

STUDI PERHITUNGAN HTR *PEBBLE-BED* DENGAN BERBAGAI MODEL KISI KERNEL DAN KISI *PEBBLE*

(Study on HTR Pebble-Bed Calculation Using Various Model of Kernel and Pebble Lattices)

Zuhair

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

Abstract

In pebble-bed reactor core, lattice models can be changed and even varies with the changing position of pebble. This sort of thing can be found mainly in the area near the vessel wall. Lattice model applied also depends on the procedure how the cylindrical vessel filled. Some lattice models such as SC, BCC, FCC, SH and HCP often used in the high temperature reactor to treat kernel randomness in the graphite matrix and pebble fuel in the reactor core. In this paper a series of calculations of the reactor multiplication factor (k_{eff}) conducted with various model of kernel and pebble lattices. The effect of lattice combination which implies on neutronics performance of HTR pebble-bed design is analyzed utilizing the Monte Carlo transport code MCNP5 and continuous energy nuclear data library ENDF/B-VI. MCNP5 calculations show consistency with the k_{eff} values which are almost the same for all combinations of kernel and pebble lattices, but if observed further appears that the k_{eff} value is more dependent on pebble lattice than kernel lattice kernel. Kernel lattice provides only a less significant effect. The results of k_{eff} predictions of all lattice combinations conclude that whatever kernel lattice model utilized, the BCC pebble lattice model is better adopted in the calculation of HTR pebble-bed design with UO_2 , PuO_2 and ThO_2/UO_2 fuel.

Keywords: kernel lattice, pebble lattice, HTR pebble-bed, MCNP5, ENDF/B-VI

PENDAHULUAN

Program riset dan pengembangan reaktor temperatur tinggi (*high temperature reactor*, HTR) secara ekstensif sedang dikerjakan di banyak negara melalui berbagai program seperti PUMA [1], RAPHAEL [2], AREVA [3] dan lain lain. Tujuan dari program ini adalah untuk mengembangkan HTR versi demonstrasi

dan komersial. Sampai sejauh ini masih terdapat dua jenis HTR, yaitu HTR prismatic dengan geometri bahan bakar berbentuk blok heksagonal dan HTR *pebble-bed* dengan geometri bahan bakar berbentuk bola yang disebut *pebble*. Selain digunakan untuk produksi listrik, HTR *pebble-bed* dapat pula dimanfaatkan untuk aplikasi panas proses pada temperatur tinggi seperti produksi hidrogen, desalinasi air laut,

pengambilan minyak sisa (*enhanced oil recovery*) dan lain-lain [4].

Teras HTR *pebble-bed* berbentuk bejana silindris yang diisi oleh bahan bakar *pebble* dalam jumlah yang cukup besar (~500.000) dan dialiri oleh helium yang berfungsi sebagai pendingin dalam ruang-ruang kosong di antara *pebble* [5-7]. Dibandingkan ukuran teras, bahan bakar *pebble* cukup kecil dan diperlakukan sebagai medium granular yang berisi butir-butir kernel dengan ukuran jauh lebih kecil. Fenomena tipikal material granular dapat diekspektasi melalui investigasi kisi kernel dan kisi *pebble*.

Model kisi dalam bejana silindris dapat berubah dan bahkan bervariasi dengan berubahnya posisi *pebble*. Hal semacam ini dapat dijumpai terutama di daerah dekat dinding bejana [8]. Model kisi yang diterapkan juga bergantung pada tata cara atau prosedur bagaimana bejana silindris diisi. Bila bejana silindris digoncangkan setelah diisi secara acak, *pebble* akan semakin berdekatan dan rapat. Dan jika hal ini terjadi dalam HTR *pebble-bed*, sebagai konsekuensi dari gempa bumi atau lainnya, maka faktor multiplikasi reaktor (k_{eff}) akan berubah karena perubahan dalam kebocoran neutron yang disebabkan oleh densitas material teras efektif.

