

TINJAUAN PROSES PELAPISAN TRISO SECARA FLUIDISASI PADA PARTIKEL UO_2 DAN PENGARUH TEMPERATUR PADA LAPISAN SiC

Sigit

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir, BATAN
Kawasan Puspiptek Serpong, Tangerang 15314
e-mail: sigit@batan.go.id

ABSTRAK

TINJAUAN PROSES PELAPISAN TRISO SECARA FLUIDISASI PADA PARTIKEL UO_2 DAN PENGARUH TEMPERATUR PADA LAPISAN SiC. Tinjauan mengenai proses pelapisan TRISO pada partikel UO_2 dengan cara fluidisasi dan pengaruh temperatur pada lapisan SiC yang terbentuk bertujuan untuk menyiapkan proses pelapisan kernel tersinter sebagai bahan bakar Reaktor berpendingin Gas Temperatur Tinggi (RGTT) dengan mempelajari dan memahami terlebih dahulu proses fluidisasi dan pelapisan sehingga akan mempermudah dalam pelaksanaan proses pelapisan, mengingat fluidisasi memegang peran yang sangat penting. Reaktor berpendingin Gas Temperatur Tinggi atau *High Temperature Gas-cooled Reactor (HTGR)* menggunakan partikel (kernel) bahan bakar UO_2 , UCO, campuran UO_2+ThO_2 atau UC+ThC bentuk bola berlapis TRISO (*tri-isotropic*). Pembuatan bahan bakar telah dilakukan dengan proses gelasi eksternal dari uranil nitrat keasaman rendah ditambah dengan aditif polivinil alkohol dan tetra hidro furfural alkohol, kemudian dilakukan pencucian terhadap gel yang diperoleh, pengeringan, kalsinasi dan sintering. Pada makalah ini dibahas berbagai aspek dalam proses fluidisasi untuk pelapisan partikel bahan bakar nuklir, juga disajikan hasil pembuatan kernel UO_2 tersinter, kemudian dilakukan pembahasan tentang pengaruh temperatur terutama pada porositas dan pori-pori lapisan, mikrostruktur dan interaksi dengan hasil fisi. Pada temperatur 1500 °C ukuran pori-pori kurang dari 1,5 μm , namun bila temperatur dinaikkan ke 1600 °C menjadi 2 μm dan terjadi deposisi fasa β -SiC + C.

Kata kunci: Reaktor Gas Temperatur Tinggi, TRISO, kernel UO_2 , fluidisasi, pelapisan

ABSTRACT

TRISO COATING PROCESS BY FLUIDIZATION OF UO_2 PARTICLES AND INFLUENCE OF TEMPERATURE ON SiC FILM. Review on TRISO coating process on UO_2 particles by fluidization and influence of temperature on SiC layer formed was carried out for ready to sintered kernel coating process as High Temperature Gas-cooled Reactor (HTGR) fuel in studying and understanding early fluidization and coating process thus simplifying in the implementation of coating process, due to the fluidization process holds a very important role. High Temperature Gas-cooled Reactor uses uranium fuel particles (kernels) of UO_2 , UCO, UO_2+ThO_2 or UC+ThC mixture coated TRISO (*tri-isotropic*) in a ball form. Manufacturing of fuel particle was carried out by external gelation process of uranyl nitrate low acidity added with polyvinil alcohol and tetra hydro furfural alcohol as additif agent, followed by washing, drying, calcination and sintering. This paper discussed the various aspects of the fluidization process for coating particles of nuclear fuel, manufacturing of sintered UO_2 kernels and influence of temperature on porosity and layer voids, microstructure and interaction with fission products. At temperature of 1500 °C, porosity size was less than 1,5 μm and increased to 2 μm at the temperature of 1600 °C and deposited of β -SiC+C phase took place.

Keywords: High Temperature Gas-cooled Reactor, TRISO, UO_2 kernel, fluidization, coating

PENDAHULUAN

Reaktor berpendingin gas temperatur tinggi atau *high temperature gas-cooled*

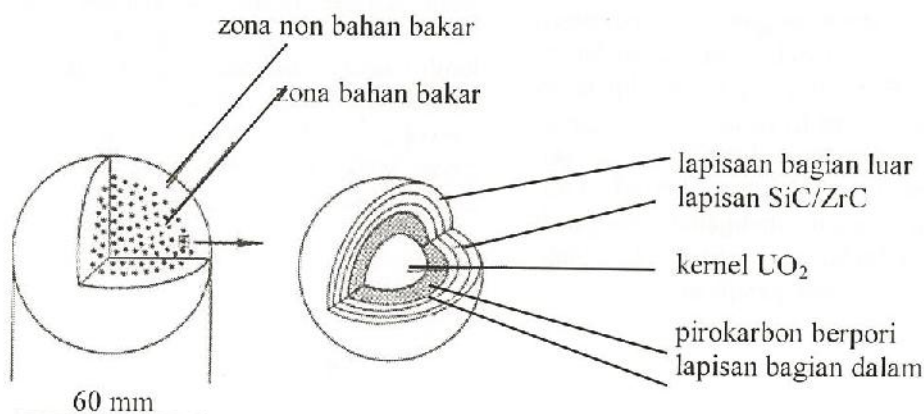
reactor (HTGR) dan *very high temperature reactor (VHTR)* adalah konsep reaktor Generasi IV yang menggunakan moderator

