

---

## KARAKTERISASI RADIONUKLIDA PADA BAHAN BAKAR BEKAS DARI *EXPERIMENTAL PEBBLE BED REACTOR*

Aisyah, Mirawaty, Dwi Luhur Ibnu Saputra, Risdiyana Setiawan

Pusat Teknologi Limbah Radioaktif – BATAN

Kawasan Puspiptek Serpong Gd.50, Tangerang Selatan, 15314

e-mail: aisyah@batan.go.id

(Naskah diterima: 26-11-2018, Naskah direvisi: 16-01-2019, Naskah disetujui: 22-01-2019)

### ABSTRAK

**KARAKTERISASI RADIONUKLIDA PADA BAHAN BAKAR NUKLIR BEKAS DARI *EXPERIMENTAL PEBBLE BED REACTOR*.** *Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor (AVR)* merupakan reaktor nuklir jenis *High Temperature Gas Cooled Reactor (HTGR)* yang menggunakan bahan bakar berbentuk *pebble* berlapis TRISO dengan tipe yang sama dengan Reaktor Daya Eksperimental (RDE) yang direncanakan akan dibangun di Indonesia. Oleh karena itu karakteristik radionuklida dalam bahan bakar bekas (BBNB) reaktor AVR dapat digunakan untuk mempelajari karakteristik BBNB reaktor RDE. Salah satu hal penting dalam operasional reaktor nuklir adalah pengelolaan BBNB yang ditimbulkannya. Pengelolaan BBNB reaktor AVR dilakukan dengan penyimpanan dalam *dry cask* untuk jangka waktu yang lama. Upaya untuk mendisain keselamatan dalam sistem penyimpanan BBNB salah satu kajian penting yang diperlukan adalah karakterisasi radionuklida yang terkandung dalam BBNB. Pada penelitian ini dilakukan karakterisasi radionuklida yang terkandung dalam BBNB dengan menggunakan *software* ORIGEN 2.1 yang didasarkan pada operasional reaktor AVR. Penelitian ini bertujuan untuk analisis keselamatan penyimpanan BBNB *pebble* pada *dry cask* dalam jangka panjang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sampai dengan waktu penyimpanan selama 100 tahun, BBNB sebuah *pebble* memiliki karakteristik radionuklida hasil aktivasi, aktinida dan anak luruhnya, serta radionuklida hasil fisi dengan total konsentrasi aktivitas sebesar  $4,03 \times 10^{10}$  Bq/g. Sampai dengan waktu penyimpanan 100 tahun konsentrasi aktivitas radionuklida total dalam *dry cask* sebesar  $7,66 \times 10^{13}$  Bq/g untuk kapasitas *dry cask* yang berisi BBNB *pebble* berjumlah 1900 buah. Terdapat BBNB *pebble* dalam *dry cask* yang mengalami kerusakan pada lapisan TRISO, sehingga dalam *dry cask* kemungkinan terdapat beberapa radionuklida hasil fisi yang dapat lepas dari BBNB seperti  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{135}\text{Xe}$ , dan  $^{131}\text{I}$  yang berupa gas, serta  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{110\text{m}}\text{Ag}$  dan  $^{107}\text{Pd}$  yang bersifat logam.

**Kata kunci:** Karakterisasi radionuklida, AVR, bahan bakar nuklir bekas, *pebble berlapis TRISO*

---

## ABSTRACT

**CHARACTERIZATION OF RADIONUCLIDES IN SPENT FUEL FROM EXPERIMENTAL PEBBLE BED REACTOR.** *Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor (AVR) is a type of High Temperature Gas Cooled Reactor (HTGR) that has a TRISO coated pebble fuel similar to TRISO fuel for the Experimental Power Reactor (Reaktor Daya Experimental, RDE), which is planned to be built in Indonesia. Therefore, the radionuclides characterization study in the AVR spent fuel can give contribution to the study of RDE spent fuel. One of the important aspects in the operation of nuclear reactor is the management of the generated spent fuel. The management of the AVR spent fuel was carried out by storing the spent fuel in dry cask for a long time. In designing the safety of spent fuel storage system, one of the needed important studies is the characterization of radionuclides contained in the spent fuel. In this study, characterization of radionuclides contained in the spent fuel has been performed by using ORIGEN 2.1 computer program based on the data of AVR reactor operation. The objective of the research is to analyze the safety of a long term storage of pebble spent fuels in dry cask. The results show that up to 100 years storage period, one pebble spent fuel has a total activity concentration of  $4.03 \times 10^{10}$  Bq/g of activated products, actinides and its daughter and fission product radionuclides. In a dry cask containing 1900 pebbles, the total activity concentration of the spent fuel is  $7.66 \times 10^{13}$  Bq/g. Some broken TRISO layer in some spent fuel pebbles in dry cask is evident, so it is possible that some amount of fission product radionuclides are released from the spent fuel in the dry cask such as  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{135}\text{Xe}$ , and  $^{131}\text{I}$  in the form of gas, and metallic radionuclides of  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{110\text{m}}\text{Ag}$  and  $^{107}\text{Pd}$ .*

**Keywords:** *Characterization of radionuclides, AVR, spent fuel, TRISO coated pebble*

## PENDAHULUAN

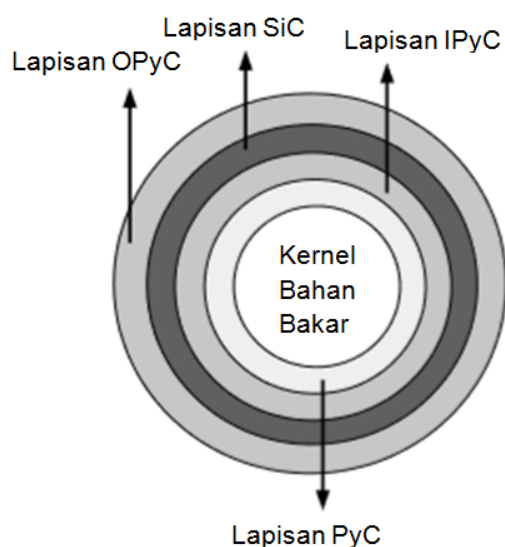
Dalam rangka mengupayakan amanat pemanfaatan energi nuklir pada Rencana Pembangunan Jangka menengah Nasional III (RPJMN III) sebagaimana tertera pada Peraturan Pemerintah Nomor 2 Tahun 2015 tentang kewenangan Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) untuk pembangunan reaktor nuklir non komersial, BATAN merencanakan membangun Reaktor Daya Eksperimental (RDE) [1,2]. RDE merupakan *pebble-bed reactor* dengan tipe *High Temperature Gas Cooled Reactor* (HTGR) dengan bahan bakar bermoderator *graphite* yang mempunyai daya termal sebesar 10 MW [1]. HTGR merupakan salah satu dari reaktor generasi ke IV yang didesain memiliki sistem keselamatan pasif yang tetap aman meski dalam kondisi kecelakaan [3]. HTGR juga memiliki kelebihan dari sisi *sustainability*, ekonomis, *viability*, *reliability*, dan *proliferation resistance* [3].

