

STUDI SENSITIVITAS KETINGGIAN TERAS REAKTOR DALAM DESAIN HTR *PEBBLE BED*

Zuhair, Rokhmadi
Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir

ABSTRAK

STUDI SENSITIVITAS KETINGGIAN TERAS REAKTOR DALAM DESAIN HTR *PEBBLE BED*. HTR *pebble bed* adalah reaktor temperatur tinggi berbahan bakar *pebble* dan berpendingin gas helium dengan teras densitas daya rendah. Teras HTR *pebble bed* disebut teras grafit penuh karena menggunakan struktur grafit sebagai moderator dan reflektor, partikel bahan bakar berlapis grafit dan elemen bakar grafit lengkap. Makalah ini mendiskusikan sensitivitas ketinggian teras reaktor dalam desain HTR *pebble bed*. Perhitungan dikerjakan dengan program transpor Monte Carlo MCNP5 pada temperatur kamar. Berbagai opsi matriks bahan bakar UO₂, PuO₂ dan ThO₂/UO₂ dieksaminasi untuk konfigurasi teras dengan rasio F/M 1:0 dan F/M 1:1. Hasil perhitungan memperlihatkan kondisi kritis teras dengan bahan bakar PuO₂ untuk rasio F/M 1:0 dicapai pada ketinggian 66 cm, ThO₂/UO₂ pada ketinggian 88 cm dan UO₂ pada ketinggian 106 cm sedangkan ketinggian kritis konfigurasi teras PuO₂ dengan rasio F/M 1:1 terjadi di 78 cm, ThO₂/UO₂ di 124 cm dan UO₂ di 138 cm. Hasil-hasil ini menyimpulkan bahwa selain pengkayaan, radius kernel, fraksi *packing* partikel TRISO dan dimensi reflektor grafit, ketinggian teras reaktor merupakan salah satu parameter neutronik yang harus dipertimbangkan dalam desain HTR *pebble bed* dengan matriks bahan bakar yang spesifik.

Kata Kunci : HTR *pebble bed*, ketinggian teras, MCNP5, ENDF/B-VI, rasio F/M

ABSTRACT

STUDY ON HEIGHT SENSITIVITY OF REACTOR CORE IN HTR PEBBLE BED DESIGN. HTR pebble bed is a pebble fueled helium gas cooled high temperature reactor with low power density core. HTR pebble bed core known as full graphite core because of using graphite structure as moderator and reflector, graphite coated fuel particles and completely graphite fuel elements. This paper discusses the height sensitivity of the reactor core in HTR pebble bed design. The calculations were done by Monte Carlo transport code MCNP5 at room temperature. Various options of UO₂, PuO₂ and ThO₂/UO₂ fuel matrix were examined for core configuration with F/M ratios of 1:0 and 1:1. The calculation results show a critical condition with PuO₂ fuel for F/M ratio of 1:0 is achieved at a height of 66 cm, ThO₂/UO₂ at a height of 88 cm and UO₂ at a height of 106 cm while critical height of PuO₂ core configuration with F/M ratio of 1:1 occurs at 78 cm, ThO₂/UO₂ at 124 cm and UO₂ at 138 cm. These results conclude that in addition to enrichment, kernel radius, packing fraction of TRISO particle and graphite reflector dimension, the height of the reactor core is one of neutronic parameters to be considered in designing of HTR pebble bed with a specific fuel matrix.

Keywords : HTR *pebble bed*, core height, MCNP5, ENDF/B-VI, F/M ratio

PENDAHULUAN

HTR *pebble bed* adalah reaktor temperatur tinggi berbahan bakar *pebble* dan berpendingin gas helium dengan teras densitas daya rendah. Teras HTR *pebble bed* disebut teras grafit penuh karena menggunakan struktur grafit sebagai moderator dan reflektor, partikel bahan bakar

berlapis grafit dan elemen bakar grafit lengkap. Reaktor ini memiliki kelebihan dibandingkan reaktor fisi lainnya seperti reaktor air tekan (*pressurized water reactor*, PWR), reaktor air didih (*boiling water reactor*, BWR) dan lain-lain karena ukurannya yang lebih kecil, lebih aman, lebih ramah lingkungan dan lebih

ekonomis. Keselamatan melekat (*inherent safety*) yang dimiliki HTR *pebble bed* 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 berfungsi mencegah kebocoran produk fisi dari matriks bahan bakar.

