



Analisis Kinerja Bahan Bakar Reaktor Tipe HTGR Sebagai Penghalang Produk Fisi

Erlan Dewita*, Siti Alimah

Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir (PKSEN)-BATAN

Jl. Kuningan Barat, Mampang Prapatan, Jakarta Selatan, 12710, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Riwayat Artikel:

Diterima:

17 Mei 2017

Diterima dalam bentuk revisi:

16 Juni 2017

Disetujui:

20 Juni 2017

Kata kunci:

Kinerja bahan bakar

HTGR

Produk fisi

Temperatur tinggi

Moderator

ABSTRAK

ANALISIS KINERJA BAHAN BAKAR REAKTOR TIPE HTGR SEBAGAI PENGHALANG PRODUK FISI. Reaktor tipe HTGR merupakan reaktor berpendingin gas temperatur tinggi (~ 900°C). Terdapat 2 tipe elemen bakar HTGR yaitu prismatic dan *pebble bed*. Kedua tipe elemen bakar tersebut tersusun dari partikel berlapis TRISO yang terdiri dari lapisan IPyC, SiC dan OPyC yang berfungsi sebagai pengungkung produk fisi dan menjaga integritas bahan bakar. Reaktor beroperasi dengan temperatur tinggi, sehingga kinerja/ kemampuan bahan bakar dalam menahan produk fisi perlu diketahui. Tujuan studi adalah untuk memperoleh pemahaman tentang karakteristik produk fisi yang dihasilkan bahan bakar, karakteristik penghalang dan kinerja bahan bakar dalam menahan produk fisi. Metode yang digunakan adalah kajian dan analisis dengan mengevaluasi kemampuan penghalang (*barrier*) dalam menahan produk fisi pada elemen bakar prismatic dan *pebble*. Hasil studi menunjukkan bahwa terdapat beberapa mekanisme potensial lepasnya produk fisi, yaitu: difusi melalui lapisan, kerusakan lapisan, korosi SiC oleh produk fisi palladium dan dekomposisi termal SiC. Bahan bakar merupakan penghalang pertama terhadap lepasnya radionuklida produk fisi sedangkan lapisan SiC merupakan penghalang utama yang menahan sebagian besar produk fisi gas dan padat pada temperatur operasi normal (< 1250°C). Produk fisi penting yang terbentuk adalah ¹³⁷Cs, ¹⁰⁷Pd, ¹⁰⁶Rh, ¹⁰⁶Ru, ^{110m}Ag, ¹³⁴I, ¹³¹Cs, ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ⁸⁸Kr dan ¹³³Xe, ¹³²Te, ¹⁴⁰La dan ²³⁹Pu. Di antara produk fisi tersebut, palladium (Pd) yang lepas dari kernel dan mencapai lapisan SiC dapat bereaksi dan menyebabkan korosi. Berdasarkan hal itu, untuk menjaga integritas bahan bakar harus dilakukan pembatasan kondisi operasi reaktor, seperti: temperatur, derajat bakar, energi aktivasi produk fisi dan kualitas bahan bakar. Pada bahan bakar tipe prismatic, terdapat 8 penghalang, yaitu: kernel bahan bakar, lapisan SiC dan PyC, matriks grafit, kompak (pil) bahan bakar, *sleeve* grafit, sirkuit primer, blok grafit heksagonal dan bangunan reaktor. Sedangkan pada bahan bakar *pebble* terdapat 6 penghalang, yaitu kernel bahan bakar, lapisan SiC dan PyC, matriks grafit, lapisan grafit sebelah luar, sirkuit primer dan bangunan reaktor. Namun, jumlah penghalang bukan merupakan satu-satunya faktor yang menentukan adanya kemungkinan lepasnya produk fisi ke lingkungan.

ABSTRACT

ANALYSIS FOR HTGR TYPE REACTOR FUEL PERFORMANCE AS THE BARRIER PRODUCT FISSION. HTGR type reactor is gas cooled reactor with high outlet temperature (~ 900°C). There are 2 types of HTGR fuel elements, prismatic and pebble bed. Both types of fuel elements composed of TRISO-coated particles are composed of layers IPyC, SiC and OPyC which serves as a confinement of fission products and maintain the integrity of the fuel. The reactor has high operating temperature, so fuel performance in retaining of fission products need to be understand. The purpose of the study is to obtain an understanding of the essential characteristics of fission products produced in the HTGR fuel, fission product barrier characteristics and fuel performance in retaining fission products. The method used is the study and analysis by evaluating capabilities (*barrier*) in retaining the fission products in the prismatic and pebble fuel elements. The results of this study shows that there are several potential mechanisms against the release of fission products, namely: diffusion through the coating, coating damage, SiC corrosion by palladium product fission and thermal decomposition of SiC. The fuel is the first barrier against radionuclide release of fission products and the SiC layer is the primary barrier and it hold almost the gas and solid fission products at normal operating temperature (< 1250°C). The main fission products produced are ¹³⁷Cs, ¹⁰⁷Pd, ¹⁰⁶Rh, ¹⁰⁶Ru, ^{110m}Ag, ¹³⁴I, ¹³¹Cs, ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ⁸⁸Kr and ¹³³Xe, ¹³²Te, ¹⁴⁰La and ²³⁹Pu. Among the fission products, palladium (Pd) when released from the kernel and reach the SiC coating can react and cause corrosion. Therefore, to maintain the integrity of the fuel, the temperature should be restrictions to burnup, the activation energy of the fission products and fuel quality, so that the release of fission products into the environment can be avoided. There are 8 barriers in the prismatic type fuel, namely: coated fuel particles, graphite matrix, a compact fuel sleeve graphite, and hexagonal graphite blocks. While, there are 6 barrier against the release of fission products the pebble fuel, namely the coated particles, the matrix graphite and graphite outer layer by considering the operating temperature, burn up and fission product confinement contained in the fuel elements. However, number of barriers is not the only factor that determines whether or not the possibility of fission products released into the environment.

