

ANALISIS SENSITIVITAS KETEBALAN REFLEKTOR GRAFIT TERAS RGTT200K MENGGUNAKAN PERHITUNGAN MONTE CARLO

Suwoto, Zuhair

Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir (PTKRN) - BATAN
Kawasan PUSPIPTEK, Gedung No. 80, Serpong, Tangerang 15310
Telp./Fax.: 021-7560912/7560913; e-mail: suwoto@batan.go.id

Diterima	Diterima dalam bentuk revisi	Disetujui
15 September 2014	14 Nopember 2014	28 Nopember 2014

ABSTRAK

ANALISIS SENSITIVITAS KETEBALAN REFLEKTORGRAFIT TERAS RGTT200K MENGGUNAKAN PERHITUNGAN MONTE CARLO. Salah satu parameter desain reaktor pebble-bed yang sangat penting selain radius, pengayaan dan densitas bahan bakar adalah ketebalan reflektor. Reflektor aksial dan radial dalam reaktor temperatur tinggi digunakan untuk meningkatkan ekonomi neutron, namun dimensi reflektor harus diinvestigasi khususnya untuk teras pebble-bed dengan opsi bahan bakar yang berbeda. Makalah ini secara esensial bertujuan mencari tebal efektif reflektor aksial dan radial yang direkomendasikan untuk teras RGTT200K. Analisis ditekankan pada perilaku neutron dalam bahan bakar boladimana partikel TRISO disusun dengan kisi SC dalam matriks grafit dan perilaku teras yang disusun oleh bahan bakar pebble dalam kisi BCC. Perhitungan teras dengan tiga opsi bahan bakar, yakni UO_2 , PuO_2 dan ThO_2/UO_2 pada berbagai fraksi packing TRISO dikerjakan dengan program transport Monte Carlo MCNPX dan pustaka data tampang lintang energi neutron kontinu ENDF/B-VI. Hasil perhitungan memperlihatkan perubahan reaktivitas teras RGTT200K karena fraksi packing TRISO tidak secara langsung menyebabkan ketebalan reflektor radial bertambah. Penambahan ketebalan reflektor radial setelah mencapai 100 cm tidak memberikan perubahan yang berarti terhadap reaktivitas teras RGTT200K. Penambahan ketebalan reflektor aksial juga tidak mempunyai dampak yang berarti pada perubahan reaktivitas teras RGTT200K. Dari analisis dapat disimpulkan bahwa, tebal efektif reflektor radial dan aksial bagian atas dan bawah dicapai masing-masing pada ketebalan 100 cm.

Kata kunci: RGTT200K, sensitivitas, reflektor radial, reflektor aksial, MCNPX, ENDF/B-VI.

ABSTRACT

ANALYSIS ON THICKNESS SENSITIVITY OF GRAPHITE REFLECTOR FOR RGTT200K CORE USING MONTE CARLO CALCULATION. One of very important parameter in design of the pebble bed reactor beside radius, enrichment and density of fuel are reflector thickness. Axial and radial reflectors in high temperature reactor are used to improve the neutron economy, however the reflector dimension has to be investigated especially for pebble bed core with various fuel options. This paper essentially aimed to look for the thickness of radial and axial reflectors to obtain specific design recommended for RGTT200K core. The analysis focused on the neutron behavior in fuel pebble where TRISO particles arranged with SC lattice in the graphite matrix and the core behavior composed by the fuel pebble in the BCC lattice arrangement. The core calculation with three fuel options of UO_2 , PuO_2 and ThO_2/UO_2 at various TRISO packing fractions were employed using MCNPX Monte Carlo transport code and continuous neutron energy cross-section ENDF/B-VI file. The calculation results show that, the RGTT200K core reactivity change because of TRISO packing fraction is not directly cause the increasing of radial reflector thickness. The adding of radial reflector thickness after achieving 100 cm does not give the effective effect on the RGTT200K core reactivity change. The increasing of axial reflector thickness has no significant impact on RGTT200K core reactivity change. From the analysis, it can be concluded that the effective thickness of radial reflector and top and bottom axial reflectors are achieved at a thickness of 100 cm.

Keywords: RGTT200K, sensitivity, radial reflector, axial reflector, MCNPX, ENDF/B-VI.

1. PENDAHULUAN

Reaktor berpendingin Gas Temperatur Tinggi (*High Temperature Gas Cooled Reactor*, HTGR)^[1] adalah reaktor nuklir berbahan bakar uranium keramik dalam bentuk ribuan partikel berlapis (*coated particles*) yang tersebar dalam matriks grafit. Partikel berlapis tersusun dari kernel dengan komposisi UO_2 , ThO_2/UO_2 atau PuO_2 yang dibungkus lapisan pirokarbon dan silikon karbida. Dalam perkembangannya, bahan bakar HTGR berkembang menjadi dua tipe, yaitu tipe blok-prismatik yang dikembangkan di USA dan Jepang serta tipe bola (*pebble-bed*) yang dikembangkan di Jerman, China, Rusia, Switzerland dan Afrika Selatan yang kemudian dikenal juga dengan sebutan Reaktor Temperatur Tinggi (*High Temperature Reactor*, HTR).

