

## Studi Sensitivitas Fraksi *Packing* Partikel TRISO dalam Desain Kritisitas HTR *Pebble Bed*

Zuhair<sup>1)\*</sup>, Suwoto<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir – BATAN  
Kawasan Puspiptek, Gedung No. 80, Serpong, Tangerang 15310

Diterima 13 Agustus 2012, direvisi 14 September 2012

### ABSTRAK

HTR adalah reaktor temperatur tinggi yang digunakan untuk produksi listrik dan aplikasi panas proses seperti produksi hidrogen, desalinasi air laut, pengambilan minyak sisa (*enhanced oil recovery*) dan lain-lain. HTR didesain berdasarkan pemanfaatan partikel bahan bakar TRISO yang dapat mencegah secara kuat lepasnya produk fisi bahkan pada temperatur di atas 1600 °C. Fraksi *packing* partikel TRISO merupakan salah satu dari empat parameter kunci yang esensial dalam desain HTR selain radius kernel, densitas kernel dan pengkayaan bahan bakar. Makalah ini mendiskusikan sensitivitas fraksi *packing* partikel TRISO yang berimpak pada pemuatan uranium dalam bahan bakar *pebble*, panjang siklus operasi reaktor dan fraksi bakar maksimum yang bisa dicapai. Dengan kapabilitas program transport Monte Carlo MCNP5, seluruh komponen reaktor, dimulai dari partikel TRISO, dimodelkan secara detail dan eksplisit dan dihitung menggunakan pustaka data nuklir energi kontinu ENDF/B-VI. Hasil perhitungan memperlihatkan bahwa nilai faktor multiplikasi efektif (*keff*) memiliki tendensi semakin bertambah dengan berkurangnya fraksi *packing* partikel TRISO dan semakin berkurang dengan bertambahnya fraksi bakar. Nilai *keff* menurun dengan bertambahnya fraksi *packing* partikel TRISO baik di awal siklus (BOC) maupun di akhir siklus (EOC). Reaktivitas ayun juga sangat sensitif pada fraksi *packing* partikel TRISO. Dari analisis dapat disimpulkan bahwa fraksi *packing* partikel TRISO sangat mempengaruhi performa neutronik desain HTR *pebble bed*. Fraksi *packing* dapat mengubah faktor multiplikasi efektif (*keff*) dan reaktivitas ayun masing-masing dengan kelakuan yang serupa.

Kata kunci: fraksi *packing*, partikel TRISO, HTR *pebble bed*, *keff*, reaktivitas ayun.

### ABSTRACT

HTR is a high temperature reactor used for electricity production and process heat applications such as hydrogen production, desalination of sea water, enhanced oil recovery and so on. HTR is designed based on the utilization of TRISO fuel particles that can prevent strongly the escape of fission products even at temperatures above 1600 °C. TRISO particles packing fraction is one of four key parameters that are essential in HTR design besides radius of the kernel, kernel density and fuel enrichment. This paper discusses the sensitivity of TRISO particles packing fraction that impacts to the loading of uranium in the fuel pebble, the long cycle of reactor operation and achievable maximum fuel burn-up. With the capability of Monte Carlo transport code MCNP5, all components of the reactor, starting from TRISO particles, were modeled in detail and explicit and calculated using the continuous energy nuclear data library ENDF/B-VI. The results show that the value of effective multiplication factor (*keff*) has a tendency to increase with decreasing particle TRISO packing fraction and to decrease with increasing fuel burn-up. *Keff* values decrease with increasing TRISO particle packing fraction both at the beginning of cycle (BOC) and at the end of cycle (EOC). Reactivity swing is also very sensitive on the TRISO particles packing fraction. From the analysis it can be concluded that TRISO particles packing fraction greatly affects the neutronics performance of HTR pebble bed design. Packing fraction can change the effective multiplication factor (*keff*) and the swing reactivity with similar behavior.

Key word: packing fraction, TRISO particle, HTR pebble bed, *keff*, swing reactivity.

---

\*Corresponding author :  
E-mail: zuhairbasjmeleh@yahoo.com

## PENDAHULUAN

Akhir-akhir ini ada semacam kebangkitan minat untuk reaktor temperatur tinggi HTR berpendingin helium sejalan dengan berlangsungnya kegiatan eksperimen reaktor *pebble bed* HTR-10 [1] di China sejak tahun 2000 dan operasi HTTR [2] 30 MW berbahan bakar blok heksagonal di Jepang sejak tahun 1998. Program riset HTR-10 dan HTTR dibangun berdasarkan pengalaman operasional yang diperoleh dari eksperimen reaktor terdahulu seperti Fort Saint Vrain [3] di USA dari tahun 1976 hingga 1989 dan reaktor temperatur tinggi thorium THTR-300 [4] di Jerman dari tahun 1983 hingga 1989.