Karakteristik keselamatan HTR *pebble bed* memungkinkan untuk menyimpan bahan bakar bekas di tempat yang memiliki proteksi radiasi lebih kecil daripada penyimpanan limbah bahan bakar reaktor tradisional. Biaya konstruksi yang rendah, efisiensi yang tinggi dan ciri pemuatan bahan bakar langsung (*on-line*) membuat HTR *pebble bed* sangat ekonomis⁽¹⁾. Dengan memanfaatkan gas helium sebagai pendingin, temperatur *outlet* reaktor yang sangat tinggi dapat dicapai untuk menghasilkan efisiensi termal tinggi dan aplikasi lainnya selain listrik seperti produksi hidrogen, desalinasi air laut, dan lain-lain.

Studi efek radius kernel bahan bakar pada berbagai pengkayaan⁽²⁾ telah dilakukan yang memberi kesan bahwa pemilihan radius kernel sangat mempengaruhi desain kritikalitas HTR *pebble bed*. Sensitivitas fraksi *packing* partikel TRISO⁽³⁾ dan dimensi reflektor grafit⁽⁴⁾ juga telah dipelajari sebagai parameter yang memberi efek pada performa neutronik HTR *pebble bed*. Makalah ini mendiskusikan sensitivitas ketinggian teras reaktor dalam desain HTR *pebble bed* dengan berbagai opsi matriks bahan bakar, yakni UO₂, PuO₂ dan ThO₂/UO₂. Perhitungan dikerjakan dengan program

transport Monte Carlo MCNP5⁽⁵⁾ memanfaatkan pustaka data nuklir energi kontinu ENDF/B-VI⁽⁶⁾ pada temperatur kamar. Konfigurasi teras yang dimuati oleh bahan bakar *pebble* (F) dan moderator *pebble* (M) dengan rasio F/M 1:1 dan dimuati hanya oleh bahan bakar *pebble* (F/M 1:0) dieksaminasi untuk melengkapi analisis desain HTR *pebble bed*.

DESKRIPSI HTR *PEBBLE BED*

HTR *pebble bed* adalah reaktor nuklir berpendingin gas helium temperatur tinggi dengan moderator dan reflektor grafit. Gas helium dan grafit merupakan material yang paling sesuai untuk operasi temperatur tinggi. Karena susunan yang unik dari bahan bakar, moderator dan pendingin, HTR *pebble bed* dapat mengakomodasi berbagai opsi matriks bahan bakar seperti uranium, plutonium, thorium dan aktinida minor atau campuran fisil dan fertil dari keempatnya. Fleksibilitas ini secara utama disebabkan oleh ketidak-tergantungan teras dari parameter-parameter yang menentukan geometri pendingin, dan oleh parameter-parameter fundamental teras yang mengkarakterisasi optimasi neutronik, seperti rasio moderasi dan distribusi nuklida berat.

Reaktor dimodelkan terdiri dari teras berbentuk silinder dengan kavitas sentral setebal 50 cm dan reflektor grafit yang mengelilingi teras dengan ketebalan 100 cm dalam arah aksial dan radial. Teras reaktor disusun dari sebuah *array* dari 45.000 *pebble* yang terdiri dari bahan bakar *pebble* dengan radius 3 cm dan moderator *pebble* dengan radius yang sama. Bahan bakar *pebble* (F) dan moderator *pebble* (M) dalam

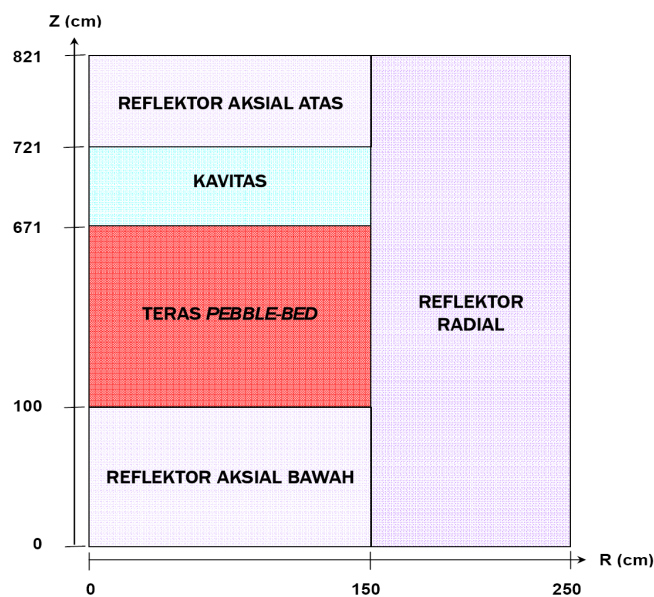
teras dispesifikasikan dengan rasio F/M 1:0 dan 1:1. Pendingin helium mengalir diantara celah-celah *pebble* serta menempati rongga dengan volume 39% dari volume teras berdiameter 180 cm dan tinggi 200 cm. Skema geometrik 2-D R-Z model teras reaktor *pebble bed* diperlihatkan dalam Gambar 1 dan parameter utama reaktor diberikan dalam Tabel 1.

