

ANALISIS EFEK KECELAKAAN *WATER INGRESS* TERHADAP REAKTIVITAS DOPPLER TERAS RGTT200K

Zuhair, Suwoto

Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir – BATAN

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

Tel. (021)756-0912, Fax. (021)756-0913, E-mail: zuhairbasjmeleh@yahoo.com

Diterima editor: 15 Januari 2015

Direvisi editor: 29 Januari 2015

Disetujui untuk publikasi: 4 Februari 2015

ABSTRAK

ANALISIS EFEK KECELAKAAN *WATER INGRESS* TERHADAP REAKTIVITAS DOPPLER TERAS RGTT200K. Dalam *high temperature reactor*, koefisien reaktivitas temperatur yang didesain negatif menjamin reaksi fisi dalam teras tetap berada di bawah kendali dan panas peluruhan tidak akan pernah melelehkan bahan bakar yang menyebabkan terlepasnya zat radioaktif ke lingkungan. Namun masuknya air (*water ingress*) ke dalam teras reaktor akibat pecahnya tabung penukar panas generator uap, yang dikenal sebagai salah satu kecelakaan dasar desain, dapat mengintroduksi reaktivitas positif dengan potensi bahaya lainnya seperti korosi grafit dan kerusakan material struktur reflektor. Makalah ini akan menganalisis efek kecelakaan *water ingress* terhadap reaktivitas Doppler teras RGTT200K. Kapabilitas koefisien reaktivitas Doppler untuk mengkompensasi reaktivitas positif yang timbul selama kecelakaan *water ingress* akan diuji melalui serangkaian perhitungan dengan program MCNPX dan pustaka ENDF/B-VII untuk perubahan temperatur bahan bakar dari 800K hingga 1800K. Tiga opsi kernel bahan bakar UO_2 , ThO_2/UO_2 dan PuO_2 dengan tiga model kisi bahan bakar *pebble* di teras reaktor diterapkan untuk kondisi *water ingress* dengan densitas air dari 0 hingga 1.000 kg/m³. Hasil perhitungan memperlihatkan koefisien reaktivitas Doppler tetap negatif untuk seluruh opsi bahan bakar yang dipertimbangkan bahkan untuk kemungkinan *water ingress* yang besar. Efek *water ingress* lebih kuat pada model kisi dengan fraksi *packing* lebih rendah karena lebih banyak volume yang tersedia untuk air yang memasuki teras reaktor. Efek *water ingress* juga lebih kuat di teras uranium dibandingkan teras thorium dan plutonium sebagai konsekuensi dari fenomena Doppler dimana absorpsi neutron di daerah resonansi ²³⁸U lebih besar daripada ²³²Th dan ²⁴⁰Pu. Secara keseluruhan dapat disimpulkan bahwa, koefisien Doppler teras RGTT200K mampu mengkompensasi insersi reaktivitas yang diintroduksi oleh kecelakaan *water ingress*. Teras RGTT200K dengan bahan bakar UO_2 , ThO_2/UO_2 dan PuO_2 dapat mempertahankan fitur keselamatan melekat dengan cara pasif.

Kata kunci: *Water ingress*, reaktivitas Doppler, RGTT200K

ABSTRACT

ANALYSIS OF THE EFFECT OF WATER INGRESS ACCIDENT ON DOPPLER REACTIVITY OF RGTT200K CORE. In *high temperature reactor*, the negative temperature reactivity coefficient guarantees fission reaction in the core remain under the control and decay heat will not melt the fuel which cause the release of radioactive substances into the environment. But the entry of water (*water ingress*) into the reactor core due to rupture of a steam generator tube heat exchanger, which is known as one of the design basis accidents, can introduce positive reactivity with other potential hazards such as graphite corrosion and damage of the reflector structure material. This paper will investigate the effect of water ingress accident on Doppler reactivity coefficient of RGTT200K core. The capability of the Doppler reactivity coefficient to compensate positive reactivity incurred during water ingress accident will be examined through a series of calculations with MCNPX code and ENDF/B-VII library for fuel temperature changes from 800K to 1800K. Three options of UO_2 , ThO_2/UO_2 and PuO_2 fuel kernels with three lattice models of fuel pebble in the reactor core was applied for condition of water ingress with water density from 0 to 1000 kg/m³. The results of the calculations show that Doppler reactivity coefficient is negative for the entire fuel options being considered even for a large possibility of water ingress. The effects of water ingress becomes stronger in lattice model with lower packing fraction because more volume available for water entering the reactor core. The effect of water ingress is also stronger in the uranium core compared to thorium and plutonium cores as a consequence of the Doppler phenomenon where the neutron absorption in resonance region of ²³⁸U is greater than ²³²Th and ²⁴⁰Pu. It can be concluded overall that Doppler coefficient of RGTT200K core has capability to compensate the reactivity insertion introduced by water ingress accident. RGTT200K core with UO_2 , ThO_2/UO_2 and PuO_2 fuels can maintain the inherently safety features in a passive way.

