

## INVESTIGASI PARAMETER BAHAN BAKAR *PEBBLE* DALAM PERHITUNGAN TERAS THORIUM RGTT200K

Zuhair<sup>1</sup>, Suwoto<sup>1</sup>, Putranto Ilham Yazid<sup>2</sup>

<sup>1</sup>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  
<sup>2</sup>Pusat Teknologi Nuklir Bahan dan Radiometri – BATAN  
Jl. Tamansari 71 Bandung 40132  
Telp. (022)250-3997, Fax. (022)250-4081, e-mail: ilham@batan.go.id

Diterima: 28-01-2013

Diterima dalam bentuk revisi: 06-02-2013

Disetujui: 17-06-2013

### ABSTRAK

**INVESTIGASI PARAMETER BAHAN BAKAR *PEBBLE* DALAM PERHITUNGAN TERAS THORIUM RGTT200K.** Dalam desain RGTT200K, pemanfaatan thorium sebagai bahan bakar merupakan alternatif yang perlu dipertimbangkan. Pada makalah ini dibahas parameter bahan bakar *pebble* dalam perhitungan teras thorium RGTT200K menggunakan program transport Monte Carlo MCNPX dan pustaka data tampang lintang energi kontinu ENDF/B-VII pada temperatur 1200K. Pengkayaan <sup>233</sup>U sebesar 4%-20% serta pemuatan bahan bakar <sup>232</sup>Th/<sup>233</sup>U sebesar 0,1g - 15g per *pebble* divariasikan untuk menganalisis kelakuan kritikalitas dan *burnup* teras thorium RGTT200K. Hasil perhitungan memperlihatkan pemuatan bahan bakar yang rendah menyebabkan teras RGTT200K mengalami kondisi *overmoderated*. Penambahan pemuatan bahan bakar setelah mencapai kondisi maksimum, menyebabkan kurva  $k_{eff}$  menurun dan teras mengalami *undermoderated*. Teras dengan pemuatan bahan bakar rendah mengakibatkan penurunan konsentrasi <sup>233</sup>U dan kenaikan konsentrasi <sup>233</sup>Pa yang tinggi. Sebaliknya, teras dengan pemuatan bahan bakar tinggi menunjukkan penurunan konsentrasi <sup>233</sup>U dan kenaikan konsentrasi <sup>233</sup>Pa yang rendah. Pemuatan bahan bakar 6 g dengan pengkayaan <sup>233</sup>U 8% layak dipertimbangkan dalam desain teras thorium RGTT200K dengan nilai kritikalitas dan *burnup* bahan bakar yang spesifik.

**Kata kunci :** bahan bakar *pebble*, kritikalitas, *burnup*, thorium, RGTT200K

### ABSTRACT

**INVESTIGATION ON FUEL *PEBBLE* PARAMETER IN THE CALCULATION OF RGTT200K THORIUM CORE.** In RGTT200K design, the utilization of thorium as a promising fuel becomes an alternative that should be considered. This paper discusses fuel *pebble* parameter in the thorium core calculation for RGTT200K. The calculations were performed with Monte Carlo transport code MCNPX and continuous energy cross section data library ENDF/B-VII at the temperature of 1200K. The <sup>233</sup>U enrichment between 4% and 20% also the increased <sup>232</sup>Th/<sup>233</sup>U fuel loading from 0.1 g to 15 g per *pebble* were varied to analyze the trends of criticality and *burnup* behavior of RGTT200K thorium core. The calculation results show that low fuel loading causes RGTT200K core has overmoderated condition. The addition of fuel loading after reaching its maximum condition causes  $k_{eff}$  curve decreases and RGTT200K thorium core has undermoderated condition. The core with low fuel loading indicates high decrease in <sup>233</sup>U and high increase of <sup>233</sup>Pa concentration. Instead of the core with high fuel loading indicates low decrease in <sup>233</sup>U and low increase of <sup>233</sup>Pa concentration. The fuel loading of 6 g with <sup>233</sup>U enrichment of 8% can be considered in design of RGTT200K with a specific criticality and *burnup* values.

**Keywords:** *pebble* fuel, criticality, *burnup*, thorium, RGTT200K

## 1. PENDAHULUAN

Energi nuklir merupakan kandidat terbaik sumber energi potensial untuk memenuhi kebutuhan energi di masa mendatang. Salah satu masalah paling krusial yang dihadapi energi nuklir adalah keselamatan. Kekhawatiran akan terjadinya kecelakaan karena kesalahan manusia atau karena bencana alam tidak bisa dihindari, namun reaktor temperatur tinggi (*high temperature reactor*, HTR) sebagai salah satu jenis reaktor Generasi IV yang didesain memiliki mekanisme keselamatan pasif dalam operasinya, mampu menutupi masalah keselamatan yang dikhawatirkan. Reaktor temperatur tinggi memenuhi kriteria pokok yang dipersyaratkan sebagai reaktor Generasi IV (1), yaitu kesinambungan (*sustainability*), keekonomian (*economics*), keamanan dan keandalan (*safety and reliability*) serta resistansi proliferasi dan proteksi fisik (*proliferation resistance and physical protection*). Reaktor jenis HTR sendiri tidak hanya berfungsi sebagai instalasi penyedia daya listrik, tetapi dapat pula digunakan sebagai penyedia energi termal untuk aplikasi industri proses seperti desalinasi air laut dan produksi hidrogen.

