

ANALISIS PERHITUNGAN KOEFISIEN REAKTIVITAS DOPPLER PARTIKEL TRISO REAKTOR TEMPERATUR TINGGI

Zuhair, Suwoto, Ign. Djoko Irianto

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir (PTRKN) BATAN

Kawasan Puspiptek, Gedung No. 80, Serpong – Tangerang 15310

Tel: (021) 7560912, Faks: (021) 7560913, Email: zuhairbasimeleh@yahoo.com

Masuk: 14 Januari 2011

Direvisi: 15 Februari 2011

Diterima: 1 April 2011

ABSTRAK

ANALISIS PERHITUNGAN KOEFISIEN REAKTIVITAS DOPPLER PARTIKEL TRISO REAKTOR TEMPERATUR TINGGI. Salah satu aspek keselamatan melekat HTR didasarkan pada koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar dan moderator yang negatif. Koefisien temperatur bahan bakar dikenal dengan sebutan koefisien reaktivitas Doppler. Makalah ini mendiskusikan perhitungan koefisien reaktivitas Doppler partikel TRISO dalam matriks grafit dengan program transport Monte Carlo MCNP5 dan pustaka tampang lintang energi kontinu ENDF/B-VII. Partikel TRISO dimodelkan dengan kisi BCC dimana kernel dan keempat lapisan coating disimulasikan secara eksplisit. Serangkaian perhitungan dikerjakan dengan fraksi packing TRISO yang berbeda dan temperatur kernel, T_F , yang berbeda pula. Temperatur matriks grafit, T_M , dijaga konstan pada 1200K. Hasil perhitungan memperlihatkan semakin tinggi temperatur bahan bakar, semakin rendah nilai kritikalitas (k) partikel TRISO. Dengan bertambahnya temperatur bahan bakar, reaktivitas partikel TRISO menurun untuk seluruh fraksi packing TRISO yang dipertimbangkan. Hasil perhitungan juga memperlihatkan koefisien reaktivitas Doppler menurun dengan naiknya temperatur bahan bakar dan meningkat dengan bertambahnya fraksi packing TRISO. Dapat disimpulkan bahwa, pemilihan fraksi packing TRISO dan temperatur operasi merupakan opsi penting dalam analisis desain keselamatan melekat reaktor temperatur tinggi.

Kata kunci: koefisien reaktivitas Doppler, partikel TRISO, BCC, MCNP5, ENDF/B-VII

ABSTRACT

ANALYSIS ON THE CALCULATION OF DOPPLER REACTIVITY COEFFICIENT FOR TRISO PARTICLE OF HIGH TEMPERATURE REACTOR. One of HTR inherent safety aspects is based on the negative fuel and moderator temperature reactivity coefficients. Fuel temperature coefficient is known as the Doppler reactivity coefficient. This paper discusses the calculation of the Doppler reactivity coefficient for TRISO particles in graphite matrix with MCNP5 Monte Carlo transport code and ENDF/B-VII continuous energy cross section library. TRISO particles are modeled as BCC lattice where the kernel and four coating layers are simulated explicitly. A series of calculations were done with different TRISO packing fraction and different temperature of the kernel, T_F . Temperature graphite matrix, T_M , is kept constant at 1200K. The calculation results show the higher the fuel temperature, the lower value of TRISO particles criticality (k). The increasing temperature of fuel, TRISO particle reactivity decreases for all considered TRISO packing fraction. The calculation results show also the Doppler reactivity coefficient decreases with rising of fuel temperature and increases with increasing of TRISO packing fraction. It can be concluded that the choice of TRISO packing fraction and operational temperature are important option in inherent safety design analysis of high temperature reactor.

