

ANALISIS SENSITIVITAS PARAMETRIK DALAM PERHITUNGAN KRITIKALITAS SEL KISI KERNEL BAHAN BAKAR RGTT MENGGUNAKAN PROGRAM MONTE CARLO MCNP5

Suwoto, Zuhair dan Maman Mulyaman

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir - BATAN
Kawasan PUSPIPTEK Gd. 80, Serpong, Tangerang Selatan, 15310
Email: suwoto@batan.go.id

ABSTRAK

ANALISIS SENSITIVITAS PARAMETRIK DALAM PERHITUNGAN KRITIKALITAS SEL KISI KERNEL BAHAN BAKAR RGTT MENGGUNAKAN PROGRAM MONTE CARLO MCNP5. RGTT (Reaktor berpendingin Gas Temperatur Tinggi) merupakan reaktor nuklir jenis *High Temperature Reactor* berpendingin helium dengan moderator grafit sangat cocok untuk diadopsi sebagai reaktor kogenerasi, karena mampu menghasilkan temperatur keluaran 950-1000°C. Bahan bakar RGTT berbentuk bola yang disebut *pebble* yang terbuat dari grafit pirolitik yang berfungsi sebagai moderator dan mengandung ribuan bahan bakar mikro partikel berlapis yang disebut TRISO. Dalam makalah ini diuraikan analisis sensitivitas parametrik dalam perhitungan kritikalitas kernel bahan bakar RGTT. Program transport Monte Carlo MCNP5 v1.2 dimanfaatkan dalam perhitungan kritikalitas dengan menggunakan pustaka tampang lintang data nuklir kontinu ENDF/B-VI. Analisis sensitivitas parametrik meliputi perhitungan kritikalitas sel kisi sebagai fungsi variasi pengkayaan U-235 dan fungsi densitas kernel UO₂ dengan variasi fraksi *packing* (*Packing Fraction*, PF). Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai faktor multiplikasi tak hingga (k_{inf}) meningkat seiring dengan kenaikan pengkayaan U-235. Nilai k_{inf} sangat sensitif pada PF rendah (0,2-0,25) dengan pengkayaan 8-10,5% dan tidak terlalu sensitif pada PF tinggi. Gradien nilai k_{inf} pada berbagai pengkayaan semakin landai pada nilai PF yang semakin kecil dan sebaliknya gradient nilai k_{inf} akan semakin tajam dengan membesarnya nilai PF. Selain itu, hasil perhitungan memperlihatkan bahwa kenaikan densitas kernel UO₂ menyebabkan peningkatan jumlah U-235, namun nilai k_{inf} menurun, khususnya untuk PF kecil. Pada pengkayaan U-235 tetap (10%), pada nilai PF tinggi (0,5) memberikan nilai k_{inf} yang terendah (~0,94) dan begitu pula sebaliknya untuk nilai PF yang kecil (0,2) menghasilkan nilai k_{inf} yang tertinggi (~1,14). Material grafit memainkan peranan ganda sebagai moderator dan reflektor yang mendominasi efek U-235 dalam perhitungan kritikalitas sel. Dari analisis ini dapat disimpulkan, bahwa selain PF, pemilihan pengkayaan U-235 dan densitas kernel UO₂ harus diperhatikan dalam desain teras RGTT karena dapat mempengaruhi karakteristik neutronik teras reaktor secara signifikan.

Kata Kunci: RGTT, HTR, partikel bahan bakar berlapis, fraksi packing (PF), MCNP5 v1.2

ABSTRACT

ANALYSIS OF PARAMETRIC SENSITIVITY ON CELL CRITICALITY CALCULATION OF RGTT FUEL KERNEL USING MCNP5 MONTE CARLO PROGRAM. High Temperature Gas-cooled Reactor (RGTT) is High Temperature Reactor type with a helium gas-cooled and graphite moderated nuclear reactor with core outlet temperature reaching 950-1000°C. The reactor is considered the most ideal to be adopted as the concept of cogeneration reactor. RGTT fuel originates from spherical fuel called pebble made from pyrolytic carbon which serves as moderator and contain thousands of micro fuel which is known as TRISO-coated fuel particles. Analysis of parametric sensitivity on criticality of RGTT fuel kernel calculation is described in this paper. Transport program Monte Carlo MCNP5 v1.2 utilise continuous cross section nuclear data library of ENDF/B-VI to calculate criticality. These analysis of parametric sensitivity includes criticality calculation as variation function of U-235 enrichment and UO₂ density on varied packing fraction (PF). The calculation results show that the infinity multiplication factor (k_{inf}) increase in accordance with an increase in U-235 enrichment. The k_{inf} value on low PF range (0,2-0,25) with enrichment ranges of 8-10,5% is very sensitive and less sensitive on higher PF value. The gradient value of k_{inf} on a various enrichment will be more gentle on the smallest value of PF and gradient k_{inf} value will become sharper with the growing value of PF. This indicate that k_{inf} will be independent of PF and various enrichment on small of PF value. On constant enrichment of U-235(10%), the k_{inf} value is lowest (~0,94) on higher PF value (0,5) and contrary on lowest PF value (0,2) the k_{inf} value is highest (~1,14). The graphite materials play important roles as both moderator and reflector dominating the effect of U-235 in the cell calculation. These analysis concludes in addition to PF, the selection of U-235 enrichment of UO₂ and density should be considered in the RGTT core design because they can influence significantly in reactor core neutronic characteristics.

