (SS)[29]. Besarnya kandungan isotope ^{134}Cs , ^{137}Cs dalam fasa padat dan ^{235}U , ^{239}Pu , ^{238}Pu dalam deposit SS diukur menggunakan spektrometer- α/γ selama 10000 detik dengan 7(tujuh) kali pengukuran. Validitas data hasil pemisahan ditunjukkan dengan jumlah isotop ^{134}Cs dan ^{137}Cs dalam fasa padat besar sedangkan dalam supernatan diperoleh dalam jumlah yang kecil. Kandungan isotop ^{134}Cs ,

^{137}Cs , ^{235}U dan ^{239}Pu selanjutnya digunakan untuk perhitungan *burn up*[30]. Parameter preparasi sampel dan pemisahan dengan metode penukar kation seperti penggunaan jenis pelarut, konsentrasi pelarut, berat

sampel, berat zeolit Lampung, KTK, waktu pengadukan, dan berat resin Dowex merupakan hasil optimasi parameter yang telah dilakukan pada penelitian sebelumnya[9,12,13,14].

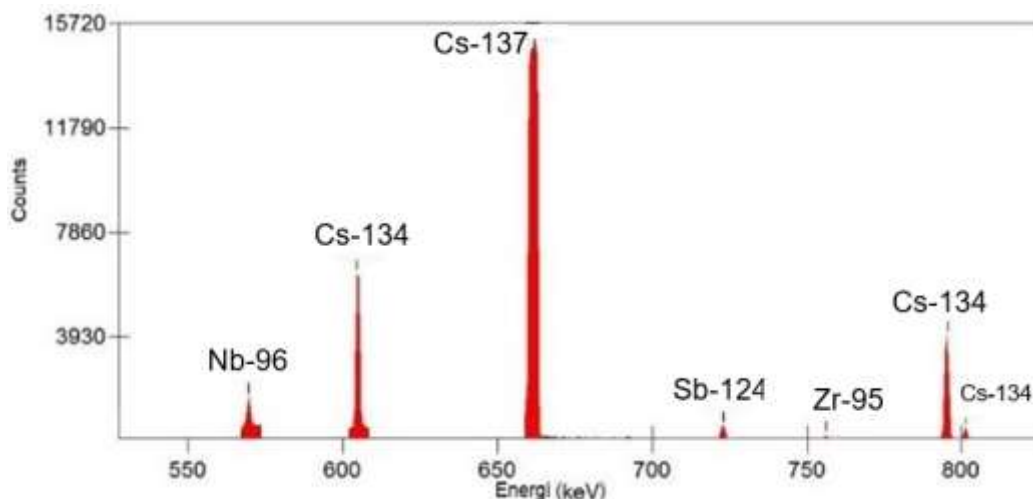
Tabel 3. Berat PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ pasca iradiasi pada bagian middle

Kode sampel	Berat PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ (g)	Pelarutan dalam 10 mL (g lar)	Pencuplikan 1mL (g lar)	Pengenceran dalam 25 mL (g lar)	Pencuplikan 100 μL (g lar)
M1-1	0,056	11,565	1,117	25,2315	0,0905
M1-2	0,056	11,565	1,117	25,2315	0,0927
M2-1	0,075	11,733	1,075	25,1549	0,0972
M2-2	0,075	11,733	1,075	25,1549	0,0976

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengukuran secara langsung (tanpa pemisahan) menggunakan spektrometer gamma terhadap larutan PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ sebanyak 100 μL diperoleh beberapa spektrum jenis radionuklida seperti ^{96}Nb , ^{124}Sb dan ^{95}Zr pada masing masing energi 570,5

keV, 723,8 keV dan 756,8 keV dalam jumlah yang kecil, isotop ^{134}Cs diperoleh pada energi 604,8 keV dan 795,8 keV serta isotop ^{137}Cs pada energi 661,8 keV seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5[19]. Hasil evaluasi dari luas spektrum tersebut diperoleh cacahan rerata isotop ^{134}Cs dan ^{137}Cs seperti ditunjukkan pada Tabel 4.



