

PENGEMBANGAN PARTIKEL BAHAN BAKAR BERLAPIS UNTUK REAKTOR VHTR

Erlan Dewita

Pusat Pengembangan Energi Nuklir (PPEN) BATAN
Jl. Kuningan Barat, Mampang Prapatan, Jakarta 12710
Telp/Fax: (021)5204243 E-mail: erlan_dewita@yahoo.com

ABSTRAK

PENGEMBANGAN PARTIKEL BAHAN BAKAR BERLAPIS UNTUK REAKTOR VHTR.

Reaktor VHTR merupakan konsep reaktor suhu sangat tinggi dengan suhu pendingin keluar reaktor 1000°C dan merupakan salah satu reaktor generasi IV yang sedang dikembangkan di negara maju. Reaktor ini merupakan pengembangan dari GT-MHR dengan perbaikan efisiensi, suhu pendingin keluar reaktor serta derajat bakar. Perbaikan ini menyebabkan perlunya perubahan material diantaranya lapisan partikel bahan bakar (SiC) karena kenaikan suhu dari 850°C menjadi 1000°C. Lapisan SiC mempunyai peranan penting selain untuk mempertahankan integritas mekanik dan stabilitas dimensi dari partikel bahan bakar, juga untuk menahan hasil belah bersifat logam (Cs-137, Ru-106) yang lepas dari kernel bahan bakar. Lapisan ZrC dipandang dapat menggantikan SiC karena mempunyai ketahanan pada suhu yang lebih tinggi. Lapisan ZrC mempunyai titik leleh 3540°C, sedangkan SiC mempunyai titik leleh 1800°C. Partikel bahan bakar berlapis TRISO - ZrC tidak mengalami kerusakan pada pemanasan suhu 2200°C selama kira-kira 6000 detik, sementara pada partikel bahan bakar konvensional (menggunakan SiC) telah mengalami kerusakan sebagian pada suhu 2200°C dan hampir 100% rusak pada temperatur 2400°C. Pada suhu hingga 2400°C, lapisan ZrC lebih tahan terhadap korosi kimia oleh produk fisi, khususnya Pd (Paladium) yang mengkorosi lapisan SiC. Namun kemampuan lapisan ZrC dalam menahan produk fisi Ru-106 lebih rendah dari pada lapisan SiC. Sedangkan kemampuan menahan produk fisi logam lainnya seperti : barium, perak dan promethium relatif lebih baik.

Kata kunci: partikel, bahan bakar, VHTR, GT-MHR, hasil belah, integritas, mekanik

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF COATED FUEL PARTICLE FOR VHTR REACTOR. The VHTR reactor is a high temperature reactor concept with a 1000°C outlet temperature and it is one of IV generation reactor that is being developed. This reactor is developed based on GT-MHR reactor with higher outlet temperature reactor, burn-up and electricity efficiency. Accordingly, material improvement is necessary, such as: SiC in correlation to elevated temperature of 850°C to 1000°C. The SiC layer plays an important role. Beside retaining metallic fission products (Cs-137, Ru-106) released from fuel kernel, it also provides mechanical strength and dimension stability to fuel particle. The ZrC layer can be considered to replace SiC because of its higher temperature capability. ZrC has a melting point of 3540°C whereas SiC has a melting point of 1800°C. The ZrC-TRISO coated fuel particle did not fail until ~6000 seconds at 2200°C heating, while a few percent of the conventional TRISO-coated fuel particles failed already by 2200°C, and almost 100% instantaneously at 2400°C. In the whole temperature range, ZrC layer showed more resistance to chemical corrosion by fission products, especially by paladium (Pd) which is known to corrode the SiC layer. However, The ZrC layer capability to retention of Ru-106 was inferior to SiC. The retention of the other metal fission products such as barium, silver and promethium appears to be better than SiC.

Keywords: particle, fuel, VHTR, GT-MHR, product fission, integrity, mechanic

1. PENDAHULUAN

Reaktor Suhu Tinggi (RST) adalah salah satu jenis reaktor daya tipe maju yang mempunyai sistem keselamatan pasif dan melekat (*inherent and passive safety*) yang sangat handal. Reaktor Suhu Tinggi berpendingin gas ini dikarakterisasi dengan penggunaan grafit sebagai moderator dan reflektor, gas helium sebagai pendingin *inert* 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 bisa mencapai 950°C serta efisiensi termal yang tinggi merupakan beberapa keuntungan Reaktor Suhu Tinggi. Dalam pengoperasiannya dikenal ada 2 macam rakitan elemen bakar, yaitu tipe blok prisma yang dikembangkan oleh negara Jepang dan Amerika Serikat serta rakitan elemen bakar tipe bola yang dikembangkan oleh Jerman, Rusia dan Cina. Adapun bahan bakar yang digunakan adalah bahan bakar partikel berlapis dengan inti bahan bakar berupa persenyawaan uranium (UO_2 , UC, UCO) dengan pengayaan rendah (3~20%).