Keywords: RGTT, HTR, coated fuel particle, packing fraction (PF), MCNP5 v1.2

PENDAHULUAN

Reaktor berpendingin Gas Temperatur Tinggi (RGTT) berbahan bakar bola *pebble* berpendingin gas helium yang beroperasi saat ini adalah HTR-

10 (*High Temperature Reactor-10MWith*) di Cina dan PBMR (*Pebble Bed Modular Reactor*) di Afrika Selatan sedang dalam konstruksi. Kedua HTR tersebut merupakan

pengembangan AVR (*Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor*) yang sebelumnya beroperasi di Jerman. Walaupun reaktor berbahan bakar *pebble* ini hanya sebagai fasilitas skala pilot, namun telah diakui dengan nilai tambah atas karakteristiknya yang unik, seperti secara fundamental aman dengan keselamatan melekat (*inherent safety*), fleksibilitas daur bahan bakar dan efisiensi termal yang tinggi, lebih murah dan kompetitif dibanding desain reaktor lainnya, berukuran modular dan dapat dikopel dengan sistem kogenerasi untuk produksi air bersih, produksi hidrogen, pencairan batubara dan lainnya di samping sebagai pembangkit listrik karena mampu memberikan temperatur keluaran hingga 950-1000°C. Hal inilah yang membuat reaktor berbahan bakar kernel berlapis TRISO dengan bentuk bahan bakar bola *pebble* ini muncul sebagai kandidat reaktor nuklir kogenerasi untuk pasar pembangkit listrik modular plus kogenerasi di masa depan^[1]. Reaktor RGTT ini dirancang dapat juga digunakan untuk tujuan insinerasi aktinida trans-uranium yang terkandung dalam bahan bakar bekas reaktor air ringan (*Light Water Reactor, LWR*)^[2].

Desain konsep sistem bahan bakar pada reaktor RGTT sejauh ini masih memiliki dua opsi, yaitu tipe berbahan bakar *pebble* (*pebble-bed*) yang digunakan di HTR-10 Cina, dan tipe blok prisma (prismatik) yang digunakan di HTRR Jepang^[3]. Salah satu kelebihan teknologi bahan bakar berbentuk *pebble* adalah menawarkan terobosan teknologi pengisian bahan bakar tanpa harus menghentikan produksi listrik. Selain itu, partikel bahan bakar *pebble* dengan kernel uranium oksida (UO₂) atau uranium oksikarbida (UCO) yang dibalut TRISO (*Tristructural-ISOTropic material*) dan pelapisan Silikon Karbida (SiC) dianggap sebagai opsi utama dengan pertimbangan performa tinggi pada fraksi bahan bakar dan temperatur tinggi. Sifat fisika bahan bakar *pebble* ditentukan oleh karakteristik dan spesifikasi teknis kernel partikel bahan bakar berlapis TRISO.

Desain unik bahan bakar RGTT berawal dari bahan bakar berbentuk bola yang disebut *pebble*. Bahan bakar *pebble* seukuran bola tenis (~6 cm) ini terbuat dari karbon pirolitik yang berfungsi sebagai moderator dan mengandung ribuan kernel (~11000-15000)^[4,5] partikel berlapis TRISO. Partikel bahan bakar berlapis TRISO ini terdiri dari material fisil yang disebut kernel yang dibungkus/dilapisi oleh empat lapisan material untuk menjaga integritas struktur dan mencegah terjadinya pelepasan produk fisi. Dalam teras reaktor RGTT, terdapat sekitar 360000^[5] bahan bakar *pebble* yang disusun secara acak untuk membentuk teras reaktor. Sifat fisika bahan bakar *pebble* ditentukan oleh spesifikasi partikel

berlapis TRISO yang menyusun bahan bakar *pebble* tersebut.

Dalam makalah ini akan dilakukan analisis sensitivitas parametrik dalam perhitungan kritikalitas kernel bahan bakar RGTT. Program transport Monte Carlo MCNP5 v1.2^[6] dimanfaatkan dalam perhitungan kritikalitas dengan menggunakan model heterogen enam zona yang telah terbukti presisi^[7] dan memanfaatkan tampang lintang kontinyu dari pustaka data nuklir ENDF/B-VI^[8]. Dalam simulasi perhitungan ini kernel UO₂ ditempatkan dalam pusat kisi kubik sederhana (*Simple Cubic, SC*). Hal ini dilakukan karena perhitungan dengan sel kisi kubik sederhana SC telah teruji dan memberikan hasil dengan akurasi yang tinggi dengan kisi BCC (*Body Centered Cubic*) dan FCC (*Face Centered Cubic*) seperti yang dilaporkan oleh Zuhair, dkk^[9]. Analisis sensitivitas parametrik pada makalah ini dilakukan untuk melengkapi data karakteristik disain neutronik reaktor RGTT yang telah diteliti sebelumnya^[7,9] secara signifikan. Perhitungan sensitivitas nilai kritikalitas sel kisi kernel bahan bakar partikel berlapis TRISO melalui variasi fungsi pengkayaan U-235 dan fungsi densitas kernel UO₂ pada berbagai nilai fraksi *packing* (*Packing Fraction, PF*). Nilai PF didefinisikan sebagai rasio perbandingan antara volume total kernel beserta lapisannya terhadap volume kisi total SC yang digunakan.

