

STUDI EFEK FRAKSI PACKING TRISO DALAM DESAIN KRITIKALITAS RGTT200K

Zuhair, Suwoto, dan Piping Supriatna

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir (PTRKN) - BATAN

Kawasan PUSPIPTEK Gd. No. 80 Serpong, Tangerang Selatan 15310

e-mail: zuhairbasjmeleh@yahoo.com

ABSTRAK

STUDI EFEK FRAKSI PACKING TRISO DALAM DESAIN KRITIKALITAS RGTT200K.

HTR adalah reaktor temperatur tinggi yang dapat digunakan dalam berbagai cara untuk aplikasi panas proses seperti produksi hidrogen, desalinasi air laut, pengambilan minyak sisa (*enhanced oil recovery*) dan lain-lain selain listrik. Bahan bakar HTR terdiri dari partikel TRISO yang mengisi volume bola dan silinder yang berkorespondensi pada zona bahan bakar pebble untuk teras pebble bed dan bahan bakar pin untuk teras prismatic. Fraksi packing TRISO dalam bahan bakar pebble atau bahan bakar pin merupakan salah satu parameter kunci yang esensial dan harus dipertimbangkan dalam desain HTR. Makalah ini mendiskusikan efek fraksi packing TRISO dalam desain kritikalitas RGTT200K. Kisi FCC diadopsi dalam perhitungan karena memiliki jelajah fraksi packing yang cukup luas sehingga secara teknis dapat mempertimbangkan kemungkinan digunakannya partikel TRISO dengan jumlah yang besar dalam bahan bakar pebble. Seluruh komponen reaktor RGTT200K, dimulai dari partikel TRISO, bahan bakar pebble, teras reaktor hingga struktur grafit dimodelkan secara detail dan eksplisit dengan memanfaatkan program transport Monte Carlo MCNPX dan pustaka data tampang lintang energi kontinu ENDF/B-VII. Hasil perhitungan memperlihatkan bahwa pada fraksi packing TRISO 5-10%, pemuatan bahan bakar UO_2 dan ThO_2/UO_2 menyebabkan kritikalitas RGTT200K mencapai nilai maksimum. Sebaliknya pemuatan PuO_2 menghasilkan kritikalitas RGTT200K mencapai nilai minimum. Dari analisis dapat disimpulkan bahwa pemilihan fraksi packing TRISO harus dipertimbangkan secara seksama untuk mendapatkan desain kritikalitas reaktor temperatur tinggi dengan tipe bahan bakar yang spesifik.

Kata-kunci: fraksi packing, TRISO, kritikalitas, MCNPX, ENDF/B-VII

ABSTRACT

STUDY ON THE EFFECT OF TRISO PACKING FRACTION IN THE CRITICALITY DESIGN OF RGTT200K.

HTR is a high temperature reactor that can be used in a variety of ways for process heat applications such as hydrogen production, desalination of seawater, enhanced oil recovery, etc. besides electricity. HTR fuel consists of TRISO particles filling volume of a sphere and a cylinder which correspond to the zone of the fuel pebble for pebble bed core and fuel pins for prismatic core. TRISO packing fraction in the fuel pebble or fuel pin is one of the key parameters that are essential and should be considered in the design of the HTR. This paper discusses the effect of TRISO packing fraction in the criticality design of RGTT200K. FCC lattice was adopted in the calculations because it has a packing fraction range that is wide enough so that it is technically able to consider the possibility of the use of TRISO particles with a large amount in the fuel pebble. All components of the RGTT200K reactor, starting from TRISO particles, the fuel pebble, the reactor core until the graphite structure are modeled in detail and explicit by utilizing the MCNPX Monte Carlo transport code and continuous energy cross sections data library ENDF/B-VII. The calculation results show that at TRISO packing fraction of 5-10%, UO_2 and ThO_2/UO_2 fuel loadings cause the criticality of RGTT200K to reach a maximum value. Conversely, PuO_2 loading produce criticality of RGTT200K to reach a minimum value. From the analysis it can be concluded that the selection of TRISO packing fraction should be considered carefully to obtain the design criticality of high temperature reactor with specific typed fuel.

Keywords: packing fraction, TRISO, criticality, MCNPX, ENDF/B-VII

1. PENDAHULUAN

HTR (*High Temperature Reactor*) adalah reaktor temperatur tinggi yang dapat digunakan dalam berbagai cara untuk aplikasi panas proses seperti produksi hidrogen, desalinasi air laut, pengambilan minyak sisa (*enhanced oil recovery*) dan lain-lain selain listrik^[1]. HTR memiliki 2 desain utama, yaitu desain teras *pebble bed* dan desain teras prisma. Dalam desain *pebble bed*, bahan bakar HTR berbentuk bola dengan diameter 6 cm sedangkan dalam desain prisma, bahan bakar HTR berbentuk *pin* silindris dengan radius 0,6225 cm dan tinggi 8 m.

HTR merupakan salah satu kandidat sistem energi nuklir Generasi IV^[2] dan diprediksi menjadi pemasok utama energi nuklir masa depan. Beberapa negara di Asia telah memulai proyek HTR secara praktis. Jepang merencanakan proyek skala komersial GTHTR300^[3] sebagai kelanjutan dari sukses reaktor temperatur tinggi prisma 30 MW HTTR^[4] yang mencapai kritikalitas di tahun 1998. Cina memulai operasi reaktor temperatur tinggi *pebble bed* HTR-10^[5] dengan *output* termal 10 MW di tahun 2000. Sukses desain, konstruksi dan operasi HTR-10 mengilhami Cina memulai proyek HTR-PM 200 MWe^[6] yang ditujukan untuk studi dan penguasaan teknologi kunci serta eksperimen keteknikan HTR modul. Reaktor demonstrasi HTR-PM skala komersial diestimasi selesai dibangun sekitar tahun 2013.