Keywords: performance, fuel, HTGR, fission products, high temperature, moderator.

1. PENDAHULUAN

Reaktor Temperatur Tinggi (HTR = *High Temperature Reactor*) adalah salah satu jenis reaktor daya tipe maju dengan efisiensi termal tinggi yang mempunyai sistem keselamatan pasif dan melekat (*passive and inherent safety*) dan sangat andal. Dari beberapa tipe reaktor temperatur tinggi, salah satu yang menarik adalah Reaktor Gas Temperatur Tinggi (*High Temperature Gas-cooled Reactor, HTGR*). Reaktor ini menggunakan grafit sebagai moderator & reflektor, gas helium sebagai pendingin *inert* yang mempunyai fase tunggal, bahan bakar partikel berlapis dan teras berdensitas daya rendah. Penggunaan bahan teras yang bersifat tahan panas dikombinasi dengan pendingin helium menyebabkan suhu pendingin dapat mencapai 900°C , efisiensi termal yang tinggi dan kemampuan yang tinggi dari bahan bakar partikel berlapis dalam menahan produk fisi merupakan beberapa keuntungan Reaktor Temperatur Tinggi [1,2]. Terdapat dua tipe HTGR, yaitu HTGR yang menggunakan elemen bakar bentuk prisma dan HTGR menggunakan elemen bakar bentuk bola (*Pebble Bed*). Baik elemen bakar bentuk prisma maupun *pebble bed* masing-masing mempunyai kelebihan dan kekurangan. Elemen bakar bentuk prisma mempunyai komposisi struktur geometri teras yang lebih pasti (mirip dengan teras LWR), dengan demikian analisis neutronik dan *thermal-flow* juga lebih mudah dan lebih akurat[3]. Ke dua teknologi reaktor daya ini terbukti dapat terbebas dari risiko pelelehan teras, karena mengadopsi partikel TRISO, dan mempunyai reaktivitas umpan balik yang negatif. Sedangkan, HTGR dengan elemen bakar bentuk *pebble bed* mempunyai kelebihan dalam fleksibilitas pola pengisian bahan bakar, karena pengisian bahan bakar dapat dilakukan secara on-line dengan beberapa kali melewati teras (*multi pass*). Selain itu, konduktivitas panas elemen bakar bentuk *pebble bed* relatif lebih tinggi dibandingkan elemen bakar bentuk prisma[4]. HTGR prisma dikembangkan pertama kali oleh General Atomic, USA, sedangkan HTGR elemen bakar bola dikembangkan pertama kali oleh Nukem GmbH Jerman. Namun demikian, komponen dasar kedua elemen bakar tersebut adalah partikel

bahan bakar berlapis TRISO (*tri iso-structural*), di mana kernel bahan bakar UO_2 , UCO, UC dan $(\text{U,Th})_2$ dilapisi dengan lapisan TRISO yang tersusun dari 4 lapisan, mulai dari yang paling dalam yaitu lapisan karbon berpori (lapisan *buffer*), lapisan pirokarbon densitas rendah di bagian dalam, lapisan silikon karbida (lapisan SiC) dan lapisan pirokarbon densitas tinggi di sebelah luar. Pada HTGR teras prisma, partikel bahan bakar berlapis TRISO terdistribusi dalam matriks grafit dan dibentuk menjadi silinder yang disebut kompak (pil) bahan bakar, selanjutnya kompak disusun membentuk batang bahan bakar dan diberi *sleeve* grafit. Selanjutnya batang bahan bakar dimasukkan dalam blok heksagonal[5,6]. Pada HTGR teras *pebble bed*, partikel TRISO bersama matriks grafit dibentuk menjadi bola (*pebble*) dan bagian bola bahan bakar dilapisi dengan lapisan grafit[7]. Dari hasil analisis teknologi berdasar aspek strategi nasional dan aspek tekno ekonomi, pada studi yang telah dilakukan sebelumnya, HTGR yang menggunakan bahan bakar *pebble* memiliki nilai lebih unggul dibanding HTGR yang menggunakan bahan bakar prisma[8].

Terdapat beberapa produk fisi penting yang dihasilkan dalam bahan bakar selama reaktor beroperasi, seperti ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{131}I , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{85}Kr dan ^{133}Xe , ^{107}Pd [9,10]. Produk fisi tersebut diusahakan agar tetap terkungkung dalam bahan bakar dan tidak terlepas ke lingkungan selama reaktor beroperasi. Produk fisi tertentu, seperti: paladium (Pd) apabila mendifusi menuju lapisan-lapisan dalam partikel bahan bakar dapat menyebabkan korosi, sehingga merusak integritas bahan bakar.

Kinerja dan kemampuan bahan bakar dalam menahan produk fisi merupakan aspek yang penting diperhatikan dengan mengevaluasi faktor penyebab lepasnya produk fisi dan penghalang (*barrier*) yang dimiliki. Penyebab dominan adalah kerusakan bahan bakar yang diantaranya disebabkan oleh korosi akibat adanya interaksi produk fisi tertentu dengan lapisan partikel bahan bakar. Selanjutnya, adanya produksi fisi yang bersifat volatil (seperti: Cs, Ag, Sr) dimana pada temperatur yang cukup tinggi dan waktu yang lama dapat terdifusi melalui lapisan SiC dan lepas dari partikel TRISO. Mekanisme penting yang dapat menyebabkan kerusakan lapisan

akibat radiasi sudah diketahui sebagai hasil uji paska iradiasi.

