

## STUDI PERFORMA TERAS INISIAL HTR *PEBBLE BED* DENGAN BAHAN BAKAR PLUTONIUM OKSIDA

Zuhair, Suwoto, Hery Adrial

Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir - BATAN

### ABSTRAK

**STUDI PERFORMA TERAS INISIAL HTR *PEBBLE BED* DENGAN BAHAN BAKAR PLUTONIUM OKSIDA.** Konsep desain reaktor nuklir Generasi IV yang paling menjanjikan adalah reaktor temperatur tinggi (*high temperature reactor*, HTR) jenis *pebble bed* karena karakteristik keselamatan melekat dan temperatur pendinginnya yang tinggi. Desain reaktor *pebble bed* memiliki puluhan bahkan ratusan ribu bahan bakar *pebble* dengan moderator grafit dan pendingin helium. Dalam studi ini, teras reaktor memiliki volume  $8\frac{1}{3}$ - $33\frac{1}{3}$  m<sup>3</sup> dan densitas daya 3 MW/m<sup>3</sup> yang menghasilkan daya termal 25-100 MW. Beberapa tahap yang dikerjakan dimulai dari pemodelan bahan bakar dan teras reaktor, optimasi teras inisial HTR *pebble bed* sebagai fungsi rasio tinggi per diameter (H/D) hingga optimasi teras inisial HTR *pebble bed* sebagai fungsi pemuatan logam berat (*heavy metal*). Seluruh perhitungan dikerjakan dengan memanfaatkan program transport Monte Carlo MCNPX dan pustaka data nuklir energi kontinu ENDF/B-VII. Hasil analisis menyimpulkan bahwa, rasio H/D yang rendah dan massa Pu/*pebble* yang tinggi merupakan opsi yang paling ideal dalam teras HTR *pebble bed* dari sudut pandang ekonomi neutron.

**Kata kunci:** TRISO, kernel, plutonium oksida, teras inisial, HTR *pebble bed*

### ABSTRACT

**STUDY ON THE PERFORMANCE OF *PEBBLE BED* HTR INITIAL CORE WITH PLUTONIUM OXIDE FUEL.** The most promising design concept of Generation IV nuclear reactor is high temperature reactor (HTR) with *pebble bed* type because of its inherent safety characteristics and high coolant temperature. *Pebble bed* reactor design has tens or even hundreds thousands of fuel pebbles with a graphite moderator and coolant helium. In this study, the reactor core has  $8\frac{1}{3}$ - $33\frac{1}{3}$  m<sup>3</sup> volume and power density of 3 MW/ m<sup>3</sup> which generate 25-100 MW thermal power. Some stages were carried out, starting from the modeling of fuel and reactor core, optimization of *pebble bed* HTR initial core as a function of height per diameter ratio (H/D) until optimization of *pebble bed* HTR initial core as a function of heavy metal loading. The whole calculation was done by utilizing the Monte Carlo transport code MCNPX and continuous energy nuclear data library ENDF/B-VII. Results of the analysis conclude that low H/D ratio and high Pu mass/*pebble* is the most ideal option in HTR *pebble bed* core from the viewpoint of neutron economy.

**Keywords:** TRISO, kernel, plutonium oxide, initial core, *pebble bed* HTR

## PENDAHULUAN

Menipisnya energi fosil dan efek negatif dari konsumsi bahan bakar fosil yang terakselerasi pada lingkungan dalam dekade terakhir ini sangat mengkhawatirkan. Di pihak lain kebutuhan energi dunia meningkat secara tajam seiring dengan meningkatnya standard hidup penduduk dunia<sup>[1]</sup>. Pasokan energi yang dibutuhkan tidak hanya dapat diandalkan dan efektif dari segi biaya, tetapi juga aman dan bersih. Untuk meminimalkan ketergantungan dunia pada bahan bakar fosil, energi nuklir yang terbukti ramah lingkungan diekspektasi akan memainkan peranan penting untuk pemenuhan kebutuhan energi dunia masa depan.