Dewasa ini, bahan bakar yang digunakan adalah partikel berlapis jenis TRISO dengan 4 lapisan yang membungkus kernel yang mengandung bahan fisil dan atau bahan fertil (UO_2 , UC, UCO) dengan pengayaan rendah (3~20%). Keempat lapisan tersebut, mulai dari lapisan yang paling dalam, yaitu lapisan *pyrolytic carbon* densitas rendah (PyC), lapisan *pyrolytic carbon* densitas tinggi sebelah dalam (IPyC), lapisan Silikon Karbida (SiC) dan lapisan *pyrolytic carbon* densitas tinggi sebelah luar (OPyC). Lapisan-lapisan tersebut berperan sebagai sebuah bejana bertekanan (*pressure vessel*) untuk menampung gas-gas hasil belah maupun sebagai penahan terhadap hasil belah yang lain untuk tetap berada di dalam partikel bahan bakar. Di antara keempat lapisan tersebut, SiC dipandang sebagai lapisan yang mempunyai peranan paling penting karena berfungsi selain mempertahankan integritas mekanik dan dimensi partikel bahan bakar, juga mempunyai kemampuan yang efektif dalam menahan hasil belah yang bersifat logam yang lepas dari partikel bahan bakar berlapis. Karena itu kinerja partikel bahan bakar selama iradiasi sangat ditentukan oleh integritas lapisan SiC.

Berbasis pada teknologi reaktor suhu tinggi berpendingin gas (DRAGON, Peach Bottom, AVR, THTR, Fort St. Vrain), akhir-akhir ini dikembangkan reaktor VHTR (*Very High Temperature Reactor*). Reaktor VHTR dengan suhu pendingin keluar reaktor mencapai 1000°C ini, merupakan pengembangan dari reaktor GT-MHR (*Gas Turbine-Modular Helium Reactor*) dengan suhu pendingin keluar reaktor 850°C dan merupakan salah satu konsep desain reaktor generasi IV yang bertujuan untuk kogenerasi. Selain untuk menghasilkan listrik, suhu keluar pendingin reaktor yang sangat tinggi, dapat diaplikasikan untuk panas proses di antaranya untuk produksi hidrogen secara termokimia. Salah satu faktor yang paling signifikan untuk diperhatikan dalam desain reaktor VHTR adalah perubahan material di antaranya lapisan partikel bahan bakar (SiC) sehubungan dengan kenaikan suhu operasi dari 850°C menjadi 1000°C. Dengan kondisi tersebut (kenaikan suhu dan derajat bakar dengan target 120 GWd/t), maka SiC dipandang perlu diganti dengan material lain, seperti : ZrC yang dipandang mempunyai kekuatan mekanik dan integritas yang lebih tinggi.

Studi dilakukan menggunakan data-data yang berasal dari para peneliti di Jepang, Amerika dan Jerman. Hasil studi ini diharapkan dapat meningkatkan pengetahuan dan memberikan masukan dalam memahami ketahanan lapisan SiC terhadap efek radiasi dan kemungkinan penggantian lapisan tersebut dengan ZrC, khususnya dalam usaha untuk menaikkan derajat bakar dan suhu.

2. KONSEP REAKTOR VHTR

Reaktor VHTR merupakan konsep reaktor yang menggunakan spektrum neutron termal dengan daur uranium sekali pakai (*once-through uranium cycle*) atau biasa disebut

dengan daur terbuka. Konsep reaktor ini berbasis pada teknologi reaktor suhu tinggi berpendingin gas yang sudah ada (DRAGON, Peach Bottom, AVR, THTR, Fort St. Vrain) dan merupakan pengembangan dari GT-MHR. Reaktor dikarakterisasi dengan densitas daya teras yang relatif rendah ($6,6 \text{ W/cm}^3$). Densitas daya rendah, massa grafit yang besar dan koefisien reaktivitas bahan bakar *doppler* yang sangat negatif dapat menjamin bahwa konsep teras reaktor ini mengikuti tujuan keselamatan melekat dari reaktor generasi IV dalam semua kondisi transien dan kecelakaan^[1]. Seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1, reaktor yang didesain dengan suhu pendingin keluar sangat tinggi ($\sim 1000^\circ\text{C}$) merupakan salah satu dari 6 sistem pembangkit energi nuklir generasi IV yang sedang dikembangkan^[2]. Reaktor ini dikembangkan untuk tujuan kogenerasi yaitu selain menghasilkan listrik dengan efisiensi tinggi (50%) melalui turbin gas daur langsung (*direct cycle gas turbin*), juga suhu pendingin keluar reaktor yang tinggi dapat diaplikasikan untuk panas proses, khususnya proses produksi hidrogen berbahan baku air (termokimia atau termal elektrolisis) menggunakan sebuah alat penukar panas *intermediate* (IHX) di antara sistem pendingin primer reaktor dan aplikasi panas proses.