Pemuatan bahan bakar HTR *pebble bed* dilakukan secara kontinu dengan memasukkan bahan bakar *pebble* ke dalam teras reaktor dari

atas. Setelah kurun waktu operasi reaktor, bahan bakar *pebble* yang telah mencapai *burnup* final akan dikeluarkan dari bawah teras. Bila belum mencapai *burnup* final, bahan bakar *pebble* akan dikembalikan lagi ke dalam teras.

PEMODELAN HTR *PEBBLE BED*

Pemodelan desain dan analisis HTR *pebble bed* membutuhkan teknik khusus karena karakteristik bahan bakar dan geometri teras reaktor temperatur tinggi. Program transport



Gambar 1. Skema geometrik model teras reaktor *pebble bed*.

Tabel 1. Parameter utama HTR *pebble bed*.

Daya termal reaktor	10 MW
Tinggi teras reaktor	2 m
Diameter teras reaktor	1,8 m
Jumlah <i>pebble</i> dalam teras	45.000
Material bahan bakar	UO ₂
Massa uranium per <i>pebble</i>	9,13 g
Pengkayaan bahan bakar	8,2%
Volume teras aktif	~5 m ³
Densitas daya rerata	2 MW/m ³
Jumlah <i>pebble</i> per m ³	9000
Impuritas boron alam dalam reflektor grafit (ppm)	2

Monte Carlo MCNP5 kemudian dipilih karena kapabilitasnya memodelkan reaktor secara utuh dan detail sesuai dengan geometri nyata tanpa simplifikasi dan homogenisasi. Eksekusi MCNP5 dilakukan setelah deskripsi bahan bakar, struktur reaktor dan komposisi material diperoleh secara lengkap. Pemodelan HTR *pebble bed* terdiri dari 2 langkah, yaitu langkah pertama adalah memodelkan bahan bakar *pebble* dan moderator *pebble*, langkah berikutnya adalah memodelkan teras penuh reaktor HTR *pebble bed*.

Pemodelan Bahan Bakar Pebble dan Moderator pebble

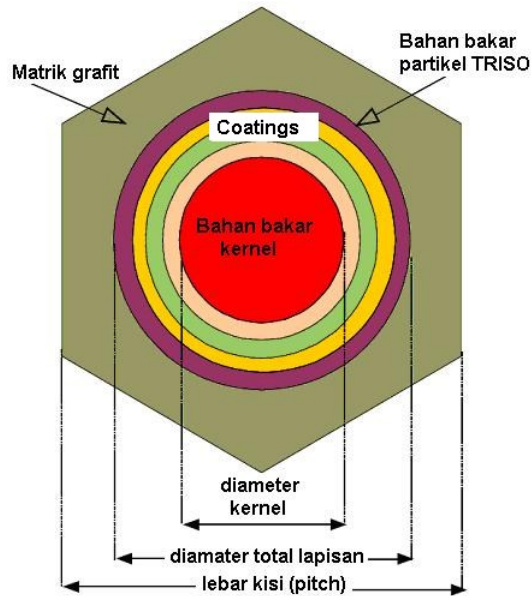
Bahan bakar *pebble* berbentuk bola dengan diameter 6 cm. *Shell* dari *pebble* adalah lapisan grafit dengan tebal 0,5 cm. Di dalam *shell* grafit terdapat zona bahan bakar yang terdiri dari matriks grafit dimana ribuan partikel berlapis TRISO terdispersi di dalamnya. Setiap partikel TRISO terdiri dari bahan bakar kernel

berdiameter 500 μm dan sistem *coating* TRISO. Sistem *coating* TRISO diawali dari penyangga karbon (*carbon buffer*, C), diikuti berturut-turut oleh karbon pirolitik bagian dalam (*inner pyrolytic carbon*, IPyC), silikon karbida (SiC) dan karbon pirolitik bagian luar (*outer pyrolytic carbon*, OPyC). Data detail dari bahan bakar *pebble* dan partikel berlapis TRISO ditabulasikan dalam Tabel 2.

Pemodelan bahan bakar *pebble* dimulai dari memodelkan partikel TRISO sebagai UNIVERSE yang dimasukkan dalam kisi heksagonal sederhana (*simple hexagonal*, SH) seperti diperlihatkan dalam Gambar 2. *Pitch* kisi heksagonal dipilih 0,171458 cm untuk mendistribusikan 15.000 partikel TRISO secara acak ke dalam bahan bakar *pebble* berdiameter 5 cm. Ini berarti fraksi *packing* TRISO dalam bahan bakar *pebble* bernilai 9,344%. Dalam studi ini dipilih bahan bakar kernel UO₂, PuO₂ dan ThO₂/UO₂ yang diadopsi dari G. Hosking

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 235U/239Pu/233U (%)	8,2/53,85/7,48
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



Gambar 2. Kisi heksagonal partikel TRISO.