Kedua jenis reaktor ini didesain berdasarkan pemanfaatan partikel bahan bakar TRISO (*tri-structural isotropic*) yang dapat mencegah secara kuat lepasnya produk fisi bahkan pada temperatur di atas 1600 °C. Partikel TRISO didistribusikan secara acak ke dalam bahan bakar *pebble* berdiameter 6 cm (desain *pebble bed*) atau bahan bakar kompak silindris yang dimasukkan ke dalam blok bahan bakar grafit heksagonal dengan ukuran yang lebih besar (desain prismatik). Reaktor modular *pebble bed* PBMR [5] 400 MW yang direncanakan dibangun di Afrika Selatan atau reaktor temperatur tinggi modular turbin gas GT-MHR [6] merupakan salah satu dari desain yang sedang dipertimbangkan untuk proyek reaktor temperatur sangat tinggi VHTR Generasi IV [7].

HTR adalah reaktor temperatur tinggi yang dapat digunakan dalam berbagai cara untuk aplikasi panas proses seperti produksi hidrogen, desalinasi air laut, pengambilan minyak sisa (*enhanced oil recovery*) dan lain-lain selain listrik. Skala komersial HTR yang baru menggunakan desain modular yang dicirikan oleh keselamatan melekat (*inherent safety*), fleksibilitas daur bahan bakar dan temperatur pendinginnya yang tinggi. Keselamatan melekat dikarakterisasi oleh koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar dan moderator yang negatif, tingginya kapasitas termal grafit dan kemampuan struktur grafit untuk mentransfer panas dengan konduksi maupun radiasi ke permukaan luar reaktor dalam kondisi normal maupun kecelakaan.

Makalah ini mendiskusikan sensitivitas fraksi *packing* partikel TRISO yang berdampak pada pemuatan uranium dalam bahan bakar *pebble*, panjang siklus operasi reaktor dan fraksi bakar maksimum yang bisa dicapai. Fraksi *packing* merupakan salah satu dari empat parameter kunci yang esensial dalam desain HTR selain radius kernel, densitas kernel dan pengkayaan bahan bakar. Eksaminasi dari seberapa besar ukuran kernel dan pengkayaan bahan bakar yang paling optimal telah dianalisis dalam studi sebelumnya [8].

Dengan kapabilitas program transport Monte Carlo MCNP5 [9], seluruh komponen reaktor, dimulai dari partikel TRISO,

Tabel 1. Parameter desain partikel TRISO dan bahan bakar *pebble* [19].

Partikel TRISO					
Lapisan	Kernel	Penyangga karbon	IPyC	SiC	OPyC
Radius ( $\mu\text{m}$ )	250	340	380	415	455
Densitas ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	10,4	1,05	1,90	3,18	1,90
Bahan bakar <i>pebble</i>					
Diameter (cm)	Radius zona bahan bakar (cm)	Ketebalan <i>shell</i> grafit (cm)	Densitas <i>shell</i> grafit ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Massa bahan bakar per <i>pebble</i> (g)	Fraksi <i>packing</i> <i>pebble</i> (%)
6,0	2,5	0,5	1,75	10,21	61

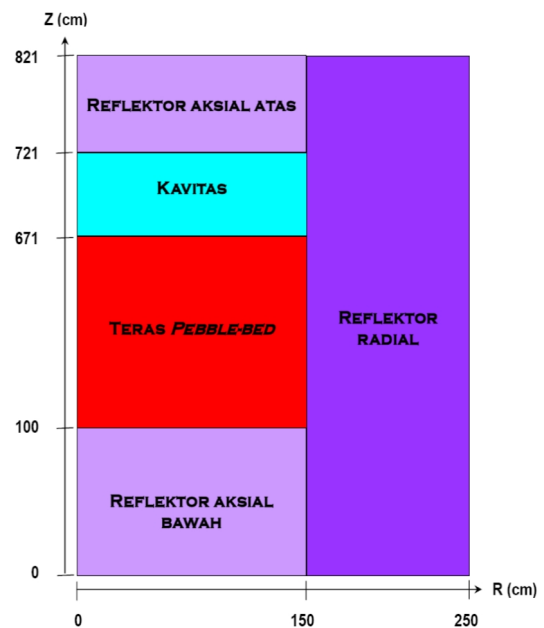
dimodelkan secara detail dan eksplisit dan dihitung menggunakan pustaka data nuklir energi kontinu ENDF/B-VI [10]. Program MCNP5 dipilih karena telah banyak diaplikasikan dalam analisis fenomena nuklir di berbagai fasilitas nuklir seperti reaktor [11-16] dan akselerator [17-18]. Dalam studi ini, partikel TRISO dengan kernel  $UO_2$  dipilih karena hampir seluruh proyek HTR demonstrasi dan komersial dewasa ini menggunakan bahan bakar  $UO_2$  dengan pengecualian proyek yang dikembangkan USA-Rusia yang secara spesifik didedikasikan untuk konsumsi plutonium tingkat senjata. Fraksi bakar yang diadopsi dari hasil perhitungan Tombakoglu [19] diaplikasikan untuk melengkapi analisis sensitivitas fraksi *packing* partikel TRISO dalam desain HTR *pebble bed*.