Bahan bakar HTR terdiri dari partikel TRISO yang mengisi volume bola dan silinder yang berkorespondensi pada zona bahan bakar *pebble* untuk teras *pebble bed* dan bahan bakar *pin* untuk teras prisma. Jumlah inventori bahan bakar karena itu proporsional pada fraksi *packing* partikel TRISO yang didefinisikan sebagai rasio volume partikel TRISO total dengan volume kisi kubik atau heksagonal dimana partikel TRISO terkandung di dalamnya. Fraksi *packing* TRISO dalam bahan bakar *pebble* atau bahan bakar *pin* merupakan salah satu parameter kunci yang esensial dan harus dipertimbangkan dalam desain HTR. Pemilihan jumlah partikel TRISO atau pemuatan bahan bakar kernel dalam gram yang digambarkan oleh fraksi *packing* menjadi penting untuk mendapatkan faktor multiplikasi reaktor (k_{eff}) yang spesifik.

Makalah ini mendiskusikan efek fraksi *packing* TRISO dalam desain kritikalitas RGTT200K^[7]. Studi sensitivitas fraksi *packing* telah dilakukan sebelumnya untuk desain HTR *pebble bed* berbahan-bakar UO₂^[8], namun keterbatasan fraksi *packing* TRISO yang bisa dicapai oleh kisi *simple cubic* (SC) dan kelakuan kritikalitas yang berada di balik fraksi *packing* kurang dari 0,05 belum diinvestigasi. Dalam studi kali ini, dari empat tipe kisi regular^[9] untuk distribusi partikel TRISO dalam 3-D, kisi *face centered cubic* (FCC) dipilih dalam perhitungan karena memiliki jelajah fraksi *packing* yang cukup luas sehingga secara teknis dapat mempertimbangkan kemungkinan digunakannya partikel TRISO dengan jumlah yang besar dalam bahan bakar *pebble*. Partikel TRISO dengan kernel UO₂, PuO₂ dan ThO₂/UO₂ yang diakomodasi dalam studi ini dipersembahkan untuk interkomparasi desain kritikalitas RGTT200K dengan bahan bakar yang berbeda.

Seluruh komponen reaktor RGTT200K, dimulai dari partikel TRISO, bahan bakar *pebble*, teras reaktor hingga struktur grafit dimodelkan secara detail dan eksplisit dengan memanfaatkan program transport Monte Carlo MCNPX^[10]. Program MCNPX dipilih karena telah banyak

diaplikasikan dalam analisis fenomena nuklir di berbagai fasilitas nuklir seperti reaktor^[11-13] dan akselerator^[14-17]. Dalam dasawarsa terakhir, MCNPX telah menjadi sebuah program yang paling populer dan *powerful* dalam desain reaktor inovatif dan sistem transmudasi limbah nuklir. Kelakuan bahan bakar uranium, plutonium dan thorium diinvestigasi dengan pustaka data tampang lintang neutron energi kontinu ENDF/B-VII^[18] pada temperatur 300K dan 1200K untuk melengkapi analisis efek fraksi *packing* TRISO dalam desain kritikalitas RGTT200K. Hasil analisis diharapkan juga dapat melengkapi studi-studi yang dilakukan sebelumnya^[19-22].

2. DESKRIPSI TRISO DAN TERAS RGTT200K

Teras RGTT200K 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 m³ dan densitas daya 3 W/cm³, RGTT200K 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.

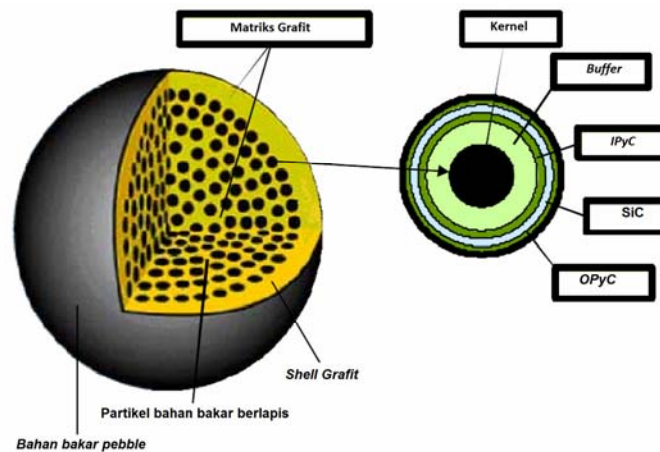
Pemuatan bahan bakar RGTT200K dilakukan secara kontinu dengan mengadopsi moda *discharging*. Manajemen bahan bakar RGTT200K dimulai dengan memasukkan bahan bakar *pebble* ke dalam teras reaktor dari atas, dan mengeluarkan bahan bakar bekas yang telah digunakan dalam kurun waktu operasi reaktor dari bawah. Bahan bakar *pebble* yang belum mencapai *burn-up* final akan disirkulasikan ke dalam teras untuk dapat dimanfaatkan kembali secara efisien dan optimal. Parameter reaktor dan spesifikasi teras RGTT200K diberikan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Parameter reaktor dan spesifikasi teras RGTT200K^[7].