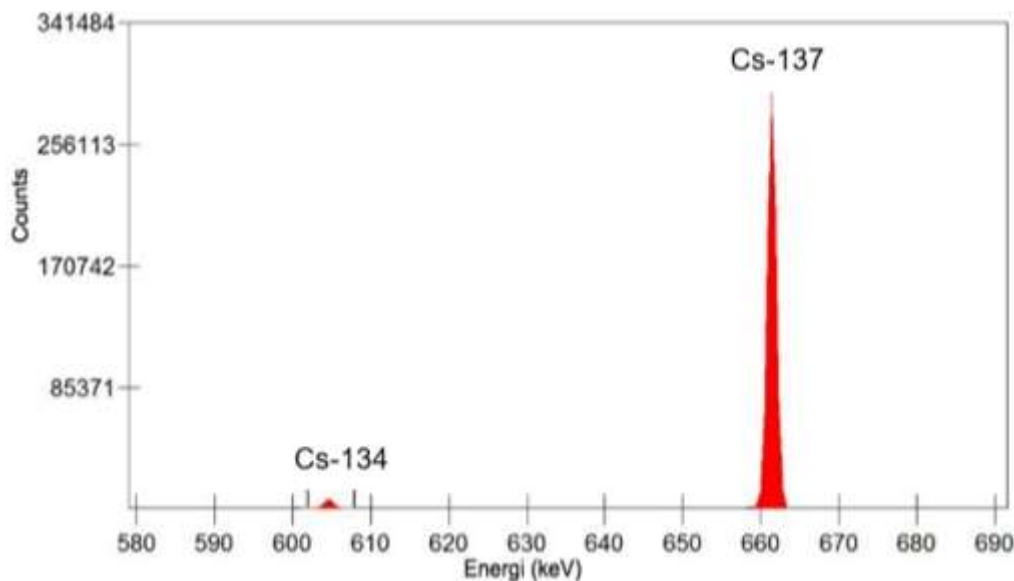
Gambar 5. Spektrum ^{134}Cs dan ^{137}Cs dalam 100 μL larutan PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$

Tabel 4. Hasil pengukuran langsung isotop cesium dalam 100 μL larutan $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$

Jenis isotop	Energi (keV)	Yield (%)	Cacah per detik (cps)			
			M1-1	M1-2	M2-1	M2-2
^{134}Cs	604,8	97,60	1,6710	1,7030	2,4590	2,2330
^{137}Cs	661,8	85,12	80,3180	81,5270	106,9830	107,2610
^{134}Cs	795,8	85,45	0,6684	0,6812	0,9835	0,8932

Tabel 4 menunjukkan bahwa cacahan per detik (cps) rerata dari isotop ^{134}Cs dan ^{137}Cs pada sampel kode M-1 (M1-1 dan M1-2) lebih kecil dibandingkan dengan M-2 (M2-1 dan M2-2). Hal ini sesuai dengan berat potongan PEB U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ masing masing $0,056 \text{ g}$ PEB untuk M-1 dan $0,075 \text{ g}$ PEB untuk M-2. Pemisahan ^{137}Cs dan ^{134}Cs dengan

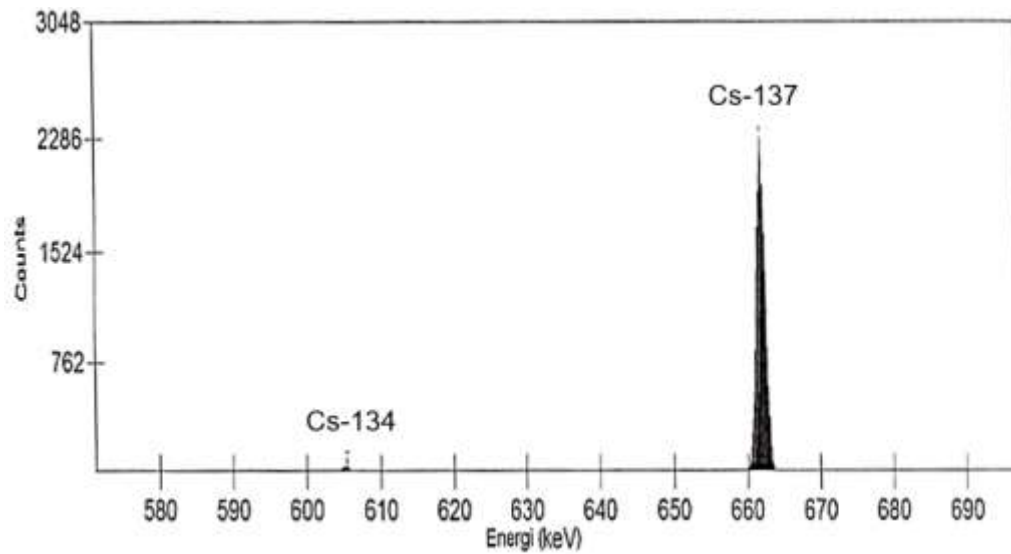
metode penukar kation menunjukkan bahwa isotop ^{137}Cs dan ^{134}Cs terikat dengan zeolit dalam fasa padat, sedangkan isotop uranium dan lainnya berada dalam fasa cair sebagai supernatan. Hasil pengukuran isotop ^{137}Cs dan ^{134}Cs dalam fasa padat menggunakan spektrometer gamma ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Spektrum isotop ^{137}Cs dan ^{134}Cs dalam padatan Cs-zeolit