**Deskripsi HTR *Pebble Bed*.** Teras HTR *pebble bed* memiliki diameter 300 cm dan tinggi 571 cm yang dikelilingi oleh reflektor radial dengan ketebalan 100 cm serta reflektor aksial bagian atas dan bagian bawah dengan ketebalan yang sama, yakni 100 cm. Kavitas berada di atas teras dengan ketebalan 50 cm. Gambar 1 merepresentasikan skema geometrik teras HTR *pebble bed* dalam koordinat silindris 2-D R-Z. Teras ini dikomposisi oleh 217.694 bahan bakar *pebble* yang tersebar secara acak. Setiap *pebble* terdiri dari 8.000–50.000 partikel berlapis TRISO yang jumlah eksaknya bergantung pada fraksi *packing* yang diinginkan. Parameter desain yang digunakan untuk partikel TRISO dan bahan bakar *pebble* disajikan pada Tabel 1 sedangkan skema geometriknya diperlihatkan pada Gambar 2.

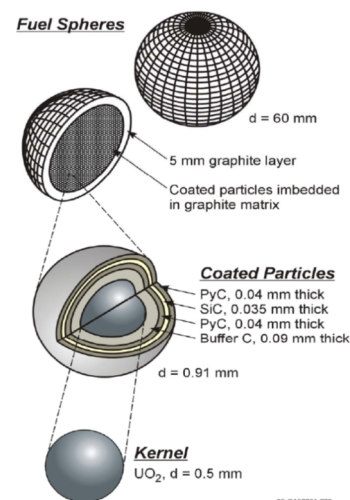
Desain HTR *pebble bed* dapat menggunakan berbagai komposisi bahan bakar seperti uranium, thorium, plutonium atau trans-uranium dengan jangkauan pengkayaan yang luas (tipikal hingga 20%).

Dalam studi ini, bahan bakar *pebble* dengan kernel  $UO_2$  dipilih karena hampir seluruh proyek HTR masa kini dan masa yang akan datang memanfaatkan  $UO_2$  sebagai bahan bakar referensi. Kernel  $UO_2$  telah digunakan dalam HTR yang sedang beroperasi

saat ini seperti HTRR Jepang dan HTR-10 China dan akan diadopsi dalam HTR yang sedang dalam proses desain seperti HTR-PM China dan PBMR Afrika Selatan. Pengalaman komersial yang dimiliki dalam pemanfaatan bahan bakar uranium oksida yang sangat banyak di hampir seluruh reaktor daya yang beroperasi di dunia merupakan kelebihan utamanya.



Gambar 1. Skema geometrik HTR *pebble bed*.



Gambar 2. Skema geometrik partikel TRISO dan bahan bakar *pebble* [19].

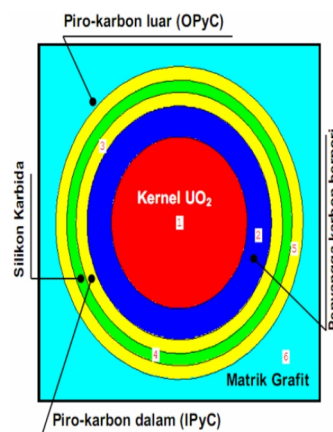
Kernel  $UO_2$  memiliki pengkayaan  $^{235}U/(^{235}U+^{238}U)$  sebesar 8,2% dengan densitas  $10,4 \text{ g/cm}^3$ . *Coating* TRISO terdiri dari lapisan densitas rendah penyangga karbon (*carbon buffer*, C) diikuti oleh lapisan densitas tinggi piro karbon bagian dalam (*inner pyrolytic carbon*, IPyC), lapisan silikon karbida (SiC) dan terakhir lapisan piro karbon bagian luar (*outer pyrolytic carbon*, OPyC). Impuritas boron alam dipilih 0,5 ppm baik dalam *shell* grafit maupun matriks grafit.