Banyak negara di berbagai belahan dunia terlibat dalam proyek riset dan pengembangan teknologi HTR. Konsorsium riset Amerika dan Rusia sedang mengembangkan desain reaktor helium modular turbin gas (*Gas Turbine - Modular Helium Reactor*, GT-MHR) 600 MW (2) yang ditujukan untuk mengurangi akumulasi plutonium untuk senjata nuklir. Afrika Selatan telah mengembangkan reaktor modular *pebble bed* (*Pebble Bed Modular*

*Reactor*, PBMR) 400 MW (3) sejak pertengahan 1990-an dan sejak awal telah mengadopsi siklus turbin gas. Jepang telah membangun dan mengoperasikan reaktor uji berpendingin gas temperatur tinggi berbahan bakar prismatik (*High Temperature engineering Test Reactor*, HTTR) 30 MW (4) pada tahun 1997 serta merencanakan untuk segera membangun reaktor temperatur tinggi turbin gas (*Gas Turbine High Temperature Reactor*, GTHTTR) 300 MW (5,6) sebagai HTR prismatik komersial masa depan. Cina mulai melakukan riset reaktor temperatur tinggi berbahan bakar bola pada akhir 1970-an dan sebuah reaktor HTR-10 (7) telah dibangun di Institute of Nuclear and New Energy Technology (INET), Universitas Tsinghua. Reaktor ini mencapai kritikalitas pertama pada Desember 2000 dan telah beroperasi pada daya penuh 10 MW (8). Pengalaman desain dan operasi HTR-10 mengilhami Cina mengusulkan proyek reaktor temperatur tinggi modul *pebble bed* (*High Temperature gas-cooled Reactor – Pebble-bed Modular*, HTR-PM) (9,10) yang diperkirakan selesai dibangun pada tahun 2014. Amerika juga sedang mengembangkan teknologi HTR sebagai kelanjutan dan optimisasi dari desain HTR saat ini untuk mendapatkan temperatur *outlet* teras 1000 °C atau lebih dalam proyek *Next Generation Nuclear Plant* (NGNP) (11). Proyek ini memprediksi prototipe skala penuh reaktor temperatur sangat tinggi (*Very High Temperature Reactor*, VHTR) (12) dan akan mulai dibangun tahun 2015.

Reaktor temperatur tinggi menggunakan helium sebagai pendingin

dan grafit sebagai moderator sekaligus material struktur. Temperatur *outlet* teras HTR dapat mencapai 700 °C hingga 950 °C. Fitur keselamatan melekat yang dimiliki HTR didasarkan pada fakta bahwa densitas daya yang dipilih tidak akan menyebabkan temperatur bahan bakar melampaui batas 1600 °C dalam seluruh kondisi kecelakaan yang mungkin terjadi, bahkan ketika hanya memanfaatkan sistem keselamatan pasif untuk menghilangkan panas peluruhan. Batas temperatur 1600 °C telah dibuktikan dalam eksperimen skala besar di Cina (13).

Bahan bakar HTR mengandung ribuan partikel berlapis TRISO (Tri-ISOtropic) yang tertanam dalam matriks grafit. HTR dapat mengakomodasi berbagai bahan bakar secara luas dalam daur bahan bakar tanpa modifikasi desain teras yang signifikan. Dalam desain RGTT200K (Reaktor berpendingin Gas Temperatur Tinggi berdaya termal 200 MW Kogenerasi), pemanfaatan thorium sebagai jenis bahan bakar yang menjanjikan menjadi sebuah alternatif yang perlu dipertimbangkan. Selain sumber daya alam thorium tiga kali lebih banyak daripada uranium, nomor massa  $^{232}\text{Th}$  yang lebih rendah memberikan akumulasi yang jauh lebih kecil dari nuklida bernomor massa tinggi trans-uranium (TRU), yang dikenal paling bertanggung jawab atas sebagian besar radiotoksitas limbah nuklir jangka panjang. Di sisi lain, thorium alam terdiri dari isotop tunggal  $^{232}\text{Th}$  yang tidak fisil, tetapi fertil. Dengan menangkap neutron,  $^{232}\text{Th}$  bertransmutasi menjadi  $^{233}\text{U}$ , yang dikenal sebagai nuklida fisil dengan kelakuan neutronik yang sangat baik di daerah energi termal (14).

Pada makalah ini dibahas parameter bahan bakar *pebble* dalam perhitungan teras thorium RGTT200K dengan program transport Monte Carlo MCNPX dan pustaka data tampang lintang energi kontinu ENDF/B-VII pada temperatur 1200K. Pengkayaan  $^{233}\text{U}$  yang berbeda antara 4% dan 20% serta pemuatan bahan bakar  $^{232}\text{Th}/^{233}\text{U}$  yang ditingkatkan dari 0,1 g hingga 15 g per *pebble* divariasikan untuk mempertimbangkan pemakaian bahan bakar thorium dengan jelajah pengkayaan  $^{233}\text{U}$  dan pemuatan  $^{232}\text{Th}/^{233}\text{U}$  yang cukup luas. Hasil perhitungan digunakan untuk menganalisis kecenderungan kelakuan kritikalitas dan *burnup* teras thorium RGTT200K.

## 2. TATA KERJA

### 2.1 Deskripsi Bahan Bakar *Pebble* dan Teras RGTT200K

RGTT200K adalah reaktor temperatur tinggi dari jenis *pebble bed* berdaya termal 200 MW. *Pebble bed* dalam kavitas teras memiliki diameter 300 cm dan tinggi 943 cm berisi 359.548 bahan bakar *pebble*. Struktur grafit yang mengelilingi teras memiliki ketebalan radial efektif 100 cm serta aksial efektif total bagian atas dan bawah 750 cm. Kavitas yang berada di atas teras mempunyai tinggi 50 cm. Pendingin helium dengan temperatur *inlet* teras sebesar 550 °C dan *outlet* teras 950 °C mengalir dari atas ke bawah melalui celah-celah bahan bakar *pebble* dengan tekanan 52 bar dan aliran massa 120 kg/s. Parameter reaktor dan spesifikasi teras RGTT200K ditampilkan dalam Tabel 1.