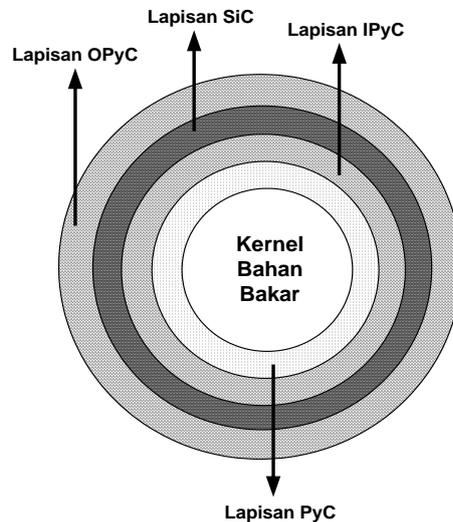
Tabel 1. Karakteristik Reaktor Generasi IV^[2]

Reaktor	Spektrum Neutron	Pendingin	Suhu °C	Daur Bhn Bakar	Daya (Mwe)
VHTR (<i>Very High Temperature Reactor</i>)	Termal	Helium	900 – 1000	Terbuka	250 – 300
SFR (<i>Sodium Cooled Fast Reactor</i>)	Cepat	Sodium	550	Tertutup	30-150, 300-1500, 1000 - 2000
SCWR (<i>Super Critical Water Cooled Reactor</i>)	Termal/ cepat	Air	510 – 625	Terbuka/ Tertutup	300 – 700, 1000 - 1500
GFR (<i>Gas Cooled Fast Reactor</i>)	Cepat	Helium	850	Tertutup	1200
LFR (<i>Lead Cooled Fast Reactor</i>)	Cepat	Timbal	480 – 800	Tertutup	20 – 180, 300 – 1200, 600 - 1000
MSR (<i>Molten Salt Reactor</i>)	Cepat/ Termal	Garam Fluorida	700 – 800	Tertutup	1000

3. BAHAN BAKAR VHTR

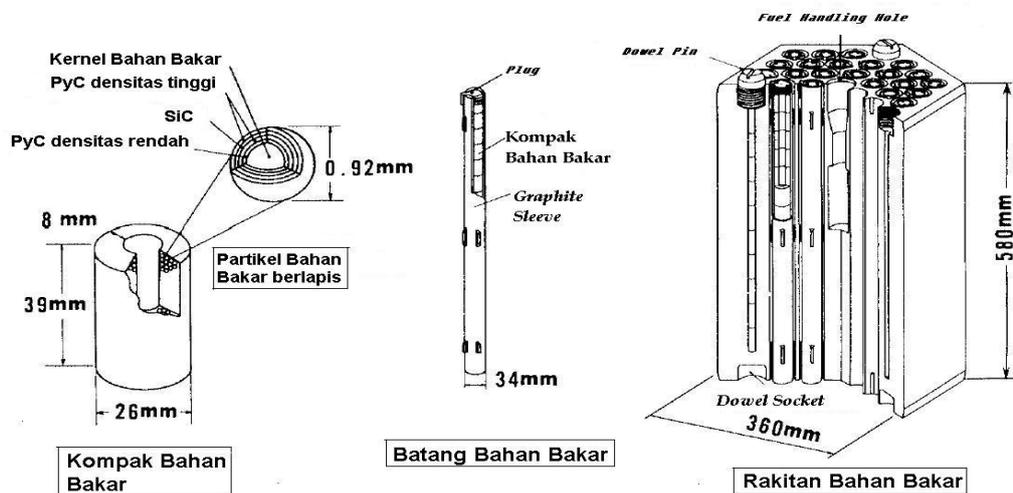
Konsep bahan bakar VHTR seperti yang secara umum digunakan pada Reaktor Suhu Tinggi adalah partikel bahan bakar berlapis jenis TRISO yang dirakit menjadi 2 tipe rakitan elemen bakar, yaitu tipe blok prisma yang dikembangkan oleh Amerika Serikat dan Jepang dan rakitan elemen bakar tipe bola yang dikembangkan oleh Jerman, Rusia dan Cina. Partikel bahan bakar berlapis jenis TRISO tersebut terdiri dari kernel dengan diameter $500 \mu\text{m}$ yang dilapisi dengan 4 lapisan dengan susunan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1, mulai dari lapisan yang paling dalam yaitu lapisan *pyrolytic carbon* densitas rendah (PyC) yang 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 dan yang terluar adalah lapisan *pyrolytic*

carbon densitas tinggi sebelah luar (OPyC) yang berfungsi secara mekanik melindungi lapisan SiC. Ketebalan keempat lapisan tersebut adalah *pyrolytic carbon* densitas rendah 95 μm , lapisan *pyrolytic carbon* densitas tinggi sebelah dalam 40 μm , lapisan silikon karbida 35 μm dan lapisan *pyrolytic carbon* densitas tinggi sebelah luar 40 μm (bahan bakar HTGR Jerman)^[3].