Tabel 3. Densitas atom bahan bakar kernel (atom/barn-cm³).

Kernel UO ₂				
235U	238U	O	10B	11B
$1,92585 \times 10^{-3}$	$2,12877 \times 10^{-2}$	$4,64272 \times 10^{-2}$	$1,14694 \times 10^{-7}$	$4,64570 \times 10^{-7}$
Kernel ThO ₂ /UO ₂				
232Th	233U	O	10B	11B
$2,19473 \times 10^{-2}$	$1,76668 \times 10^{-3}$	$4,74279 \times 10^{-2}$	$1,14694 \times 10^{-7}$	$4,64570 \times 10^{-7}$
Kernel PuO ₂				
238Pu	239Pu	240Pu	241Pu	
$6,01178 \times 10^{-4}$	$1,24470 \times 10^{-2}$	$5,44599 \times 10^{-3}$	$3,00965 \times 10^{-3}$	
242Pu	O	10B	11B	
$1,54539 \times 10^{-3}$	$4,60983 \times 10^{-2}$	$1,14694 \times 10^{-7}$	$4,64570 \times 10^{-7}$	

Tabel 4. Densitas atom lapisan *coating* TRISO (atom/barn-cm³).

Nuklida	Penyangga karbon	IPyC/OPyC	SiC
12C	$5,26449 \times 10^{-2}$	$9,52621 \times 10^{-2}$	$4,77240 \times 10^{-2}$
28Si	-	-	$4,77240 \times 10^{-2}$

dan T.D. Newton⁽⁷⁾ agar dapat memberikan komparasi performa neutronik dalam desain HTR *pebble bed*. Pengkayaan $^{235}\text{U}/(^{235}\text{U}+^{238}\text{U})$ dalam UO₂ dan $^{233}\text{U}/(^{233}\text{U}+^{232}\text{Th})$ dalam ThO₂/UO₂ masing-

masing adalah 8,20% dan 7,48%. Kernel PuO₂ memiliki fraksi isotopik plutonium 2,59/ 53,85/ 23,66/ 13,13/ 6,77% yang berkorespondensi pada isotop $^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}/^{242}\text{Pu}$. Densitas atom bahan bakar kernel dan

lapisan *coating* TRISO diberikan dalam Tabel 3 dan 4.

Struktur zona bahan bakar dari bahan bakar *pebble*, bagaimanapun, sangat sulit dimodelkan karena jumlah yang besar dari partikel TRISO dengan sistem *coating*nya. Walaupun tidak seorangpun dapat memprediksi susunan dan distribusi partikel TRISO dalam bahan bakar *pebble*, namun MCNP5 dapat membangun model eksak untuk zona bahan bakar dengan struktur berulang pada kisi heksagonal yang dibuat. Pemodelan struktur berulang dalam MCNP5 dikenal sebagai opsi LATTICE. Pemanfaatan LATTICE dapat menyebabkan munculnya partikel TRISO yang tidak utuh di sekeliling bahan bakar *pebble* yang disebut TRISO parsial. Dengan menerapkan koreksi pada fraksi *packing* TRISO kontribusi TRISO parsial dapat dieliminasi namun dalam studi ini tidak dilakukan koreksi karena tidak mempengaruhi hasil perhitungan secara

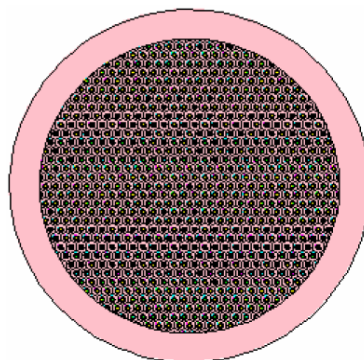
signifikan walaupun homogenisasi distribusi partikel TRISO dalam grafit matriks tidak direkomendasikan⁽⁸⁾. Gambar 3 mengilustrasikan struktur bahan bakar *pebble* yang dimodelkan MCNP5. Moderator *pebble* dengan diameter yang sama dengan bahan bakar *pebble* lebih mudah dimodelkan oleh MCNP5. Densitas atom matriks grafit partikel TRISO, *shell* grafit bahan bakar *pebble* dan moderator *pebble* diberikan dalam Tabel 5.