Proyek pengembangan sistem energi nuklir Generasi IV dibentuk tahun 2000 oleh sembilan negara untuk meningkatkan peranan sistem energi nuklir di masa mendatang<sup>[2]</sup>. Reaktor Generasi IV dengan karakteristik memiliki daya saing ekonomi, keselamatan yang tinggi, limbah radioaktif yang minimal dan resistansi proliferasi diharapkan mulai beroperasi tahun 2030. Diantara konsep desain reaktor nuklir Generasi IV, reaktor temperatur tinggi (*high temperature reactor*, HTR) adalah konsep reaktor yang paling menjanjikan karena karakteristik keselamatan melekat dan temperatur pendinginnya yang tinggi. Karakteristik ini menyebabkan HTR memiliki kelebihan dalam efisiensi tinggi dan posibilitas untuk aplikasi panas proses seperti produksi hidrogen, desalinasi air laut, *enhanced oil recovery*, dan lain-lain.

Sepanjang sejarahnya, HTR memiliki dua konfigurasi reaktor yang khas, yaitu tipe

*pebble bed* dan tipe blok prisma. Reaktor HTR-10<sup>[3]</sup> yang saat ini sedang beroperasi di China dan reaktor modular *pebble bed* PBMR<sup>[4]</sup> 400 MW yang dalam pengembangan di Afrika Selatan merupakan contoh HTR dengan geometri teras *pebble bed*. Reaktor uji temperatur tinggi HTTR<sup>[5]</sup> 30 MW Jepang yang telah dioperasikan secara sukses sejak kritikalitas pertama dicapai pada 10 November 1998 dan reaktor temperatur tinggi modular turbin gas GT-MHR<sup>[6]</sup> yang sedang dalam taraf desain di USA dan Rusia merupakan contoh HTR dengan desain teras prisma. Meskipun memiliki bentuk elemen bakar yang berbeda, basis teknis untuk kedua konfigurasi adalah sama, seperti partikel bahan bakar berlapis TRISO dalam matriks grafit, struktur teras grafit penuh, pendingin helium, dan densitas daya rendah untuk mencapai temperatur outlet tinggi dan retensi produk fisi di dalam partikel berlapis dalam kondisi operasi normal dan kondisi kecelakaan.

HTR memiliki fleksibilitas dan posibilitas daur bahan bakar alternatif seperti uranium-plutonium, hanya plutonium, MOX, uranium-thorium dan lain-lain yang diakomodasi tanpa modifikasi yang signifikan pada desain teras reaktor. Dalam studi ini, performa teras inisial HTR *pebble bed* dengan bahan bakar plutonium oksida ( $\text{PuO}_2$ ) dipelajari sebagai langkah awal dalam desain reaktor. Beberapa tahap yang di-kerjakan dimulai dari pemodelan bahan bakar dan teras reaktor, optimasi teras inisial HTR *pebble bed* sebagai fungsi rasio tinggi per diameter (H/D) hingga optimasi teras inisial HTR *pebble bed* sebagai fungsi

pemuatan logam berat (*heavy metal*). Seluruh perhitungan dikerjakan dengan memanfaatkan program transport Monte Carlo MCNPX [7] dan pustaka data nuklir energi kontinu ENDF/B-VII [8]. Hasil analisis diharapkan dapat mendefinisikan parameter teras kritis inisial HTR *pebble bed* dengan bahan bakar plutonium oksida yang paling optimal.

## DEKSRIPSI TERAS HTR *PEBBLE BED*

### Dimensi teras HTR *pebble bed*

Kritikalitas awal merupakan parameter kunci dalam desain HTR *pebble bed*. Eksaminasi dari seberapa besar ukuran teras kritis yang paling optimal dengan bahan bakar berpengkayaan tertentu sangat esensial sebelum dilakukan perhitungan fisika teras lainnya seperti reaktivitas batang kendali, reaktivitas temperatur, koefisien Doppler, parameter kinetik, fraksi bakar dan panjang siklus operasi reaktor.

Studi ini mengasumsikan teras reaktor memiliki volume  $8\frac{1}{3}$ - $33\frac{1}{3}$  m<sup>3</sup> dan densitas daya 3 W/cm<sup>3</sup> yang menghasilkan daya termal 25-100 MW. Dimensi teras HTR *pebble bed* untuk berbagai daya reaktor sebagai fungsi rasio H/D diperlihatkan dalam Tabel 1. Struktur grafit yang mengelilingi teras memiliki ketebalan radial 100 cm serta aksial total bagian atas dan bagian bawah 200 cm. Kavitas yang berada di atas teras mempunyai tinggi 50 cm serupa dengan yang dimiliki HTR-10 China.

Tabel 1. Dimensi teras HTR *pebble bed* untuk berbagai rasio H/D.