Salah satu hal penting berkenaan dengan pembangunan reaktor nuklir adalah masalah pengelolaan bahan bakar nuklir bekas (BBNB). Pengelolaan BBNB diatur dalam Peraturan Pemerintah Republik Indonesia (PP) Nomor 61 Tahun 2013. Pada pasal 32 menyatakan bahwa penghasil limbah radioaktif wajib melaksanakan penyimpanan sementara BBNB dalam waktu sekurang-kurangnya selama masa operasi reaktor nuklir. Setelah melakukan penyimpanan sementara maka penghasil limbah wajib mengirim kembali BBNB ke negara asal, atau menyerahkan BBNB kepada BATAN (pasal 33). Sementara itu pada pasal 38 menyatakan bahwa BATAN mempunyai kewajiban melakukan penyimpanan BBNB sebelum dilakukan penyimpanan lestari [4]. Oleh karena itu sejalan dengan rencana pembangunan RDE dimasa mendatang, BATAN dalam hal ini Pusat Teknologi Limbah Radioaktif (PTLR) perlu mempersiapkan fasilitas penyimpanan BBNB dari operasional reaktor RDE.

*Arbeitsgemeinschaft Versuchs reaktor* atau *Experimental Pebble Bed Reactor* (AVR) merupakan reaktor nuklir jenis HTGR dari Jerman yang dibangun pada tahun 1960 dan berhenti beroperasi pada tahun 1988 [5,6]. Jenis bahan bakar nuklir dari reaktor AVR adalah sama dengan RDE yaitu bahan bakar bentuk *pebble* (bola) yang berlapis TRISO [7-10]. Oleh karena itu dalam penelitian ini dipelajari BBNB dari reaktor AVR yang dapat menjadi salah satu kontribusi penting untuk melengkapi data penelitian berkenaan dengan sistem penyimpanan BBNB dari RDE yang amat diperlukan.

Bahan bakar reaktor AVR merupakan bahan bakar kernel tipe termal yang berbentuk *pebble* dan konstruksi partikel berlapis TRISO (*Triso Coated Particle*) dengan 4 lapisan yang membungkus kernel. Kernel mengandung bahan fisil  $UO_2$  dengan pengayaan rendah (<20%) yang dilapisi moderator keramik dan grafit. Lapisan pertama berupa lapisan *pyrolytic carbon* densitas rendah (PyC) yang berpori yang berguna menahan gas-gas hasil fisi yang keluar dari kernel sekaligus menyediakan ruang jika terjadi pembengkakan (*swelling*). Lapisan kedua berupa lapisan *pyrolytic carbon* densitas tinggi sebelah dalam (IPyC) berfungsi untuk menahan hasil belah, khususnya Kr dan Xe agar tidak keluar dari kernel. Selain itu lapisan ini juga berfungsi sebagai pengahalang difusi hasil fisi yang berupa logam serta berfungsi juga sebagai bejana yang menahan jika terdapat tekanan dari lapisan sebelah dalamnya. Lapisan ketiga merupakan lapisan silikon karbida (SiC) yang merupakan lapisan utama berfungsi untuk mempertahankan integritas mekanik dan stabilitas dimensi dari partikel bahan bakar berlapis serta sebagai penahan terhadap hasil belah yang bersifat logam yang telah berhasil menembus lapisan disebelah dalamnya. Lapisan keempat adalah lapisan *pyrolytic carbon* densitas tinggi sebelah luar (OPyC) yang merupakan

lapisan terluar dari bahan bakar berlapis TRISO yang berfungsi secara mekanik melindungi lapisan SiC. Keempat lapisan tersebut berfungsi sebagai bejana bertekanan yang berintegritas tinggi dan memiliki kemampuan retensi yang sangat tinggi terhadap hasil fisi serta masing-masing lapisan mempunyai fungsi yang spesifik. Di antara keempat lapisan tersebut, lapisan yang paling penting dalam partikel jenis TRISO adalah lapisan SiC yang berfungsi memberikan sebagian besar kekuatan struktur dan stabilitas dimensi serta sebagai penghalang utama terhadap pelepasan hasil fisi yang apabila tidak ditahan akan menembus lapisan PyC dan akan mengkontaminasi sistem pendingin primer [8–11]. Gambar 1 menunjukkan partikel bahan bakar *Pebble* yang berlapis TRISO.



Gambar 1. Partikel Bahan Bakar *Pebble* Berlapis TRISO [11]

Dalam operasional reaktor AVR, bahan bakar saling bersinggungan didalam teras reaktor, sehingga terdapat bahan bakar yang rusak terutama rusak lapisan TRISO. Lapisan TRISO pada bahan bakar yang telah rusak secara otomatis akan keluar dari teras reaktor dan dikategorikan sebagai BBNB sehingga dalam BBNB yang dikelola merupakan campuran bahan bakar yang rusak dan bahan bakar yang utuh

tetapi telah mencapai *burn-up*. Terdapat beberapa penyebab terjadinya kerusakan bahan bakar *pebble* dalam reaktor antara lain kerusakan akibat tekanan gas hasil fisi, kerusakan akibat tekanan gas CO, kerusakan akibat migrasi kernel [12], dan kerusakan akibat korosi oleh hasil fisi Paladium (Pd) [11,13]. Adanya kerusakan bahan bakar dalam operasional reaktor, maka diperlukan tingkat keselamatan yang tinggi dalam pengelolaan BBNB.

Sampai saat ini Indonesia menganut opsi daur bahan bakar terbuka, ini berarti tidak dilakukan proses olah ulang dan BBNB akan disimpan dalam jangka waktu panjang. Dalam pengelolaan BBNB dari reaktor AVR, penyimpanan BBNB dilakukan dalam *dry cask* yang terbuat dari bahan baja tahan karat. *Dry cask* didisain terdiri dari 2 *canister* yang masing-masing memiliki kapasitas 950 buah BBNB *pebble*, sehingga dalam 1 *dry cask* akan menyimpan sebanyak 1800 buah BBNB *pebble* [14]. Untuk merancang *dry cask* diperlukan banyak data dari BBNB yang akan disimpan yang salah satunya adalah data karakteristik radionuklida yang terkandung dalam BBNB.

Penelitian yang berkaitan dengan BBNB HTGR secara umum dilakukan oleh Jian Li, dkk; Lim Peng Hong; Ihda Husnayani [15]–[17]. Fukaya, F. dkk mempublikasikan penyimpanan dan final disposal BBNB dari HTGR [18]. Penelitian yang berkaitan dengan proses olah ulang BBNB dari HTGR dilakukan oleh Liyang Zhu dkk [19]. Hingga saat ini, cukup banyak beberapa penelitian serta dokumen teknik berkenaan dengan BBNB dari berbagai jenis reaktor nuklir. Khusus untuk BBNB *pebble* dari reaktor jenis HTGR, penelitian dibidang ini relatif belum banyak.

Dalam mendisain sistem penyimpanan BBNB, salah satu kajian penting yang diperlukan adalah karakterisasi radionuklida yang terkandung dalam BBNB baik BBNB yang baru keluar dari teras reaktor maupun BBNB dalam penyimpanan jangka panjang. Saat ini penelitian yang

berkaitan dengan karakteristik radionuklida dari BBNB untuk reaktor AVR relatif belum banyak. Beberapa penelitian dibidang tersebut diantaranya adalah analisis karakterisasi beserta pengembangan metode inventori radionuklida dari BBNB [15]–[19].

