



ID0200122

MODEL EVALUASI KEMAMPUAN LAPISAN PELINDUNG PADA PARTIKEL BAHAN BAKAR DALAM MENAHAN TEKANAN GAS INTERNAL

Bambang Herutomo dan Tri Yulianto
Pusat Pengembangan Teknologi Bahan Bakar nuklir dan Daur Ulang

ABSTRAK

MODEL EVALUASI KEMAMPUAN LAPISAN PELINDUNG PADA PARTIKEL BAHAN BAKAR DALAM MENAHAN TEKANAN GAS INTERNAL. Partikel bahan bakar berpelindung yang diisi ke dalam matrik grafit telah digunakan sebagai bahan bakar reaktor temperatur tinggi. Fungsi utama lapisan pelindung adalah menjaga nuklida hasil fisi agar tetap berada di dalam partikel bahan bakar. Oleh karena itu, keselamatan dan kinerja operasi reaktor sangat ditentukan oleh integritas mekanik lapisan pelindung. Model perhitungan untuk mengevaluasi kemampuan lapisan pelindung dalam menahan tekanan gas internal disajikan di dalam makalah ini. Di dalam model, lapisan pelindung diasumsikan sebagai bejana tekan bentuk bola berdinding tebal dan rasio antara tekanan gas internal dengan tekanan internal yang menyebabkan permukaan dalam dinding bejana mulai mengalami peluluhan digunakan untuk mengevaluasi integritas lapisan pelindung. Berdasarkan model, evaluasi kemampuan lapisan pelindung partikel bahan bakar untuk Reaktor Uji Temperatur Tinggi (Jepang) telah dilakukan dan hasilnya menunjukkan bahwa lapisan pelindung mampu menahan tekanan gas internal yang timbul.

ABSTRACT

MODEL FOR STRENGTH EVALUATION OF COATING LAYERS OF A FUEL PARTICLE IN RESTRAINT OF INTERNAL GAS PRESSURE. Coated fuel particles contained in graphite matrix are used in high temperature reactor. The main purpose of the coating layer is to retain fission products within the fuel particles. Therefore, the safety and the performance of reactor operation depend on the mechanical integrity of the coating layers. A calculation model for strength evaluation of coating layer to restrain internal gas pressure is presented in this paper. In the model, coating layer is assumed as thick walled – spherical pressure vessel, and ratio of internal gas pressure and internal pressure caused the inner surface of pressure vessel wall begin to yield is used to evaluate the integrity of coating layer. Based on this model, strength evaluation of coating layers of fuel particle for High Temperature Test Reactor (Japan) has been carried out and the result shows that the coating layers are able to restrain the build up of internal gas pressure.

PENDAHULUAN

Bahan bakar untuk reaktor temperatur tinggi (HTR – *High Temperature Reactor*) pada umumnya tersusun atas partikel-partikel bahan bakar yang dikompakkan dengan matrik grafit dalam bentuk bola atau pelet. Setiap partikel bahan bakar tersusun atas bahan fisil berupa bola-bola kecil (*kernel*) berdiameter sekitar 600 mikron dan lapisan pelindung yang berfungsi menghalangi pelepasan nuklida hasil fisi ke sistem pendingin dan menghalangi serangan kimia pendingin terhadap *kernel* bahan bakar. Sebagai *kernel* bahan bakar dapat berupa uranium dioksida - UO_2 , campuran uranium dan thorium dioksida - $(U+Th)O_2$ maupun campuran UO_2 dengan UC (*Uranium Carbide*). Lapisan pelindung yang dikembangkan pada partikel bahan bakar untuk HTR modern adalah tipe TRISO (*Tri - Isotropic*). Lapisan pelindung ini tersusun atas tiga lapis, yaitu lapis terdalam berupa lapisan pirokarbon kerapatan tinggi (*Inner PyC – IPyC*), lapis tengah berupa lapisan

silikon karbida (SiC) dan lapis luar berupa lapisan pirokarbon kerapatan tinggi (*Outer PyC – OPyC*). Di antara *kernel* bahan bakar dengan lapisan pelindung terdalam (*IPyC*) terdapat lapisan *buffer* pirokarbon yang sangat porous. Fungsi utama lapisan *buffer* menampung gas-gas hasil fisi yang terlepas dari *kernel* bahan bakar. Model elemen bakar tipe prismatic dan ilustrasi tampang lintang partikel bahan bakar berpelindung TRISO dapat dilihat pada gambar 1. ^[1,2,3]

