

Urania

Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir

Beranda jurnal: <http://jurnal.batan.go.id/index.php/urania/>



RADIONUKLIDA CESIUM SEBAGAI INDIKATOR PENENTUAN *BURNUP* BAHAN BAKAR U_3Si_2/Al SECARA MERUSAK

Aslina Br. Ginting¹, Yanlinastuti¹, Boybul¹, Supardjo¹, Sungkono¹

¹Pusat Riset Teknologi Daur Bahan Bakar Nuklir dan Limbah Radioaktif – BRIN
Kawasan Sains dan Teknologi B.J. Habibie Gd.20, Tangerang Selatan, Banten 15314
e-mail: asli001@brin.go.id

(Naskah diterima: 10–09–2022, Naskah direvisi: 29–09–2022, Naskah disetujui: 17–10–2022)

ABSTRAK

RADIONUKLIDA CESIUM SEBAGAI INDIKATOR PENENTUAN *BURNUP* BAHAN BAKAR U_3Si_2/Al SECARA MERUSAK. Penentuan *burn-up* secara merusak dilakukan dengan metode pemisahan ^{137}Cs dalam PEB U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ pasca iradiasi. Penentuan *burn-up* secara merusak bertujuan untuk membuktikan kesesuaian besar *burn-up* yang diperoleh dengan metode tak merusak maupun menggunakan *Origen Code*. PEB U_3Si_2/Al dengan kode CBBJ 251 dipotong pada bagian *top*, *middle* dan *bottom* secara duplo dengan berat masing-masing *Top-1*= 0,049 gPEB dan *Top-2*=0,058 gPEB, *Middle-1*= 0,055 gPEB dan *Middle-2*= 0,024 gPEB, serta *Bottom-1*= 0,056 gPEB dan *Bottom-2*=0,075gPEB. PEB U_3Si_2/Al dengan berat tersebut dilarutkan menggunakan asam sehingga diperoleh larutan bahan bakar U_3Si_2/Al yang mengandung hasil fisi ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{235}U dan isotop lainnya. Larutan bahan bakar U_3Si_2/Al dipipet 1mL kemudian ditransfer dari *hotcell* ke R.135 untuk dilakukan pemisahan ^{137}Cs dari ^{235}U dengan metode penukar kation menggunakan zeolit Lampung. Larutan bahan bakar U_3Si_2/Al dipipet 100 μL dan dimasukkan ke dalam vial secara duplo kemudian ditambahkan zeolit Lampung 1000 mg untuk dilakukan proses penukar kation. Hasil pemisahan diperoleh isotop ^{137}Cs dalam fasa padat, sedangkan uranium dan isotop lainnya dalam fasa cair. Besarnya aktivitas (Bq) isotop ^{137}Cs diukur dengan Spektrometer- γ dan selanjutnya digunakan untuk perhitungan *burn-up*. Hasil perhitungan *burn-up* PEB U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ dengan metode merusak diperoleh sebesar 26,9714%; 55,1431%; dan 37,8855% masing-masing untuk potongan *top*, *middle* dan *bottom* dengan *burn-up* rerata 40%. Besaran ini tidak jauh berbeda dengan *burn-up* yang diperoleh dengan metode tak merusak menggunakan *gamma scanning* yaitu sebesar 24,4%; 52,7% ; 37,6 % masing-masing untuk potongan *top*, *middle* dan *bottom* dengan *burn-up* rerata 38,23% serta dengan *burn up* yang dihitung menggunakan *Origen code* yaitu sebesar 40%.

Kata kunci : Metode merusak, pemisahan, cesium, *burn-up*.

ABSTRACT

RADIONUCLIDE OF CESIUM AS AN INDICATOR FOR THE DETERMINATION OF U_3Si_2/Al FUEL BURNUP USING DESTRUCTIVE METHOD. Determination of burn-up using a destructive method was carried out by separation of ^{137}Cs in the irradiated U_3Si_2/Al fuel element plate (FEP) with a density of 4.8 gU/cm^3 . Determination of burn-up by the destructive method aims to study the suitability of the burn-up obtained by the non-destructive method or using the Origen Code software. FEP U_3Si_2/Al with CBBJ code 251 was cut in duplo at the top, middle and bottom with a weight of Top-1= 0.049 gFEP and Top-2=0.058 gFEP, Middle-1= 0.055 gFEP and Middle-2= 0.024 gFEP, and Bottom-1= 0.056 gFEP and Bottom-2=0.075gFEP. FEP samples were dissolved in acid to obtain a fuel solution containing fission products of ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{235}U and other isotopes. The fuel solution was pipetted 1 mL and then transferred from the hot cell to R.135 to separate the ^{137}Cs from ^{235}U by a cation exchange method using zeolite from Lampung. The fuel solution was pipetted 100 μL and put into the vial in duplicate, then 1000 mg Lampung zeolite was added to the cation exchange process. The separation results were ^{137}Cs in solid phase, while uranium and other isotopes in liquid phase. The amount of activity (Bq) of the ^{137}Cs isotope was measured with a Spectrometer- γ and then used for burn-up calculation. The results of the calculation of the burn-up were 26.9714%; 55.1431%; and 37.8855% for the top, middle and bottom pieces, respectively, with an average burn-up by 40%. These values are not much different from the burn-up obtained by the non-destructive method using gamma scanning, i.e., 24.4%; 52.7% ; and 37.6% for top, middle and bottom positions with an average of 38.23% and a burn-up calculated using the Origen code, which is 40%.