H/D	Daya 25 MW		Daya 50 MW	
	Diameter (m)	Tinggi (m)	Diameter (m)	Tinggi (m)
1	2,1971	2,1971	2,76818	2,7681
1,5	1,91935	2,8790	2,41823	3,6273
2	1,74385	3,4876	2,19711	4,3942
2,5	1,61884	4,0471	2,03961	5,0990
3	1,52339	4,5701	1,91935	5,7580
H/D	Daya 75 MW		Daya 100 MW	
	Diameter (m)	Tinggi (m)	Diameter (m)	Tinggi (m)
1	3,16878	3,1687	3,48769	3,4876
1,5	2,76818	4,1522	3,04678	4,5701
2	2,51506	5,0301	2,76818	5,5363
2,5	2,33478	5,8369	2,56975	6,4243
3	2,19711	6,5913	2,41823	7,2546

### Bahan bakar HTR *pebble Bed*

Bahan bakar *pebble* dimuatkan ke dalam teras reaktor dari atas dan dikeluarkan dari bawah teras reaktor. Teras reaktor diokupasi oleh bahan bakar *pebble* dengan fraksi *packing* 0,61. Bahan bakar *pebble* yang melewati teras dapat disirkulasi-ulang beberapa kali dalam skema pemuatan *multi-pass* atau hanya satu kali dalam skema pemuatan *once-through-then-out* (OTTO). Reaktor HTR-10 dioperasikan dengan skema *multi-pass* dan PBMR didesain menggunakan skema yang sama. Dalam skema *multi-pass*, bahan bakar yang telah melewati teras akan diukur level *burnup*-nya. Jika belum mencapai target *burnup* tertentu, bahan bakar dapat dimuatkan kembali ke da-

lam teras untuk siklus operasi berikutnya. Tetapi jika telah mencapai target *burnup* yang ditentukan, bahan bakar yang bersangkutan akan dikeluarkan dari teras untuk dikirim ke tangki penyimpanan bahan bakar bekas guna pemrosesan lebih lanjut.

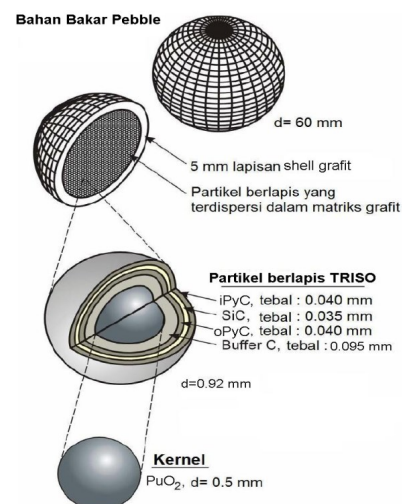
Berbeda dengan skema *multi-pass*, dalam skema OTTO tidak ada bahan bakar yang dimanfaatkan kembali ke dalam teras. Bahan bakar yang telah melewati teras akan dikeluarkan untuk dikirim ke tangki penyimpanan bahan bakar bekas tanpa diukur level *burnup*-nya. Karena mekanisme pemuatan yang lebih sederhana, operasi HTR *pebble bed* dengan siklus OTTO tidak membutuhkan peralatan untuk pengukuran *burnup* bahan bakar, sirkulasi- ulang bahan bakar dan peralatan ekstraksi untuk membatalkan bahan bakar yang akan digunakan kembali.

Bahan bakar *pebble* dengan diameter 6 cm dikomposisi oleh zona bahan bakar berjari-jari 2,5 cm dan *shell* grafit dengan tebal 0,5 cm. Zona bahan bakar terdiri atas matriks grafit yang mengandung ribuan partikel berlapis TRISO. Partikel TRISO dibuat dari kernel plutonium oksida ( $\text{PuO}_2$ ) dengan diameter 0,050 cm dan dikelilingi oleh lapisan *buffer* grafit berpori, lapisan karbon pirolitik bagian dalam (*inner pyrolytic carbon*, iPyC), lapisan silikon karbida (SiC) dan lapisan karbon pirolitik bagian luar (*outer pyrolytic carbon*, oPyC). Keempat lapisan ini secara efektif mengungkung produk fisi radioaktif yang dihasilkan oleh reaksi fisi berantai dalam partikel TRISO untuk temperatur hingga 1.600 °C. Diameter keseluruhan partikel TRISO adalah 0,092 cm.

Skema geometrik dan spesifikasi bahan bakar HTR *pebble bed* diperlihatkan dalam Gambar 1 dan Tabel 2.