Keywords: Doppler reactivity coefficient, TRISO particle, BCC, MCNP5, ENDF/B-VI

1. PENDAHULUAN

Reaktor temperatur tinggi (HTR) adalah reaktor nuklir berpendingin gas temperatur tinggi, bermoderator grafit dengan spektrum neutron termal dan temperatur *outlet* teras yang bisa mencapai 1000°C. Pengakuan yang terus bertambah atas karakteristik uniknya meliputi keselamatan melekat (*inherent safety*), fleksibilitas daur bahan bakar dan efisiensi termal yang tinggi, membuat HTR muncul sebagai kandidat untuk pasar pembangkit listrik di masa depan^[1]. Keselamatan melekat HTR didasarkan pada tingginya kapasitas termal grafit dan kemampuan struktur grafit dalam teras untuk mentransfer panas ke permukaan luar reaktor dengan konduksi dan radiasi dalam kondisi tidak adanya pendingin, juga pada koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar dan moderator yang negatif.

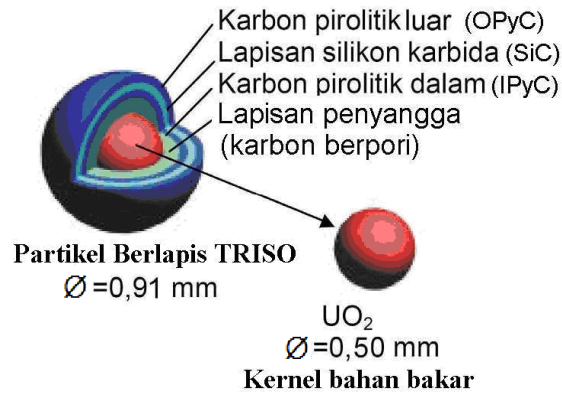
Koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar dan moderator adalah dua koefisien temperatur yang paling dominan dalam sistem reaktor nuklir. Koefisien temperatur bahan bakar mempunyai efek yang lebih besar daripada koefisien temperatur moderator untuk berbagai jenis reaktor. Koefisien temperatur bahan bakar secara umum dipertimbangkan menjadi lebih penting daripada koefisien temperatur moderator karena temperatur bahan bakar segera meningkat menyusul kenaikan daya reaktor. Dalam kejadian insersi reaktivitas positif yang besar, temperatur moderator tidak dapat menangani kenaikan daya dalam hitungan detik, tetapi koefisien temperatur dapat menstabilkan daya reaktor dengan insersi reaktivitas negatif secara cepat.

Koefisien temperatur bahan bakar dikenal dengan sebutan koefisien reaktivitas Doppler^[2]. Fenomena efek Doppler disebabkan oleh pelebaran resonansi akibat gerak termal nuklida. Jika inti bergerak menjauh dari neutron, kecepatan (dan energi) neutron harus lebih besar dari energi tertentu untuk mengalami absorpsi resonansi. Demikian pula, jika inti bergerak mendekati neutron, neutron membutuhkan energi kurang dari energi tertentu tadi untuk diserap. Isotop ²³⁸U dan ²⁴⁰Pu merupakan dua nuklida dalam jumlah besar di bahan bakar beberapa reaktor dengan puncak resonansi besar yang mendominasi efek Doppler.

Makalah ini mendiskusikan perhitungan koefisien reaktivitas Doppler partikel TRISO dalam matriks grafit dengan program transport Monte Carlo MCNP5^[3]. Program MCNP5 telah diaplikasikan secara luas untuk problema transport radiasi dan khususnya untuk perhitungan fisika reaktor nuklir. Partikel TRISO dimodelkan dengan kisi BCC^[4] (*body centered-cubic*) dimana kernel dan keempat lapisan *coating* disimulasikan secara eksplisit. Serangkaian perhitungan dikerjakan dengan fraksi *packing* TRISO (*TRISO Packing Fraction*, TPF) yang berbeda dan temperatur kernel, T_F , yang berbeda pula. Temperatur matriks grafit, T_M , dijaga konstan pada 1200K. Efek rasio atom moderator-bahan bakar (M/F) pada kritikalitas dan kelakuan koefisien reaktivitas Doppler yang dihitung dianalisis dengan memanfaatkan pustaka tampang lintang energi kontinu ENDF/B-VII^[5].

