

INVESTIGASI KRITIKALITAS REAKTOR RGTT200K SEBAGAI IMPAK VARIASI RADIUS BAHAN BAKAR *PEBBLE* DAN KERNEL DENGAN BERBAGAI FRAKSI BAKAR

Zuhair dan Suwoto

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir – BATAN
Kawasan Puspipstek Gedung No. 80, Serpong, Tangerang 15310
Tel. (021)756-0912, Fax. (021)756-0913,
e-mail: zuhairbasjmeleh@yahoo.com

ABSTRAK

INVESTIGASI KRITIKALITAS REAKTOR RGTT200K SEBAGAI IMPAK VARIASI RADIUS BAHAN BAKAR *PEBBLE* DAN KERNEL DENGAN BERBAGAI FRAKSI BAKAR. Partikel TRISO yang digunakan dalam HTR memiliki diameter ~1 mm, namun hingga saat ini radius bahan bakar *pebble* dan radius kernel dalam HTR *pebble bed* dibuat tetap pada nilai baku. Radius bahan bakar *pebble* ditetapkan 3,0 cm dan radius kernel bahan bakar ditentukan 0,0250 cm. Dua parameter ini diinvestigasi dalam makalah karena sangat mempengaruhi performa moderasi neutron dalam desain kritikalitas RGTT200K dengan berbagai fraksi bakar. Efek radius bahan bakar *pebble* dan kernel dalam teras RGTT200K didiskusikan dengan pengkayaan ^{235}U 8,2% dan fraksi *packing* TRISO 9,34%. Investigasi dilakukan dengan memanfaatkan program transport Monte Carlo MCNPX dan pustaka data nuklir energi kontinu ENDF/B-VII pada temperatur 1200K. Hasil perhitungan memperlihatkan faktor multiplikasi reaktor (k_{eff}) teras RGTT200K dengan radius bahan bakar *pebble* lebih kecil sangat bergantung pada radius kernel dan sebuah radius kernel optimum didapatkan untuk setiap bahan bakar *pebble* yang secara implisit juga bergantung pada fraksi bakar bahan bakar. Dari analisis dapat disimpulkan bahwa, pemilihan radius bahan bakar *pebble* 1,5 cm sebaiknya tidak dipertimbangkan dalam desain RGTT200K karena profil kritikalitasnya yang berbeda. Radius bahan bakar *pebble* 2 cm hingga 4 cm dan kombinasinya dengan radius kernel dapat dipertimbangkan sebagai sebuah cara yang tepat untuk mendapatkan nilai kritikalitas optimum dan fraksi bakar spesifik yang diinginkan dari teras RGTT200K dengan fraksi *packing* TRISO dan pengkayaan bahan bakar yang telah ditentukan.

Kata-kunci: TRISO, kritikalitas, fraksi bakar, kernel, bahan bakar *pebble*, RGTT200K

ABSTRACT

INVESTIGATION ON CRITICALITY OF RGTT200K REACTOR AS AN IMPACT OF KERNEL AND FUEL *PEBBLE* RADIUS VARIATION WITH VARIOUS BURNUP. TRISO particles used in HTR has a diameter of ~1 mm, but until this time the radius of kernel and fuel *pebble* in HTR *pebble bed* as a design parameter has been made fixed at standard values. Radius of fuel *pebble* was set as 3.0 cm and radius of kernel was determined as 0.0250 cm. These two parameters were investigated in the paper because they affect performance of neutron moderation in RGTT200K design criticality with various fuel burnup. The effect of kernel and fuel *pebble* radius in RGTT200K core was discussed with ^{235}U enrichment of 8.2% and TRISO packing fraction of 9.34%. Investigation was conducted by using Monte Carlo transport code MCNPX and continuous energy nuclear data library ENDF/B-VII at temperature of 1200K. The calculation results show the RGTT200K reactor core multiplication factor (k_{eff}) with smaller fuel *pebble* radius strongly depends on the radius of kernel and a fuel kernel radius optimum is obtained for each fuel *pebble* which implicitly also depends on fuel burnup. From the analysis it can be concluded that, the selection of fuel *pebble* of 1.5 cm should be not be considered in the RGTT200K because of different its criticality profile. Fuel *pebble* radius of 2 cm to 4 cm and its combination with kernel radius can be considered as a great way to find optimum criticality value and specific fuel burnup desired by RGTT200K with the determined TRISO packing fraction and fuel enrichment.

Keywords: TRISO, criticality, fraksi bakar, kernel, *pebble* fuel, RGTT200K

PENDAHULUAN

Reaktor Generasi IV^[1] tengah diinvestigasi sebagai pembangkit listrik energi nuklir dengan sejumlah perbaikan besar pada desain yang dimiliki reaktor nuklir saat ini. Tujuan utama dari investigasi adalah untuk mendapatkan desain reaktor yang memiliki mekanisme keamanan pasif dalam operasi reaktor, peningkatan ketahanan proliferasi, pengoptimalan siklus bahan bakar tertutup dan peningkatan efisiensi konversi energi serta pengurangan biaya konstruksi dan operasional. Reaktor temperatur tinggi (*high temperature reactor*, HTR) dengan kapabilitas memproduksi listrik dan panas proses pada temperatur tinggi (hingga $\sim 1.000^{\circ}\text{C}$) telah dipertimbangkan menjadi kandidat yang potensial untuk konsep sistem reaktor Generasi IV. HTR memiliki beberapa kelebihan dibandingkan reaktor air ringan LWR (*light water reactor*) konvensional. Pertama, temperatur *outlet* teras HTR yang lebih tinggi dengan jangkauan 700°C hingga 950°C (LWR tipikal $\sim 300^{\circ}\text{C}$) membuat efisiensi Carnot HTR secara intrinsik lebih tinggi. Kedua, temperatur HTR yang tinggi dapat dimanfaatkan untuk panas proses yang dapat mereduksi penggunaan metana. Ketiga, temperatur tinggi HTR dimana partikel TRISO dapat beroperasi menghasilkan eksploitasi koefisien temperatur negatif untuk memadamkan reaktor secara aman tanpa pemanfaatan batang kendali^[2,3].