Oleh karena itu penelitian tentang analisis sensitivitas parametrik kisi kernel bahan bakar berlapis TRISO dengan program transport Monte Carlo MCNP5 v1.2 sangat penting dilakukan untuk mendapatkan spesifikasi desain partikel bahan bakar berlapis TRISO dan impaknya pada desain teras reaktor RGTT berbahan bakar *pebble*.

DESKRIPSI PARTIKEL BAHAN BAKAR BERLAPIS UNTUK RGTT

Desain konsep bahan bakar teras reaktor RGTT mengadopsi teknologi bahan bakar teras HTR *pebble-bed* yang dikarakterisasikan oleh teras berbentuk silinder berisi 80% grafit^[10] dengan media pendingin gas helium yang secara neutronik tidak aktif dan tidak korosif karena bersifat *inert*. Karakteristik teras ini dapat dioperasikan pada temperatur yang tinggi. HTR *pebble-bed* menggunakan konsep partikel bahan bakar berlapis (*coated fuel particles*) TRISO dengan kualitas yang sangat baik dari resistansi dan retensi produk pelepasan fisi dan kemudian menjadi tonggak fundamental dalam pengembangan bahan bakar reaktor temperatur tinggi. Partikel bahan bakar berlapis TRISO berisi kernel bahan bakar dari UO₂ atau lainnya dengan pengkayaan tertentu (8–20% U-235) yang dibungkus dengan lapisan TRISO yaitu lapisan

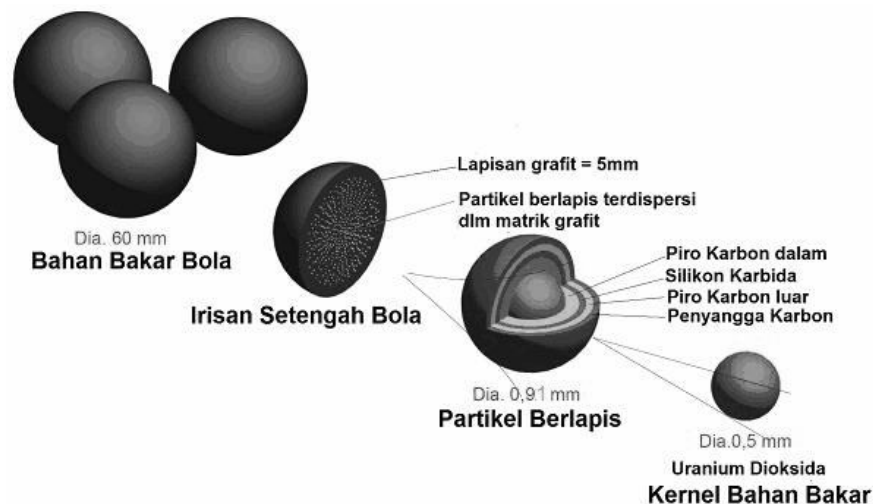
karbon penyangga berpori, lapisan piro karbon dalam, lapisan silikon karbida dan lapisan piro karbon luar. Ukuran kernel partikel berlapis ini sekitar 1 mm. Ribuan partikel bahan bakar berlapis ini kemudian didispersikan ke dalam bahan bakar *pebble* yang bermatriks grafit berukuran sebesar bola tenis (diamater ~6 cm). Kemudian ratusan ribu bahan bakar berbentuk *pebble* ini menyusun teras reaktor RGTT. Bentuk bahan bakar yang terdispersi dalam matriks grafit

ini membuat HTR secara khusus berbeda dari tipe reaktor lainnya.

Dimensi dan ukuran kernel partikel bahan bakar berlapis TRISO secara lengkap disajikan dalam Tabel 1 dan skematik geometri partikel bahan bakar berlapis untuk RGTT *pebble-bed* ditampilkan dalam Gambar 1.

Tabel 1. Spesifikasi teknis bahan bakar partikel berlapis RGTT

TIPE KERNEL	UO ₂	
Enrichment, % (U-235)	10,00	
Diameter kernel, cm	0,050	
Densitas kernel, g/cm ³	10,40	
LAPISAN TRISO^[11]	Diameter dari dalam kernel ke luar (cm) / tebal (cm)	Densitas (g/cm³)
Lapisan penyangga karbon berpori (<i>buffer</i>)	0,0340/0,0090	1,05
Lapisan dalam piro karbon (IPyC)	0,0380/0,0040	1,90
Lapisan Silikon Karbida (SiC)	0,0415/0,0035	3,18
Lapisan luar piro karbon (OPyC)	0,0455/0,0040	1,90
PEBBLE-BED		
Diameter bola <i>pebble</i> , cm	6,00	
Diameter zona aktif bahan bakar, cm	5,00	
Tebal matriks grafit <i>outer shell</i> , cm	0,50	
Densitas matrik grafit <i>outer shell</i> , g/cm ³	1,75	



Gambar 1. Skema geometrik bahan bakar RGTT *pebble-bed*^[12].