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

Bahan bakar <i>pebble</i>	
Diameter <i>pebble</i> (cm)	6
Diameter zona bahan bakar (cm)	5
Tebal <i>shell</i> grafit (cm)	0,5
Densitas <i>shell</i> grafit ( $\text{g/cm}^3$ )	1,75
Densitas matriks grafit ( $\text{g/cm}^3$ )	1,75
Impunitas boron alam dalam <i>shell</i> grafit (ppm)	0,5
Impunitas boron alam dalam matriks grafit (ppm)	0,5
Partikel berlapis TRISO	
Kernel bahan bakar	
Diameter kernel ( $\mu\text{m}$ )	500
Densitas kernel ( $\text{g/cm}^3$ )	10,4
Impunitas 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> ( $\text{g/cm}^3$ )	1,05/1,9/ 3,18/1,9



Gambar 1. Skema geometrik bahan bakar HTR *pebble bed*

## MODEL PERHITUNGAN

HTR *pebble bed* memiliki teras dengan konfigurasi bahan bakar yang sangat berbeda dari reaktor konvensional. Bahan bakar *pebble* tersusun secara acak di dalam teras reaktor. Keacakan ini membuat kesulitan tersendiri, terutama untuk mendefinisikan lokasi *pebble* individual sehingga untuk beberapa jenis perhitungan, reaktor *pebble bed* sering dimodelkan sebagai sebuah campuran material *pebble* dan pendingin yang dihomogenisasi dengan densitas yang seragam di seluruh teras. Efek fluktuasi densitas dalam *pebble bed* di dekat dinding, *streaming* neutron melalui rongga di antara *pebble* dan variasi faktor Dancoff di dekat pinggir *pebble bed* tidak dipertimbangkan dalam model semacam ini. Konsekuensinya kesalahan sistematis akan dihasilkan jika heterogenitas ganda di reaktor *pebble bed* tidak ditangani secara seksama. Untuk mendeskripsikan susunan bahan bakar *pebble* dalam konfigurasi teras diperlukan asumsi tertentu yang membagi keacakan dalam reaktor *pebble bed* ke dalam dua tahap: keacakan partikel berlapis TRISO dalam bahan bakar *pebble* yang disebut heterogenitas pertama dan keacakan distribusi bahan bakar *pebble* dalam teras reaktor yang disebut heterogenitas kedua. MCNPX mempertimbangkan kedua tahap ini dalam model reaktor *pebble bed*.

### Model partikel TRISO dalam bahan bakar *pebble*

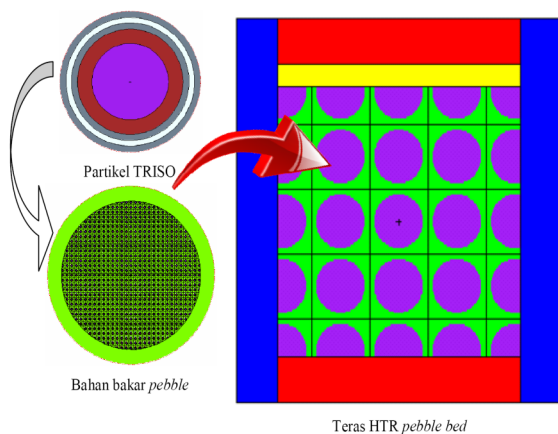
Model partikel TRISO dalam bahan bakar *pebble* diawali dengan merepresentasikan setiap partikel TRISO dalam zona bahan bakar

dengan sel satuan partikel TRISO. Partikel TRISO dengan seluruh lapisannya dimodelkan secara detil dalam kisi kubik sederhana (*simple cubic*, SC) dengan dimensi dan densitas eksak. Kernel memiliki radius 0,012 cm sedangkan *coating* yang melapisi kernel memiliki tebal 0,0095; 0,0040; 0,0035 dan 0,0040 cm untuk *buffer*, iPyC, SiC dan oPyC. Setiap partikel bahan bakar ditempatkan di pusat kisi kubik dengan pitch kisi sebesar 0,163430 cm.

