

PEMODELAN PARTIKEL BAHAN BAKAR BERLAPIS DALAM KISI SC, BCC, DAN FCC UNTUK PERHITUNGAN FAKTOR MULTIPLIKASI INFINIT RGTT MENGGUNAKAN PROGRAM MCNP 5

Maman Mulyaman, Suwoto dan Zuhair

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir BATAN
Kawasan PUSPIPTEK Gd. 80, Serpong, Tangerang Selatan, 15310
Email : mamanmulyaman@yahoo.com

ABSTRAK

PEMODELAN PARTIKEL BAHAN BAKAR BERLAPIS DALAM KISI SC, BCC, DAN FCC UNTUK PERHITUNGAN FAKTOR MULTIPLIKASI INFINIT MENGGUNAKAN PROGRAM MCNP 5. Dalam desain reaktor nuklir berpendingin gas temperatur tinggi (RGTT), pemodelan bahan bakar berlapis (*coated fuel particle*) memegang peranan yang cukup penting untuk menentukan dan mengoptimasi kuantitas fisika seperti kritikalitas, reaktivitas, distribusi spasial daya dan temperatur, panas peluruhan, deplesi dan fraksi bakar bahan bakar. Sejumlah teknik dan metode pendekatan sel yang dihomogenisasi, secara ekivalen telah diadopsi dalam perhitungan deterministik. Metode konvensional ini digunakan dalam analisis neutronik RGTT pada tahun-tahun awal pengembangan RGTT itu sendiri. Hasil-hasil yang cukup baik memang telah dicapai, tetapi untuk metode konvensional desain unik RGTT dengan partikel bahan bakar berlapis TRISO memerlukan prediksi yang lebih akurat dari segi karakteristik neutronik. Tantangan lain adalah terdapat lebih dari 10^{10} partikel berlapis dalam konfigurasi reaktor tipikal dengan kesulitan mengidentifikasi partikel bahan bakar berlapis secara individual dalam matriks grafit. Sebagai alternatif metode deterministik, metode Monte Carlo kemudian menjadi solusi walaupun secara praktis memiliki kendala waktu. Dalam makalah ini, partikel bahan bakar berlapis yang terdistribusi secara stokastik dalam bahan bakar *pebble bed* dimodelkan ke dalam kisi SC (*simple cubic*), BCC (*body centered cubic*), dan FCC (*face centered cubic*) untuk memprediksi kritikalitas RGTT. Perhitungan dengan program transport Monte Carlo MCNP5 dilakukan untuk RGTT berbahan bakar UO_2 dengan pengkayaan U^{235} 10% dan packing factor 0,3. Model susunan infinit bahan bakar *pebble bed* dimanfaatkan dalam perhitungan ini dengan kondisi batas reflektif. Hasil perhitungan memperlihatkan nilai faktor multiplikasi infinit (k_{∞}) untuk kisi SC dengan pustaka data nuklir rmccs, endf60c, dan endf66c masing-masing: $1,0107 \pm 0,0031$; $1,0085 \pm 0,0028$; dan $1,0097 \pm 0,0029$. Sedangkan untuk kisi BCC dan FCC dengan pustaka data nuklir yang sama masing-masing adalah: $1,2026 \pm 0,0029$; $1,2025 \pm 0,0032$; $1,1938 \pm 0,0038$; dan $1,2056 \pm 0,0035$, $1,2002 \pm 0,0027$, $1,2046 \pm 0,0031$. Dari hasil-hasil ini dapat disimpulkan bahwa kisi SC menghasilkan k_{∞} yang lebih rendah 18,98%, sedangkan kisi BCC dan kisi FCC menghasilkan nilai k_{∞} yang hampir sama yaitu 0,25%.