Pada penelitian ini dilakukan kajian karakterisasi radionuklida untuk BBNB dari AVR dengan bahan bakar bentuk *pebble* berlapis TRISO. Karakterisasi ini dilakukan dengan tujuan untuk analisis keselamatan penyimpanan BBNB *pebble* pada *dry cask* dalam jangka panjang. Analisis keselamatan dalam penyimpanan BBNB ini antara lain untuk mendisain sistem proteksi radiasi pada *dry cask* BBNB seperti *shielding*, analisis panas peluruhan BBNB, disain *dry cask*, dan penanganan BBNB. Karakteristik radionuklida pada BBNB ini meliputi perhitungan konsentrasi aktivitas radionuklida hasil aktivasi, aktinida beserta anak luruhnya dan radionuklida hasil fisi. Selain itu penting juga untuk diketahui karakteristik beberapa hasil fisi yang kemungkinan dapat lepas dari *dry cask* ke lingkungan karena dalam penyimpanan BBNB terdapat *pebble* yang rusak lapisan TRISO nya. Adanya lapisan TRISO yang rusak akan mengakibatkan beberapa hasil fisi dapat berdifusi keluar lapisan TRISO dan keluar ke lingkungan [12], [20]. Hasil fisi yang keluar ke lingkungan dalam jumlah tertentu dapat berdampak negatif pada kesehatan. Selain itu terdeteksinya hasil fisi dalam lingkungan penyimpanan BBNB

dapat mengindikasikan terjadinya kerusakan *canister* maupun *dry cask* yang mengakibatkan beberapa hasil fisi tersebut keluar ke lingkungan [12,20].

Karakterisasi radionuklida pada BBNB *pebble* dalam penelitian ini dilakukan menggunakan program komputer ORIGEN 2.1 dengan data masukan yang berupa operasional reaktor AVR dan komposisi bahan bakar *pebble*. Dari hasil perhitungan akan diperoleh ratusan jenis radionuklida yang terbentuk dalam BBNB *pebble*. Dilakukan seleksi radionuklida yang terbentuk yaitu radionuklida yang berpengaruh dalam pengelolaan BBNB. Hasil karakterisasi radionuklida dalam BBNB berupa radionuklida hasil aktivasi, aktinida beserta anak luruhnya dan radionuklida hasil fisi. Selain itu juga dipelajari beberapa radionuklida hasil fisi yang kemungkinan dapat terlepas dari BBNB seperti  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{135}\text{Xe}$ , dan  $^{131}\text{I}$  yang berupa gas hasil fisi, serta radionuklida  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{110\text{m}}\text{Ag}$  dan  $^{107}\text{Pd}$ .

## TEORI

Perhitungan untuk karakteristik radionuklida pada BBNB reaktor *pebble bed* (AVR) yang telah mengalami iradiasi sampai mencapai *burn up* dilakukan menggunakan program komputer ORIGEN 2.1 atau *Oak Ridge Isotope Generation and depletion code version 2.1*. Perhitungan ORIGEN 2.1 didasarkan pada proses peluruhan dan terbentuknya radionuklida dalam BBNB sebuah *pebble* menurut persamaan [4], [21]–[24]:

$$\frac{dX_i}{dt} = \sum_{j=1}^N l_{ij} \lambda_j X_j - \phi \sum_{k=1}^N f_{ik} \sigma_k X_k - (\lambda_i + \phi \sigma_i + r_i) X_i + F_i, i = 1 \dots, N \quad (1)$$

dimana

$X_i$  = kerapatan atom nuklida i (atom/cm<sup>3</sup>)

$N$  = jumlah nuklida (atom)

$l_{ij}$  = fraksi peluruhan radioaktif, pembentukan nuklida j menjadi nuklida i (fraksional)

$\lambda_i$  = konstanta peluruhan radioaktif nuklida i (detik<sup>-1</sup>)

$\phi$  = fluks neutron rata-rata (n/cm<sup>2</sup>.detik)

$f_{ik}$  = fraksi serapan neutron nuklida k menjadi nuklida i (fraksional)

$\sigma_k$  = tampang lintang serapan neutron rerata nuklida k (barn)

$r_i$  = laju perpindahan nuklida i dari system (atom/detik)

$F_i$  = laju umpan nuklida i (atom/detik)

Melalui penyelesaian persamaan (1) menggunakan ORIGEN 2.1 diperoleh karakteristik radionuklida pada BBNB sebuah *pebble* seperti konsentrasi aktivitas dari radionuklida hasil aktivasi, aktinida dan anak luruhnya serta hasil fisi.

Hasil perhitungan karakteristik radionuklida menggunakan program ORIGEN 2.1 akan diperoleh ratusan jenis radionuklida. Terkait dengan keperluan pengelolaan limbah radioaktif khususnya BBNB maka diperlukan seleksi radionuklida yang memiliki kontribusi besar dalam penentuan metode pengolahan limbah radioaktif. Seleksi radionuklida didasarkan pada waktu paro, tingkat kliren dan tingkat radiotoksitas untuk setiap radionuklida sehingga karakteristik radionuklida hanya terdiri dari radionuklida yang memiliki umur paro panjang, radiotoksitas yang tinggi dan konsentrasi aktivitas yang besar [4], [25]. Salah satu masalah penting dalam pengelolaan limbah radioaktif adalah *delay and decay*, yaitu limbah radioaktif disimpan terlebih dahulu sebelum diproses. Hal ini dimaksudkan untuk peluruhan radionuklida umur paro pendek yang terkandung dalam limbah ataupun untuk pendinginan limbah dengan paparan radiasi yang besar. Dalam makalah ini disimulasikan kurun waktu peluruhan yaitu melalui penyimpanan BBNB dalam *dry cask* sampai dengan waktu 100 tahun sehingga hanya terdapat radionuklida yang memiliki umur paro panjang dan diatas kliren yang relevan untuk pengelolaan limbah radioaktif.

## METODOLOGI

Dalam penelitian ini perhitungan menggunakan ORIGEN 2.1 memerlukan data parameter input seperti jenis reaktor beserta parameter operasionalnya dan komposisi bahan bakar. Dalam penelitian ini perhitungan didasarkan kepada jenis reaktor *pebble bed* AVR dengan energi termal 46 MW, *burn up* 14,5% FIMA, bahan bakar tipe *pebble* dengan lapisan TRISO [8]. Diasumsikan bahwa setiap *pebble*

mengalami iradiasi dengan rata rata spesifik daya  $1,2 \times 10^{-4}$  MW selama 1170 hari. Bahan bakar *pebble* terdiri dari kernel yang berupa  $UO_2$  dengan pengayaan  $^{235}U$  sebesar 17% dengan jumlah 5 gram serta lapisan TRISO yang terdiri dari lapisan IPyC, SiC, OPyC masing-masing dengan tebal 0,004; 0,0035 dan 0,004 cm serta densitas lapisan masing-masing 1,9; 3,18; dan 1,9  $g/cm^3$  [8]. Data komposisi bahan bakar sebuah *pebble* seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi Bahan Bakar per *Pebble*

No.	Radionuklida	Jumlah (gram)
1	$^{234}U$	0,0002
2	$^{235}U$	0,7491
3	$^{238}U$	3,6570
4	$^{16}O$	0,5937
5	$^{12}C$	195,5376
6	$^{28}Si$	0,4073
Berat total 1 <i>pebble</i>		200,9448

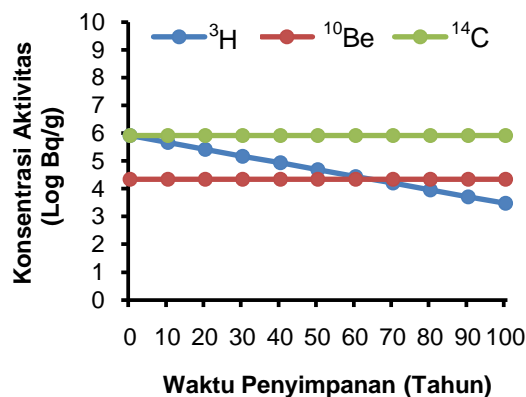
Persamaan 1 digunakan sebagai dasar perhitungan karakteristik radionuklida dalam BBNB menggunakan ORIGEN 2.1. Hasil perhitungan menggunakan ORIGEN 2.1 dapat diketahui karakteristik radionuklida yang terkandung dalam BBNB sebuah *pebble* yang meliputi seluruh kandungan radionuklida beserta konsentrasi aktivitasnya dalam waktu 0 sampai dengan 100 tahun. Dalam pembuatan grafik konsentrasi aktivitas radionuklida dalam BBNB digunakan satuan log Bq/g. Hal ini dimaksudkan hanya untuk penyederhanaan pembuatan dan penampilan grafik.