### METODE PENELITIAN

**Model Perhitungan.** Dalam perhitungan ini, seluruh komponen HTR *pebble bed* dimodelkan secara detail dan eksplisit sesuai dengan geometri sebenarnya. Pemodelan dengan MCNP5 dimulai dari partikel TRISO, bahan bakar *pebble*, teras reaktor hingga seluruh komponen reaktor. Partikel TRISO digambarkan dalam MCNP5 menurut parameter desain dalam Tabel 1 dengan menggenerasi permukaan-permukaan seperti dilukiskan dalam Gambar 3.

Densitas atom partikel TRISO diberikan dalam Tabel 2. Partikel ini ditempatkan di pusat kisi kubik sederhana SC (*simple cubic*) dalam matriks grafit yang ukuran *pitch*-nya berkorespondensi dengan fraksi *packing* yang diinginkan. Kisi SC diadopsi dalam perhitungan ini karena selain lebih sederhana,

kisi SC lebih sering digunakan daripada kisi BCC (*body centered-cubic*) dan FCC (*face centered-cubic*) untuk menangani keacakan dari lokasi partikel TRISO dalam matriks grafit bahan bakar *pebble*. Secara keseluruhan, estimasi kritikalitas oleh model kisi BCC dan FCC tidak terlalu berbeda dan hampir sama dengan kisi SC [20]



Gambar 3. Model MCNP5 partikel berlapis TRISO.

Modifikasi fraksi *packing* partikel TRISO dapat dilakukan tanpa mengubah dimensi dasar kernel dan lapisan *coating*. Mengubah fraksi *packing* merupakan salah satu pilihan untuk mengoptimasi teras HTR yang memfasilitasi pencapaian tujuan manajemen bahan bakar. Fraksi *packing* partikel TRISO dalam kisi SC dapat mencapai  $\pi/6$  atau 0,524, namun dalam

Tabel 2. Densitas atom partikel berlapis TRISO dan matriks grafit (atom/barn-cm) [19].

Kernel $UO_2$				
$^{235}U$	$^{238}U$	Oksigen	$^{10}B$	$^{11}B$
$1,92585 \times 10^{-3}$	$2,12877 \times 10^{-2}$	$4,64272 \times 10^{-2}$	$1,14694 \times 10^{-7}$	$4,64570 \times 10^{-7}$
Lapisan TRISO				
	Karbon	Silikon	$^{10}B$	$^{11}B$
Penyangga karbon	$5,26449 \times 10^{-2}$	-	-	-
IPyC/OPyC	$9,52621 \times 10^{-2}$	-	-	-
SiC	$4,77240 \times 10^{-2}$	$4,77240 \times 10^{-2}$	-	-
Matriks grafit	$8,77414 \times 10^{-2}$	-	$9,64977 \times 10^{-9}$	$3,90864 \times 10^{-8}$

studi ini nilai fraksi *packing* dipilih 0,05-0,30 yang secara tipikal dijumpai di reaktor *pebble bed*. raksi *packing* dan *pitch* kisi partikel TRISO dapat dilihat dalam Tabel 3. Nilai *pitch* kisi kubik partikel TRISO ( $a$ ) dan jumlah kernel dalam sebuah bahan bakar *pebble* ( $N$ ) dapat diderivasi mengikuti hubungan:

$$a = r * \sqrt[3]{\frac{4\pi}{3f}} \quad (1)$$

$$N = f * \left(\frac{R}{r}\right)^3 \quad (2)$$

dimana,

$r$  = radius partikel berlapis TRISO (= 455  $\mu\text{m}$ )

$R$  = radius zona bahan bakar *pebble* (=2,5 cm).

**Tabel 3.** Fraksi *packing* dan *pitch* kisi kubik partikel TRISO[19].

Fraksi <i>packing</i> ( $f$ )	<i>Pitch</i> ( $a$ , cm)	Jumlah kernel per <i>pebble</i> ( $N$ )
0,05	0,199117	8.294
0,10	0,158040	16.588
0,15	0,138060	24.882
0,20	0,125436	33.175
0,25	0,116445	41.469
0,30	0,109579	49.763

**Tabel 4.** Densitas atom *shell* grafit dan matriks grafit (atom/barn-cm) [19].

Nuklida	<i>Shell</i> grafit	Matriks grafit
Karbon	$8,77414 \times 10^{-2}$	$8,77414 \times 10^{-2}$
$^{10}\text{B}$	$9,64977 \times 10^{-9}$	$9,64977 \times 10^{-9}$
$^{11}\text{B}$	$3,90864 \times 10^{-8}$	$3,90864 \times 10^{-8}$