Gambar 1. Partikel Bahan Bakar berlapis jenis TRISO

Pada rakitan elemen bakar tipe prismatic seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2, partikel bahan bakar berlapis bersama serbuk grafit dan bahan pengikat resin dipadatkan menjadi bentuk silinder berlubang ditengah yang disebut dengan kompak bahan bakar (*fuel compact*).

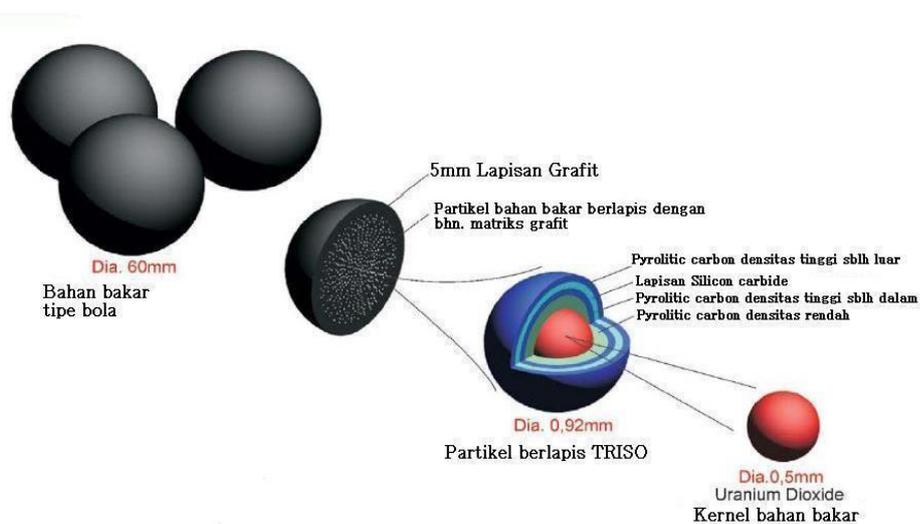


Gambar 2. Elemen Bahan Bakar tipe Prismatic^[4]

Kompak bahan bakar tersebut diwadahi selongsong grafit menjadi sebuah batang bahan bakar (*fuel rod*) yang berukuran diameter luar 34 mm dan tinggi 577 mm (HTTR Jepang)^[4]. Batang-batang bahan bakar dimasukkan ke lubang-lubang vertikal yang ada pada blok grafit.

Sedang pada rakitan elemen bakar tipe bola ditunjukkan pada Gambar 3. Partikel bahan bakar berlapis TRISO yang berjumlah 10.000 – 30.000 bersama dengan bahan matriks

grafit dipadatkan menjadi bahan bakar bentuk bola dan kemudian diberi selongsong grafit setebal ~ 5 mm. Diameter bahan bakar tipe bola adalah 4 – 6 cm.



Gambar 3. Elemen Bahan Bakar tipe Bola [5]

3.1. Karakteristik Lapisan SiC

Silikon karbida yang digunakan sebagai salah satu lapisan pada partikel bahan bakar Reaktor Suhu Tinggi, dihasilkan dari campuran *methylchloro silane* (CH_3SiCl_3 , MTS) dan hidrogen (H_2) melalui proses CVD = *Chemical Vapor Deposition* (proses pengendapan uap bahan kimia) dengan sebuah alat pelapis *fluidized bed*. Silikon karbida adalah merupakan bahan yang mempunyai karakteristik sebagai berikut :

1. Kekuatan mekanik tinggi
2. Konduktivitas panas tinggi ($28 \sim 75 \text{ Wm.K}^{-1}$ pada temperatur 600°C)
3. Tahan terhadap sebagian besar bahan kimia
4. Tahan terhadap suhu tinggi ($\sim 1700^\circ\text{C}$)^[6,7]

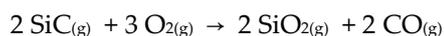
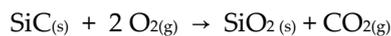
Pada suhu di atas 1700°C (yang diperkirakan dapat dicapai apabila terjadi kecelakaan), maka silikon karbida akan terurai sebagai berikut :