Pemodelan teras reaktor

Pemodelan teras HTR *pebble bed* dilakukan dengan memanfaatkan opsi LATTICE untuk mendistribusikan 45.000 bahan bakar *pebble* yang dimodelkan dengan kisi *body-centered cubic* (BCC) dengan fraksi *packing pebble* 61%. Fraksi *packing* ini dipilih agar sesuai dengan nilai tipikal HTR *pebble bed*. *Pitch* kisi BCC karenanya menjadi 7,185259 cm. Untuk rasio F/M 1:1, moderator *pebble* menggantikan bahan bakar *pebble* yang diposisikan di delapan

Tabel 5. Densitas atom lapisan *coating* TRISO (atom/barn-cm).

Nuklida	Matriks grafit	<i>Shell</i> grafit	Moderator <i>pebble</i>
12C	$8,77414 \times 10^{-2}$	$8,77414 \times 10^{-2}$	$8,38302 \times 10^{-2}$
10B	$9,64977 \times 10^{-9}$	$9,64977 \times 10^{-9}$	$2,40326 \times 10^{-8}$
11B	$3,90864 \times 10^{-8}$	$3,90864 \times 10^{-8}$	$9,73442 \times 10^{-8}$



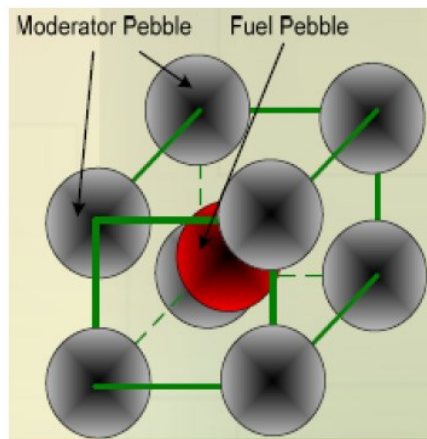
Gambar 3. Model MCNP5 untuk bahan bakar *pebble*.

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

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

Tabel 7. Densitas atom reflektor grafit (atom/barn-cm).

Nuklida	Reflektor aksial	Reflektor radial
12C	$7,72000 \times 10^{-2}$	$8,53000 \times 10^{-2}$
10B	$3,39617 \times 10^{-8}$	$3,75250 \times 10^{-8}$
11B	$1,37562 \times 10^{-7}$	$1,51995 \times 10^{-7}$



Gambar 4. Struktur kisi BCC untuk rasio F/M 1:1.

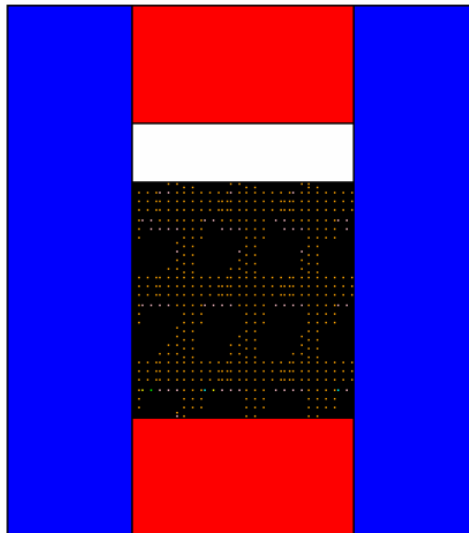
pojok kisi BCC untuk rasio F/M 1:0 seperti diilustrasikan dalam Gambar 4.

Model teras penuh HTR *pebble bed* diilustrasikan dalam Gambar 5 setelah memodelkan komponen reaktor lainnya seperti reflektor dengan cara yang lebih sederhana. Densitas atom pendingin helium dan *void* diberikan dalam Tabel 6 sedangkan densitas atom reflektor grafit diberikan dalam Tabel 7.

HASIL PERHITUNGAN DAN DISKUSI

Dalam perhitungan HTR *pebble bed* digunakan opsi KCODE dan KSRC. Sebanyak 5.000 neutron per siklus disimulasikan dengan 10 siklus *diskip* sebelum akumulasi data dimulai dari total 110 siklus. Tebakan awal faktor

multiplikasi reaktor (k_{eff}) diambil 1,0 agar hasil simulasi final diharapkan sangat dekat dengan kondisi kritis. Jumlah sumber neutron tergantung pada sistem reaktor dan jumlah siklus yang dipilih dan dalam studi ini sumber neutron diletakkan di pusat bahan bakar kernel. Iterasi distribusi neutron fisi dieksekusi MCNP5 dengan waktu komputasi rerata 60 menit dalam *workstation quadcore* 16 MB untuk setiap kasus ketinggian teras reaktor yang dihitung. Pustaka data nuklir energi kontinu ENDF/B-VI dan data hamburan neutron $S(\alpha, \beta)$, yakni *graph.01t*, dimanfaatkan dalam perhitungan untuk seluruh material reaktor yang mengandung unsur grafit guna mempertimbangkan efek *binding* pada energi neutron di bawah ~ 4 eV.