Keywords : Destructive method, separation, cesium, burnup.

PENDAHULUAN

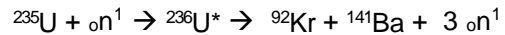
Pusat Riset Teknologi Daur Bahan Bakar Nuklir dan Limbah Radioaktif (PRTDBBNLR)-BRIN telah berhasil membuat elemen bakar uji (EBU) U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ dengan pengkayaan 19,89% ^{235}U . Pembuatan EBU U_3Si_2/Al tersusun dari 21 pelat, yang terdiri atas 3 buah pelat elemen bakar (PEB) U_3Si_2/Al densitas uranium $4,8 \text{ gU/cm}^3$ dan 18 pelat elemen bakar *dummy* (PEBD). Bentuk dan dimensi EBU sama dengan elemen bakar (EB) reaktor Serba Guna-G.A.Siwabessy (RSG-GAS). Tiga PEB U_3Si_2/Al densitas uranium $4,8 \text{ gU/cm}^3$ disisipkan pada alur nomor 3, 7 dan 19 sedangkan alur lainnya terdiri dari 18 PEB *dummy* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1[1],[2].



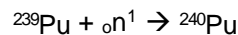
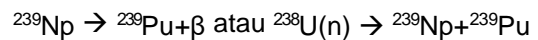
Gambar 1. Prototipe Elemen Bakar Uji U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ [1]

Elemen bakar uji didesain dengan mempertimbangkan kualitas, kemudahan proses fabrikasi, dan dapat dilakukan uji iradiasi di RSG-GAS hingga *burn-up* tinggi dan selamat. Kinerja (*performance*) bahan bakar selama proses iradiasi di dalam reaktor diamati, dan selanjutnya dilakukan pengujian pasca iradiasi di *hot cell* Instalasi Radiometalurgi (IRM) baik secara tidak merusak maupun merusak[2]. Data proses iradiasi dan uji pasca iradiasi digunakan sebagai bahan evaluasi kinerja bahan bakar untuk menentukan kualitas bahan bakar.

Selama EBU U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ diirradiasi di teras RSG-GAS dengan *burnup* tertentu, bahan bakar tersebut mengalami reaksi fisi maupun fertil sehingga menghasilkan beberapa produk fisi dan unsur bermassa berat (*heavy element*) seperti radionuklida U, Pu, Nd, Cs, Eu, Sr, Ce, Zr, Kr, dan Xe[3]. Reaksi fisi pada bahan bakar terjadi seperti yang terlihat pada persamaan reaksi berikut[1],[3].



Ketika inti atom ^{235}U ditembak oleh neutron menyebabkan atom ^{235}U memiliki inti yang tidak stabil, sehingga inti atom ^{235}U akan membelah menjadi dua buah inti atom yakni atom Barium (^{141}Ba) dan atom Krypton (^{92}Kr) serta tiga neutron. Radionuklida ^{92}Kr , ^{141}Ba , dan ^{95}Rb adalah isotop hasil fisi yang masih dapat meluruh dan menghasilkan isotop-isotop lain yang lebih stabil, diantaranya adalah isotop ^{90}Sr dan ^{137}Cs [1],[3]. Reaksi aktivasi ^{238}U dengan menangkap neutron termal pada energi $0,025 \text{ eV}$ akan mengalami reaksi fertil dengan mengikuti persamaan dibawah ini.

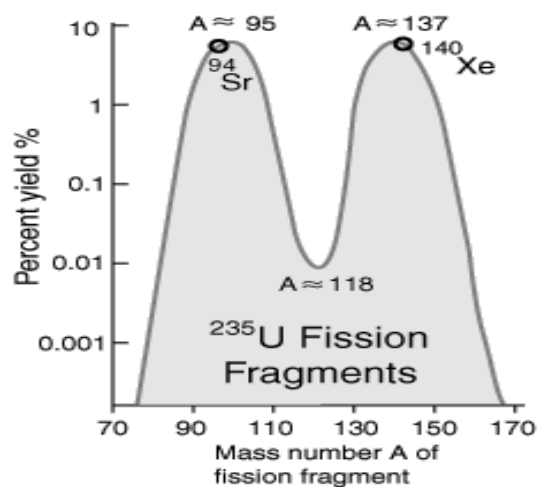


Radionuklida ^{240}Pu merupakan spontan fisi dan fragmen hasil fisi lain di antaranya juga menghasilkan ^{90}Sr dan ^{137}Cs [3]. Kebolehjadian terjadinya reaksi fisi sangat tergantung dari jumlah ^{235}U , neutron, posisi pelat elemen bakar dan *burn up*.