Keywords: *Water ingress*, Doppler reactivity, RGTT200K

PENDAHULUAN

Permintaan energi dunia meningkat secara dramatis dalam beberapa dekade terakhir ini. Populasi dunia dalam 50 tahun ke depan akan bertambah dari 6 ke 9 milyar dan konsumsi energi diprediksi tumbuh pesat seiring dengan meningkatnya kebutuhan kualitas hidup yang lebih baik. Energi nuklir menjadi faktor kunci dalam memastikan pasokan energi bersih, aman dan berkelanjutan di masa mendatang. Namun isu keselamatan selalu menjadi perhatian utama dalam industri tenaga nuklir. Insiden Fukushima yang mengejutkan dunia dengan dampaknya memperjelas jika energi nuklir akan memainkan peranan utama dalam pemenuhan kebutuhan energi dunia, sifat keselamatan melekat (*inherently safety*) dan ramah lingkungan yang dimiliki reaktor nuklir menjadi syarat mutlak [1].

Reaktor Generasi IV merupakan seperangkat desain reaktor teoretik yang saat ini sedang dikembangkan di 13 negara dalam elaborasi Forum Internasional Generasi IV (*Generation IV international forum*, GIF) [2] dengan tujuan utama meningkatkan keselamatan nuklir dan resistansi proliferasi. Tujuan GIF lainnya adalah meminimalkan limbah dan memaksimalkan pemanfaatan sumber daya alam serta mengurangi biaya konstruksi dan pengoperasian reaktor. Reaktor temperatur tinggi (*high temperature reactor*, HTR) menjadi salah satu jenis dari enam desain reaktor Generasi IV yang menggunakan moderator grafit, pendingin helium dan beroperasi pada temperatur sangat tinggi ($\sim 1000^{\circ}\text{C}$). Desain HTR terdiri dari teras reaktor yang dikelilingi oleh reflektor aksial dan reflektor radial. Geometri teras HTR dapat berupa blok prisma seperti reaktor uji temperatur tinggi (*high temperature test reactor*, HTTR) Jepang [3] atau *pebble bed* seperti HTR-10 Cina [4]. Kedua jenis HTR ini menggunakan bahan bakar yang berasal dari unsur grafit dan material fisil dalam bentuk partikel TRISO. Kualitas partikel TRISO yang luar biasa dari resistansi dan retensi produk fisi menjadi inovasi fundamental dalam bidang teknologi keselamatan HTR yang intrinsik.

Salah satu karakteristik keselamatan melekat dalam HTR adalah koefisien reaktivitas temperatur yang negatif dan kapasitas panas tinggi dari struktur teras yang dapat mencegah bahan bakar dari kenaikan temperatur melebihi 1600°C . Koefisien reaktivitas negatif HTR menjamin reaksi fisi dalam teras tetap berada di bawah kendali dan panas peluruhan tidak akan pernah melelehkan bahan bakar sehingga mencegah terlepasnya zat radioaktif ke lingkungan. Namun masuknya air (*water ingress*) ke dalam teras reaktor akibat pecahnya tabung penukar panas generator uap, yang dikenal sebagai salah satu kecelakaan dasar desain (*design basic accident*, DBA), akan mengintroduksi reaktivitas positif dengan potensi bahaya lainnya seperti korosi grafit dan kerusakan material struktur reflektor.

RGTT200K adalah reaktor temperatur tinggi bertipe *pebble bed* dengan daya termal 200 MW yang didesain untuk menghasilkan listrik dan aplikasi panas proses berbagai industri seperti produksi hidrogen, desalinasi air laut. Selain siklus langsung, RGTT200K mempertimbangkan siklus tak langsung dengan turbin uap yang teknologinya sudah berkembang. Akan tetapi penggunaan turbin uap memungkinkan terjadinya kecelakaan *water ingress*. Hasil studi sebelumnya mendemonstrasikan RGTT200K dapat didesain dengan koefisien reaktivitas negatif [5] dan analisis *water ingress* di teras RGTT200K juga telah dilakukan dengan kesimpulan perubahan reaktivitas positif terjadi untuk teras dengan bahan bakar *pebble* mengandung lebih dari 10.000 partikel TRISO per *pebble* [6]. Karena bahan bakar *pebble* RGTT200K mengandung 15.000 partikel TRISO per *pebble*, maka kemampuan koefisien reaktivitas negatif bahan bakar, yang disebut reaktivitas Doppler, untuk mengkompensasi reaktivitas positif yang timbul selama kecelakaan *water ingress* perlu diuji untuk meyakinkan reaktor tetap memiliki sifat keselamatan melekat. Makalah ini akan menganalisis efek kecelakaan *water ingress* terhadap reaktivitas Doppler teras RGTT200K. Identifikasi reaktivitas Doppler dilakukan melalui serangkaian perhitungan dengan program transport Monte Carlo MCNPX [7] dan pustaka data nuklir energi kontinu ENDF/B-VII [8] pada temperatur bahan bakar dari 800K hingga 1800K. Tiga opsi kernel bahan bakar UO_2 , ThO_2/UO_2 dan PuO_2 dengan tiga model kisi bahan bakar *pebble* di teras reaktor diterapkan untuk kondisi *water ingress* dengan densitas air dari 0 hingga 1000 kg/m^3 . Hasil analisis diharapkan dapat menunjukkan seberapa besar efek *water ingress* terhadap reaktivitas Doppler teras RTT200K dengan berbagai opsi bahan bakar.