Gambar 6 menunjukkan bahwa penambahan zeolit dengan berat 1000 mg mampu menyerap isotop ^{137}Cs dan ^{134}Cs yang terikat dalam padatan Cs-zeolit. Hal ini ditunjukkan oleh spektrum isotop ^{134}Cs pada energi $604,8 \text{ keV}$ dan ^{137}Cs pada energi $661,8 \text{ keV}$ dan tidak ada sepektrum isotop lainnya. Pada pengukuran langsung diperoleh isotop ^{134}Cs pada energi $795,8 \text{ keV}$ dengan cacahan (cps) yang kecil, namun pada hasil pengukuran dalam padatan Cs-zeolit, isotop ^{134}Cs tidak terdeteksi. Hal ini disebabkan karena intensitas gamma (I_γ) isotop ^{134}Cs pada $795,8 \text{ keV}$ ($85,4\%$), lebih kecil dibanding intensitas gamma pada energi $604,8 \text{ keV}$ sebesar $97,60\%$ [19], sehingga pada saat proses pertukaran kation, yang mempunyai kemampuan bertukar kation dengan NH_4^+ adalah kation cesium yang mempunyai konsentrasi lebih besar.

Pemisahan ^{134}Cs dan ^{137}Cs menggunakan metoda penukar kation menunjukkan bahwa zeolit Lampung yang telah diaktivasi dengan NH_4^+ sangat selektif terhadap cesium. Hal ini disebabkan karena jari jari ion hidrasi NH_4^+ (331 pm) dengan Cs^+ (329 pm) hampir sama sehingga lebih mudah bertukar[27]. Selain itu, berdasarkan hasil penelitian sebelumnya, zeolit Lampung mempunyai KTK sebesar $1,4476 \text{ meq/g}$ zeolit yang artinya secara perhitungan, setiap 1 gram zeolit Lampung dapat mengikat kation ^{137}Cs sebesar $1,4476 \text{ meq}$ atau $1,4476\text{E-}03 \text{ g}$ [9,22,23]. Hal ini dibuktikan dengan diperolehnya isotop ^{134}Cs pada energi $604,7 \text{ keV}$ serta ^{137}Cs pada energi $661,7 \text{ keV}$ di dalam supernatan dalam jumlah sangat kecil dan tidak terlihat adanya spektrum isotop pemancar sinar- γ lainnya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7, Tabel 5 dan 6.

Gambar 7. Spektrum isotop ^{137}Cs dan ^{134}Cs dalam supernatan

Tabel 5 menunjukkan bahwa penggunaan zeolite Lampung sebagai bahan penyerap isotope cesium cukup baik, karena diperoleh kandungan ^{134}Cs dan ^{137}Cs di dalam supernatan relatif kecil. Hal ini sesuai dengan kemampuan tukar kation (nilai KTK) NH_4 -

zeolite Lampung terhadap kation Cs^+ sebesar $1,4476\text{E-}03 \text{ g/g}$ zeolite. Nilai KTK NH_4 -zeolite lebih besar dari kandungan Cs dalam $0,056 \text{ gPEB}$ maupun $0,075 \text{ gPEB}$, sehingga isotope Cs dalam potongan PEB U_3Si_2/Al dapat dipertukarkan dengan NH_4 -zeolite secara baik.