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

Setiap bahan bakar *pebble* memiliki diameter 6 cm dan mengandung ~1.000 hingga 100.000 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.



Gambar 1. Skema geometrik bahan bakar RGTT200K^[23].

Tabel 2. Spesifikasi bahan bakar *pebble* dan partikel berlapis TRISO^[24].

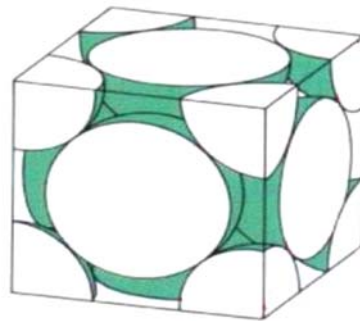
Bahan bakar <i>pebble</i>:	
Diameter <i>pebble</i> (cm)	6,0
Diameter zona berbahan bakar (cm)	5,0
Ketebalan <i>shell</i> grafit (cm)	0,5
Densitas <i>shell</i> grafit (g/cm ³)	1,75
Impuritas boron alam dalam <i>shell</i> grafit (ppm)	0,5
Fraksi <i>packing pebble</i> dalam teras (%)	61
Partikel berlapis TRISO:	
Kernel bahan bakar	
Radius bahan bakar kernel (cm)	0,025
Densitas bahan bakar kernel (g/cm ³)	10,4
Pengkayaan ²³⁵ U/ ²³⁵ U+ ²³⁸ U (%)	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

Dalam studi ini digunakan kernel berdiameter 500 μm dengan bahan bakar UO_2 , PuO_2 dan ThO_2/UO_2 yang diadopsi dari G. Hosking dan T.D. Newton [24]. Kernel UO_2 memiliki pengkayaan $^{235}\text{U}/(^{235}\text{U}+^{238}\text{U})$ sebesar 8,2 % sedangkan kernel ThO_2/UO_2 memiliki pengkayaan $^{233}\text{U}/(^{233}\text{U}+^{232}\text{Th})$ sebesar 7,48 %. Kernel PuO_2 memiliki pengkayaan ^{239}Pu sebesar 53,85% 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 diberikan dalam Tabel 2.

3. FRAKSI PACKING TRISO DAN MODEL PERHITUNGAN

Terdapat empat tipe kisi regular untuk distribusi partikel TRISO dalam 3-D, yaitu *simple cubic* (SC), *body centered cubic* (BCC), *face centered cubic* (FCC) dan heksagonal. Problema *packing* adalah problema kuno yang sering digunakan dalam matematika dan sains. Perdebatan acapkali dilakukan untuk menemukan fraksi *packing* terbesar dalam volume kisi kubik atau heksagonal yang diisi oleh bola. Hipotesa J. Kepler pada tahun 1611 mempostulasikan bahwa kisi FCC dan *hexagonal close packed* (HCP) memiliki fraksi *packing* yang paling tinggi, yakni 74,048%. Hipotesa itu kemudian ditegaskan pada tahun 1831 ketika Gauss secara parsial mendemonstrasikan apa yang disebut dugaan Kepler (*Kepler conjecture*).



Gambar 2. Model partikel TRISO dalam kisi FCC.

Fraksi *packing* TRISO sendiri didefinisikan sebagai rasio volume partikel TRISO dalam matriks grafit dan volume kisi kubik atau heksagonal dimana partikel TRISO terkandung di dalamnya. Jumlah partikel TRISO dalam kisi ditentukan dari jenis kisi regular yang diinginkan. Dalam studi ini, kisi FCC diadopsi karena fraksi *packing*-nya dapat divariasikan dari yang paling rendah hingga yang paling tinggi. Kontak antar partikel TRISO dalam kisi FCC adalah yang paling dekat di antara susunan kisi lainnya.

Dalam perhitungan ini seluruh komponen reaktor RGTT200K dimulai dari partikel TRISO, bahan bakar *pebble*, teras reaktor hingga struktur grafit dimodelkan secara detail dan eksplisit dengan program transport Monte Carlo MCNPX. Sel-sel permukaan bola konsentris dengan ukuran seperti dalam Tabel 2 digenerasi untuk membuat *universe* partikel TRISO. Opsi FILL kemudian dikenakan pada *universe* tersebut dan opsi TRCL dimanfaatkan untuk mentranslasikannya dari salah satu titik pusat diagonal bidang kisi ke lima titik pusat diagonal bidang kisi lainnya serta ke delapan titik sudut kisi. Dalam kisi FCC (Gambar 2), terdapat empat partikel TRISO dengan komposisi $\frac{1}{2}$ bagian masing-masing berada di enam bidang kisi dan $\frac{1}{8}$ bagian masing-masing berada di delapan titik sudut kisi. Bahan bakar *pebble* dimodelkan dalam struktur berulang dengan opsi LAT pada kisi FCC dan opsi FILL diaplikasikan untuk menggambarkan bahan bakar *pebble* secara detail. Pemodelan teras penuh RGTT200K 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 3 dan 4.

Tabel 3. Densitas atom bahan bakar kernel (atom/barn-cm³)^[24].

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 4. Densitas atom lapisan *coating* TRISO (atom/barn-cm³)^[24].