Berbagai institusi riset energi nuklir di dunia menaruh perhatian khusus pada reaktor ini karena selain beberapa kelebihan di atas, karakteristik keselamatan melekat (*inherent safety*) HTR telah dibuktikan di masa lalu melalui serangkaian eksperimen dan operasi Peach Bottom^[4] dan Fort Saint Vrain^[5] di USA, AVR^[6] (*arbeitsgemeinschaft versuchsreaktor*) dan THTR^[7] (*thorium high temperature reactor*) di Jerman, juga konfirmasi evaluasi yang dilaporkan akhir-akhir ini dari eksperimen demonstrasi keselamatan yang dikerjakan di HTTR^[8] (*high temperature engineering test reactor*) Jepang dan HTR-10^[9] China. Banyak negara telah melakukan desain dan pengembangan HTR untuk aplikasi komersial, seperti PBMR^[10] (*pebble bed modular reactor*) yang sedang dalam taraf desain di Afrika Selatan, GT-MHR^[11] (*gas turbine modular helium reactor*) untuk pembakaran plutonium tingkat senjata di USA dan Rusia, GTHTTR300^[12,13] (*gas turbine high temperature reactor*) di Jepang dan HTR-PM^[14] (*high temperature reactor pebble-bed module*) di China.

Keselamatan melekat HTR berasal dari pemanfaatan partikel bahan bakar berlapis TRISO. Partikel TRISO terdiri dari bahan bakar kernel yang dilapisi silikon karbida dan tiga lapisan piro karbon. Lapisan-lapisan ini pada prinsipnya berfungsi mencegah kebocoran produk fisi dari matriks bahan bakar. Dalam HTR tipe blok prismatik, partikel TRISO diikat bersama matriks grafit ke dalam bahan bakar kernel berbentuk batang atau pin untuk selanjutnya ditumpuk dalam lobang bahan bakar dari blok grafit heksagonal. Dalam HTR tipe *pebble bed*, partikel TRISO didistribusikan secara acak ke dalam matriks grafit untuk membentuk bahan bakar bola atau *pebble*.

Partikel TRISO yang digunakan dalam kedua tipe HTR memiliki diameter ~ 1 mm, namun hingga saat ini radius bahan bakar *pebble* dan radius kernel dalam HTR *pebble bed* dibuat tetap pada nilai baku. Radius bahan bakar *pebble* ditetapkan 3,0 cm dan radius kernel bahan bakar ditentukan 0,0250 cm. Pemilihan radius bahan bakar *pebble* dan kernel dalam desain RGTT200K masih terbuka dan masih dapat dipertimbangkan. Tujuan dari makalah ini adalah melakukan investigasi apakah

pemilihan nilai baku sudah tepat karena pada dasarnya dua parameter ini sangat mempengaruhi performa moderasi neutron dalam desain kritikalitas reaktor RGTT200K^[15] dengan berbagai fraksi bakar. Investigasi dilakukan dengan memanfaatkan program transport Monte Carlo MCNPX^[16] dan pustaka data nuklir energi kontinu ENDF/B-VII^[17] pada temperatur 1200K. Hasil investigasi diharapkan melengkapi studi efek parameter desain lainnya seperti pengkayaan^[18], fraksi *packing* partikel TRISO^[19] dan dimensi reflektor grafit^[20] yang telah dilakukan sebelumnya.

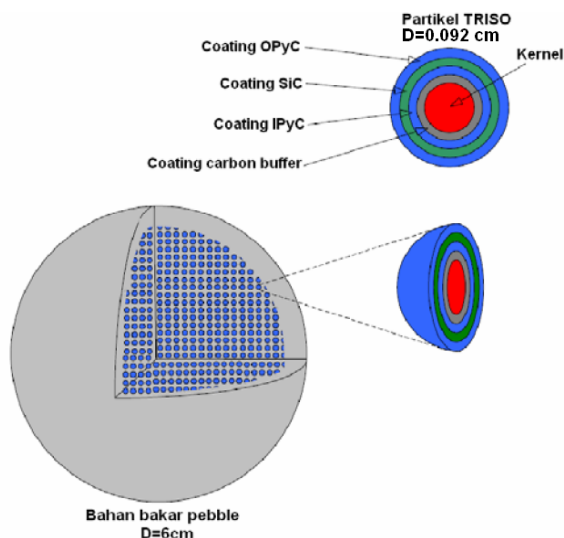
DESKRIPSI TERAS REAKTOR RGTT200K

Teras reaktor RGTT200K memiliki diameter 300 cm, tinggi 943 cm dan memuat 359.548 bahan bakar *pebble* yang terdistribusi secara acak di dalam teras reaktor. Dengan volume teras 66,657 m³ dan densitas daya 3 W/cm³, RGTT200K dapat menghasilkan daya sebesar 200 MW dengan temperatur *outlet* teras rerata 950°C dan temperatur *inlet* helium rerata 550°C. Struktur grafit yang mengelilingi teras memiliki ketebalan radial 100 cm serta aksial total bagian atas dan bagian bawah 750 cm. Kavitas yang berada di atas teras mempunyai tinggi 50 cm.

Tabel 1. Parameter reaktor dan spesifikasi teras reaktor RGTT200K^[15].

Parameter reaktor:	
Daya (MW)	200
Volume teras (m ³)	66,657
Temperatur <i>inlet</i> teras (°C)	550
Temperatur <i>outlet</i> teras (°C)	950
Tekanan He (MPa)	7
Aliran massa pendingin (kg/s)	120
Densitas pendingin He pada 273,16K, 10 ⁵ Pa (g/cm ³)	1,78×10 ⁻⁴
Spesifikasi teras:	
Tinggi teras (m)	9,43
Radius teras (m)	1,5
Jumlah <i>pebble</i> per m ³	5.394
Jumlah <i>pebble</i> dalam teras	359.548
Fraksi <i>packing pebble</i> dalam teras (%)	61
Impuritas boron alam dalam struktur grafit (ppm)	2

Pemuatan bahan bakar RGTT200K dilakukan secara kontinu dengan mengadopsi moda *discharging*. Manajemen bahan bakar RGTT200K dimulai dengan memasukkan bahan bakar *pebble* ke dalam teras reaktor dari atas, dan mengeluarkan bahan bakar bekas yang telah digunakan dalam kurun waktu operasi reaktor dari bawah. Bahan bakar *pebble* yang belum mencapai *fraksi bakar* final akan disirkulasikan ke dalam teras untuk dapat dimanfaatkan kembali secara efisien dan optimal. Parameter reaktor dan spesifikasi teras RGTT200K diberikan dalam Tabel 1.