Sejarah HTGR^[2-4] dimulai dari reaktor berpendingin gas helium pertama di Oak Ridge, USA tahun 1944. Untuk meningkatkan kinerja reaktor berpendingin gas, pada tahun 1960-an di beberapa negara lain dikembangkan HTGR yang beroperasi pada suhu 850°C-950°C, diantaranya proyek DRAGON di Inggris (1964-1974), AVR (*Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor*) di Jerman (1967-1988), Peach Bottom di USA (1967-1974), proyek demonstrasi teknologi HTGR di Fort St. Vrain USA (1976-1989) dan THTR (*Thorium High Temperature Reactor*) di Jerman (1986-1989).

Konsep desain modular HTGR^[5] kemudian berkembang setelah tahun 1986 seperti MHTGR di USA berdaya 350-400 MWt dan serangkaian HTR di Jerman berdaya 200-300 MWt. HTGR yang digunakan sebagai fasilitas uji saat ini adalah HTR-10 (*High Temperature Reactor 10 MWt*)^[6] China, HTTR (*High Temperature Engineering Test Reactor*) 30 MWth di Jepang dan fasilitas kritik ASTRA Rusia. HTTR dan HTR-10 merupakan reaktor eksperimental yang mendukung pengembangan teknologi reaktor generasi lanjut VHTR (*Very High Temperature Reactor*)^[7]. Beberapa proyek HTGR^[8-13] yang sedang dalam taraf perencanaan adalah PBMR Afrika Selatan, HTR-PM China, GT-HTR300C Jepang, GT-MHR Rusia, ANTARES Perancis, NHDD Korea Selatan dan NGNP USA.

Reaktor berpendingin Gas Temperatur Tinggi berdaya 200 MWth (dikenal dengan nama RGTT200K) dengan siklus langsung berbahan bakar tipe bola menjadi pilihan dalam riset desain konseptual reaktor daya maju kogenerasi. Ada beberapa riset yang telah diselesaikan dalam kaitannya dengan desain konseptual RGTT200K. Riset yang terkait dengan kriticalitas teras RGTT200K sebagai fungsi dari radius bahan bakar pada berbagai pengayaan telah dilakukan^[14]. Pemanfaatan bahan bakar yang berbeda yaitu UO_2 , PuO_2 dan ThO_2/UO_2 pada bentuk dan dimensi teras RGTT200K yang sama juga telah dianalisis dalam perhitungan koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar dan moderatornya^[15]. Studi efek fraksi *packing* TRISO dalam desain teras RGTT200K pun telah dikerjakan untuk berbagai opsi bahan yang berbeda^[16].

Selain efek radius, pengayaan, densitas dan fraksi *packing* bahan bakar, efek dari ketebalan reflektor juga mempengaruhi parameter desain teras reaktor RGTT200K. Pengaruh ketebalan reflektor yang perlu diinvestigasi adalah tebal reflektor arah radial dan aksial. Reflektor grafit yang digunakan pada reaktor RGTT200K memiliki peran penting dalam meningkatkan ekonomi neutron dan menjaga perpindahan panas yang baik. Oleh karena itu perlu dilakukan investigasi tentang ketebalan reflektor yang optimal pada teras RGTT200K.

Makalah ini secara esensial bertujuan untuk mencari ketebalan efektif reflektor aksial dan radial untuk dapat direkomendasikan pada desain reflektor teras RGTT200K^[17] dengan memanfaatkan opsi bahan bakar yang berbeda agar tidak berdampak pada perubahan reaktivitas teras yang besar. Analisis ditekankan pada perilaku neutron dalam bahan bakar bola di mana partikel berlapis TRISO disusun dengan kisi kubik sederhana SC (*Simple Cubic*) dalam matriks grafit dan perilaku neutron dalam teras yang

disusun oleh bahan bakar boladalam kisi BCC (*Body Centered Cubic*). Tiga opsi bahan bakar yaitu UO_2 , PuO_2 dan ThO_2/UO_2 akan dianalisis dalam menentukan desain reflektor grafit teras RGTT200K berbahan bakar uranium, plutonium dan thorium^[18]. Fraksi *packing* TRISO^[19] yang berperan dalam moderasi neutron dengan variasi 5% hingga 30% dipilih untuk mempelajari efektivitas ketebalan reflektor grafit melalui perhitungan reaktivitas teras RGTT200K. Seluruh perhitungan teras RGTT200K memanfaatkan program transport Monte Carlo MCNPX^[20] dan pustaka data tampang lintang energi neutron kontinu ENDF/B-VI^[21].