Radionuklida hasil fisi dan unsur bermassa berat yang dihasilkan sangat mempengaruhi stabilitas dan kompatibilitas bahan bakar nuklir. Terbentuknya hasil fisi menyebabkan tekanan di dalam *meat* bahan bakar meningkat sehingga dapat terjadi cacat, *swelling* dan kelengkungan pada kelongsong PEB U_3Si_2/Al . Adanya *swelling* atau cacat pada bahan bakar pasca iradiasi biasanya dapat dianalisis awal dengan metode uji tidak merusak. Uji tak merusak seringkali digunakan untuk memperoleh gambaran elemen bakar pasca iradiasi secara singkat dan sebagai pendekatan awal untuk mempersempit daerah pengamatan degradasi elemen bakar pasca iradiasi. Selain itu, hasil fisi dan unsur bermassa berat yang terbentuk dapat mempengaruhi perubahan struktur mikro dan *burn-up* bahan bakar. Interaksi kelongsong AlMg2 dengan *meat* bahan bakar, dan interaksi antara partikel bahan bakar U_3Si_2 dengan matriks Al menyebabkan terjadinya *interaction layer*, *bubble* dan *void* sedangkan hasil fisi ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{95}Zr dan ^{235}U sangat berpengaruh

pada pengukuran distribusi hasil fisi dan perhitungan *burn-up*. Terjadinya *intearaction layer*, *buble* dan *void* dapat diketahui dengan analisis metalografi menggunakan metode uji merusak. Demikian halnya dengan analisis hasil fisi ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{95}Zr dan ^{235}U untuk penentuan *burn-up* dapat dilakukan pemisahan menggunakan metode *cation-anion change* dengan metode merusak. Data uji tak merusak dan merusak dijadikan sebagai umpan balik kepada reaktor dan fabrikator bahan bakar.

Burn-up suatu bahan bakar menunjukkan jumlah ^{235}U yang terbakar atau mengalami reaksi fisi menghasilkan isotop hasil fisi dan unsur unsur bermassa berat. Dengan kata lain, *burn-up* merupakan ratio antara jumlah ^{235}U yang terbakar (U_i) dengan jumlah ^{235}U mula-mula (U_o) yang terdapat di dalam elemen bakar U_3Si_2/Al densitas uranium $4,8 \text{ gU/cm}^3$ pada saat difabrikasi. Selain ratio (U_i/U_o), isotop yang juga dapat digunakan sebagai indikator *burn-up* adalah ratio $^{134}Cs/^{137}Cs$ [4]. Pemilihan ratio $^{134}Cs/^{137}Cs$ sebagai indikator *burn-up* karena isotop ^{134}Cs dan ^{137}Cs merupakan isotop besar yang berada pada daerah mayoritas intensitas gamma (I_γ) dalam fenomena reaksi fisi (pembelahan) ^{235}U dengan neutron seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Radionuklida cesium dengan nomor massa 137 mempunyai *fission yield* 6,02%. Selain mempunyai *fission yield* sebesar 6,02%, isotop ^{137}Cs mempunyai tampang serapan neutron (σ) kecil 0,05 barn dan umur paro panjang ($T_{1/2}$) 30,17 tahun serta merupakan isotop stabil sehingga baik digunakan sebagai indikator *burn-up*[1],[5].



Gambar 2. Intensitas gamma ^{137}Cs dalam reaksi fisi ^{235}U [1],[5]

Besarnya *burn-up* umumnya dinyatakan dalam persen (%), namun yang paling sering digunakan adalah MWD/ton-U atau yang menyatakan jumlah energi yang telah dihasilkan dalam Mega Watt hari (MWD) dari tiap ton uranium. Hingga saat ini, *burn-up* bakar bahan bakar yang diizinkan oleh BAPETEN untuk pengoperasian RSG-GAS adalah 56%. Upaya yang dilakukan untuk meningkatkan *burn-up* pengoperasian RSG-GAS adalah dengan cara meningkatkan densitas uranium dalam bahan bakar U_3Si_2/Al yaitu dari $2,96 \text{ gU/cm}^3$ menjadi $4,8 \text{ gU/cm}^3$. Oleh karena itu, untuk mengetahui unjuk kerja EBU U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ yang telah berhasil difabrikasi, selanjutnya diirradiasi di teras RSG-GAS dengan variasi *burnup* 20%, 40%, dan 60%[1]. Pada 23 Desember 2009, EBU U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ yang telah berhasil diirradiasi dengan *burnup* 40%, dikeluarkan dari teras RSG-GAS kemudian dikirim ke *hot cell* IRM pada 26 November 2018 untuk dilakukan uji pasca iradiasi baik secara tak merusak maupun merusak. Dalam kegiatan uji pasca iradiasi bahan bakar nuklir, penggunaan metode tak merusak dan merusak tidak dapat terpisahkan karena kedua metode tersebut saling melengkapi antara satu dan lainnya, Data uji tak merusak merupakan langkah awal untuk mengetahui gambaran unjuk kerja bahan bakar setelah diirradiasi sedangkan data uji merusak merupakan langkah pembuktian dari uji tak merusak.