Berdasarkan desain bahan bakar HTR di atas tampak bahwa keselamatan dan kinerja operasi reaktor sangat ditentukan oleh integritas mekanik dari masing-masing lapisan pelindung (*IPyC*, SiC dan *OPyC*). Usaha dasar yang sangat diperlukan untuk meningkatkan keselamatan dan kinerja operasi reaktor adalah mereduksi sekecil-mungkin fraksi gagal lapisan pelindung (*as-fabricated*) dan mencegah terhadap kegagalan selama iradiasi. Beberapa penyebab utama kegagalan lapisan pelindung selama iradiasi telah dapat diidentifikasi secara baik dewasa ini. Untuk

iradiasi pada temperatur tinggi, kegagalan lapisan pelindung terutama disebabkan oleh migrasi *kernel* bahan bakar (*amoeba effect*) dan korosi lapisan pelindung SiC oleh nuklida hasil fisi seperti paladium. Untuk iradiasi sampai derajat bakar tinggi, kegagalan terutama disebabkan oleh tegangan yang timbul pada lapisan pelindung (*pressure vessel failure*) akibat tekanan gas internal yang berasal dari gas-gas hasil fisi yang terlepas dari *kernel* bahan bakar dan efek penyusutan dimensi lapisan pelindung (terutama lapisan PyC) karena iradiasi neutron cepat.^(1,2,3)

Dalam usaha memahami konsep desain partikel bahan bakar seperti diuraikan di atas, terutama dalam hal desain lapisan pelindung, makalah ini menyajikan suatu model perhitungan untuk mengevaluasi kemampuan desain lapisan pelindung dalam menahan tekanan gas internal yang timbul akibat iradiasi. Di dalam model, lapisan pelindung diasumsikan sebagai bejana tekan bentuk bola berdinding tebal dan masing-masing lapisan pelindung tidak saling terkait antara satu dengan yang lainnya (*independent*) sehingga masing-masing lapisan pelindung akan mendapat tekanan gas internal yang sama. Kemampuan lapisan pelindung dievaluasi berdasarkan atas rasio antara tekanan gas internal dengan tekanan kritis lapisan pelindung. Lapisan pelindung dikatakan mampu menahan tekanan gas internal (tetap memiliki integritas mekanik) apabila rasio antara tekanan gas internal dengan tekanan kritis lebih kecil dari satu. Sebagai contoh perhitungan, evaluasi telah dilakukan pada lapisan pelindung tipe TRISO dari partikel bahan bakar HTTR – Jepang (*High Temperature Test Reactor*). Model dan hasil yang diperoleh diharapkan bermanfaat untuk mengevaluasi keandalan disain partikel bahan bakar yang akan dikembangkan dan digunakan dalam bahan bakar HTR untuk Indonesia.

MODEL PERHITUNGAN

Perhitungan yang diperlukan dalam evaluasi ini secara garis besar meliputi perhitungan tekanan gas internal yang timbul akibat iradiasi dan perhitungan tekanan internal yang menyebabkan permukaan dalam lapisan pelindung mulai mengalami peluluhan (tekanan kritis). Untuk melakukan perhitungan tersebut, lapisan pelindung diasumsikan sebagai bejana tekan bentuk

bola berdinding tebal (*thick walled – spherical pressure vessel*) yang hanya mendapat tekanan dari dalam saja (tekanan atau gaya dari luar diabaikan).