**Tabel 5.** Densitas atom reflektor aksial dan radial (atom/barn-cm) [19].

Nuklida	Reflektor aksial	Reflektor radial
Karbon	$7,02000 \times 10^{-2}$	$7,72000 \times 10^{-2}$
$^{10}\text{B}$	$3,08823 \times 10^{-8}$	$3,39617 \times 10^{-8}$
$^{11}\text{B}$	$1,25089 \times 10^{-7}$	$1,37562 \times 10^{-7}$

**Tabel 6.** Densitas atom pendingin helium dan void (atom/barn-cm) [19].

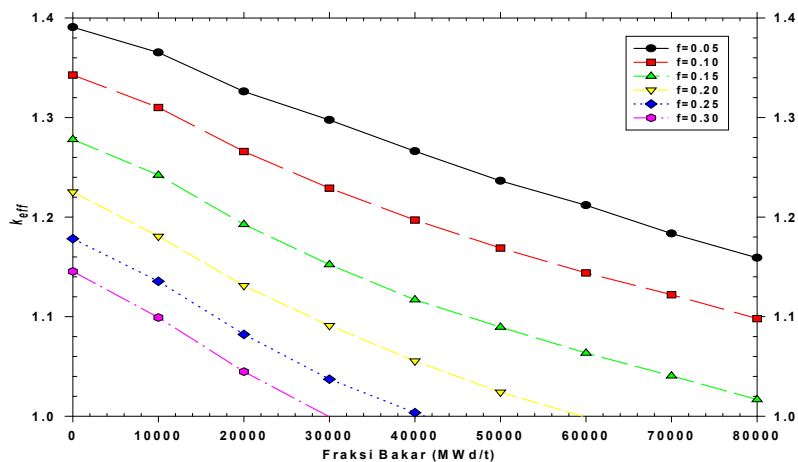
Nuklida	Helium	Void
$^4\text{He}$	$2,65156 \times 10^{-5}$	$1,00000 \times 10^{-11}$
$^3\text{He}$	$3,71220 \times 10^{-11}$	-

Kisi kubik TRISO lalu diekspansi ke zona bahan bakar *pebble* berdiameter 2,5 cm untuk memodelkan bahan bakar *pebble* dengan struktur berulang. Dengan struktur berulang pula teras *pebble bed* dimodelkan dari ekspansi kisi BCC bahan bakar *pebble*. Kisi BCC menjadi pilihan walaupun *packing* bola dalam teras *pebble bed* diekspektasi mendekati kisi HCP (*hexagonal closed-packing*). Ini disebabkan kisi BCC dapat menyediakan ukuran *packing* yang secara tipikal dijumpai di reaktor *pebble bed*. Dalam kisi BCC terdapat 2 bahan bakar *pebble* yang terdiri dari 1 *pebble* di pusat kisi dan 1/8 *pebble* sebanyak 8 buah yang masing-masing diletakkan di delapan sudut kisinya. Pendingin helium dialirkan ke dalam teras dan menempati ruang kosong di antara tumpukan *pebble* dengan volume 39% dari total volume teras sehingga ukuran *pitch* kisi BCC dapat ditentukan dan nilainya 7,185259 cm. Densitas atom material reaktor yang digunakan dalam perhitungan ditabulasikan dalam Tabel 4-6.

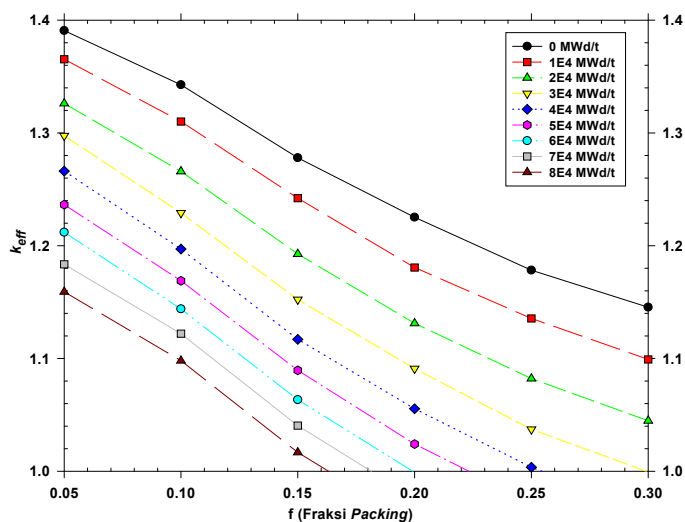
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam perhitungan HTR *pebble bed*, efek heterogenitas ganda menantang untuk ditangani menggunakan metode Monte Carlo dan karena itu harus dipertimbangkan secara seksama. Heterogenitas ganda ini dispesifikasikan oleh terdapatnya ~8.000–50.000 partikel TRISO (diameter 0,091 cm) dalam sebuah *pebble* (diameter 6 cm) dan ~0,2 juta *pebble* (diameter 6 cm) dalam teras HTR *pebble bed* (diameter 3 m).