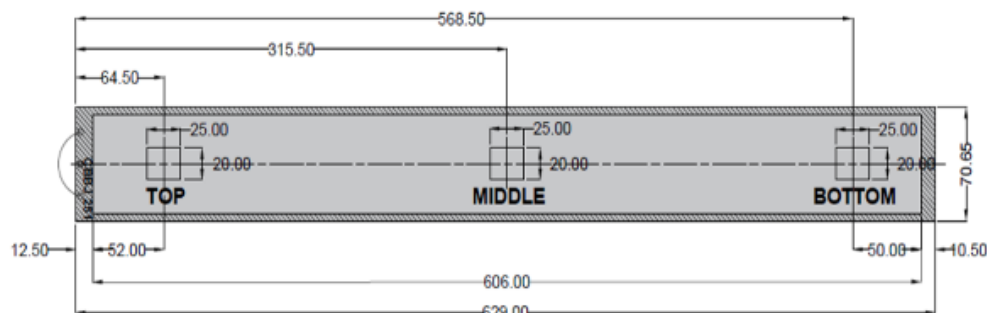
Pada penelitian sebelumnya telah dilakukan uji tak merusak terhadap PEB U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ dengan *burnup* 40% menggunakan radiografi sinar-X *Gamma Scanning*. Dari uji tak merusak diperoleh data citra radiografi dengan resolusi baik yang menunjukkan bahwa tidak ada perubahan warna, cacat, *swelling* maupun kerusakan yang signifikan (anomali) pada kelongsong maupun PEB U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ akibat iradiasi[6]-[7]. Sementara itu, uji tak merusak lainnya dengan menggunakan *Gamma Scanning* telah diperoleh distribusi isotop hasil fisi $^{134}Cs/^{137}Cs$ bahan bakar PEB U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ [8]. 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 dengan *burn-up* pada posisi pelat bagian *middle* sebesar 52,7%[8]. Data uji tak merusak yang diperoleh menggunakan radiografi sinar-X dan *Gamma scanning*

selanjutnya digunakan untuk menentukan daerah pengambilan sampel untuk menentukan posisi sampling pemotongan PEB U_3Si_2/Al untuk penentuan *burn-up* secara merusak.

Selain uji tak merusak menggunakan radiografi sinar-X dan *Gamma Scanning*, pada penelitiannya sebelumnya juga telah dilakukan uji merusak untuk penentuan *burn-up* PEB U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ bagian potongan *Middle*. Penentuan *burn-up* tersebut dilakukan dengan menggunakan kandungan ^{137}Cs , dan ^{235}U sebagai indikator[9]-[11]. Perhitungan *burn-up* dengan menggunakan indikator ^{235}U mempunyai beberapa kendala, diantaranya adalah langkah pemisahan uranium dengan isotop lainnya sangat panjang, sehingga seringkali menyebabkan data ^{235}U yang diperoleh kurang akurat. Kendala lain adalah pada saat pengukuran ^{235}U menggunakan Spektrometer- α , dimana isotop ^{235}U sebagai pemancar radiasi alpha dengan daya tembus yang kecil sering sekali tertutupi oleh isotop ^{137}Cs sebagai pemancar radiasi gamma yang mempunyai daya tembus lebih besar. Hal ini

menyebabkan isotop ^{235}U tidak dapat dideteksi secara sempurna oleh PIPS detector (Canberra A450-18-AM). Oleh karena itu, sampel uji harus tipis dan merata, sehingga pemisahannya harus dikenakan proses elektrodeposisi untuk mendapatkan deposit isotop uranium (^{238}U , ^{235}U , ^{236}U , 234) pada plasket *stainless steel* yang tipis dan homogen[12]. Mestinya kendala ini dapat diatasi, apabila pengukuran isotop ^{235}U dilakukan menggunakan peralatan *Thermal Ionization Mass Spectrometer*[13]. Namun hingga saat ini, PRTDBBNR belum memiliki alat *Thermal Ionization Mass Spektrometer* sehingga perhitungan *burn-up* harus dilakukan melalui pemisahan ^{137}Cs dan isotop lainnya di dalam bahan bakar U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ dan pengukuran menggunakan spektrometer- γ .