2. DESKRIPSI PARTIKEL TRISO

Partikel TRISO, yang skema geometriknnya diperlihatkan dalam Gambar 1, adalah basis konsep reaktor temperatur tinggi HTR. Partikel ini digunakan baik dalam desain HTR tipe blok prisma maupun HTR tipe *pebble-bed*. Dalam makalah ini, desain geometrik partikel TRISO serupa dengan desain partikel TRISO HTR-10^[6] Cina seperti diberikan dalam Tabel 1.



Gambar 1. Skema Geometrik Partikel TRISO

Tabel 1. Desain Geometrik Partikel TRISO

	Material	Radius luar (cm)	Densitas (g/cm ³)
Kernel	UO ₂	0,0250	10,4
Lapisan penyangga	Grafit	0,0340	1,1
Lapisan IPyC	Grafit pirolitik	0,0380	1,9
Lapisan SiC	Silikon karbida	0,0415	3,18
Lapisan OPyC	Grafit pirolitik	0,0455	1,9

Partikel TRISO terdiri atas kernel bahan bakar UO₂ berdiameter 250 µm dan berpengkayaan ²³⁵U 17% yang dikelilingi oleh empat lapisan *coating*: lapisan penyangga karbon, lapisan pirokarbon dalam (IPyC, *inner pyrolytic carbon*), lapisan silikon karbida (SiC) dan lapisan pirokarbon luar (OPyC, *outer pyrolytic carbon*). Masing-masing lapisan mempunyai ketebalan dan densitas tertentu.

Setiap lapisan *coating* memiliki fungsi spesifik dalam unjuk kerja bahan bakar, namun pada dasarnya keempat lapisan berfungsi mencegah terjadinya pelepasan produk fisi dalam bentuk gas maupun metalik dan menjaga integritas struktur selama kondisi normal maupun kecelakaan. Densitas atom partikel TRISO dan matriks grafit (Tabel 2 dan 3) dihitung dengan memasukkan faktor pengkayaan ²³⁵U dan mengadopsi data berat atom ²³⁵U= 235,0439; ²³⁸U= 238,0299; ¹⁶O= 15,9997; ¹²C= 12,0111; ²⁸Si= 28,0855. Impuritas boron alam dalam bahan bakar dan grafit adalah 1,3 ppm.

Tabel 2. Densitas Atom Partikel TRISO

	Isotop	Densitas atom (atom/barn.cm)
Kernel	²³⁵ U	3,992701×10 ⁻³
	²³⁸ U	1,924805×10 ⁻²
	¹⁶ O	4,648151×10 ⁻²
	¹⁰ B	1,840667×10 ⁻⁸
	¹¹ B	7,455633×10 ⁻⁸
Lapisan penyangga	¹² C	5,515175×10 ⁻²
Lapisan IPyC	¹² C	9,526211×10 ⁻²
Lapisan SiC	¹² C	4,772396×10 ⁻²
	²⁸ Si	4,772396×10 ⁻²
Lapisan OPyC	¹² C	9,526211×10 ⁻²

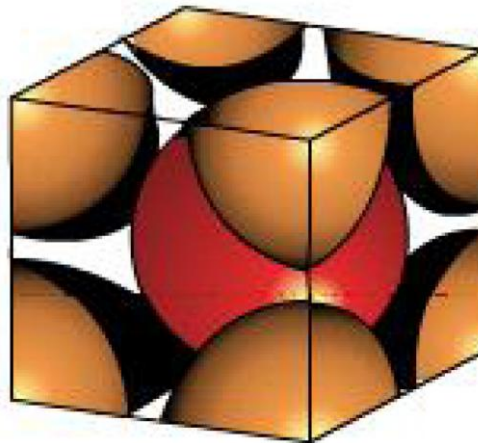
Tabel 3. Densitas Atom Matriks Grafit

	Isotop	Densitas atom (atom/barn.cm)
Matriks grafit	¹² C	$8,673866 \times 10^{-2}$
	¹⁰ B	$1,717425 \times 10^{-8}$
	¹¹ B	$6,956441 \times 10^{-8}$