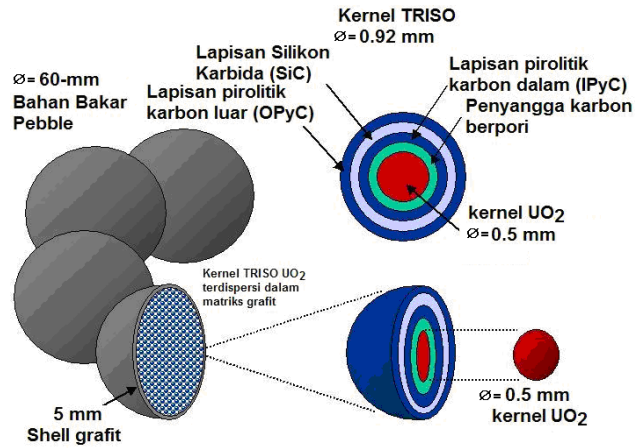
2. DESKRIPSI TERAS RGTT200K

RGTT200K adalah reaktor berpendingin gas temperatur tinggi dengan daya 200 MW dan berbahan bakar bola. Teras reaktor RGTT200K memiliki diameter 300 cm dan tinggi 943 cm dengan temperatur *outlet* teras rerata 950°C dan temperatur *inlet* teras rerata 550°C . Pemodelan teras reaktor RGTT200K mengacu pada HTR-Module Jerman dan HTR-10 China. Reflektor radial dan reflektor aksial yang mengelilingi teras RGTT200K memiliki ketebalan yang divariasikan dari 10 cm hingga 200 cm. Kavitas yang berada di atas teras mempunyai tinggi 50 cm. Parameter reaktor dan spesifikasi teras RGTT200K diberikan dalam Tabel 1.

Dalam analisis sensitivitas ketebalan reflektor teras RGTT200K digunakan partikel berlapis TRISO dengan diameter 0,092 cm. Partikel TRISO terdiri dari kernel bahan bakar dengan diameter 500 μm dan empat lapisan *coating* yang terdispersi dalam matriks grafit. Empat lapisan *coating* 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). Dengan fraksi *packing* 5% hingga 30% sebanyak 15000 partikel TRISO membentuk bahan bakar boladiameter 6 cm. Bahan bakar bola dikelilingi oleh lapisan pelindung yang disebut *shell* grafit dengan ketebalan 0,5 cm. Skema geometrik bahan bakar bola dan partikel TRISO diilustrasikan dalam Gambar 1 dan spesifikasi detailnya diberikan dalam Tabel 2.

Tabel 1. Parameter reaktor dan spesifikasi teras RGTT200K^[19]

Parameter reaktor:	Nilai	Spesifikasi teras:	Nilai
Daya reaktor (MWt)	200	Tinggi teras (m)	9,43
Volume teras (m^3)	66,657	Radius teras (m)	1,5
Temperatur <i>inlet</i> teras ($^\circ\text{C}$)	550	Jumlah bola (<i>pebble</i>) per m^3	5.394
Temperatur <i>outlet</i> teras ($^\circ\text{C}$)	950	Jumlah bola dalam teras	359.548
Tekanan He (Mpa)	7	Fraksi <i>packing</i> bola dalam teras (%)	61
Aliran massa pendingin (kg/s)	120	Impuritas boron alam dalam struktur grafit (ppm)	2
Densitas pendingin He pada 273,16K, 10^5Pa (g/cm^3)	$1,78 \times 10^{-4}$		



Gambar 1. Skema geometrik bahan bakar RGTT200K

Tabel 2. Spesifikasi bahan bakar *bola* dan partikel berlapis TRISO^[19]

Bahan bakar bola (<i>pebble</i>)	Nilai	Partikel berlapis TRISO	Nilai
Kernel bahan bakar:			
Diameter bola (cm)	6,0	Radius bahan bakar kernel (cm)	0,025
Diameter zona berbahan bakar (cm)	5,0	Densitas bahan bakar kernel (g/cm ³)	10,4
Ketebalan shell grafit (cm)	0,5	Pengayaan ²³⁵ U/ ²³⁹ Pu/ ²³³ U(%)	8,2/7,48/53,85
Densitas shell grafit (g/cm ³)	1,75	Impuritas boron alam dalam kernel, (ppm)	0,5
Impuritas boron alam dalam shell grafit (ppm)	0,5	Lapisan coating (dari dalam keluar):	
Fraksi <i>packing</i> bola dalam teras (%)	61	Material lapisan <i>coating</i>	C/IPyC/ SiC/OPyC
		Ketebalan lapisan coating (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