Studi ini bertujuan untuk memperoleh pemahaman tentang karakteristik produk fisi yang dihasilkan bahan bakar, kinerja elemen bakar, dan evaluasi penghalang (*barrier*) terhadap lepasnya produk fisi dari elemen bakar baik prismatic maupun *pebble*. Hasil studi diharapkan dapat menjadi bahan masukan sebagai pertimbangan dalam pemilihan teknologi HTGR yang akan diterapkan di Indonesia.

2. TEORI

Bahan bakar merupakan penahan/penghalang (*barrier*) pertama dalam reaktor nuklir agar produk fisi tetap berada dalam bahan bakar, sehingga apabila ada yang terlepas ke pendingin primer tidak melebihi batas yang diizinkan. Dalam reaktor gas emperatur tinggi ada dua macam bentuk elemen bakar yaitu tipe bola (*pebble*) yang dikembangkan oleh Jerman, Rusia, Afrika Selatan dan Cina dan tipe blok prismatic yang dikembangkan oleh General Atomic-Amerika Serikat dan Japan Atomic Energy Agency, Jepang. Walaupun bentuk elemen bakar berbeda, tetapi kedua tipe elemen bakar tersebut tersusun dari partikel bahan bakar yang sama yaitu partikel berlapis TRISO (Tri-structural isotropic coated fuel).

Partikel berlapis TRISO merupakan kernel bahan bakar (UO_2 , UCO, UC, (U,Th) O_2) yang dilapisi dengan 4 lapisan, yaitu lapisan

karbon berpori, lapisan pyrolytic carbon densitas rendah, lapisan silikon karbida dan lapisan pyrolytic carbon densitas tinggi seperti ditunjukkan pada Gambar 1 & 2. Ke empat lapisan tersebut mempunyai fungsi spesifik dalam menahan produk fisi, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Berdasar desain bahan bakar HTGR yang merupakan partikel bahan bakar berlapis maka keselamatan dan kinerja operasi reaktor sangat ditentukan oleh integritas mekanik partikel bahan bakarnya (keutuhan lapisan pelindung)[12].

2.1. Desain Bahan Bakar Bentuk Bola

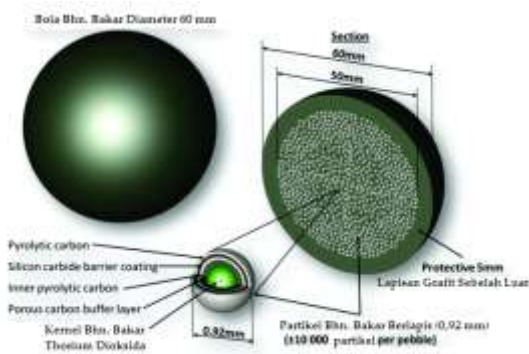
Elemen bakar bentuk bola telah difabrikasi dan diuji pada program reaktor Jerman dan China[13,14]. Dalam elemen bakar bentuk bola, partikel berlapis TRISO didistribusikan secara merata dalam matriks grafit dan kemudian dibentuk/dikompres menjadi perangkat bahan bakar bola (*pebble*) sebesar bola tenis. Pada bagian terluar dari bola dilapisi dengan lapisan grafit. Inti partikel berlapis TRISO adalah kernel bahan bakar yang terbuat dari material UO_2 , UC, (U,Th) O_2 , atau UCO dengan pengayaan rendah (3~20%). Tampang Lintang elemen bakar bentuk bola ditunjukkan pada Gambar 1. Sebuah bolabahan bakar dibagi menjadi dua wilayah: bagian dalam dikenal sebagai wilayah bahan bakar, dan bagian luar dikenal sebagai wilayah bebas bahan bakar. Wilayah bahan bakar dari setiap bola bahan bakar mengandung sejumlah besar partikel bahan bakar berlapis TRISO,

Tabel 1. Fungsi Lapisan dalam Partikel Bahan Bakar Berlapis[11]

Lapisan Partikel TRISO	Fungsi Desain
Buffer (50% dense PyC)	Menyediakan volume kosong (pori-pori) untuk menampung produk fisi gas dan produk reaksi karbon-oksigen (CO, CO ₂) yang telah dilepaskan dari kernel bahan bakar. Mengantisipasi terjadinya <i>swelling</i> kernel bahan bakar. Melindungi lapisan PyC dan SiC dari <i>recoil</i> produk fisi
PyC sebelah dalam (densitas $\geq 1,85$ mg/m ³)	Penahan difusi produk fisi, yaitu produk fisi gas. Sebagai lapisan pelindung kernel terhadap gas Cl ₂ selama proses pengendapan SiC, dan mencegah CO berinteraksi dengan SiC selama iradiasi. Menyediakan substrat mekanik untuk deposisi lapisan SiC. Menginduksi tegangan tekan pada SiC karena iradiasi disebabkan penyusutan.
SiC (densitas teoritis 3,21 mg/m ³)	Penahan primer terhadap produk fisi, menahan semua produk fisi gas dan padat pada temperatur operasi normal (< 1250°C) dan kondisi kecelakaan sampai 1600°C. Sebagai pendukung kekuatan mekanik dalam partikel berlapis.
PyC sebelah luar (densitas $\geq 1,85$ mg/m ³)	Menahan produk fisi gas. Menyediakan lapisan pengikat dengan matriks elemen bakar karbon.

sementara tidak terdapat sama sekali partikel bahan bakar di dalam wilayah bebas bahan bakar.