grafit dengan bahan bakar uranium *once-through*. Secara konseptual, reaktor tersebut mempunyai pendingin dengan temperatur keluar sebesar 1000 °C. Panas yang keluar ini dapat dimanfaatkan untuk proses produksi hidrogen melalui siklus termokimia sulfur-iodin. selain itu juga untuk desalinasi air laut, memproduksi *steam* untuk industri gasifikasi batubara guna menghasilkan CH_4 dan CO_2 dll. Teras reaktor dapat berupa blok prisma atau *pebble-bed* (berbentuk bola). Reaktor blok prisma mempunyai konfigurasi teras blok prisma dengan blok grafit heksagonal disusun dan diletakkan dalam suatu bejana tekan silindris. Reaktor *pebble-bed* memiliki bahan bakar berbentuk bola diletakkan secara bersama-sama suatu bejana tekan silindris^[1].

Bahan bakar yang digunakan dalam HTGR adalah partikel bahan bakar berlapis TRISO (*tri-isotropic*). Partikel berlapis disebut bahan bakar kernel biasanya dibuat

dari uranium oksida atau uranium karbida. Kelebihan HTGR adalah fleksibilitas pada penggunaan siklus bahan bakar yang berbeda. Uranium pengayaan tinggi, *High Enriched Uranium (HEU)*, *Low Enriched Uranium (LEU)*, Uranium-Thorium (U, Th), Uranium-Plutonium (U-Pu), dan Plutonium (Pu) dapat digunakan sebagai bahan bakar pada berbagai aplikasi. Dua tipe bahan bakar berlapis adalah partikel bi-isotropik (BISO) dan tri-isotropik (TRISO)^[2]. Sebagai pendingin reaktor digunakan gas helium yang merupakan gas inert sehingga tidak berinteraksi dengan bahan lain. Bahan pelapis yang digunakan adalah pirokarbon, silikon karbida atau zirkonium karbida^[3].

Partikel berlapis bahan bakar UO_2 berbentuk bola terdiri dari beberapa lapis seperti pada Gambar 1^[4].



Gambar 1. Partikel berlapis bahan bakar UO_2 ^[4]

Masing-masing lapisan mempunyai fungsi dan kegunaan sendiri-sendiri. Bahan pelapis yang digunakan adalah pirokarbon dan silikon karbida. Untuk pengembangan saat ini, silikon karbida diganti dengan zirkon karbida. Pada partikel bahan bakar berlapis TRISO, pelapis pertama adalah pirokarbon berpori (*porous*) sebagai penyangga (*buffer*), berfungsi untuk menampung dan menyerap gas hasil fisi. Pada proses pelapisan *buffer* ini digunakan bahan asetilen yang diencerkan dengan gas argon, suhu pelapisan berkisar antara 1100 – 1400 °C. Lapisan kedua atau lapisan bagian dalam (*inner pyrolytic carbon, IPyC*) adalah

pirokarbon dari bahan propilen yang diencerkan dengan gas argon, proses pelapisan dilakukan pada suhu 1350 – 1450°C. Lapisan ini berfungsi untuk mencegah difusi produk fisi metalik. Lapisan ketiga adalah silikon karbida atau zirkonium karbida yang berfungsi untuk menutup keluarnya hasil fisi dari dalam kernel. Bahan kimia yang digunakan untuk pelapisan tersebut adalah triklorosilan yang diencerkan dengan argon dan H_2 dengan suhu pelapisan 1500-1670°C. Pelapis terluar adalah pirokarbon (*outerpyrolytic carbon, OPyC*), terbentuk dari deposisi propilen pada suhu 1350 – 1450°C, berfungsi untuk

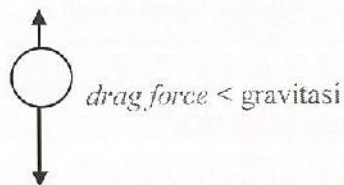
menjaga dan mengungkung zat hasil fisi agar tidak keluar dari kernel yang sudah terlapis^[5].