Gambar 1. Skema geometrik bahan bakar RGTT200K.

Tabel 2. Spesifikasi bahan bakar *pebble* dan partikel berlapis TRISO.

Bahan bakar <i>pebble</i>:	
Diameter <i>pebble</i> (cm)	6,0
Diameter zona berbahan bakar (cm)	5,0
Ketebalan <i>shell</i> grafit (cm)	0,5
Densitas <i>shell</i> grafit (g/cm^3)	1,75
Impuritas boron alam dalam <i>shell</i> grafit (ppm)	0,5
Fraksi <i>packing pebble</i> dalam teras (%)	61
Partikel berlapis TRISO:	
Kernel bahan bakar	
Radius bahan bakar kernel (cm)	0,025
Densitas bahan bakar kernel (g/cm^3)	10,4
Pengkayaan ^{235}U (%)	8,2
Impuritas boron alam dalam kernel (ppm)	0,5
Lapisan <i>coating</i>	
Material lapisan <i>coating</i>	C/IPyC/SiC/OPyC
Ketebalan lapisan <i>coating</i> (cm)	0,0095/0,004/0,0035/0,004
Densitas lapisan <i>coating</i> (g/cm^3)	1,05/1,9/3,18/1,9

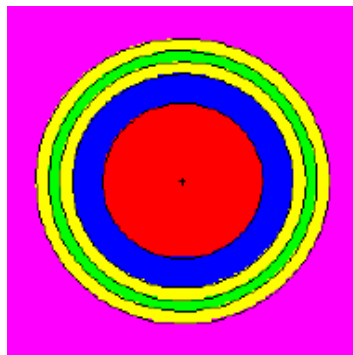
Setiap bahan bakar *pebble* memiliki diameter 6 cm dan mengandung 15.000 partikel TRISO. Partikel TRISO dengan diameter 0,092 cm ini membentuk zona bahan bakar berdiameter 5 cm dan *shell* grafit dengan ketebalan 0,5 cm. Massa kernel dalam setiap bahan bakar *pebble* dapat diderivasi dari jumlah partikel TRISO yang terdistribusi dalam matriks grafit. Partikel TRISO sendiri disusun oleh bahan bakar kernel dengan empat lapisan *coating* yang mengelilinginya.

Kernel UO_2 memiliki diameter 0,05 cm dengan pengkayaan $^{235}\text{U}/(^{235}\text{U} + ^{238}\text{U})$ sebesar 8,2 %. *Coating* tipikal yang dipilih dalam desain ini memiliki ketebalan 0,0095 cm untuk penyangga karbon (*carbon buffer*, C), 0,004 cm untuk karbon pirolitik bagian dalam (*inner pyrolytic carbon*, IPyC) dan luar (*outer pyrolytic carbon*, OPyC) serta 0,0035 cm untuk lapisan silikon karbida (SiC). Skema geometrik bahan bakar *pebble* dan partikel TRISO diilustrasikan dalam Gambar 1 dan spesifikasi detailnya diberikan dalam Tabel 2.

MODEL PERHITUNGAN

Sebelum dilakukan perhitungan dengan MCNPX, konfigurasi geometrik RGTT200K dimodelkan secara detail, presisi dan sedekat mungkin sesuai dengan geometri sebenarnya. Perhitungan MCNPX menggambarkan secara eksplisit fitur kunci seperti heterogenitas ganda, *streaming* neutron dalam daerah densitas rendah dan transisi spektrum di antar-muka yang memberikan keuntungan tersendiri dalam studi reaktor 3-D dari konfigurasi RGTT200K.

MCNPX dikenal sebagai program Monte Carlo partikel neutron yang dikembangkan sebagai ekstensi dari program MCNP. Dalam MCNPX, opsi BURN dimanfaatkan untuk perhitungan fraksi bakar. Beberapa parameter didefinisikan untuk melengkapi perhitungan fraksi bakar diantaranya identifikasi dan volume material fisil yang dapat mengalami fraksi bakar. Daya dan fraksi daya serta lama siklus operasi reaktor harus pula didefinisikan untuk setiap langkah fraksi bakar yang diinginkan. Perhitungan teras RGTT200K keseluruhan (*whole core*) dilakukan dalam ruang 3-D dengan pustaka ENDF/B-VII pada temperatur 1200K. Data nuklir pada temperatur 1200K diderivasi dari pemrosesan menggunakan modul ACER dalam program pengolah data NJOY99.304^[21]. Pemodelan diawali dari partikel TRISO tunggal dengan matriks grafit dalam kisi kubik sederhana (*simple cubic*, SC) sebagai UNIVERSE. Dalam kisi SC, partikel TRISO yang terdiri dari kernel dan keempat lapisan *coating* ditempatkan di pusat kisi. Kisi SC dimodelkan dengan menggenerasi sel kubik dimana partikel TRISO di dalamnya didefinisikan dengan sel-sel permukaan bola konsentris seperti diperlihatkan dalam Gambar 2. Densitas atom partikel TRISO dan matriks grafit diberikan dalam Tabel 3.



Gambar 2. Model MCNPX untuk kisi partikel TRISO.

Tabel 3. Densitas atom partikel TRISO dan matriks grafit (atom/barn-cm³).

Kernel UO ₂				
²³⁵ U	²³⁸ U	O	¹⁰ B	¹¹ B
1,92585×10 ⁻³	2,12877×10 ⁻²	4,64272×10 ⁻²	1,14694×10 ⁻⁷	4,64570×10 ⁻⁷
Nuklida	Lapisan <i>coating</i> TRISO			Matriks grafit
	Penyangga karbon	IPyC/OPyC	SiC	
¹² C	5,26449×10 ⁻²	9,52621×10 ⁻²	4,77240×10 ⁻²	8,77414×10 ⁻²
²⁸ Si	-	-	4,77240×10 ⁻²	-
¹⁰ B	-	-	-	9,64977×10 ⁻⁹
¹¹ B	-	-	-	3,90864×10 ⁻⁸

Untuk menginvestigasi dampak variasi radius bahan bakar kernel, pemodelan kisi tunggal partikel TRISO dikerjakan pada berbagai radius dengan mempertahankan radius bahan bakar *pebble* tetap 3,0 cm. Tabel 4 menyajikan ukuran *pitch* kisi partikel TRISO (p_{SC}) yang diperoleh dari hubungan,

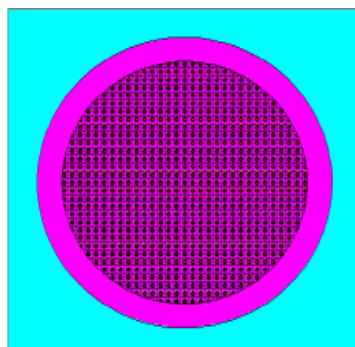
$$p_{SC} = R_{TRISO} \times \sqrt[3]{\frac{4\pi}{3f_T}} \dots\dots\dots(1)$$

dengan R_{TRISO} dan f_T masing-masing adalah radius dan fraksi *packing* partikel TRISO (= 9,34%).