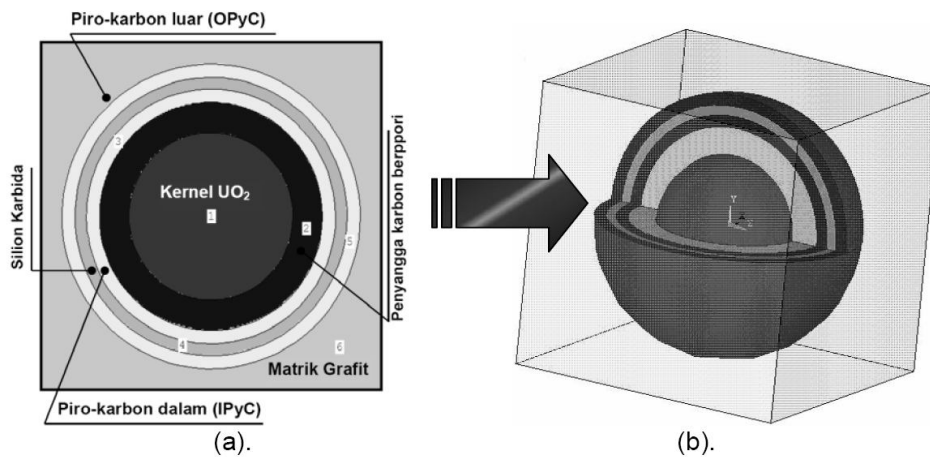
MODEL PERHITUNGAN KERNEL PARTIKEL BAHAN BAKAR BERLAPIS

Dalam perhitungan neutronik reaktor RGTT berbahan bakar bola *pebble*, mulai dari pemodelan sel/kisi bahan bakar partikel berlapis (*coated fuel particle*) TRISO sampai pemodelan konfigurasi teras (pemodelan teras) memainkan peranan yang sangat penting untuk analisis neutronik diantaranya adalah kritikalitas dan parameter kinetik lainnya.

Sebelum melakukan perhitungan teras reaktor penuh RGTT, perhitungan sel kisi bahan bakar partikel berlapis TRISO sangatlah penting. Seperti diperlihatkan dalam Gambar 2, pemodelan bahan bakar partikel berlapis TRISO dalam program

Monte Carlo MCNP5 v1.2 dilakukan dengan membagi bahan bakar partikel berlapis TRISO menjadi enam zona dimulai dari dalam kernel yaitu:

- zona 1 berisi kernel UO_2 ,
- zona 2 berisi lapisan penyangga berbahan grafit berpori (*buffer*),
- zona 3 berisi lapisan piro-karbon dalam (IPyC),
- zona 4 berupa lapisan silikon karbida (SiC),
- zona 5 berisi lapisan piro-karbon luar (OPyC) dan
- zona 6 berisi bahan matriks grafit.



Gambar 2. Pemodelan sel kisi kernel bahan bakar partikel berlapis dalam MCNP5 v1.2
(a). Model sel kisi kernel partikel berlapis heterogen dengan enam zona.
(b). Model sel kisi kernel di pusat kisi kubik sederhana (SC, *Simple Cubic*).

Pemodelan sel kernel partikel berlapis TRISO dengan heterogen enam zona dimaksudkan untuk melukiskan partikel bahan bakar berlapis dan matriks grafit secara eksplisit. Sel kernel partikel berlapis TRISO heterogen yang berisi enam zona ini dalam Monte Carlo MCNP5 v1.2 disebut *Universe-1* ($u=1$). Sel kernel ini kemudian dimasukkan ke dalam pusat sel kisi kubik sederhana (SC, *Simple Cubic*) dengan opsi FILL dan LAT=1. Dalam perhitungan sel, model *array* infinit kernel bahan bakar partikel berlapis dimanfaatkan dengan membuat *array* sel kisi kubik sederhana (SC) tersebut menggunakan kondisi batas reflektif pada ke-enam bidang lateralnya sehingga membentuk sel kubik sederhana tak berhingga (infinit). Seluruh perhitungan dilakukan dengan opsi tipikal KCODE dan KSRC pada temperatur 293,6 K dan setiap siklus KCODE terdiri atas 1000 neutron dimana jumlah eksaknya bervariasi dari siklus ke siklus, dimulai dari titik sumber fisi yang ditentukan dalam siklus sebelumnya. Hasil perhitungan didasarkan pada 1000 siklus total

dengan 10 siklus pertama di-*skip* sebelum *tally* dimulai untuk memastikan bahwa distribusi sumber sudah stabil. Sumber fisi awal diletakkan dalam pusat sel kisi kubik sederhana pada pusat koordinat (0,0;0,0;0,0). Kondisi batas vakum dikenakan pada semua permukaan luar sistem perangkat yang dianalisis setelah memasukkan material dan sifat-sifat lain seperti *importance* neutron ke dalam setiap sel yang didefinisikan.

Hasil perhitungan kritikalitas sel kernel partikel berlapis TRISO berupa faktor multiplikasi tak hingga (k_{inf}) dengan program Monte Carlo MCNP5 v1.2 dan menggunakan pustaka tampang lintang pustaka data nuklir kontinyu ENDF/B-VI untuk berbagai sensitivitas parameter meliputi kritikalitas sebagai fungsi pengayaan dan densitas kernel UO_2 pada berbagai faktor *packing* (PF, *Packing Fraction*). Karena seluruh permukaan sel kisi kubik didefinisikan sebagai permukaan reflektif, maka hasil perhitungan transport Monte Carlo MCNP5

v1.2 merupakan nilai faktor multiplikasi infinit/tak hingga (k_{inf}).

Untuk melakukan perhitungan kritikalitas kernel bahan bakar partikel berlapis dengan program Monte Carlo MCNP5 v1.2, dilakukan dengan menempatkan kernel partikel bahan bakar berlapis dalam sel/kisi kubik sederhana (*SC*, *Simple Cubic*) dengan keenam permukaannya dengan kondisi batas reflektif.