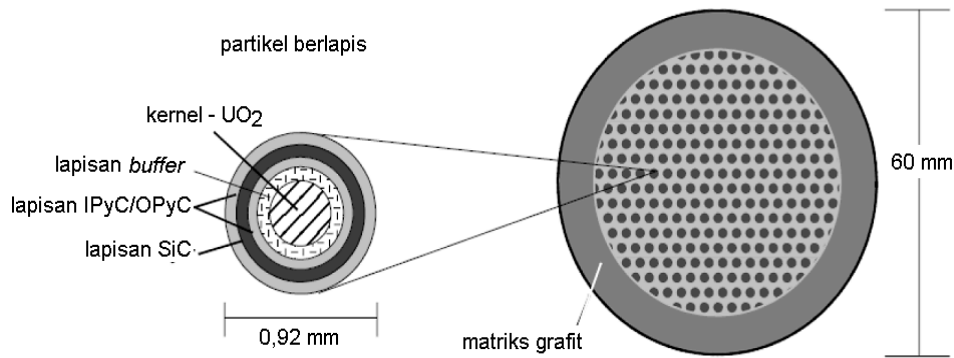
DESKRIPSI SINGKAT RGTT200K

RGTT200K terdiri dari teras silinder dengan tinggi 943 cm dan diameter 300 cm yang dikelilingi oleh reflektor grafit radial dengan ketebalan 200 cm dan reflektor grafit aksial dengan ketebalan total 750 cm. Helium dipilih sebagai pendingin teras reaktor karena memiliki beberapa keuntungan. Selain secara kimia *inert*, helium tidak mudah terbakar atau korosif yang berarti tidak diperlukan pemeliharaan untuk mengatasi kerusakan material jika melakukan kontak dengan gas. Helium juga transparan sehingga kerusakan yang mungkin dari sistem dapat dilihat dengan lebih mudah. Tampang lintang absorpsi helium yang rendah sangat baik untuk reaksi pembiakan (*breeding*) dan moderasinya yang rendah menghasilkan spektrum yang lebih keras. Spektrum keras bermanfaat untuk *breeding* dan pemuatan aktinida minor sebagai bahan bakar reaktor. Helium juga memiliki efek reaktivitas pendingin yang kecil, baik temperatur maupun void dan karena helium pendingin non radioaktif, penggunaan siklus langsung sangat dimungkinkan. Parameter teras RGTT200K diberikan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Parameter teras RGTT200K.

Densitas daya (MW/m ³)	3
Daya bahan bakar <i>pebble</i> (kW/ <i>pebble</i>)	0,56
Tinggi / Diameter teras (m/m)	9,43 / 3
Temperatur <i>inlet</i> teras (°C)	550
Temperatur <i>outlet</i> teras (°C)	950
Pendingin	He
Tekanan helium (MPa)	5,2
Laju aliran massa (kg/s)	120
Densitas helium (kg/m ³)	0,178

RGTT200K mengadopsi desain standard bahan bakar yang dikembangkan oleh Jerman untuk HTR-Modul [9] dan HTR-10 Cina dengan geometri dan dimensi yang serupa dengan reaktor modular *pebble bed* (*pebble bed modular reactor*, PBMR) [10] Afrika Selatan. Setiap bahan bakar *pebble* (diameter 6 cm) terdiri dari bola matriks grafit berdiameter 5 cm yang diisi oleh 15.000 partikel berlapis TRISO dan *shell* grafit yang bebas dari bahan bakar dengan ketebalan 0,5 cm. Partikel TRISO sendiri dibentuk oleh bahan bakar kernel berdiameter 0,05 cm dan dikelilingi oleh lapisan karbon dengan ketebalan tipikal 0,021 cm yang terdiri dari *buffer* 0,0095 cm, karbon pirolitik bagian dalam (*inner pyrolytic carbon*, IPyC) 0,0040 cm, silikon karbida (SiC) 0,0035 cm dan karbon pirolitik bagian luar (*outer pyrolytic carbon*, OPyC) 0,0040 cm. Lapisan *buffer* berfungsi menampung akumulasi gas fisi yang terbentuk dari proses fisi di dalam bahan bakar kernel sedangkan karbon pirolitik bagian dalam dan luar serta silikon karbida berfungsi sebagai lapisan penahan yang tidak dapat ditembus dan sangat efektif untuk mencegah produk fisi menyebar keluar dari partikel bahan bakar pada temperatur tinggi. Partikel TRISO dapat mempertahankan semua produk fisi hampir sepenuhnya sepanjang temperatur bahan bakar tidak melebihi 1600°C. Dalam kasus kecelakaan terjadinya kehilangan pendingin aktif, laju probabilitas pelepasan produk fisi kurang dari 1×10^{-5} selama beberapa ratus jam pada temperatur 1600°C. Diagram skematik partikel TRISO dan bahan bakar *pebble* diperlihatkan dalam Gambar 1.