Tabel 4. Ukuran *pitch* kisi partikel TRISO.

Radius kernel (cm)	Radius TRISO (cm)	<i>Pitch</i> kisi (p_{SC} , cm)
0,0175	0,0385	0,136783
0,0200	0,0410	0,145666
0,0225	0,0435	0,154548
0,0250	0,0460	0,163430
0,0275	0,0485	0,172312
0,0300	0,0510	0,181194

Langkah selanjutnya adalah memodelkan bahan bakar *pebble*. Struktur zona bahan bakar *pebble* sulit dimodelkan karena jumlah partikel TRISO dengan lapisan *coating*nya yang besar. Sangat sulit memprediksi susunan dan distribusi partikel TRISO dalam bahan bakar *pebble*, namun MCNPX dapat membangun model eksak untuk zona bahan bakar dengan struktur berulang pada kisi tunggal partikel TRISO yang telah dibuat. Opsi LATTICE dalam MCNPX disediakan untuk mendefinisikan struktur berulang. Pemanfaatan LATTICE dapat menyebabkan munculnya partikel TRISO yang tidak utuh di sekeliling bahan bakar *pebble*. Dengan menerapkan koreksi pada fraksi *packing* TRISO kontribusi TRISO yang tidak utuh di sekeliling *pebble* dapat dieliminasi namun dalam studi ini tidak dilakukan koreksi karena tidak mempengaruhi hasil perhitungan secara signifikan walaupun homogenisasi distribusi partikel TRISO dalam bahan bakar *pebble* tidak direkomendasikan^[22]. Gambar 3 mengilustrasikan kisi bahan bakar *pebble* yang dimodelkan MCNPX. Densitas atom *shell* grafit dibuat sama dengan densitas matriks grafit.



Gambar 3. Model MCNPX untuk kisi bahan bakar *pebble*.

Impak variasi radius bahan bakar *pebble* diinvestigasi dengan mendefinisikan radius *pebble* 2,0; 2,5; 3,0; 3,5 dan 4,0 cm. Radius kernel dipertahankan tetap 0,0250 cm. Pemodelan teras RGTT200K dilakukan dengan memanfaatkan opsi LATTICE untuk mendistribusikan 359.548 bahan

bakar *pebble* yang dimodelkan dengan kisi *body-centered cubic* (BCC). Fraksi *packing* BCC sebesar 61% dipilih agar sesuai dengan nilai tipikal yang diadopsi dalam reaktor temperatur tinggi. Ukuran *pitch* kisi BCC (p_{BCC}), seperti disajikan dalam Tabel 5, yang berubah dengan berubahnya radius bahan bakar *pebble* diperoleh dari hubungan,

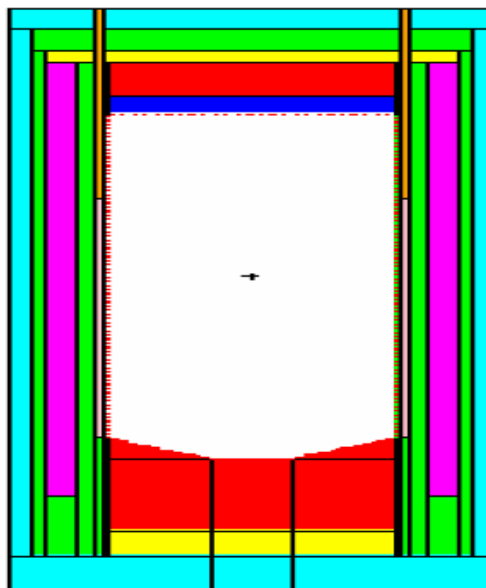
$$p_{BCC} = R_{zona} \times \sqrt[3]{\frac{8\pi}{3f_p}} \dots\dots\dots(2)$$

dengan R_{zona} dan f_p masing-masing adalah radius zona dan fraksi *packing* bahan bakar *pebble* (=61%).

Tabel 5. Ukuran *pitch* kisi bahan bakar *pebble*.

Radius zona (cm)	Radius <i>pebble</i> (cm)	<i>Pitch</i> kisi (p_{BCC} , cm)
1,0	1,5	3,592630
1,5	2,0	4,790173
2,0	2,5	5,987716
2,5	3,0	7,185259
3,0	3,5	8,382802
3,5	4,0	9,580345

Model MCNPX untuk RGTT200K diilustrasikan dalam Gambar 4. Konus di bagian bawah teras diisi dengan moderator *pebble* dan dimodelkan dengan kisi dan fraksi *packing* yang sama dengan bahan bakar *pebble* yang menempati teras reaktor. Densitas atom moderator *pebble* disajikan dalam Tabel 6. Setiap *region* dalam RGTT200K diberi nomor material struktur yang komposisi dan densitas atomnya disajikan dalam Tabel 7 dan 8. Dalam perhitungan ini, efek absorpsi dari impuritas ditentukan dalam bentuk kandungan boron natural (ppm) yang ekuivalen dengan massa. Nilai yang digunakan adalah tipikal untuk teras HTR *pebble-bed*.



Gambar 4. Model MCNPX untuk reaktor RGTT200K.

Tabel 6. Densitas atom moderator pebble (atom/barn-cm).

C	¹⁰ B	¹¹ B
$9,22571 \times 10^{-2}$	$2,28337 \times 10^{-9}$	$9,24878 \times 10^{-9}$

Tabel 7. Densitas atom pendingin helium dan void (atom/barn-cm).

Nuklida	Helium	Void (region 2)
⁴ He	$2,65156 \times 10^{-5}$	$1,00000 \times 10^{-11}$
³ He	$3,71220 \times 10^{-11}$	-

Tabel 8. Komposisi dan densitas atom material struktur reaktor RGTT200K.