Pemuatan bahan bakar RGTT200K

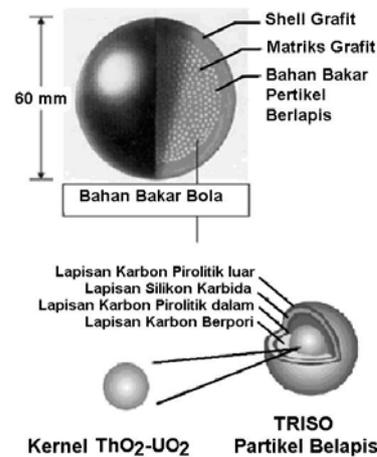
dapat dilakukan dengan skema OTTO (*once through then out*), *multipass* dan *peu á peu*, namun karena geometri teras yang tidak anular, ukuran diameter dan tinggi teras serta daya 200 MW, pola pemuatan dengan skema OTTO atau *multipass* lebih bisa diadopsi. Dalam skema OTTO, bahan bakar *pebble* hanya digunakan sekali lewat untuk kemudian dikeluarkan setelah satu siklus operasi. Dalam skema *multipass*, pemuatan dilakukan secara kontinu dengan memasukkan bahan bakar *pebble* ke dalam teras reaktor dari atas dan setelah kurun waktu operasi reaktor, bahan bakar *pebble* yang telah mencapai batas *burnup* tertentu dikeluarkan dari bawah teras. Bahan bakar *pebble* yang masih di bawah batas *burnup* dikembalikan lagi ke dalam teras reaktor untuk dapat dipakai kembali secara efisien dan optimal. Sirkulasi bahan bakar *pebble* secara berulang dapat dilakukan hingga 9 kali.

Dalam skema OTTO, tidak

dibutuhkan mekanisme pemuatan yang kompleks seperti peralatan untuk pengukuran *burnup* bahan bakar, resirkulasi bahan bakar dan ekstraksi peralatan yang membatalkan bahan bakar digunakan kembali. Setiap bahan bakar *pebble* memiliki diameter 6 cm dan mengandung ribuan partikel berlapis TRISO yang terdispersi dalam matriks grafit. Bahan bakar *pebble* dikelilingi oleh *shell* grafit berketebalan 0,5 cm. Setiap partikel TRISO terdiri dari bahan bakar kernel  $\text{ThO}_2/\text{UO}_2$  berdiameter 0,050 cm yang dikelilingi oleh lapisan penyangga karbon (*carbon buffer*, C), karbon pirolitik dalam (*inner pyrolytic carbon*, IPyC), silikon karbida (SiC) dan karbon pirolitik luar (*outer pyrolytic carbon*, OPyC). Masing-masing lapisan *coating* memiliki ketebalan tertentu. Skema geometrik bahan bakar *pebble* dan partikel TRISO diilustrasikan dalam Gambar 1 dan spesifikasinya ditampilkan dalam Tabel 2.

Tabel 1. Parameter reaktor dan spesifikasi teras reaktor RGTT200K

Parameter reaktor:	
Daya termal (MW)	200
Volume teras (m <sup>3</sup> )	66,657
Temperatur <i>inlet</i> teras (°C)	550
Temperatur <i>outlet</i> teras (°C)	950
Tekanan He (MPa)	5,2
Aliran massa pendingin (kg/s)	120
Densitas pendingin He pada 273,16K; 10 <sup>5</sup> Pa (g/cm <sup>3</sup> )	1,78×10 <sup>-4</sup>
Spesifikasi teras:	
Tinggi teras (m)	9,43
Radius teras (m)	1,5
Jumlah <i>pebble</i> per m <sup>3</sup>	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



Gambar 1. Skema geometrik bahan bakar RGTT200K (15).

Tabel 2. Spesifikasi bahan bakar  $\text{ThO}_2/\text{UO}_2$  RGTT200K

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 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1,75
Impuritas boron alam dalam <i>shell</i> grafit (ppm)	1,0
Partikel berlapis TRISO:	
Kernel bahan bakar	
Radius bahan bakar kernel ( $\mu\text{m}$ )	250
Densitas bahan bakar kernel ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	10,4
Pengkayaan $^{233}\text{U}$ (%)	4-20
Impuritas boron alam dalam kernel (ppm)	1,0
Lapisan <i>coating</i>	
Material lapisan <i>coating</i>	C/IPyC/SiC/OPyC
Ketebalan lapisan <i>coating</i> ( $\mu\text{m}$ )	95/40/35/40
Densitas lapisan <i>coating</i> ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1,05/1,90/3,18/1,90

## 2.2 Model Perhitungan

Tidak seperti kebanyakan tipe reaktor pada umumnya, RGTT200K yang berjenis *pebble bed* lebih sulit dimodelkan dan memerlukan teknik khusus untuk menyelesaikannya. Program transport Monte Carlo MCNPX mampu menjawab tantangan ini dengan tepat karena dapat memodelkan bahan bakar dan teras reaktor *pebble bed* secara eksak dengan geometri kompleks tanpa aproksimasi. Program MCNPX dikenal sebagai program yang *powerful* untuk perhitungan transport partikel

baik neutron, foton maupun elektron. Perhitungan transport neutron dalam reaktor sangat dibutuhkan fisikawan reaktor untuk mendesain teras reaktor.

Dalam MCNPX, program deplesi CINDER90 diintegrasikan untuk melengkapi kemampuan perhitungan *burnup* bahan bakar. Hubungan siklus MCNPX dan CINDER90 diawali dengan perhitungan kritikalitas dan fluks neutron rerata 63 kelompok energi untuk setiap material oleh MCNPX. Fluks ini bersama dengan tampang lintang dan densitas atom yang terkait

dikirimkan ke CINDER90. Program CINDER90 menggunakan fluks neutron dan tampang lintang satu kelompok energi untuk menghasilkan perhitungan aktivasi, deplesi dan peluruhan dalam waktu *burnup* yang dispesifikasikan. Selanjutnya CINDER90 memperbarui inventori isotop, menghitung *burnup* bahan bakar dan mengembalikan berbagai kuantitas lainnya ke MCNPX untuk menghitung kembali kritikalitas dan fluks neutron di langkah waktu berikutnya.

Pemodelan teras RGTT200K terdiri dari dua langkah. Langkah pertama adalah memodelkan bahan bakar *pebble* dan langkah berikutnya adalah memodelkan teras reaktor.