Dimensi bahan bakar bentuk bola adalah sebagai berikut: diameter bahan bakar bentuk bola (*pebble*) adalah 60 mm, diameter wilayah bahan bakar 50 mm diameter partikel bahan bakar berlapis 0,92 mm, dan diameter kernel bahan bakar 0,5 mm, tebal lapisan karbon berpori (*porous carbon buffer*) 95 micron, lapisan Pyrolytic carbon sebelah dalam 40 microns, lapisan silikon karbida 35 micron dan lapisan *pyrolytic carbon* densitas tinggi 40 microns.

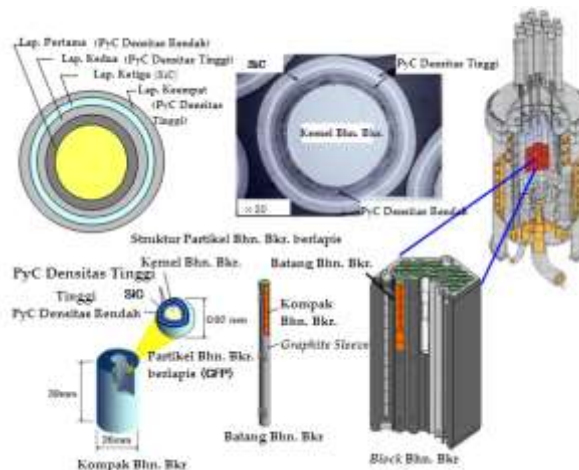


Gambar 1. Elemen Bakar Reaktor HTGR Bentuk Bola[15].

2.2. Desain Bahan Bakar Bentuk Prismatik

Dalam perangkat bahan bakar bentuk prismatik, partikel berlapis TRISO dibentuk menjadi pil (*pellet*) dengan diameter 26 mm dan tinggi 39 mm dan kemudian pil-pil tersebut disusun dalam lubang-lubang yang terdapat pada blok grafit berbentuk prismatik. Terdapat perbedaan dari bentuk pil pada desain General Atomic-USA dan JAEA-Jepang. Pada desain GA-USA pil berbentuk silinder pejal, sedangkan pada desain JAEA-Jepang pil berbentuk silinder dengan lubang ditengah (tidak pejal). Partikel TRISO berdiameter 0,92 mm tersebut terdiri dari kernel bahan bakar UO_2 , UC atau UCO dengan diameter 500 μm yang dilapisi dengan 4 lapisan dengan susunan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Lapisan yang paling dalam yaitu lapisan *pyrolytic carbon* densitas rendah (PyC) berpori untuk menampung gas-gas hasil belah, lapisan *pyrolytic carbon* densitas tinggi sebelah dalam (IPyC) berfungsi untuk menahan hasil belah, khususnya Kr dan Xe serta sebagai pelindung

terhadap kernel bahan bakar dari reaksi dengan gas-gas yang digunakan dalam proses pelapisan SiC, lapisan silikon karbida (SiC) berfungsi untuk mempertahankan integritas mekanik dan stabilitas dimensi dari partikel bahan bakar berlapis serta sebagai penahan terhadap hasil belah yang bersifat logam volatil seperti cesium dan yang terluar adalah lapisan *pyrolytic carbon* densitas tinggi sebelah luar (OPyC) yang berfungsi sebagai pelindung mekanik dari lapisan SiC.



Gambar 2. Elemen Bakar Reaktor Bentuk Prismatik[16].

2.3. Fenomena Kerusakan Bahan Bakar Tipe HTGR

Proses fisi dalam bahan bakar reaktor HTGR menghasilkan beberapa unsur radioaktif berbahaya ^{107}Pd , ^{106}Rh , ^{106}Ru , ^{110m}Ag , ^{134}I , ^{131}Cs , ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{88}Kr dan ^{133}Xe , ^{132}Te , ^{140}La dan ^{239}Pu , yang terbagi menjadi 3 kelompok : non-logam (I, gas mulia), logam-logam reaktif (Cs, Sr) dan logam mulia (Ag). Karena itu harus dijaga agar tidak lepas ke lingkungan dan tetap berada di dalam bahan bakar. Di antara unsur-unsur tersebut, Pd, Rh, Ru merupakan unsur mulia yang dapat mengkorosi lapisan SiC sehingga merusak integritas lapisan SiC dan partikel bahan bakar. Sedangkan ^{110m}Ag , ^{134}I , ^{131}Cs , ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{88}Kr , ^{133}Xe , ^{132}Te , ^{140}La dan ^{239}Pu dapat keluar dari partikel TRISO dan menyebabkan bahaya radiologi[17]. Elemen bakar merupakan penahan pertama terhadap lepasnya produk fisi ke lingkungan, karena itu integritas elemen bakar harus dijaga baik selama kondisi reaktor beroperasi maupun kecelakaan. Fenomena kerusakan yang terjadi pada bahan bakar adalah sebagai berikut[17]:

- Kerusakan partikel dengan lapisan hilang atau rusak.
- Kerusakan akibat iradiasi pada lapisan OPyC,
- Kerusakan akibat iradiasi pada lapisan IPyC dan potensi *cracking* pada lapisan SiC,
- Kerusakan lapisan SiC karena migrasi kernel akibat adanya gradien temperatur,
- Kerusakan lapisan SiC yang disebabkan oleh interaksi produk fisi dengan lapisan SiC,
- Kerusakan lapisan SiC yang disebabkan oleh interaksi lapisan SiC dengan gas CO,
- Kerusakan lapisan SiC yang disebabkan oleh proses dekomposisi termal,
- Kerusakan lapisan SiC karena dispersi logam berat pada lapisan buffer dan IPyC.



Gambar 3. Penghalang Produk Fisi Pada Teras Pebble Bed[7].