Kata kunci: model kisi, fraksi packing, k_{∞} , RGTT

ABSTRACT

MODELLING OF COATED FUEL PARTICLE IN SC, BCC, AND FCC LATTICE FOR CALCULATION OF INFINITE MULTIPLICATION FACTOR USING MCNP 5 PROGRAM. In a high temperature gas-cooled nuclear reactor design (RGTT), modeling of coated fuel particle plays an important role to determine and optimize physical quantities such as criticality, reactivity, power and temperature spatial distribution, decay heat, depletion and fuel burn-up. There are some technique and method of homogenized cell approximation equivalently have been adopted in deterministic calculation. This conventional method is used in RGTT neutronic analysis in the initial year of its RGTT. The good results been achieved, but for conventional method, a RGTT unique design with TRISO coated fuel particle needs more accurate prediction from neutronic characteristic side. A challenge to identify coated fuel particle individually in graphite matrix. As alternative of deterministic method, Monte Carlo method becomes then a solution although it practically has time barrier. In this paper, coated fuel particle stochastically distributed in pebble bed fuel is modeled into SC (*simple cubic*), BCC (*body centered cubic*), and FCC (*face centered cubic*) lattices to predict RGTT critically. The calculation using Monte Carlo transport code MCNP5 has been carried for UO_2 fueled RGTT with U^{235} enrichment of 10% and packing fraction of 0.3. Modeling of infinity array of pebble bed fuel was utilized in this calculation with reflective boundary condition. The calculation results show infinite multiplication factor value (k_{∞}) for SC lattice with rmccs, endf60c, and endf66c nuclear data library are $1,0107 \pm 0,0031$; $1,0085 \pm 0,0028$; and $1,0097 \pm 0,0029$, respectively. While for BCC and FCC lattice with the same nuclear data library are $1,2026 \pm 0,0029$; $1,2025 \pm 0,0032$; $1,1938 \pm 0,0038$; dan $1,2056 \pm 0,0035$, $1,2002 \pm 0,0027$, $1,2046 \pm 0,0031$, respectively. From these results it

can be concluded that SC lattice produces RGTT criticality with lower k_{∞} is 18.98%, while BCC and FCC lattice almost the same produce k_{∞} values is 0.25%.

Keywords: lattice model, packing fraction, k_{∞} , RGTT.

PENDAHULUAN

Dari titik pandang historik reaktor gas temperatur tinggi (RGTT) adalah reaktor bertemperatur tinggi, berpendingin gas helium dan moderatornya adalah grafit. Reaktor berpendingin gas dimulai sejak tahun 1950. Pada tahun 1964, reaktor gas temperatur tinggi DRAGON dibangun. Reaktor gas temperatur tinggi telah dikembangkan dalam kurun waktu 50 tahun. Sedangkan konsep reaktor gas temperatur tinggi modular (*Modular High Temperature Gas-cooled Reactor*, MHTGR) telah dilakukan lebih dari 25 tahun, dan pada tahun 2000 jenis MHTGR telah terealisasi dengan telah beroperasinya HTR 10 di China^[1].

Reaktor gas temperatur tinggi berpendingin helium khususnya dari jenis modular mempunyai keistimewaan dalam hal kemampuan keselamatan inheren/pasifnya, temperatur keluaran gas yang tinggi menghasilkan efisiensi yang tinggi dalam konversi ke listrik dan dapat diaplikasikan pada produksi hidrogen, untuk pemompaan sumur minyak, ekstraksi batubara, dan proses-proses kimia lainnya.

Selain hal tersebut di atas reaktor gas temperatur tinggi juga mempunyai resistansi proliferasi serta bahan bakar bekasnya yang dapat meminimisasi proses daur ulang. Kelebihan ini berasal dari desain bahan bakar unik kernel uranium oksida (UO_2) yang sangat kecil dengan diameter 0,091 cm dengan lapisan (*coating*) ganda piro carbon (PyC), silikon karbida (SC) dan penyangga karbon berpori (C) dalam kisi matrik grafit.

Dalam desain reaktor nuklir berpendingin gas temperatur tinggi (RGTT), pemodelan bahan bakar berlapis (*coated fuel particle*) memegang peranan yang cukup penting untuk menentukan dan mengoptimasi kuantitas fisika seperti kritikalitas, reaktivitas, distribusi spasial daya dan temperatur, panas peluruhan, deplesi dan fraksi bakar bahan bakar, dan lain-lain. Model yang diterapkan harus sedekat mungkin dengan geometri nyata dengan densitas dan komposisi material yang benar. Mengambil kelebihan kapabilitas program transport neutron Monte Carlo MCNP5^[2] untuk pemodelan geometri struktur kisi, perhitungan kritikalitas kernel bahan bakar dalam matrik grafit dilakukan sebagai riset awal sebelum memodelkan dan melakukan perhitungan konfigurasi teras penuh reaktor berpendingin gas temperatur tinggi.

Sejumlah teknik dan metode pendekatan sel yang dihomogenisasi, secara ekivalen telah diadopsi dalam perhitungan deterministik. Metode

konvensional ini digunakan dalam analisis neutronik RGTT pada tahun-tahun awal pengembangan RGTT itu sendiri. Hasil-hasil yang cukup baik memang telah dicapai, tetapi untuk metode konvensional desain unik RGTT dengan partikel bahan bakar berlapis TRISO memerlukan prediksi yang lebih akurat dari segi karakteristik neutronik. Tantangan lain adalah terdapat lebih dari 10^{10} partikel berlapis dalam konfigurasi reaktor tipikal dengan kesulitan mengidentifikasi partikel bahan bakar berlapis secara individual dalam matriks grafit. Sebagai alternatif metode deterministik, metode Monte Carlo kemudian menjadi solusi walaupun secara praktis memiliki kendala waktu.