Gambar 1. Diagram skematik partikel TRISO dan bahan bakar *pebble* [11].

Tabel 2. Parameter desain partikel TRISO dan bahan bakar *pebble*.

Partikel berlapis TRISO		Bahan bakar <i>pebble</i>	
Komposisi kernel	UO ₂ , ThO ₂ /UO ₂ , PuO ₂	Massa logam berat (<i>g/pebble</i>)	9,2
Diameter kernel, 1×10^{-6} (cm)	500	Pengkayaan isotop fisil (%)	8,2/7,48/53,85
Ketebalan lapisan <i>coating</i> 1×10^{-6} (cm)	95/40/35/40	Jumlah partikel TRISO per <i>pebble</i>	15.000
Urutan lapisan <i>coating</i>	<i>Buffer</i> /IPyC/SiC/OPyC	Volume pemuatan partikel TRISO (%)	5,4

Dalam RGTT200K, bahan bakar *pebble* dimuatkan ke dalam teras dan dikeluarkan dari teras secara kontinu selama operasi reaktor. Berbagai daur bahan bakar dapat diakomodasi tanpa modifikasi desain teras yang signifikan, karena itu dalam analisis ini tiga opsi bahan bakar kernel UO₂, ThO₂/UO₂ dan PuO₂ diterapkan untuk mendapatkan komparasi kelakuan reaktivitas Doppler teras RGTT200K berbahan bakar uranium, thorium dan plutonium. Kernel UO₂ dan ThO₂/UO₂ memiliki pengkayaan ²³⁵U dan ²³³U masing-masing 8,2 % dan 7,48 %. Kernel PuO₂ terdiri dari beberapa isotop plutonium, yakni ²³⁸Pu/ ²³⁹Pu/ ²⁴⁰Pu/ ²⁴¹Pu/ ²⁴²Pu dengan kandungan spesifik 0,0259/ 0,5385/ 0,2366/ 0,1313/ 0,0677. Bahan bakar *pebble* dan partikel berlapis TRISO dengan kernel UO₂, ThO₂/UO₂ dan PuO₂ memiliki spesifikasi dan geometri yang sama. Parameter desainnya diberikan dalam Tabel 2.

METODOLOGI

Untuk memahami efek kecelakaan *water ingress* yang disebabkan oleh pecahnya tabung penukar panas generator uap, sejumlah air dengan kuantitas tertentu disimulasikan masuk ke dalam teras reaktor. Situasi *water ingress* akan mempengaruhi reaktivitas teras karena air sebagai moderator neutron yang baik dapat mengubah spektrum neutron. Untuk menganalisis meningkatnya moderasi karena *water ingress*, perhitungan reaktivitas Doppler teras RGTT200K dilakukan untuk perubahan temperatur dari 800 K ke 1800 K pada kondisi *water ingress* dengan densitas air dari 0 hingga 1000 kg/m³.

Dalam analisis ini, reaktivitas moderator dan reflektor tidak ikut dihitung karena kontribusinya tidak begitu signifikan. Koefisien reaktivitas Doppler memiliki efek yang jauh lebih besar dan bahkan secara umum dianggap lebih penting daripada koefisien temperatur moderator dan reflektor karena dalam hal kejadian insersi reaktivitas positif yang besar, temperatur moderator dan reflektor tidak dapat mengubah kenaikan reaktivitas dalam waktu yang cepat, sedangkan koefisien reaktivitas Doppler segera beraksi secara agresif dengan menambahkan koefisien negatif untuk mengkompensasi situasi agar tetap terkendali.

Reaktivitas Doppler teras RGTT200K (α_F^D) yang didefinisikan sebagai rasio perubahan reaktivitas ($\Delta\rho$) dengan perubahan temperatur bahan bakar (ΔT) diperoleh dari nilai faktor multiplikasi reaktor (k_{eff}) menggunakan formula,

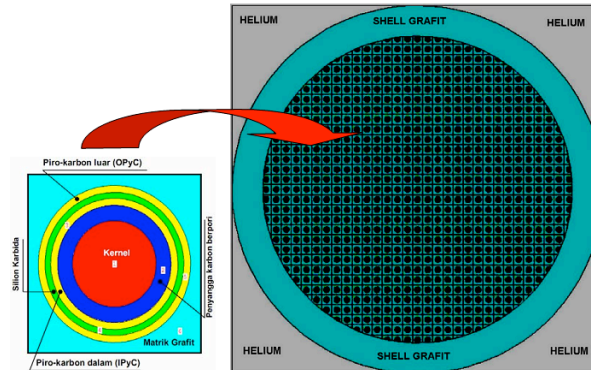
$$\alpha_F^D = \frac{\Delta\rho}{\Delta T} = \frac{k_{eff}^{T_2} - k_{eff}^{T_1}}{T_2 - T_1} \times \frac{1}{k_{eff}^{T_1} \times k_{eff}^{T_2}} \quad (1)$$

dimana $k_{eff}^{T_1}$ dan $k_{eff}^{T_2}$ masing-masing adalah faktor multiplikasi reaktor dalam kecelakaan *water ingress* pada temperatur T_1 dan T_2 untuk densitas air dari 0 hingga 1000 kg/m³.