Pengelolaan BBNB *pebble* dari reaktor AVR dilakukan dengan system *dry cask* dalam jangka waktu lama (*long term storage*) sampai dengan 100 tahun. Disain *dry cask* BBNB terdiri dari 2 *canister* dengan kapasitas setiap *canister* memuat 950 buah *pebble*, sehingga dalam *dry cask* memuat 1900 buah *pebble*. Dalam penelitian ini total konsentrasi aktivitas juga dihitung untuk sebuah *dry cask* untuk penyimpanan BBNB jangka panjang yaitu sampai dengan 100 tahun.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil perhitungan menggunakan ORIGEN 2.1 berupa data output yang berisi seluruh jenis radionuklida yang dimungkinkan terbentuk karena adanya iradiasi bahan bakar dalam reaktor. Data output Origen 2.1 menunjukkan bahwa pada BBNB sebuah *pebble* segera setelah keluar dari reaktor didapat radionuklida berjumlah 208 jenis radionuklida yang terdiri dari 11 jenis radionuklida hasil aktivasi, 12 jenis radionuklida aktinida dan anak luruhnya serta 185 jenis radionuklida hasil fisi. Namun demikian dalam penyimpanan *dry cask* terdapat banyak radionuklida yang meluruh dan mencapai kliren, sehingga karakteristik radionuklida dalam BBNB sebuah *pebble* dalam penyimpanan sampai dengan 100 tahun seperti ditunjukkan pada Gambar 2 dan Gambar 4.

Kandungan radionuklida hasil aktivasi pada BBNB sebuah *pebble* pada penyimpanan sampai dengan 100 tahun ditunjukkan pada Gambar 2.

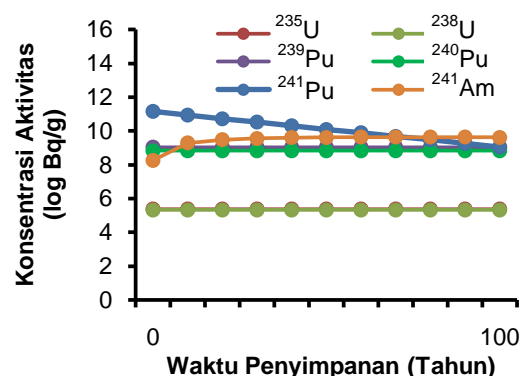


Gambar 2. Konsentrasi aktivitas radionuklida hasil aktivasi dalam BBNB sebuah *pebble*

Radionuklida hasil aktivasi dalam BBNB sebuah *pebble* muncul dari pengotor-pengotor yang ada dalam bahan bakar *pebble* yang kemudian teraktivasi oleh neutron. Oleh karena itu karakteristik limbah ini dipengaruhi oleh kemurnian bahan bakar *pebble*. Setelah dilakukan seleksi radionuklida berdasarkan waktu paro dan

tingkat kliren, maka karakteristik radionuklida hasil aktivasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Pada Gambar 2 terlihat karakteristik kandungan radionuklida dalam BBNB sebuah *pebble* hasil aktivasi yang signifikan berjumlah 3 radionuklida yaitu  $^3\text{H}$  ( $T_{1/2}$ :12,35 tahun),  $^{14}\text{C}$  ( $T_{1/2}$ : 5730 tahun), dan  $^{10}\text{Be}$  ( $T_{1/2}$ : $1,3 \times 10^6$  tahun). Radionuklida hasil aktivasi berasal dari reaksi tangkapan neutron dari grafit, lapisan bahan bakar kernel, dan oksigen dalam  $\text{UO}_2$ . Adanya  $^{14}\text{C}$  dalam hasil aktivasi berasal dari iradiasi neutron pada grafit, adanya  $^3\text{H}$  berasal dari beberapa sumber yang salah satunya berasal dari hasil fisi bahan bakar. BBNB sebuah *pebble* mengandung radionuklida hasil aktivasi dengan umur paro yang panjang dan yang terpanjang memiliki umur paro  $1,3 \times 10^6$  tahun yaitu  $^{10}\text{Be}$ . Sampai dengan waktu peluruhan 100 tahun tidak terdapat radionuklida yang habis meluruh tetapi masing-masing masih memiliki konsentrasi aktivitas  $2,946 \times 10^3$ ;  $21,966 \times 10^3$ ; dan  $809,804 \times 10^3$  Bq/g. Radionuklida hasil aktivasi ini memiliki konsentrasi aktivitas total  $8,35 \times 10^5$  Bq/g dan dikategorikan sebagai limbah tingkat sedang yang memerlukan pengelolaan dengan tingkat keselamatan yang tinggi [4], [24].

Karakteristik aktinida dan anak luruhnya pada BBNB sebuah *pebble* sampai dengan waktu penyimpanan 100 tahun ditunjukkan pada Gambar 3.

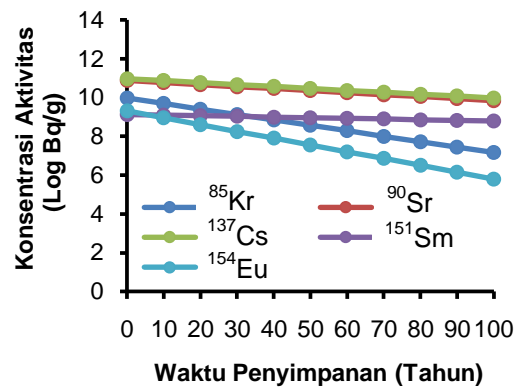


Gambar 3. Konsentrasi aktivitas aktinida dan anak luruhnya dalam BBNB sebuah *pebble*

Radioinuklida golongan aktinida terbentuk karena reaksi transmudasi inti uranium ( $^{238}\text{U}$ ) pada bahan bakar *pebble* dan produk dari reaksi berantai aktinida yang lain dalam reaktor nuklir [26]. Sebagian besar aktinida adalah radionuklida berumur paro sangat panjang dan yang terpanjang adalah sisa uranium yang tidak terbakar dalam reaktor dengan waktu paro sampai dengan milyar tahun. Setelah dilakukan seleksi radionuklida yang berdasarkan waktu paro dan tingkat kliren, maka karakteristik radionuklida aktinida dan anak luruhnya seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Gambar 3 menunjukkan karakteristik kandungan radionuklida aktinida dan anak luruhnya berjumlah 6 jenis yaitu  $^{235}\text{U}$  ( $T_{1/2}: 7,04 \times 10^8$  tahun),  $^{238}\text{U}$  ( $T_{1/2}: 4,47 \times 10^9$  tahun),  $^{239}\text{Pu}$  ( $T_{1/2}: 2,41 \times 10^4$  tahun),  $^{240}\text{Pu}$  ( $T_{1/2}: 6,5 \times 10^3$  tahun),  $^{241}\text{Pu}$  ( $T_{1/2}: 14,4$  tahun) dan  $^{241}\text{Am}$  ( $T_{1/2}: 4,32 \times 10^2$ ) tahun. Sampai dengan waktu penyimpanan 100 tahun BBNB ini memiliki konsentrasi aktivitas masing masing sebesar  $234,213 \times 10^3$ ;  $216,352 \times 10^3$ ;  $1,09 \times 10^9$ ;  $6,84 \times 10^8$ ;  $1,15 \times 10^9$ ; dan  $4,28 \times 10^9$  Bq/g untuk radionuklida  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ;  $^{239}\text{Pu}$ ;  $^{240}\text{Pu}$ ;  $^{241}\text{Pu}$  dan  $^{241}\text{Am}$ . Aktinida dan anak luruhnya ini memiliki konsentrasi aktivitas total  $7,203 \times 10^9$  Bq/g dan dikategorikan sebagai limbah tingkat sedang yang memerlukan pengelolaan dengan tingkat keselamatan yang tinggi [4], [24].