	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

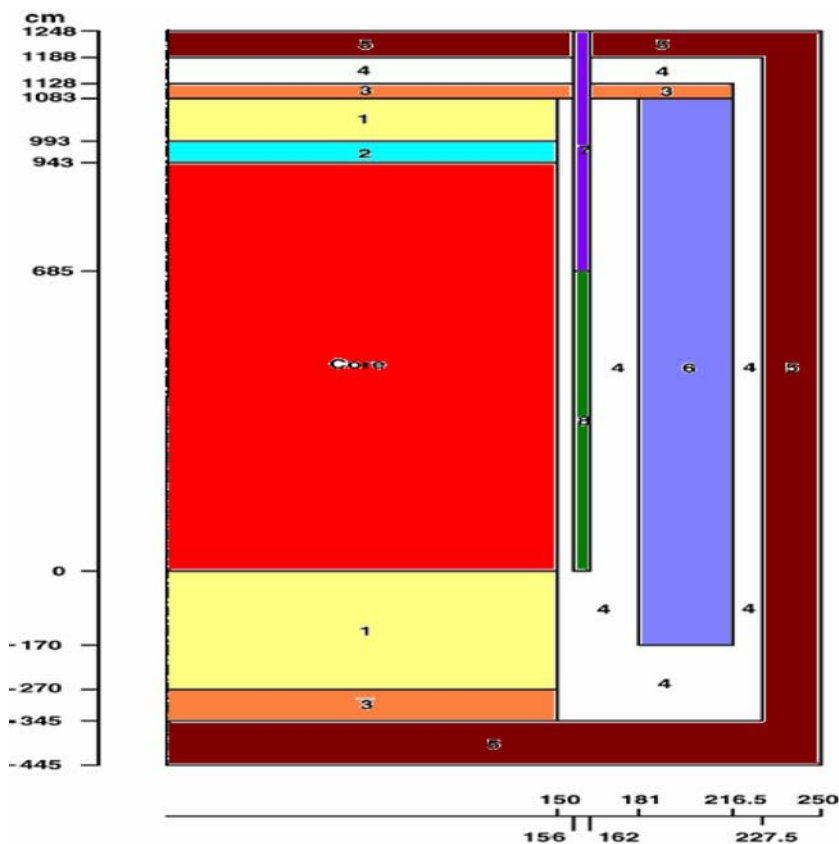
Gas helium yang berfungsi sebagai pendingin mengalir di sela-sela rongga kosong di antara tumpukan bahan bakar *pebble* dengan volume 0,39 bagian dari total volume teras. Karena itu kisi BCC yang digunakan untuk menyusun bahan bakar *pebble* dalam teras RGTT200K memiliki ukuran *pitch* sebesar 7,185259 cm. Densitas atom matriks grafit partikel TRISO, *shell* grafit bahan bakar *pebble*, pendingin helium dan void ditabulasikan dalam Tabel 5 dan 6.

Tabel 5. Densitas atom matriks grafit dan *shell* grafit (g/cm³)^[24].

Nuklida	Matriks grafit	Shell grafit
C	8,77414×10 ⁻²	8,77414×10 ⁻²
¹⁰ B	9,64977×10 ⁻⁹	9,64977×10 ⁻⁹
¹¹ B	3,90864×10 ⁻⁸	3,90864×10 ⁻⁸

Tabel 6. Densitas pendingin helium dan void (g/cm³)^[24].

Nuklida	Helium	Void (region 2)
⁴ He	2,65156×10 ⁻⁵	1,00000×10 ⁻¹¹
³ He	3,71220×10 ⁻¹¹	-



Gambar 3. Skema geometrik teras RGTT200K.

Skema geometrik model perhitungan teras RGTT200K 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 7. 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 HTR *pebble-bed*.

Tabel 7. Komposisi dan densitas atom material struktur RGTT200K^[24].

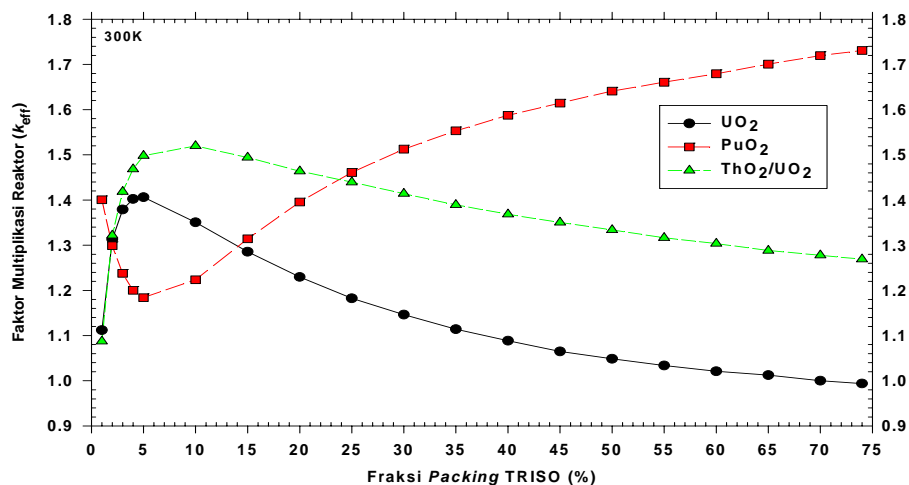
No. Region	Material struktur	Densitas (g/cm ³)	Densitas atom (atom/barn-cm)		
			C	¹⁰ B	¹¹ B
1	Reflektor 1	1,53901	$7,72000 \times 10^{-2}$	$3,39617 \times 10^{-8}$	$1,37562 \times 10^{-7}$
3	Void + grafit	0,0398707	$2,00000 \times 10^{-3}$	$8,79837 \times 10^{-10}$	$3,56378 \times 10^{-9}$
4	Reflektor 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	$3,51000 \times 10^{-2}$	$1,54411 \times 10^{-8}$	$6,25444 \times 10^{-8}$

4. HASIL PERHITUNGAN DAN DISKUSI

Dalam perhitungan RGTT200K, siklus *kcode* 110 dipertimbangkan dengan jumlah neutron per siklus sebesar 5.000. *Skipping* 10 siklus dipilih untuk mensimulasikan 0,5 juta neutron total. Dimulai dari sumber *ksrc* di pusat bahan bakar kernel, iterasi distribusi neutron fisi dieksekusi MCNPX yang menghabiskan waktu komputasi rerata 60-160 menit dengan *workstation quadcore* 16 MB untuk setiap kasus fraksi *packing* TRISO yang dihitung.