Beberapa model kisi [9] seperti SC (*simple cubic*), BCC (*body centered cubic*), FCC (*face centered cubic*), SH (*simple*

hexagonal) dan HCP (*hexagonal closed packed*) acapkali digunakan dalam reaktor temperatur tinggi untuk menangani keacakan kernel dalam matriks grafit dan bahan bakar *pebble* dalam teras reaktor. Pemilihan kisi ditujukan untuk memodelkan distribusi stokastik dari kernel dan *pebble* sedekat mungkin dengan geometri nyata. Serangkaian perhitungan faktor multiplikasi reaktor (k_{eff}) dengan berbagai model kisi kernel (SC, BCC, FCC) dan kisi *pebble* (BCC, FCC) dikerjakan dengan program transport Monte Carlo MCNP5 [10] dan pustaka data nuklir energi kontinu ENDF/B-VI [11]. Tujuan dari makalah ini adalah menganalisis efek kisi kernel dan kisi *pebble* yang berimplikasi pada performa neutronik desain HTR *pebble-bed*. Hasil analisis diharapkan dapat memberikan informasi kombinasi kisi kernel dan kisi *pebble* yang lebih baik diadopsi dalam perhitungan desain HTR *pebble-bed* baik dengan bahan bakar UO_2 , PuO_2 maupun ThO_2/UO_2 .

Deskripsi HTR *Pebble-bed*

Teras HTR *pebble-bed* 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 $66,657 \text{ m}^3$ dan densitas daya 3 W/cm^3 , HTR *pebble-bed* dapat menghasilkan daya sebesar 200 MW dengan temperatur *outlet* teras rerata

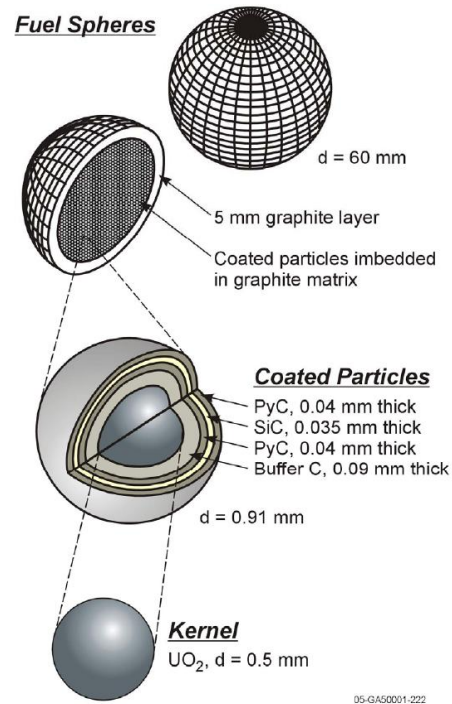
950°C dan temperatur *inlet* helium rerata 550°C. Struktur grafit yang mengelilingi teras memiliki ketebalan radial 100 cm serta aksial total bagian atas dan bagian bawah 750 cm. Kavitas yang berada di atas teras mempunyai tinggi 50 cm.

Tabel 1. Parameter reaktor dan spesifikasi teras HTR *pebble-bed* [12].

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

Selama operasi reaktor, bahan bakar *pebble* secara kontinu ditambahkan dari atas teras. *Pebble* akan bergerak ke bawah dan akan dikeluarkan di bagian bawah teras reaktor. Setiap bahan bakar *pebble* akan melewati peralatan pengukuran *burn-up* satu persatu. Bahan bakar *pebble* yang belum mencapai *burn-up* final akan diresirkulasi ke dalam teras reaktor untuk dapat dimanfaatkan kembali secara efisien dan optimal. Bahan bakar *pebble* yang telah mencapai *burn-up* final akan dikeluarkan dan

diangkut ke dalam tangki penyimpanan bahan bakar bekas. Parameter reaktor dan spesifikasi teras HTR *pebble bed* diberikan dalam Tabel 1.



Gambar 1. Skema geometrik bahan bakar HTR *pebble-bed* [12]

Setiap bahan bakar *pebble* memiliki diameter 6 cm dan mengandung ~5.000 hingga 20.000 partikel TRISO yang terdispersi dalam matriks grafit. Partikel TRISO dengan diameter 0,092 cm ini membentuk zona bahan bakar berdiameter 5 cm dan *shell* grafit dengan ketebalan 0,5 cm. Jumlah partikel TRISO dan massa kernel dalam setiap bahan bakar *pebble* dapat diderivasi dari fraksi *packing* TRISO yang dipilih. Partikel TRISO sendiri disusun oleh bahan bakar kernel dengan empat lapisan *coating* yang mengelilinginya.

Tabel 2. Spesifikasi bahan bakar *pebble* dan partikel berlapis TRISO [12].