Perhitungan Tekanan Gas Internal

Apabila *kernel* bahan bakar yang digunakan di dalam partikel bahan bakar adalah UO_2 maka gas internal yang dipertimbangkan dalam perhitungan meliputi gas hasil fisi (Xe dan Kr) yang terlepas dari *kernel* bahan bakar UO_2 dan gas CO yang terbentuk dari hasil reaksi antara lapisan *buffer* dengan oksigen bebas yang berasal dari oksigen berlebih akibat reaksi fisi yang terjadi di dalam *kernel* bahan bakar UO_2 . Dengan mengasumsikan bahwa gas-gas tersebut berkelakuan seperti gas ideal maka besarnya tekanan gas internal sebagai fungsi waktu iradiasi, $P(t)$, dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$P(t) = \frac{n(t) R T}{V(t)} \quad (1)$$
$$n(t) = n_{fp} + n_{co}$$

$n(t)$ adalah total gas pada waktu t (gr-mol), R adalah konstanta gas ideal (8,317 MPa cm^3 /gr-mol K), T adalah temperatur (K), $V(t)$ adalah volume ruang kosong yang terdapat di dalam lapisan *buffer* pada waktu t (cm^3), n_{fp} dan n_{co} adalah jumlah gas hasil fisi yang terlepas dari *kernel* bahan bakar dan gas CO yang terbentuk sampai waktu t (gr-mol).

Jumlah gas hasil fisi (gr-mol) yang terlepas dari *kernel* bahan bakar dihitung dengan persamaan berikut (diasumsikan bahwa *yield* gas hasil fisi yang terbentuk dari reaksi fisi adalah 31%)

$$n_{fp} = \frac{0,31 \times F \times FR \times t_{ir}}{NA} \quad (2)$$

F adalah laju reaksi fisi (fisi/hari), FR adalah total fraksi gas hasil fisi yang terlepas dari *kernel* bahan bakar, t_{ir} adalah lama iradiasi (hari), dan NA adalah bilangan Avogadro ($6,02217 \cdot 10^{23}$ gr-mol⁻¹).

Jumlah gas CO (gr-mol) yang terbentuk dari hasil reaksi antara oksigen dengan lapisan *buffer* pirokarbon ditentukan berdasarkan jumlah atom oksigen (n_{ox}) bebas yang terlepas dari *kernel* bahan bakar UO_2 , yaitu :^[3]

$$\log\left(\frac{n_{ox}}{F t_{ir}^3}\right) = -0,21 - \frac{8500}{T} \quad (3)$$

T adalah temperatur kernel bahan bakar (K).

Sedangkan volume ruang kosong, $V(t)$, yang terdapat di dalam lapisan *buffer* sebagai fungsi waktu dapat ditentukan berdasarkan perbandingan densitas fabrikasi lapisan *buffer* dengan densitas teoritis PyC kemudian dikoreksi dengan penambahan volume *kernel* bahan bakar akibat *swelling*.

$$V(t) = \left(1 - \frac{\rho_{buffer}}{\rho_{PyC}}\right) \times V_{buffer} - dV_{sw} \quad (4)$$

V_{buffer} adalah volume lapisan *buffer* (cm^3) dan dV_{sw} adalah pertambahan volume *kernel* bahan bakar akibat peristiwa *swelling* (cm^3)

Perhitungan Tekanan Kritis

Untuk bejana tekan bentuk bola berdinding tebal yang hanya mendapat tekanan internal sebesar P dan tekanan dari luar bola diabaikan maka besarnya tekanan internal yang menyebabkan permukaan dalam dinding bejana tekan mulai mengalami peluluan (*yielding*), P_{crit} , adalah :⁽⁴⁾

$$P_{crit} = \frac{2}{3} \frac{(R_o / R_i)^3 - 1}{(R_o / R_i)^3} \sigma_y \quad (5)$$

R_i dan R_o adalah jari-jari dalam dan jari-jari luar bola, σ_y adalah tegangan luluh bahan bejana tekan.

Metoda Evaluasi

Kemampuan lapisan pelindung dalam menahan tekanan gas internal dapat dievaluasi dari besar-kecilnya rasio antara tekanan gas internal hasil perhitungan persamaan (1) dengan tekanan kritis hasil perhitungan persamaan (5). Hal ini berarti, semakin kecil rasio antara tekanan gas internal dengan tekanan kritis maka lapisan pelindung semakin mampu (andal) dalam menahan tekanan gas internal yang timbul.