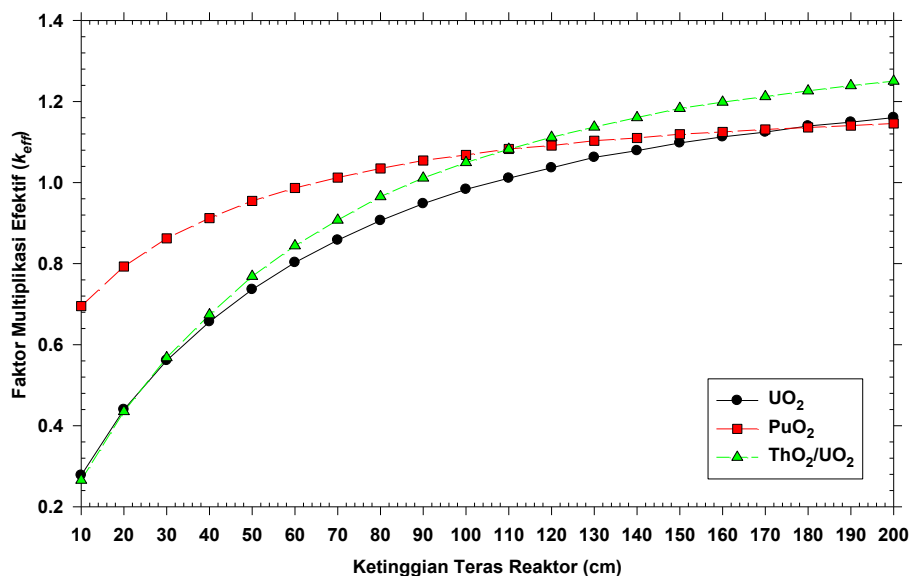
Gambar 5. Model MCNP5 untuk teras penuh HTR *pebble bed*.Tabel 8. Sensitivitas ketinggian teras reaktor terhadap faktor multiplikasi efektif (k_{eff}) HTR *pebble bed* untuk konfigurasi F/M 1:0.

Tinggi teras reaktor (cm)	Faktor multiplikasi efektif (k_{eff})		
	UO ₂	PuO ₂	ThO ₂ /UO ₂
10	0,27766±0,00059	0,69520±0,00111	0,26562±0,00057
20	0,43995±0,00078	0,79301±0,00111	0,43512±0,00073
30	0,56112±0,00100	0,86234±0,00124	0,56807±0,00095
40	0,65661±0,00103	0,91241±0,00114	0,67394±0,00093
50	0,73615±0,00110	0,95467±0,00109	0,76873±0,00111
60	0,80299±0,00110	0,98672±0,00124	0,84420±0,00111
70	0,85806±0,00126	1,01239±0,00096	0,90737±0,00120
80	0,90634±0,00113	1,03494±0,00118	0,96537±0,00123
90	0,94805±0,00109	1,05449±0,00121	1,01137±0,00127
100	0,98343±0,00118	1,06832±0,00108	1,04953±0,00122
110	1,01081±0,00140	1,08304±0,00102	1,08234±0,00123
120	1,03645±0,00123	1,09145±0,00116	1,11185±0,00111
130	1,06226±0,00116	1,10319±0,00112	1,13714±0,00114
140	1,07886±0,00120	1,11003±0,00104	1,16044±0,00122
150	1,09801±0,00120	1,11950±0,00109	1,18309±0,00111
160	1,11295±0,00114	1,12504±0,00101	1,19861±0,00101
170	1,12459±0,00110	1,13105±0,00120	1,21232±0,00124
180	1,13967±0,00115	1,13610±0,00121	1,22641±0,00119
190	1,14914±0,00121	1,14060±0,00108	1,23925±0,00105
200	1,16041±0,00118	1,14582±0,00117	1,25045±0,00136

Hasil perhitungan sensitivitas ketinggian teras reaktor terhadap faktor multiplikasi efektif (k_{eff}) HTR *pebble bed* untuk rasio F/M 1:0 disajikan dalam Tabel 8. Konfigurasi teras dengan matriks bahan bakar UO_2 , PuO_2 dan ThO_2/UO_2 dieksaminasi pada temperatur kamar. Ada kecenderungan yang serupa dari kelakuan tiga konfigurasi bahan bakar yang meningkat seiring dengan bertambahnya ketinggian teras reaktor.