Sebelum ini telah dilakukan pemodelan kernel bahan bakar dalam kisi matrik grafit untuk perhitungan kritikalitas VHTR dengan MCNP5^[3]. Dalam pemodelan tersebut, menggunakan kernel bahan bakar uranium oksida karbida (UCO) dengan lapisan (*coating*) ganda piro karbon (PyC), silikon karbida (SC) dan penyangga karbon berpori (C) dalam kisi matrik grafit. Distribusi stokastik dari kernel bahan bakar dimodelkan sedekat mungkin dengan geometri nyata untuk menangani keacakan dari lokasi kernel bahan bakar dalam matrik grafit. Ada tiga model kisi kernel bahan bakar yang digunakan dalam kisi matrik grafit untuk memprediksi kritikalitas (k_{eff}) VHTR dalam konfigurasi reaktor infinit, yaitu; kisi SC, BCC, dan FCC.

Sebagai tindak lanjut dari pemodelan kernel bahan bakar kisi matrik grafit untuk perhitungan kritikalitas VHTR dengan MCNP5, maka dalam makalah ini, telah dilakukan pemodelan partikel bahan bakar berlapis yang terdistribusi secara stokastik dalam bahan bakar *pebble bed* yang dimodelkan ke dalam kisi SC (*simple cubic*), BCC (*body centered cubic*), dan FCC (*face centered cubic*) dimasukkan ke dalam bola grafit berongga (*pebble bed*) untuk menghitung faktor multiplikasi infinit (k_{∞}) RGTT. Perhitungan dengan program transport Monte Carlo MCNP5 dilakukan untuk RGTT berbahan bakar UO_2 dengan pengkayaan U^{235} 10% dan fraksi *packing* 0,3. Model *infinity array* bahan bakar *pebble bed* dimanfaatkan dalam perhitungan ini dengan kondisi batas reflektif. Selain itu untuk melengkapi analisis kritikalitas memanfaatkan pustaka data tampang lintang neutron rmccs/B-V^[4], endf60c/B-VI^[5] dan endf66c/B-VI.

TEORI

Neutron yang dihasilkan dari suatu reaksi fisi merupakan neutron cepat yang akan. Neutron tersebut akan diperlambat oleh moderator menjadi neutron thermal (lambat), namun tidak semua neutron hasil fisi berubah menjadi neutron lambat, ada sebagian neutron cepat yang mengalami kebocoran ke luar reaksi dan sebagian lagi diserap oleh bahan non fisil. Setelah mengalami difusi, tidak seluruh neutron termal terserap oleh U^{235} , tetapi sebagian diserap oleh bahan non fisil dan sebagian lagi mengalami kebocoran keluar reaksi. Begitu juga dengan neutron yang terserap oleh U^{235} , tidak semua neutron menghasilkan reaksi fisi, tetapi ada sebagai neutron menghasilkan U^{236} . Hal tersebut akan terus berulang.

Pengertian kritikalitas adalah suatu keadaan pada bahan fisil (bahan dapat belah) di mana neutron yang dihasilkan dalam reaksi pembelahan berada dalam jumlah yang cukup untuk mempertahankan reaksi rantai secara terus menerus. Penghitungan kekritisitas (k_{eff}) mencakup perhitungan jumlah rata-rata neutron fisi yang dihasilkan dalam suatu generasi untuk tiap-tiap sumber neutron fisi. Yang dimaksud satu generasi adalah masa hidup neutron dari saat ia dilahirkan dari suatu fisi sampai dengan hilang karena lolos dari sistem, tangkapan parasitik, atau absorpsi yang akan menimbulkan fisi berikutnya.

Dalam program transport Monte Carlo, kekritisitas (k_{eff}) didefinisikan sebagai^[5]:

$$k_{eff} = \frac{\text{neutron fisi pada generasi ke } i + 1}{\text{neutron fisi pada generasi ke } i} \quad (1)$$

Program transport Monte Carlo menggunakan 3 buah nilai keff yang berbeda yang disebut sebagai estimator. Ketiga estimator tersebut adalah:

1. Estimator tumbukan (k_{eff}^c) adalah jumlah neutron yang dihasilkan dari seluruh proses fisi dalam tumbukan, atau merupakan jumlah rata-rata neutron fisi yang dihasilkan tiap siklus melalui proses tumbukan. Estimator tumbukan ditulis dalam persamaan:

$$k_{eff}^c = \frac{1}{N} \sum_i W_i \left[\frac{\sum_k f_k \bar{v}_k \sigma_{fk}}{\sum_k f_k \sigma_{Tk}} \right] \quad (2)$$

Dimana :

i = jumlah tumbukan dalam satu siklus

k = jumlah nuklida

σ_{Tk} = totalampang lintang mikroskopis

σ_{fk} = tampang lintang fisi mikroskopis

\bar{v}_k = jumlah rata-rata neutron hasil fisi

f_k = fraksi atom

W_i = berat partikel

Estimator ini memberikan estimasi harga k_{eff} yang terbaik untuk sistem yang sangat besar.