Perhitungan faktor multiplikasi reaktor (k_{eff}) dikerjakan dengan program transport Monte Carlo MCNPX setelah pemodelan teras RGTT200K dilakukan. Dalam memodelkan RGTT200K, MCNPX menangani problema stokastisiti ganda: dispersi stokastik partikel TRISO dalam matriks grafit dari setiap bahan bakar *pebble* dan distribusi stokastik dari ribuan bahan bakar *pebble* dalam teras reaktor. Proses pemodelan terdiri dari dua tahap, yaitu pemodelan bahan bakar *pebble* dan pemodelan teras.

Pemodelan bahan bakar pebble

Pada tahap awal, yang disebut pemodelan heterogenitas pertama, bahan bakar *pebble* dimodelkan. Pemodelan dimulai dari partikel TRISO dengan kisi kubik sederhana (*simple cubic*, SC). Partikel TRISO dalam matriks grafit didefinisikan MCNPX sebagai sebuah "UNIVERSE" yang diinsersikan ke dalam kisi SC dengan kartu "FILL". *Pitch* kisi SC ditetapkan 0,16343 cm untuk mendapatkan fraksi *packing* TRISO 9,3443 %. Kombinasi kartu "LATTICE" dan "FILL" kemudian digunakan untuk menyusun 15.000 partikel TRISO dalam bahan bakar *pebble*. Gambar 2 memperlihatkan model MCNPX untuk partikel TRISO dan bahan bakar *pebble* sedangkan densitas atomnya dirangkum dalam Tabel 3.



Gambar 2. Model MCNPX untuk partikel TRISO dan bahan bakar pebble.

Tabel 3. Densitas atom bahan bakar kernel dan lapisan coating.

Nuklida	Densitas (g/cm ³)	Densitas atom ($\times 10^{24}$ atom/cm ³)	Nuklida	Densitas (g/cm ³)	Densitas atom ($\times 10^{24}$ atom/cm ³)
Kernel UO ₂			Kernel ThO ₂ /UO ₂		
²³⁸ U	10,4	$2,12877 \times 10^{-2}$	²³² Th	10,4	$2,19473 \times 10^{-2}$
²³⁵ U		$1,92585 \times 10^{-3}$	²³³ U		$1,76668 \times 10^{-3}$
¹⁶ O		$4,64272 \times 10^{-2}$	¹⁶ O		$4,74279 \times 10^{-2}$
¹⁰ B		$1,14694 \times 10^{-7}$	¹⁰ B		$1,14694 \times 10^{-7}$
¹¹ B		$4,64570 \times 10^{-7}$	¹¹ B		$4,64570 \times 10^{-7}$
Kernel PuO ₂			Buffer		
²³⁸ Pu		$6,01178 \times 10^{-4}$	¹² C	1,05	$5,26449 \times 10^{-2}$
²³⁹ Pu		$1,24470 \times 10^{-2}$	IPyC		

Nuklida	Densitas (g/cm ³)	Densitas atom (×10 ²⁴ atom/cm ³)	Nuklida	Densitas (g/cm ³)	Densitas atom (×10 ²⁴ atom/cm ³)
²⁴⁰ Pu		5,44599×10 ⁻³	¹² C	1,90	9,52621×10 ⁻²
²⁴¹ Pu		3,00965×10 ⁻³	SiC		
²⁴² Pu		1,54539×10 ⁻³	Si-nat	3,19	4,77240×10 ⁻²
¹⁶ O		4,60983×10 ⁻²	¹² C		4,77240×10 ⁻²
¹⁰ B		1,14694×10 ⁻⁷	OPyC		
¹¹ B	4,64570×10 ⁻⁷	¹² C	1,90	9,52621×10 ⁻²	