HASIL DAN BAHASAN

Sebagai contoh penerapan model perhitungan di atas, berikut disajikan hasil evaluasi kemampuan lapisan pelindung pada

partikel bahan bakar HTTR-Jepang dalam menahan tekanan gas internal. Data desain dan kondisi operasi partikel bahan bakar yang diperlukan dalam perhitungan dapat dilihat pada tabel 1.

Data pada tabel 2 adalah ringkasan hasil perhitungan tentang jumlah gas yang mengisi ruang kosong di dalam lapisan *buffer* (gas hasil fisi yang terlepas dari kernel bahan bakar dan gas CO yang terbentuk), volume ruang kosong di dalam lapisan *buffer* dan tekanan gas internal yang timbul di dalam partikel bahan bakar yang ditinjau. Dalam evaluasi ini, total fraksi gas hasil fisi yang terlepas dari *kernel* bahan bakar maupun *swelling* yang terjadi pada *kernel* bahan bakar sebagai fungsi sejarah iradiasi ditentukan dengan program komputer FASTGRASS⁽⁶⁾. Oleh karena fraksi gas hasil fisi yang terlepas maupun *swelling* yang terjadi pada bahan bakar UO_2 sangat dipengaruhi oleh temperatur operasi, yaitu semakin besar apabila temperatur operasi semakin tinggi maka perhitungan dilakukan pada temperatur operasi maksimum (1495 °C). Berdasarkan temperatur operasi tersebut, hasil perhitungan tekanan gas internal di dalam tabel 2 menunjukkan nilai maksimum sehingga evaluasi berikutnya akan mendapatkan hasil yang konservatif.

Data pada tabel 3 adalah ringkasan hasil perhitungan tekanan kritis dan rasio antara tekanan gas internal dengan tekanan kritis untuk masing-masing lapisan pelindung (IPyC, SiC dan OPyC) dari tipe partikel bahan bakar yang ditinjau. Dalam perhitungan ini diasumsikan bahwa masing-masing lapisan pelindung pada partikel bahan bakar adalah berdiri bebas atau tidak saling berinteraksi sehingga masing-masing lapisan pelindung mendapat tekanan gas internal yang sama (tabel 2) dan tekanan antar muka akibat interaksi antar lapisan pelindung dapat diabaikan. Berdasarkan asumsi ini lapisan pelindung akan mendapatkan tekanan gas internal yang maksimum. Oleh karena data tegangan luluh untuk masing-masing lapisan tidak ada maka tegangan luluh dalam perhitungan tekanan kritis diasumsikan sama dengan kekuatan patahnya (*fracture strength*) sehingga tekanan kritis hasil perhitungan persamaan (5) merupakan tekanan internal yang menyebabkan lapisan pelindung jebol. Berdasarkan pustaka [3] besar kekuatan patah lapisan pelindung IPyC dan OPyC adalah 160 MPa sedangkan kekuatan patah

untuk lapisan pelindung SiC (dalam satuan MPa) adalah :

$$\sigma_{y, SiC} = 834 - 88 \times \Phi \quad (6)$$

Φ adalah *fluence* neutron cepat ($\times 10^{25} \text{ m}^{-2}$)

Data hasil perhitungan pada tabel 3 menunjukkan bahwa rasio tekanan gas internal dengan tekanan kritis adalah lebih kecil dari satu untuk lapisan pelindung SiC dan lebih besar dari satu untuk lapisan pelindung pirokarbon (IPyC dan OPyC). Hal ini berarti bahwa tekanan gas internal yang timbul tidak akan menyebabkan kerusakan pada lapisan pelindung SiC akan tetapi menyebabkan kerusakan pada lapisan pelindung IPyC dan OPyC. Oleh karena ketiga lapisan pelindung tersebut merupakan satu kesatuan maka lapisan pelindung SiC akan menahan lapisan pelindung IPyC dan OPyC sehingga integritas mekanik lapisan tersebut tetap terjaga sampai iradiasi berakhir. Dalam arti lain, partikel bahan bakar yang ditinjau memiliki lapisan pelindung SiC yang berfungsi sebagai penyangga (*restraint*) lapisan pelindung yang lain (IPyC dan OPyC). Ditinjau dari segi keandalan partikel bahan bakar, keadaan tersebut akan sangat menguntungkan karena selama lapisan pelindung SiC tetap utuh (dalam arti tekanan gas internal tidak melampaui tekanan kritisnya) maka dua lapisan yang lain (IPyC dan OPyC) juga tetap dalam keadaan utuh meskipun tekanan gas internal telah melampaui tekanan kritis lapisan tersebut.