No. Region	Material struktur	Densitas (g/cm ³)	Densitas atom (atom/barn-cm)		
			C	¹⁰ B	¹¹ B
1	Reflektor 1	1,53901	$7,72000 \times 10^{-2}$	$3,39617 \times 10^{-8}$	$1,37562 \times 10^{-7}$
3	Void + grafit	0,0398707	$2,00000 \times 10^{-3}$	$8,79837 \times 10^{-8}$	$3,56378 \times 10^{-9}$
4	Reflektor 2	1,80016	$9,03000 \times 10^{-2}$	$3,97246 \times 10^{-8}$	$1,60905 \times 10^{-7}$
5	Lapisan karbon di sekeliling sistem	1,70049	$8,53000 \times 10^{-3}$	$3,75250 \times 10^{-8}$	$1,51995 \times 10^{-7}$
6	Reflektor + kanal pendingin	1,39946	$7,02000 \times 10^{-2}$	$3,08823 \times 10^{-8}$	$1,25089 \times 10^{-7}$
7	Reflektor + batang kendali	0,699731	$3,51000 \times 10^{-2}$	$1,54411 \times 10^{-8}$	$6,25444 \times 10^{-8}$
8	Reflektor 3	0,699731	$3,51000 \times 10^{-2}$	$1,54411 \times 10^{-8}$	$6,25444 \times 10^{-8}$

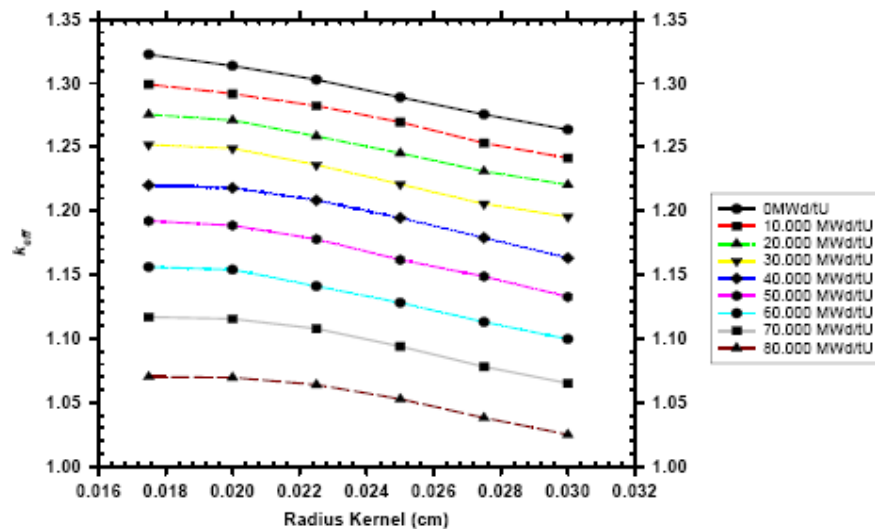
HASIL PERHITUNGAN DAN DISKUSI

Dalam perhitungan MCNPX, sebanyak 5.000 neutron per siklus disimulasikan dan *skipping* 10 siklus dikerjakan sebelum akumulasi data dimulai dari total 110 siklus untuk menghindari konvergensi sumber. Jumlah total partikel dan siklus dalam KCODE *card* ini dipilih untuk mendapatkan deviasi standard faktor multiplikasi reaktor (k_{eff}) lebih kecil daripada 400 pcm. Nilai ini dianggap dapat diterima untuk perhitungan fraksi bakar HTR *pebble bed* guna memperoleh waktu komputasi yang cukup singkat. Tebakan awal k_{eff} diambil 1,0 agar hasil simulasi final diharapkan sangat dekat dengan kondisi kritis.

Jumlah sumber neutron dalam KSRC *card* tergantung pada sistem reaktor dan jumlah siklus yang dipilih. Dalam studi ini sumber neutron fisi awal dilokasikan di pusat bahan bakar kernel. Seluruh perhitungan dikerjakan dengan pustaka data nuklir energi kontinu ENDF/B-VII pada temperatur 1200K. Data hamburan neutron $S(\alpha,\beta)$ *graph.01t* diaplikasikan untuk seluruh material reaktor yang mengandung unsur grafit guna mempertimbangkan efek *binding* pada energi neutron di bawah ~4 eV. Opsi BURN dalam MCNPX diterapkan untuk mengestimasi fraksi bakar bahan bakar sebagai fungsi daya dan waktu operasi reaktor. Iterasi distribusi neutron fisi dieksekusi MCNPX dengan waktu komputasi rerata 40 jam dalam *workstation quadcore* 16 MB untuk setiap kasus kritikalitas dan fraksi bakar teras reaktor dengan langkah fraksi bakar 10.000 MWd/tU dari 0 hingga 80.000 MWd/tU.

Gambar 5 mengilustrasikan hasil perhitungan faktor multiplikasi reaktor (k_{eff}) RGTT200K sebagai fungsi radius kernel dengan berbagai fraksi bakar. Radius bahan bakar *pebble* adalah 3,0 cm. Dari Gambar 5 dapat diamati, nilai k_{eff} menurun seiring dengan bertambahnya fraksi bakar bahan

bakar sebagai konsekuensi dari berkurangnya inventori material fisil. Di awal siklus (BOC, *beginning of cycle*), kernel dengan radius 0,0175 cm menyebabkan nilai k_{eff} berada pada nilai yang paling tinggi di antara seluruh radius kernel yang dipertimbangkan karena moderasi neutron berada pada kondisi yang paling baik. Dengan bertambahnya radius bahan bakar kernel, nilai k_{eff} berkurang secara perlahan. Radius kernel yang besar menyebabkan banyak uranium yang dimuatkan dan grafit menjadi sedikit keberadaannya di dalam bahan bakar *pebble*. Hal ini mengakibatkan moderasi neutron berkurang dan implikasinya nilai k_{eff} menjadi rendah. Situasi moderasi tidak berubah dengan fraksi bakar bahan bakar.