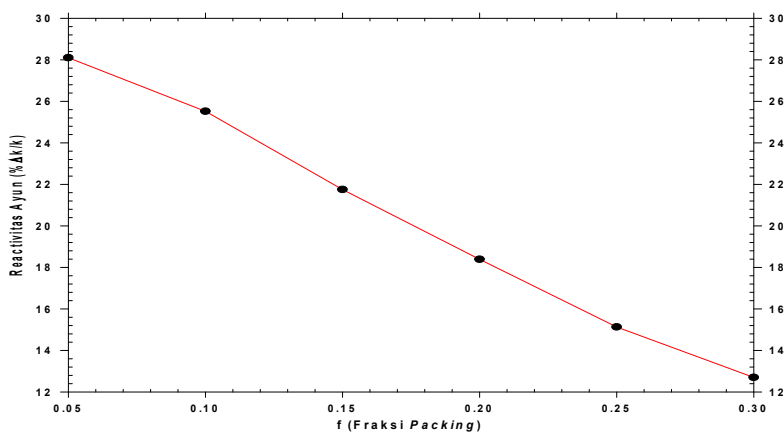
Jumlah bahan bakar *pebble* lebih dari 0,2 juta mengimplikasikan setidaknya jumlah histori neutron yang sama harus disimulasikan dalam MCNP5 sebelum iterasi distribusi sumber fisi dieksekusi. Oleh karena itu 500.000 adalah jumlah yang dipilih dalam perhitungan ini dimana 110 siklus iterasi dengan 5.000 neutron per siklus disimulasikan. Sebanyak 10 siklus di-*skip* untuk menghindari konvergensi sumber. Sumber neutron fisi awal diposisikan di pusat kernel bahan bakar. Pustaka data nuklir energi kontinu ENDF/B-VI



Gambar 4.  $K_{eff}$  sebagai fungsi fraksi bakar untuk berbagai fraksi *packing* partikel TRISO.



Gambar 5.  $K_{eff}$  sebagai fungsi fraksi *packing* partikel TRISO untuk berbagai fraksi bakar.



Gambar 6. Hasil perhitungan reaktivitas ayun sebagai fungsi fraksi *packing* partikel TRISO.

**Tabel 7.** Hasil perhitungan MCNP5 dengan berbagai fraksi bakar dan fraksi *packing* partikel TRISO.

Fraksi <i>packing</i> TRISO( <i>f</i> )	Faktor multiplikasi efektif ( $k_{eff}$ )								
	0 MWd/t	10,000 MWd/t	20,000 MWd/t	30,000 MWd/t	40,000 MWd/t	50,000 MWd/t	60,000 MWd/t	70,000 MWd/t	80,000 MWd/t
0,05	1,3908 ±0,0011	1,3654 ±0,0010	1,3262 ±0,0011	1,2976 ±0,0011	1,2662 ±0,0010	1,2364 ±0,0010	1,2119 ±0,0011	1,1835 ±0,0011	1,1591 ±0,0011
0,10	1,34278 ±0,0011	1,3101 ±0,0012	1,2659 ±0,0011	1,2291 ±0,0012	1,1971 ±0,0012	1,1689 ±0,0011	1,1440 ±0,0012	1,1220 ±0,0013	1,0980 ±0,0011
0,15	1,2780 ±0,0011	1,2421 ±0,0011	1,1926 ±0,0012	1,1523 ±0,0012	1,1170 ±0,0012	1,0895 ±0,0011	1,0634 ±0,0011	1,0405 ±0,0012	1,0167 ±0,0012
0,20	1,2253 ±0,0012	1,1807 ±0,0012	1,1312 ±0,0012	1,0910 ±0,0012	1,0554 ±0,0012	1,0241 ±0,0012	0,9990 ±0,0012	0,9762 ±0,0012	0,9535 ±0,0011
0,25	1,17833 ±0,0012	1,1355 ±0,0011	1,0822 ±0,0012	1,0372 ±0,0011	1,0036 ±0,0011	0,9724 ±0,0011	0,9485 ±0,0011	0,9245 ±0,0011	0,9005 ±0,0011
0,30	1,1454 ±0,0011	1,0992 ±0,0010	1,0448 ±0,0011	0,9994 ±0,0011	0,9643 ±0,0011	0,9337 ±0,0010	0,9093 ±0,0011	0,8871 ±0,0010	0,8648 ±0,0011

dimanfaatkan pada temperatur 293,6K. Konsiderasi interaksi neutron termal dengan grafit di bawah energi ~4 eV dilakukan untuk setiap material karbon dengan data hamburan termal  $S(\alpha, \beta)$  *graph.01t*. Kondisi vakum dikerjakan pada batas luar dari sistem reaktor HTR *pebble bed*.