Tabel 5. Kandungan ^{137}Cs dan ^{134}Cs dalam padatan ^{137}Cs -zeolit dan supernatan per $0,056 \text{ g PEB}$.

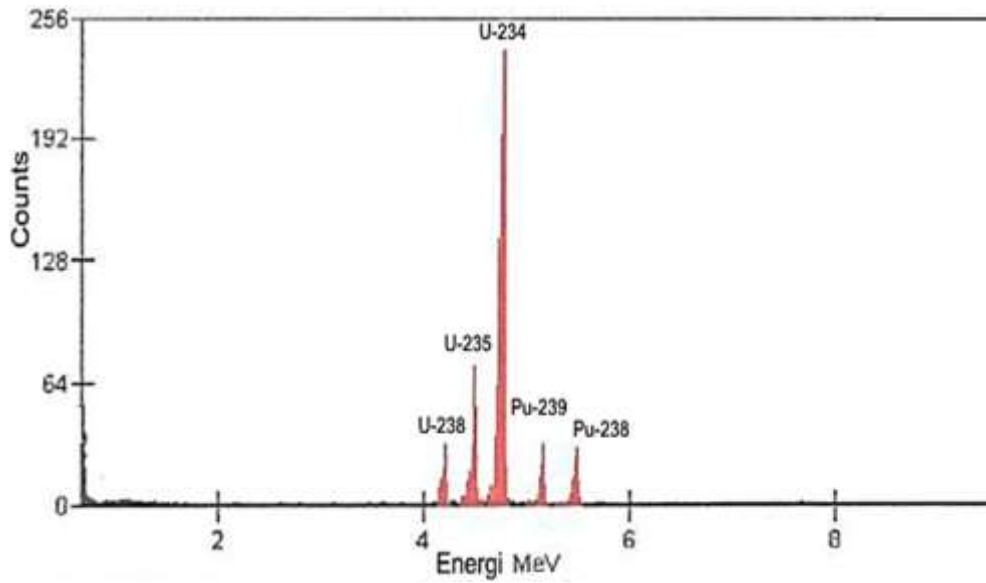
Kode sampel	^{137}Cs dalam padatan zeolit (g/0,056g PEB)	^{134}Cs dalam padatan zeolit (g/0,056g PEB)	^{137}Cs dalam supernatan (g/0,056g PEB)	^{134}Cs dalam supernatan (g/0,056g PEB)
M1-1	4,5546E-05	5,3445E-08	5,0000E-09	7,6296E-11
M1-2	4,5553E-05	5,7764E-08	6,0000E-09	5,7354E-11
Rerata M-1	4,5549E-05	5,5604E-08	5,5000 E-09	6,6825E-11

Tabel 6. Kandungan ^{137}Cs dan ^{134}Cs dalam padatan ^{137}Cs -zeolit dan supernatan per $0,075 \text{ g PEB}$.

Kode sample	^{137}Cs dalam padatan zeolit (g/0,075g PEB)	^{134}Cs dalam padatan zeolit (g/0,075g PEB)	^{137}Cs dalam supernatan (g/0,075g PEB)	^{134}Cs dalam supernatan (g/0,075g PEB)
M2-1	5,9721E-05	8,0073E-08	7,0000E-09	1,1221E-10
M2-2	5,9632E-05	3,9986E-08	7,0000E-09	8,9624E-11
Rerata M-2	5,9677E-05	6,00297E-08	7,0000E-09	1,0091E-10

Sementara itu, hasil pengukuran deposit uranium pada planset SS setelah dilakukan pemisahan dengan metode kolom

penukar anion diperoleh spektrum isotope uranium dan plutonium dalam SPIrr U_3Si_2/Al seperti yang terlihat pada Gambar 8.