Tabel 8. Efek fraksi *packing* TRISO terhadap faktor multiplikasi reaktor (k_{eff}) RGTT200K pada temperatur 300K.

Fraksi <i>packing</i> TRISO (%)	<i>Pitch</i> kisi FCC (cm)	Jumlah TRISO per <i>pebble</i>	Massa kernel per <i>pebble</i> (g)	Faktor multiplikasi reaktor (k_{eff})		
				UO ₂	PuO ₂	ThO ₂ /UO ₂
1	0,540488	1.659	1,129543	1,11193±0,00088	1,40066±0,00122	1,08714±0,00082
2	0,428985	3.318	2,259085	1,31285±0,00091	1,29912±0,00114	1,32174±0,00112
3	0,374753	4.976	3,388628	1,37899±0,00125	1,23773±0,00117	1,41842±0,00109
4	0,340486	6.635	4,51817	1,40242±0,00101	1,20010±0,00101	1,46846±0,00096
5	0,316079	8.294	5,647713	1,40621±0,00113	1,18398±0,00098	1,49808±0,00098
10	0,250872	16.588	11,29543	1,35073±0,00111	1,22368±0,00093	1,51968±0,00112
15	0,219157	24.882	16,94314	1,28550±0,00128	1,31403±0,00091	1,49398±0,00110
20	0,199117	33.175	22,59085	1,22977±0,00101	1,39565±0,00106	1,46379±0,00108
25	0,184844	41.469	28,23856	1,18244±0,00119	1,46103±0,00101	1,43940±0,00114
30	0,173945	49.763	33,88628	1,14644±0,00103	1,51271±0,00090	1,41401±0,00106
35	0,165233	58.057	39,53399	1,11405±0,00108	1,55314±0,00104	1,38911±0,00125
40	0,158040	66.351	45,18170	1,08858±0,00098	1,58737±0,00091	1,36841±0,00110
45	0,151955	74.645	50,82941	1,06502±0,00109	1,61455±0,00108	1,35027±0,00105
50	0,146711	82.938	56,47713	1,04871±0,00105	1,64115±0,00107	1,33386±0,00100
55	0,142123	91.232	62,12484	1,03386±0,00105	1,66061±0,00091	1,31635±0,00103
60	0,138060	99.526	67,77255	1,02107±0,00099	1,67934±0,00107	1,30360±0,00106
65	0,134425	107.820	73,42026	1,01235±0,00111	1,70061±0,00109	1,28820±0,00113
70	0,131145	116.114	79,06798	1,00000±0,00089	1,71954±0,00099	1,27772±0,00116
74	0,128694	122.878	83,67408	0,99391±0,00111	1,73093±0,00099	1,26874±0,00111



Gambar 4. Faktor multiplikasi reaktor (k_{eff}) sebagai fungsi fraksi *packing* TRISO pada temperatur 300K.

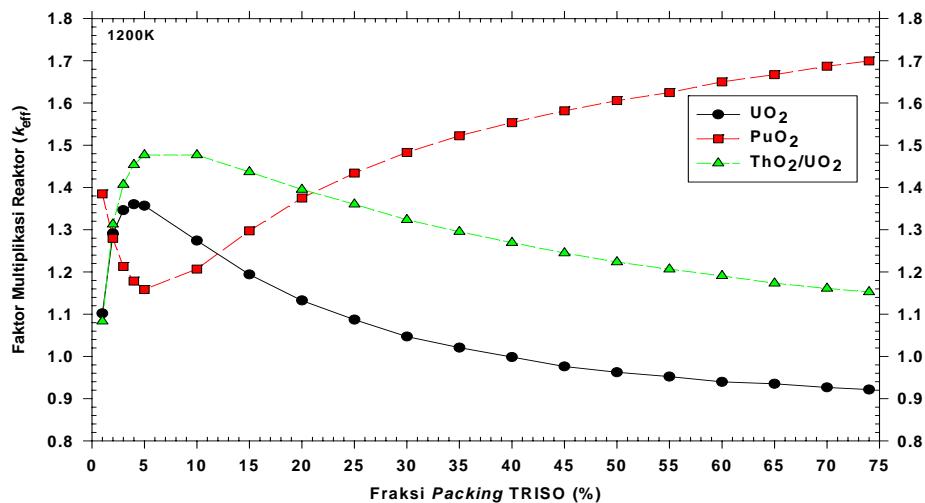
Fungsi hamburan $S(\alpha, \beta)$ dari grafit dimanfaatkan dalam perhitungan untuk setiap material reaktor yang mengandung unsur karbon guna mempertimbangkan efek *binding* pada energi di bawah ~ 4 eV. Pustaka data tampang lintang neutron energi kontinu ENDF/B-VII pada temperatur 300K dan 1.200K digenerasi dari NJOY99.304^[25]. Kondisi vakum dikenakan pada batas luar sistem reaktor RGTT200K.