Kecenderungan faktor multiplikasi efektif (k_{eff}) menjadi lebih jelas bila hasil perhitungan MCNP5 dalam Tabel 8 *diplot* ke dalam grafik seperti diilustrasikan dalam Gambar 6. Dimulai dari kondisi subkritis yang nyaris sama untuk konfigurasi bahan bakar UO_2 dan ThO_2/UO_2 dengan reaktivitas masing-masing $-2,60 \Delta k/k$

dan $-2,76 \Delta k/k$ sedangkan PuO_2 dengan reaktivitas $-0,44 \Delta k/k$, sebuah pendakian yang cukup curam dan menyerupai logaritmis dapat diamati dalam Gambar 6. Hampir tidak ada perubahan drastis dalam faktor multiplikasi efektif (k_{eff}) untuk setiap penambahan ketinggian teras. Pada ketinggian ~ 110 cm, nilai k_{eff} PuO_2 mulai dilampaui oleh ThO_2/UO_2 dan pada ketinggian ~ 180 cm nilai k_{eff} PuO_2 dilampaui oleh UO_2 . Ketiga kurva diakhiri ke dalam sebuah *plateau* untuk seluruh konfigurasi bahan bakar, tetapi lebih segera untuk PuO_2 kemudian diikuti oleh UO_2 dan ThO_2/UO_2 . Kondisi kritis teras dengan bahan bakar PuO_2 dicapai pada ketinggian 66 cm, ThO_2/UO_2 pada ketinggian 88 cm dan UO_2 pada ketinggian 106 cm.



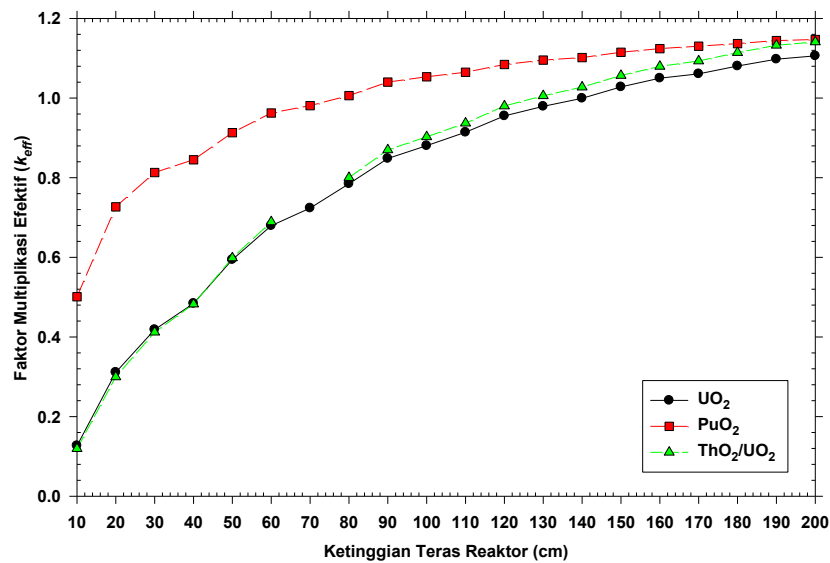
Gambar 6. Faktor multiplikasi reaktor (k_{eff}) sebagai fungsi ketinggian teras HTR *pebble bed* untuk rasio F/M 1:0.

Tabel 9. Sensitivitas ketinggian teras reaktor terhadap faktor multiplikasi efektif (k_{eff}) HTR *pebble bed* untuk konfigurasi F/M 1:1.

Tinggi teras reaktor (cm)	Faktor multiplikasi efektif (k_{eff})		
	UO ₂	PuO ₂	ThO ₂ /UO ₂
10	0,12687±0,00032	0,50109±0,00090	0,11950±0,00034
20	0,31134±0,00070	0,72685±0,00117	0,29960±0,00061
30	0,41837±0,00092	0,81309±0,00114	0,41194±0,00072
40	0,48428±0,00093	0,84511±0,00112	0,48252±0,00084
50	0,59433±0,00098	0,91302±0,00124	0,59843±0,00100
60	0,67958±0,00100	0,96258±0,00111	0,68903±0,00096
70	0,72374±0,00109	0,98104±0,00117	0,73774 ±0,00111
80	0,78478±0,00110	1,00610±0,00120	0,80013±0,00097
90	0,84822±0,00119	1,04020±0,00120	0,86987±0,00111
100	0,88055±0,00134	1,05344±0,00112	0,90267±0,00111
110	0,91432±0,00123	1,06486±0,00126	0,93704±0,00108
120	0,95519±0,00130	1,08436±0,00106	0,98005±0,00102
130	0,97932±0,00116	1,09533±0,00096	1,00574±0,00106
140	0,99950±0,00111	1,10162±0,00116	1,02755±0,00103
150	1,02810±0,00121	1,11507±0,00107	1,05679±0,00104
160	1,05003±0,00120	1,12414±0,00131	1,07965±0,00113
170	1,06097±0,00113	1,13039±0,00123	1,09307±0,00111
180	1,08052±0,00116	1,13677±0,00122	1,11425±0,00111
190	1,09772±0,00121	1,14442±0,00101	1,13264±0,00114
200	1,10606±0,00091	1,14702±0,00107	1,14100±0,00114