Dalam makalah ini dibahas proses fluidisasi untuk pelapisan TRISO partikel bahan bakar UO_2 dan pengaruh temperatur terhadap hasil pelapisan dan interaksi hasil fisi dengan lapisan SiC dengan tujuan untuk memperoleh pemahaman pengaruh beberapa parameter pada pelapisan, jenis partikel dan proses fluidisasi.

Hasil yang diharapkan dari tinjauan ini adalah diperolehnya pengetahuan, informasi dan pemahaman mengenai proses terjadinya fluidisasi, dan proses pelapisan sebagai landasan pengetahuan dalam pelaksanaan proses pelapisan partikel UO_2 sebagai bahan bakar RGTT secara fluidisasi.

METODE

Tinjauan dilakukan dengan metode mempelajari, memahami dan melakukan kajian data serta informasi yang diperoleh dari berbagai pustaka dengan topik mengenai proses fluidisasi dan pelapisan kernel bahan bakar nuklir. Sebagai permulaan, dipelajari teori mengenai proses fluidisasi dan pelapisan partikel UO_2 , kemudian dilanjutkan dengan penyajian hasil pembuatan kernel UO_2 tersinter dan kajian mengenai pengaruh temperatur terhadap lapisan SiC yang terbentuk selama proses pelapisan.



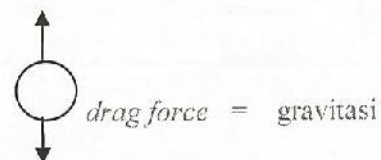
Gambar 2a. Partikel dalam kondisi stagnan

Bahan yang dilapis adalah partikel atau kernel bahan bakar UO_2 atau U/Th O_2 sinter. Sebelum proses pelapisan, dilakukan pembuatan partikel/kernel bahan bakar UO_2 terlebih dulu. Pembuatan gel UO_2 dilakukan dengan proses gelas eksternal. Setelah diperoleh kernel UO_2 sinter kemudian dilakukan proses pelapisan secara fluidisasi. Dari berbagai literatur dibahas mengenai proses fluidisasi dan parameter yang berpengaruh pada hasil proses pelapisan kernel bahan bakar berlapis TRISO serta interaksi hasil fisi dengan lapisan SiC.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tinjauan Proses Fluidisasi Dan Pelapisan Fluidisasi

Fluidisasi adalah proses suatu padatan (partikel) menjadi bersifat sebagai fluida karena dorongan gas atau cairan yang melalui reaktor yang disebut dengan *fluidized bed reactor*. Pada kondisi *packed bed*, partikel akan stagnan (diam) seperti pada Gambar 2a^[6]. Di sini *drag force* (gaya tarik ke atas) lebih kecil daripada gaya gravitasinya. Sebaliknya pada *fluidized bed*, partikel tersuspensi dalam aliran gas ke atas di mana gaya tarik ke atas sama dengan gaya gravitasinya (Gambar 2b)^[6].



Gambar 2b. Partikel dalam kondisi terfluidisasi

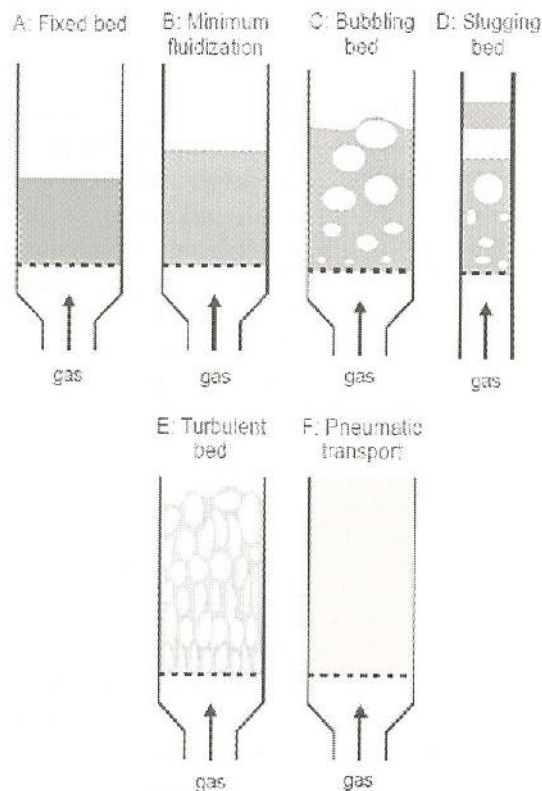
Jika partikel padat terfluidisasi, maka akan terjadi rezim fluidisasi tergantung dari kecepatan gas, sifat dan dimensi padatan seperti pada Gambar 3^[7] yang dibuat berdasarkan teori dari Kunii dan Levenspiel^[8].