3. METODE PERHITUNGAN

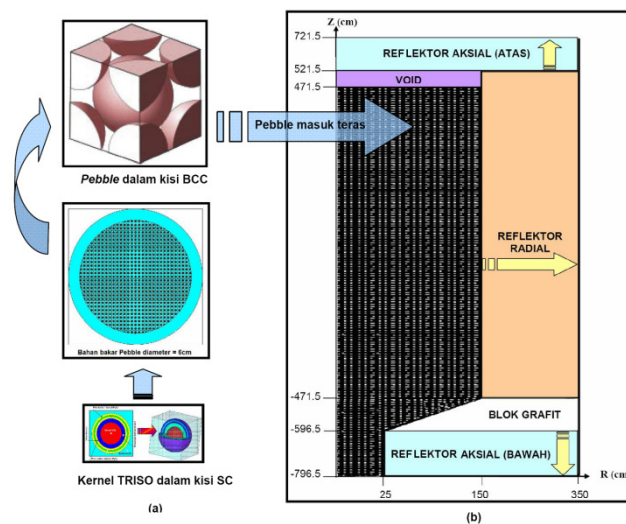
Perhitungan sensitivitas ketebalan reflektor grafit teras RGTT200K diawali dari pemodelan partikel TRISO dengan kisi kubik sederhana SC dalam matriks grafit. Kernel bahan bakar dan keempat lapisan *coating*nya digenerasi dengan sel permukaan bola konsentris yang didefinisikan dalam MCNPX. Kisi kubik ini dengan berbagai *pitch* kisi sesuai dengan fraksi *packing* TRISO (Tabel 3) kemudian disusun dengan struktur berulang memanfaatkan opsi LAT dan FILL untuk memodelkan bahan bakar bola. Teras RGTT200K dimodelkan dengan mengekspansi bahan bakar bola ke seluruh teras dengan struktur berulang memanfaatkan opsi LAT dan FILL dengan kisi BCC dengan *pitch* kisi 7,185259 cm

yang diperoleh dari fraksi *packing* tipikal teras *pebble-bed* (0,61). Pemodelan kernel TRISO dalam kisi SC dan bahan bakar bola dalam kisi BCC serta skema geometrik teras RGTT200K menggunakan MCNPX diilustrasikan dalam Gambar 2.

Tabel 3. *Pitch* kisi SC untuk berbagai fraksi *packing* TRISO

Fraksi <i>Packing</i> TRISO (%)	<i>Pitch</i> kisi SC (cm)
5	0,199117
10	0,158040
15	0,138060
20	0,125436
25	0,116445
30	0,109579

Komponen reaktor lainnya seperti reflektor dimodelkan dengan cara yang lebih sederhana. Densitas atom kernel UO_2 , PuO_2 dan ThO_2/UO_2 serta lapisan *coating* TRISO diberikan dalam Tabel 4 dan 5. Densitas atom matriks grafit partikel TRISO, *shell* grafit bahan bakar *bola*, pendingin helium dan void dirangkum dalam Tabel 6 dan 7 sedangkan densitas atom reflektor aksial dan radial ditabulasikan dalam Tabel 8.



Gambar 2. Pemodelan: (a) kernel TRISO dan bola dalam MCNPX, (b) skema geometrik teras RGTT200K.

Tabel 4. Densitas atom kernel UO_2 , PuO_2 dan ThO_2/UO_2 (atom/barn-cm)

Kernel	^{235}U	^{238}U	^{16}O	^{10}B	^{11}B
UO_2	$1,92585 \times 10^{-3}$	$2,12877 \times 10^{-2}$	$4,64272 \times 10^{-2}$	$1,14694 \times 10^{-7}$	$4,64570 \times 10^{-7}$
Kernel	^{238}Pu	^{239}Pu	^{240}Pu	^{10}B	^{11}B
PuO_2	$6,01178 \times 10^{-4}$	$1,24470 \times 10^{-2}$	$5,44599 \times 10^{-3}$	$1,14694 \times 10^{-7}$	$4,64570 \times 10^{-7}$
	^{241}Pu	^{242}Pu	^{16}O		
	$3,00965 \times 10^{-3}$	$1,54539 \times 10^{-3}$	$4,60983 \times 10^{-2}$		
Kernel	^{232}Th	^{233}U	^{16}O	^{10}B	^{11}B
ThO_2/UO_2	$2,19473 \times 10^{-2}$	$1,76668 \times 10^{-2}$	$4,74279 \times 10^{-2}$	$1,14694 \times 10^{-7}$	$4,64570 \times 10^{-7}$

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

Lapisan	C	Si	¹⁰ B	¹¹ B
Penyangga karbon	5,26449×10 ⁻²	-	-	-
IPyC/OpyC	9,52621×10 ⁻²	-	-	-
SiC	4,77597×10 ⁻²	4,77597×10 ⁻²	-	-
Matriks grafit	8,77404×10 ⁻²	-	9,64977×10 ⁻⁹	3,90864×10 ⁻⁸

Tabel 6. Densitas atom matriks grafit dan shell grafit (atom/barn-cm)

Nuklida	Matriks grafit	Shell grafit
¹² C	8,77404×10 ⁻²	8,77404×10 ⁻²
¹⁰ B	9,64977×10 ⁻⁹	9,64977×10 ⁻⁹
¹¹ B	3,90864×10 ⁻⁸	3,90864×10 ⁻⁸

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

Nuklida	Helium	Void
⁴ He	2,65156×10 ⁻⁰⁵	1,00000×10 ⁻¹¹
³ He	3,71220×10 ⁻¹¹	-

Tabel 8. Densitas atom reflektor aksial dan radial(atom/barn-cm)

Nuklida	Reflektor Aksial	Reflektor Radial
¹² C	7,02000×10 ⁻²	7,02000×10 ⁻²
¹⁰ B	3,08823×10 ⁻⁸	3,39617×10 ⁻⁸
¹¹ B	1,25089×10 ⁻⁷	1,37562×10 ⁻⁷

Perubahan reaktivitas ($\Delta\rho$) pada teras RGTT200K didefinisikan sebagai,

$$\Delta\rho = \rho - \rho_{10} \dots\dots\dots(1)$$

dimana ρ adalah reaktivitas teras dengan reflektor radial atau aksial pada ketebalan tertentu dan ρ_{10} adalah reaktivitas teras dengan reflektor radial atau aksial pada ketebalan 10 cm.