Gambar 8 Spektrum isotop uranium ^{238}U , ^{235}U , ^{234}U , ^{239}Pu dan ^{238}Pu

Gambar 8 menunjukkan bahwa pemisahan uranium menggunakan resin Dowex diperoleh spektrum isotop uranium dan plutonium telah terpisah dengan baik pada energi masing-masing. Spektrum isotope uranium ^{238}U berda pada energi 4,1502 MeV, ^{235}U (4,3409 MeV), ^{234}U (4,7135 MeV), ^{239}Pu (5,1209 MeV) dan

^{238}Pu (5,4849 MeV)[19]. Besar cacahan isotope ^{238}U , ^{235}U , ^{234}U , ^{239}Pu dan ^{238}Pu dalam supernatan SPIrr U_3Si_2/Al pasca iradiasi kemudian dievaluasi sehingga diperoleh kandungan isotope uranium dan plutonium seperti ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Kandungan U dan Pu dalam M-1 (g/0,056 g PEB) dan M-2 (g/0,075 gPEB)

Kode Sampel	Kandungan rerata isotope U dan Pu				
	^{238}U	^{235}U	^{234}U	^{239}Pu	^{238}Pu
SPIrr (M-1)	1,1337 E-03	2,579 E-03	4,0000E-07	1,4903E-05	1,4080E-07
SPIrr (M-2)	1,0842E-03	3,1646E-03	3,9000E-07	2,0297E-05	2,0367E-07

Kandungan isotope ^{134}Cs dan ^{137}Cs pada Tabel 5 dan 6 (baik dalam fasa padat dan supernatan) serta kandungan ^{235}U , ^{239}Pu dan ^{238}Pu pada Tabel 7, digunakan untuk perhitungan *burn up* PEB U_3Si_2/Al potongan bagian *Middle* dengan kode M-1 dan M-2. Kandungan isotope ^{134}Cs dan ^{137}Cs dalam supernatan sangat kecil sehingga tidak berpengaruh dalam perhitungan *burn up*, namun yang paling berpengaruh adalah kandungan ^{235}U . Hasil perhitungan *burn up* rerata untuk PEB U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ untuk kode M-1 dengan berat = 0,056 gPEB

dan M-2 = 0,075 gPEB ditunjukkan pada Tabel 8. Dari Tabel 8 diketahui bahwa besar *burn up* rerata PEB U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ untuk kode M-1 dan M-2 diperoleh sebesar $41,6560 \pm 1,6870 \%$. Besar *burn up* ini tidak mempunyai perbedaan yang signifikan dengan *burn up* yang dihitung menggunakan *Origen Code* oleh RSG-GAS sebesar 40%. Namun perhitungan *burn up* PEB U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ bagian *middle* ini harus dilengkapi dengan *burn up* bagian *top* dan *bottom* sehingga diperoleh *burn up* rerata dari bahan bakar tersebut.

Tabel 8. Perhitungan *burn up* untuk potongan bagian *Middle* kode M-1 dan M-2.

Isotop	Kandungan isotop (g/0,056gPEB)	Kandungan isotop (atom)	Kandungan isotop (g/0,075gPEB)	Kandungan isotop (atom)
²³⁵ U awal (Uo) (data fabrikasi)	0,00432	1,1083E+19	0,00576	1,4775E+19
¹³⁷ Cs	4,5549E-05	2,0025E+17	5,9677E-05	2,6236E+17
¹³⁴ Cs	5,5604E-08	2,4992E+14	6,0030E-08	2,4993E+14
²³⁹ Pu	1,4903E-05	3,7556E+16	2,0297E-05	5,1151E+16
²³⁸ Pu	1,4081E-07	3,5633E+14	2,0367E-07	5,1542E+14
²³⁵ U sisa	2,5796E-03	6,6115E+18	3,1646E-03	8,1109E+18
Ui		6,8499E+18		8,4252E+18
Uo-Ui		4,2313E+18		6,3498E+18
<i>Burn Up</i>		40,3360 %		42,9770 %
<i>Burn Up</i>	rerata			41,6560 %

SIMPULAN

Dari analisis fisikokimia telah diperoleh kandungan isotop ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs, ²³⁵U, ²³⁹Pu, dan ²³⁸Pu dalam PEB U₃Si₂/Al densitas 4,8 gU/cm³ pasca iradiasi potongan bagian *middle* dan telah digunakan untuk perhitungan *burn up*. Hasil perhitungan *burn up* PEB U₃Si₂/Al densitas 4,8 gU/cm³ pasca iradiasi potongan bagian *middle* diperoleh sebesar 41,6560 ± 1,6870 %. Besar *burn up* dari hasil analisis fisikokimia (merusak) tidak jauh berbeda dengan *burn up* yang dihitung menggunakan *Origen Code* sebesar 40% (tidak merusak).