Ketika aliran gas melewati tumpukan partikel meningkat terus, ada beberapa yang bergetar, tapi masih dalam ketinggian yang sama, dan disebut *fixed bed* (Gambar 3A). Dengan menambah kecepatan gas, akan

dicapai suatu titik di mana *drag force* gaya tarik yang diberikan oleh gas bergerak ke atas sama dengan berat dari partikel-partikel, dan kekosongan raung sedikit meningkat. Hal ini menandakan terjadinya fluidisasi yang disebut dengan fluidisasi minimum pada kecepatan U_{mf} (Gambar 3B). Peningkatan aliran gas selanjutnya menyebabkan terjadinya pembentukan gelembung fluidisasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3C.

Jika kecepatan gas diperbesar lagi, gelembung di dalam *bed* terfluidisasi akan menyatu dan tumbuh lebih besar. Jika rasio tinggi terhadap diameter *bed* cukup tinggi, ukuran gelembung dapat menjadi hampir sama dengan diameter *bed* dan bergerak secara perlahan-lahan (*slugging*) (Gambar 3D). Jika partikel terfluidisasi tersebut berada pada laju alir gas yang cukup tinggi, maka

kecepatan melebihi kecepatan akhir partikel. Permukaan atas *bed* menghilang, terjadi gerakan padatan secara turbulen, rongga-rongga gas dari berbagai ukuran dan bentuk. Kondisi ini disebut sebagai rezim turbulen (Gambar 3E). Dengan kenaikan kecepatan gas, akhirnya *fluidized bed* menjadi terhambur dan disebut rezim transport pneumatik (Gambar 3F)^[7].



Gambar 3. Skema proses *fluidized bed* menurut rezim fluidisasi^[7]

Proses fluidisasi banyak digunakan secara komersial dan dapat dibagi menjadi dua katagori yaitu:

- operasi secara fisika, seperti pemanasan, absorpsi, pencampuran serbuk halus
- operasi secara kimia, seperti reaksi gas dengan katalis, reaksi gas dan padatan

Klasifikasi Partikel

Pada kenyataannya, tidak semua partikel dapat difluidisasi. Kelakuan partikel padat dalam fluidisasi tergantung pada ukuran dan densitas. Banyak peneliti^[7-9] mengacu pada penelitian Geldart^[10] yang membagi serbuk menjadi empat kelompok yaitu:

1. Kelompok A adalah partikel *aeratable*. Serbuk ini berukuran antara 30 – 100 μm dan densitas rendah ($< 1,4 \text{ g/cm}^3$).

Contoh bahan ini adalah katalis pada proses *cracking* dan pada pembuatan susu bubuk. Partikel padatan mudah sekali terfluidisasi pada kecepatan gas rendah tanpa pembentukan gelembung (*bubbles*). Pada kecepatan gas yang lebih tinggi akan dicapai titik yaitu pada saat gelembung mulai terbentuk dengan kecepatan penggelembungan minimum U_{mb} selalu lebih tinggi daripada U_{mf} .

2. Kelompok B dinamakan partikel *sandlike* atau disebut juga partikel gelembung. Ukuran partikel jenis ini antara 100 – 1000 μm dengan densitas 1,4 – 4 g/cm^3 . Untuk partikel ini kecepatan fluidisasi minimum sering terlampaui dan kelebihan gas menimbulkan bentuk gelembung yang

dapat tumbuh menjadi besar. Contoh bahan ini adalah serbuk kaca atau pasir kasar.

3. Kelompok C disebut *cohesive*, atau serbuk sangat halus berukuran kurang dari 30 μm dan sulit terfluidisasi karena daya antar partikel relatif besar dibandingkan dengan daya yang dihasilkan dari gas. Jika diameter *bed* kecil, partikel akan sangat mudah untuk terhambur ke luar. Contoh jenis kelompok ini adalah talk, tepung gandum, pati.
4. Kelompok D dinamakan *spoutable*, berukuran besar ($>1000 \mu\text{m}$) dan berdensitas tinggi, sangat sulit terfluidisasi dalam tungku dengan *bed* yang rendah. Tidak seperti partikel kelompok B, dengan meningkatnya kecepatan, semburan dapat terbentuk di dalam *bed* dan partikel akan terhambur ke luar. Jika distribusi gas tidak homogen, akan terjadi semburan dan

aliran yang tidak merata. Contoh kelompok ini adalah pemanggangan biji kopi.

Kecepatan fluidisasi minimum

Kecepatan gas superficial di mana partikel baru saja terfluidisasi, biasanya disebut kecepatan fluidisasi minimum, U_{mf} . Keadaan fluidisasi yang baru mulai dapat digambarkan oleh persamaan yang memberikan penurunan tekanan (*pressure drop*) dalam gas yang mengalir melalui *packed bed*, seperti Persamaan Ergun^[7].