Model perhitungan dilakukan untuk kondisi parameter dengan 7 variasi *Packing Fraction* (PF)

dan 11 variasi pengkayaan U-235 (dalam %) dimana densitas UO_2 dianggap konstan ($10,4 \text{ g/cm}^3$), seperti disajikan dalam Tabel 2. Model perhitungan lainnya juga dilakukan dengan 6 variasi parameter densitas kernel dengan pengkayaan U-235 tetap sebesar 10% seperti disajikan dalam Tabel 3. Densitas atom kernel bahan bakar pada berbagai pengkayaan uranium dengan densitas UO_2 tetap ($10,4 \text{ g/cm}^3$) disajikan dalam Tabel 4.

Tabel 2. Variasi *Packing Fraction* (PF) dan pengkayaan U-235 (%) dengan densitas kernel UO_2 sebesar $10,4 \text{ g/cm}^3$ yang dipergunakan dalam perhitungan MCNP5 v1.2.

<i>Packing Fraction</i> (PF)	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5					
Densitas UO_2 (g/cm^3)	10,4 (tetap)											
Pengkayaan U-235 (%)	8,0	8,5	9,0	9,5	10	10,5	17,0	17,5	18	19	19,75	

Tabel 3. Variasi *Packing Fraction* (PF) dan variasi densitas kernel UO_2 dengan pengkayaan U-235 tetap sebesar 10% dipergunakan dalam perhitungan MCNP5 v1.2.

<i>Packing Fraction</i> (PF)	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
Pengkayaan U-235 (%)	10 (tetap)						
Densitas UO_2 (g/cm^3)	10	10,2	10,4	10,6	10,8	11	

Tabel 4. Densitas atom kernel bahan bakar pada berbagai pengkayaan uranium dengan densitas UO_2 tetap ($10,4 \text{ g/cm}^3$).

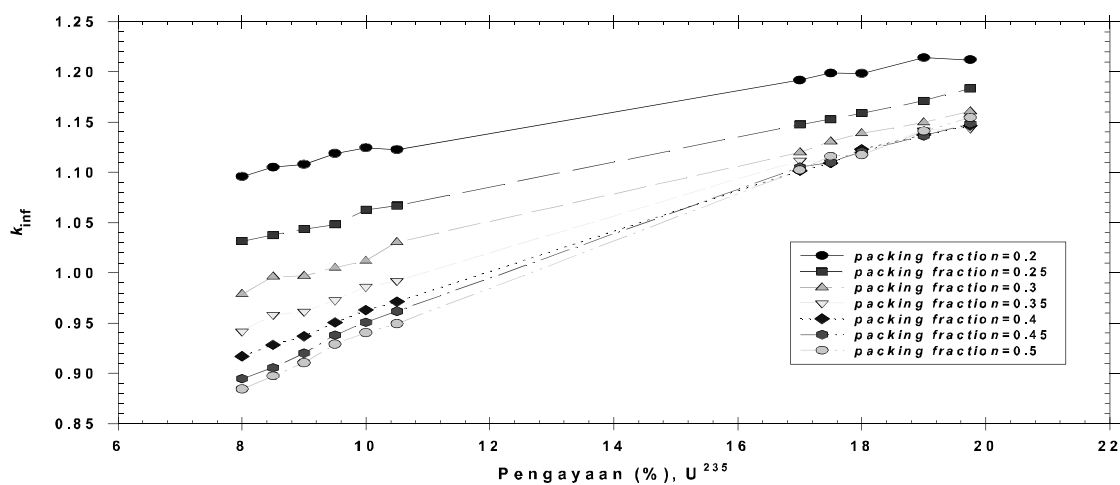
Pengkayaan Uranium (%)	Densitas UO_2 (g/cm^3)	Densitas atom (atom/barn-cm)			
		U235	U238	O	Total
8,0	10,4	1,8788564E-03	2,1333643E-02	4,6424998E-02	6,9637497E-02
8,5	10,4	1,9962698E-03	2,1217538E-02	4,6427615E-02	6,9641423E-02
9,0	10,4	2,1136814E-03	2,1101435E-02	4,6430233E-02	6,9645349E-02
9,5	10,4	2,2310912E-03	2,0985334E-02	4,6432850E-02	6,9649275E-02
10	10,4	2,3484992E-03	2,0869234E-02	4,6435467E-02	6,9653200E-02
10,5	10,4	2,4659055E-03	2,0753137E-02	4,6438085E-02	6,9657128E-02
17	10,4	3,9920247E-03	1,9244028E-02	4,6472105E-02	6,9708158E-02
17,5	10,4	4,1094060E-03	1,9127955E-02	4,6474	6,9712083E-02
18	10,4	4,2267855E-03	1,9011884E-02	4,6477338E-02	6,9716008E-02
19	10,4	4,4615392E-03	1,8779747E-02	4,6482572E-02	6,9723858E-02
19,75	10,4	4,6375999E-03	1,8605648E-02	4,6486496E-02	6,9729744E-02

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil perhitungan kritikalitas kernel dengan densitas UO_2 tetap ($10,4 \text{ gr/cm}^3$) menunjukkan nilai faktor multiplikasi tak-hingga (k_{inf}) meningkat seiring dengan kenaikan pengkayaan U-235, seperti terlihat dalam Gambar 3.