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> (%)	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/ ²³⁹ Pu/ ²³³ U (%)	8,2/53,85/ 7,48
Impuritas boron alam dalam kernel (ppm)	0,5
Lapisan coating	
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

Kernel HTR *pebble-bed* memiliki diameter 500 μm dengan bahan bakar UO_2 , PuO_2 dan ThO_2/UO_2 . Kernel UO_2 berpengkayaan 8,2% $^{235}\text{U}/(^{235}\text{U}+^{238}\text{U})$ sedangkan kernel ThO_2/UO_2 berpengkayaan 7,48% $^{233}\text{U}/(^{233}\text{U}+^{232}\text{Th})$. Kernel PuO_2 berpengkayaan 53,85% ^{239}Pu dengan fraksi isotopik plutonium ^{238}Pu 0,0259; ^{240}Pu 0,2366; ^{241}Pu 0,1313 dan ^{242}Pu 0,0677. *Coating* tipikal yang dipilih dalam desain ini memiliki ketebalan 95 μm untuk penyangga karbon (*carbon buffer*, C),

40 μm untuk karbon pirolitik bagian dalam (*inner pyrolytic carbon*, IPyC) dan luar (*outer pyrolytic carbon*, OPyC) serta 35 μm untuk lapisan silikon karbida (SiC). Skema geometrik bahan bakar *pebble* dan partikel TRISO diilustrasikan dalam Gambar 1 dan spesifikasi detailnya dalam Tabel 2.

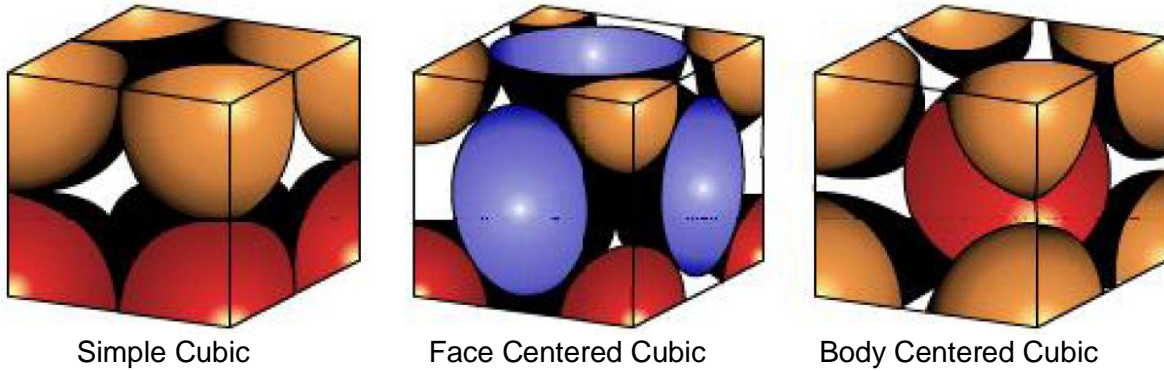
Model Kisi dan Perhitungan

Dalam studi ini, berbagai kisi kernel dan kisi *pebble* dikerjakan untuk menganalisis efek model kisi pada performa neutronik desain HTR *pebble-bed*. Kisi kernel atau *pebble* biasanya dikarakterisasi oleh parameter fraksi *packing* yang didefinisikan sebagai rasio antara volume kernel (dalam hal ini partikel TRISO) atau *pebble* dengan volume total kisi dimana kernel atau *pebble* berada di dalamnya.

Beberapa model kisi seperti SC, BCC, FCC, SH dan HCP paling sering digunakan dalam HTR *pebble-bed* untuk memodelkan distribusi stokastik dari kernel dalam matriks grafit dan *pebble* dalam teras reaktor. Kisi FCC dan HCP dikenal sebagai kisi yang paling padat di antara model kisi lainnya. Kisi FCC sering digunakan untuk menginvestigasi efek fraksi *packing* kernel dalam analisis HTR *pebble-bed* karena memiliki jelajah fraksi *packing* yang cukup luas sehingga secara teknis dapat mempertimbangkan posibilitas digunakannya partikel TRISO dengan jumlah yang besar dalam bahan bakar *pebble*. Kisi SC adalah kisi yang paling sederhana dan biasanya

dimanfaatkan untuk memodelkan partikel TRISO dalam matriks grafit. Komposisi berbagai model kisi yang dikerjakan dalam

perhitungan ini dilukiskan dalam Gambar 2 dan karakteristiknya dalam Tabel 3.