3. PERHITUNGAN REAKTIVITAS DOPPLER

Perhitungan reaktivitas Doppler dimulai dengan memodelkan sel satuan partikel TRISO. Dalam program deterministik, perhitungan sel satuan umumnya digunakan untuk menentukan spektrum fluks neutron yang kemudian dimanfaatkan untuk mengkondensasi jumlah kelompok energi tampang lintang. Program *transport Monte Carlo* MCNP5 tidak membutuhkan kondensasi karena memanfaatkan tampang lintang energi kontinu.

Dalam MCNP5, problema transport neutron diselesaikan secara stokastik dengan mengakumulasi histori neutron. Pergerakan neutron secara langsung disimulasikan dengan probabilitas proses interaksi. Neutron mengalami beberapa interaksi dengan material seperti hamburan elastik atau inelastik sampai akhirnya diserap dalam reaksi (n, γ) atau reaksi fisi.



Gambar 2. Kisi BCC Partikel TRISO

Dalam teras reaktor yang besar dimana kebocoran neutron yang keluar dari teras adalah kecil, perhitungan reaktivitas Doppler partikel TRISO dapat mempersembahkan estimasi yang baik dari karakteristik teras. Setiap kernel dengan keempat lapisan *coating* disimulasikan secara eksplisit. Sel satuan partikel TRISO dalam matriks grafit dimodelkan dengan kisi BCC seperti diperlihatkan dalam Gambar 2. Dalam kisi BCC terdapat dua buah partikel TRISO yang terdiri dari satu buah ditempatkan di pusat kisi dan satu buah lainnya terbagi menjadi 8 bagian yang berada di delapan titik sudut kisi kubik.

Analisis perhitungan reaktivitas Doppler partikel TRISO dipresentasikan dengan fraksi *packing* TRISO yang berbeda pada berbagai temperatur kernel, T_F , yang berbeda pula. Temperatur matriks grafit, T_M , dipertahankan konstan pada 1200K. Fraksi *packing* TRISO didefinisikan sebagai fraksi volum partikel TRISO dalam matriks grafit^[7],

$$TPF = \frac{V_{TRISO}}{V_{MATRIKS}} \quad (1)$$

dengan V_{TRISO} dan $V_{MATRIKS}$ masing-masing adalah volum partikel TRISO dan matriks grafit. Dengan menentukan fraksi *packing* TRISO maka didapatkan volum matriks grafit dan dihitung ukuran *pitch* kisi BCC yang digunakan dalam perhitungan.

Fraksi *packing* TRISO memfasilitasi perubahan rasio atom moderator-bahan bakar (M/F) dalam partikel TRISO. Rasio atom M/F mempunyai pengaruh yang cukup signifikan dalam performa neutronik teras HTR. Dari fraksi *packing* TRISO yang dipilih dapat diperoleh rasio atom M/F mengikuti persamaan^[8],

$$\frac{M}{F} = \frac{TPF \times M_{TRISO} + (1 - TPF) \times M_{MATRIKS}}{TPF \times F_{TRISO}} \quad (2)$$

dimana,

$$M_{TRISO} = \sum_{n=1}^4 \frac{V_{coating\ n}}{V_{TRISO}} \times N_{coating\ n}^C \text{ atom} \quad (3)$$

$$F_{TRISO} = \frac{V_{fuel}}{V_{TRISO}} \times N_{fuel}^F \text{ atom} \quad (4)$$

dengan $V_{coating\ n}$ dan $N_{coating-n}^C$ masing-masing adalah volum dan densitas atom grafit lapisan *coating* ke- n , sedangkan V_{fuel} dan N_{fuel}^F masing-masing adalah volum dan densitas atom kernel bahan bakar ($^{235}\text{U} + ^{238}\text{U}$). $M_{MATRIKS}$ adalah densitas atom matriks grafit. Spesifikasi geometrik sel satuan partikel TRISO dalam perhitungan MCNP5 disajikan dalam Tabel 4.