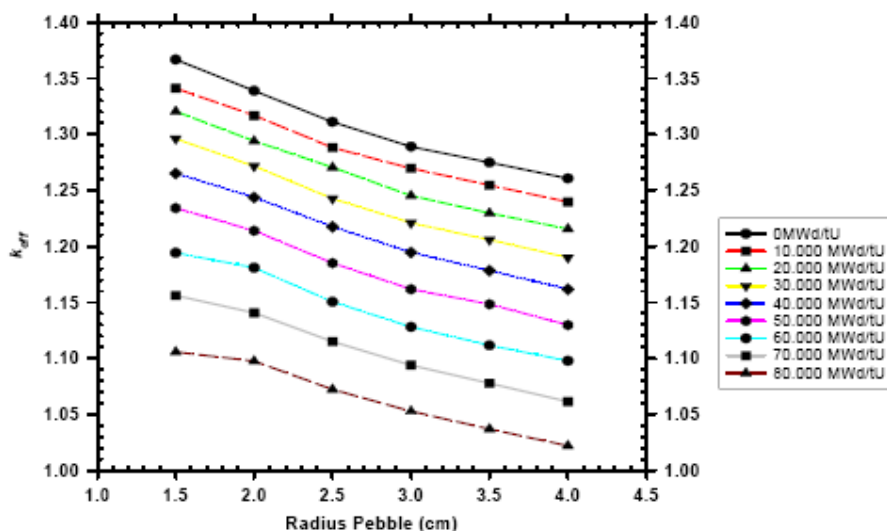


Gambar 5. Faktor multiplikasi reaktor (k_{eff}) sebagai fungsi radius kernel dengan berbagai fraksi bakar.

Bila Gambar 5 diamati lebih jauh, tampak reaktivitas teras berkurang dengan $\sim 1,5 \times 10^{-2} \Delta k/k$ untuk setiap langkah fraksi bakar 10.000 MWd/tU ketika fraksi bakar bahan bakar bervariasi dari 0 MWd/tU hingga 30.000 MWd/tU, tetapi berkurangnya reaktivitas makin bertambah besar dengan $\sim 2,8 \times 10^{-2} \Delta k/k$ untuk setiap langkah fraksi bakar yang sama ketika fraksi bakar bahan bakar lebih besar dari 30.000 MWd/tU. Efek penting yang bisa diamati dari radius kernel pada performa neutronik teras RGTT200K adalah radius kernel yang lebih besar menyebabkan reaktivitas ayun sedikit lebih tinggi. Reaktivitas ayun didefinisikan sebagai perbedaan reaktivitas teras antara awal siklus (BOC) dan akhir siklus (EOC, *end of cycle*).

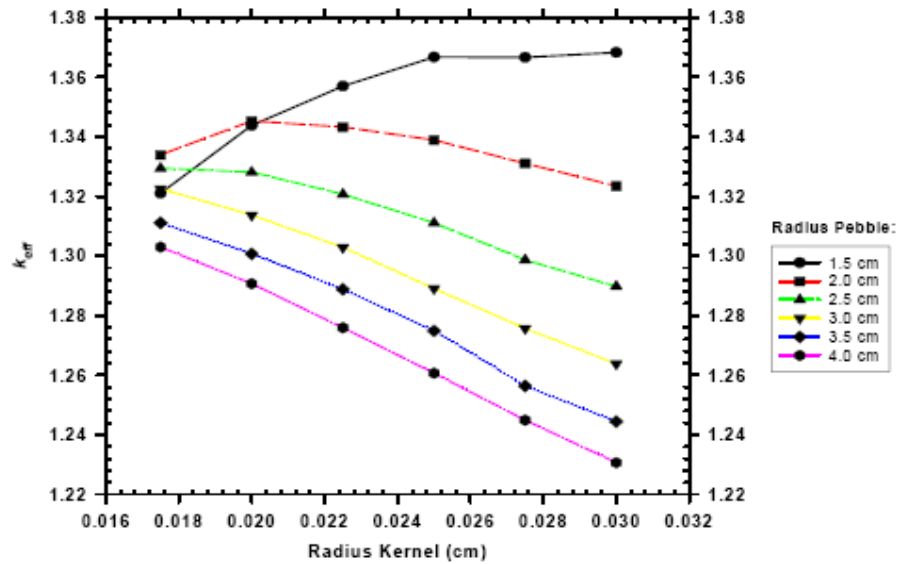
Gambar 6 mengilustrasikan hasil perhitungan faktor multiplikasi reaktor (k_{eff}) RGTT200K sebagai fungsi radius bahan bakar *pebble* dengan berbagai fraksi bakar. Radius kernel dalam bahan bakar *pebble* adalah 0,0250 cm. Ada efek serupa dari radius bahan bakar *pebble* pada k_{eff} teras RGTT200K jika radius bertambah. Di BOC, radius bahan bakar *pebble* yang besar menghasilkan k_{eff} rendah. Bertambahnya radius bahan bakar *pebble* berarti rasio grafit-uranium berkurang yang menyebabkan moderasi neutron berkurang. Situasi ini tidak berubah dengan fraksi bakar bahan bakar seperti kasus radius kernel. Karena ukuran radius bahan bakar *pebble* dan ukuran radius kernel

mengubah rasio bahan bakar-moderator di dalam teras reaktor, implikasinya faktor multiplikasi reaktor akan berubah secara bersamaan untuk seluruh waktu hidup bahan bakar.

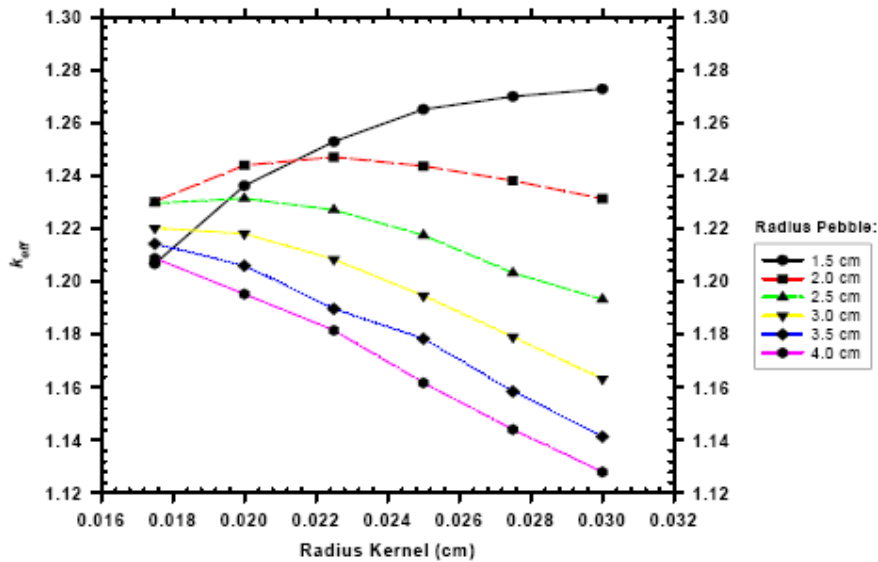


Gambar 6. Faktor multiplikasi reaktor (k_{eff}) sebagai fungsi radius bahan bakar *pebble* dengan berbagai fraksi bakar.