3. METODOLOGI

Metodologi yang digunakan adalah analisis deskriptif yang dilakukan dengan cara mempelajari berbagai pustaka dan mengevaluasi penghalang (*barrier*) terhadap lepasnya produk fisi dari elemen bakar prismatic dan *pebble*.

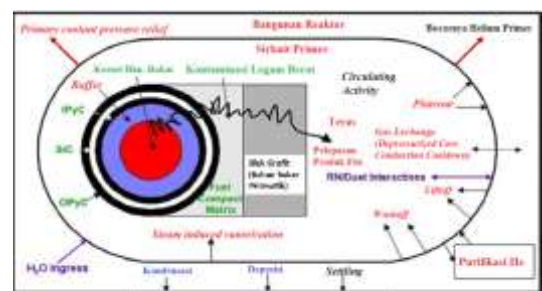
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Produk Hasil Proses Fisi dalam Bahan Bakar Reaktor HTGR dan Penghalang/Barriernya.

Proses fisi dalam bahan bakar reaktor HTGR menghasilkan beberapa unsur radioaktif berbahaya yaitu Pd, ¹⁰⁶Rh, ¹⁰⁶Ru, ^{110m}Ag, ¹³⁴I, ¹³¹Cs, ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ⁸⁸Kr dan ¹³³Xe, ¹³²Te, ¹⁴⁰La dan ²³⁹Pu, yang terbagi menjadi 3

kelompok : non-logam (I, gas mulia), logam-logam reaktif (Cs, Sr) dan logam mulia (Ag). Oleh sebab itu harus dijaga agar produk fisi tidak terlepas ke lingkungan dan tetap berada di dalam bahan bakar yaitu dengan cara menghindari terjadinya kerusakan bahan bakar. Oleh karena itu, bahan bakar yang akan digunakan harus dilakukan uji paska iradiasi untuk mengetahui kinerja bahan bakar pada kondisi operasi reaktor. Di antara unsur-unsur tersebut, Pd, ¹⁰⁶Rh, ¹⁰⁶Ru merupakan unsur mulia yang dapat menyebabkan korosi pada lapisan SiC sehingga merusak integritas lapisan SiC dan partikel bahan bakar. Sedangkan ^{110m}Ag, ¹³⁴I, ¹³¹Cs, ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ⁸⁸Kr, ¹³³Xe, ¹³²Te, ¹⁴⁰La dan ²³⁹Pu dapat keluar dari partikel TRISO dan menyebabkan bahaya radiologi[17]. Elemen bakar yang merupakan penahan pertama terhadap lepasnya produk fisi ke lingkungan harus dijaga integritasnya selama kondisi operasi maupun kecelakaan. Penghalang produk fisi elemen bakar tipe prismatic, ditunjukkan pada Gambar 4. Pada gambar terlihat bahwa ada 8 penghalang (*barrier*) produk fisi, yaitu[18]:

1. Kernel bahan bakar,
2. Lapisan silikon karbida dan pirokarbon dari partikel bahan bakar,
3. Matriks grafit,
4. Kompak bahan bakar,
5. *Sleeve* grafit,
6. Blok grafit heksagonal.
7. Sirkuit primer, dan
8. Bangunan reaktor



Gambar 4. Penghalang Produk Fisi Pada Teras Prismatic[19].

4.b. Kinerja Penghalang/Barrier

Kinerja penghalang diketahui dari efektivitas kerja masing-masing penghalang dalam menahan produk fisi, dan hal ini

tergantung pada sejumlah faktor, yaitu: (a) sifat kimia dan umur paruh radionuklida produk fisi, (b) kondisi operasi dan efek iradiasi.

Penghalang lepasnya produk fisi pertama adalah “kernel” bahan bakar (Gambar 4). Pada kondisi operasi normal, kernel dapat menahan > 95% gas hasil fisi umur pendek yang secara radiologi penting, seperti: ⁸⁸Kr dan ¹³¹I. Namun demikian, kemampuan menahan produk fisi tersebut berkurang dengan meningkatnya temperatur.

Penghalang ke dua adalah lapisan SiC dan PyC yang terdapat dalam setiap partikel berlapis. SiC dan PyC berfungsi sebagai penghalang untuk lepasnya sebagian besar produk fisi baik gas maupun logam. Selain itu lapisan SiC bertindak sebagai penghalang primer terhadap lepasnya produk fisi logam karena koefisien difusi dan kelarutan produk fisi logam dalam lapisan SiC relatif rendah[16].

Penghalang ke tiga adalah matriks grafit merupakan material komposit yang memiliki kandungan karbon *amorphous* tinggi, dan konstituen matriks ini memiliki daya adsorpsi tinggi terhadap produk fisi logam, khususnya Sr. Material matriks grafit dan grafit elemen bahan bakar tidak menahan gas-gas dan I hasil fisi, tetapi mampu menahan logam-logam hasil fisi seperti Sr, Eu dan Cs dengan baik. Retensi produk fisi dalam material grafit sangat dipengaruhi oleh temperatur[20].

Penghalang ke empat adalah sirkuit pendingin primer. Produk fisi yang telah dilepaskan dari teras ke pendingin dipindahkan melalui sirkuit primer menuju pendingin helium. Sistem purifikasi helium (*helium purification system*-HPS) secara efisien memindahkan baik produk fisi logam maupun gas dari pendingin primer pada laju, yang ditentukan oleh laju alir gas melalui sistem purifikasi. Sedangkan HPS dimaksudkan untuk mengendalikan pengotor kimia (*chemical impurities*) dalam pendingin primer.

Penghalang ke lima adalah struktur pengungkung/ bangunan reaktor yang prosesnya menghalangi lepasnya produk fisi agar tidak terlepas ke lingkungan. Secara umum kontribusi penghalang dalam menahan produk fisi ditunjukkan pada Gambar 5.