Dalam tenggang waktu tertentu, silikon meninggalkan sistem dan hanya struktur karbon yang tertinggal dalam lapisan SiC, sehingga dapat mengakibatkan struktur yang tertinggal menjadi tidak mampu menahan hasil belah yang bersifat mudah menguap (*volatil*), seperti cesium dan stronsium

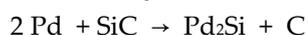
5. Ketahanan oksidasi yang tinggi sampai suhu 1500°C

Oksidasi SiC pada tekanan parsial oksigen yang tinggi terjadi dengan reaksi sebagai berikut :

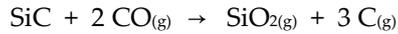


Pembentukan lapisan SiO_2 yang bersifat protektif pada permukaan SiC dapat menahan proses oksidasi selanjutnya (*passive oxidation*)^[8]

6. Dapat bereaksi dengan hasil belah paladium (Pd) dan unsur-unsur lantanida, dengan reaksi sebagai berikut :



7. Dapat bereaksi dengan CO yang dihasilkan dalam kernel akibat reaksi antara oksigen dengan karbon dari lapisan



3.2. Karakteristik Lapisan ZrC

Lapisan ZrC diproduksi dengan reaksi pirolitik dari ZrBr_4 , CH_4 dan H_4 dalam alat pelapis *spouted-bed* pada suhu sekitar 1773°K . *Propylene* dapat digunakan sebagai pengganti *methane*. Zirconium karbida merupakan bahan yang mempunyai karakteristik sebagai berikut^[9] :

1. Kompatibilitas yang baik dengan bahan struktur
2. Titik leleh tinggi (3450°C)
3. Stabilitas termodinamika yang tinggi
4. Stabilitas kimia tinggi, lapisan ZrC menunjukkan sifat lebih tahan terhadap korosi kimia oleh hasil belah, khususnya Pd yang dapat mengkorosi SiC

4. FENOMENA KERUSAKAN PARTIKEL BAHAN BAKAR TRISO-UO₂

Dalam pengoperasian Reaktor Suhu Tinggi (RST), terdapat beberapa fenomena kerusakan bahan bakar terkait dengan kenaikan suhu dan derajat bakar, di antaranya :

4.1. Kerusakan akibat Tekanan Gas Hasil Fisi

Gas-gas hasil fisi yang telah dilepaskan dari kernel selama iradiasi tergantung pada suhu operasi reaktor, derajat bakar dan waktu. Gas-gas hasil fisi yang terbentuk akan menghasilkan tekanan yang menekan lapisan SiC sebelah dalam. Jika beban ini melebihi kekuatan lapisan akan mengakibatkan kerusakan pada semua lapisan. Tabel 2 menunjukkan tekanan gas hasil fisi yang terbentuk dalam partikel UO_2 dengan diameter $500 \mu\text{m}$ yang telah diradiasi selama 3 tahun.

Tabel 2. Perbandingan Tekanan Gas Hasil Fisi pada Partikel Bahan Bakar Tipe Bola (Jerman) pada Suhu dan Derajat Bakar yang dinaikkan ^[10]

Derajat Bakar (% FIMA)	1100°C	1150°C	1200°C	1250°C	1300°C
	Tekanan				
8%	1,00	1,28	1,62	2,04	2,52
10%	1,33	1,69	2,14	2,68	3,28
15%	2,26	2,86	3,60	4,47	5,42
20%	3,32	4,21	5,28	6,53	7,89

4.2 Kerusakan akibat Tekanan Gas CO

Selama proses fisi dilepaskan oksigen. Pada partikel bahan bakar berlapis UO_2 terdapat kelebihan oksigen atau oksigen bebas karena produk fisi yang dihasilkan tidak mengkonsumsi semua oksigen yang dilepaskan. Oksigen bebas akan bereaksi dengan lapisan penahan sehingga membentuk gas CO. Jumlah gas CO yang dihasilkan merupakan fungsi dari suhu dan derajat bakar. Jika tekanan gas CO melebihi kekuatan lapisan, maka akan terjadi kerusakan lapisan.

4.3. Kerusakan akibat Migrasi Kernel

Migrasi kernel adalah kecenderungan kernel untuk bermigrasi sampai gradien temperatur. Hal ini telah ditemukan dalam partikel bahan bakar UO_2 berlapis TRISO-SiC. Migrasi merupakan fungsi dari koefisien migrasi kernel, gradien suhu dan suhu.