Jika menggunakan persamaan ERGUN, maka harus diketahui kekosongan fluidisasi minimum ϵ_{mf} , walaupun seringkali tidak diketahui nilainya. Persamaan (1) dikembangkan menurut tipe dan ukuran partikel dengan asumsi pendekatan data eksperimental (Persamaan (2)). Kombinasi dengan persamaan Ergun menghasilkan Persamaan (3).

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{(1 - \epsilon_{mf})^2}{\epsilon_{mf}^3} \frac{\mu U_{mf}}{(\phi_s d_p)^2} + 1.75 \frac{(1 - \epsilon_{mf}) \rho_g U_{mf}^2}{\epsilon_{mf}^3 \phi_s d_p} \tag{1}$$

dengan:

ΔP = beda tekanan pada *bed*

Φ_s = sferisitas partikel didefinisikan sebagai luas permukaan dari volume ekuivalen dari sebuah

bola per luas permukaan partikel

L = panjang *bed*

ρ_g = densitas fluida

ϵ_{mf} = fraksi kosong dari *bed*

d_p = diameter bola ekuivalen

Leva menurut pustaka nomor 7 telah memperoleh persamaan yang digunakan secara luas secara empiris seperti pada Persamaan (4)^[11].

$$\frac{1 - \epsilon_{mf}}{\phi_s^2 \epsilon_{mf}^3} = 11 \quad \text{dan} \quad \frac{1}{\phi_s \epsilon_{mf}^5} = 14. \tag{2}$$

$$Re_{mf} = \frac{d_p \cdot U_{mf} \cdot \rho_g}{\mu} = \sqrt{33.7^2 + 0.0408 \frac{d_p^3 \cdot \rho_g \cdot (\rho_s - \rho_g) \cdot g}{\mu^2}} - 33.7. \tag{3}$$

$$U_{mf} = 7.90 \times 10^{-3} d_p^{1.82} (\rho_s - \rho_f)^{0.94} \mu_f^{-0.88} \tag{4}$$

dengan :

μ = viskositas fluida

g = gravitasi

ρ_s = densitas padatan

ρ_f = densitas fluida

Persamaan tersebut berlaku untuk bilangan Reynold $Re_{mf} \leq 10$, sedangkan untuk harga Re_{mf} yang lebih tinggi diperlukan faktor koreksi.

Kecepatan Fluidisasi Maximum

Jika kecepatan gas dinaikkan cukup tinggi, maka *drag force* atau hambatan pada partikel individu lebih besar daripada gaya gravitasi sehingga partikel akan keluar dari

bed. Kondisi seperti di atas disebut dengan kecepatan fluidisasi maksimum. Apabila kecepatan gas melebihi kecepatan terminal u_t , maka partikel akan terbawa ke atas. Jika partikelnya sangat kecil, maka bilangan Reynold juga makin kecil dan menurut Kunni dan Levenspiel^[8] hubungannya seperti pada persamaan (5) dan (6) dengan kombinasi $\{g(\rho_s - \rho_g)\}$ sering digunakan, disebut $\{\eta\}$.

$$u_t = \frac{\eta d_p^2}{18\mu} \quad Re < 0,4 \tag{5}$$

$$u_t = \left(\frac{1,78 \times 10^{-2} \eta^2}{\rho_g \mu} \right)^{\frac{1}{3}} (d_p) \quad (0,4 < Re < 500) \tag{6}$$

Agar fluidisasi dapat terjadi, kecepatan masuk gas U_0 , harus di atas kecepatan minimum fluidisasi dan di bawah kecepatan akhir u_t .

Proses pelapisan partikel bahan bakar

Pembuatan bahan bakar dilakukan dengan proses gelasi eksternal dari uranil nitrat keasaman rendah ditambah dengan aditif polivinil alkohol (PVA) dan tetra hidro

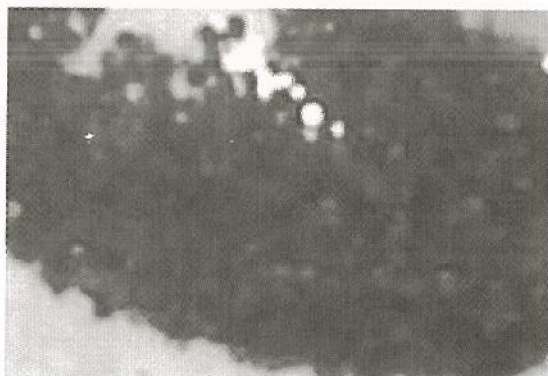
furfuril alkohol (THFA), kemudian dilakukan pencucian terhadap gel yang diperoleh, pengeringan, kalsinasi, sintering dan pelapisan. Hasil penelitian yang telah diperoleh yaitu gel hasil proses gelasi (Gambar 4), partikel U_3O_8 hasil proses kalsinasi (Gambar 5), partikel UO_2 hasil proses reduksi (Gambar 6) dan partikel/kernel UO_2 hasil sinter (Gambar 7)^[12].