2. Estimator serapan (k_{eff}^A) adalah estimator yang dihitung setiap kali terjadi interaksi antar neutron dengan inti bahan dapat belah. Estimator serapan ditulis dalam bentuk persamaan:

$$k_{eff}^A = \frac{1}{N} \sum W_i' \bar{v}_k \frac{\sigma_{fk}}{\sigma_{ck} + \sigma_{fk}} \quad (3)$$

dimana:

$$W_i' = W_i \frac{\sigma_{ck} + \sigma_{fk}}{\sigma_{fk}}$$

Estimator ini memberikan estimasi harga k_{eff} dengan kesalahan terkecil pada sistem reaktor termal.

3. Estimator panjang jejak (k_{eff}^{TL}) adalah estimator yang dihitung setiap kali neutron berpindah tempat di dalam bahan dapat belah pada suatu jarak tertentu. Estimator panjang jejak dapat ditulis dalam persamaan:

$$k_{eff}^{TL} = \frac{1}{N} \sum W_i \rho d \sum f_k \bar{v}_k \sigma_{fk} \quad (4)$$

dimana:

i = jumlah lintasan neutron

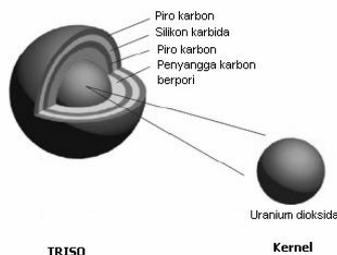
ρ = densitas atom

d = panjang jejak lintasan

Dalam teori reaktor, selain faktor multiplikasi efektif (kekritisitas efektif) ada juga faktor multiplikasi infinit (kekritisitas infinit, k_{∞}). Hal yang membedakan faktor multiplikasi infinit dibandingkan dengan faktor multiplikasi efektif, bahwa pada faktor multiplikasi infinit (k_{∞}) tidak terjadi kebocoran neutron.

DESKRIPSI KERNEL BAHAN BAKAR

Konsep desain teras reaktor berpendingin gas temperatur tinggi dengan bahan bakar tipe *Pebble* menggunakan bahan bakar *TRistructural-ISOtropic* (TRISO) yang terdiri atas partikel bahan bakar berlapis. Partikel bahan bakar berlapis RGTT dikomposisikan oleh kernel uranium oksida UO_2 berpengkayaan U^{235} 10% yang dilapisi oleh penyangga karbon berpori (*porous carbon buffer*, C), piro karbon bagian dalam (*inner pyrolytic carbon*, IPyC), silikon karbida (SiC), dan piro karbon bagian luar (*outer pyrolytic carbon*, OPyC). Geometri partikel berlapis TRISO dan parameter *pebble* diperlihatkan masing-masing pada Gambar 1 dan Tabel 1.



Gambar 1. Geometri partikel bahan bakar berlapis TRISO untuk RGTT

Setiap lapisan partikel TRISO memiliki fungsi spesifik dalam unjuk kerja bahan bakar, salah satu diantaranya adalah mencegah kebocoran produk fisi dalam bentuk gas maupun metalik dan menjaga integritas struktur selama kondisi normal maupun kecelakaan. Partikel berlapis tersebar dalam matrik grafit dan terdistribusi secara acak dalam sel *pebble* bahan bakar. Dalam sebuah sel *pebble* terdapat puluhan ribu partikel berlapis TRISO.

Tabel 1. Parameter desain bahan bakar *pebble bed*

	Radius luar (cm)	Komposisi	Densitas (g/cm ³)
Partikel bahan bakar berlapis:	0,025	UO ₂	11,0
Kernel uranium oksida			
Lapisan penyangga karbon berpori	0,034	C	1,1
Lapisan piro karbon bagian dalam	0,038	C	1,9
Lapisan silikon karbida	0,0415	SiC	3,2
Lapisan piro karbon bagian luar	0,0455	C	1,9
<i>Pebble:</i>			
Rongga <i>Pebble</i>	2,5	-	-
Lapisan luar <i>Pebble</i>	3,0		1,73

MODEL PERHITUNGAN KRITIKALITAS

Dalam desain reaktor nuklir, analisis neutronik dibutuhkan untuk menentukan dan mengoptimasikan kuantitas fisika seperti reaktivitas, distribusi spasial dari gaya dan temperatur, panas peluruhan, deplesi dan fraksi bakar bahan bakar. Banyak metode analisis yang dikembangkan untuk mendapatkan kuantitas-kuantitas ini di setengah abad yang lampau^[6,7] termasuk beberapa metode aproksimasi klasik dalam menyelesaikan persamaan transpor Boltzmann seperti teori difusi multi kelompok, metode probabilitas tumbukan, dan lain-lain.