Karakteristik radionuklida hasil fisi pada BBNB sebuah *pebble* sampai dengan waktu penyimpanan 100 tahun ditunjukkan pada Gambar 4. Radionuklida hasil fisi terbentuk karena adanya reaksi fisi dari  $^{235}\text{U}$  dalam bahan bakar dengan neutron yang membentuk hasil fisi. Pada umumnya radionuklida hasil fisi merupakan radionuklida pemancar gamma dengan umur paro yang paling panjang hanya sampai ribuan tahun. Setelah dilakukan seleksi radionuklida yang berdasarkan waktu paro dan tingkat kliren, maka karakteristik radionuklida hasil fisi seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Pada Gambar

4 terlihat BBNB dari sebuah *pebble* dengan karakteristik kandungan radionuklida hasil fisi yang berjumlah 5 jenis yaitu  $^{85}\text{Kr}$  ( $T_{1/2}: 10,756$  tahun),  $^{90}\text{Sr}$  ( $T_{1/2}: 29,1$  tahun),  $^{137}\text{Cs}$  ( $T_{1/2}: 30,167$  tahun),  $^{151}\text{Sm}$  ( $T_{1/2}: 88,84$  tahun), dan  $^{155}\text{Eu}$  ( $T_{1/2}: 4,761$  tahun). Sampai dengan waktu penyimpanan dalam *dry cask* 100 tahun BBNB sebuah *pebble* masih memiliki konsentrasi aktivitas yang sangat tinggi yaitu sebesar  $1,46 \times 10^7$ ;  $7,03 \times 10^9$ ;  $9,47 \times 10^9$ ;  $6,27 \times 10^8$ ; dan  $6,43 \times 10^5$  Bq/g masing-masing untuk radionuklida  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{151}\text{Sm}$ , dan  $^{155}\text{Eu}$ . Radionuklida hasil fisi ini memiliki konsentrasi aktivitas total  $1,710 \times 10^{10}$  Bq/g dan dikategorikan sebagai limbah tingkat sedang yang memerlukan pengelolaan dengan tingkat keselamatan yang tinggi [4], [24].

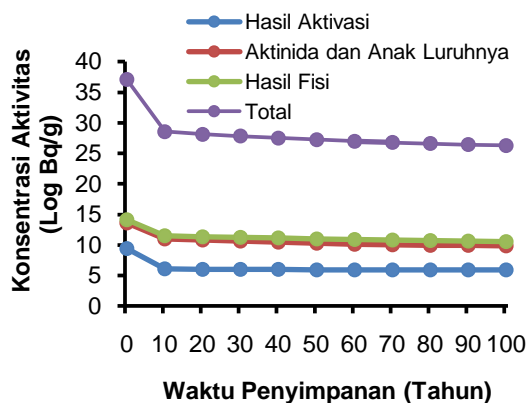


Gambar 4. Konsentrasi aktivitas radionuklida hasil fisi dalam BBNB sebuah *pebble*

Sampai dengan waktu penyimpanan dalam *dry cask* selama 100 tahun konsentrasi aktivitas total dari BBNB sebuah *pebble* yang mengandung radionuklida hasil aktivasi, aktinida dan anak luruhnya serta hasil fisi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Konsentrasi aktivitas total BBNB sebuah *pebble* adalah jumlah dari konsentrasi aktivitas untuk radionuklida hasil aktivasi, aktinida dan anak luruhnya serta hasil fisi. Pada Gambar 5 tampak bahwa konsentrasi aktivitas hasil aktivasi, aktinida dan anak luruhnya, serta hasil fisi memiliki konsentrasi aktivitas yang cukup stabil sampai dengan waktu penyimpanan dalam

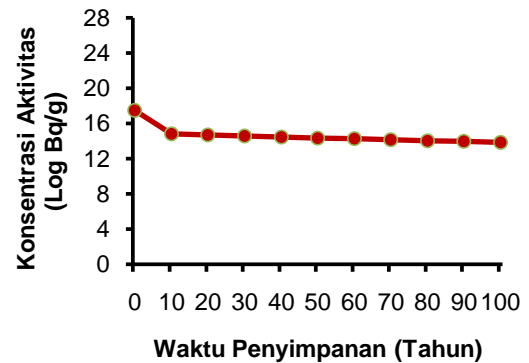


*dry cask* selama 100 tahun. Hal ini menunjukkan bahwa karakteristik radionuklida dalam BBNB sebuah *pebble* didominasi oleh radionuklida yang berumur paro panjang baik untuk radionuklida hasil aktivasi, aktinida maupun hasil fisi. Sampai dengan waktu penyimpanan dalam *dry cask* selama 100 tahun, BBNB sebuah *pebble* memiliki karakteristik kandungan radionuklida hasil aktivasi, aktinida dan anak luruhnya, serta radionuklida hasil fisi dengan total konsentrasi aktivitas sebesar  $4,03 \times 10^{10}$  Bq/g.



Gambar 5. Konsentrasi aktivitas total radionuklida dalam BBNB sebuah *pebble*

Pada pengelolaan BBNB dari operasional reaktor AVR di Jerman, penyimpanan BBNB dilakukan dengan sistem penyimpanan kering (*dry cask*). Model penyimpanan kering sebuah *dry cask* yang digunakan di Jerman terdiri dari 2 buah *canister* yang ditumpuk dalam satu *dry cask*. Dalam setiap *canister* memuat 950 buah *pebble*, sehingga dalam satu *dry cask* memuat 1900 buah *pebble*. Perhitungan total konsentrasi aktivitas dalam satu *dry cask* mulai BBNB keluar dari reaktor sampai penyimpanan 100 tahun ditunjukkan pada Gambar 6. Perhitungan total konsentrasi aktivitas dalam Gambar 6 didasarkan pada asumsi bahwa semua BBNB *pebble* dalam satu *dry cask* adalah BBNB yang utuh dan tidak terdapat BBNB *pebble* yang rusak terutama rusak lapisan TRISO.



Gambar 6. Konsentrasi Aktivitas BBNB dalam *Dry Cask*

Pada Gambar 6 tampak bahwa konsentrasi aktivitas BBNB dalam *dry cask* cenderung stabil sampai dengan waktu penyimpanan 100 tahun. Hal ini dapat terjadi karena kandungan radionuklida dalam BBNB didominasi oleh radionuklida berumur paro panjang. Sampai dengan waktu penyimpanan 100 tahun konsentrasi aktivitas radionuklida total dalam *dry cask* sebesar  $7,66 \times 10^{13}$  Bq/g.