Hasil perhitungan MCNP5 dirangkum dalam Tabel 7. Dari Tabel 7 dapat diamati bahwa nilai  $k_{eff}$  memiliki tendensi semakin bertambah dengan berkurangnya fraksi *packing* partikel TRISO dan semakin berkurang dengan bertambahnya fraksi bakar. Nilai fraksi bakar diadopsi dari hasil perhitungan Monte Carlo oleh Tombakoglu. Hasil perhitungan MCNP5 diplot ke dalam Gambar 4 dan didapatkan fraksi *packing* yang lebih besar menyebabkan waktu hidup atau siklus operasi reaktor lebih pendek. Reaktor dengan fraksi *packing* partikel TRISO 0,30 hanya mencapai waktu hidup untuk fraksi bakar 30.000 MWd/t sedangkan fraksi *packing* 0,25 dan 0,20 masing-masing untuk fraksi bakar 40.000 dan 60.000 MWd/t. Bertambahnya fraksi *packing* berarti semakin banyak bahan bakar yang dimasukkan ke dalam teras reaktor, namun bahan bakar yang lebih banyak tidak membuat faktor multiplikasi efektif menjadi lebih tinggi. Nilai  $k_{eff}$  menurun dengan bertambahnya fraksi *packing* partikel TRISO baik di awal

siklus (BOC, *beginning of cycle*) maupun di akhir siklus (EOC, *end of cycle*).

Gambar 5 mengilustrasikan hubungan antara  $k_{eff}$  dan fraksi *packing* partikel TRISO sedikit lebih tepat daripada Gambar 4. Di awal siklus (BOC), fraksi *packing* yang lebih besar memberikan nilai  $k_{eff}$  yang lebih rendah karena lebih banyak massa  $^{235}\text{U}$  yang dimuatkan ke dalam teras reaktor dan pada situasi ini neutron mengalami kondisi *under-moderated* secara total. Kondisi ini tidak berubah dengan bertambahnya fraksi bakar. Nilai  $k_{eff}$  hampir selalu bergantung pada fraksi *packing* partikel TRISO pada fraksi bakar berapapun.

Gambar 6 melukiskan reaktivitas ayun yang didefinisikan sebagai perbedaan reaktivitas antara awal siklus (BOC) dan akhir siklus (EOC). Bertambahnya fraksi *packing* partikel TRISO akan mereduksi reaktivitas ayun. Fraksi *packing* yang tinggi dapat menekan reaktivitas ayun sehingga sedikit sekali kompensasi yang perlu dilakukan oleh pergerakan batang kendali untuk mengatasi kehilangan reaktivitas akibat terbakarnya bahan bakar dalam teras reaktor. Perbedaan reaktivitas karena fraksi bakar seharusnya dijaga sekecil mungkin dan fraksi *packing* partikel TRISO 0,30 menghasilkan reaktivitas ayun yang paling rendah (12,70 % $\Delta k/k$ ).

## KESIMPULAN

Studi sensitivitas fraksi *packing* partikel TRISO dalam desain HTR *pebble bed* telah dilakukan melalui serangkaian perhitungan menggunakan program transport Monte Carlo MCNP5 dan pustaka data nuklir energi kontinu ENDF/B-VI.

Hasil perhitungan memperlihatkan bahwa nilai faktor multiplikasi efektif ( $k_{\text{eff}}$ ) memiliki tendensi semakin bertambah dengan berkurangnya fraksi *packing* partikel TRISO dan semakin berkurang dengan bertambahnya fraksi bakar. Nilai  $k_{\text{eff}}$  menurun dengan bertambahnya fraksi *packing* partikel TRISO baik di awal siklus (BOC) maupun di akhir siklus (EOC). Reaktivitas ayun juga sangat sensitif pada fraksi *packing* partikel TRISO.