Ada sejumlah teknik dan metode yang menangani sel heterogenitas dengan melakukan

transformasi ke sel yang dihomogenisasi secara ekuivalen, seperti teori ekuivalensi dan perisai diri gayut energi. Metode konvensional ini telah digunakan dalam analisis neutronik reaktor berpendingin gas di tahun-tahun awal pengembangan reaktor berpendingin gas. Hasil-hasil yang cukup baik memang telah dicapai, namun desain unik dari reaktor berpendingin gas dengan bahan bakar TRISO memunculkan tantangan substansial untuk metode konvensional bila dibutuhkan prediksi yang lebih akurat dari kelakuan neutronik. Tantangan lain adalah terdapat lebih dari 10^{10} kernel dalam konfigurasi teras reaktor tipikal dengan kesulitan mengidentifikasi kernel bahan bakar secara individual dalam matrik grafit. Sebagai alternatif metode Monte Carlo menjadi solusi dalam perhitungan kritikalitas reaktor.

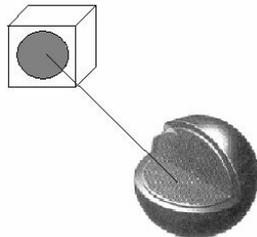
Perhitungan kritikalitas dilakukan dengan menggunakan program metode Monte Carlo yang bersifat stokastik dalam mencari penyelesaiannya. Hal ini berlainan dengan metode transpor yang bersifat deterministik. Dalam metode deterministik, cara yang paling umum diterapkan adalah metode ordinat diskret yang menyelesaikan persamaan transport untuk perilaku partikel rata-rata. Metode Monte Carlo tidak memecahkan persamaan yang eksplisit, tetapi mencari penyelesaian dengan cara mensimulasikan partikel-partikel secara individual serta mencatat beberapa aspek dari perilaku rata-rata partikel tersebut. Jadi metode Monte Carlo menyelesaikan permasalahan transpor dengan melakukan simulasi atas riwayat atau jalannya partikel, bukan memecahkan persamaan.

Perhitungan kritikalitas dalam MCNP mencakup perhitungan jumlah rata-rata neutron fisi yang dihasilkan dalam satu generasi untuk tiap-tiap sumber neutron fisi. Yang dimaksud dengan satu generasi adalah masa hidup neutron dari saat ia dilahirkan dari reaksi fisi sampai dengan hilang karena lolos dari sistem, tangkapan parasitik, atau absorpsi yang akan menimbulkan fisi berikutnya.

Untuk melakukan perhitungan kritikalitas, perlu menyediakan file input yang memuat kartu KCODE yang berisi informasi mengenai jumlah partikel sumber, harga awal k_{eff} , jumlah siklus yang dilompati sebelum perhitungan akumulasi k_{eff} dimulai, dan jumlah siklus total yang dikehendaki dalam perhitungan, serta kartu KSRC yang berisi informasi mengenai koordinat sumber yang disimulasi.

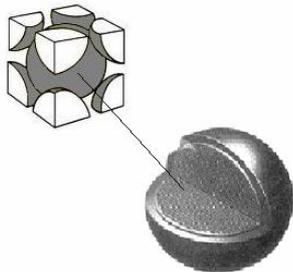
Dalam makalah ini telah dimodelkan bahan bakar reaktor berpendingin gas temperatur tinggi tipe bola (*pebble*) termasuk materialnya, yang dimodelkan dalam bentuk geometri, dimensi, dan komposisi sedekat mungkin dengan benda aslinya. Dalam pemodelan ini komposisi bahan bakar

dianggap baru dengan tidak memperhitungkan pengaruh *burn-up* bahan bakar selama operasi reaktor. Bahan bakar tipe *pebble* dengan diameter rongga 5,0 cm diisi penuh dengan kernel yang disusun dalam model kisi *simple cubic*, *body centered cubic*, dan *face centered cubic* seperti diperlihatkan pada Gambar 2, 3, dan 4.