Data karakteristik radionuklida hasil aktivasi, aktinida dan anak luruhnya serta hasil fisi yang dihitung ini diperlukan dalam analisis keselamatan dalam pengelolaan BBNB antara lain untuk mendisain *dry cask* BBNB seperti pemilihan bahan *canister*, sistem penahan (*shielding*), sistem pendingin, kapasitas *canister* dan lainnya. Hal ini untuk menjamin keselamatan pekerja radiasi beserta lingkungannya.

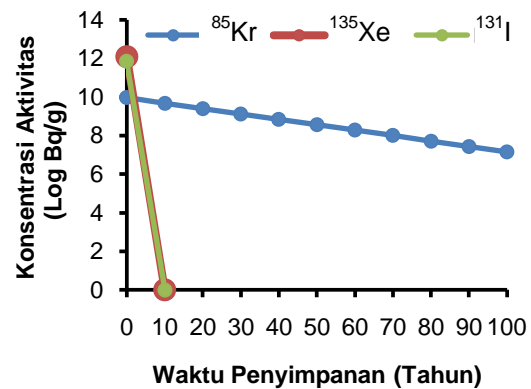
Pada faktanya BBNB yang disimpan dalam *dry cask* merupakan campuran BBNB dari *pebble* yang utuh dan rusak. BBNB yang utuh mampu menyimpan hasil aktivasi, aktinida dan hasil fisi tetap berada dalam kernel, sehingga dalam *dry cask* diasumsikan tidak terdapat hasil aktivasi, aktinida dan hasil fisi yang keluar dari BBNB. Namun pada faktanya dalam operasional reaktor AVR terdapat *pebble* yang rusak terutama rusak lapisan TRISO, sehingga BBNB yang disimpan dalam *dry cask* merupakan campuran BBNB dari *pebble* yang utuh dan *pebble* yang rusak.

Adanya *pebble* yang rusak dalam *canister* BBNB mengakibatkan terdapat akumulasi hasil fisi dalam *canister* seperti hasil fisi yang berupa gas yang memungkinkan dapat keluar dari *canister*, *dry cask* dan akhirnya dapat lepas ke lingkungan.

Terdapat beberapa hasil fisi yang perlu diperhatikan terkait dengan kerusakan lapisan TRISO pada penyimpanan BBNB dalam *dry cask* :

1. Radionuklida hasil fisi yang berupa gas seperti  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{135}\text{Xe}$ , dan  $^{131}\text{I}$ . Pada kondisi operasi reaktor normal, kernel dalam bahan bakar mampu menahan lebih dari 95% gas-gas hasil fisi [11]. Namun efektivitas kernel dalam menahan hasil fisi gas dapat menurun jika terjadi kerusakan pada lapisan TRISO, terutama lapisan *pyrolytic carbon* densitas tinggi sebelah dalam (IPyC) yang berfungsi untuk menahan hasil belah, khususnya  $^{85}\text{Kr}$  dan  $^{135}\text{Xe}$  serta sebagai pelindung terhadap kernel bahan bakar. Adanya kerusakan pada salah satu lapisan TRISO dapat meningkatkan kemungkinan terjadinya pelepasan gas gas hasil fisi keluar dari BBNB dan terakumulasi dalam *canister*. Jika terjadi kecelakaan pada penyimpanan BBNB, gas-gas ini dapat terlepas dari *canister* keluar *dry cask* dan akhirnya dapat keluar ke lingkungan. Walaupun radionuklida  $^{85}\text{Kr}$  dan  $^{135}\text{Xe}$  yang memiliki waktu paro masing masing 10,756 tahun dan 9,14 jam termasuk golongan gas mulia sehingga bersifat inert dan tidak berbahaya terhadap kesehatan. Namun terdeteksinya gas-gas hasil fisi ini di lingkungan penyimpanan BBNB dapat mengindikasikan terjadinya kerusakan *canister* dan *dry cask* pada sistem *dry storage* BBNB. Selain itu adanya  $^{131}\text{I}$  yang ikut lepas ke lingkungan walaupun dengan waktu paro pendek yaitu 8,021 hari, tetapi  $^{131}\text{I}$  dalam jumlah yang cukup besar dapat meningkatkan kemungkinan terjadinya penyakit kanker pada kelenjar

gondok di kemudian hari. Berbeda dengan gas  $^{85}\text{Kr}$  dan  $^{135}\text{Xe}$  yang bersifat inert, gas  $^{131}\text{I}$  dapat terserap oleh manusia dan tersimpan dalam kelenjar tiroid. Paparan terhadap kelenjar tiroid pada dosis sedang sampai tinggi ( $2,4 \times 10^4 \sim 7,4 \times 10^6$  PBq)  $^{131}\text{I}$  akan meningkatkan resiko untuk kanker tiroid [25,27]. Oleh karena itu penting untuk diketahui seberapa besar jumlah radionuklida  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{135}\text{Xe}$ , dan  $^{131}\text{I}$  dalam BBNB sebuah *pebble* dalam penyimpanan *dry cask* sampai dengan waktu 100 tahun dengan hasil perhitungan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.

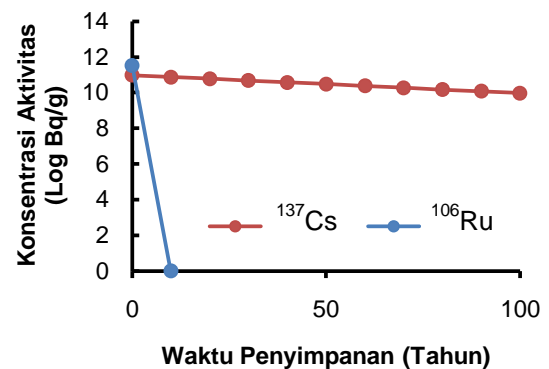


Gambar 7. Konsentrasi aktivitas radionuklida  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{135}\text{Xe}$ , dan  $^{131}\text{I}$

Gambar 7 tampak bahwa konsentrasi aktivitas radionuklida gas hasil fisi  $^{135}\text{Xe}$  dan  $^{131}\text{I}$  memiliki kecenderungan yang mirip satu sama lain dan sangat berdekatan (berimpit) yaitu meluruh dengan cepat mulai dari keluar dari teras reactor sampai dengan waktu penyimpanan 10 tahun. Hal ini karena kedua radionuklida tersebut memiliki waktu paro yang sangat pendek yaitu masing masing 9,14 jam dan 8,02 hari untuk  $^{135}\text{Xe}$  dan  $^{131}\text{I}$ . Pada Gambar 7 juga tampak bahwa  $^{85}\text{Kr}$  meluruh dengan kecepatan lebih lambat dibandingkan dengan  $^{135}\text{Xe}$  dan  $^{131}\text{I}$ , dan bahkan tetap ada sampai waktu penyimpanan 100 tahun. Hal ini karena  $^{85}\text{Kr}$  memiliki waktu paro yang panjang yaitu 10,756 tahun. Sampai dengan