Gambar 2. Komposisi berbagai model kisi.

Tabel 3. Karakteristik berbagai model kisi

Model kisi	Jumlah kernel atau <i>pebble</i>	Fraksi <i>packing</i> maksimum
SC	1	0,52359
BCC	2	0,68175
FCC	4	0,74048

Tabel 4. Ukuran *pitch* kisi kernel dan kisi *pebble*

Model kisi	<i>Pitch</i> kisi (cm)	
	Kernel	<i>Pebble</i>
SC	0,163431	-
BCC	0,205910	7,185259
FCC	0,259431	9,052859

Fraksi *packing* kernel dan fraksi *packing pebble* dalam perhitungan ini dibuat tetap, masing-masing sebesar 9,344 % dan 61 %. Ini berarti terdapat 15.000 kernel dalam sebuah bahan bakar *pebble* dan 359.548 *pebble* dalam teras reaktor. Ini juga berarti bahwa, gas helium yang berfungsi sebagai pendingin mengalir di sela-sela rongga kosong di antara tumpukan bahan bakar *pebble* dengan volume 39% bagian dari total volume teras. Perhitungan faktor multiplikasi

reaktor (k_{eff}) dilakukan dengan serangkaian kombinasi kisi kernel dan kisi *pebble*. Ukuran *pitch* (p) kisi kernel dan *pebble* yang ditabulasikan dalam Tabel 4 diperoleh dari hubungan geometrik bola dan kubik mengikuti persamaan:

$$p_{SC} = r * \sqrt[3]{\frac{4\pi}{3f}} \dots\dots\dots(1)$$

$$p_{BCC} = r * \sqrt[3]{\frac{8\pi}{3f}} \dots\dots\dots(2)$$

$$p_{FCC} = r * \sqrt[3]{\frac{16\pi}{3f}} \dots\dots\dots(3)$$

dengan fraksi *packing* (f) sebesar 9,344 % dan 61% masing-masing untuk kisi kernel dan kisi *pebble* serta r sebesar 0,0460 cm dan 3 cm masing-masing untuk radius partikel TRISO dan *pebble*.

Dalam perhitungan ini seluruh komponen HTR *pebble-bed* dimulai dari partikel TRISO, bahan bakar *pebble*, teras reaktor hingga struktur grafit dimodelkan secara detail dan eksplisit

dengan program transport Monte Carlo MCNP5. Sel-sel permukaan bola konsentris dengan ukuran seperti dalam Tabel 2 digenerasi untuk membuat *universe* partikel TRISO. Opsi FILL kemudian dikenakan pada *universe* tersebut dimana untuk kisi SC partikel TRISO berada di pusat kisi. Opsi TRCL dimanfaatkan untuk mentranslasikannya dari titik pusat kisi ke delapan titik sudut kisi untuk

kisi BCC dan dari salah satu titik pusat diagonal bidang kisi ke lima titik pusat diagonal bidang kisi lainnya serta ke delapan titik sudut kisi untuk kisi FCC. Bahan bakar *pebble* dimodelkan dalam struktur berulang dengan opsi LAT pada kisi BCC dan FCC dimana opsi FILL kemudian diaplikasikan untuk menggambarkan bahan bakar *pebble* secara detail.

Tabel 5. Densitas atom bahan bakar kernel (atom/barn-cm³) [12].

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
Kernel ThO ₂ /UO ₂				
²³² Th	²³³ U	O	¹⁰ B	¹¹ B
2,19473×10 ⁻²	1,76668×10 ⁻³	4,74279×10 ⁻²	1,14694×10 ⁻⁷	4,64570×10 ⁻⁷
Kernel PuO ₂				
²³⁸ Pu	²³⁹ Pu	²⁴⁰ Pu	²⁴¹ Pu	²³⁸ Pu
6,01178×10 ⁻⁴	1,24470×10 ⁻²	5,44599×10 ⁻³	3,00965×10 ⁻³	6,01178×10 ⁻⁴
²⁴² Pu	O	¹⁰ B	¹¹ B	²⁴² Pu
1,54539×10 ⁻³	4,60983×10 ⁻²	1,14694×10 ⁻⁷	4,64570×10 ⁻⁷	1,54539×10 ⁻³

Tabel 6. Densitas atom lapisan *coating* TRISO (atom/barn-cm³) [12].