Tabel 4. Spesifikasi Geometrik Sel Satuan Partikel TRISO

TPF (%)	<i>Pitch</i> kisi BCC (cm)	Rasio atom M/F
1	0,428985	2243,29
5	0,250872	443,32
10	0,199117	218,32
15	0,173945	143,32
20	0,158040	105,82
25	0,146711	83,32
30	0,138060	68,32
35	0,131145	57,61

Koefisien reaktivitas Doppler didefinisikan sebagai perubahan reaktivitas per derajat temperatur bahan bakar. Koefisien reaktivitas Doppler partikel TRISO dapat dihitung dari persamaan^[9],

$$\alpha_{T_F}^D = \frac{\Delta\rho}{\Delta T_F} = \frac{\rho_{T_{F,2}} - \rho_{T_{F,1}}}{T_{F,1} \times T_{F,2}} \quad (5)$$

dengan $\rho_{T_{F,1}}$ dan $\rho_{T_{F,2}}$ masing-masing adalah reaktivitas pada temperatur bahan bakar $T_{F,1}$ dan $T_{F,2}$. Besaran reaktivitas (ρ), didefinisikan sebagai,

$$\rho = \frac{k - 1}{k} \quad (6)$$

dengan k adalah kritikalitas.

4. HASIL PERHITUNGAN DAN DISKUSI

Sebanyak 5.000 histori neutron per siklus dengan total 100 siklus aktif disimulasikan dan menghasilkan deviasi standar dalam kritikalitas lebih kecil dari 0,112%. *Skipping* 10 siklus dikerjakan untuk menghindari konvergensi sumber. Sumber neutron fisi awal diletakkan pada pusat kisi partikel TRISO. 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. Kondisi batas reflektif digunakan di seluruh enam permukaan sisi dari sel satuan partikel TRISO. Pustaka data tampang lintang energi neutron kontinyu untuk temperatur 300-1800K diderivasi dari pemrosesan menggunakan modul ACER dalam program pengolah data NJOY99.304^[10].

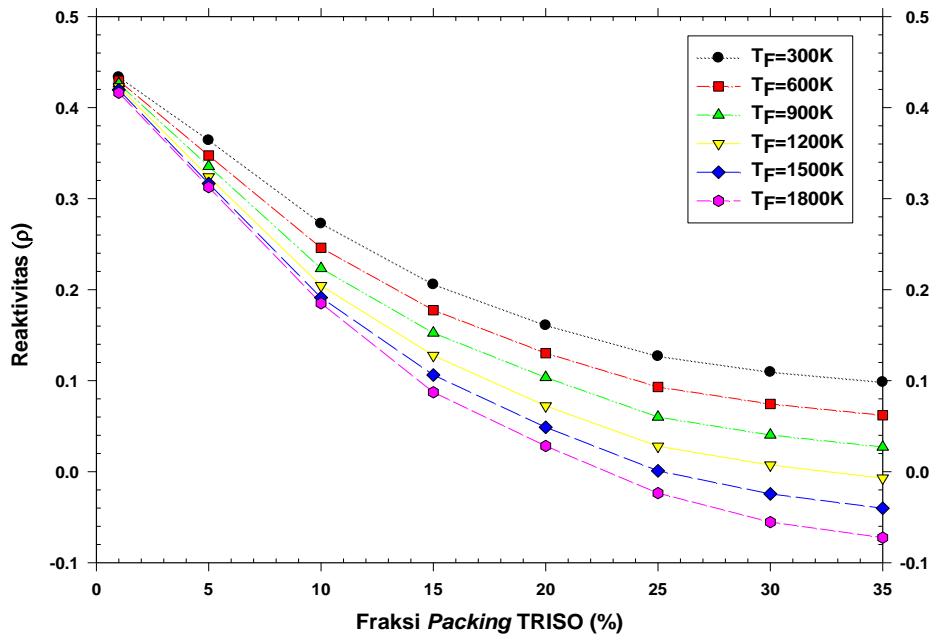
Tabel 5. Kritikalitas Partikel TRISO dalam Matriks Grafit