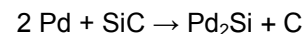
waktu penyimpanan BBNB 100 tahun konsentrasi aktivitas  $^{85}\text{Kr}$  sebesar  $1,46 \times 10^7$  Bq/g. Secara keseluruhan, bahan bakar pebble memiliki performa yang sangat bagus. Hal ini karena adanya lapisan TRISO sebagai penahan utama terhadap pelepasan hasil fisi keluar dari bahan bakar. Adanya migrasi radionuklida hasil fisi keluar BBNB dapat mengindikasikan bahwa terdapat kerusakan lapisan TRISO. Di antara lapisan TRISO, lapisan SiC mempunyai peranan penting yaitu untuk mempertahankan integritas mekanik dan stabilitas dimensi dari partikel bahan bakar. Selain itu lapisan SiC juga sebagai penahan hasil belah yang bersifat logam seperti  $^{137}\text{Cs}$ , dan  $^{106}\text{Ru}$  yang lepas dari kernel bahan bakar [20]. Jika telah terjadi kerusakan lapisan SiC pada bahan bakar dalam teras reaktor, tatkala menjadi BBNB maka hasil fisi  $^{137}\text{Cs}$  dan  $^{106}\text{Ru}$  akan terus keluar dari BBNB selama dalam penyimpanan. Radionuklida hasil belah  $^{137}\text{Cs}$  dan  $^{106}\text{Ru}$  termasuk radionuklida dengan tingkat "toksisitas tinggi". Pengertian radiotoksitas adalah toksisitas yang terkandung dalam radiasi pengion yang dipancarkan oleh suatu radionuklida dan turunannya. Radiotoksitas tidak hanya dikaitkan dengan karakteristik radioaktivitas sumber, tetapi juga dengan sifat fisika dan kimianya, yaitu ukuran kemampuan radionuklida apabila masuk dalam tubuh menyebabkan kerusakan jaringan dan organ tubuh [25]. Oleh karena itu penting untuk menghitung konsentrasi aktivitas  $^{137}\text{Cs}$  dan  $^{106}\text{Ru}$  yang terkandung dalam BBNB sebuah *pebble* dalam penyimpanan *dry cask*. Hasil perhitungan seperti ditunjukkan pada Gambar 8. Pada Gambar 8 tampak konsentrasi aktivitas radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  dan  $^{106}\text{Ru}$  yang terkandung dalam BBNB sebuah *pebble* dalam penyimpanan *dry cask* mulai keluar dari teras reaktor sampai dengan waktu penyimpanan 100

tahun. Pada gambar tampak radionuklida  $^{106}\text{Ru}$  meluruh dengan cepat hanya dalam waktu penyimpanan 10 tahun, karena radionuklida  $^{106}\text{Ru}$  memiliki waktu paro pendek yaitu 373,59 hari. Radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  memiliki konsentrasi aktivitas yang mendekati stabil sampai dengan waktu penyimpanan 100 tahun. Hal ini karena  $^{137}\text{Cs}$  memiliki waktu paro yang relatif panjang yaitu 30,17 tahun.

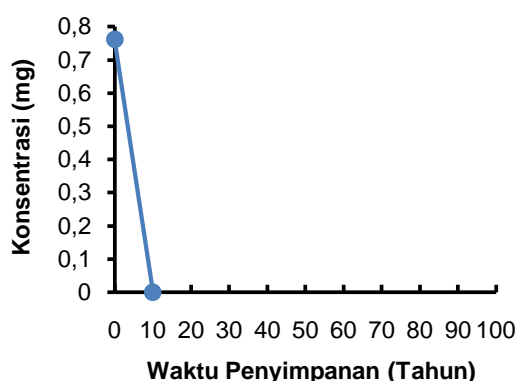


Gambar 8. Konsentrasi Aktivitas  $^{137}\text{Cs}$  dan  $^{106}\text{Ru}$  dalam BBNB sebuah *Pebble*

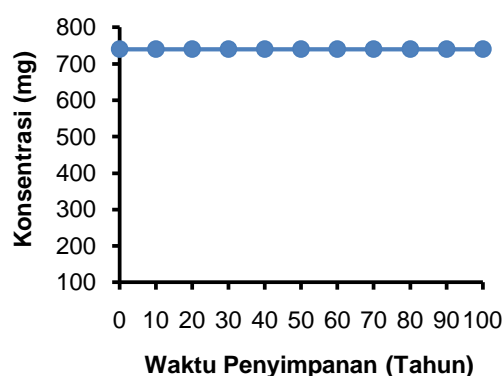
Keunggulan dari bahan bakar *pebble* terletak pada peranan penting dari keberadaan lapisan TRISO yang cukup kuat menjaga integritas bahan bakar. Adanya kerusakan BBNB dapat mengakibatkan lepasnya beberapa hasil fisi seperti  $^{110m}\text{Ag}$  dan  $^{107}\text{Pd}$  dari kernel dan dapat menembus lapisan SiC [28]. Hasil fisi  $^{107}\text{Pd}$  dapat bereaksi dengan lapisan SiC dan mengakibatkan korosi bahan bakar dengan reaksi sebagai berikut [11,13,29].



Perhitungan  $^{110m}\text{Ag}$  dan  $^{107}\text{Pd}$  perlu dilakukan untuk memperkirakan pengaruh radionuklida  $^{110m}\text{Ag}$  dan  $^{107}\text{Pd}$  terhadap integritas bahan bakar. Gambar 9 dan Gambar 10 masing masing menunjukkan konsentrasi aktivitas  $^{110m}\text{Ag}$  dan  $^{107}\text{Pd}$  mulai bahan bakar keluar dari teras reaktor sampai dengan waktu penyimpanan selama 100 tahun dalam *dry cask*.



Gambar 9. Konsentrasi Aktivitas Radionuklida  $^{110m}\text{Ag}$  dalam sebuah BBNB sebuah *Pebble*



Gambar 10. Konsentrasi aktivitas radionuklida  $^{107}\text{Pd}$  dalam BBNB sebuah *Pebble*

Gambar 9 tampak konsentrasi aktivitas  $^{110m}\text{Ag}$  yang meluruh hanya sampai dengan waktu penyimpanan 10 tahun. Hal ini karena waktu paro  $^{110m}\text{Ag}$  yang pendek yaitu 249,95 hari. Dalam penyimpanan *dry cask* sampai dengan waktu penyimpanan 100 tahun,  $^{107}\text{Pd}$  memiliki konsentrasi aktivitas yang cenderung stabil seperti yang terlihat pada Gambar 10. Hal ini karena  $^{107}\text{Pd}$  memiliki waktu paro yang cukup panjang yaitu  $6,5 \times 10^6$  tahun.

## SIMPULAN

Karakterisasi radionuklida dalam BBNB *pebble* dilakukan menggunakan program komputer ORIGEN 2.1. Perhitungan didasarkan pada BBNB dari operasional reaktor AVR dan BBNB disimpan dalam *dry cask* sampai dengan waktu penyimpanan 100 tahun. Hasil perhitungan menunjukkan

bahwa sampai dengan penyimpanan 100 tahun, BBNB sebuah *pebble* memiliki karakteristik radionuklida hasil aktivasi yaitu radionuklida yaitu  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$  dan  $^{10}\text{Be}$ , aktinida dan anak luruhnya yaitu  $^{235}\text{U}$ ;  $^{238}\text{U}$ ;  $^{239}\text{Pu}$ ;  $^{240}\text{Pu}$ ;  $^{241}\text{Pu}$  dan  $^{241}\text{Am}$  dan radionuklida hasil fisi yaitu  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{151}\text{Sm}$ , dan  $^{155}\text{Eu}$  dengan total konsentrasi aktivitas sebesar  $4,03 \times 10^{10}$  Bq/g. Pengelolaan BBNB ini dilakukan dengan penyimpanan dalam *dry cask* yang memiliki kapasitas 1900 BBNB *pebble*, sehingga sampai dengan waktu penyimpanan 100 tahun total aktivitas dalam 1 *dry cask* sebesar  $7,66 \times 10^{13}$  Bq/g. Pada faktanya dalam operasional reaktor AVR terdapat bahan bakar yang rusak lapisan TRISO, sehingga pada penyimpanan BBNB dalam *dry cask* merupakan campuran dari BBNB utuh dan BBNB rusak lapisan TRISO. Terdapat radionuklida yang dapat keluar dari lapisan TRISO diantaranya adalah  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{135}\text{Xe}$ , dan  $^{131}\text{I}$  yang berupa gas,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{110m}\text{Ag}$  dan  $^{107}\text{Pd}$ .