### 2.2.1. Pemodelan *pebble*

Sebelum memodelkan bahan bakar *pebble*, pemuatan bahan bakar *pebble* ( $m_{HM}$ ) dihitung terlebih dahulu menggunakan persamaan [1] dengan  $\alpha_{HM}$ ,  $\rho$ ,  $N_{TRISO}$  dan  $R_{kernel}$  masing-masing adalah fraksi massa bahan bakar, densitas bahan bakar  $ThO_2/UO_2$ , jumlah partikel TRISO dalam setiap bahan bakar *pebble* dan radius bahan bakar kernel.

$$m_{HM} = \frac{4\pi}{3} \times \alpha_{HM} \times \rho \times N_{TRISO} \times R_{kernel}^3 \quad [1]$$

Fraksi massa bahan bakar ( $\alpha_{HM}$ ) dihitung menggunakan persamaan [2] dengan  $A_O$  dan  $A_{Th/U}$  masing-masing adalah berat atom oksigen dan berat atom Th/U.

$$\alpha_{HM} = \left[ 1 + \frac{2 \times A_O}{2 \times A_O + A_{Th/U}} \right]^{-1} \quad [2]$$

Berat atom Th/U dihitung

menggunakan persamaan [3] dengan  $e_{U233}$ ,  $A_{U233}$  dan  $A_{Th232}$  adalah pengkayaan  $^{233}U$ , berat atom  $^{233}U$  dan berat atom  $^{232}Th$ .

$$A_{Th/U} = \left[ \frac{e_{U233}}{A_{U233}} + \frac{1 - e_{U233}}{A_{Th232}} \right]^{-1} \quad [3]$$

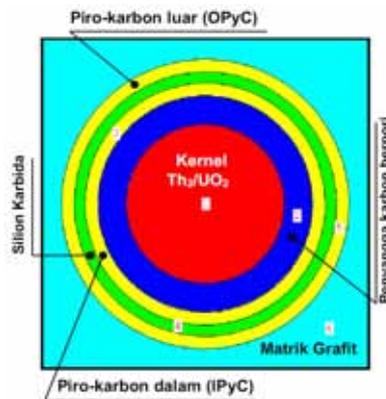
Dengan menggunakan jumlah partikel TRISO sebanyak 15000, secara rata-rata bahan bakar *pebble* berdiameter 6 cm mengandung 9 g  $^{232}Th/^{233}U$  untuk berbagai pengkayaan  $^{233}U$ . Dari massa bahan bakar dapat ditentukan jumlah partikel TRISO yang terkandung dalam setiap bahan bakar *pebble*. Dalam makalah ini, pemuatan bahan bakar dapat ditingkatkan dengan cara meningkatkan radius bahan bakar kernel atau meningkatkan jumlah partikel TRISO. Karena radius bahan bakar kernel dibuat tetap pada nilai baku 0,0250 cm, maka pemuatan bahan bakar *pebble* divariasikan dari 0,1 g hingga 15 g dengan meningkatkan jumlah partikel TRISO.

Partikel TRISO kemudian dimodelkan dengan kisi kubik sederhana (*simple cubic*, SC). Dalam MCNPX, model sel satuan partikel TRISO dibuat dengan menggenerasi permukaan-permukaan bola konsentris seperti diperlihatkan dalam Gambar 2. Bahan bakar *pebble* kemudian dimodelkan dengan membuat *array* pada sel satuan partikel TRISO dengan opsi LATTICE (Gambar 3). Jarak antara partikel dipilih sedemikian rupa sehingga terdapat sejumlah partikel TRISO dalam bahan bakar *pebble* untuk radius kernel 250  $\mu m$ . Dari hubungan volumetrik antara *pebble* dan kernel serta jumlah partikel TRISO, ukuran *pitch* kisi SC ( $\rho_{SC}$ ) partikel TRISO dapat

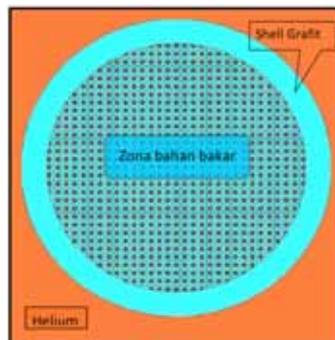
diperoleh dari persamaan [4] dimana  $R_{ZONA}$  adalah radius zona bahan bakar *pebble*. Tabel 3 menyajikan *pitch* kisi SC yang digunakan dalam perhitungan sebagai fungsi jumlah partikel TRISO per *pebble*.

$$P_{SC} = R_{ZONA} \times \sqrt[3]{\frac{4\pi}{3N_{TRISO}}} \quad [4]$$

Konsentrasi nuklida kernel  $\text{ThO}_2/\text{UO}_2$  untuk berbagai pengkayaan  $^{233}\text{U}$  disajikan dalam Tabel 4, sedangkan konsentrasi nuklida lapisan *coating* partikel TRISO, matriks grafit dan *shell* grafit ditampilkan dalam Tabel 5.



Gambar 2. Model MCNPX untuk sel satuan partikel TRISO.