TPF (%)	Nilai kritikalitas (<i>k</i>) pada temperatur bahan bakar (T_F):					
	300K	600K	900K	1200K	1500K	1800K
1	1,76512±0,00063	1,75314±0,00063	1,74278±0,00079	1,73264±0,00070	1,72289±0,00073	1,71338±0,00074
5	1,57242±0,00107	1,53237±0,00107	1,50478±0,00099	1,47915±0,00120	1,46335±0,00114	1,45496±0,00108
10	1,37477±0,00108	1,32619±0,00109	1,28753±0,00112	1,25689±0,00104	1,23643±0,00115	1,22701±0,00111
15	1,25895±0,00105	1,21567±0,00101	1,17983±0,00096	1,14634±0,00102	1,11881±0,00107	1,09559±0,00105
20	1,19163±0,00100	1,14978±0,00103	1,11555±0,00093	1,07785±0,00116	1,05129±0,00099	1,02906±0,00111
25	1,14523±0,00103	1,10258±0,00097	1,06389±0,00096	1,02878±0,00095	1,00089±0,00098	0,97698±0,00094
30	1,12299±0,00089	1,08037±0,00092	1,04199±0,00092	1,00738±0,00089	0,97617±0,00089	0,94754±0,00088
35	1,10912±0,00078	1,06614±0,00099	1,02782±0,00075	0,99295±0,00078	0,96134±0,00081	0,93245±0,00083

Hasil perhitungan kritikalitas partikel TRISO dalam matriks grafit dirangkum dalam Tabel 5. Untuk seluruh kasus yang dipertimbangkan, nilai kritikalitas (*k*) cenderung berkurang dengan bertambahnya fraksi *packing* TRISO. Hal ini sebagai konsekuensi dari rasio atom moderator-bahan bakar (M/F) yang makin rendah. Isotop ²³⁵U yang jumlahnya banyak dalam partikel TRISO tidak membuat nilai kritikalitas (*k*) menjadi tinggi, tetapi justru sebaliknya. Moderasi neutron yang kurang baik karena rasio atom M/F yang rendah memberi efek dominan yang membuat kritikalitas mengecil. Untuk seluruh perhitungan tampak pula kecenderungan semakin tinggi temperatur bahan bakar (T_F) semakin rendah nilai kritikalitas (*k*) partikel TRISO (Gambar 3).

Reaktivitas memperlihatkan kelakuan yang sama sebagaimana kritikalitas, yaitu dengan bertambahnya temperatur, reaktivitas partikel TRISO menurun untuk seluruh fraksi *packing* TRISO. Fraksi *packing* TRISO HTR tipe *pebble-bed* bervariasi antara 5 hingga 10% sedangkan dalam kasus HTR tipe blok prismatic, fraksi *packing* TRISO sekitar 30%. Berkurangnya reaktivitas partikel TRISO disebabkan oleh pelebaran resonansi isotop ²³⁸U karena agitasi termal yang meningkat dari nuklida yang menjauhi neutron. Kenaikan temperatur membuat nuklida bervibrasi lebih cepat dalam struktur kisinya, melebarkan jangkauan energi neutron yang secara resonansi diserap dalam bahan bakar.