Perhitungan *burn-up* PEB U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ kode CBBJ 251 yang telah diradiasi di RSG-GAS hingga *burn-up* 40% dilakukan secara merusak. Pemotongan PEB U_3Si_2/Al dilakukan pada bagian *top*, *middle* dan *bottom* seperti yang terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Posisi pemotongan PEB U_3Si_2/Al densitas $4,8\text{gU/cm}^3$ kode CBBJ 251

Net area (*counts*) isotop ^{137}Cs pada masing-masing potongan *top*, *middle* dan *bottom* dievaluasi menjadi radioaktivitas (Bq) untuk selanjutnya digunakan dalam perhitungan *burn-up*. Perhitungan *burn-up* PEB U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ *burn-up* 40% menggunakan indikator radioaktivitas isotop ^{137}Cs dilakukan dengan menggunakan persamaan (1) dibawah ini[8],[10],[11].

$$F_{i,j} = \frac{A_{i,j}}{A_{i,r}} F_{i,r} \quad (1)$$

$F_{i,j}$ merupakan fraksi bakar (*burn-up*) pada posisi j , pelat i (yang akan dihitung), $F_{i,r}$ adalah Fraksi bakar (*burn-up*) rerata pada pelat i yaitu 40% (data Origen code), $A_{i,j}$ adalah aktivitas ^{137}Cs pada posisi j , pelat i

dan $A_{i,r}$ merupakan aktivitas ^{137}Cs rerata pada pelat i . Posisi j menggambarkan posisi *Top*, *Middle* atau *Bottom* pada PEB sedangkan pelat i adalah PEB U_3Si_2/Al kode CBBJ 251 dengan *burn-up* 40%.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memperoleh data *burn-up* PEB U_3Si_2/Al densitas $4,8\text{gU/cm}^3$ kode CBBJ 251 secara merusak dengan menggunakan isotop ^{137}Cs sebagai indikator. Data *burn-up* yang diperoleh secara merusak dibandingkan dengan *burn-up* yang diperoleh dengan metode tak merusak. Data *burn-up* selanjutnya digunakan sebagai umpan balik kepada RSG-GAS untuk membuktikan kesesuaian nilai *burn-up* yang diperoleh melalui perhitungan menggunakan *software* Origen code[12].

METODOLOGI

Elemen bakar uji (EBU) U_3Si_2/Al densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ dibongkar di dalam *hot cell*, kemudian PEB U_3Si_2/Al *burn-up* 40 % dengan kode CBBJ 251 pada alur pelat sisi nomor 19 ditarik ke luar dari EBU. PEB U_3Si_2/Al dipotong pada bagian *top*, *middle* dan *bottom* dengan masing-masing dimensi $4 \times 3 \times 1,37 \text{ mm}$ secara duplo. Berat potongan *top* dengan kode T-1= 0,049 gPEB dan T-2=0,058 g PEB, berat potongan bagian *middle* dengan kode M-1= 0,055 gPEB dan M-2= 0,024 gPEB, serta berat potongan *bottom* dengan kode B-1= 0,056 gPEB dan B-2=0,075 gPEB. PEB U_3Si_2/Al dengan berat tersebut dilarutkan dengan 5 mL HCl 6 N dan 5 mL HNO_3 6N di dalam *hotcell*[14]. Hasil pelarutan PEB diperoleh larutan bahan bakar U_3Si_2/Al yang mengandung isotop hasil fisi seperti ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{235}U dan isotop lainnya. Larutan bahan bakar masing-masing potongan dipipet 1mL ditransfer dari *hot cell* 109 ke R.135 kemudian diencerkan hingga 25 mL. Larutan bahan bakar potongan *top*,*middle* dan *bottom* dipipet masing-masing 100 μL dan dimasukkan ke dalam vial secara duplo, kemudian diukur langsung menggunakan spektrometer- γ dengan waktu cacah 1500 detik. Pengukuran langsung bertujuan untuk mengetahui jenis radionuklida yang terdapat di dalam larutan bahan bakar sebelum dilakukan pemisahan.

Pemisahan Cs dilakukan dengan memipet 100 μL larutan bahan bakar, kemudian ditambahkan zeolit Lampung seberat 1000 mg. Pemisahan Cs menggunakan proses penukar kation 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 uranium berada dalam fasa air (supernatan). Padatan Cs-zeolit diukur menggunakan Spektrometer- γ Merk Gennie 2000, detektor HpGe dengan waktu cacah 1500 detik. Spektrum ^{137}Cs yang diperoleh selanjutnya dievaluasi menjadi aktivitas (Bq). Besar aktivitas (Bq) isotop ^{137}Cs pada masing-masing potongan *top*, *middle* dan *bottom* digunakan untuk perhitungan *burn-up*. Hasil perhitungan *burn-up* secara merusak selanjutnya dibandingkan dengan nilai *burn-up* yang diperoleh dengan metode tak merusak menggunakan *Gamma scanning*[8].