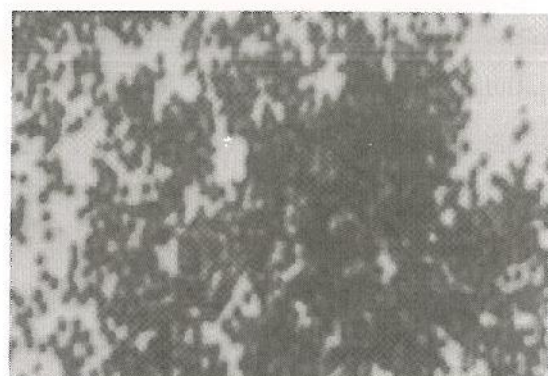
Gambar 4. Gel hasil proses gelasi^[12]



Gambar 5. Partikel U_3O_8 hasil kalsinasi^[12]



Gambar 6. Partikel UO_2 hasil reduksi



Gambar 7. Partikel/kernel UO_2 hasil sinter

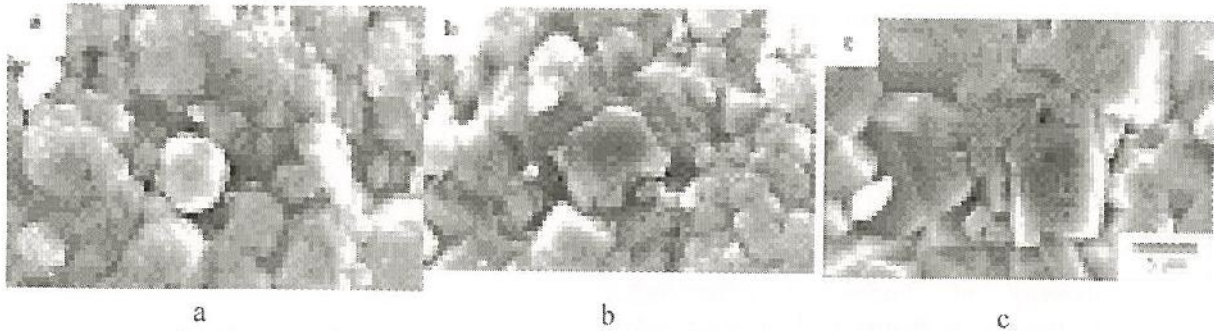
Pada proses pelapisan dapat digunakan berbagai jenis gas sesuai dengan tujuannya. Gas yang dapat dipakai adalah hidrokarbon misalnya campuran metana, propana, propilena dan gas lain seperti asetilen, silen/xylene (SiC) dll. Gas tersebut dicampur dengan gas inert seperti argon, nitrogen atau helium. Pada suhu antara 1440-1550 °C akan terbentuk lapisan SiC yang mendekati komposisi stoikiometrik, namun pada suhu 1600 °C akan terbentuk karbon bebas^[11]. Mekanisme terjadinya pelapisan dapat dijelaskan sbb.: gas hidrokarbon atau gas lainnya pada pemanasan suhu tinggi akan terdekomposisi menjadi senyawa lain yang sebagian akan diadsorpsi partikel kemudian terdepositasi pada permukaan partikel. Di sini terjadi transfer massa dari fluida ke permukaan padatan yang berbentuk bola karena kadar solute di fluida lebih besar dari kadar jenuhnya. Reaktor *fluidized bed* merupakan tempat terjadinya proses deposisi dari hasil pirolisa gas di mana gas hidrokarbon dan gas inert masuk melalui bagian bawah reaktor yang berbentuk kerucut. Bagian atas reaktor membesar untuk memperlambat laju gas sehingga kecepatannya lebih kecil dari kecepatan fluidisasi minimum dan partikel tidak terbawa ke luar.

Pengaruh temperatur pada proses pelapisan

Proses pelapisan SiC pada partikel berlapis TRISO dipengaruhi oleh temperatur pelapisan. Jika temperatur makin tinggi, maka permukaan partikel terlapis menjadi lebih kasar dan terjadinya peningkatan ukuran pori dan porositas lapisan SiC. Pada temperatur 1400-1550 °C, lapisan SiC memiliki komposisi hampir stoikiometri, sedangkan lapisan SiC yang terbentuk pada temperatur 1600 °C mengandung sejumlah kecil karbon bebas. Degradasi kekerasan dan modulus elastisitas lapisan SiC yang dilapisi pada temperatur 1550 dan 1600 °C disebabkan oleh peningkatan porositas partikel dan keberadaan karbon bebas. Selain temperatur, kecepatan dan konsentrasi gas juga berpengaruh pada proses pelapisan^[11].