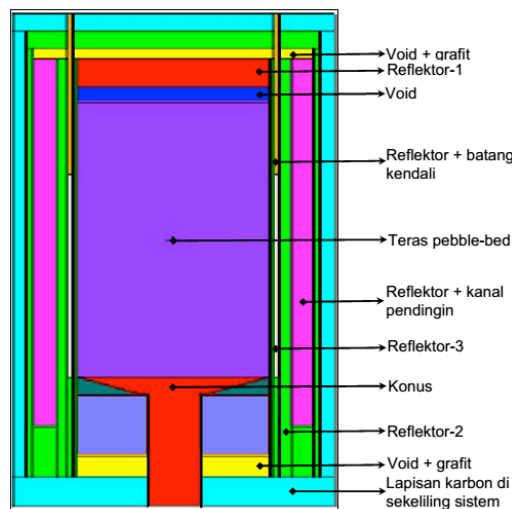
Pemodelan teras

Pada tahap berikutnya, yang disebut pemodelan heterogenitas kedua, teras RGTT200K dimodelkan. Lokasi bahan bakar *pebble* ditentukan dengan tiga model kisi, yaitu *face centered cubic* (FCC), *body centered cubic* (BCC) dan SC dengan fraksi *packing* maksimal masing-masing 74 %, 68 % dan 52 %. Fitur “LIKE n BUT” dan kartu “TRCL” dimanfaatkan untuk transformasi spasial bahan bakar *pebble* khususnya untuk kisi FCC dan BCC. Bahan bakar *pebble* bersama helium di antara *pebble* didefinisikan MCNPX sebagai sebuah “UNIVERSE” yang diinsersikan ke dalam kisi dengan kartu “FILL”. *Pitch* kisi ditetapkan sesuai dengan fraksi *packing pebble* yang dipilih seperti diberikan dalam Tabel 4. Serupa dengan pemodelan bahan bakar *pebble*, kombinasi kartu “LATTICE” dan “FILL” kemudian digunakan untuk menyusun 359.548 bahan bakar *pebble* dalam teras reaktor.

Tabel 4. Fraksi packing pebble dan pitch kisi.

Kisi	Fraksi <i>packing</i> (%)	<i>Pitch</i> kisi (cm)
SC	52	6
BCC	68	6,928203
FC	74	8,485281
BCC	61 (tipikal)	7,185259

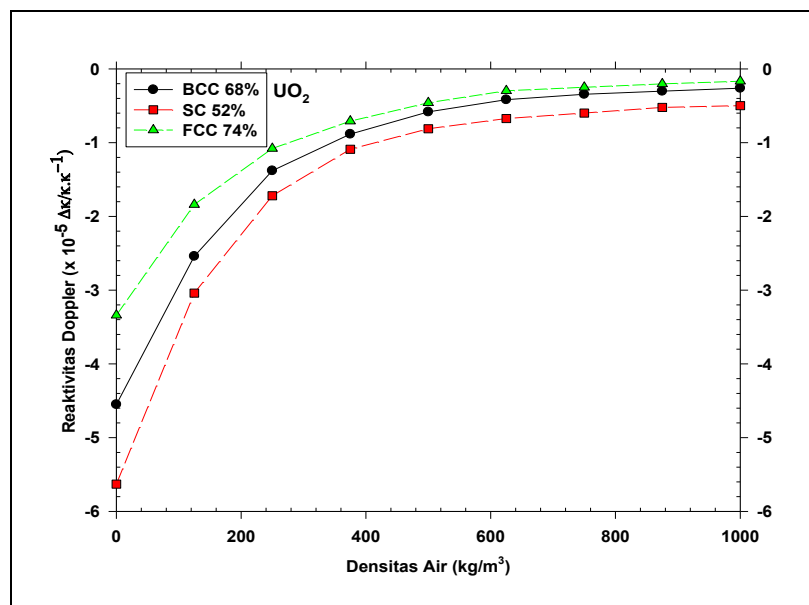
Pemodelan struktur teras lainnya, seperti reflektor dan lain-lain merupakan bagian termudah dalam pemodelan teras dengan fitur kisi MCNPX. Pemodelan konus di bagian bawah teras yang hanya ditempati oleh moderator *pebble* memerlukan penanganan yang serupa dengan bahan bakar *pebble* di dalam teras. Fraksi *packing* tipikal dari kisi BCC digunakan untuk memodelkan moderator *pebble* di dalam konus. Gambar 3 memperlihatkan model MCNPX untuk teras RGTT200K.



Gambar 3. Model MCNPX untuk teras RGTT200K.