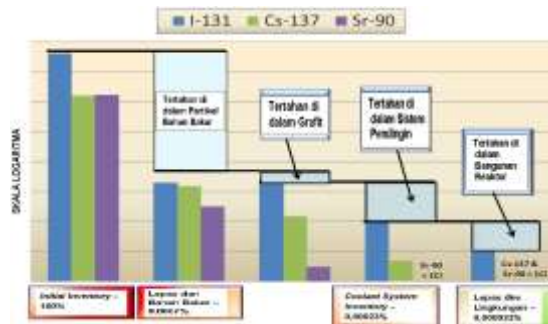
Berdasarkan penjelasan tersebut diketahui bahwa penghalang (*barrier*) lepasnya produk fisi pada elemen bakar tipe prismatic

lebih banyak dibandingkan elemen bakar tipe *pebble*.

4.3. Mekanisme Terlepasnya Produk Fisi

Beberapa mekanisme potensial terhadap lepasnya produk fisi, yaitu:

1. Difusi melalui lapisan,
2. Kerusakan lapisan,
3. Korosi SiC oleh produk fisi,
4. Dekomposisi termal SiC.



Gambar 5. Kontribusi Relatif Setiap Penghalang Untuk Membatasi Pelepasan Radionuklida Ke Lingkungan[8].

4.3.1. Difusi Melalui Lapisan

Mekanisme pertama terhadap lepasnya produk fisi adalah difusi melalui lapisan. Difusi produk fisi dalam lapisan dapat dijelaskan pada rumus berikut ini:

$$D_{\text{eff}} = Bu^{-1} \exp(-Q/RT) \quad (1)$$

Keterangan:

- D_{eff} = Koefisien difusi efektif ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
- Bu = Derajat bakar terakumulasi (% FIMA)
- Q = Energi aktivasi (376 kJmol^{-1})
- R = Konstanta gas ($8,312 \text{ Jmol}^{-1} \text{K}^{-1}$)
- T = Temperatur.

Dari rumus tersebut diketahui bahwa difusi sangat dipengaruhi oleh derajat bakar, energi aktivasi dan temperatur, sebagaimana juga dijelaskan pada Gambar 5.

4.3.2. Kerusakan Lapisan

Mekanisme ke dua adalah lepasnya produk fisi yang terjadi akibat rusaknya lapisan partikel bahan bakar berlapis. Seperti dijelaskan sebelumnya bahwa lapisan-lapisan dalam partikel bahan bakar (IPyC, SiC, OPyC) masing-masing mempunyai fungsi spesifik

dalam menahan produk fisi, seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Di antara lapisan tersebut, lapisan SiC mempunyai peran paling penting sebab berfungsi selain menahan sebagian besar produk fisi gas dan padat, juga berfungsi sebagai pendukung kekuatan mekanik dalam partikel berlapis. Karena itu, karakteristik lapisan SiC perlu diketahui, agar kegagalan/kerusakan bahan bakar dapat dihindari.

4.3.4. Korosi Lapisan SiC

Mekanisme ketiga adalah korosi lapisan SiC oleh produk fisi. Unsur Pd, Rh, Ru merupakan unsur mulia yang dihasilkan pada proses fisi yang dapat menyebabkan korosi lapisan SiC sehingga merusak integritas lapisan SiC dan partikel bahan bakar. Walaupun kenyataannya bahwa SiC merupakan salah satu material dengan kekerasan tertinggi, yaitu 9.2–9.3 Moh, dan mempunyai ketahanan korosi baik terhadap serangan kimia karena memiliki energi ikat kimia yang kuat, i.e. energi kohesif 3C–SiC adalah 6.34 eV/atom[21]. Reaksi korosi dari SiC oleh Pd adalah sebagai berikut:



4.3.4. Dekomposisi Termal dari Lapisan SiC

Dekomposisi termal merupakan dekomposisi kimia yang disebabkan oleh panas. Reaksi terjadinya dekomposisi bersifat endotermis dimana panas dibutuhkan untuk memutus ikatan kimia dalam senyawa yang mengalami dekomposisi. Pada Partikel bahan bakar berlapis (*coated fuel particle*), dekomposisi termal dari lapisan Silikon Karbida (SiC) dipandang sebagai mekanisme kerusakan yang paling dominan yang terjadi pada temperatur lebih dari 2000°C. Proses *annealing* diatas temperatur 800°C menghasilkan perubahan struktur karbon dan migrasi atom karbon ke permukaan bebas silisida.

Namun demikian, ketahanan lapisan SiC terhadap korosi kimia akan berkurang dengan adanya pemanasan pada temperatur tinggi dan waktu yang lama. Hal ini dapat dijelaskan pada persamaan dibawah ini, dimana ketebalan lapisan SiC mengalami perubahan akibat korosi dikarenakan kenaikan temperatur[9].

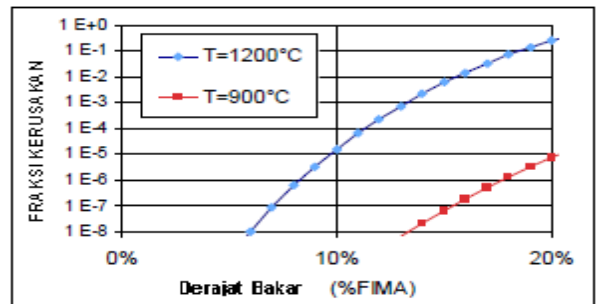
$$dx/dt = 2.613 \times 10^5 \exp(-3.03 \times 10^4/T) \quad (3)$$

Keterangan:

dx/dt = Laju perubahan ketebalan lapisan SiC ($\mu\text{m/h}$) akibat korosi SiC,

T = Temperatur bahan bakar ($^{\circ}\text{K}$).