	C	Si	¹⁰ B	¹¹ B
Penyangga karbon	5,26449×10 ⁻²	-	-	-
IPyC/OPyC	9,52621×10 ⁻²	-	-	-
SiC	4,77240×10 ⁻²	4,77240×10 ⁻²	-	-
Matriks grafit	8,77414×10 ⁻²	-	9,64977×10 ⁻⁹	3,90864×10 ⁻⁸

Pemodelan teras penuh HTR *pebble-bed* dikerjakan dengan mengekspansi bahan bakar *pebble* ke seluruh volume teras. Komponen reaktor lainnya seperti reflektor dimodelkan dengan cara yang lebih sederhana. Densitas atom

bahan bakar kernel dan lapisan *coating* TRISO diberikan dalam Tabel 5 dan 6. Densitas atom matriks grafit partikel TRISO, *shell* grafit bahan bakar *pebble*, pendingin helium dan void ditabulasikan dalam Tabel 7 dan 8.

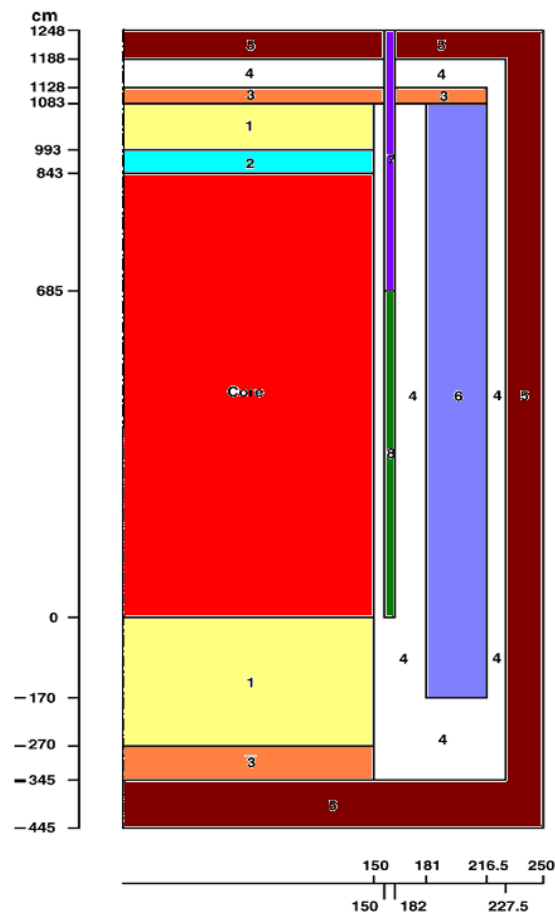
Tabel 7. Densitas atom matriks grafit dan *shell* grafit (g/cm^3) [12].

Nuklida	Matriks grafit	Shell grafit
C	$8,77414 \times 10^{-2}$	$8,77414 \times 10^{-2}$
^{10}B	$9,64977 \times 10^{-9}$	$9,64977 \times 10^{-9}$
^{11}B	$3,90864 \times 10^{-8}$	$3,90864 \times 10^{-8}$

Tabel 8. Densitas pendingin helium dan void (g/cm^3) [12].

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

Skema geometrik model perhitungan teras HTR *pebble-bed* dalam koordinat silindris 2-D R-Z diperlihatkan dalam Gambar 3. Nomor material struktur diindikasikan untuk setiap *region* dengan komposisi dan densitas atom material seperti diberikan dalam Tabel 9. 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 reaktor *pebble-bed*.



Gambar 3. Skema geometrik teras HTR *pebble-bed* [12].

Tabel 9. Komposisi dan densitas atom material struktur RGTT200K [12].

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	$2,00000 \times 10^{-3}$	$8,79837 \times 10^{-10}$	$3,56378 \times 10^{-9}$
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 ANALISIS

Dalam perhitungan MCNP5, opsi tipikal KCODE dipilih untuk *skipping* 10 siklus iterasi dari total 110 siklus dengan 5.000 neutron per siklus yang disimulasikan guna menghindari konvergensi sumber. Opsi tipikal KSRC dikerjakan untuk sumber neutron fisi awal yang diposisikan di pusat kernel bahan bakar. Pustaka data nuklir energi kontinu ENDF/B-VI dimanfaatkan pada temperatur kamar 300K. Interaksi neutron termal dengan grafit di bawah energi ~4 eV dipertimbangkan untuk seluruh material yang mengandung karbon dengan pustaka hamburan termal $S(\alpha, \beta)$ *graph.01t*. Kondisi vakum dikerjakan pada batas luar dari sistem reaktor HTR *pebble bed*.