Dari hubungan reaktivitas (ρ) dan faktor multiplikasi efektif (k_{eff}):

$$\rho = (1 - k_{eff}) / k_{eff} \dots\dots\dots(2)$$

perubahan reaktivitas ($\Delta\rho$) teras RGTT200K dapat dituliskan dalam bentuk persamaan:

$$\Delta\rho = (k_{eff} - k_{eff,10}) / (k_{eff} \times k_{eff,10}) \times 100\% \Delta k / k \dots\dots\dots(3)$$

dimana k_{eff} adalah faktor multiplikasi efektif teras dengan reflektor radial atau aksial pada ketebalan tertentu dan $k_{eff,10}$ adalah faktor multiplikasi efektif teras dengan reflektor radial atau aksial pada ketebalan 10 cm.

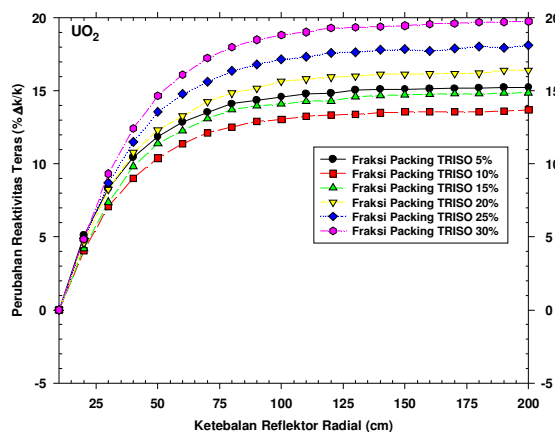
Untuk memperoleh desain ketebalan reflektor teras RGTT200K, perhitungan dilakukan dengan memvariasikan ketebalan reflektor aksial dan radial dari 10 cm hingga 200 cm. Dalam perhitungan ini, program Monte Carlo MCNPX dimanfaatkan dengan pustaka data nuklir energi kontinu ENDF/B-VI untuk memprediksi reaktivitas teras RGTT200K. MCNPX adalah program transport Monte Carlo yang memiliki kapabilitas

pemodelan sistem reaktor 3-D yang digunakan untuk menyelesaikan perhitungan transpor neutron, foton, elektron atau kopling neutron, foton dan elektron dalam problema kritikalitas reaktor. MCNPX menelusuri dan mensimulasikan perjalanan jejak partikel dengan memodelkan sebuah geometri suatu material berupa sel yang digenerasi oleh permukaan-permukaan yang didefinisikan dalam MCNPX.

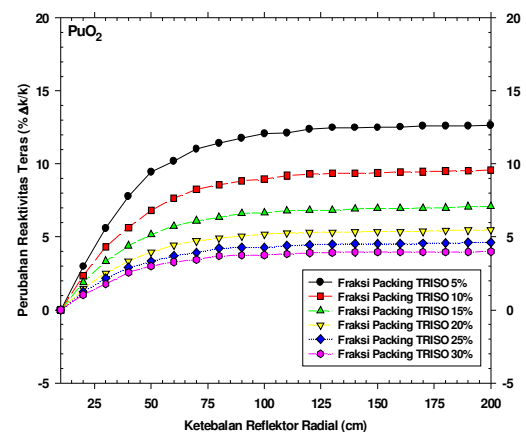
Sebanyak 5000 histori neutron per siklus dengan total 100 siklus aktif disimulasikan dan *skipping* 10 siklus dikerjakan untuk menghindari konvergensi sumber. Sumber neutron fisi awal dilokasikan di pusat kernel bahan bakar. Data hamburan termal $S(\alpha, \beta)$ *graph.01t* diaplikasikan untuk mempertimbangkan efek *binding* yang mempengaruhi interaksi neutron termal dengan seluruh material yang mengandung grafit pada energi di bawah ~ 4 eV.

4. HASIL PERHITUNGAN DAN PEMBAHASAN

Hasil perhitungan reaktivitas teras sebagai fungsi ketebalan reflektor radial dalam bentuk grafik diilustrasikan dalam Gambar 3. Dalam perhitungan MCNPX, ketebalan reflektor aksial bagian atas dan bawah dibuat tetap sebesar 100 cm sedangkan ketebalan reflektor radial bervariasi dari 10 cm hingga 200 cm. Hasil perhitungan MCNPX ditampilkan dalam bentuk grafik pada Gambar 3 yang memperlihatkan perubahan reaktivitas teras ($\Delta\rho$) sebagai fungsi ketebalan reflektor radial dengan berbagai fraksi *packing* TRISO.