Model bahan bakar *pebble* dimodelkan selanjutnya dengan mendistribusikan 15.000 partikel TRISO ke dalam zona bahan bakar berdiameter 5 cm. Distribusi partikel TRISO yang dimodelkan tersusun secara uniform dalam zona bahan bakar dengan opsi LATTICE dan UNIVERSE secara tidak langsung mengabaikan keacakan nyata lokasi partikel TRISO. Memposisikan partikel TRISO satu demi satu dalam zona bahan bakar merupakan problema tersendiri. Pemanfaatan fitur struktur berulang akan memunculkan partikel berlapis yang terpotong di permukaan zona bahan bakar *pebble*, yang disebut partikel TRISO parsial. Beberapa metode yang mengantisipasi situasi ini sebenarnya dapat digunakan, yaitu dengan memindahkan partikel TRISO yang berlokasi di dekat permukaan *pebble*. Tetapi karena tidak akan memperbaiki hasil perhitungan secara signifikan, seringkali fitur struktur berulang dipakai tanpa koreksi. Zona bahan bakar lalu dilapisi *shell* grafit setebal 0,5 cm untuk melengkapi pemodelan partikel TRISO dalam *pebble*.

### Model bahan bakar *pebble* dalam teras

Model bahan bakar *pebble* dalam teras diawali dengan merepresentasikan setiap *pebble* yang terdistribusi dalam teras reaktor dengan sel satuan *pebble* dalam kisi *body-centered cubic* (BCC). dan *face-centered cubic* (FCC). Konfigurasi BCC terdiri dari satu *pebble* di pusat kisi dan delapan *pebble* di delapan sudut kisi. Jadi sel satuan dikomposisi oleh dua *pebble*  $[1 + 8 \times (1/8)]$ . Opsi LATTICE dan UNIVERSE untuk fitur struktur berulang digunakan kembali untuk memodelkan bahan bakar *pebble* dalam teras reaktor. Dengan pitch kisi BCC sebesar 7,185259 cm, teras reaktor diisi oleh ribuan bahan bakar *pebble* yang tersusun secara teratur dengan fraksi packing 0,61. Pemodelan HTR *pebble bed* yang dijelaskan secara panjang lebar dapat ditemui dalam studi sebelumnya [9-11]. Gambar 2 mengilustrasikan pemodelan partikel TRISO, bahan bakar *pebble* dan teras HTR *pebble bed* dengan MCNPX.



Gambar 2. Model partikel TRISO, bahan bakar *pebble* dan teras HTR *pebble bed*

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam studi ini, massa plutonium (Pu) per *pebble* divariasikan dari 0,5 hingga 5,0

gram yang diperoleh dengan mengubah konsentrasi  $\text{PuO}_2$ . Konsentrasi  $\text{PuO}_2$ , seperti diperlihatkan dalam Tabel 3, dihitung dengan formula yang mengkaitkan berat atom plutonium (Pu), berat atom plutonium oksida ( $\text{PuO}_2$ ), densitas kernel  $\text{PuO}_2$  dan vektor isotopik plutonium  $\text{Pu}^{238}$ ,  $\text{Pu}^{239}$ ,  $\text{Pu}^{240}$ ,  $\text{Pu}^{241}$  dan  $\text{Pu}^{242}$  sebesar 2,59; 53,85; 23,66; 13,13 dan 6,77%. Konsentrasi 10B dan 11B masing-masing sebesar  $1,49103\text{E-}7$  dan  $6,03941\text{E-}7$  diperoleh untuk seluruh massa plutonium (Pu) per *pebble* yang dipertimbangkan.

Tabel 3. Konsentrasi  $\text{PuO}_2$  untuk berbagai massa plutonium per *pebble* (atom/barn-cm)

Massa Pu/ <i>pebble</i> (g)	Konsentrasi $\text{Pu}^{238}$	Konsentrasi $\text{Pu}^{239}$	Konsentrasi $\text{Pu}^{240}$
0,5	3,01616E-4	6,24476E-3	2,73230E-3
1,0	6,03233E-4	1,24895E-2	5,46460E-3
1,5	9,04849E-4	1,87343E-2	8,19690E-3
2,0	1,20647E-3	2,49790E-2	1,09292E-2
2,5	1,50808E-3	3,12238E-2	1,36615E-2
3,0	1,80970E-3	3,74685E-2	1,63938E-2
3,5	2,11131E-3	4,37133E-2	1,91261E-2
4,0	2,41293E-3	4,99581E-2	2,18584E-2
4,5	2,71455E-3	5,62028E-2	2,45907E-2
5,0	3,01616E-3	6,24476E-2	2,73230E-2
Massa Pu/ <i>pebble</i> (g)	Konsentrasi $\text{Pu}^{238}$	Konsentrasi $\text{Pu}^{239}$	Konsentrasi $\text{Pu}^{240}$
0,5	1,50997E-3	7,75337E-3	2,31280E-2
1,0	3,01994E-3	1,55067E-2	4,62559E-2
1,5	4,52990E-3	2,32601E-2	6,93839E-2
2,0	6,03987E-3	3,10135E-2	9,25118E-2
2,5	7,54984E-3	3,87668E-2	1,15640E-1
3,0	9,05981E-3	4,65202E-2	1,38768E-1
3,5	1,05698E-2	5,42736E-2	1,61896E-1
4,0	1,20797E-2	6,20269E-2	1,85024E-1
4,5	1,35897E-2	6,97803E-2	2,08152E-1
5,0	1,50997E-2	7,75337E-2	2,31280E-1