Apabila dibandingkan dengan data eksperimen, pernyataan tersebut di atas adalah sesuai karena dari hasil uji iradiasi ke dua tipe partikel bahan bakar yang ditinjau tidak ditemui adanya kegagalan sampai derajat bakar yang direncanakan tercapai (33 MWd/kgU untuk partikel bahan bakar teras pertama dan 70 MWd/kgU untuk partikel bahan bakar teras ulang).^[3]

SIMPULAN DAN SARAN

Model perhitungan untuk evaluasi kemampuan lapisan pelindung pada partikel bahan bakar HTR dalam menahan tekanan gas internal telah dikemukakan. Dalam model, lapisan pelindung diasumsikan sebagai bejana tekan bentuk bola ber dinding tebal dan masing-masing lapisan pelindung tidak saling terkait antara satu dengan yang lainnya (*independent*) sehingga masing-masing lapisan pelindung akan mendapat

tekanan gas internal yang sama. Kemampuan lapisan pelindung dievaluasi berdasarkan atas rasio antara tekanan gas internal dengan tekanan kritis lapisan pelindung. Lapisan pelindung dikatakan mampu menahan tekanan gas internal (tetap memiliki integritas mekanik) apabila rasio antara tekanan gas internal dengan tekanan kritis lebih kecil dari satu.

Berdasarkan model, telah dilakukan evaluasi kemampuan lapisan pelindung pada partikel bahan bakar HTTR – Jepang, baik untuk bahan bakar teras pertama maupun bahan bakar teras isi-ulang. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa lapisan pelindung (IPyC, SiC dan OPyC) pada partikel bahan bakar tersebut mampu menahan tekanan gas internal yang timbul. Dari hasil evaluasi juga tampak bahwa keandalan partikel bahan bakar dalam mempertahankan integritas mekaniknya sangat dipengaruhi oleh desain dan keutuhan lapisan SiC-nya.

Oleh karena penyusutan dimensi lapisan pelindung PyC akibat iradiasi neutron cepat juga merupakan penyebab utama kegagalan lapisan pelindung maka model perlu dikembangkan lebih lanjut sehingga keandalan atau kemampuan lapisan pelindung dalam mempertahankan integritas mekaniknya selama iradiasi dapat diprediksi secara akurat. Selain itu efek perbedaan ekspansi termal di antara lapisan pelindung juga perlu dipertimbangkan terutama untuk kondisi *transient*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. SIMNAD, M., "Fuel Element Experience in Nuclear Power Reactors", American Nuclear Society, Gordon and Breach Science Publishers, New York, 1971
- [2]. GOEDEL, W.V. and BOKROS, J.C., "The HTGR Coated Particle Fuel", High Temperature Nuclear Fuel (ed. HOLDEN, A.N.), Metallurgical Society Conferences, Vol. 42, 1966.
- [3]. SAWA, K. And SHIOZAWA, S., "Development of Coated Fuel Particle Failure Model under High Burnup Irradiation", Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 33, No. 9, p. 712 – 720, September 1996
- [4]. REST, J. and HOFMAN, G.L., "DART Model for Irradiation-Induced

- Swelling of Uranium Silicide Dispersion Fuel Elements", Nuclear Technology, Vol. 126, April 1999.
- [5]. REST, J. and ZAWADZKI, S.A., "FASTGRASS : A Mechanistic Model for the Prediction of Fission-Gas Behaviour in UO₂ Base Fuels During Steady State and Transients Conditions", NUREG/CR-0202, Argonne National Laboratory, Report ANL-78-53 (1978)

TANYA JAWAB

Endiah P.H.

- Dalam perhitungan maksimum lapisan pelindung yang berlapis-lapis dalam menahan tekanan gas internal, apakah dilakukan secara simultan sebagai fungsi derajat bakar
- Jika dianggap bahwa garis horizontal bahan bakar spheris adalah arah radial, apakah dilakukan nodalisasi dalam perhitungan dan bagaimanakah caranya.