4.4. Kerusakan akibat Korosi oleh Produk Fisi Pd (Paladium)

Proses fisi dari unsur logam berat akan menghasilkan salah satunya unsur paladium (Pd). Diantara atom-atom logam berat diketahui bahwa plutonium-239 menghasilkan unsur paladium yang tertinggi, yaitu ± 10 kali dibanding dengan yang dihasilkan oleh isotop U-235^[11]. Ini berakibat, pada bahan bakar dengan pengayaan rendah, kontribusi Pu-239 meningkat dengan meningkatnya derajat bakar. Hal ini disebabkan karena makin rendah pengayaan bahan bakar, maka prosentase U-238 makin besar bila dibandingkan U-235. Migrasi paladium (Pd) dipengaruhi oleh tekanan uap, suhu iradiasi, komposisi kernel dan densitas bahan bakar. Produk fisi Pd yang bermigrasi dari kernel dan berinteraksi dengan lapisan SiC akan mengkorosi lapisan sehingga akan terjadi kerusakan bahan bakar.

5. PEMBAHASAN

Dalam membangun reaktor daya (PLTN) yang dapat diterima oleh masyarakat maka keselamatan merupakan salah satu aspek yang paling penting diperhatikan. Pada Reaktor Temperatur Tinggi berpendingin Gas (HTGR), sistem pengungkung radionuklida telah menggambarkan filosofi pertahanan berlapis. Sistem pengungkung tersebut terdiri dari beberapa penghalang (*multiple barrier*) untuk membatasi pelepasan produk fisi dari bahan bakar ke lingkungan sampai pada level yang tidak signifikan baik selama reaktor beroperasi normal maupun pada kondisi kecelakaan terpostulasi. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. terdapat 5 penghalang untuk lepasnya produk fisi, yaitu (1) kernel bahan bakar, (2) lapisan partikel, khususnya lapisan SiC, (3) struktur grafit dalam elemen bahan bakar, (4) batas tekanan pendingin primer, dan (5) struktur pengungkung/ bangunan reaktor. Pada kondisi operasi normal, kernel dapat menahan lebih dari 95% gas-gas hasil fisi berumur pendek seperti : Kr-88 dan I-131. Namun efektivitas kernel dalam menahan produk fisi gas dapat menurun dengan meningkatnya temperatur. Kunci dari pencapaian tujuan keselamatan pada Reaktor Temperatur Tinggi berpendingin Gas tersebut adalah mempertahankan integritas partikel bahan bakar berlapis keramik baik jika sistem pendingin normal maupun kecelakaan.

Pada konsep reaktor VHTR, partikel bahan bakar yang digunakan sama dengan bahan bakar HTGR yaitu partikel berlapis jenis TRISO dengan 4 lapisan yang membungkus kernel yang mengandung bahan fisil dan atau bahan fertil (UO₂ atau UCO) dengan pengayaan rendah (3 ~ 20%). Lapisan-lapisan dalam partikel berlapis jenis TRISO terdiri mulai dari lapisan yang paling dalam, yaitu lapisan *pyrolytic carbon* densitas rendah (PyC), lapisan *pyrolytic carbon* densitas tinggi sebelah dalam (IPyC), lapisan *silicon carbide* (SiC) dan lapisan *pyrolytic carbon* densitas tinggi sebelah luar (OPyC). Keempat lapisan tersebut berfungsi sebagai bejana bertekanan yang berintegritas tinggi dan kemampuan retensi sangat tinggi terhadap produk fisi serta masing-masing lapisan mempunyai fungsi yang spesifik. Fungsi dari lapisan penghalang (*buffer layer*) adalah menyediakan penampung untuk gas-gas hasil fisi yang lepas dari kernel bahan bakar, sedangkan fungsi dari lapisan *pyrocarbon* sebelah dalam (IPyC) adalah untuk menyediakan substrat reguler yang halus untuk pengendapan lapisan SiC integritas tinggi dan untuk mencegah Cl₂ dan HCl dari menembus kernel bahan bakar selama proses pengendapan SiC. Karena itu keuntungan utama dari lapisan IPyC direalisasikan selama fabrikasi bahan bakar. Selain itu selama reaktor beroperasi, lapisan IPyC juga berfungsi untuk menahan hasil belah, khususnya Kr dan Xe dan lapisan OpyC berfungsi secara mekanik melindungi lapisan SiC. 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 produk fisi, khususnya produk