Dalam teras berbahan bakar uranium, rasio tangkapan-fisi ²³⁵U ($\sigma_c^{U235} / \sigma_f^{U235}$) tetap konstan untuk seluruh jelajah temperatur, namun ketika temperatur bahan bakar naik, menyebabkan ²³⁸U mengabsorpsi neutron jauh lebih banyak daripada proses fisi. Implikasinya tangkapan radiatif ²³⁸U meningkat dan pada akhirnya dapat ditemui bahwa rasio tangkapan ²³⁸U-fisi ²³⁵U ($\sigma_c^{U238} / \sigma_f^{U235}$) makin bertambah yang mendorong reaktivitas menurun.



Gambar 3. Reaktivitas Partikel TRISO sebagai Fungsi Fraksi Packing dan Temperatur Kernel Bahan Bakar

Hasil perhitungan koefisien reaktivitas Doppler partikel TRISO dirangkum dalam Tabel 6. Tabel ini mendemonstrasikan koefisien reaktivitas Doppler yang menurun dengan meningkatnya temperatur. Tabel ini juga menunjukkan kelakuan reaktivitas Doppler yang lebih halus dengan penurunan relatif cukup kecil ($< 3,0 \times 10^{-7} \Delta k/k/K$) untuk temperatur di atas 900K pada fraksi *packing* TRISO 1%. Efek Doppler menggenerasi umpan balik reaktivitas sebesar $-1,29 \times 10^{-5}$ hingga $-1,21 \times 10^{-4} \Delta k/k/K$ pada kondisi dingin (*cold*) dan hanya $-1,09 \times 10^{-5}$ hingga $-1,10 \times 10^{-4} \Delta k/k/K$ pada temperatur operasional 1500 K.

Tabel 6. Koefisien Reaktivitas Doppler Partikel TRISO

TPF (%)	Koefisien reaktivitas Doppler ($\alpha_{T_F}^D, \Delta k/k/K$) pada temperatur bahan bakar (T_F):				
	300-600K	600-900K	900-1200K	1200-1500K	1500-1800K
1	$-1,29 \times 10^{-5}$	$-1,13 \times 10^{-5}$	$-1,12 \times 10^{-5}$	$-1,09 \times 10^{-5}$	$-1,07 \times 10^{-5}$
5	$-5,54 \times 10^{-5}$	$-3,99 \times 10^{-5}$	$-3,84 \times 10^{-5}$	$-2,43 \times 10^{-5}$	$-1,31 \times 10^{-5}$
10	$-8,88 \times 10^{-5}$	$-7,55 \times 10^{-5}$	$-6,31 \times 10^{-5}$	$-4,39 \times 10^{-5}$	$-2,07 \times 10^{-5}$
15	$-9,43 \times 10^{-5}$	$-8,33 \times 10^{-5}$	$-8,25 \times 10^{-5}$	$-7,16 \times 10^{-5}$	$-6,31 \times 10^{-5}$
20	$-1,02 \times 10^{-4}$	$-8,90 \times 10^{-5}$	$-1,05 \times 10^{-4}$	$-7,81 \times 10^{-5}$	$-6,85 \times 10^{-5}$
25	$-1,13 \times 10^{-4}$	$-1,10 \times 10^{-4}$	$-1,07 \times 10^{-4}$	$-9,03 \times 10^{-5}$	$-8,15 \times 10^{-5}$
30	$-1,17 \times 10^{-4}$	$-1,14 \times 10^{-4}$	$-1,10 \times 10^{-4}$	$-1,06 \times 10^{-4}$	$-1,03 \times 10^{-4}$
35	$-1,21 \times 10^{-4}$	$-1,17 \times 10^{-4}$	$-1,14 \times 10^{-4}$	$-1,10 \times 10^{-4}$	$-1,07 \times 10^{-4}$

Dari Tabel 6 dapat diobservasi pula, nilai koefisien reaktivitas Doppler meningkat dengan bertambahnya fraksi *packing* TRISO yang menjelaskan mengapa koefisien reaktivitas Doppler teras HTR prismatik ($-1,17 \times 10^{-4}$ hingga $-1,03 \times 10^{-4} \Delta k/k/K$) lebih besar daripada teras HTR *pebble-bed* ($-5,54 \times 10^{-5}$ hingga $-1,31 \times 10^{-5} \Delta k/k/K$). Isotop ^{238}U dalam inventori bahan bakar yang besar karena fraksi *packing* yang besar membuat koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar menjadi lebih negatif lagi.