Tabel 8 dan Gambar 4 memperlihatkan efek fraksi *packing* TRISO terhadap faktor multiplikasi reaktor (k_{eff}) RGTT200K untuk tiga tipe pemuatan bahan bakar kernel pada temperatur 300K. Faktor multiplikasi reaktor (k_{eff}) dimulai oleh pemuatan bahan bakar UO_2 dan ThO_2/UO_2 dari kondisi di atas kritis di fraksi *packing* TRISO 1% dengan reaktivitas lebih 10,07 % $\Delta k/k$ dan 8,02 % $\Delta k/k$, kemudian meningkat mencapai maksimum di fraksi *packing* 5% untuk UO_2 dan 10% untuk ThO_2/UO_2 sebelum menurun seiring dengan bertambahnya fraksi *packing* TRISO. Bahan bakar PuO_2 memulai faktor multiplikasi reaktor (k_{eff}) tinggi di fraksi *packing* TRISO 1% lalu menitik turun dan mencapai minimum di fraksi *packing* 5% untuk selanjutnya meningkat lagi dengan kurva yang cenderung menyerupai logaritmis. Di fraksi *packing* TRISO 70%, RGTT200K dengan bahan bakar UO_2 tepat mencapai kondisi kritis ($k_{eff} = 1,00000$). Bila diamati lebih lanjut, di fraksi *packing* paling tinggi, yakni 74%, bahan bakar UO_2 berada dalam kondisi sub-kritis sedangkan kondisi kritikalitas dua bahan bakar lainnya berbeda, khususnya PuO_2 yang superkritis dan berada 74,15% di atas UO_2 serta ThO_2/UO_2 27,65% di atas UO_2 .

Tabel 9. Efek fraksi *packing* TRISO terhadap faktor multiplikasi reaktor (k_{eff}) RGTT200K pada temperatur 1200K.

Fraksi <i>packing</i> TRISO (%)	Pitch kisi FCC (cm)	Jumlah TRISO per <i>pebble</i>	Massa kernel per <i>pebble</i> (g)	Faktor multiplikasi reaktor (k_{eff})		
				UO_2	PuO_2	ThO_2/UO_2
1	0,540488	1.659	1,129543	1,10165±0,00091	1,38504±0,00116	1,08319±0,00086
2	0,428985	3.318	2,259085	1,29109±0,00112	1,27952±0,00095	1,31305±0,00108
3	0,374753	4.976	3,388628	1,34621±0,00114	1,21289±0,00114	1,40670±0,00095
4	0,340486	6.635	4,51817	1,36022±0,00120	1,17845±0,00109	1,45384±0,00105
5	0,316079	8.294	5,647713	1,35671±0,00116	1,15840±0,00113	1,47710±0,00111
10	0,250872	16.588	11,29543	1,27429±0,00118	1,20684±0,00103	1,47691±0,00116
15	0,219157	24.882	16,94314	1,19402±0,00126	1,29740±0,00099	1,43676±0,00109
20	0,199117	33.175	22,59085	1,13231±0,00109	1,37515±0,00097	1,39526±0,00113
25	0,184844	41.469	28,23856	1,08705±0,00094	1,43394±0,00097	1,36000±0,00105
30	0,173945	49.763	33,88628	1,04715±0,00118	1,48321±0,00110	1,32339±0,00123
35	0,165233	58.057	39,53399	1,02062±0,00101	1,52267±0,00105	1,29532±0,00125
40	0,158040	66.351	45,18170	0,99827±0,00097	1,55364±0,00095	1,26943±0,00112
45	0,151955	74.645	50,82941	0,97621±0,00108	1,58147±0,00102	1,24472±0,00110
50	0,146711	82.938	56,47713	0,96241±0,00108	1,60564±0,00099	1,22331±0,00115
55	0,142123	91.232	62,12484	0,95226±0,00114	1,62481±0,00103	1,20652±0,00103
60	0,138060	99.526	67,77255	0,93972±0,00098	1,65020±0,00090	1,19084±0,00108
65	0,134425	107.820	73,42026	0,93512±0,00102	1,66723±0,00094	1,17320±0,00108
70	0,131145	116.114	79,06798	0,92663±0,00109	1,68713±0,00103	1,16090±0,00109
74	0,128694	122.878	83,67408	0,92157±0,00102	1,69967±0,00094	1,15269±0,00117

Fraksi *packing* TRISO reaktor *pebble-bed* tipikal pada umumnya berkisar di sekitar 5-10%^[26]. Di fraksi *packing* ini pemuatan bahan bakar UO₂ dan ThO₂/UO₂ cenderung menghasilkan faktor multiplikasi reaktor (k_{eff}) paling tinggi sedangkan PuO₂ menghasilkan k_{eff} paling rendah. Alasan di balik kecenderungan ini tersembunyi dalam jumlah material moderasi yang ada. Pada fraksi *packing* yang rendah, keberadaan grafit dalam matriks di bagian dalam *pebble* sangat melimpah. Grafit dengan jumlah yang lebih besar daripada nuklida fisi termal ²³⁵U dalam UO₂ dan ²³³U dalam ThO₂/UO₂ memoderasi teras secara optimal yang menyebabkan kritikalitas RGTT200K mencapai nilai maksimum. Dengan bertambahnya fraksi *packing* TRISO, jumlah grafit makin kecil karena okupasi partikel bahan bakar. Akibatnya neutron termal berkurang dan faktor multiplikasi reaktor (k_{eff}) akan tereduksi.