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

Tabel 3. *Pitch* kisi SC untuk berbagai jumlah partikel TRISO per *pebble*

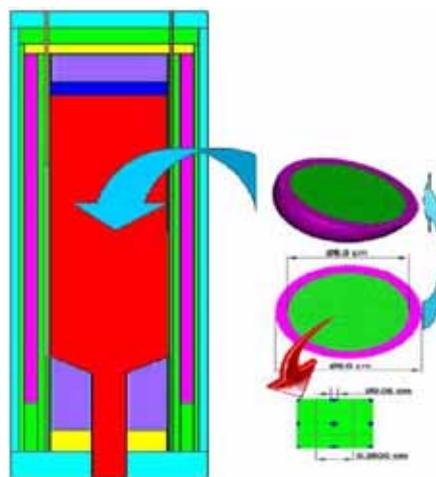
$m_{HM}$ (g)	$N_{TRISO}$	<i>pitch</i> kisi SC (cm)	$m_{HM}$ (g)	$N_{TRISO}$	<i>pitch</i> kisi SC (cm)
0,1	165	0,734852	8,0	13172	0,170665
0,5	823	0,430092	9,0	14818	0,164096
1,0	1646	0,341364	10,0	16465	0,158431
2,0	3293	0,270913	11,0	18111	0,153478
3,0	4939	0,236673	12,0	19758	0,149089
4,0	6586	0,215024	13,0	21404	0,145165
5,0	8232	0,199615	14,0	23051	0,141622
6,0	9879	0,187841	15,0	24697	0,138403
7,0	11525	0,178435			

Tabel 4. Konsentrasi nuklida kernel ThO<sub>2</sub>/UO<sub>2</sub> (atom/barn-cm<sup>3</sup>)

Nuklida	Pengkayaan <sup>233</sup> U				
	4%	8%	12%	16%	20%
<sup>233</sup> U	9,44729×10 <sup>-4</sup>	1,88950×10 <sup>-3</sup>	2,834315×10 <sup>-3</sup>	3,77916×10 <sup>-3</sup>	4,72404×10 <sup>-3</sup>
<sup>232</sup> Th	2,27724×10 <sup>-2</sup>	2,18240×10 <sup>-2</sup>	2,08756×10 <sup>-2</sup>	1,99271×10 <sup>-2</sup>	1,89786×10 <sup>-2</sup>
<sup>16</sup> O	4,74342×10 <sup>-2</sup>	4,74270×10 <sup>-2</sup>	4,74198×10 <sup>-2</sup>	4,74125×10 <sup>-2</sup>	4,74053×10 <sup>-2</sup>
<sup>10</sup> B	1,14694×10 <sup>-7</sup>	1,14694×10 <sup>-7</sup>	1,14694×10 <sup>-7</sup>	1,14694×10 <sup>-7</sup>	1,14694×10 <sup>-7</sup>
<sup>11</sup> B	4,64570×10 <sup>-7</sup>	4,64570×10 <sup>-7</sup>	4,64570×10 <sup>-7</sup>	4,64570×10 <sup>-7</sup>	4,64570×10 <sup>-7</sup>

Tabel 5. Konsentrasi nuklida lapisan *coating* partikel TRISO, matriks grafit dan *shell* grafit (atom/barn-cm<sup>3</sup>)

Nuklida	Lapisan <i>coating</i> TRISO			Matriks grafit/ <i>Shell</i> grafit
	Penyangga karbon	IPyC/OPyC	SiC	
<sup>12</sup> C	5,26449×10 <sup>-2</sup>	9,52621×10 <sup>-2</sup>	4,77240×10 <sup>-2</sup>	8,77414×10 <sup>-2</sup>
<sup>28</sup> Si	-	-	4,77240×10 <sup>-2</sup>	-
<sup>10</sup> B	-	-	-	9,64977×10 <sup>-9</sup>
<sup>11</sup> B	-	-	-	3,90864×10 <sup>-8</sup>



Gambar 4. Model MCNPX untuk reaktor RGTT200K.

### 2.2.2. Pemodelan teras

Dalam teras RGTT200K, bahan bakar *pebble* dimuatkan secara acak dan keacakannya dimodelkan dengan kisi *body centered-cubic* (BCC). Kisi BCC terdiri dari dua *pebble*, yaitu satu *pebble* utuh terletak di pusat kisi dan delapan *pebble* tidak utuh (masing-masing 1/8 *pebble*) terletak di delapan sudut kisi. Jarak *pitch* kisi BCC dihitung dari hubungan fraksi *packing* dan radius *pebble*. Teras *pebble bed* kemudian

dimodelkan dengan menyusun konfigurasi bahan bakar *pebble* dengan struktur berulang memanfaatkan opsi LATTICE. Nilai fraksi *packing* 61% dalam model kisi BCC dipilih agar sesuai dengan nilai tipikal yang biasa digunakan untuk teras reaktor *pebble bed*.

Gambar 4 mengilustrasikan model MCNPX teras penuh RGTT200K. Konus di bagian bawah teras dimuati oleh moderator *pebble* dan dimodelkan dengan kisi dan

fraksi *packing* yang sama dengan bahan bakar *pebble* yang menempati teras reaktor. Dengan demikian, teras aktif pada dasarnya memiliki bentuk silinder karena konus di bagian bawah teras hanya berisi moderator *pebble*. Komposisi dan densitas atom setiap *region* dalam RGTT200K disajikan dalam Tabel 6 dan 7.

Dalam perhitungan ini, efek absorpsi dari impuritas ditentukan dalam bentuk kandungan boron natural (ppm) yang ekuivalen dengan massa.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam perhitungan MCNPX, opsi KCODE dimanfaatkan dengan mensimulasikan 5.000 neutron per siklus untuk 100 siklus generasi guna memonitor perubahan populasi neutron dalam teras. *Skipping* 10 siklus generasi dikerjakan untuk menstabilkan reaksi berantai dalam simulasi

RGTT200K. Opsi KSRC dimanfaatkan untuk mendefinisikan sumber neutron fisi awal yang dilokasikan di pusat bahan bakar kernel guna mengawali perhitungan multiplikasi neutron dari satu generasi kejadian fisi ke generasi berikutnya.

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* yang signifikan pada neutron dengan energi di bawah ~4 eV. Opsi BURN dalam MCNPX diterapkan untuk melakukan perhitungan deplesi guna mengestimasi *burnup* bahan bakar sebagai fungsi daya dan waktu operasi reaktor.