Konsentrasi *coating* yang melapisi kernel dihitung dengan formula yang lebih sederhana. Tabel 4 memperlihatkan konsentrasi *coating* partikel TRISO dalam bahan bakar *pebble*. Konsentrasi matriks grafit identik dengan *shell* grafit dan disajikan dalam Tabel 5 sedangkan konsentrasi reflektor aksial dan radial diperli-

hatkan dalam Tabel 6. Konsentrasi void dan pendingin helium dapat dilihat dalam Tabel 7.

Tabel 4. Konsentrasi *coating* partikel berlapis TRISO (atom/barn-cm)

<i>Buffer</i>		<i>iPyC/oPyC</i>	
$^{12}\text{C}$	$5,51513 \times 10^{-2}$	$^{12}\text{C}$	$9,52614 \times 10^{-2}$
<i>SiC</i>			
$^{28}\text{Si}$	$4,40481 \times 10^{-2}$	$^{30}\text{Si}$	$1,48053 \times 10^{-3}$
$^{29}\text{Si}$	$2,23035 \times 10^{-3}$	$^{12}\text{C}$	$4,77240 \times 10^{-2}$

Tabel 5. Konsentrasi matriks grafit dan *shell* grafit (atom/barn-cm)

Matriks grafit		<i>Shell</i> grafit	
$^{12}\text{C}$	$8,67417 \times 10^{-2}$	$^{12}\text{C}$	$8,67417 \times 10^{-2}$
$^{10}\text{B}$	$2,24401 \times 10^{-8}$	$^{10}\text{B}$	$2,24401 \times 10^{-8}$
$^{11}\text{B}$	$9,03242 \times 10^{-8}$	$^{11}\text{B}$	$9,03242 \times 10^{-8}$

Tabel 6. Konsentrasi reflektor aksial dan reflektor radial (atom/barn-cm)

Reflektor aksial		Reflektor radial	
$^{12}\text{C}$	$7,72000 \times 10^{-2}$	$^{12}\text{C}$	$9,03000 \times 10^{-2}$
$^{10}\text{B}$	$3,39617 \times 10^{-8}$	$^{10}\text{B}$	$3,97246 \times 10^{-8}$
$^{11}\text{B}$	$1,37562 \times 10^{-7}$	$^{11}\text{B}$	$1,60905 \times 10^{-7}$

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

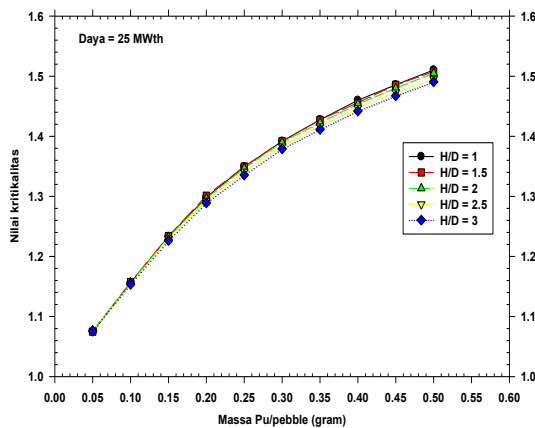
Void		Helium	
$^4\text{He}$	$1,00000 \times 10^{-11}$	$^3\text{He}$	$3,71220 \times 10^{-11}$
		$^4\text{He}$	$2,65156 \times 10^{-5}$