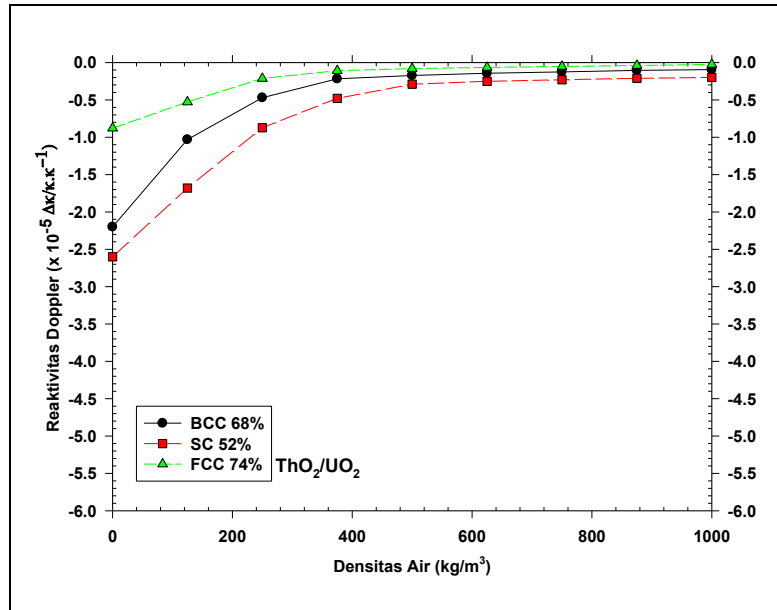
HASIL PERHITUNGAN DAN DISKUSI

Efek kecelakaan *water ingress* terhadap koefisien reaktivitas Doppler teras uranium RGTT200K dilukiskan dalam Gambar 4 untuk tiga model kisi. Kurva ini mengilustrasikan masuknya air ke dalam teras menghasilkan koefisien reaktivitas Doppler yang berkurang untuk semua model kisi yang dipertimbangkan. Penurunan koefisien Doppler tidak lagi fantastis di atas 500 kg/m^3 karena terlalu banyak neutron yang ditangkap oleh air. Dalam hal ini sifat air berubah fungsi dari termalisasi spektrum menjadi racun neutron karena absorpsinya yang tinggi. Jika Gambar 4 diamati lebih jauh, efek *water ingress* nampak lebih kuat pada model kisi dengan fraksi *packing* lebih rendah. Hal ini karena dengan faktor *packing* yang lebih rendah lebih banyak volume yang tersedia untuk air yang memasuki teras reaktor. Koefisien Doppler berkurang $5,132 \times 10^{-5} \Delta k/k \text{ K}^{-1}$; $4,288 \times 10^{-5} \Delta k/k \text{ K}^{-1}$ dan $3,173 \times 10^{-5} \Delta k/k \text{ K}^{-1}$ masing-masing untuk kisi SC, BCC dan FCC pada kondisi *water ingress* dengan densitas air paling besar yang ekuivalen dengan massa air $\sim 26.000 \text{ kg}$. Menurut Yanhua [12], nilai ini tidak mungkin terjadi karena jumlah air maksimum yang bisa memasuki teras dalam kondisi *water ingress* tidak lebih dari 4.000 kg , namun dalam analisis ini perhitungan dilakukan hingga kondisi yang paling ekstrim.

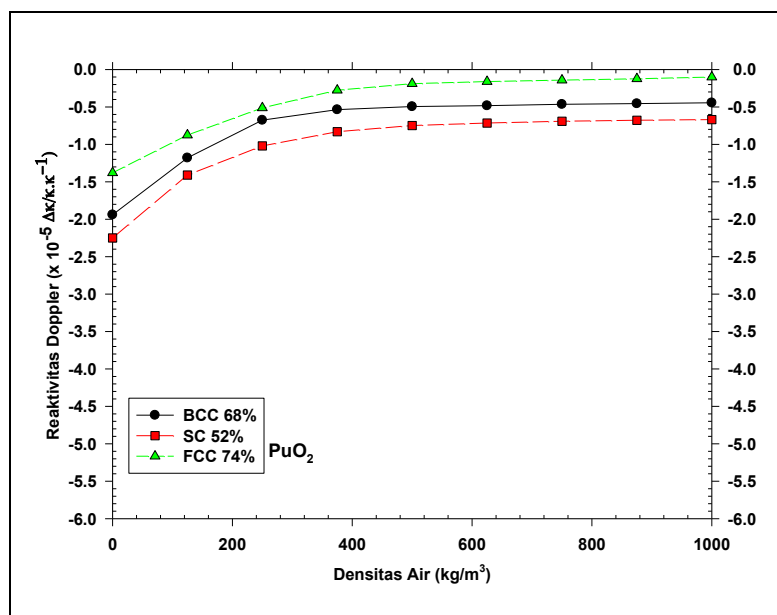


Gambar 4. Efek *water ingress* terhadap reaktivitas Doppler teras uranium RGTT200K.

Efek kecelakaan *water ingress* terhadap koefisien reaktivitas Doppler teras thorium dan plutonium RGTT200K dilukiskan dalam Gambar 5 dan 6 yang memperlihatkan kelakuan tidak banyak berubah. Penurunan koefisien Doppler tidak lagi tajam di atas densitas 500 kg/m^3 , namun efek *water ingress* tetap nampak lebih kuat pada model kisi dengan fraksi *packing* lebih rendah sebagai akibat dari fraksi volume pendingin yang lebih besar yang dimasuki air. Kondisi *water ingress* dengan densitas air paling besar menghasilkan koefisien Doppler teras thorium berkurang $2,401 \times 10^{-5} \Delta k/k \text{ K}^{-1}$; $2,106 \times 10^{-5} \Delta k/k \text{ K}^{-1}$ dan $8,530 \times 10^{-6} \Delta k/k \text{ K}^{-1}$ sedangkan koefisien Doppler teras plutonium berkurang $1,581 \times 10^{-5} \Delta k/k \text{ K}^{-1}$; $1,496 \times 10^{-5} \Delta k/k \text{ K}^{-1}$ dan $1,279 \times 10^{-5} \Delta k/k \text{ K}^{-1}$ masing-masing untuk kisi SC, BCC dan FCC.