Dalam studi ini nilai faktor multiplikasi reaktor (k_{eff}) berasal dari kombinasi tiga estimator yang digunakan dalam MCNP5. Ketiga estimator adalah estimator tumbukan yang menghitung jumlah neutron yang dihasilkan dari seluruh proses fisi dalam tumbukan, estimator serapan yang

mengkalkulasi seluruh proses interaksi neutron dengan nuklida fisil, dan estimator panjang jejak yang mengestimasi seluruh proses neutron berpindah tempat di dalam material fisil pada suatu jarak tertentu.

Hasil perhitungan k_{eff} berbagai model kisi kernel dan kisi *pebble* dirangkum dalam Tabel 5. Bahan bakar *pebble* dalam teras reaktor tidak dapat dimodelkan dengan kisi SC karena porositas maksimum desain HTR *pebble-bed* yang diokupasi oleh helium adalah 39% dari volume total teras sedangkan fraksi *packing* maksimum kisi SC adalah 52,4 %. Dari Tabel 5 dapat diamati bahwa secara keseluruhan perhitungan MCNP5 menunjukkan konsistensi dengan nilai k_{eff} yang hampir sama untuk seluruh kombinasi kisi kernel dan kisi *pebble*. Untuk model kisi kernel yang sama, kisi *pebble* FCC memproduksi k_{eff} lebih besar daripada kisi *pebble* BCC, khususnya untuk kisi kernel BCC dengan bias < 0,09%. Namun untuk bahan bakar PuO₂ dan ThO₂/UO₂, kisi

pebble FCC memproduksi k_{eff} lebih kecil daripada kisi *pebble* BCC dengan bias < 0,24%. Untuk model kisi *pebble* yang sama, kisi kernel FCC memproduksi k_{eff} lebih dekat dengan kisi kernel SC, khususnya dalam kisi *pebble* BCC untuk

bahan bakar UO_2 dan ThO_2/UO_2 . Namun sebaliknya dalam kisi *pebble* FCC, kisi kernel BCC justru memproduksi k_{eff} lebih dekat dengan kisi kernel SC untuk bahan bakar yang sama.

Tabel 5. Hasil perhitungan k_{eff} berbagai kombinasi kisi kernel dan *pebble*.

Kisi <i>pebble</i>		Kisi kernel		
		SC	BCC	FCC
BCC	UO_2	1,31534±0,00115 (1,00000) [†] (1,00000) [‡]	1,31642±0,00111 (1,00082) (1,00000) [‡]	1,31502±0,00113 (0,99975) (1,00000) [‡]
	PuO_2	1,20905±0,00105 (1,00000) [†] (1,00000) [‡]	1,20996±0,00107 (1,00075) (1,00000) [‡]	1,21083±0,00098 (1,00147) (1,00000) [‡]
	ThO_2/UO_2	1,51492±0,00114 (1,00000) [†] (1,00000) [‡]	1,51235±0,00114 (0,99830) (1,00000) [‡]	1,51305±0,00103 (0,99877) (1,00000) [‡]
FCC	UO_2	1,31667±0,00100 (1,00000) [†] (1,00101)	1,31648±0,00112 (0,99986) (1,00005)	1,31528±0,00123 (0,99894) (1,00021)
	PuO_2	1,20846±0,00097 (1,00000) [†] (0,99951)	1,21038±0,00106 (1,00159) (1,00035)	1,20797±0,00097 (0,99959) (0,99764)
	ThO_2/UO_2	1,51314±0,00102 (1,00000) [†] (0,99883)	1,51374±0,00127 (1,00040) (1,00092)	1,51036±0,00111 (0,99816) (0,99822)

† Kisi kernel SC dinormalisasi satu untuk seluruh kisi *pebble*.

‡ Kisi *pebble* BCC dinormalisasi satu untuk seluruh kisi kernel.