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini terlaksana dengan dukungan dana DIPA PTBBN-BATAN Tahun 2019. Terima kasih disampaikan kepada Ibu lis Haryati dan Ariyanti Saputri yang telah membantu melaksanakan penelitian sehingga pembuatan makalah dapat terlaksana dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. V. D. Berghe, A. Leenaers, E. Koonen and L. Sannen, "From high to low enriched uranium fuel in research Reactors", *Advances in Science and Technology*, vol. 73, pp. 78-90, 2010.
- [2] S. H. Kim, *et al.*, "A Feasibility study on fast reactor with low-enriched uranium fuel at Kyoto University critical assembly," *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 100, pp. 60-70, 2010.
- [3] P. H. Liem, and T. M. Sembiring. "Design of transition cores of RSG GAS (MPR-30) with higher loading silicide fuel," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 240, pp. 1433–1442, 2010.
- [4] Supardjo, T. Surbakti, E. P. Hastuti, A. Hamzah and A.B. Ginting, "Teknik pembuatan dan pengujian bahan bakar dispersi U₃Si₂/Al densitas uranium tinggi," Jakarta: Batan Press, 2019, pp. 64-70.
- [5] R. Artika, R. Sigit, H. F. Rahmatullah, Supardjo dan A.B. Ginting, "Uji tak merusak pelat elemen bakar U₃Si₂/Al densitas uranium 4,8 gU/cm³ menggunakan radiografi sinar-x digital," *URANIA*, Vol. 26, No.1, hal.49 – 56, 2020.
- [6] Y. J. Kim, B. O. Yoo, H. M. Kim, S. B. Ahn, "Development of X-ray system for irradiated fuel in hotcell," Hotlab Conference Proceeding 2016, Karlsruhe, Germany.
- [7] Y. Nampira, S. Ismarwanti, H. F. Rahmatullah, and K. Mustopa, "Non destructive test nuclear fuel U₃Si₂/Al 4,8 gU/cm³ post irradiation with 60% burn up research reactor," Hotlab Conference