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

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

Tabel 7. Komposisi dan densitas atom material struktur reaktor RGTT200K

No. <i>Region</i>	Material struktur	Densitas atom (atom/barn-cm)		
		C	<sup>10</sup> B	<sup>11</sup> B
1	Reflektor 1	$7,72000 \times 10^{-2}$	$3,39617 \times 10^{-8}$	$1,37562 \times 10^{-7}$
3	Void + grafit	$2,00000 \times 10^{-3}$	$8,79837 \times 10^{-10}$	$3,56378 \times 10^{-9}$
4	Reflektor 2	$9,03000 \times 10^{-2}$	$3,97246 \times 10^{-8}$	$1,60905 \times 10^{-7}$
5	Lapisan karbon di sekeliling sistem	$8,53000 \times 10^{-3}$	$3,75250 \times 10^{-8}$	$1,51995 \times 10^{-7}$
6	Reflektor + kanal pendingin	$7,02000 \times 10^{-2}$	$3,08823 \times 10^{-8}$	$1,25089 \times 10^{-7}$
7	Reflektor + batang kendali	$3,51000 \times 10^{-2}$	$1,54411 \times 10^{-8}$	$6,25444 \times 10^{-8}$
8	Reflektor 3	$3,51000 \times 10^{-2}$	$1,54411 \times 10^{-8}$	$6,25444 \times 10^{-8}$
9	Bolla <i>dummy</i> disederhanakan sebagai grafit	$5,38275 \times 10^{-2}$	$5,72218 \times 10^{-8}$	$2,317772 \times 10^{-2}$
10	Bolla <i>dummy</i> dimodelkan sebagai <i>carbon bricks</i>	$7,97184 \times 10^{-2}$	0	0
11	Moderator <i>pebble</i>	$9,22571 \times 10^{-2}$	$2,28337 \times 10^{-9}$	$9,24878 \times 10^{-9}$

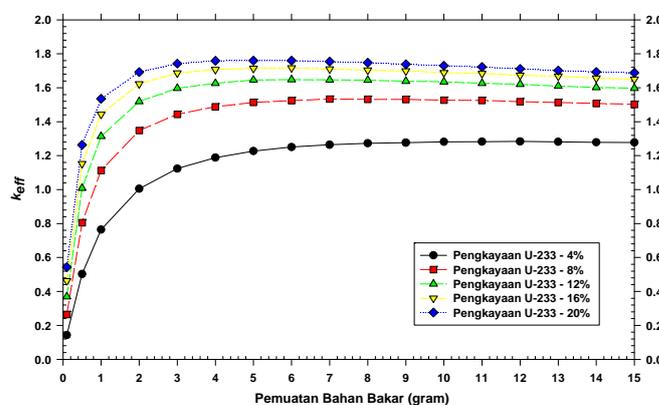
Iterasi distribusi neutron fisi dieksekusi MCNPX dengan waktu komputasi rerata 40 jam dalam *workstation quadcore* 16 MB untuk setiap kasus kritikalitas dan *burnup* bahan bakar teras thorium RGTT200K dengan langkah *burnup* 10.000 MWd/t dari 0 hingga 100.000 MWd/t

Gambar 5 mengilustrasikan hasil perhitungan faktor multiplikasi efektif ( $k_{eff}$ ) teras thorium RGTT200K sebagai fungsi pemuatan bahan bakar pada berbagai pengkayaan  $^{233}\text{U}$ . Perhitungan kritikalitas teras thorium RGTT200K dilakukan untuk pemuatan bahan bakar yang divariasikan dari 0,1 g hingga 15 g. Variasi terdiri atas 17 langkah yang dikerjakan dengan mengubah jumlah partikel TRISO antara 165 dan 24.697 per bahan bakar *pebble*. Radius kernel dibuat tetap 0,0250 cm. Dalam perhitungan ini digunakan 5 pengkayaan  $^{233}\text{U}$  yang bervariasi dari 4% hingga 20%.

Dari Gambar 5 dapat diamati bahwa, kurva faktor multiplikasi efektif ( $k_{eff}$ ) teras thorium RGTT200K yang diawali dari pemuatan bahan bakar 0,1 g cenderung meningkat secara signifikan hingga

mencapai nilai maksimum. Nilai  $k_{eff}$  maksimum 1,28353; 1,53319; 1,64767; 1,71743 dan 1,76026 masing-masing dicapai oleh teras dengan pengkayaan  $^{233}\text{U}$  4%, 8%, 12%, 16% dan 20%.

Nilai  $k_{eff}$  maksimum terjadi pada pemuatan bahan bakar yang lebih tinggi untuk pengkayaan  $^{233}\text{U}$  yang lebih rendah. Pada pemuatan bahan bakar yang rendah teras RGTT200K mengalami kondisi *overmoderated* sebagai akibat dari rasio grafit dan material fisil yang kecil untuk pengkayaan  $^{233}\text{U}$  yang tinggi. Penambahan pemuatan bahan bakar setelah mencapai kondisi maksimum, menyebabkan kurva  $k_{eff}$  menurun secara perlahan dan teras thorium RGTT200K mengalami kondisi *undermoderated*. Dapat diamati pula, transisi dari kondisi *overmoderated* ke *undermoderated* tidak sama untuk setiap teras dengan pengkayaan  $^{233}\text{U}$  yang berbeda. Perubahan faktor multiplikasi efektif, konsentrasi  $^{233}\text{U}$  dan konsentrasi  $^{233}\text{Pa}$  merupakan indikator yang relevan dalam pemanfaatan bahan bakar thorium.



Gambar 5. Faktor multiplikasi efektif ( $k_{eff}$ ) teras thorium RGTT200K sebagai fungsi pemuatan bahan bakar pada berbagai pengkayaan  $^{233}\text{U}$ .

Gambar 6 mengilustrasikan hasil perhitungan  $k_{eff}$  teras thorium RGTT200K sebagai fungsi *burnup* pada pemuatan bahan bakar yang berbeda, yaitu 2 g, 6 g dan 15 g. *Burnup* bahan bakar dalam teras reaktor merupakan aspek penting dalam menentukan desain reaktor *pebble bed*. Sebuah determinasi yang akurat dari *burnup* bahan bakar di dalam reaktor membutuhkan konfigurasi teras reaktor menyeluruh karena akan menentukan fluks dan spektrum neutron selama deplesi.