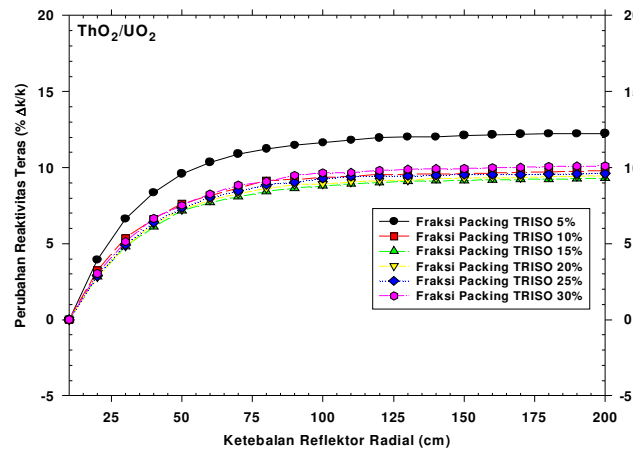


Gambar 3. Perubahan reaktivitas teras UO_2 RGTT200K sebagai fungsi ketebalan reflektor radial.



Gambar 4. Perubahan reaktivitas teras PuO_2 RGTT200K sebagai fungsi ketebalan reflektor radial.

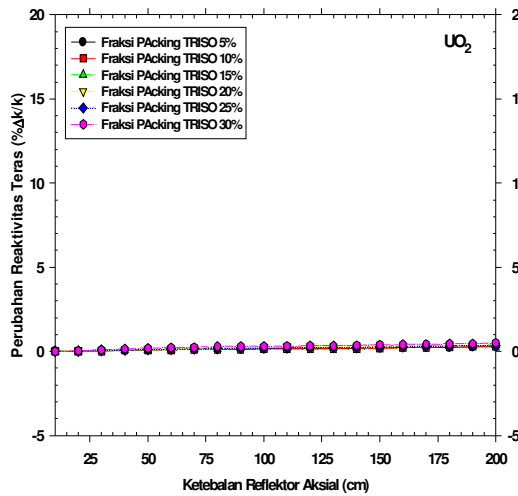
Dari Gambar 3 dapat diamati bahwa, ketika ketebalan bertambah terdapat banyak neutron yang direfleksikan kembali ke dalam teras yang membuat reaktivitas teras RGTT200K meningkat secara tajam untuk ketebalan reflektor radial hingga 75 cm dan mencapai saturasi, dimana perubahan reaktivitas yang lebih besar lagi sudah tidak terjadi (konstan) pada nilai tertentu setelah ketebalan reflektor di atas 100 cm. Gambar 3 juga memperlihatkan fraksi *packing* TRISO yang tinggi menyebabkan perubahan reaktivitas teras UO_2 yang besar. Efek moderasi neutron berperan dalam kondisi ini. Tendensi seperti ini tidak dijumpai untuk teras PuO_2 (Gambar 4), situasi justru berkebalikan, fraksi *packing* TRISO yang tinggi menghasilkan perubahan reaktivitas teras yang kecil. Plutonium yang lebih banyak dimuatkan ke dalam teras tidak membuat perubahan reaktivitas menjadi lebih tinggi. Hal ini disebabkan oleh dominasi matriks grafit dalam zona bahan bakar plutonium dengan jumlah lebih kecil tidak memoderasi teras secara optimal.



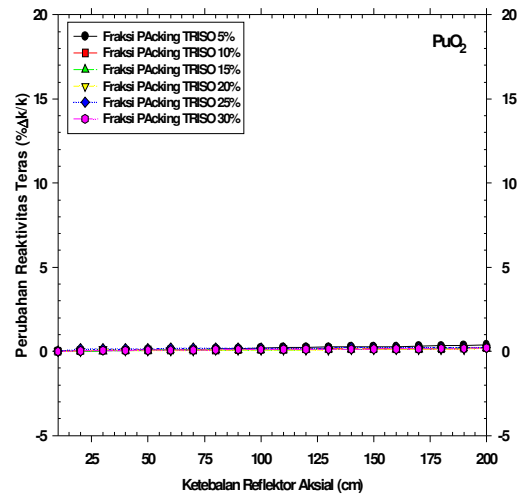
Gambar 5. Perubahan reaktivitas teras ThO₂/UO₂ RGTT200K sebagai fungsi ketebalan reflektor radial.