Dari Gambar 3 tampak dan mudah dipahami bahwa dengan bertambahnya kandungan U-235 (pengkayaan meningkat) akan menaikkan nilai k_{inf} untuk seluruh nilai PF. Pada Gambar 3 bahwa dalam rentang pengkayaan 8-20% terlihat gradien (*slope*) nilai k_{inf} akan semakin landai bila nilai PF semakin kecil dan sebaliknya gradien nilai k_{inf}

semakin tajam bila menggunakan nilai PF yang semakin besar. Pada nilai PF yang rendah, khususnya 0,2-0,25, bahwa nilai k_{inf} sangat sensitif dengan kenaikan pengkayaan. Pada rentang pengkayaan 8-10,5% nilai k_{inf} sensitif dengan nilai PF, kecuali pada PF 0,4, 0,45 dan 0,5. Sedangkan pada pengkayaan 19-20%, k_{inf} tidak sensitif terhadap nilai PF, akan tetapi pada PF 0,2 – 0,25 sensitivitas nilai k_{inf} masih terasa. Hal ini menunjukkan bahwa nilai k_{inf} tetap sensitif pada PF rentang 0,2-0,3 dengan rentang pengkayaan U-235 8-10,5%.

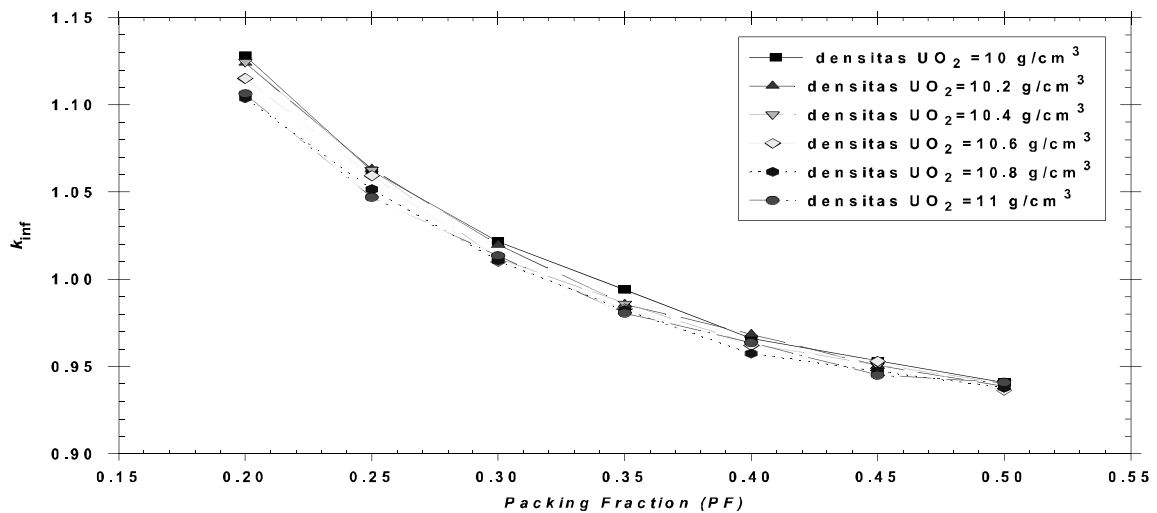


Gambar 3. Sensitivitas nilai faktor multiplikasi tak hingga (k_{inf}) kernel terhadap parameter pengkayaan U-235 dan *packing fraction* (PF) untuk densitas UO_2 $10,4 \text{ g/cm}^3$.

Hasil perhitungan variasi densitas memperlihatkan bahwa kenaikan densitas kernel UO_2 akan menyebabkan meningkatnya jumlah U-235 dalam kernel bahan bakar berlapis, namun nilai k_{inf} justru cenderung menurun, khususnya untuk *Packing Fraction* (PF) yang relatif kecil, seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Dengan kata lain dapat dikatakan bahwa semakin tinggi nilai PF (PF=0,5) memberikan nilai k_{inf} yang paling rendah ($k_{inf} \approx 0,94$) dan begitu pula sebaliknya untuk nilai PF yang semakin kecil (PF=0,2) menghasilkan nilai k_{inf} yang paling tinggi ($k_{inf} \approx 1,14$). Pada rentang PF 0,2-0,3 nilai k_{inf} lebih besar dari 1,0 sehingga memenuhi kecukupan kritikalitas sebagai bahan bakar segar. Tampak

jelas pada Gambar 4, semakin besar nilai PF, nilai k_{inf} tidak sensitif terhadap perubahan densitas UO_2 . Jika dibandingkan dengan pengkayaan, perubahan nilai k_{inf} terhadap densitas UO_2 pada PF 0,2 sangat kecil sekali.

Gambar 3 dan Gambar 4 menunjukkan bahwa k_{inf} sensitif terhadap pengkayaan dan densitas pada nilai PF yang rendah, khususnya 0,2 dan 0,25. Hal ini berarti peran grafit sebagai moderator dan sekaligus reflektor sangat berperan dalam penurunan nilai k_{inf} sel kisi kernel bahan bakar RGTT.



Gambar 4, Sensitivitas nilai faktor multiplikasi tak hingga (k_{inf}) kernel UO_2 terhadap parameter nilai *packing fraction* (PF) dan densitas kernel UO_2 untuk pengkayaan tetap 10%.