5. KESIMPULAN

Analisis perhitungan koefisien reaktivitas Dopler partikel TRISO reaktor temperatur tinggi telah dilakukan dengan program transport Monte Carlo MCNP5 dan pustaka data nuklir energi kontinu ENDF.B-VII.

Hasil perhitungan memperlihatkan bahwa semakin tinggi temperatur bahan bakar, semakin rendah nilai kritikalitas (k) partikel TRISO. Bertambahnya temperatur bahan bakar akan menurunkan reaktivitas partikel TRISO menurun untuk seluruh fraksi *packing* TRISO yang dipertimbangkan. Koefisien reaktivitas Dopler menurun dengan meningkatnya temperatur bahan bakar dan bertambahnya fraksi *packing* TRISO.

Pemilihan fraksi *packing* TRISO dan temperatur operasi merupakan opsi penting dalam analisis desain keselamatan melekat reaktor temperatur tinggi.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih kami sampaikan kepada Dr. Ir. M. Dhandhang Purwadi yang memberikan inspirasi dan motivasi untuk melakukan riset ini. Ucapan terimakasih juga kami sampaikan kepada Dr. June Mellawati dan Ir. Edwaren Liun yang menyediakan waktu, pikiran dan saran dalam perbaikan makalah ini. Dukungan dan saran yang amat berarti dari rekan-rekan di Bidang Pengembangan Reaktor-PTRKN BATAN, sangat kami hormati.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. INEEL, "NGPG Point Design-Results of the Initial Neutronics and Thermal-Hydraulic Assessment During FY-03", INEEL, September 2003.
- [2]. U.S. Department of Energy, "DOE Fundamentals Handbook, Nuclear Physics and Reactor Theory", DOE-HDBK-1019/1-93, U.S. Department of Energy, Washington D.C. 20585, January 1993.
- [3]. BROWN, F.B, et al., "MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5", LA-UR-03-1987, April 24, 2003.
- [4]. _____, Body Centered Cubic, <http://departments.kings.edu/chemlab/animation/bcc.html>, 7 Januari, 2011.
- [5]. CHADWICK, M.B., OBLOZINSKY, P., HERMAN, M. et al., "ENDF/B-VII: Next Generation Evaluated Nuclear Data Library for Nuclear Science and Technology", Nuclear Data Sheets, Vol. 107, pp. 2931-3060, 2006.
- [6]. XING JING and YULIANG SUN, "Results on Benchmark Problem of the HTR-10 Initial Core", Third Research Coordination Meeting of the IAEA CRP-5, Oarai, Japan, 2001.
- [7]. BECKER, B., "On the Influence of the Resonance Scattering Treatment in Monte Carlo Codes on High Temperature Reactor Characteristics", Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) Dissertation, Institut fuer Kernenergetik und Energiesysteme, Universitaet Stuttgart, Juni 2010.
- [8]. LEWIS III, T. G., "Analysis of TRU-Fueled VHTR Prismatic Core Performance Domains", Master of Science Thesis, Texas A&M University, December 2007.
- [9]. STACEY, W.M., "Nuclear Reactor Physics", Wiley-VCH, Book 2-Edition, July 2007.
- [10]. MC FARLANE, R.E., MUIR, D. M., "NJOY99.0: Code System for Producing Pointwise and Multigroup Neutron and Photon Cross Sections from ENDF/B Data", LANL, PSR-480, 2000.