Jika diamati lebih jauh tampak bahwa nilai k_{eff} lebih bergantung pada kisi *pebble* daripada kisi kernel. Kisi kernel hanya memberikan efek yang tidak begitu signifikan dengan rentang bias 0,01-0,18%. Seluruh *pebble* yang dikandung dalam kisi FCC diposisikan di sepanjang batas datar dari sel satuan sehingga sulit memodelkan susunan yang memungkinkan dari bahan bakar

pebble dan moderator *pebble* (jika diperlukan) karena *pebble-pebble* yang berdekatan saling tumpang tindih secara tidak konsisten. Karena itu, walaupun *packing pebble* dalam teras *pebble-bed* diekspektasi mendekati kisi HCP namun kisi *pebble* BCC menjadi pilihan yang tepat. Kisi *pebble* BCC dapat menyediakan fraksi *packing* lebih dekat dengan ukuran tipikal yang dijumpai di

reaktor *pebble-bed*. Hasil estimasi k_{eff} seluruh kombinasi kisi memberi kesan model BCC lebih baik dibandingkan model FCC.

SIMPULAN

Studi perhitungan HTR *pebble-bed* dengan berbagai kisi kernel dan kisi pebble telah dilakukan melalui serangkaian perhitungan faktor multiplikasi reaktor (k_{eff}) dengan dengan program transport Monte Carlo MCNP5 dan pustaka data nuklir energi kontinu ENDF/B-VI.

Secara keseluruhan perhitungan MCNP5 menunjukkan konsistensi dengan nilai k_{eff} yang hampir sama untuk seluruh kombinasi kisi kernel dan kisi *pebble* namun jika diamati lebih jauh tampak bahwa nilai k_{eff} lebih bergantung pada kisi *pebble* daripada kisi kernel. Kisi kernel hanya memberikan efek yang tidak begitu signifikan.

Hasil prediksi k_{eff} seluruh kombinasi kisi menyimpulkan bahwa apapun model kisi kernel yang dimanfaatkan, model kisi *pebble* BCC lebih baik diadopsi dalam perhitungan desain HTR *pebble-bed* baik dengan bahan bakar UO_2 , PuO_2 maupun ThO_2/UO_2 .

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih kami sampaikan kepada Dr. Ir. M. Dhandhang Purwadi yang memberikan inspirasi dan motivasi untuk

melakukan riset ini. Ucapan terimakasih juga kami sampaikan kepada Ir. Suwoto yang menyediakan waktu dan pikirannya untuk membantu dan mendukung kami dalam eksekusi MCNP5.

PUSTAKA

1. J.C. Kuijper, "Puma – Plutonium And Minor Actinides Management In Thermal High-Temperature Reactors", Proceedings Of The International Congress On Advances In Nuclear Power Plants, Nice France, 13-18 May 2007.
2. V. Basini, et al., "High-Temperature Reactor Fuel Technology In Raphael European Project", Proceedings of The 4-Th International Topical Meeting On High Temperature Reactor Technology (HTR2008), Washington, D.C., USA, 28 Sep. – 1 Oct. 2008.
3. Antares, "The Areva HTR-VHTR Design" (Www.Areva.Com).
4. K. Kugeler, H. Barnen, "Application Of The High Temperature Reactor In The Energy Economy", Proceedings of A Technical Committee Meeting On High Temperature Applications Of Nuclear Energy, Oarai, Japan, 19-20 Oct. 1992.
5. Ineel, "Ngnp Point Design – Results of The Initial Neutronics and Thermal-Hydraulic Assessments During Fy-2003", Sep. 2003.
6. A. Koster, H.D. Matzner, D.R. Nicholsi, "PBMR Design For The Future", Nuclear Engineering and Design 222 (2003) 231-245.
7. Z. Wu, D. Lin, D. Zhong, "The Design Features of The HTR-10", Nuclear Engineering and Design 218 (2002) 25-32.
8. T. Aste, D. Weaire, "The Pursuit Of Perfect Packing", Iop Publishing Bristol, 2000, P. 20-27.

9. Mark R. De Guire, "Principle Of Atomic Packing", Introduction To Materials Science & Engineering, ESME, 2001.
10. Brown, F. B., et al., MCNP – A "General Monte Carlo N-Particle Transport Code", Version 5, La-Ur-03-1987, 24 Apr. 2003.
11. Hendricks, J. S., Frankle, S. C., Court, J. D., ENDF/B-VI Data For Mcnp, Los Alamos National Laboratory Report, La-12891, 1994.
12. G. Hosking, T.D. Newton, "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, 2007.