Kelakuan reaktivitas teras ThO₂/UO₂ tidak menyerupai teras UO₂ maupun teras PuO₂ seperti diilustrasikan dalam Gambar 5. Terlihat adanya ketidak-konsistenan antara fraksi *packing* TRISO dan perubahan reaktivitas. Pada fraksi *packing* TRISO 5-10% reaktivitas teras ThO₂/UO₂ mencapai titik tertinggi karena okupasi moderator grafit pada bahan bakar mencapai puncaknya. Secara keseluruhan dapat dikatakan perubahan reaktivitas teras karena fraksi *packing* TRISO tidak secara langsung menyebabkan efektivitas reflektor radial bertambah. Penambahan ketebalan reflektor radial adalah sebuah cara yang efektif untuk memperbaiki ekonomi neutron, namun penambahan ketebalan reflektor radial setelah mencapai 100 cm tidak memberikan pengaruh yang efektif terhadap perubahan reaktivitas teras. Oleh karena itu reflektor radial dengan ketebalan 100 cm sebaiknya digunakan untuk teras RGTT200K.

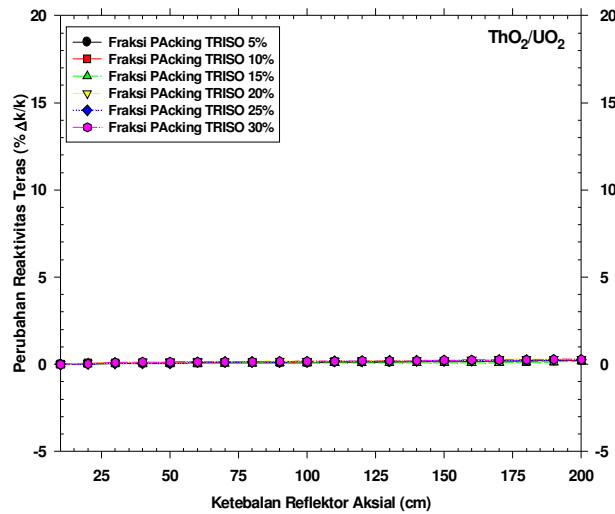
Investigasi efek reaktivitas yang diakibatkan oleh reflektor aksial dilakukan dengan membuat ketebalan reflektor radial tetap sebesar 100 cm sedangkan ketebalan reflektor aksial bagian atas dan bawah dibuat sama tetapi bervariasi dari 10 cm hingga 200 cm. Kurva yang diplot dari hasil perhitungan MCNPX disajikan dalam Gambar 6 dan didapatkan bahwa perubahan reaktivitas teras ($\Delta\rho$) pada UO₂ dengan berbagai fraksi *packing* TRISO relatif sangat kecil dan tetap untuk berbagai ketebalan reflektor aksial. Kecenderungan serupa diperoleh untuk teras PuO₂ (Gambar 7) maupun ThO₂/UO₂ (Gambar 8), perubahan reaktivitas teras ($\Delta\rho$) relatif sangat kecil dan tetap pada nilai tertentu untuk berbagai ketebalan reflektor aksial. Ini berarti penambahan ketebalan reflektor aksial tidak memberikan dampak yang signifikan pada perubahan reaktivitas teras RGTT200K. Namun demikian, walaupun sensitivitas kenaikan dalam ketebalan reflektor aksial tidak mempunyai dampak pada perubahan reaktivitas, reflektor aksial bagian atas dan bagian bawah dengan ketebalan masing-masing 100 cm sebaiknya dipilih untuk teras RGTT200K dengan spesifikasi geometri yang telah ditentukan, sesuai dengan ketebalan reflektor aksial yang dimiliki oleh HTR *pebble-bed* tipikal, seperti HTR-Module Jerman^[22].



Gambar 6. Perubahan reaktivitas teras UO_2 RGTT200K sebagai fungsi ketebalan reflektor aksial.



Gambar 7. Perubahan reaktivitas teras PuO_2 RGTT200K sebagai fungsi ketebalan reflektor aksial.



Gambar 8. Perubahan reaktivitas teras ThO_2/UO_2 RGTT200K sebagai fungsi ketebalan reflektor aksial.

5. KESIMPULAN

Analisis sensitivitas ketebalan reflektor grafit teras RGTT200K telah dilakukan dengan program transport Monte Carlo MCNPX menggunakan pustaka data tampang lintang energi kontinu ENDF/B-VI. Hasil perhitungan memperlihatkan perubahan reaktivitas teras RGTT200K karena fraksi *packing* TRISO tidak secara langsung menyebabkan efektivitas reflektor radial bertambah. Penambahan ketebalan reflektor radial setelah mencapai 100 cm tidak memberikan pengaruh yang berarti terhadap perubahan reaktivitas teras RGTT200K.

Adapun penambahan ketebalan reflektor aksial memberikan perubahan reaktivitas teras RGTT200K yang sangat kecil.