Seluruh perhitungan MCNPX memanfaatkan jumlah total 110 siklus dalam opsi KCODE termasuk 10 siklus yang diskip untuk 5000 histori neutron per siklus. Distribusi spasial awal dari sumber neutron dalam opsi KSRC ditempatkan di dalam bahan bakar kernel. Pustaka data nuklir energi kontinu ENDF/B-VII digunakan untuk seluruh nuklida pada temperatur 1200 K. Pustaka hamburan termal  $S(\alpha, \beta)$ , yaitu graph.65t, juga diaplikasikan untuk mempertimbangkan interaksi neutron termal dengan

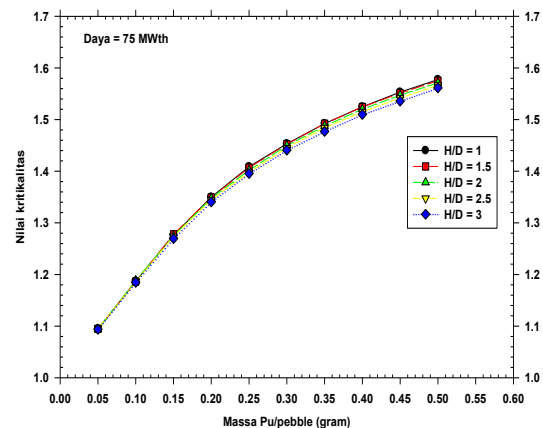
grafit yang terkandung dalam material reaktor di bawah energi  $\sim 4$  eV. Kondisi vakum dikerjakan pada batas luar sistem reaktor HTR *pebble bed*. Seluruh komputasi dieksekusi pada Workstation di bawah Windows Server 2003 Quadcore 32 bits, 16 MB Ram.

Hasil perhitungan teras HTR *pebble bed* sebagai fungsi massa Pu/*pebble* untuk berbagai rasio H/D dan daya reaktor diperlihatkan dalam Gambar 3-6. Kurva-kurva ini mengekspresikan massa Pu/*pebble* yang meningkat menyebabkan nilai kritikalitas teras HTR *pebble bed* makin tinggi untuk seluruh rasio H/D dan daya reaktor yang diinginkan. Massa Pu/*pebble* yang besar akan menghasilkan jumlah isotop fisil, khususnya  $\text{Pu}^{239}$ , yang besar. Jumlah isotop  $\text{Pu}^{239}$  yang besar menyebabkan jumlah reaksi fisi yang terjadi antara neutron dengan isotop  $\text{Pu}^{239}$  yang besar pula dan ini akan mengakibatkan nilai kritikalitas teras makin tinggi.

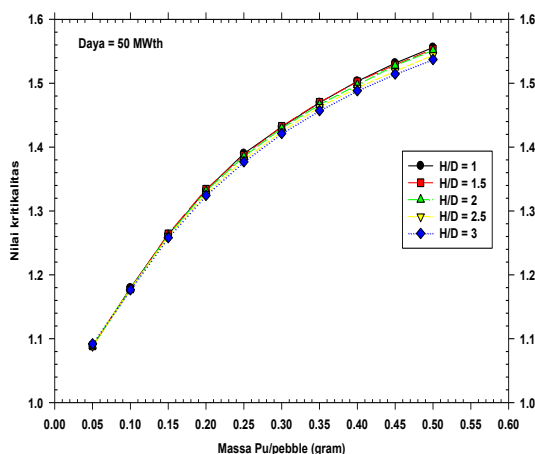
Namun hal sebaliknya dapat diamati disini, meningkatnya rasio H/D menyebabkan nilai kritikalitas teras HTR *pebble bed* makin rendah untuk seluruh massa Pu/*pebble* dan daya reaktor yang dikehendaki. Banyaknya neutron yang mengalami kebocoran dalam HTR *pebble bed* dengan rasio H/D yang tinggi diasumsikan sebagai penyebab nilai kritikalitas teras menjadi rendah. Teras HTR *pebble bed* dengan rasio H/D yang besar memiliki ekonomi neutron yang kurang baik.