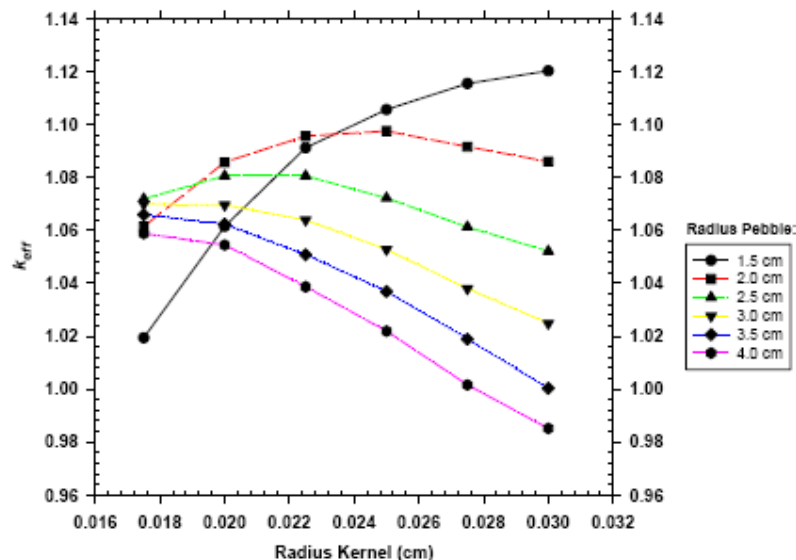
Gambar 7, 8 dan 9 memperlihatkan hasil perhitungan k_{eff} teras RGTT200K sebagai fungsi radius kernel dan bahan bakar *pebble* di BOC (0 MWd/tU), pada fraksi bakar 40.000 MWd/tU dan EOC (80.000 MWd/tU). Beberapa hal menarik dapat diderivasi dari ketiga Gambar ini. Pertama, nilai k_{eff} teras RGTT200K dengan bahan bakar *pebble* yang lebih kecil sangat bergantung pada radius kernel. Profil k_{eff} teras reaktor dengan radius *pebble* 1,5 cm sangat berbeda dibandingkan profil k_{eff} teras dengan radius *pebble* lainnya. Bahan bakar *pebble* dengan radius selain 1,5 cm memperlihatkan kecenderungan k_{eff} semakin rendah dengan bertambahnya radius kernel di awal teras RGTT200K. Nilai k_{eff} teras dengan radius *pebble* 1,5 cm berubah lebih drastis terhadap radius kernel di akhir siklus (EOC). Kedua, dari Gambar 8 dan 9 didapatkan radius kernel optimum untuk setiap bahan bakar *pebble*. Bahan bakar *pebble* dengan radius 2,5 cm mencapai k_{eff} maksimum ketika radius kernel 0,0200 cm pada fraksi bakar 40.000 MWd/tU dan EOC. Ketiga, ketergantungan pada fraksi bakar bahan bakar juga dapat diamati untuk radius kernel optimum. Bahan bakar *pebble* dengan radius 2,0 cm mencapai k_{eff} maksimum ketika radius kernel 0,0200 cm; 0,0225 cm dan 0,0250 cm masing-masing di BOC, pada fraksi bakar 40.000 MWd/tU dan EOC.



Gambar 7. Faktor multiplikasi reaktor (k_{eff}) sebagai fungsi radius kernel dan bahan bakar *pebble* di BOC.



Gambar 8. Faktor multiplikasi reaktor (k_{eff}) sebagai fungsi radius kernel dan bahan bakar *pebble* pada fraksi bakar 40.000 MWd/tU.



Gambar 9. Faktor multiplikasi reaktor (k_{eff}) sebagai fungsi radius kernel dan bahan bakar *pebble* di EOC.

KESIMPULAN

Investigasi kritikalitas RGTT200K sebagai dampak variasi radius bahan bakar *pebble* dan kernel dengan berbagai fraksi bakar telah dilakukan dengan program transport Monte Carlo MCNPX dan pustaka data nuklir energi kontinu ENDF/B-VII pada temperatur 1200K. Efek radius bahan bakar *pebble* dan kernel dalam teras RGTT200K didiskusikan dengan pengkayaan ^{235}U 8,2% dan fraksi *packing* TRISO 9,34%.

Hasil perhitungan memperlihatkan faktor multiplikasi reaktor (k_{eff}) teras RGTT200K dengan radius bahan bakar *pebble* lebih kecil sangat bergantung pada radius kernel dan sebuah radius kernel optimum didapatkan untuk setiap bahan bakar *pebble* yang secara implisit juga bergantung pada fraksi bakar bahan bakar.

Dari analisis dapat disimpulkan bahwa, pemilihan radius bahan bakar *pebble* 1,5 cm sebaiknya tidak dipertimbangkan dalam desain RGTT200K karena profil kritikalitasnya yang berbeda. Radius bahan bakar *pebble* 2 cm hingga 4 cm dan kombinasinya dengan radius kernel dapat dipertimbangkan sebagai sebuah cara yang tepat untuk mendapatkan nilai kritikalitas optimum dan fraksi bakar spesifik yang diinginkan dari teras RGTT200K dengan fraksi *packing* TRISO dan pengkayaan bahan bakar yang telah ditentukan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih kami sampaikan kepada Dr. Ir. M. Dhandhang Purwadi yang memberikan inspirasi dan motivasi untuk melakukan riset ini. Ucapan terimakasih kami sampaikan pula kepada Ir. Tagor M. Sembiring yang menyediakan waktu dan pikiran tidak sedikit untuk mengoreksi dan memberikan saran yang sangat bermanfaat untuk perbaikan makalah ini.