KESIMPULAN

Secara keseluruhan, analisis perhitungan sensitivitas parameter terhadap nilai kritikalitas pada sel kisi kernel partikel bahan bakar berlapis memberikan hasil nilai k_{inf} meningkat seiring dengan peningkatan pengkayaan kernel UO_2 . Nilai k_{inf} sangat sensitif pada parameter *packing factor* (PF) yang rendah, khususnya rentang 0,2-0,25 dengan pengkayaan 8-10,5%. Nilai faktor multiplikasi tak hingga (k_{inf}) tidak terlalu sensitif pada nilai PF yang besar. Dengan densitas UO_2 tetap, semakin tinggi nilai PF (0,5) memberikan nilai k_{inf} yang paling rendah (~0,94) dan begitu pula sebaliknya untuk nilai PF yang semakin kecil (0,2) menghasilkan nilai k_{inf} yang paling tinggi (~1,14).

Perbedaan nilai k_{inf} akan semakin kecil pada berbagai pengkayaan kernel UO_2 dengan membesarnya nilai parameter *packing fraction* (PF) yang digunakan atau dengan kata lain, kecenderungan gradien nilai k_{eff} semakin landai bila nilai PF semakin kecil dan sebaliknya gradien nilai k_{eff} semakin tajam bila menggunakan nilai PF yang semakin besar.

Dari hasil nilai k_{inf} ini material grafit diperkirakan memainkan peranan ganda sebagai moderator dan reflektor yang mendominasi efek U-235 dalam perhitungan kritikalitas sel kernel partikel bahan bakar berlapis pada reaktor RGTT.

Dari seluruh hasil analisis perhitungan kritikalitas ini dapat disimpulkan, bahwa selain *packing fraction* (PF), pemilihan pengkayaan U-

235 dan densitas kernel UO_2 harus dipertimbangkan dalam desain teras RGTT karena dapat merubah karakteristik neutronik reaktor secara signifikan.

DAFTAR PUSTAKA

1. ANONYMOUS, "NGPG Point Design-Results of the Initial Neutronics and Thermal-Hydraulic Assessment During FY-03", INEEL, September 2003.
2. J, SOMERS, A, FERNANDEZ, "Novel Inert Matrix Fuel Kernels for Pu and Minor Actinide Incineration in High Temperature Reactors", Proceedings of the Conference on High Temperature Reactors, Beijing, China, September 22-24, 2004.
3. N, FUJIMOTO, S, FUJIKAWA, H, HAYASHI, T, NAKAZAWA, T, IYOKU AND K, KAWASAKI, "Present status of HTTR Project: Achievement of 950 °C of reactor outlet coolant temperature", 2nd International Topical Meeting on HIGH TEMPERATURE REACTOR TECHNOLOGY, Beijing, CHINA,, September 22-24, 2004.
4. ANDREW C, KADAK, DAVID A, PETTI, ET,AL,, "Modular Pebble Bed Reactor", Annual Report, INEEL/EXT-2000-01034, MIT-ANP-PR-075, July 2000.
5. EDWIN S, LYMAN, "The Pebble-Bed Modular Reactor (PBMR): Safety Issues", Physics and Society, Vol, 30, No 4, October, 2001.

6. J,S, HENDRICKS, S,C, FRANKLE, J,D, COURT, "ENDF/B-VI Data for MCNP", Los Alamos National Laboratory Report, LA-12891, 1994.
7. ZUHAIR DAN SUWOTO, "Studi Pemodelan Kernel Bahan Bakar dan Perhitungan Kritikalitas Kisi Kubik Infinit VHTR", Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir, Volume 10, No, 1, Februari 2008, ISSN 1411-240X.
8. F, B, BROWN, ET AL., "MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5", LA-UR-03-1987, April 24, 2003.
9. ZUHAIR, SUWOTO, MAMAN MULYAMAN, "Pemodelan Kernel Bahan Bakar dalam Kisi Matriks Grafit untuk Perhitungan Kritikalitas VHTR dengan MCNP5", Prosiding Seminar Nasional Ke-14 Teknologi dan Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir, Bandung, 5 November 2008.
10. CHARLES W. F., GUILLERMO D. DELCUL, BARRY B. SPENCER, AND EMORY D. COLLINS, "HTGR Fuel Processing and Waste Forms", 2003 International High-Level Radioactive Waste Management Conference, Las Vegas, Nevada, April 1, 2003.
11. F., AZIZ DAN AS NATIO LASMAN, "Analisis Pasca-Kritikalitas Pertama Reaktor Temperatur Tinggi HTR-10 China", Prosiding Lokakarya Komputasi Dalam Sains dan Teknologi Nuklir XII, ISSN: 0853-9812, Serpong, 4-5 Juli, 2001.
12. B. BOER, "Optimized Core Design and Fuel Management of a Pebble-Bed Type Nuclear Reactor", Physics of Nuclear Reactors (PNR), of the Department Radiation, Radionuclides & Reactors of the Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, ISBN 978-1-58603-966-0, IOS Press 2008.