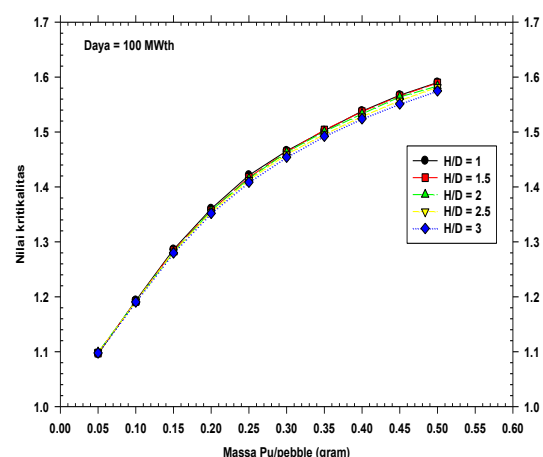
Gambar 3. Nilai kritikalitas sebagai fungsi massa Pu/pebble pada daya 25 MW untuk berbagai rasio H/D



Gambar 5. Nilai kritikalitas sebagai fungsi massa Pu/pebble pada daya 75 MW untuk berbagai rasio H/D



Gambar 4. Nilai kritikalitas sebagai fungsi massa Pu/pebble pada daya 50 MW untuk berbagai rasio H/D



Gambar 6. Nilai kritikalitas sebagai fungsi massa Pu/pebble pada daya 100 MW untuk berbagai rasio H/D

## KESIMPULAN

Studi performa teras inisial HTR *pebble bed* dengan bahan bakar plutonium oksida telah dilakukan dengan program transport Monte Carlo MCNPX dan pustaka data nuklir energi kontinu ENDF/B-VII. Hasil perhitungan memperlihatkan meningkatnya massa Pu/pebble menyebabkan nilai kritikalitas teras HTR *pebble*

*bed* makin tinggi untuk seluruh rasio H/D dan daya reaktor yang dipertimbangkan. Sebaliknya hasil perhitungan memperlihatkan meningkatnya rasio H/D menyebabkan nilai kritikalitas teras HTR *pebble bed* makin rendah untuk seluruh massa Pu/pebble dan daya reaktor yang dipertimbangkan. Dapat disimpulkan bahwa, rasio H/D yang rendah dan



massa Pu/*pebble* yang tinggi merupakan opsi yang paling ideal dalam teras HTR *pebble bed* dari sudut pandang ekonomi neutron.

### UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih kami sampaikan kepada Dr. Geni Rina Sunaryo, M.Sc. dan Dr. Jupiter S. Pane, M.Sc. yang memberikan motivasi dan dukungan dalam penulisan makalah ini.

### DAFTAR PUSTAKA

- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, "Energy Technology Perspectives: Scenarios & Strategies to 2050", Technical report, OECD/IEA, France, 2008.
- GENERATION IV INTERNATIONAL FORUM (GIF), "Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems", OECD Nuclear Energy Agency, January, 2014.
- HYEDONG JEONG, SOON HEUNG CHANG, "Monte Carlo Calculation for Modeling HTR-10 Core", Transaction of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, Gyeongju, Korea, May 29-30, 2008.
- ADEM ACIR, HASAN COŞKUN, "Neutronic Analysis of the PBMR-400 Full Core using Thorium Fuel Mixed with Plutonium and Minor Actinide", Annals of Nuclear Energy, 48 (45-50), 2012.
- TETSUO NISHIHARA et al., "Experience and Future Plan of Test Operation using HTTR", 18th International Conference on Nuclear Engineering, Xi'an, China, May 17-21, 2010.
- JONG B. LIM et al., "Computational Assessment of the GT-MHR Graphite Core Support Structural Integrity in Air Ingress Accident Condition", 7th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, Operation and Safety, October 2008.
- J.S. HENDRICKS, G.W. McKinney, et al., "MCNPX 2.6.0 Extensions, LA-UR-08-2216", Los Alamos National Laboratory, 11 April 2008.
- M.B. CHADWICK, et al., "ENDF/B-VII.1 Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data", Nuclear Data Sheets, 112 (2887-2996) 12, December 2011.
- ZUHAIR, SUWOTO, PIPING SUPRIATNA, "Studi Model Heksagonal MCNP5 dalam Perhitungan Benchmark Fisika Teras HTR-10", Jurnal Matematika & Sains, 17(61-70) 2, 2012.
- ZUHAIR, SUWOTO, PUTRANTO ILHAM YAZID, "Investigasi Parameter Bahan Bakar Pebble dalam Perhitungan Teras Thorium RGTT200K", Jurnal Sains dan Teknologi Nuklir Indonesia, 14(65-78) 2, 2013.
- ZUHAIR, SUWOTO, "Analisis Efek Kecelakaan Water Ingress terhadap Reaktivitas Doppler Teras RGTT200K", Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir TRI DASA MEGA, 17(31-40) 1, 2015.