Gambar 5. Faktor multiplikasi reaktor (k_{eff}) sebagai fungsi fraksi *packing* TRISO pada temperatur 1200K.

Bahan bakar PuO₂ mengandung ²³⁹Pu dengan jumlah yang besar dan nuklida fisi cepat lainnya. Bahan bakar ini memproduksi faktor multiplikasi reaktor (k_{eff}) yang tinggi ketika keberadaan grafit dalam teras reaktor jumlahnya sedikit. Pada fraksi *packing* TRISO yang tinggi, pemuatan PuO₂ membuat reaktor berada pada kondisi superkritis seperti dapat dilihat kembali dalam Gambar 4.

Tabel 9 menyajikan efek fraksi *packing* TRISO yang sama seperti Tabel 8 namun untuk temperatur operasi yang berbeda. Gambar 5 mengilustrasikan hasil perhitungan MCNPX dalam bentuk grafik. Kurva menunjukkan kecenderungan yang serupa dengan yang diperoleh pada temperatur 300K, tetapi dengan faktor multiplikasi reaktor (k_{eff}) yang sedikit agak lebih rendah. Hasil ini mengindikasikan RGTT200K memiliki koefisien reaktivitas temperatur teras negatif seperti yang diekspektasi.

5. KESIMPULAN

Studi efek fraksi *packing* TRISO dalam desain kritikalitas RGTT200K telah dilakukan melalui serangkaian perhitungan menggunakan program transport Monte Carlo MCNPX dan pustaka tampang lintang energi kontinu ENDF/B-VII.

Hasil perhitungan memperlihatkan bahwa pada fraksi *packing* TRISO 5-10%, pemuatan bahan bakar UO₂ dan ThO₂/UO₂ menghasilkan faktor multiplikasi reaktor (k_{eff}) paling tinggi. Grafit dengan jumlah lebih besar daripada nuklida fisil termal ²³⁵U dalam UO₂ dan ²³³U dalam ThO₂/UO₂ memoderasi teras secara optimal yang menyebabkan kritikalitas RGTT200K mencapai nilai maksimum. Sebaliknya pemuatan PuO₂ menghasilkan kritikalitas RGTT200K mencapai nilai minimum.

Dari analisis dapat disimpulkan bahwa fraksi *packing* TRISO sangat mempengaruhi desain kritikalitas RGTT200K. Pemilihan fraksi *packing* TRISO harus dipertimbangkan secara seksama untuk mendapatkan desain kritikalitas reaktor temperatur tinggi dengan tipe bahan bakar yang spesifik.

6. UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih kami sampaikan kepada Dr. Ir. M. Dhandhang Purwadi yang memberikan inspirasi dan motivasi untuk melakukan riset ini. Ucapan terimakasih kami sampaikan pula kepada Prof. Surian Pinem, M.Si atas koreksi dan sarannya yang sangat bermanfaat dalam perbaikan makalah ini. Dorongan dan dukungan semangat yang amat berarti dari rekan-rekan di Bidang Pengembangan Reaktor, sangat kami hargai.

7. DAFTAR PUSTAKA

- [1]. 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, 19-20 October, 1992), Oarai, Japan (1992).
- [2]. ANONYMOUS, “*A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems*”, US DOE Nuclear Energy and the Generation IV International Forum (GIF) (December 2002).
- [3]. K. KUNITOMI, S. KATANISHI, S. TAKADA, “*Japan’s Future HTR- the GTHTR300*”, Journal of Nuclear Engineering and Design, 233 (309)(2004).
- [4]. S. SHIOZAWA, S. FUJIKAWA, T. IYOKU, K. KUNITOMI, and Y. TACHIBANA, “*Overview of HTR Design Features*”, Journal of Nuclear Engineering and Design, 233 (2004) 11-21.
- [5]. S. HU, R. WANG and Z. GAO, “*Safety Demonstration Tests on HTR-10 Reactors*” (Proceedings of the 2-nd International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology September 22-24, 2004), Beijing, China (2004)