Tabel 9 menyajikan sensitivitas ketinggian teras reaktor yang sama seperti Tabel 8 namun untuk rasio F/M 1:1. Gambar 7 mengilustrasikan hasil perhitungan MCNP5 dalam bentuk grafik. Kurva menunjukkan profil yang serupa dengan yang diperoleh untuk rasio F/M 1:0, tetapi dengan kecenderungan faktor multiplikasi reaktor (k_{eff}) yang sedikit lebih kecil. Hal ini diprediksi karena keberadaan moderator *pebble* tidak memoderasi teras secara efektif. Jika

Gambar 7 diamati lebih lanjut, kurva nilai k_{eff} PuO₂ selalu berada di atas kurva UO₂ dan ThO₂/UO₂ sepanjang ketinggian teras reaktor yang dipertimbangkan. Setelah ketinggian lebih dari 200 cm diperkirakan nilai k_{eff} PuO₂ akan dilampaui oleh ThO₂/UO₂ dan mungkin pula oleh UO₂. Berbeda dengan rasio F/M 1:0, ketinggian kritis konfigurasi teras PuO₂ dengan rasio F/M 1:1 terjadi di 78 cm, ThO₂/UO₂ di 124 cm dan UO₂ di 138 cm.



Gambar 7. Faktor multiplikasi reaktor (k_{eff}) sebagai fungsi ketinggian teras HTR *pebble bed* untuk rasio F/M 1:1.

KESIMPULAN

Studi sensitivitas ketinggian teras reaktor dalam desain HTR *pebble bed* telah dilakukan dengan program *transport* Monte Carlo MCNP5 dan pustaka data nuklir energi kontinu ENDF/B-VI pada temperatur kamar. Berbagai opsi matriks bahan bakar UO₂, PuO₂ dan ThO₂/UO₂ dieksminasi untuk konfigurasi teras dengan rasio F/M 1:0 dan F/M 1:1.

Hasil perhitungan memperlihatkan kondisi kritis teras dengan bahan bakar PuO₂ untuk rasio F/M 1:0 dicapai pada ketinggian 66 cm, ThO₂/UO₂ pada ketinggian 88 cm dan UO₂ pada ketinggian 106 cm sedangkan ketinggian kritis konfigurasi teras PuO₂ dengan rasio F/M 1:1 terjadi di 78 cm, ThO₂/UO₂ di 124 cm dan UO₂ di 138 cm.

Hasil-hasil ini menyimpulkan bahwa selain pengkayaan, radius kernel, fraksi *packing* partikel TRISO dan dimensi reflektor grafit, ketinggian teras reaktor merupakan salah

satu parameter neutronik yang harus dipertimbangkan secara seksama dalam desain HTR *pebble bed* dengan matriks bahan bakar yang spesifik.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih kami sampaikan kepada Ir. Tagor M. Sembiring yang memberikan inspirasi dan motivasi untuk melakukan riset ini. Dukungan dan saran yang amat berarti dari rekan-rekan di Bidang Pengembangan Reaktor - PTRKN BATAN sangat kami hargai.

DAFTAR PUSTAKA

1. Kadak, A.C., *A Future for Nuclear Energy: Pebble Bed Reactors*, International Journal of Critical Infrastructures, Vol. 1, No. 4, 2005
2. 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.
3. Zuhair, Suwoto, Supriatna, P., *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.
 4. Suwoto, Supriatna, P., Irianto, I.D., Zuhair, *Optimasi Desain Ketebalan Reflektor Teras RGTT200K Menggunakan Perhitungan Monte Carlo*, diajukan ke Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir, 2012
 5. Brown, F. B., et al., *MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code*, Version 5, LA-UR-03-1987, April 24, 2003
 6. Hendricks, J.S. , Frankle, S.C., Court, J.D., *ENDF/B-VI Data for MCNP*, Los Alamos National Laboratory Report, LA-12891, 1994
 7. Hosking, G., Newton, T.D., *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.
 8. Seker, V., Colak, U., *HTR-10 Full Core First Criticality Analysis with MCNP*, Journal of Nuclear Engineering and Design, 222, 2, pp. 263-270, 2003.