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Kepala Pusat Teknologi Limbah Radioaktif atas kesempatan yang diberikan untuk mengikuti program Insinas Flagship Tahun 2018. Kepada Kementerian Riset Dikti juga kami mengucapkan terimakasih atas dukungan dana penelitian melalui program Insinas Flagship sehingga karya tulis ilmiah ini dapat diselesaikan dengan baik.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. Setiadipura, S. Bakhri, G. R. Sunaryo, D. S. Wisnusubroto, "Cooling passive safety features of reaktor daya eksperimental," *AIP Conf. Proc.*, vol. 1984, 2018.
- [2] P. H. Liem, T. M. Sembiring, H. N. Tran, "Evaluation on fuel cycle and loading scheme of the Indonesian Experimental Power Reactor (RDE) design," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 340, pp. 245–259, 2018.

- [3] T. Setiadipura, D. Irwanto, Z. Zuhair, "Preliminary neutronic design of high burnup OTTO cycle pebble bed reactor," *Atom Indones.*, vol. 41, no.1, pp. 7–15, 2015.
- [4] Aisyah, P. A. Artiani, Y. Purwanto, "Karakterisasi limbah dari produksi radioisotop Molibdenum-99," *J. Iptek Nukl. Ganendra*, vol. 99, pp. 71–82, 2018.
- [5] R. S. Sen and C. F. Viljoen, "The re-evaluation of the AVR melt-wire experiment with specific focus on different modeling strategies and simplifications," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 251, pp. 306–316, 2012.
- [6] T. Dudley, P. de Villiers, W. Bouwer, R. Luh, "The operator training simulator system for the pebble bed modular reactor (PBMR) plant," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 238, no. 11, pp. 2908–2915, 2008.
- [7] I. V. Dulera, R. K. Sinha, A. Rama Rao, and R. J. Patel, "High Temperature Reactor Technology Development in India," *Prog. Nucl. Energy*, vol. 101, pp. 82–99, 2017.
- [8] M. J. Kania, H. Nabielek, K. Verfondern, H. J. Allelein, "Testing of HTR UO<sub>2</sub> TRISO fuels in AVR and in Material Test Reactors," *J. Nucl. Mater.*, vol. 441, no. 1–3, pp. 545–562, 2013.
- [9] P. A. Demkowicz, B. Liu, J. D. Hunn, "Coated particle fuel: historical perspectives and current progress," *J. Nucl. Mater.*, 2018.
- [10] W. Ji, C. Liang, E. N. Pusateri, "Analytical dancoff factor evaluations for reactor designs loaded with TRISO particle fuel," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 63, pp. 665–673, 2014.
- [11] E. Dewita, "Pengembangan partikel bahan bakar berlapis untuk reaktor VHTR," *J. Pengemb. Energi Nukl.*, vol. 10 No. 2, 2008.
- [12] H. Jeong, Y. H. Jeong, S. H. Chang, "Model development for the estimation of fission product release under normal and accident conditions in a HTGR," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 239, no. 6, pp. 1066–1075, 2009.
- [13] N. Cerullo, G. Lomonaco, "Corrosion issues in high temperature gas-cooled reactor (HTR) systems," *Nucl. Corros. Sci. Eng.*, pp. 731–772, 2012.
- [14] K. Verfondern, "AVR Decommissioning," *IAEA Mission to PTLR-BATAN on HTGR Decommissioning and Waste*, May 15-19<sup>th</sup>, 2017. Jakarta, Indonesia
- [15] J. Li, D. She, L. Shi, "Burnup characteristics analyses of graphite impurities in HTGR fuel element," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 118, pp. 165–169, 2018.
- [16] P. H. Liem, H.-N. Tran, T. M. Sembiring, B. Arbie, I. Subki, "Alternative fueling scheme for the Indonesian Experimental Power Reactor (10 MWth Pebble-Bed HTGR)," *Energy Procedia*, vol. 131, pp. 69–76, Dec. 2017.
- [17] I. Husnayani, P. M. Udiyani, "Radionuclide characteristics of RDE spent fuels," *J. Teknol. Reakt. Nukl. Tri Dasa Mega*, vol. 20, no. 2, p. 69, 2018.
- [18] Y. Fukaya, M. Goto, H. Ohashi, T. Nishihara, Y. Tsubata, T. Matsumura, "Optimization of disposal method and scenario to reduce high level waste volume and repository footprint for HTGR," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 116, pp. 224–234, Jun. 2018.
- [19] L. Zhu, W. Duan, J. Xu, Y. Zhu, "Uranium extraction from TRISO-coated fuel particles using supercritical CO<sub>2</sub> containing Tri-N-Butyl Phosphate," *J. Hazard. Mater.*, vol. 241–242, pp. 456–462, 2012.
- [20] M. P. Kissane, "A review of radionuclide behaviour in the primary system of a very-high-temperature reactor," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 239,

- no. 12, pp. 3076–3091, 2009.
- [21] I. Husnayani, "Fission products inventory analysis of HTGR fuel by using ORIGEN 2.1 computer code," *Pros. Semin. Nas. Teknol. Energi Nukl. ISSN 2355-7524*, 2016.
- [22] A. Rohanda, "Komparasi hasil perhitungan inventori hasil fisi teras PLTN PWR 1000 MWe antara ORIGEN 2.1 dengan ORIGEN-ARP," *Sigma Epsil.*, 2013.
- [23] K. Hadad, M. Nematollahi, A. Golestani, "VVER-1000 cross-section library generation for ORIGEN-II based on MCNP calculations," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 44, pp. 15158–15163, 2015.
- [24] Aisyah, Y. Purwanto, "Estimasi limbah radioaktif lazy susan dan beamport dalam perencanaan dekomisioning reaktor Triga 2000 Bandung," *J. Teknol. Pengelolaan Limbah, Pus. Teknol. Limbah Radioakt.*, vol. 15, pp. 1–14, 2012.
- [25] G. Alonso, E. Martinez, J. R. Ramirez, H. Hernandez, "Radiotoxicity implications and reduction strategies of minor actinide in a boiling water reactor," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 99, pp. 410–420, Jan. 2017.
- [26] T. Akyurek, L. P. Tucker, S. Usman, "Review and characterization of best candidate isotopes for burnup analysis and monitoring of irradiated fuel," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 69, pp. 278–291, 2014.
- [27] J. M. Tando, "Potensi pemanfaatan rumput laut cokelat corong (*Turbinaria Conoides*) untuk mengurangi resiko kanker tiroid pada manusia yang terpapar radiasi Iodium 131 akibat kecelakaan nuklir Fukushima," *Intisari Sains Medis*, vol. 1, no. 1, pp. 49–55, 2014.
- [28] G. M. De Bellefon, B. D. Wirth, "Kinetic Monte Carlo (KMC) simulation of fission product silver transport through TRISO fuel particle," *J. Nucl. Mater.*, vol. 413, no. 2, pp. 122–131, 2011.
- [29] E. Dewita, S. Alimah, "Analisis kinerja bahan bakar reaktor tipe HTGR sebagai penghalang produk fisi," *J. Pengemb. Energi Nukl.*, vol. 19, no. 1, pp. 1–9, 2017.