TANYA JAWAB

Pertanyaan :

1. Pada Pengkayaan U-235 seberapa besar nilai factor multiplikasi tak hingga (k_{inf}) tidak lagi bergantung pada besaran PF (Packing Fraction).
(Sriyana, PPEN-BATAN)
2. Pada suhu dan tekanan tinggi serta radiasi neutron cukup kuat, apakah terjadi perubahan struktur pada karbon pembungkus kernel?
(Rifai Muslih, PTBIN-BATAN)

Jawaban :

1. Walaupun secara eksak perhitungan belum pernah dilakukan, dari gambar 3 dapat diprediksi nilai k_{inf} tidak bergantung pada nilai PF (Packing Fraction) untuk uranium yang diperkaya hingga 100%.
2. Pemodelan tidak dilakukan sampai sejauh itu, karena tidak memperhatikan aspek material properties akibat suhu tinggi atau tekanan tinggi..

INVESTIGASI KESELAMATAN ELEMEN BAKAR PWR DENGAN PELET EKSENTRIS PADA KECELAKAAN KEHILANGAN ALIRAN

Hendro Tjahjono

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir BATAN
Kawasan PUSPIPTEK Gd. 80, Serpong, Tangerang Selatan, 15310, email: hendro@batan.go.id

ABSTRAK

INVESTIGASI KESELAMATAN ELEMEN BAKAR PWR DENGAN PELET EKSENTRIS PADA KECELAKAAN KEHILANGAN ALIRAN. Adanya gap antara pelet dengan kelongsong pada elemen bakar PWR memberikan kemungkinan besar terjadi ketidaksentrisan posisi pelet terhadap kelongsongnya. Pengaruh ketidaksentrisan posisi pelet tersebut terhadap parameter termal pada kondisi tunak telah dikaji dalam penelitian sebelumnya dan diketahui meningkatkan variasi azimuthal temperatur dan fluks pada kelongsong sehingga menurunkan nilai DNBR yang menjadi salah satu tolok ukur keselamatan PLTN tipe PWR dari 2,4 pada kondisi simetris ke 1,6 jika tak simetris. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui sejauh mana keselamatan reaktor terganggu dalam kondisi kecelakaan kehilangan aliran akibat matinya seluruh pompa primer dan bagaimana ketidaksimetrisan tersebut berpengaruh terhadap keselamatan. Penurunan laju alir hingga 80% akan diikuti dengan padamnya reaktor dengan masih menyisakan kalor peluruhan. Adanya kalor sisa tersebut berpotensi menaikkan temperatur elemen bakar dalam kondisi pendinginan yang kurang. Metode yang digunakan adalah dengan memecahkan persamaan konduksi dalam variabel waktu dan ruang dua dimensi, yaitu dalam bidang penampang elemen bakar menggunakan Matlab. Data yang digunakan adalah data tipikal PWR 1000 MWe, sedangkan untuk penurunan laju alir menggunakan data AP1000 sebagai pendekatan dan daya peluruhan menggunakan formula pendekatan terhadap data ANS. Hasil investigasi pada daya maksimum hingga 100 detik setelah pompa mati menunjukkan kenaikan temperatur kelongsong beberapa saat sebelum reaktor padam dan kemudian turun dengan cepat seiring padamnya reaktor dan naik kembali setelah 20 detik. Pengaruh ketidaksentrisan terlihat dari lebih tingginya temperatur dan fluks kalor pada sisi rapat dibanding sisi renggang. Dari aspek keselamatan ditunjukkan dengan naiknya DNBR di saat awal padam hingga mencapai puncak sebesar 7,36 dan turun kembali hingga mencapai titik batas minimum yang diijinkan setelah 85 detik. Dapat disimpulkan bahwa matinya pompa pendingin berdampak serius terhadap keselamatan PLTN dan diperparah dengan adanya ketidaksentrisan posisi pelet.

Kata kunci: LOFA, PLTN PWR, pelet eksentris, DNBR, transien.

ABSTRACT

SAFETY INVESTIGATION OF PWR FUEL ELEMEN WITH EKSENTRIC PELLET UNDER LOSS OF FLOW ACCIDENT. The existence of gap between PWR fuel pellet and cladding can shift the pellet from its concentric position. The influences of this eccentricity to thermal parameters of fuel element has been investigated in the previous research resulting to the increase of angular variation of temperature and flux. That reduce DNBR (Departure from Nucleate Boiling Ratio) value starting from 2.4 in concentric position to 1.6 in eccentric position. results to the angular variation of temperature and heat flux with the maximum flux is higher than its concentric value. The objective of this research is to know how far the reactor safety could be maintained under loss of flow accident and how big the pellet eccentricity takes place. The flow decreasing to 80% of nominal value will trigger reactor shut-down with the power follows certain curve of decay heat in a long period. Under less of cooling, this decay heat can induce the increase of fuel element temperature, so that needs to be investigated. Investigation is performed by resolving the two dimensions heat conduction equation in transient regime using Matlab. The geometric data of typical PWR 1000 MWe is used, and especially for flow cast-down, the data given in AP1000 design is used. Concerning the decay heat, an approximation equation to the ANS Table is used. The investigation within 100 second shows the increase of cladding temperature before reactor shut-down and decrease rapidly following the power decreasing, and increase again after 20 second indicating the less of decay heat cooling. The influence of eccentricity shown by the higher temperature and heat flux in smallest gap side compared to the opposite side. The DNBR decreases firstly before reactor shut-down and increase until a peak value of 7.36 and goes down again until achieving the minimum value required in about 85 second. It can be concluded that the loss of flow accident makes a serious impact to reactor safety and that risk could be increased with the eccentricity of pellet.

Keywords: LOFA, PWR, eccentric pellet, DNBR, transient.