Pada dasarnya, bukan hanya penghalang produk fisi yang merupakan satu-satunya faktor yang perlu diperhatikan terkait dengan lepasnya produk fisi ke lingkungan, terdapat beberapa faktor/parameter yang menyebabkan lepasnya produk fisi dari bahan bakar, diantaranya adalah karakter radionuklida produk fisi, sifat lapisan, serta kondisi operasi, seperti temperatur dan bahan bakar. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 6, yaitu makin tinggi temperatur dan derajat bakar akan menyebabkan makin tingginya fraksi kerusakan bahan bakar. Dengan kata lain, dengan makin tingginya fraksi kerusakan maka makin tinggi juga kemungkinan terjadi lepasnya produk fisi dari bahan bakar.



Gambar 6. Fraksi Kerusakan Bahan Bakar Untuk Iradiasi pada Temperatur 900–1200°C, Derajat bakar sampai 20% FIMA[22].

Oleh karena itu, untuk memahami kinerja bahan bakar dalam menahan produk fisi maka perlu dipahami sifat produk fisi dan karakteristik lapisan dalam partikel bahan bakar berlapis agar integritas lapisan penghalang dapat terjaga selama reaktor operasi dan kondisi kecelakaan. Sifat produk fisi penting yang dihasilkan bahan bakar HTGR ditunjukkan pada Tabel 2.

Produk fisi gas yang berupa non logam (I, Kr, Xe) ditahan dengan baik oleh lapisan partikel (SiC dan lapisan pirocarbon sebelah luar), tidak ada pelepasan melalui lapisan dengan cara difusi. Namun, karena retensi dalam grafit elemen bakar tidak ada untuk gas-gas mulia, berturut-turut diabaikan untuk iodine pada temperatur >800 °C, partikel

Tabel 2. Produk Fisi Penting[20]

Produk Fisi	Waktu Paruh	Sifat
^{134}Cs	2,1 tahun	Lepas dari kernel bahan bakar dengan cepat
^{137}Cs	30 tahun	Tertahan dalam grafit (buffer, matriks)
^{90}Sr	29 tahun	Terdifusi dengan cepat melalui SiC
		Tertahan dengan baik dalam kernel bhn bakar dan matriks
^{131}I	8 hari	Lepas dari partikel bhn bakar yang rusak
$^{110\text{m}}\text{Ag}$	250 hari	Migrasi dengan cepat melalui lapisan dan matriks
		Lepasan tertinggi dari elemen bahan bakar
		Lepasan yg signifikan selama operasi normal (SiC <i>permeability</i>)
^{85}Kr	11 tahun	Indikasi adanya kerusakan partikel
^{133}Xe	5,3 hari	Terkumpul dalam sistim purifikasi helium

dengan lapisan yang rusak menyebabkan pelepasan produk fisi selama operasi normal. Sedangkan Produk fisi logam reaktif (Cs, Sr) mendifusi melalui lapisan, khususnya pada temperatur >1200 °C. Namun, produk fisi yang telah dilepaskan dari lapisan dan partikel berlapis yang rusak telah ditahan dalam matriks grafit. Disamping parameter di atas, faktor penting yang perlu diperhatikan adalah kualitas produksi bahan bakar[23], hal ini terkait spesifikasi bahan bakar yang diperlukan, misalnya: berapa tingkat muat uraniumnya yang akan berpengaruh pada porositas yang disediakan untuk menampung produk fisi, selanjutnya, selain berpengaruh dalam tingkat kesulitan dalam fabrikasi, semakin tinggi tingkat muat uranium dalam bahan bakar juga akan berpengaruh juga pada kelakuan iradiasi bahan bakar selama dioperasikan.

5. KESIMPULAN

Penghalang pertama lepasnya produk fisi adalah “kernel” bahan bakar. Pada kondisi operasi normal, kernel dapat menahan $> 95\%$ gas hasil fisi umur pendek yang secara radiologi penting, seperti: ^{88}Kr dan ^{131}I . ^{107}Pd , ^{106}Rh , ^{106}Ru , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{131}Cs , ^{137}Cs , ^{90}Sr dan ^{133}Xe , ^{132}Te , ^{140}La dan ^{239}Pu , Penghalang ke dua adalah lapisan SiC dan PyC yang terdapat dalam setiap partikel berlapis dan berfungsi sebagai penghalang lepasnya sebagian besar produk fisi baik gas maupun logam. Selain itu lapisan SiC bertindak sebagai penghalang primer terhadap lepasnya produk fisi logam karena koefisien difusi dan kelarutan produk fisi logam dalam lapisan SiC relatif rendah. Terdapat beberapa mekanisme potensial terhadap lepasnya produk fisi, yaitu: difusi melalui lapisan, kerusakan lapisan, korosi SiC oleh produk fisi paladium dan

dekomposisi termal SiC. Untuk mencegah lepasnya produk fisi, perlu adanya penghalang (*barrier*) dan pembatasan terhadap kondisi operasi reaktor, seperti: temperatur, derajat bakar, waktu, energi aktivasi dari produk fisi dan kualitas produksi bahan bakar. Pada reaktor HTGR memiliki 2 tipe elemen bakar, masing-masing mempunyai jumlah penghalang (*barrier*) produk fisi yang berbeda, yaitu 6 penghalang produk fisi untuk teras *pebble* dan 8 penghalang untuk teras prismatic. Namun demikian, jumlah penghalang bukan merupakan satu-satunya faktor yang menentukan adanya kemungkinan lepas tidaknya produk fisi ke lingkungan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih penulis sampaikan kepada Kepala Bidang KDT, Ir. Sriyana, MT., yang telah memberikan arahan dalam penulisan makalah ini.