Dari analisis dapat disimpulkan bahwa, ketebalan efektif reflektor grafit radial dan aksial masing-masing sebesar 100 cm direkomendasikan untuk desain teras RGTT200K.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih kami sampaikan kepada Ir. Tagor M. Sembiring dan Ir. Iman Kuntoro, APU yang memberikan motivasi, saran dan sumbangan pemikiran dalam perbaikan makalah ini. Dukungan moral dari rekan-rekan Bidang Fisika dan Teknologi Reaktor (BFTR) – PTKRN BATAN, sangat kami apresiasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. B. TYOBEKA, "Status of IAEA Gas Cooled Reactor Technology Development Activities", TWG-GCR-23 Meeting, VIC-Vienna, 5-7 March 2013.
- [2]. R.A. SIMON and P.D. CAPP, "Operating Experience with the DRAGON High Temperature Reactor Experiment", Proceeding of the Conference on High Temperature Reactors, Petten, NL, April 22-24, 2002.
- [3]. NUCLEAR ENERGY AGENCY, "High Temperature Reactor Experience", Archived Documentation, IRPhE/AVR, 28 Nov 2008.
- [4]. S.K. GINTNER, "Thorium-based Fuel Cycles: Saving Uranium in a 200 MWth Pebble Bed High Temperature Reactor", North West University, Master of Engineering Thesis, October 27, 2010.
- [5]. GERHARD STRYDORM, "Reactor Physics Characterization of the HTR-Module with UCO Fuel", Idaho National Laboratory, INL/EXT-10-205521, January 2011.
- [6]. YULIAN SUN, "HTR Development Status in China", IAEA TWG-GCR Meeting, VIC-Vienna, 5-7 March, 2013.
- [7]. D. L. MOSES, "Very High-Temperature Reactor Proliferation Resistance and Physical Protection," Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-2010/163, August 2012.
- [8]. F. REITSMA, "Status of GCR programme in Republic of South Africa", TWG-GCR-23 Meeting, VIC-Vienna, 5-7 March 2013.
- [9]. "_____", "Status Report 101 – Gas Turbine High Temperature Reactor (GTHTR-300C)", last update: 21-7-2011.
- [10]. P. FOMICHENKO, "Status of HTGR Technologies in the Russian Federation: Problem of HTGR Implementation in Industrial Technology", TWG-GCR-23 Meeting, VIC-Vienna, 5-7 March 2013.
- [11]. J.C. GAUTHIER, G. BRINKMANN, B. COPSEY, M. LECOMTE, "ANTARES: The HTR/VHTR Project at Framatome ANP", The 2-nd International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology (HTR-2004), paper A10, Beijing, China, September 22-24, 2004.
- [12]. EUNG-SEON, KIM, "Status of HTGR Research and Development in Korea", Technical Meeting on High Temperature Qualification of HTGR Materials, VIC-Vienna, Austria, June 10-13, 2014.
- [13]. "_____", "Next Generation Nuclear Plant", U.S. Office of Nuclear Energy, April 2010.
- [14]. ZUHAIR, SUWOTO, "Studi Perhitungan Faktor Multiplikasi Reaktor Pebble-Bed Sebagai Fungsi Radius Kernel Bahan Bakar Pada Berbagai Pengayaan", Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir, Yogyakarta, ISSN 0216-3128, 14 Juli 2009.

- [15]. ZUHAIR, SUWOTO, "Analisis Perhitungan Koefisien Reaktivitas Temperatur Bahan Bakar dan Moderator Teras RGTT200K", Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Nuklir 2013, UNPAD-Bandung, ISSN: 1858-3601, 04 Juli 2013.
- [16]. ZUHAIR, SUWOTO, DAN PIPING SUPRIATNA, "Studi Efek Fraksi Packing TRISO Dalam Desain Kritikalitas RGTT200K", Seminar Nasional ke-17 tentang Teknologi Keselamatan PLTN dan Fasilitas Nuklir, Yogyakarta, ISSN: 0854-2910, 01 Oktober 2011.
- [17]. M. D. PURWADI, Desain Konseptual Sistem Reaktor Daya Maju Kogenerasi Berbasis RGTT (Prosiding Seminar Nasional Ke-16 Teknologi dan Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir, Surabaya, ISSN: 0854-2910, 28 Juli 2010.
- [18]. J.G. HOSKING, T.D. NEWTON, "Physics of Plutonium Recycling, Vol. VIII, Results of a Benchmark Considering a High Temperature Reactor (HTR) Fuelled with Reactor-grade Plutonium", NEA No. 6200, OECD/NEA, ISBN 978-92-64-99007-4, 2007.
- [19]. ZUHAIR, SUWOTO, PIPING SUPRIATNA, "Studi Efek Fraksi *Packing* TRISO Dalam Desain Kritikalitas RGTT200K", Prosiding Seminar Nasional Ke-17 Teknologi dan Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir, Yogyakarta, ISSN 0854-2910, 1 Oktober 2011.
- [20]. J.S. HENDRICKS, G.W. MCKINNEY *et al.*, "MCNPX 2.6.0 Extensions", LA-UR-08-2216, Los Alamos National Laboratory, April 11, 2008.
- [21]. J.S. HENDRICKS, S.C. FRANKLE, J.D. COURT, "ENDF/B-VI Data for MCNP", Los Alamos National Laboratory Report, LA-12891, 1994.
- [22]. H. NATHAN, "Pebble Bed Reactor Plant Design Description", Areva NP Inc., Doc. Num. 12-9149697-000, October 18, 2010.