- Proceeding 2016, Karlsruhe, Germany.
- [8] P. H. Liem, S. Amini, A. G. Hutagaol, and T. M. Sembiring, "Nondestructive burnup verification by gamma-ray spectroscopy of LEU silicide fuel plates irradiated in the RSG GAS multipurpose reactor," *Annals Nuclear Energy*, vol. 56, pp. 57–65, 2013.
- [9] A. K. Dewi, Sukarsono, Supardjo, Masrukan, dan A.B. Ginting, *Penguasaan Teknologi Pembuatan Bahan Bakar Reaktor Suhu Tinggi Dan Reaktor Riset*, Buku Bunga Rampai. Jakarta: Batan Press, Oktober 2018.
- [10] F. Muhammad. "Reactivity feedback coefficients of a low enriched uranium fuelled material, test research reactor at end-of-life," *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 38, pp. 2836–2839, 2011.
- [11] P. H. Patricia, "Radiochemistry Webinars Actinide Chemistry Series. National Analytical Management Program (NAMP)," U.S. Department of Energy, Carlsbad Field Office, Idaho National Laboratory, 2014.
- [12] A. B. Ginting dan D. Aggraini. "Metode pengendapan dan penukar kation untuk pemisahan cesium dalam bahan bakar U_3Si_2/Al ." *URANIA*, Vol. 22, No.2. pp. 65 – 132, 2016.
- [13] A. Nugroho, Boybul, S. Indaryati, I. Haryati, R. Kriswarini, dan A.B. Ginting, "Pemisahan cesium dalam PEB U_3Si_2/Al densitas $2,96\text{ gU/cm}^3$ pasca iradiasi dengan metode pengendapan chloroplatinate." *URANIA*, vol. 25, no. 2, hal. 103 – 114, 2019.
- [14] D. Anggraini, A. Nugroho, A.B. Ginting, Y. Nampira, dan Boybul. "Penentuan Parameter Optimum Proses Pengendapan $CsClO_4$ Pada Pemisahan Isotop ^{137}Cs Dari Larutan PEB U_3Si_2/Al Pasca Iradiasi." *URANIA*, Vol 19, No.2, pp. 63 – 74, 2013.
- [15] R. I. Dobrin, T. Craciunescu, and M. Pavelescu. "CANDU And TRIGA Fuel burn-up determination using axial and tomographic gammascanning," *Romanian Reports in Physics*, vol. 63, no. 4, pp. 1009–1017, 2011.
- [16] S. K. Jung, S. J. Young, D. P. Soon, K. H. Yeong, and S. Kyuseok. "Analysis of high burnup pressurized water reactor fuel using uranium, plutonium, neodymium, and cesium isotope correlations with burn-up." *Nuclear Engineering Technology*, vol. 471, pp. 924-933, 2015.
- [17] H. U. Zwicky, *et al.*. "Nuclide analysis in high burn-up fuel samples irradiated in Vandellós 2." *Journal of Nuclear Materials*, vol. 402, pp.60 – 73, 2010.
- [18] A. B. Ginting and P. H. Liem, "Absolute burnup measurement of LEU silicide fuel plate irradiated in the RSG GAS multipurpose reactor by destructive radiochemical technique," *Annals Nuclear Energy*, vol. 85, pp. 613–620, 2015.
- [19] Table of Radionuclides, Monographic BIPM-5, Available: https://www.bipm.org/utis/common/pdf/monographieRI/Monographie_BIPM-5_Tables_Vol5.pdf.
- [20] M. M. Febri, and P. Ardian, "Pemanfaatan batu apung sebagai sumber silika dalam pembuatan zeolit sintetis." *Jurnal Fisika UNAND*, vol. 2, no. 4, hal. 262-268, 2013.
- [21] P. Francesco, G. Bruno, A. Paolo, and C. Domenico, "Natural zeolites for heavy metals removal from aqueous solutions: modeling of the fixed bed Ba^{2+}/Na^+ ion-exchange process using a mixed phillipsite/chabazite-rich tuff." *Chemical Engineering Journal*, vol. 219, pp. 37- 42, 2013.
- [22] A. Sukur, A. Azira and, H. A. Husni, "determination of cation exchange capacity of natural zeolite," *Malaysian Journal of Soil Science*, vol. 21, pp.102-112, 2017.
- [23] B. Wiyantoko, N. Rahmah, "Measurement of cation exchange capacity (CEC) on natural zeolite by percolation method." in *AIP Conference Proceedings* 1911, 020012, 2017. Published On line 05 December 2017.

-
- [24] A. K. Vipin, S. Ling, B. Fugetsu, "Microporous and mesoporous materials removal of Cs⁺ and Sr²⁺ from water using MWCNT reinforced zeolite-A beads," *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 224, pp. 84–88, 2016.
- [25] R. C. Martínez, M. T. Olguín, and M. Soache-Ríos. "Cesium sorption by clinoptilolite-rich tuffs in batch and fixed-bed Systems," *Desalination*, 258, pp.164–170, 2010.
- [26] E. H. Borai, R. Harjula, M. Leena, and P. Airi, "Efficient removal of cesium from low-level radioactive liquid waste using natural and impregnated zeolite minerals." *Journal of Hazardous Materials*, vol. 172, pp. 416–422, 2009.
- [27] A. G. Volkov and S. Paula, "Radii of unhydrated (first value) and hydrated (second value) ions, taken in Bioelectrochem." *Bioenergetics* vol. 42, pp.153-160, 1997.
- [28] Yanlinastuti, Boybul, A. B. Ginting, dan D. Anggraini. "Pengaruh parameter proses elektrodeposisi terhadap penentuan berat isotop ²³⁵U dalam PEB U₃Si₂/Al pasca iradiasi," *URANIA*, vol. 22, no. 2, hal. 65 – 132, 2016.
- [29] Boybul, Yanlinastuti, D. Anggraini, A. Nugroho, R. Kriswarini, and A. B. Ginting, "Analisis kandungan cesium dan uranium dalam bahan bakar U₃Si₂/Al pasca iradiasi." *URANIA*, vol. 23, no. 2, hal.108 – 122, 2017.
- [30] Boybul, Yanlinastuti, S. Indaryati, I. Haryati, dan A. Nugroho, "Penentuan kandungan isotop ²³⁵U dalam PEB U₃Si₂-Al densitas 2,96 gU/cm³ untuk perhitungan *burn up*." *URANIA*, vol. 21, no.3, hal.141-149, 2015.