Bambang Herutomo

- Ya, telah dilakukan secara simultan. Dalam arti jumlah gas hasil fisi yang terlepas dari kernel bahan bakar dan besar swelling yang terjadi pada kernel sebagai fungsi derajat bakar ditentukan terlebih dahulu (telah dihitung dengan program FASTGRASS) kemudian baru dihitung besar tekanan gas internal sebagai fungsi derajat bakar dengan persamaan (1).
- Oleh karena dalam model yang diajukan diambil asumsi bahwa masing-masing lapisan pelindung tidak saling terkait (independent) maka nodalisasi dalam perhitungan tidak perlu dilakukan.

Tumpal P.

- Kekuatan lapisan pelindung untuk menahan tekanan gas internal sangat

ditentukan oleh kekuatan *yield stress* dari bahan pelapis tersebut.

- Bagaimana hubungan perubahan temperatur terhadap *yield stress* dari bahan pelapis tersebut.
- Sebagai fungsi temperatur kita ketahui sifat mekanik lapisan tersebut akan berubah. Bagaimana kaitannya dengan model perhitungan tersebut.
- Densitas yang berbeda-beda dibuat sedemikian guna mengakomodasi gas-gas tersebut. Bagaimana hubungannya dengan model tersebut.

Bambang Herutomo

- *Yield Stress* dari bahan lapisan pelindung (PyC dan SiC) memiliki tendensi naik dengan kenaikan temperatur.
- Model secara langsung menggunakan sifat bahan (*yield stress*) yang telah dievaluasi berdasarkan temperatur operasi.
- Telah dimodelkan (lihat persamaan (4))