Penelitian dengan memvariasi temperatur antara 1400 – 1600 °C telah dilakukan pula oleh Nozawa dkk.^[13] pada pelapisan SiC baik untuk lapisan *buffer*, lapisan dalam maupun luar. Radius lapisan SiC sekitar 390 µm dan tebal lapisan antara 30-40 µm. Stoikiometri lapisan SiC yang dianalisis dengan metode *Auger Electron Spectroscopy* (AES) tercapai pada pemanasan di bawah 1550 °C, sedangkan kelebihan karbon tampak pada temperatur 1600 °C yaitu dengan terdepositasinya fasa β -SiC + C.

Pengaruh temperatur juga tampak pada distribusi pori-pori dan porositas dari lapisan SiC. Pada temperatur di bawah 1500 °C ukuran pori-pori kurang dari 1,5 µm dan bertambah besar di atas 2,0 µm bila temperatur dinaikkan menjadi 1550 dan 1600 °C. Pada Gambar 4 ditunjukkan mikrostruktur permukaan luar lapisan SiC yang diperoleh dengan menggunakan SEM dan mengalami pemanasan dari 1400 – 1600°C. Porositas mengalami kenaikan pada temperatur di atas 1500 °C, ukuran pori-pori rata-rata dari lapisan SiC secara asimtotis naik dari 0,29 ke 0,45 µm yaitu pada temperatur pelapisan dari 1400 sampai 1600 °C. Kenaikan porositas berkaitan dengan kenaikan laju deposisi dan ukuran butir seperti terlihat pada Gambar 8a, 8b dan 8c. Kenaikan porositas juga dapat disebabkan oleh jenis partikel yang berfluidisasi. Pada laju aliran optimum jenis partikel yang baik adalah kelompok partikel *sputable*. Aliran partikel menjadi lebih cepat pada bagian tengah dan mencapai level maksimum, kemudian jatuh ke ruang anular sekeliling partikel secara homogen. Pada kenaikan temperatur tersebut, jika parameter laju aliran gas, jumlah partikel yang digunakan, konfigurasi distribusi gas dibuat konstan, maka partikel dapat difluidisasi secara kuat karena kenaikan viskositas gas masuk. Jika fluidisasi partikel dalam kondisi tak beraturan, maka akan terlempar dari zona deposisi normal sehingga pelapisan kurang baik dan menyebabkan peningkatan ukuran pori dan porositas lapisan SiC^[11].



Gambar 8. Mikrostruktur permukaan luar lapisan SiC pada temperatur 1400 (a), 1500 (b), dan 1600 °C (c) menggunakan SEM^[11]

Interaksi hasil fisi dengan lapisan SiC

Hasil fisi yang terbentuk pada proses iradiasi menyebabkan terjadinya interaksi dengan pelapis TRISO. Pada Reaktor Gas Temperatur Tinggi dengan kernel bahan bakar $UC_{0.3}O_{1.7}$ pengayaan 20% dan ThO_2 , reaksi antara hasil fisi dengan lapisan SiC membatasi mekanisme kegagalan lapisan secara termokimia yang mempengaruhi kinerja. Reaksi paladium (Pd) dengan SiC dianggap sebagai pengendali untuk sistem bahan bakar oksida maupun karbida. Lantanida seperti serium, neodimium dan praseodimium juga beraksi dengan SiC untuk bahan bakar karbida. Pada desain reaktor, hubungan antara waktu dan temperatur pada titik lokal dalam teras digunakan untuk menghitung kedalaman reaksi SiC-Pd. Kedalaman penetrasi pada lapisan SiC selama reaktor beroperasi bervariasi tergantung pada daya reaktor, distribusi daya, temperatur gas keluar dan waktu tinggal bahan bakar. Untuk mencegah kerusakan lapisan, maka perlu dilakukan pengaturan berbagai parameter di atas^[14].

Dengan demikian mekanisme difusi hasil fisi ke dalam SiC menjadi sangat menarik sehingga beberapa peneliti juga melakukan penelitian menggunakan bahan lain yaitu ZrC yang berpotensi memberikan tambahan kekuatan sebagai penghalang difusi dari hasil fisi atau oksigen dan sifat mekaniknya. Isotop radioaktif Ag dan Cs dipelajari karena merupakan unsur logam yang paling cepat terlepas dari bahan bakar berlapis TRISO^[15].

KESIMPULAN

Karakteristik partikel, kecepatan aliran dan konsentrasi gas mempengaruhi terjadinya

fluidisasi. Makin baik proses fluidisasi, maka reaksi antara padatan dan gas pelapis menjadi lebih sempurna. Pada pelapisan dengan SiC, temperatur makin tinggi menjadikan kekasaran pada permukaan lapisan SiC sehingga ukuran pori meningkat. Permukaan partikel terlapis menjadi lebih kasar dan terjadinya peningkatan ukuran pori dan porositas lapisan SiC. Peningkatan porositas partikel dan keberadaan karbon bebas pada pelapisan temperatur tinggi menyebabkan terdegradasinya kekerasan dan modulus elastisitas lapisan SiC. Adanya hasil fisi yang terbentuk selama proses iradiasi di dalam reaktor berlangsung, mempengaruhi kinerja bahan bakar seperti adanya paladium dan lantanum karena bereaksi dengan lapisan SiC.

DAFTAR PUSTAKA

1. http://en.wikipedia.org/wiki/Very_high_temperature_reactor, diakses 4 Januari (2013)
2. Anonim, High Temperature Gas Cooled Reactor, Fuels And Materials, IAEA-TECDOC-1645-CD, ISBN 978-92-0-153110-2, ISSN 1684-2073, Vienna, (2010)
3. <http://library.sinap.ac.cn/db/yuanjian201104/%E5%85%A8%E6%96%87/01%E5%BC%8D41072556.pdf>, diakses 21 Maret (2012)
4. Daogang Lu, The Current Status of Chinese Nuclear Power Industry and Its Future, E-Journal of Advance Maintenance, Vol.2, No.1, GA12, Copyright 2009-2011, Japan Society of Maintenance, (2012)
5. Eltawila F., TRISO-Coated Particle Fuel Phenomenon Identification and Ranking

- Tables (PIRTs) for Fission Product Transport Due to Manufacturing, Operations, and Accidents, NUREG/CR-6844, Vol. 1, Div. of Syst. Analysis and Regulatory Effectiveness, Office of Nuclear Regulatory Research, Washington, DC 20555-0001, diakses 4 Januari (2013)
6. Ruud Van Ommen, J.* And Ellis, N.**, (2010), Fluidization, JMBC/OSPT Course Particle Technology 2010, *Delft University of Technology-Netherlands, **University of British Columbia-Canada, (2010)
 7. <http://www.google.co.id/...../dissertations.u b.rug.nl/FILES/faculties/science/2004/c..... /c2. pdf>: Introduction to Fluidization, diakses 21 Februari (2013)
 8. Kunii, D., and Levenspiel, O., Fluidization Engineering, Butterworth-Heinemann, Reed Publishing, 2nded., USA, (1991)
 9. Silva, G.G., Natalia Prieto Jiménez, N.P., and Salazar, O.F., Fluid Dynamics of Gas - Solid Fluidized Beds, Advanced Fluid Dynamics, ISBN 978-953-51-0270-0, DOI: 10.5772/25791, (2012)
 10. Geldart, D., Types of Gas Fluidization, Powder Technology, 7 (1973) 285-292 285, (1973)
 11. <http://www.google.co.id/...../dissertations.u b.rug.nl/FILES/faculties/science/2004/c..... /c2. pdf>: Introduction to Fluidization, diakses 21 Februari (2013)
 12. Sigit, Torowati, Asminar, Mujinem, Ngatijo, Rahmiati, Banawa S.G., Edi Indarto, Ghaib W. dan Hendro, W., Bangtek Produksi Bahan Bakar Sistem Energi Nuklir Inovatif: Studi Awal Pembuatan Gel Bahan Bakar Oksida, Prosiding Hasil-hasil Penelitian EBN Tahun 2011, PTBN-BATAN, Serpong, (2012)
 13. Nozawa, T., L.L. Snead, Y. Katoh, J.H. Miller and E. Lara-Curzio, Determining The Shear Properties of the PyC Interface for a Model TRISO Fuel, Journal of Nuclear Materials, Vol. 350, Issue 2, pp. 182-194, (2006)
 14. Stansfield, O.M., Homan, F.J., Simon, W.A. and Turner, R.F., Interaction Of Fission Products And SiC In TRISO Fuel Particles: A Limiting HTGR Design Parameter, Technical Report, GA Technologies, Inc., San Diego, CA (USA), (2008)
 15. Sarah M. Khalil, David Shrader, Andrew J. Heim, Sungtae Kim, Dane Morgan and Izabela Szlufarska, Fission Product Release in TRISO Nuclear Fuels, http://matmodel.engr.wisc.edu/Nuggets/Triso_group.html, diakses 28 Mei (2013)