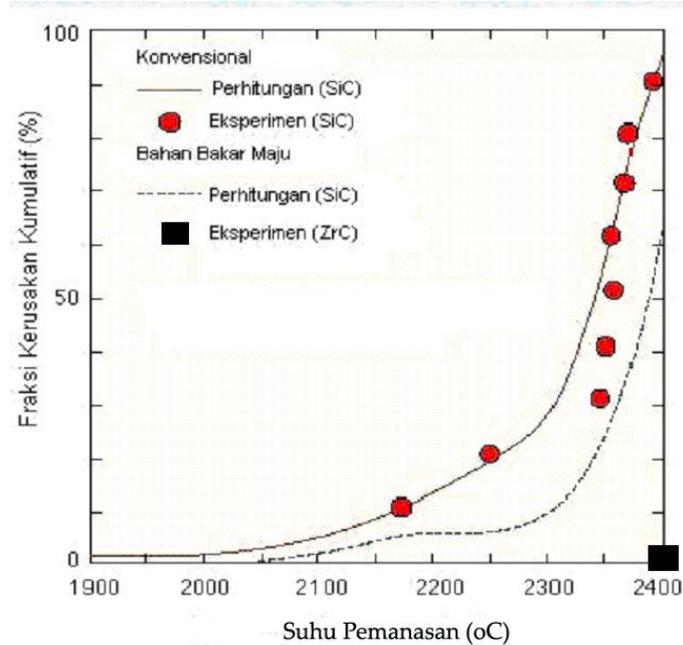
fisi yang bersifat logam, seperti : Cs-137 dan Sr-90, yang apabila tidak ditahan akan menembus lapisan PyC dan akan mengkontaminasi sistem pendingin primer.

Hingga saat ini, bahan bakar Reaktor Suhu Tinggi yang ada, menggunakan material SiC sebagai salah satu lapisan TRISO. Namun demikian hasil dari beberapa penelitian menunjukkan bahwa terdapat beberapa mekanisme yang mempengaruhi integritas lapisan SiC, dan mekanisme tersebut sangat dipengaruhi oleh meningkatnya suhu dan derajat bakar. Mekanisme tersebut adalah (1) apabila terjadi kontak antara produk fisi paladium (Pd) dengan lapisan SiC maka akan terjadi korosi, (2) jika lapisan IPyC rusak, lapisan SiC akan membentuk gas SiO, dan (3) pada temperatur diatas 1700°C, lapisan SiC terdekomposisi sehingga menurunkan densitas. Terkait dengan salah satu tujuan utama dari dikembangkannya VHTR adalah menyediakan suhu pendingin keluar reaktor yang sangat tinggi (~1000°C), atau sekitar 150°C lebih tinggi dibanding reaktor GT-MHR, maka diperlukan material yang mempunyai ketahanan lebih tinggi. Karena itu akhir-akhir ini sedang diteliti material alternatif lain sebagai pengganti SiC yaitu lapisan ZrC. Perbandingan sifat antara ZrC dan SiC ditunjukkan pada Tabel 3, dimana ZrC mempunyai titik leleh yang jauh lebih tinggi dari pada SiC atau dengan kata lain ketahanan terhadap suhu tinggi dari ZrC lebih tinggi dari pada SiC.

Tabel 3. Sifat SiC dan ZrC^[9]

Sifat	SiC	ZrC
Densitas (g/ cm ³)	3,21	6,6
Titik Leleh	terdekomposisi dg cepat pada suhu diatas 2200°K	3693°K
Energi aktivasi untuk difusi (eV)	8,2 (Si, C)	7,5 (Zr), 4, 7 (C)
Tekanan uap (atm, 2000°K)	10 ⁻⁶ – 10 ⁻⁵	2,5 x 10 ⁻¹⁴
Fracture toughness K _{IC} (Mpa.m ^{1/2})	2,7	3,2
Konduktivitas panas (W/m.K)	30 – 70	40 – 50
Ekspansi panas linier (K ⁻¹)	4 – 5.10 ⁻⁶	6 – 7.10 ⁻⁶

Pada Gambar 4 ditunjukkan hubungan antara kenaikan suhu terhadap fraksi kerusakan kumulatif lapisan SiC dan ZrC. Nampak pada gambar tersebut bahwa partikel bahan bakar berlapis TRISO-ZrC tidak mengalami kerusakan pada pemanasan pada suhu 2200°C selama ~ 6000 detik, sementara pada partikel bahan bakar konvensional (menggunakan SiC) telah mengalami kerusakan sebagian pada suhu 2200°C dan hampir 100% rusak pada temperatur 2400°C. Penahanan (*retention*) hasil belah logam oleh lapisan ZrC pada temperatur diatas 1600°C menunjukkan bahwa pelepasan Cs-137 adalah dibawah 10⁻³ pada pemanasan dengan suhu 1800°C selama 3000 jam. Namun kemampuan lapisan ZrC dalam menahan hasil belah Ru-106 lebih rendah dari pada lapisan SiC dan harus dilakukan penelitian lebih lanjut terkait dengan aplikasinya untuk reaktor VHTR. Sedangkan kemampuan penahanan terhadap produk fisi logam lainnya seperti : barium, perak (silver) dan promethium tampak lebih baik ZrC dari pada SiC.