DAFTAR ACUAN

- [1] X. W. Zhou and C. H. Tang, “Current Status and Future Development of Coated Fuel Particles for High Temperature Gas-Cooled Reactors,” *Progress in Nuclear Energy*, vol. 53, no. 2. pp. 182-188, 2011.
- [2] E. Dewita, D. Priambodo, dan S. Alimah, “Sistem Kopling PLTN Tipe HTGR Dengan Instalasi Produksi Hidrogen,” dalam *Prosiding Seminar Nasional Pengembangan Energi Nuklir IV*, Jakarta, 2011, pp. 184-194.
- [3] B. M. Elsheikh, “Safety Assessment of Molten Salt Reactors in Comparison with Light Water Reactors,” *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, vol. 6, no. 2, pp. 63-70, 2013.
- [4] H.-N. Tran and P. H. Liem, “Neutronic Feasibility Study of U-Th-Pa Based High Burnup Fuel For Pebble Bed Reactors,” *Progress in Nuclear Energy*, vol. 80, pp. 17-23, Apr-2015.
- [5] K. Verfondern, *et al.* “Coated Particle Fuel for High Temperature Gas Cooled Reactors,” *Nuclear*

- Engineering And Technology*. vol. 39, no. 5, Oct-2007.
- [6] H. Gougar, *et al.*, "Prismatic Coupled Neutronics/Thermal Fluids Transient Benchmark of The MHTGR-350 MW Core Design - Google Search." [Online]. Available: <https://art.inl.gov/NGNP/Water%20Ingress%20Assessment%20Review%20Material/INL%20Published%20Material/Preliminary%20Prismatic%20Coupled%20Neutronics%20Thermal%20Fluids%20Transient%20Benchmark%20of%20the%20MHTGR-350%20MW%20Core%20Design%2012-06-10.pdf>. [Accessed: 13-Jan-2017].
- [7] A. C. Kadak, "A Future for Nuclear Energy: Pebble Bed Reactors," *International Journal of Critical Infrastructures*, vol. 1, no. 4. p. 330, 2005.
- [8] S. Alimah, E. Dewita, S. Ariyanto. "Analisis Komparasi HTGR Tipe Prismatic dan Pebble Bed," *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, vol. 16, no.1, 2014.
- [9] L. Sandell, "A Review of Radionuclide Release From HTGR Cores During Normal Operation," Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, Final Rep. Feb. 2004.
- [10] S. Ueta, *et al.*, "Development of high Temperature Gas-Cooled Reactor (HTGR) Fuel in Japan," *Progress in Nuclear Energy*, vol. 53, no. 7. pp. 788-793, 2011.
- [11] K. Verfondern, H. Nabelek, M. J. Kania, and H.-J. Allelein, *High-quality Thorium TRISO fuel performance in HTGRs*. Forschungszentrum Jülich GmbH Zentralbibliothek, 2013.
- [12] B. Herutomo, "Analisis Keandalan Bahan Bakar Reaktor Temperatur Tinggi," in *Prosiding Seminar ke-5 Reaktor Temperatur Tinggi*, Yogyakarta, 2000.
- [13] K. Rollig and W. Theymann, "Operational Requirements of Spherical HTR Fuel Elements and Their Performance," in *Specialist's Meeting on Gas-Cooled Reactor Fuel Development and Spent Fuel Treatment*, Moscow, 1983, pp. 19-39.
- [14] G. Buster, M. Laufer, P. Peterson, "A Review of Radionuclide Release From HTGR Cores During Normal Operation," Dept. Nucl. Eng., Univ. of California, Berkeley, CA, Sci. Rep., May-2015.
- [15] Oak Ridge National Laboratory. (2016, Jan 21). ORNL Supports New Projects to Develop Advanced Nuclear Technologies [Online]. Available: <https://www.ornl.gov/news/ornl-supports-new-projects-develop-advanced-nuclear-technologies>.
- [16] K. Minato, *et al.*, "Release Behavior of Metallic Fission Products from HTGR Fuel Particles at 1600 to 1900°C," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 202, no. 1, pp. 47-53, 1993.
- [17] T. Hicks, "Modular HTGR Safety Basis and Approach," Idaho Nat. Lab., Idaho Falls, ID, Rep. Aug-2011.
- [18] G. Brinkmann *et al.*, "Important Viewpoints Proposed for A Safety Approach of HTGR Reactors in Europe," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 236, no. 5-6. pp. 463-474, Mar-2006.
- [19] D. Hanson, (2010, May). *HTGR Technology Course for The Nuclear Regulatory Commission: Fission Product Behavior in HTGRs (Module 13)*. [Online]. Available: <https://art.inl.gov/NGNP/Training%20Modules%20%20HTGR%20Fundamentals/Module%2013%20-%20Fission%20Product%20Behavior%20in%20HTGRs.pdf>.
- [20] W. Moe, "HTGR Mechanistic Source Terms White Paper," Idaho Nat. Lab., Idaho Falls, ID, Tech. Rep. Jul-2010.
- [21] J. B. Malherbe, "Diffusion of Fission Products and Radiation Damage in SiC," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 46, no. 47, p. 473001, Nov. 2013.
- [22] *IAEA-TECDOC-1645: High Temperature Gas Cooled Reactor Fuels and Materials*. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2010.
- [23] K. N. Koshcheyev and A. S. Chernikov, "The Behaviour of Fission Products in the HTGR Fuel Irradiated in the IVV-2M Reactor," in *HTR-2002: Proceedings of the Conference on High Temperature Reactors*, 2002. [Online]. Available: https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:33033027

HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN