

## DESAIN KONSEPTUAL PENYIMPANAN BAHAN BAKAR BARU RGTT MENGGUNAKAN PROGRAM MCNPX

**Maman Mulyaman, Zuhair, M. Dhandhang Purwadi**

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir (PTRKN) - BATAN

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

e-mail : [mamanmulyaman@yahoo.com](mailto:mamanmulyaman@yahoo.com)

### ABSTRAK

**DESAIN KONSEPTUAL PENYIMPANAN BAHAN BAKAR BARU RGTT MENGGUNAKAN PROGRAM MCNPX.** RGTT merupakan reaktor nuklir jenis high temperature reactor yang berpendingin helium dengan moderator grafit. Reaktor ini sangat cocok diadopsi sebagai reaktor kogenerasi karena kemampuannya menghasilkan temperatur keluaran 900-1000°C. Bahan bakar RGTT berbentuk bola yang disebut pebble terbuat dari grafit pirolitik yang berfungsi sebagai moderator. Setiap bahan bakar pebble mengandung ribuan partikel bahan bakar berlapis TRISO dengan kernel  $UO_2$  berpengkayaan  $U^{235}$  7%. Setiap hari RGTT diperkirakan membutuhkan 347 bahan bakar pebble yang diambil dari tangki penyimpanan bahan bakar pebble baru. Makalah ini mendiskusikan faktor multiplikasi efektif sebagai fungsi radius dan tinggi tangki penyimpanan bahan bakar pebble baru. Program transport Monte Carlo MCNPX dimanfaatkan dalam perhitungan dengan pustaka data tampang lintang nuklir energi kontinu ENDF/B-VI. Hasil analisis menyimpulkan bahwa geometri tangki penyimpanan bahan bakar pebble baru dengan radius 110 cm dan tinggi 900 cm memenuhi kriteria standard keselamatan kritikalitas.

**Kata kunci:** penyimpanan bahan bakar pebble, MCNPX, ENDF/B-VI, keselamatan kritikalitas

### ABSTRACT

**CONCEPTUAL DESIGN OF FRESH FUEL PEBBLE STORAGE FOR RGTT USING MCNPX CODE.** RGTT is a high temperature reactor type helium-cooled nuclear reactor with graphite moderator. The reactor is very suitable adopted as a co-generation reactors because its ability to produce outlet temperature of 900-1000°C. RGTT's fuel is ball-shaped which is called pebble made of pyrolytic graphite which serves as a moderator. Each fuel pebble contains thousands of TRISO-coated fuel particles with  $U^{235}$  enriched 7%  $UO_2$  kernel. Every day RGTT is estimated to require 347 fuel pebble taken from the fresh fuel pebble storage tank. This paper discusses effective multiplication factor as a function of radius and height of the fresh fuel pebble storage tank. The MCNPX Monte Carlo transport program utilized in the calculation with the continuous energy nuclear cross-section data library ENDF/B-VI. The results of the analysis concluded that the geometry of the fresh fuel pebble storage tank with a radius of 110 cm and height of 900 cm meet criticality safety standard criteria.

**Keywords:** fuel pebble storage, MCNPX, ENDF / B-VI, safety criticality

### 1. 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 lebih dari 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<sup>[1]</sup>.

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 bekasnya yang dapat meminimisasi proses daur ulang. Kelebihan ini berasal dari desain bahan bakar unik kernel uranium oksida ( $\text{UO}_2$ ) yang sangat kecil dengan diameter 0,092 cm dengan lapisan (*coating*) ganda piro karbon (PyC), silikon karbida (SiC) dan penyangga karbon berpori (C) dalam kisi matrik grafit.

Teras kesetimbangan RGTT200K diprediksi memuat 360.000 elemen bakar yang mengisi sumur dengan radius 150 cm dan ketinggian rata-rata 940 cm. Elemen bakar akan dimasukkan ke dalam reaktor dengan “*multi-pass*”. Bahan bakar bola berdiameter 6 cm dengan partikel berlapis TRISO mengisi teras. Untuk mendukung agar reaktor ini biasa beroperasi pada 200 MWth dengan *burn-up* 80 MWD/kg diperlukan injeksi bahan bakar baru setiap harinya sejumlah 347 elemen bakar.

Agar reaktor bisa beroperasi secara terus menerus, maka diperlukan ketersediaan bahan bakar yang cukup banyak. Hal ini mengakibatkan perlunya tempat penyimpanan bahan bakar baru yang aman. Pengertian aman di sini adalah tangki penyimpanan bahan bakar aman dari segi kritikalitas apabila terjadi tsunami, dan kehilangan pendingin.

Dalam makalah ini, akan dikaji radius dan tinggi tangki penyimpanan bahan bakar baru RGTT yang paling optimal dan aman dengan menggunakan program MCNPX. Untuk memperoleh hasil kajian tersebut di atas, telah dilakukan pemodelan partikel bahan bakar berlapis yang terdistribusi secara stokastik dalam bahan bakar *pebble bed* yang dimodelkan ke dalam kisi SC (*simple cubic*) dengan berbagai variasi fraksi *packing* yang dimasukkan ke dalam bola grafit berongga (*pebble bed*) untuk mencari fraksi *packing* dan faktor multiplikasi infinit ( $k_{inf}$ ) terbesar. Fraksi *packing* dengan  $k_{inf}$  terbesar digunakan sebagai dasar pemodelan *pebble* dalam kisi BCC (*body centered cubic*) yang dimasukkan ke dalam tangki penyimpanan bahan bakar. Selanjutnya dicari faktor multiplikasi efektif ( $k_{eff}$ ) sekitar 0,85 (dalam kondisi normal faktor multiplikasi penyimpanan bahan bakar yang diizinkan oleh IAEA adalah 0,85, sedangkan dalam kondisi kecelakaan faktor multiplikasi yang diizinkan 0,95)<sup>[2]</sup> dengan cara memvariasikan diameter dan ketinggian tangki penyimpanan bahan bakar. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan program transport Monte Carlo MCNPX. Bahan bakar yang digunakan dalam perhitungan ini adalah bahan bakar *pebble* yang diisi kernel  $\text{UO}_2$  dengan pengkayaan 7%. Selain itu untuk melengkapi analisis kritikalitas memanfaatkan pustaka data tampang lintang neutron rmccs/B-V<sup>[3]</sup>, endf60c/B-VI<sup>[4]</sup> dan endf66c/B-VI.

## 2. TEORI

Neutron yang dihasilkan dari suatu reaksi fisi merupakan neutron cepat. 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 kekritisan ( $k_{eff}$ ) 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, kekritisan ( $k_{eff}$ ) didefinisikan sebagai<sup>[5]</sup> :

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

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
- $\sigma_{Tk}$  = total tampang lintang mikroskopis
- $\sigma_{fk}$  = 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:

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

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.

- 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

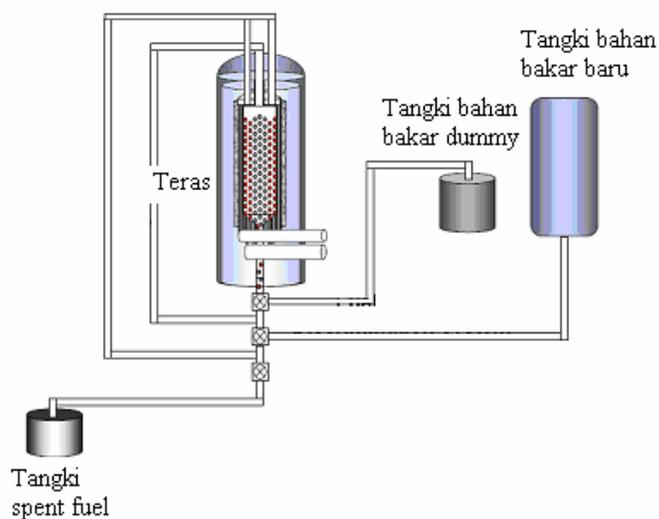
$\rho$  = densitas atom

$d$  = panjang jejak lintasan

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

### 3. DISKRIPSI UMUM RGTT200K

RGTT adalah reaktor temperatur tinggi berbahan bakar bola. Bila terjadi kecelakaan, reaktor ini tidak memerlukan sistem pendinginan teras secara aktif. Panas sisa (residual) dapat didisipasikan dengan mekanisme pemindahan panas pasif ke atmosfer sekitarnya. Sketsa teras RGTT dan tangki penyimpanan bahan bakar diperlihatkan pada Gambar 1<sup>[6]</sup>.



Gambar 1. Sketsa teras RGTT dan tangki penyimpanan bahan bakar baru

Teras kesetimbangan RGTT200K diprediksi memuat 360.000 elemen bakar yang mengisi sumur dengan jejari 150 cm dan ketinggian rata-rata 940 cm. Elemen bakar akan dimasukkan akan dimasukkan ke dalam reaktor dengan “multi-pass”. Bahan bakar bola dengan diameter 6 cm dengan partikel berlapis TRISO mengisi teras. Untuk mendukung agar reaktor ini biasa beroperasi pada 200 MWth dengan *burn-up* 80 MWD/kg diperlukan injeksi bahan bakar baru setiap harinya sejumlah 374 elemen bakar. Parameter RGTT200K dapat dilihat pada Tabel 1<sup>[7]</sup>.

**Tabel 1. Parameter kunci RGTT200K modular**

Daya reaktor (MWth)	200
Diameter teras (m)	3,0
Tinggi teras (m)	9,4
Rerata densitas daya (W/cc)	3,0
Jumlah <i>pebble</i> (bahan bakar / grafit)	360000
Tekanan (MPa)	6
Temperatur masukan (oC)	250
Temperatur keluaran (oC)	900 - 1000
Jumlah batang kendali	6
Jumlah sistem penyerap bola	18
Jumlah lapisan TRISO per <i>pebble</i>	11200
Jumlah kandungan UO <sub>2</sub> (g/ <i>pebble</i> )	~ 7
Pengkayaan	7%
Jumlah bahan bakar yang diinjeksikan ke teras ( <i>pebble</i> /hari)	347
<i>Burn-up</i> (MWD/kg)	80

Desain bahan bakar bola dapat dilihat pada Gambar 2. Sistem penanganan bahan bakar *pneumatic* digunakan secara terus menerus untuk mengisi dan mengeluarkan elemen bakar. Grafit digunakan sebagai material utama struktur teras yang terdiri atas reflektor atas, bawah, dan sisi. Struktur teras keramik ini dikungkung oleh bejana tekan dari baja.

Di dalam reflektor samping, kanal helum pendingin dirancang sedemikian rupa agar helium mengalir ke atas setelah memasuki reaktor dari antara bejana penghubung dan pipa gas panas. Aliran helium berbalik ke bawah setelah mencapai puncak teras untuk menuju bagian bawah teras, sehingga terbentuk pola aliran ke bawah. Setelah dipanasi dalam teras, helium melewati suatu ruang gas panas (*hot gas plenum*) di dalam reaktor bagian bawah. Dari sini gas mengalir melewati pipa gas panas menuju komponen penukar panas.

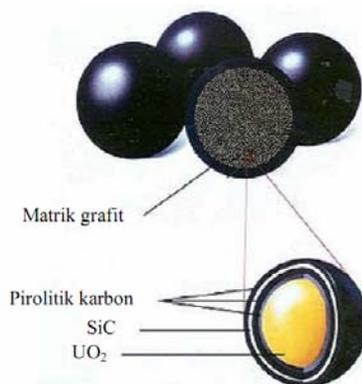
Pembuangan panas peluruhan RGTT didesain seluruhnya atas dasar sistem pasif. Bila terjadi kecelakaan kehilangan tekanan (*loss of pressure*) dimana tidak tersedia pendinginan, panas peluruhan akan terdisipasi melalui struktur teras dengan cara konduksi dan radiasi panas ke luar bejana tekan reaktor (*reactor pressured vessel*. RPV). Panas ini kemudian akan didisipasikan melalui sistem pendinginan permukaan yang terdapat pada dinding bangunan beton. Sistem ini bekerja secara prinsip alamiah, dan melepaskan panas tersebut melalui pendingin udara ke atmosfer.

RGTT menerapkan dua sistem pemadaman reaktor. Pertama adalah sistem batang kendali yang terdiri atas enam batang kendali. Kedua adalah sistem bola kecil penyerap yang disebut juga KLAK. Masing-masing dari kedua sistem dapat memadamkan reaktor. Karena reaktor memiliki

koefisien tempertur negatif yang sangat kuat dan pembuangan panas peluruhannya tidak membutuhkan sirkulasi pendingin helium, reaktor juga dapat dipadamkan dengan cara mematikan sirkulator helium.

#### 4. 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  $U^{235}$  7% 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 carbo, OPyC*). Geometri partikel berlapis TRISO dan parameter *pebble* diperlihatkan masing-masing pada Gambar 2 dan Tabel 2.



**Gambar 2. 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 2. Parameter desain bahan bakar *pebble bed***

	Radius luar (cm)	Komposisi	Densitas (g/cm <sup>3</sup> )
<b>Partikel bahan bakar berlapis:</b>			
Kernel uranium oksida	0,025	UO <sub>2</sub>	11,0
Lapisan penyangga karbon berpori	0,0345	C	1,1
Lapisan piro karbon bagian dalam	0,0385	C	1,9
Lapisan silikon karbida	0,042	SiC	3,2
Lapisan piro karbon bagian luar	0,046	C	1,9
<b><i>Pebble:</i></b>			
Rongga <i>Pebble</i>	2,5	-	-
Lapisan luar <i>Pebble</i>	3,0		1,73

## 5. METODOLOGI PERHITUNGAN KRITIKALITAS

Dalam desain tempat penyimpanan bahan bakar baru, 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<sup>[8,9]</sup> 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 tempat penyimpanan 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 tempat penyimpanan bahan bakar tipikal dengan kesulitan mengidentifikasi kernel bahan bakar secara individual dalam matrik grafit. Sebagai alternatif, metode Monte Carlo menjadi solusi dalam perhitungan kritikalitas reaktor.

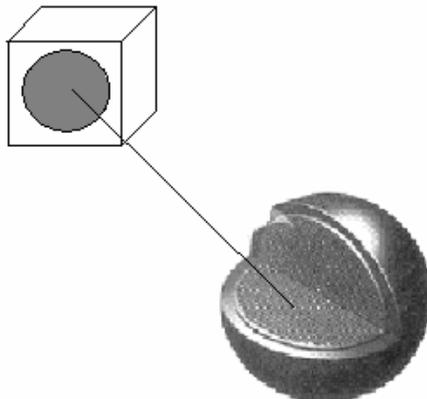
Perhitungan kritikalitas dilakukan dengan menggunakan program metode Monte Carlo yang bersifat stokastik dalam mencari penyelesaiannya. Hal ini berlainan dengan metode transpor yang bersifat deterministik. Dalam metode deterministik, cara yang paling umum diterapkan adalah metode ordinat diskret yang 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 transport dengan melakukan simulasi atas riwayat atau jalannya partikel, bukan memecahkan persamaan.

Perhitungan kritikalitas dalam MCNPX 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 tempat penyimpanan bahan bakar reaktor berpendingin gas temperatur tinggi tipe bola (*pebble*) berupa tangki yang diisi penuh bahan bakar. Dalam pemodelan ini komposisi bahan bakar dianggap baru.

Langkah awal dalam pemodelan ini, adalah memodelkan bahan bakar TRISO dengan densitas  $\text{UO}_2$   $10,4 \text{ g/cm}^3$  dan pengkayaan uranium 7% ke dalam kisi SC dengan berbagai variasi fraksi *packing* (perbandingan antara volume kisi dengan volume bahan bakar).

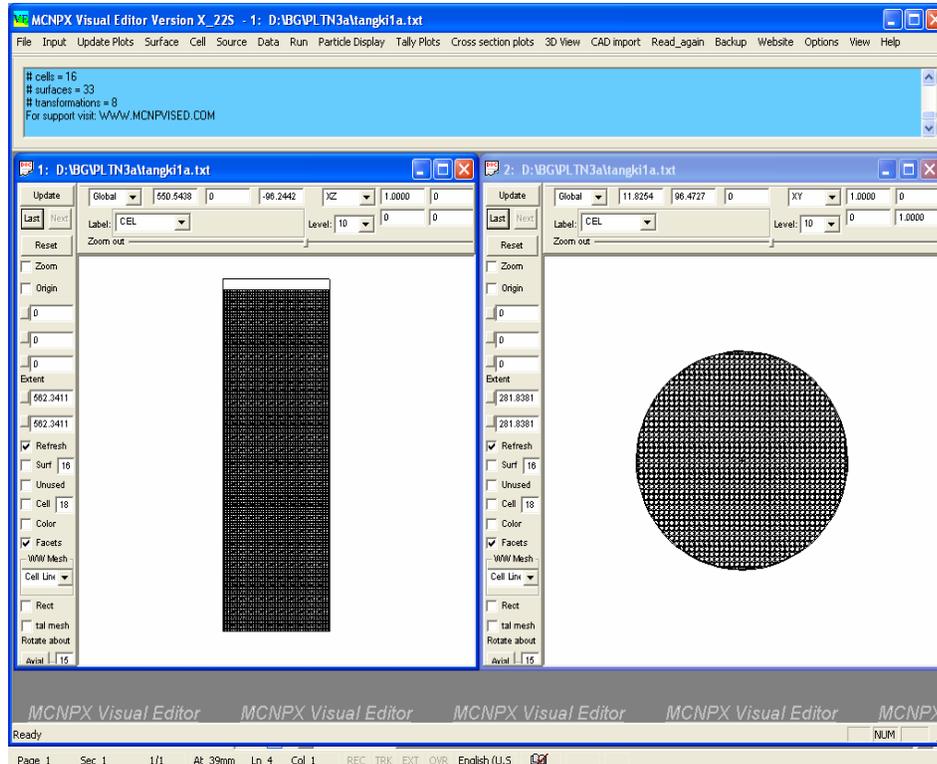


**Gambar 3. Model TRISO kisi SC dalam *pebble bed***

Gambar 3. memperlihatkan pemodelan dari bahan bakar tipe *pebble* yang diisi kernel dalam model kisi *simple cubic*. Kisi *simple cubic* (SC) dengan berbagai fraksi *packing* hanya diisi satu buah kernel pada posisi pusat diagonal ruang kisi. Hasil yang diharapkan dari pemodelan ini, adalah memperoleh fraksi *packing* kisi SC dengan faktor multiplikasi infinit paling optimum.

Langkah kedua memodelkan bahan bakar *pebble* yang diisi penuh oleh TRISO ke dalam kisi BCC dengan fraksi *packing* 61%. Bahan bakar *pebble* tersebut diisikan ke dalam tangki penyimpanan bahan bakar sampai penuh. Dengan memvariasikan geometri tangki (radius dan tinggi), kemudian dicari faktor multiplikasinya. Hasil yang diharapkan dari pemodelan ini adalah memperoleh geometri tangki penyimpanan bahan bakar yang paling optimum.

Langkah ketiga adalah memodelkan tangki penyimpanan bahan bakar yang diisi penuh bahan bakar pada kondisi terjadi tsunami dan kehilangan pendingin, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 4. Hasil yang diperoleh adalah apakah tangki penyimpanan bahan bakar yang diisi penuh bahan bakar aman dari segi standar keselamatan kritikalitas apabila terjadi tsunami dan kehilangan pendingin.



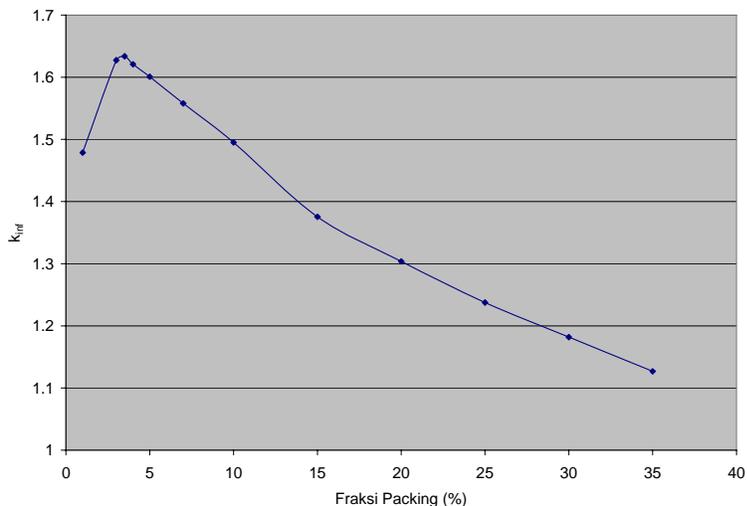
**Gambar 4. Model tangki penyimpanan bahan bakar baru.**

Gambar 4 memperlihatkan pemodelan tangki penyimpanan bahan baru RGTT yang penuh diisi oleh bahan bakar. Geometri tangki berbentuk silinder dengan diameter 110 cm dan ketinggian tangki 900 cm, sehingga mampu menampung bahan bakar 103455 buah. Tangki dibuat dar baja tahan karat dengan ketebalan 1 cm.

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 75 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 tangki.

## 6. HASIL PERHITUNGAN DAN DISKUSI

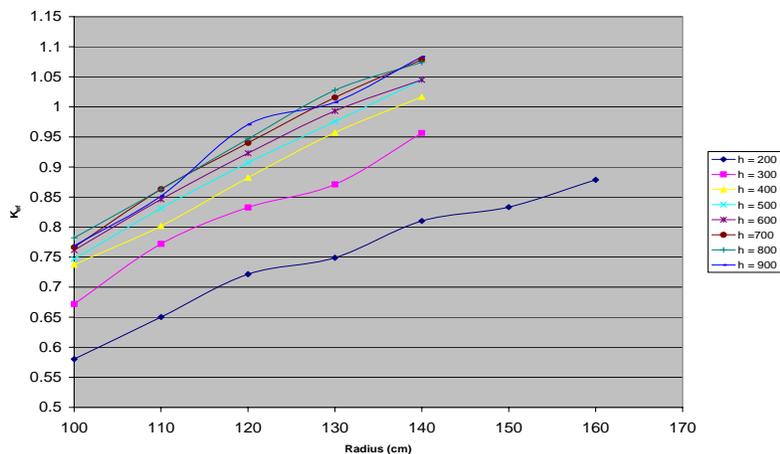
Hasil perhitungan faktor multiplikasi infinit ( $k_{inf}$ ) kisi SC untuk berbagai fraksi *packing* dengan pengkayaan 7% dalam *pebble bed* ditampilkan pada Gambar 5. Dalam perhitungan ini digunakan program transport Monte Carlo MCNPX. Adapun pustaka tampang lintang yang digunakan adalah endf60C/B.



**Gambar 5. Sensitivitas nilai faktor multiplikasi infinit ( $k_{inf}$ ) kernel terhadap parameter fraksi packing untuk densitas  $UO_2$  10,4 g/cm<sup>3</sup> dengan pengkayaan 7%**

Dari Gambar 5, memperlihatkan bahwa faktor multiplikasi ( $k_{inf}$ ) maksimum 1,63378 diperoleh pada fraksi packing 3,5%. Untuk fraksi packing yang lebih besar dari 3,5%  $k_{inf}$  menurun, hal ini disebabkan jumlah karbon dalam kisi SC semakin sedikit, sehingga jumlah neutron cepat yang berubah menjadi neutron thermal semakin sedikit yang menyebabkan jumlah reaksi fisi semakin berkurang. Begitu juga sebaliknya  $k_{inf}$  untuk fraksi packing di bawah 3,5% menurun, hal ini disebabkan jumlah grafit yang terlalu banyak, sehingga neutron yang diserap grafit semakin banyak, berakibat pada turunya  $k_{inf}$ .

Kisi SC dengan fraksi packing 0,35 dengan panjang rusuk kisi SC 0.22672 cm digunakan untuk menghitung faktor multiplikasi efektif pada tangki penyimpanan bahan bakar.



**Gambar 6. Sensitivitas nilai faktor multiplikasi efektif ( $k_{eff}$ ) terhadap parameter radius dan tinggi tangki penyimpanan bahan bakar untuk densitas  $UO_2$  10,4 g/cm<sup>3</sup> dengan pengkayaan 7%,**

Hasil perhitungan variasi radius tangki penyimpanan bahan bakar memperlihatkan bahwa kenaikan radius tangki bahan bakar menyebabkan kenaikan faktor multiplikasi efektif, hal ini

dikarenakan semakin besar radius tangki penyimpanan bahan bakar semakin banyak bola bahan bakar yang mengisi tangki bahan bakar tersebut.

**Tabel 3. Variasi radius dan ketinggian tangki tempat penyimpanan bahan bakar yang menghasilkan faktor multiplikasi efektif 0,85.**

Ketinggian Tangki (cm)	Radius Tangki (cm)	Volume Tangki (cm <sup>3</sup> )	Jumlah bahan bakar dalam tangki
200	155	15101429	45647
300	125,5	14850236	44888
400	116	16916114	51133
500	112,5	19888393	60117
600	110,5	23025043	69598
700	108	25660800	77566
800	108	29326629	88646
900	110	34225714	103455

Nilai faktor multiplikasi yang diizinkan oleh IAEA untuk penyimpanan bahan bakar baru adalah 0,85. Pada Gambar 6, diperoleh nilai faktor multiplikasi 0,85 untuk berbagai radius dan ketinggian tangki penyimpanan bahan bakar disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3, memperlihatkan variasi antara ketinggian dan radius tangki penyimpanan bahan bakar untuk faktor multiplikasi efektif 0,85. Volume tangki tempat penyimpanan bahan bakar akan optimal bila tinggi tangki 900 cm dan radius tangki 110 cm. Tangki dengan ukuran ini akan mampu menampung bahan bakar 103455 bahan bakar.

Dalam kondisi kecelakaan seperti terjadi tsunami, tangki penyimpanan bahan bakar dimungkinkan akan kehilangan pendingin dan tangki masih penuh diisi bahan bakar, sehingga tangki penyimpanan bakar tersebut harus didinginkan dengan menggunakan air atau udara. Faktor multiplikasi untuk kondisi tersebut diperlihatkan pada Tabel 4.

**Tabel 4. Faktor multiplikasi pada kondisi didinginkan dengan udara dan air.**

Material pendingin	Faktor multiplikasi efektif
Udara	0,85171 ± 0,01055
Air	0,85163 ± 0,01146

Dari Tabel 4, diketahui bahwa pada kondisi terjadi kecelakaan kehilangan pendingin, tangki tempat penyimpanan bahan bakar yang diisi penuh dengan bahan bakar, secara kritikalitas masih aman walaupun didinginkan dengan udara atau air.

## 7. KESIMPULAN

Dari hasil perhitungan dengan menggunakan program tranport Monte Carlo MNPX, diperoleh ukuran geometri tangki penyimpanan bahan bakar yang paling optimal, yaitu tinggi tangki 900 cm dan radius 110 cm. Dalam kondisi terjadi kecelakaan, secara kritikalitas tangki penyimpanan bahan bakar masih aman walaupun didinginkan dengan udara maupun air.

## 8. DAFTAR PUSTAKA

- [1]. ZUOYI ZHANG, ZONGXIN WU, YULIANG SUN. FU LI, "Design of Chinese Modular High-Temperature Gas-cooled Reactor", 2<sup>nd</sup> International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology, Beijing, China, September, 2004.
- [2]. IAEA, "Code on the Safety of Nuclear Research Reactor Design", Safety Standards SS-35-S1, Austria, Vienna, (1992)
- [3]. DCL-105/MCNP DAT, "Standard Neutron Cross Section Data Library Derived from ENDF/B-V for MCNP Version4", Radiation Shielding Center, 1994.
- [4]. J.S. HENDRICKS. S.C. FRANKLE, J.D. COURT, "ENDF/B-VI Data for MCNP". Los Alamos National Laboratory Report, LA-12891, 1994.
- [5]. 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.
- [6]. PROF. DR. H. BOCK, Vienna University of Technology / Austria Atominstutue Stadionallee 2, 1020 Vienna, Austria.
- [7]. FU LI, XINGQING JING. "Comparison of Fuel Loading Pattern in HTR-PM", 2<sup>nd</sup> International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology, Beijing, China, September 22-24, 2004.
- [8]. J.J. DUDERSTADT and L.J. HAMILTON, "Nuclear Reactor Analysis", pp. 343-345, 1976.
- [9]. J.R. LEBENHAFT R.FRUEH 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.

### **DISKUSI/TANYA JAWAB:**

#### **1. PERTANYAAN: (Rokhmadi, PTRKN-BATAN)**

- Kenapa  $k_{eff}$  lebih sensitif terhadap parameter radius dari pada tinggi tangki?.

#### **JAWABAN: (Maman Mulyaman, PTRKN-BATAN)**

- $k_{eff}$  akan naik dengan naiknya volume bahan bakar di dalam tangki penyimpanan. Persamaan volume tangki:  $V = \pi r^2 h$  di mana  $h$  fungsi linier sedangkan  $r$  fungsi kuadrat. Berarti kenaikan volume tangki yang diakibatkan oleh perubahan radius lebih sensitif dibandingkan dengan perubahan ketinggian tangki. Hal ini akan mengakibatkan  $k_{eff}$  akan lebih sensitif terhadap parameter radius daripada parameter ketinggian tangki.

#### **2. PERTANYAAN: (Djen Djen Djainal, PTRKN-BATAN)**

- Pada langkah awal anda memodelkan bahan bakar TRISO dalam kisi SC. Kenapa pada langkah kedua memodelkan bahan bakar *pebble* yang diisi penuh oleh TRISO dalam kisi BCC?

#### **JAWABAN: (Maman Mulyaman, PTRKN-BATAN)**

- Pada langkah kedua dalam pemodelan ini bahan bakar *pebble* yang diisi penuh oleh TRISO menggunakan fraksi packing 0,61 (fraksi packing penumpukan bola secara alami). Untuk kisi SC fraksi packing maksimal 0,54 sehingga tidak memungkinkan untuk menggunakan kisi SC. Untuk fraksi packing 0,61 bisa dimodelkan oleh kisi BCC atau kisi FCC. Dalam pemodelan ini menggunakan kisi BCC.