HASIL DAN PEMBAHASAN

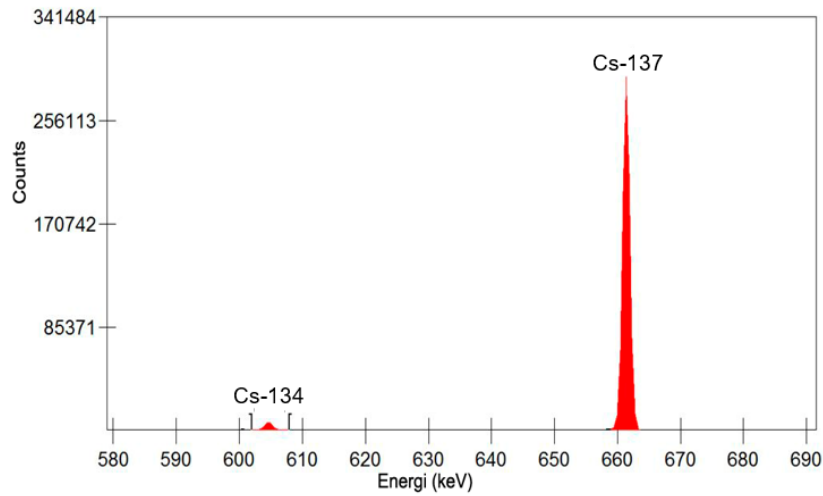
Hasil pengukuran langsung 100 μL larutan bahan bakar U_3Si_2/Al (sebelum pemisahan) menggunakan Spektrometer gamma dengan waktu cacah 1500 detik diperoleh beberapa jenis radionuklida pemancar gamma diantaranya ^{96}Nb , ^{124}Sb , ^{95}Zr , ^{134}Cs dan ^{137}Cs seperti yang terlihat pada Tabel 1[5].

Tabel 1. Jenis radionuklida sebelum pemisahan.

Radionuklida	Energi (keV)	Waktu paroh	Net area (cacah)
^{96}Nb	570,5	34,99 hari	543
^{124}Sb	723,8	60,22 hari	419
^{95}Zr	756,8	64,03 hari	117
^{134}Cs	604,8	2,1 tahun	5472
^{134}Cs	795,8	2,1 tahun	2057
^{137}Cs	661,7	30,17 tahun	15231

Pada Tabel 1, terlihat dengan jelas bahwa spektrum radionuklida ^{96}Nb , ^{95}Zr dan ^{124}Sb relative sangat kecil. Hal ini disebabkan karena waktu parohnya yang sangat pendek, sehingga pada saat pengukuran aktivitas ketiga radionuklida tersebut sudah menurun jauh. Sementara itu, cacahan isotop ^{134}Cs dan ^{137}Cs diperoleh masih besar dan untuk penentuan *burn-up* memang hanya difokuskan pada cacahan cesium.

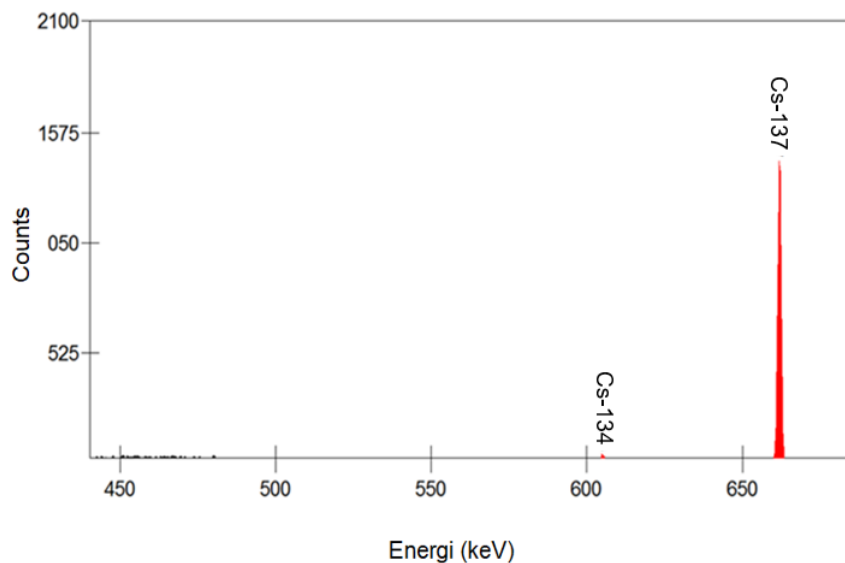
Setelah dilakukan pemisahan cesium dengan metode penukar kation menggunakan zeolit Lampung diperoleh hasil bahwa isotop ^{137}Cs dan ^{134}Cs terikat dengan zeolit dalam fasa padat, sedangkan uranium dan isotop lainnya berada dalam fasa cair sebagai supernatan. Hasil pengukuran isotop ^{137}Cs dan ^{134}Cs dalam fasa padat menggunakan spektrometer gamma ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Spektrum isotop ^{137}Cs dan ^{134}Cs dalam padatan Cs-zeolit.