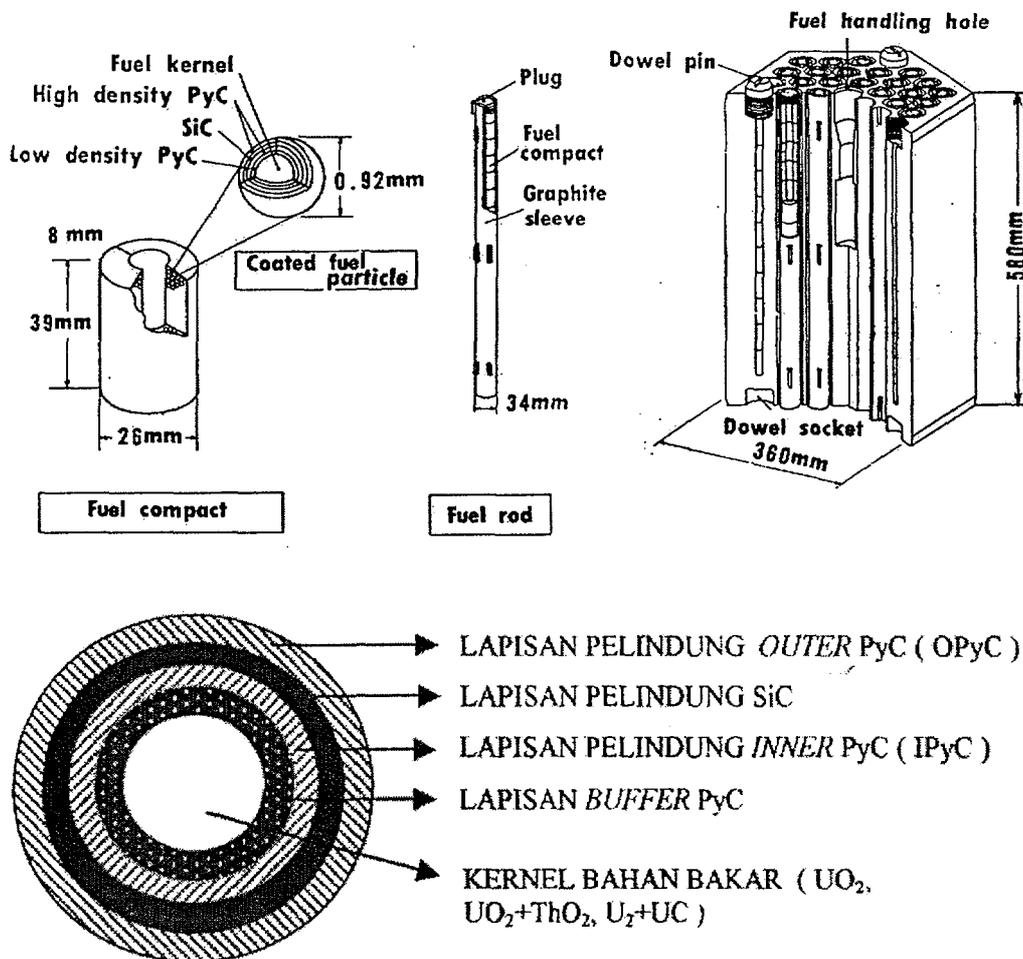
Sunardi

- Apakah jenis lapisan pelindung yang dievaluasi dalam makalah adalah yang terbaik saat ini
- Bagaimana jika temperatur iradiasi melebihi 1495^oC misalkan 1600^oC
- Dapatkah model ini digunakan untuk bahan bakar bentuk pelat

Bambang Herutomo

- Ya, lapisan tipe TRISO telah diyakini yang terbaik.
- Tekanan gas internal akan naik.
- Dapat. Model perhitungan kritis (persamaan (5)) yang digunakan adalah diambil dari model mekanik DART yang digunakan untuk memprediksi *swelling* partikel bahan bakar dari bahan bakar dispersi tipe pelat

LAMPIRAN 1



Gambar 1 : Model elemen bakar heksagonal atau prismatic (HTTR – Jepang) dan ilustrasi penampang lintang partikel bahan bakar berpelindung TRISO.

LAMPIRAN 2

Table 1. Beberapa data utama desain dan kondisi operasi partikel bahan bakar untuk HTTR – Jepang yang diperlukan di dalam perhitungan.

	Teras Pertama	Teras Isi-Ulang
Diameter Kernel UO ₂ (μm)	600	550
Tebal Lapisan <i>Buffer</i> (μm)	60	90
Tebal Lapisan PyC Dalam - IPyC (μm)	30	30
Tebal Lapisan SiC (μm)	25	35
Tebal Lapisan PyC Luar – OPyC (μm)	45	40
Densitas Lapisan <i>Buffer</i> (gr-cm ⁻³)	1,1	1,1
Temperatur Iradiasi (°C)	1495	1495
Daya (W/partikel)	0,05	0,05
Maks. <i>Fluent</i> Neutron Cepat (m ⁻²)	$1,5 \times 10^{25}$	$2,7 \times 10^{25}$
Maks. Derajat Bakar (GWd/t)	33	60

Tabel 2. Hasil perhitungan tekanan internal gas di dalam partikel bahan bakar

Tipe Bahan Bakar	Derajat Bakar (GWd/t)	Jumlah Gas (gr – mol)	Volume Ruang Kosong (cm ³)	Tekanan Gas Internal (MPa)
Teras Pertama	33	$8,89 \times 10^{-8}$	$3,22 \times 10^{-5}$	43,0
Teras Isi-Ulang	60	$2,32 \times 10^{-7}$	$5,03 \times 10^{-5}$	72,0

Tabel 3. Hasil perhitungan tekanan kritis dan rasio antara tekanan gas internal dengan tekanan kritis untuk setiap lapisan pelindung.

	Tekanan Kritis (MPa)	[Tekanan Internal Gas]
		[Tekanan Kritis]
Partikel Bahan Bakar Teras Pertama :		
▪ Lapisan Pelindung PyC Dalam - IPyC	22,72	1,89
▪ Lapisan Pelindung SiC	54,24	0,79
▪ Lapisan Pelindung PyC Luar - OPyC	28,32	1,52
Partikel Bahan Bakar Teras Ulang :		
▪ Lapisan Pelindung PyC Dalam - IPyC	22,50	3,20
▪ Lapisan Pelindung SiC	89,40	0,81
▪ Lapisan Pelindung PyC Luar - OPyC	24,98	2,88