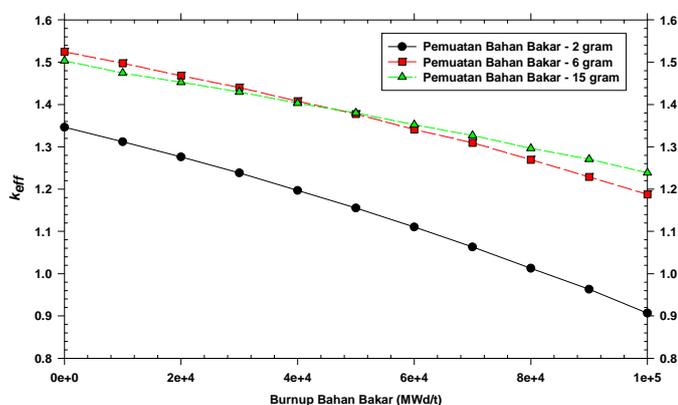
Dalam perhitungan *burnup*, dipilih pengkayaan  $^{233}\text{U}$  8% dan daya spesifik 200 MW untuk 10 langkah *burnup*. Setiap langkah *burnup* berkorespondensi dengan periode 36 hari yang menghasilkan *burnup* total 100.000 MWd/t. Gambar 7 dan 8 mengilustrasikan konsentrasi  $^{233}\text{U}$  dan  $^{233}\text{Pa}$  sebagai fungsi *burnup* bahan bakar

Dari Gambar 6 dapat diamati bahwa, pemuatan bahan bakar 6 g memperlihatkan nilai  $k_{eff}$  yang paling tinggi di awal siklus, namun penurunan reaktivitasnya cenderung lebih besar dibandingkan pemuatan bahan bakar 15 g. Penurunan reaktivitas tertinggi diperlihatkan oleh pemuatan bahan bakar 2 g karena konsentrasi bahan bakarnya yang

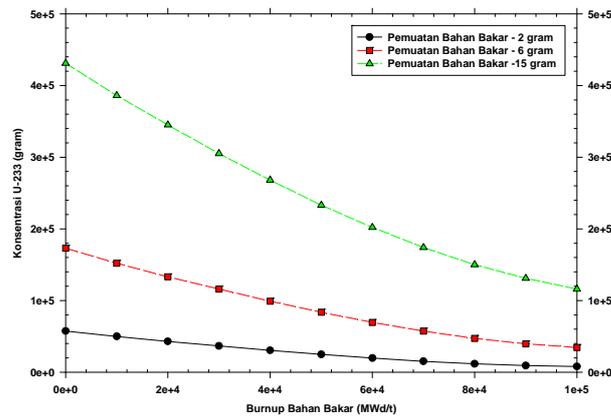
rendah.

Untuk seluruh teras, pengkayaan  $^{233}\text{U}$  8% menyisakan nilai  $k_{eff}$  yang rendah ( $< 1$ ) pada *burnup* 100.000 MWd/t untuk pemuatan bahan bakar yang rendah (2 g) dan nilai  $k_{eff}$  yang tinggi ( $> 1$ ) untuk pemuatan bahan bakar yang tinggi (6g dan 15 g).

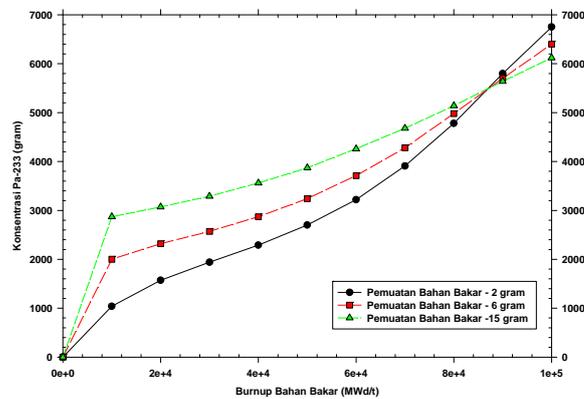
Dari Gambar 7 dapat diamati bahwa, teras dengan pemuatan bahan bakar yang rendah memperlihatkan penurunan konsentrasi  $^{233}\text{U}$  yang tinggi sedangkan teras dengan pemuatan bahan bakar yang tinggi memperlihatkan penurunan konsentrasi  $^{233}\text{U}$  yang rendah. Pada pemuatan bahan bakar 2 g, konsentrasi  $^{233}\text{U}$  pada *burnup* maksimum adalah 8,006E+03 kg sedangkan di awal siklus 5,752E+04 kg yang berkorespondensi pada penurunan 86,1 %. Pada pemuatan bahan bakar 6 g dan 15 g terjadi penurunan konsentrasi  $^{233}\text{U}$  masing-masing sebesar 80,1 % dan 73,2 %. Ini berarti lebih banyak tangkapan neutron yang terjadi di dalam teras thorium dengan pemuatan bahan bakar yang tinggi sehingga penurunan konsentrasi  $^{233}\text{U}$  di *burnup* final menjadi lebih rendah.



Gambar 6. Faktor multiplikasi efektif ( $k_{eff}$ ) teras thorium RGTT200K sebagai fungsi *burnup* pada pemuatan bahan bakar yang berbeda.



Gambar 7. Konsentrasi  $^{233}\text{U}$  sebagai fungsi *burnup* bahan bakar pada pemuatan bahan bakar yang berbeda.



Gambar 8. Konsentrasi  $^{233}\text{Pa}$  sebagai fungsi *burnup* pada pemuatan bahan bakar yang berbeda.