Dari Gambar 4 diketahui bahwa penambahan zeolit dengan berat 1000 mg mampu menyerap isotop ^{137}Cs dan ^{134}Cs dan terikat dalam padatan Cs-zeolit[13],[14]. Hal ini dibuktikan dengan hanya spektrum isotop ^{134}Cs pada energi 604,8 keV dan ^{137}Cs pada energi 661,8 keV yang terdeteksi dan tidak ada terdeteksi sepektrum isotop gamma lainnya. Pada hasil pengukuran langsung diperoleh isotop ^{134}Cs pada energi 795,8 keV dengan cacahan yang kecil seperti yang terlihat pada Tabel 3, namun hasil pengukuran dalam padatan Cs-zeolit, isotop ^{134}Cs pada energi 795,8 keV tidak terdeteksi seperti yang terlihat pada Gambar 4. Hal ini disebabkan karena intensitas gamma (I_γ) isotop ^{134}Cs pada 795,8 keV sebesar 85,4% lebih kecil dibanding intensitas gamma isotop

^{134}Cs pada energi 604,8 keV yaitu sebesar 97,60 % [5], sehingga pada saat proses pertukaran kation, yang mempunyai kemampuan bertukar kation dengan NH_4^+ (dalam zeolite) adalah kation cesium yang mempunyai konsentrasi lebih besar. Dari fenomena ini diketahui pemisahan ^{134}Cs dan ^{137}Cs dengan metoda penukar kation menunjukkan bahwa zeolit Lampung yang diaktifasi dengan NH_4^+ sangat selektif terhadap cesium [13]-[15]. Hal ini dibuktikan dengan hasil pengukuran ^{134}Cs dan ^{137}Cs pada supernatant seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Cacahan isotop ^{134}Cs pada energi 604,7 keV dan ^{137}Cs pada energi 661,7 keV diperoleh dalam jumlah sangat kecil dan tidak terlihat adanya spektrum isotop pemancar sinar- γ lainnya.



Gambar 5. Spektrum isotop ^{137}Cs dan ^{134}Cs dalam fasa cair (supernatant).

Hasil evaluasi dari spektrum pada Gambar 4 diperoleh berat isotop ^{137}Cs dalam padatan Cs-zeolit masing masing untuk potongan bagian *top*, *middle* dan *bottom* secara duplo seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2. Berat isotop ^{137}Cs dalam padatan Cs-zeolit potongan *top*, *middle* Dan *bottom* kemudian dievaluasi sehingga diperoleh *activists* Dan *burn-up* PEB U_3Si_2/Al densitas

4,8 gU/cm^3 masing-masing potongan potongan *top*, *middle* dan *bottom*. Besar *burn-up* yang diperoleh dengan metode merusak, kemudian dibandingkan dengan *burn-up* yang diperoleh dengan metode tak merusak[8]. Hasil perbandingan *burn-up* dengan kedua metode tersebut ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 2. Berat ^{137}Cs dalam padatan Cs-zeolit potongan *top*, *middle* dan *bottom*

Kode sampel	Berat PEB (g)	Berat ^{137}Cs (g)	Berat ^{137}Cs (g/g PEB)
<i>Top</i> -1	0,049	2,2857E-05	0,000466463
<i>Top</i> -2	0,058	2,6313E-05	0,000453667
Rerata Top			0,000460065
<i>Middle</i> -1	0,055	5,8799E-05	0,001069065
<i>Middle</i> -2	0,024	1,9492E-05	0,000812144
Rerata Middle			0,000940605
<i>Bottom</i> -1	0,056	3,5142E-05	0,000627532
<i>Bottom</i> -2	0,075	4,9870E-05	0,000664934
Rerata Bottom			0,000646233

Tabel 3. *Burn-up* PEB U_3Si_2/Al potongan *top* (T), *middle* (M) dan *bottom* (B)

Kode sample	Berat ^{137}Cs (g/g PEB)	Berat atom ^{137}Cs	Aktivitas ^{137}Cs (Bq)	<i>Burn-up</i> merusak (%)	<i>Burn-up</i> tak merusak (%)
<i>Top</i>	0,000460065	2,0216E+18	1.471.444.765	26,9714	23,400
<i>Middle</i>	0,000940605	4,1332E+18	3.008.371.700	55,1431	52,700
<i>Bottom</i>	0,000646233	2,8397E+18	2.066.871.037	37,8855	37,600