Gambar 4. Hubungan Suhu Pemanasan dengan Fraksi Kerusakan SiC dan ZrC^[12]

Efek lain yang perlu dipertimbangkan sehubungan dengan kenaikan temperatur pendingin keluar reaktor adalah reaksi antara produk fisi dengan lapisan SiC mengikat logam mulia (Ru, Rh, Pd dan Ag) yang dihasilkan dari proses fisi uranium dan plutonium adalah relatif tinggi. Kondisi termokimia tidak kondusif untuk unsur-unsur ini dalam membentuk oksida-oksida stabil dan berakibat dapat bermigrasi keluar dari kernel. Reaksi SiC dengan Pd akan membentuk paladium oksida (Pd_2Si) yang akan mengkorosi lapisan SiC dan hal ini telah ditemukan dalam uji paska iradiasi bahan bakar lapisan TRISO. Meskipun jumlah produk fisi Pd kecil dibanding dengan masa lapisan SiC, reaksi dapat terjadi dan penetrasi sempurna pada lapisan SiC dapat terjadi jika temperatur tinggi dipertahankan untuk periode waktu tertentu. Sedangkan pada lapisan ZrC keadaan ini tidak terjadi karena ZrC tidak bereaksi dengan hasil belah Pd.

6. KESIMPULAN

Keuntungan utama dari lapisan ZrC dibanding dengan lapisan SiC adalah ketahanannya pada suhu yang lebih tinggi. Lapisan ZrC mempunyai titik leleh $3540^{\circ}C$, sedangkan SiC mempunyai titik leleh $1800^{\circ}C$. Partikel bahan bakar berlapis TRISO-ZrC tidak mengalami kerusakan pada pemanasan pada suhu $2200^{\circ}C$ selama ~ 6000 detik, sementara pada partikel bahan bakar berlapis konvensional mengalami kerusakan sebagian pada suhu $2200^{\circ}C$ dan hampir 100% rusak pada suhu $2400^{\circ}C$. Selanjutnya pada seluruh jangkauan suhu, lapisan ZrC menunjukkan lebih tahan terhadap korosi kimia oleh produk fisi, khususnya oleh Pd (Paladium) yang mengkorosi lapisan SiC. Namun kemampuan lapisan ZrC dalam menahan hasil belah Ru-106 lebih rendah dari pada lapisan SiC dan harus dilakukan penelitian lebih lanjut terkait dengan aplikasinya untuk reaktor VHTR.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] JAMES, W. STERBENTZ, "Low-Enriched Fuel Design Concept for the Prismatic Very High temperature Reactor Core", 2007 International Congress on Advances in Nuclear Power Plant, May 2007

- [2] ANNUAL REPORT, " Gen IV International Forum", 2007
- [3] KARL VERFONDERN, HEINZ NABIELEK and JAMES M. KENDALL, " Coated Particle Fuel for High Temperature Gas Cooled Reactors", Nuclear Engineering and Technology, Vol. 39 No.5 October 2007
- [4] FUKUDA, K., OGAWA, T., HAYASHI, K., SHIOZAWA, S., TSURUTA, H., TANAKA, I., " Research and development of HTTR coated particle fuel", Journal of Nuclear Science and Technology, 28 (1991) 570
- [5] M. RAGHEB, [Http://netfiles.uiuc. Edu/2006](http://netfiles.uiuc.edu/2006)
- [6] BLOOR, D., et.al, " The Encyclopedia of Advanced Materials, 4 (1994)
- [7] NABIELEK, H., SCHENK, W., HEIT, W., MEHNER, A.W., and GOODIN, D.T., " Performance of ZrC coated particle fuel in irradiation and postirradiation", Nuclear Technology (1989) 84, 62
- [8] YANO, T., et.al, "Effect of neutron irradiation on passive oxidation of silicon carbide", Journal of Nuclear Material, 233 -237 (1996) 1275 - 1278
- [9] TORU OGAWA, KAZUO MINATO and KAZUHIRO SAWA, " Advanced Coated Particle Fuels : Experience of ZrC-TRISO Fuel Development and Beyond", 11th International Conference on Nuclear Engineering, Tokyo, JAPAN, April 20-23, 2003
- [10] DAVID PETTI, JOHN MAKI, "The Challenges Associated with High BurnUp and High Temperature for UO₂ TRISO-Coated Particle Fuel", MIT NGNP Symposium, February 2005
- [11] KARCZ, P.J. ET.AL, "High temperature applications of nuclear energy", Proceedings of 2nd JAERI symposium on HTGR technologies (1992)
- [12] SHOHEI UETA, " Fuel Researches in the HTTR Project", IAEA International Conference on Non-Electric Application of Nuclear Power, Oarai, Japan, 16 -18 April 2007