Dari Gambar 8 dapat diamati, bahwa konsentrasi  $^{233}\text{Pa}$  pada pemuatan bahan bakar 2 g melebihi konsentrasi  $^{233}\text{Pa}$  untuk pemuatan bahan bakar 6 g dan 15 g setelah *burnup* 88.000 MWd/t. Isotop  $^{233}\text{Pa}$  terbentuk dari  $^{232}\text{Th}$  dengan menyerap neutron dan meluruh memancarkan  $\beta$ .  $^{233}\text{Pa}$  memainkan peranan penting dalam produksi panas peluruhan untuk kasus kecelakaan kehilangan tekanan pendingin karena  $^{233}\text{Pa}$  meluruh dengan memancarkan  $\beta$  membentuk  $^{233}\text{U}$  yang konsentrasinya dapat meningkat sekitar 2 bulan setelah reaktor dipadamkan (*shutdown*). Peningkatan konsentrasi  $^{233}\text{U}$  karena peluruhan  $^{233}\text{Pa}$

menyebabkan nilai  $k_{eff}$  teras bertambah sehingga kemungkinan reaktor *start up* secara spontan menjadi lebih besar yang dapat mengakibatkan reaktor kritis setelah *shutdown*.

#### 4. KESIMPULAN

Investigasi parameter bahan bakar *pebble* dalam perhitungan teras thorium RGTT200K dengan pengkayaan  $^{233}\text{U}$  yang berbeda antara 4% dan 20% serta pemuatan bahan bakar  $^{232}\text{Th}/^{233}\text{U}$  yang ditingkatkan dari 0,1 g hingga 15 g per *pebble* telah dilakukan dengan program transport Monte Carlo MCNPX dan pustaka

data nuklir energi kontinu ENDF/B-VII pada temperatur 1200K. Hasil perhitungan memperlihatkan pemuatan bahan bakar yang rendah menyebabkan teras RGTT200K mengalami kondisi *overmoderated* sebagai akibat dari rasio grafit dan material fisil yang kecil untuk pengkayaan  $^{233}\text{U}$  yang tinggi. Penambahan pemuatan bahan bakar setelah mencapai kondisi maksimum, menyebabkan kurva  $k_{eff}$  menurun secara perlahan dan teras thorium RGTT200K mengalami kondisi *undermoderated*.

Hasil perhitungan juga memperlihatkan teras dengan pemuatan bahan bakar yang rendah menunjukkan penurunan konsentrasi  $^{233}\text{U}$  yang tinggi sedangkan teras dengan pemuatan bahan bakar yang tinggi menunjukkan penurunan konsentrasi  $^{233}\text{U}$  yang rendah. Sebaliknya, teras dengan pemuatan bahan bakar yang rendah menunjukkan kenaikan konsentrasi  $^{233}\text{Pa}$  yang tinggi sedangkan teras dengan pemuatan bahan bakar yang tinggi menunjukkan kenaikan konsentrasi  $^{233}\text{Pa}$  yang rendah.

Dari hasil-hasil ini disimpulkan bahwa, pemuatan bahan bakar 6 g dengan pengkayaan  $^{233}\text{U}$  8 % dapat dipilih untuk dipertimbangkan dalam desain teras RGTT200K lebih detail dengan nilai kritikalitas dan *burnup* bahan bakar yang spesifik.

## 5. UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih kami sampaikan kepada Dr. Ir. M. Dhandhang Purwadi yang memberikan inspirasi dan motivasi untuk melakukan riset ini. Ucapan terima kasih

juga kami sampaikan kepada Prof. Surian Pinem, M.Si. atas waktu dan sumbangan pemikirannya dalam perbaikan makalah ini. Dukungan moral yang amat berarti dari rekan-rekan Bidang Pengembangan Reaktor, sangat kami hargai.

## 6. DAFTAR PUSTAKA

1. Bennett RG. An overview of generation IV strategy and outlook. Proceedings of GIF Symposium; 2009 Sept 9-10; Paris, France; 2009.
2. Kodochigov N, Glushkov E, Fomichinko P. Neutronic features of the GT-MHR reactor. J Nucl Eng and Design 2003;222:161-71.
3. Koster A, Matzner HD, Nichols DR. PBMR design for the future. J Nucl Eng and Design 2003;222:231-45.
4. Shiozawa S, Fujikawa S, Iyoku T, Kunitomi K, Tachibana Y. Overview of HTTR design features. J Nucl Eng and Design 2004;233:11-21.
5. Yan X, Kunitomi K, Nakata T, Shiozawa S. GTHTR300 design and development. J Nucl Eng and Design 2003;222:247-62.
6. Kunitomi K, Katanishi S, Takada S, Takizuka T, Yan X. Japan's future HTR – the GTHTR300. J Nucl Eng and Design 2004;233:309-27.
7. Wu Z, Lin D, Zhong D. The design features of the HTR-10. J Nucl Eng and Design 2002;218:25-32.
8. Hu S, Wang R, Gao Z. Safety demonstration tests on HTR-10 reactors. Proceedings of The 2-nd International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology; 2004 Sept 22-24; Beijing, China; 2004.

- 
9. Zhang Z, Wu Z, Xu Y, Sun Y, Li F. Design of Chinese modular high-temperature Gas-Cooled Reactor HTR-PM. Proceedings of The 2-nd International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology. Beijing, China: 22-24 September, 2004.
  10. Zhang Z, Wu Z, Xu Y, Sun Y, Li F. Design aspects of the Chinese modular high temperature gas-cooled reactor HTR-PM. *J Nucl Eng and Design* 2006;236: 485–90.
  11. Generation IV International Forum. FY 2006 ten-year program plan appendix 1.0 next generation nuclear plan. July 2006.
  12. Carré F, Yvon P, Lee WJ, Dong Y, Tachibana Y, Petti D. VHTR – ongoing international projects. Proceedings of GIF Symposium 2009 Sept 9-10; Paris, France; 2009.
  13. Zhang Z, Sun Y. Economic potential of modular reactor nuclear power plants based on the Chinese HTR-PM project. *J of Nucl Eng and Design* 2007; 237:2265–74.
  14. International Atomic Energy Agency. Thorium based fuel options for the generation of electricity. IAEA-TECDOC-1155. IAEA; 2000.
  15. Rodríguez Sánchez DA. Safety analysis of a thorium-fuelled high temperature gas-cooled reactor. Master Thesis. Delft University of Technology; 2012.