Dukungan moral yang amat berarti dari Drs. Sumijanto, Dra. Itjeu Karliana dan rekan-rekan Bidang Pengembangan Reaktor, sangat kami hargai.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. _____, "A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems", US DOE Nuclear Energy and the Generation IV International Forum (GIF), December 2002.
- [2]. H.D. GOUGAR, A.M. OUGOUAG and W.K. TERRY, "Advanced Core Design and Fuel Management for Pebble Bed Reactors", INEEL/EXT-04-02245, 2004.
- [3]. Z. WU, D. LIN and D. ZHONG, "The Design Features of the HTR-10", Journal of Nuclear Engineering and Design, 218: 25-32, 2002.
- [4]. J.L. EVERETT and E. KOHLER, "Peach Bottom Unit No. 1: A High-Performance Helium-Cooled Nuclear Power Plant", Annals of Nuclear Energy, 5(321), 1978.
- [5]. A. HABUSH and A. HARRIS, "330-MW(e) Fort St. Vrain High – Temperature Gas-Cooled Reactor, Nuclear Engineering and Design, 7(312), 1968.
- [6]. R. BAEUMER, *et al.*, "AVR: Experimental High Temperature Reactor; 21 Years of Successful Operation for a Future Energy Technology", Association of German Engineers (VDI), The Society for Energy Technologies, VDI – Verlag GmbH, Duesseldorf, 1990.
- [7]. _____, "Das 300 MW Thorium-Hochtemperatur-Kernkraftwerk THTR", Atomwirtschaft, May 1971.
- [8]. S. SHIOZAWA, S. FUJIKAWA, T. IYOKU, K. KUNITOMI, and Y. TACHIBANA, "Overview of HTTR Design Features", Nuclear Engineering and Design, 233:11-21, 2004.
- [9]. S. HU, R. WANG and Z. GAO, "Safety Demonstration Tests on HTR-10 Reactors", The 2-nd International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology, Beijing, China, September 22-24, 2004.
- [10]. A. KOSTER, H.D. MATZNER, D.R. NICHOLSI, "PBMR Design for the Future", Journal of Nuclear Engineering and Design, 222: 231-245, 2003.
- [11]. N. KODOCHIGOV, E. GLUSHKOV, P. FOMICHENKO, "Neutronic Features of the GT-MHR Reactor", Journal of Nuclear Engineering and Design, 222: 161-171, 2003.
- [12]. X. YAN, K. KUNITOMI, T. NAKATA, S. SHIOZAWA, "GTHTR300 Design and Development", Journal of Nuclear Engineering and Design, 222: 247-262, 2003.
- [13]. K. KUNITOMI, S. KATANISHI, S. TAKADA, T. TAKIZUKA, X. YAN, "Japan's Future HTR – the GTHTR300", Journal of Nuclear Engineering and Design, 233: 309-327, 2004.
- [14]. Z. ZHANG, Z. WU, Y. XU, Y. SUN, F. LI, "Design of Chinese Modular High-Temperature Gas-Cooled Reactor HTR-PM", The 2-nd International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology, Beijing, China, September 22-24, 2004.
- [15]. M. DHANDHANG PURWADI, "Desain Koneptual Sistem Reaktor Daya Maju Kogenerasi Berbasis RGTT", Prosiding Seminar Nasional Ke-16 Teknologi dan Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir, Surabaya, 28 Juli 2010

- [16]. J.S. HENDRICKS, G.W. MCKINNEY, *et al.*, "MCNPX 2.6.0 Extensions", LA-UR-08-2216, Los Alamos National Laboratory, April 11, 2008.
- [17]. M.B. CHADWICK, P. OBLOZINSKY, M. HERMAN, *et al.*, "ENDF/B-VII: Next Generation Evaluated Nuclear Data Library for Nuclear Science and Technology", Nuclear Data Sheets, Vol. 107, pp. 2931-3060, 2006.
- [18]. ZUHAIR, SUWOTO, "Studi Perhitungan Faktor Multiplikasi Reaktor *Pebble-Bed* sebagai Fungsi Radius Kernel Bahan Bakar pada Berbagai Pengkayaan", Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir, Yogyakarta, 14 Juli 2009.
- [19]. ZUHAIR, SUWOTO, PIPING SUPRIATNA, "Studi Efek Fraksi Packing TRISO dalam Desain Kritikalitas RGTT200K", Prosiding Seminar Nasional Ke-17 Teknologi dan Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir, Yogyakarta, 1 Oktober 2011.
- [20]. SUWOTO, PIPING SUPRIATNA, IGN. DJOKO IRIANTO, ZUHAIR, "Optimasi Desain Ketebalan Reflektor Teras RGTT200K Menggunakan Perhitungan Monte Carlo", diajukan ke Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir, 2012.
- [21]. R.E. MC FARLANE, D.M. MUIR, "NJOY99.0: Code System for Producing Pointwise and Multigroup Neutron and Photon Cross Sections from ENDF/B Data", LANL, PSR-480, 2000.
- [22]. V. SEKER and Ü. COLAK, "HTR-10 Full Core First Criticality Analysis with MCNP", Journal of Nuclear Engineering and Design, 222, 2, pp. 263-270, 2003.

DISKUSI/TANYA JAWAB:

1. PERTANYAAN: (Pudjijanto, MS., PTRKN-BATAN)

- Bagaimanakah cara menentukan bahan bakar *pebble* yang sudah dikeluarkan dapat dimanfaatkan kembali?

JAWABAN: (Zuhair, PTRKN-BATAN)

- *Pemuatan bahan bakar RGTT200K dapat dilakukan dengan skema OTTO (Once Through Then Out), multipass dan peu á peu, namun karena geometri teras yang tidak anular, ukuran diameter dan tinggi teras serta daya 200 MWth, pola pemuatan dengan skema OTTO atau multipass lebih bisa diadopsi. Dalam skema OTTO, bahan bakar pebble hanya digunakan sekali lewat untuk kemudian dikeluarkan setelah satu siklus operasi. Dalam skema multipass, bahan bakar pebble yang dikeluarkan akan dilewatkan ke peralatan pengukuran burnup. Jika masih di bawah batas burnup maka dapat dikembalikan ke dalam teras reaktor untuk dapat dimanfaatkan kembali secara efisien dan optimal. Resirkulasi bahan bakar pebble secara berulang dapat dilakukan hingga 9 kali.*