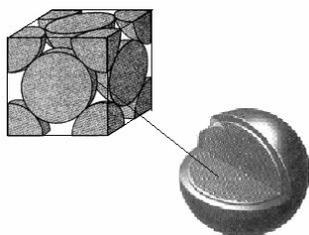
Gambar 2. Model TRISO kisi SC dalam *pebble bed*

Gambar 2. memperlihatkan pemodelan dari bahan bakar tipe *pebble* yang diisi kernel dalam model kisi *simple cubic*. Kisi *simple cubic* (SC) dengan fraksi *packing* 0,3 hanya diisi satu buah kernel pada posisi pusat diagonal ruang kisi dengan panjang rusuk kisi 0,109564 cm mengisi rongga *pebble* sampai penuh, sehingga kernel yang tersusun dalam rongga *pebble* tersebut akan mengikuti pola kisi *simple cubic*.



Gambar 3. Model TRISO kisi BCC dalam *pebble bed*

Gambar 3. memperlihatkan pemodelan bahan bakar tipe *pebble* yang diisi kernel dalam model kisi *body centered cubic* (BCC). Kisi *body centered cubic* dengan fraksi *packing* 0,3 diisi dua buah kernel (satu kernel pada pusat diagonal ruang kisi dan seperdelapan kernel menempati delapan pojok kisi) dengan panjang rusuk 0,13804 cm mengisi rongga *pebble* sampai penuh, sehingga kernel yang tersusun dalam rongga *pebble* akan mengikuti pola kisi *body centered cubic*.



Gambar 4. Model TRISO kisi FCC dalam *pebble bed*

Gambar 4. memperlihatkan pemodelan bahan bakar tipe *pebble* yang diisi kernel dalam model kisi *face centered cubic* (FCC). Kisi *face centered cubic* dengan fraksi *packing* 0,3 diisi empat buah kernel (setengah kernel pada enam pusat diagonal permukaan kisi dan seperdelapan kernel menempati delapan pojok kisi) dengan panjang rusuk 0,17392 cm mengisi rongga *pebble* sampai penuh, sehingga kernel yang tersusun dalam rongga *pebble* akan mengikuti pola kisi *body centered cubic*.

Dalam pemodelan ini kartu KCODE diisi dengan jumlah neutron sumber pada setiap siklus 100 buah, harga awal $k_{eff} = 1$, jumlah siklus yang akan dilompati sebelum perhitungan k_{eff} diakumulasikan adalah 10 siklus, dan jumlah siklus dalam perhitungan adalah 110 siklus. Adapun kartu KSRC yang berisi informasi lokasi sumber neutron ditempatkan pada koordinat 0,0 0,0 0,0 (di pusat *pebble*), lokasi ini cukup jauh dari batas-batas sel.

Langkah awal dalam perhitungan ini adalah menghitung nilai fraksi *packing* untuk semua model kisi agar diperoleh faktor multiplikasi infinit mendekati satu. Setelah nilai fraksi *packing* diperoleh, maka ketiga model kisi dengan nilai fraksi *packing* tersebut dimasukkan ke dalam *pebble bed* untuk menghitung faktor multiplikasinya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil perhitungan faktor multiplikasi infinit (k_{∞}) untuk model kisi SC, BCC, dan FCC sebelum dimasukkan ke dalam *pebble bed* dengan berbagai fraksi *packing* dengan menggunakan program transfer Monte Carlo MCNP5. Pustaka tampang lintang yang digunakan baik untuk kisi SC, BCC, maupun FC adalah sama, yaitu endf60C/B.VI. disajikan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Hasil perhitungan faktor multiplikasi infinit (k_{∞}) untuk model kisi SC, BCC dan FCC tanpa *pebble bed*.

fraksi <i>Packing</i>	Faktor multiplikasi infinit		
	0,2	0,3	0,4
SC	1.11743±0.00731	1.00737±0.00731	0.95534±0.00559
BCC	1.10976±0.00630	1.01984±0.00687	0.96180±0.00627
FCC	1.09989±0.00581	1.00723±0.00644	0.96252±0.00671

Dari Tabel 2 memperlihatkan bahwa faktor multiplikasi (k_{∞}) mendekati 1 (reaktor dalam keadaan kritis) pada kisi SC, BCC, dan FCC terjadi pada fraksi *packing* 0,3. Pada fraksi *packing* 0,4 baik untuk kisi SC, BCC, maupun FCC faktor multiplikasi infinit (k_{∞}) belum mencapai 1 (reaktor dalam keadaan sub-kritis), sedangkan untuk fraksi *packing* 0,2 untuk kisi SC, BCC, dan FCC nilai faktor multiplikasi infinit (k_{∞}) jauh di atas 1 (reaktor dalam keadaan super kritis).