Dari analisis dapat disimpulkan bahwa fraksi *packing* partikel TRISO sangat mempengaruhi performa neutronik desain HTR *pebble bed*. Fraksi *packing* dapat mengubah faktor multiplikasi efektif ( $k_{\text{eff}}$ ) dan reaktivitas ayun masing-masing dengan kelakuan yang serupa.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih kami sampaikan kepada Dr. Ir. M. Dhandhang Purwadi yang memberikan inspirasi dan motivasi untuk melakukan riset ini. Dukungan moral dan saran yang amat berarti dari rekan-rekan di Bidang Pengembangan Reaktor, sangat kami hargai.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] G.H. Lohnert (2002), Topical Issue on China's HTR-10, *Journal of Nuclear Engineering and Design*, **218**, 1-3.
- [2] G.H. Lohnert (2004), Topical Issue on Japan's HTTR, *Journal of Nuclear Engineering and Design*, **233**, 1-3.
- [3] A. Habush, A. Harris (1968), 330-MW(e) Fort St. Vrain High-Temperature Gas-Cooled Reactor, *Journal of Nuclear Engineering and Design*, **312**
- [4] \_\_\_\_\_ (May 1971), *Das 300 MW Thorium Hochtemperatur-Kernkraftwerk THTR*, Atomwirtschaft
- [5] A. Koster, H.D. Matzner, and D.R. Nicholsi (2003), PBMR Design for the Future, *Journal of Nuclear Engineering and Design*, **222**, 231-245.
- [6] \_\_\_\_\_ (Aug 2002), *GT-MHR Conceptual Design Description Report*, General Atomics, GA/NRC-337-02.
- [7] P.E. McDonald (March 4-5, 2004), Next Generation Nuclear Plant (NGNP): A Very High Temperature Gas-cooled Reactor (VHTR), *Proceedings of US-DOE Advanced Reactor, Fuel Cycle and Energy Products Workshop for Universities*, Gaithersburg, USA.
- [8] Zuhair, Suwoto (14 Juli, 2009), 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.
- [9] F.B. Brown, *et al.* (April 24, 2003), *MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5*, LA-UR-03-1987.
- [10] J.S. Hendricks, S.C. Frankle, J.D. Court (1994), *ENDF/B-VI Data for MCNP*, Los Alamos National Laboratory Report, LA-12891.
- [11] Üner Colak, Volkan Şeker (Feb 2005), Monte Carlo Criticality Calculations for a Pebble Bed Reactor with MCNP, *Journal of Nuclear Science and Engineering*, **149**[2].
- [12] A. Kitamura, J. Matsumoto, Y. Furuyama, A. Taniike, N. Kubota, T. Ohsawa, K. Hashimoto, T. Horiuchi and T. Tsuruta (May 2003), Measurements and Analysis of Neutron Flux Distribution in UTR-KINKI, *Journal of Nuclear Science and Technology*, **40**[5], 349-355.
- [13] H. Sono, H. Yanagisawa, K. Nakajima and Y. Miyoshi (Oct 20-24, 2003), Analyses of Criticality and Reactivity for TRACY Experiments Based on JENDL-



- 3.2 Data Library, *Proceedings of The 7-th International Conference on Nuclear Criticality Safety (ICNC'2003)*, Tokai, Japan.
- [14] Tagor M. Sembiring and Zuhair (Mar 21-24, 2004), Criticality Safety Assessment on the RSG-GAS Fresh Fuel Storage for Anticipating the Next Core Conversion Program, *Proceedings of The 8-th International Topical Meeting on Research Reactor Fuel Management (RRFM'2004)*, München, Germany.
- [15] S. Satoh, H. Iida (2000), *ITER Shielding Analysis by 3D Monte Carlo Method, Present Status and Problems of Particle Simulation by Monte Carlo Method*, Atomic Energy Society, Japan, 193.
- [16] F. Maekawa, K. Ochiai, K. Shibata, Y. Kasugai, M. Wada, Y. Morimoto, H. Takeuchi (2001), Benchmark Experiment on Silicon Carbide with D-T Neutrons and Validation of Nuclear Data Libraries, *Journal of Fusion Engineering and Design*, **58-59**, 595-600.
- [17] K. Tuček, J. Wallenius, W. Gudowski (2004), Coolant Void Worth in Fast Breeder Reactors and Accelerator-driven Transuranium and Minor-actinide Burners, *Annals of Nuclear Energy*, **31**, 1783-1801.
- [18] M. Plaschy, C. Destouches, G. Rimpault and R. Chawla (Sep 2005), Investigation of ADS-Type Heterogeneities in the MUSE4 Critical Configuration, *Journal of Nuclear Science and Technology*, **42[9]**, 779-787.
- [19] G. Hosking, T.D. Newton (2007), *Results of Benchmark Considering a High-Temperature Reactor (HTR) Fuelled with Reactor-grade Plutonium, Physics of Plutonium Recycling, Volume VIII*, OECD/NEA Nuclear Science Committee.
- [20] Zuhair, Suwoto, Maman Mulyaman (2008), Pemodelan Kernel Bahan Bakar dalam Kisi Matriks Grafit untuk Perhitungan Kritikalitas VHTR dengan MCNP5, *Prosiding seminar nasional ke-14 teknologi dan keselamatan PLTN serta*