- [6]. Z. ZHANG, Z. WU, F. LI, “*Design Aspects of the Chinese Modular High-Temperature Gas-Cooled Reactor HTR-PM*”, Journal of Nuclear Engineering and Design, 236 (2006) 485-490.
- [7]. M. DHANDHANG PURWADI, “*Desain Koneptual Sistem Reaktor Daya Maju Kogenerasi Berbasis RGTT*” (Prosiding Seminar Nasional Ke-16 Teknologi dan Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir, 28 Juli 2010), Surabaya (2010).
- [8]. ZUHAIR, SUWOTO, “*Studi Sensitivitas Fraksi Packing Partikel TRISO dalam Desain HTR Pebble Bed*” (diajukan ke Jurnal Fisika - Himpunan Fisika Indonesia) (2011).
- [9]. MARK R. DE GUIRE, “*Principle of Atomic Packing*”, Introduction to Materials Science & Engineering, ESME (2001).
- [10]. J.S. HENDRICKS, G.W. MCKINNEY, *et al.*, “*MCNPX 2.6.0 Extensions*”, LA-UR-08-2216, Los Alamos National Laboratory (April 11, 2008).
- [11]. A. TALAMO, *et al.*, “*MCNPX, MONK, and ERANOS Analysis of the YALINA Booster Subcritical Assembly*”, Journal of Nuclear Engineering and Design, 241 (5)(May 2011) 1606-1615.
- [12]. A. VASILIEV, H. FERROUKHI, M.A. ZIMMERMANN, and R. CHAWLA, “*Development of a CASMO-4/SIMULATE-3/MCNPX Calculation Scheme for PWR Fast Neutron Fluence Analysis and Validation against RPV Scraping Test Data*”, Annals of Nuclear Energy, 34 (8)(August 2007) 615-627.
- [13]. J.R. LEBENHAFT, R. FRÜH, AND R. CHAWLA, “*The Effect of Nuclear Data on the MCNPX Modeling of Moderator Level Variations in the CROCUS Critical Facility*”, Journal of Nuclear Science and Technology, 40 (6)(June 2003) 429-432.
- [14]. B. ŞARER, S. ŞAHİN, M. GÜNAY, Y. ÇELİK, “*Comparison of the Calculations using Different Codes Implemented in MCNPX Monte Carlo Transport Code for Accelerator Driven System Target*” (Proceedings of the 15-th International Conference on Emerging Nuclear System (ICENES-15), May 15-19, 2011), San Francisco, USA (2011).
- [15]. G. de P. BAROS, C. PEREIRA, M.A.F. VELOSO, A.L. COSTA, “*Fuel Regeneration Analysis of an Accelerator Driven System using the MCNPX2.6.0 Code*” (Proceedings of the 2011 International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP2011), May 2-5, 2011), Nice, France (2011).
- [16]. G. de P. BAROS, C. PEREIRA, M.A.F. VELOSO, A.L. COSTA, “*Neutron Production Evaluation from a ADS Target Utilizing the MCNPX2.6.0 Code*”, Brazilian Journal of Physics, 40 (4)(December 2010).
- [17]. Z. ZHONG, Y. GOHAR, and A. TALAMO, “*MCNPX and MCB Coupled Methodology for the Burnup Calculation of the KIPT Accelerator Driven Subcritical System*” (Proceedings of the

- International Conference on Mathematics, Computational Methods & Reactor Physics (M&C2009), May 3-7, 2009), Saratoga Springs, New York (2009).
- [18]. M.B. CHADWICK, P. OBLOZINSKY, M. HERMAN, *et al.*, "ENDF/B-VII: Next Generation Evaluated Nuclear Data Library for Nuclear Science and Technology", Nuclear Data Sheets, 107 (2006) 2931-3060.
- [19]. HERY ADRIAL, PIPING SUPRIATNA, ZUHAIR, "Studi Kombinasi Kisi Kernel dan Kisi Pebble Dalam Desain RGTT200K" (diseminarkan pada Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir, 19 Juli 2011), Yogyakarta (2011).
- [20]. SUWOTO, ZUHAIR, MAMAN MULYAMAN, "Analisis Sensitivitas Parametrik Dalam Perhitungan Kritikalitas Sel Kisi Kernel Bahan Bakar RGTT" (Prosiding Seminar Nasional Ke-15 Teknologi dan Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir, 28 Juli 2010), Surabaya (2010).
- [21]. MAMAN MULYAMAN, SUWOTO, ZUHAIR, "Pemodelan Partikel Bahan Bakar Berlapis Dalam Kisi SC, BCC dan FCC untuk Perhitungan Faktor Multiplikasi Infinit RGTT Menggunakan Program MCNP5" (Prosiding Seminar Nasional Ke-15 Teknologi dan Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir, 28 Juli 2010), Surabaya (2010).
- [22]. SUWOTO, ZUHAIR, MAMAN MULYAMAN, "Efek Model Kisi Heksagonal Dalam Perhitungan Faktor Multiplikasi Bahan Bakar RGTT" (Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir, 20 Juli 2010), Yogyakarta (2010).
- [23]. M. HROVAT, KARL-HEINZ GROSSE, "Manufacture of High Corrosion Resistant Fuel Spheres (FS) for High Temperature Pebble Bed Modular Reactors (PBMR)" (Proceedings of the 3-rd International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology (HTR2006), October 1-4, 2006), Johannesburg, South Africa (2006).
- [24]. 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).
- [25]. R.E. MC FARLANE, D.M. MUIR, "NJOY99.0: Code System for Producing Pointwise and Multigroup Neutron and Photon Cross Sections from ENDF/B Data", LANL, PSR-480 (2000).
- [26]. BJÖRN BECKER, "On the Influence of the Resonance Scattering Treatment in Monte Carlo Codes on High Temperature Reactor Characteristics", Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) Dissertation, Universität Stuttgart (Juni 2010).

DISKUSI / TANYA - JAWAB:

PERTANYAAN: (Azizul Khakim, P2STPIBN-BAPETEN)

- Mengapa tidak dilakukan perhitungan *burnup* dengan MCNPX untuk mengamati fenomena kritikalitas RGTT200K? Jika perhitungan *burnup* dilakukan, apa yang bisa diprediksi dari k_{eff} sebagai fungsi fraksi *packing* TRISO?

JAWABAN: (Zuhair, PTRKN-BATAN)

- *Perhitungan burnup belum dilakukan dan akan dikerjakan di waktu yang akan datang. Pada umumnya, nilai k_{eff} memiliki tendensi semakin berkurang dengan bertambahnya burnup, namun jika perhitungan burnup belum dilakukan kami belum dapat memprediksi apakah situasi moderasi akan berubah dan tidak lagi menyerupai kelakuan kritikalitas sebagai fungsi fraksi packing TRISO seperti yang diperlihatkan dalam Gambar 4 dan 5.*