Karena faktor multiplikasi infinit (k_{∞}) mendekati 1 terjadi pada fraksi *packing* 0,3, maka nilai fraksi *packing* inilah yang digunakan dalam perhitungan untuk menentukan faktor multiplikasi infinit (k_{∞}) untuk *pebble bed* yang diisi kernel bahan bakar dengan model kisi SC, BCC, dan FCC yang dimasukkan ke dalam rongga *pebble bed*.

Adapun jarak antara kernel bahan bakar terdekat untuk model kisi SC, BCC, dan FCC untuk fraksi *packing* 0,3 diperlihatkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Jarak antara kernel terdekat untuk berbagai macam kisi.

Model kisi	Panjang rusuk model kisi (cm)	Jarak antara kernel bahan bakar terdekat (cm)
SC	0,109564	0,109564
BCC	0,138042	0,119544
FCC	0,173917	0,122981

Jarak antara kernel bahan bakar terdekat untuk SC sama dengan panjang rusuk model kisi SC, jarak antara kernel bahan bakar terdekat untuk model kisi BCC adalah setengah panjang diagonal ruang model BCC ($\frac{1}{2}\sqrt{3}r$, dengan r adalah panjang rusuk model kisi BCC), dan jarak antara kernel bahan bakar terdekat untuk kisi FCC adalah setengah diameter permukaan model kisi FCC ($\frac{1}{2}\sqrt{2}r$, dengan r adalah panjang rusuk model kisi FCC).

Hasil perhitungan faktor multiplikasi infinit (k_{∞}) *pebble bed* untuk ketiga model kisi dan pustaka tampang lintang yang digunakan disajikan dalam Tabel 4.

Tabel 4. Hasil perhitungan faktor multiplikasi untuk model kisi SC, BCC, dan FCC dalam *pebble bed*.

Model Kisi	endf50C (rcms) / B.V	endf60C / B.VI	endf66C / B.VI
SC	1,0107 ± 0,0031	1,0085 ± 0,0028	1,0097 ± 0,0029
BCC	1,2026 ± 0,0029	1,2025 ± 0,0032	1,1938 ± 0,0038
FCC	1,2056 ± 0,0035	1,2002 ± 0,0027	1,2046 ± 0,0031

Tabel 4 memperlihatkan bahwa, pustaka data nuklir B.V (endf50C) menghasilkan nilai k_{∞} yang lebih besar dibandingkan dengan pustaka data

nuklir B.VI (endf60C dan endf66C). Perbedaan nilai k_{∞} ini disebabkan oleh perbedaan tampang lintang fisi termal dari U^{235} . Pustaka data nuklir B.V (endf50C) mempunyai tampang lintang fisi termal dan tampang lintang tangkapan yang lebih besar dibandingkan dengan B.VI (endf60C dan endf66C)^[8].

Bila ditinjau lebih seksama, diantara ketiga model kisi matrik grafit, model kisi BCC dan FCC menghasilkan nilai k_{∞} yang hampir sama dengan perbedaan hanya 0,25%, dan jauh lebih besar jika dibandingkan dengan nilai fraksi yang dihasilkan oleh model kisi SC dengan perbedaan nilai fraksi 18,98%. Hal ini disebabkan karena jarak antara kernel bahan bakar. Seperti diperlihatkan pada Tabel 3 jarak terdekat antara kernel bahan bakar untuk SC lebih pendek dibandingkan dengan jarak terdekat antara kernel bahan bakar untuk BCC dan FCC.

Hasil lain memberikan kesan bahwa perhitungan kritikalitas akan memberikan hasil prediksi yang lebih baik jika digunakan model kisi BCC dan FCC, hal ini bisa dilihat dari kecenderungan kernel-kernel tersebut bila ditumpuk akan membentuk pola model kisi FCC atau BCC.

KESIMPULAN

Pemodelan partikel bahan bakar berlapis dalam kisi SC, BCC, dan FCC untuk memprediksi kritikalitas RGTT telah dilakukan dengan program transport Monte Carlo MCNP5 memanfaatkan pustaka data tampang lintang neutron rcms/B.V, endf60C/B.VI, dan endf66C/B.VI.

Dari hasil-hasil ini dapat disimpulkan bahwa kisi SC menghasilkan kritikalitas RGTT dengan k_{∞} yang lebih rendah dibandingkan dengan k_{∞} untuk model kisi BCC dan FCC dengan nilai perbedaan 18,98%, sedangkan kisi BCC dan kisi FCC menghasilkan nilai k_{∞} yang hampir sama dengan perbedaan 0,25%, hal ini disebabkan oleh jarak antara kernel bahan bakar. Semakin dekat jarak kernel bahan bakar menghasilkan faktor multiplikasi yang lebih kecil dibandingkan dengan jarak kernel bahan bakar yang lebih jauh.

UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada Sdr. Putranto Ilham Yazid dari Pusat Teknologi Nuklir Bahan dan Radiometri (PTNBR) BATAN yang telah meluangkan waktunya untuk membimbing penggunaan MCNP kepada penulis. Dan tak lupa diucapkan terima kasih juga kepada Dr. Ir. M. Dhandhang Purwadi yang telah memberikan inspirasi dan ide untuk melakukan riset ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. ZUOYI ZHANG, ZONGXIN WU, YULIANG SUN, FU LI, "Design of Chinese Modular High-Temperature Gas-cooled Reactor", 2nd International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology, Beijing, China, September, 2004.
2. F.B. Brown, et al., "MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5", LA-UR-03-1987, April 24, 2003.
3. ZUHAIR, SUWOTO, MAMAN MULYAMAN, "Pemodelan Kernel Bahan Bakar dalam Kisi Matriks Grafit untuk Perhitungan Kritikalitas VHTR dengan MCNP5", Prosiding Seminar ke-14 Teknologi dan Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir, Bandung, 05 Nopember 2008.
4. DCL-105/MCNPDAT, "Standard Neutron Cross Section Data Library Derived from ENDF/B-V for MCNP Version 4", Radiation Shielding Center, 1994.
5. J.S. HENDRICKS, S.C. FRANKLE, J.D. COURT, "ENDF/B-VI Data for MCNP", Los Alamos National Laboratory Report, LA-12891, 1994.
6. X-5 MONTE CARLO TEAM, "MCNP-A General Monte Carlo-Particle Transport Code Version 5", Volume I, Overview and Theory, Los Alamos National Laboratory, 2003.
7. J.J. DUDERSTADT and L.J. HAMILTON, "Nuclear Reactor Analysis", pp. 434-435, 1976.
8. J.R. LEBENHAFT R. FRUH and R. CHAWLA, "The Effect of Nuclear Data on the MCNPX Modeling of Moderator Level Variations in the Crows Criticality Facility", Journal of Nuclear Science and Technology, vol. 40, No. 6, June 2003.

TANYA JAWAB

Pertanyaan :

1. Progres proyek yang ada di Afrika Selatan (PBMR) terkait dengan pemakaian bahan bakar bentuk kernel?
2. Bagaimana tingkat keselamatannya?
3. Prospek ke depan (PLTN generasi IV) dengan RGTT?
4. Bagaimana jika diaplikasikan di Bangka Belitung? Kapasitasnya?

(Arief Heru K., PPEN-BATAN)

Jawaban :

1. Pada Juni 2004 diumumkan bahwa PBMR (*Pebble Bed Modular Reactor*) akan di bangun di Koeberg Afrika Selatan oleh ESKOM (BUMN Afrika Selatan bidang utilitas listrik). Di bawah tekanan beberapa kelompok seperti *Koeberg Alert* dan *Earth life Afrika*, pada September 2009 pembangunan plant demonstration diumumkan ditunda tanpa batas waktu. Februari 2010, pemerintah Afsl menghentikan pendanaan PBMR dengan alasan kurangnya investor, sehingga kemudian perusahaan melakukan penghematan dengan cara mengurangi jumlah pegawai sebanyak 70%.
2. Tingkat keselamatan PBMR sangat tinggi. Selain dari pemanfaatan kernel bahan bakar partikel berlapis TRISO, yang dilapisi oleh 4 lapisan yang berfungsi mencegah terjadinya kebocoran produk fisi dan menjaga integritas struktur selama kondisi normal maupun kecelakaan. Tingkat keselamatan PBMR dijamin dari koefisien reaktivitas temperatur negatif, pendinginan pasif dan tidak adanya perubahan fase dari pendingin gas helium yang inert, tidak korosif serta tidak bereaksi dengan neutron.
3. Prospek PLTN Generasi IV (Gen-IV) dalam dekade mendatang sangat baik, seperti di China yang sudah menjadwalkan pembangunan HTR-PM pada tahun 2009 dan target komisioning pada tahun 2013. Pada tahun 2050, China berencana merekonstruksi reaktor dengan kapasitas 300 GWe, dimana PBMR menjadi komponen utamanya. Melihat perkembangan ini, RGTT sangat prospektif di masa mendatang bagi Indonesia, karena dapat dibangun secara modular dan dapat diaplikasikan sebagai reaktor kogenerasi.
4. Aplikasi RGTT di Bangka-Belitung dapat dipertimbangkan, karena dapat dibangun dengan daya relatif kecil dan medium. Telah dikaji kebutuhan sharing listrik di Babel sekitar 60 MWe, sehingga dapat dipenuhi oleh reaktor RGTT dengan daya 200 MWth, yang dapat dipakai sebagai penyedia listrik (60-80MWe), air bersih dan panas suhu tinggi untuk industri.