Dari Tabel 3 diketahui bahwa *burn-up* rerata PEB U_3Si_2/Al densitas 4,8 gU/cm^3 kode CBBJ 251 untuk potongan *top*, *middle* dan *bottom* masing-masing sebesar 26,9714%; 55,1431%; dan 37,8855% dengan *burn-up* rerata 40%. Besar *burn-up* ini tidak mempunyai perbedaan signifikan dengan *burn-up* yang diperoleh dengan metode tak merusak menggunakan *gamma scanning* sebesar 23,4%; 52,7%; 37,6% masing-masing untuk potongan *top*, *middle* dan *bottom* dengan *burn-up* rerata 38,23%[8]. *Burn-up* PEB U_3Si_2/Al densitas 4,8 gU/cm^3 paling besar diperoleh pada bagian *middle*. Hal ini disebabkan pada saat diiradiasi di RSG-GAS, posisi bahan bakar bagian *middle* dikelilingi oleh reflektor sebagai pengendali neutron, sehingga neutron secara terus menerus terrefleksi ke bagian *middle* bahan bakar yang menyebabkan reaksi fisi terjadi paling besar pada posisi bahan bakar bagian *middle*.

SIMPULAN

Burn-up PEB U_3Si_2/Al densitas 4,8 gU/cm^3 dengan metode merusak diperoleh sebesar 26,9714%; 55,1431%; dan 37,8855% dengan rerata sebesar 40%, sedangkan nilai *burn up* dengan metode tak merusak diperoleh sebesar 23,4%; 52,7%; 37,6% masing-masing untuk potongan *top*, *middle* dan *bottom* dengan rerata sebesar 38,23%. Nilai tersebut tidak jauh berbeda dengan hasil perhitungan *burn-up* menggunakan *software Origen Code* oleh RSG-GAS. Data *burn up* yang diperoleh secara merusak menjadi umpan balik kepada RSG-GAS untuk mengetahui unjuk kerja bahan bakar U_3Si_2/Al densitas 4,8 gU/cm^3 selama diiradiasi serta untuk membuktikan kesesuaian nilai *burn-up* yang diperoleh melalui perhitungan menggunakan *software Origen code*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Supardjo, T. Surbakti, E. P. Hastuti, A. Hamzah, A. B. Ginting, "Teknik pembuatan dan pengujian bahan bakar dispersi U_3Si_2/Al densitas uranium tinggi," *Buku Batan Press*, hal 64-70, 2019.
- [2]. P. H. Liem, 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.
- [3]. 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 isotop correlations with burn-up," *Nuclear Engineering Technology*, vol. 471, pp. 924-933, 2015.
- [4]. 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.
- [5]. Monographic BIPM-5-Table of Radionuclides, Comments on Evaluations, 2010, volume 5, Published by the LNHB or in the web pages: <http://www.nucleide.org/NucData.htm>.
- [6]. R. Artika, R. Sigit, H. F. Rahmatullah, A. B. Ginting, Supardjo, "Uji tak merusak pelat elemen bakar U_3Si_2/Al densitas uranium 4,8 gU/cm³ menggunakan radiografi sinar-x digital," *Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir Urania*, vol. 26, no. 1, hal. 49-56, 2020.
- [7]. Y. J. Kim, B. O. Yoo, H. M. Kim, S. B. Ahn, "Development of X-ray system for irradiated fuel in hot cell," *Hotlab Conference Proceeding* 2016, Karlsruhe, Germany.
- [8]. Y. Nampira dan S. Ismarwanti, "Uji tidak merusak bahan bakar U_3Si_2/Al tingkat muat uranium 4,8 g/cm³ pasca iradiasi fraksi bakar 20% dan 40%," *Jurnal Teknologi Bahan Nuklir*, vol. 10, no. 2, hal. 53-63, 2014.
- [9]. A. B. Ginting, Supardjo, Yanlinastuti, S. Indaryati, Boybul, "Perhitungan *burn up* PEB U_3Si_2/Al densitas 4,8 gU/cm³ pasca iradiasi potongan bagian *middle*," *Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir Urania*, vol. 25, no. 2, hal. 91–106, 2020.
- [10]. H. U. Zwicky, J. Low, M. Granfors, C. Alejano, J. M. Conde, C. Casado, J. Sabater, M. Llore, M. Quecedo, J. A. Gago, "Nuclide analysis in high burn-up fuel samples irradiated in Vandellós 2," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 402, pp. 60-73, 2010.
- [11]. A. B. Ginting and P. H. Liem, "Absolute burn-up 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.
- [12]. A. B. Ginting, S. Amini, Noviarty, Yanlinastuti, A. Nugroho, Boybul, "Natural zeolite 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.
- [13]. 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.
- [14]. B. Wiyantoko and N. Rahmah, "Measurement of cation exchange capacity (CEC) on natural zeolite by percolation methode," *AIP Conference Proceedings* 1911, 020012, 2017. Published On line 05 December 2017.
- [15]. A. G. Volkov, S. Paula, D. W. Deamer, "Two mechanisms of permeation of small neutral molecules and hydrated ions across phospholipid bilayers," *Bioelectrochem. Bioenergetics*, vol. 42, pp. 153-160, 1997.

HALAMAN INI DIBIARKAN KOSONG