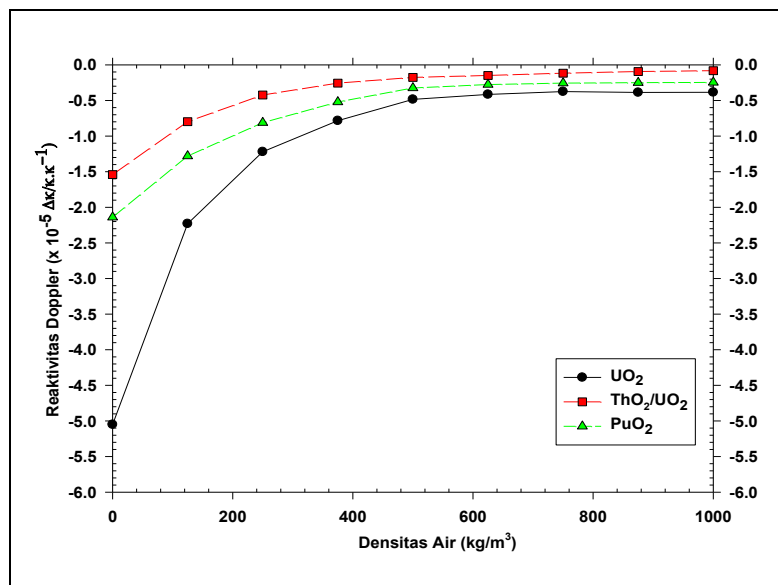


Gambar 5. Efek *water ingress* terhadap reaktivitas Doppler teras thorium RGTT200K.



Gambar 6. Efek *water ingress* terhadap reaktivitas Doppler teras plutonium RGTT200K.

Komparasi koefisien reaktivitas Doppler teras uranium, thorium dan plutonium RGTT200K sebagai efek kecelakaan *water ingress* dilukiskan dalam Gambar 7 untuk model kisi BCC tipikal. Kisi BCC dengan fraksi *packing* tipikal 61 % acapkali dipilih untuk memodelkan distribusi bahan bakar *pebble* di teras reaktor *pebble bed*. Gambar ini mengilustrasikan ketika temperatur meningkat, koefisien reaktivitas Doppler tetap negatif untuk seluruh opsi bahan bakar yang diterapkan bahkan untuk posibilitas *water ingress* yang besar. Absorpsi neutron yang tinggi dari air menjadi penyebab mengapa koefisien reaktivitas Doppler selalu negatif. Dari Gambar 7 dapat diamati pula efek Doppler uranium nampak lebih dominan dibandingkan efek Doppler thorium dan plutonium dimana koefisien Doppler teras thorium dan plutonium masing-masing berkurang $1,458 \times 10^{-5} \Delta k/k K^{-1}$ dan $1,894 \times 10^{-5} \Delta k/k K^{-1}$. Nilai-nilai ini lebih kecil daripada $4,665 \times 10^{-5} \Delta k/k K^{-1}$ ketika bahan bakar RGTT200K berganti dari UO₂ menjadi ThO₂/UO₂ dan PuO₂. Konsekuensi dari fenomena Doppler dimana absorpsi neutron di daerah resonansi ²³⁸U lebih besar daripada ²³²Th dan ²⁴⁰Pu menjadi alasan mengapa efek *water ingress* lebih kuat di teras uranium daripada teras thorium dan plutonium.



Gambar 7. Efek *water ingress* terhadap reaktivitas Doppler teras uranium, thorium dan plutonium RGTT200K.

Secara keseluruhan dapat dikatakan bahwa, kenaikan reaktivitas karena efek *water ingress* dapat dikompensasi oleh koefisien reaktivitas Doppler teras RGTT200K. Jika penurunan koefisien reaktivitas Doppler dari 800 K ke 1800 K tidak cukup besar untuk mengkompensasi insersi reaktivitas dalam kondisi *water ingress*, ini berarti kenaikan reaktivitas tidak dapat diimbangi oleh sifat keselamatan melekat yang dimiliki reaktor dan karenanya bergantung pada mekanisme keselamatan aktif lainnya seperti batang kendali. Dalam HTR yang aman, koefisien reaktivitas temperatur dari setiap masuknya air harus bernilai negatif. Jika kondisi ini tidak tercapai, komposisi bahan bakar *pebble* seperti pemuatan logam berat (*heavy metal*) dan pengkayaan bahan bakar harus diubah agar dapat menghasilkan respons reaktivitas negatif yang diperlukan untuk mengantisipasi kecelakaan *water ingress*.

Namun demikian, walaupun koefisien reaktivitas Doppler dapat mengkompensasi reaktivitas positif yang diakibatkan kecelakaan *water ingress*, potensi bahaya lainnya seperti uap air yang bersama grafit panas bereaksi menjadi gas hidrogen tidak dapat diabaikan selain korosi grafit. Insiden kecelakaan *water ingress* di Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor (AVR)[13] tahun 1978 yang ternyata tidak menyebabkan ekskursi reaktivitas, tidak menyurutkan prioritas yang harus diberikan kepada solusi problema keselamatan yang berkaitan dengan operasi dan kecelakaan dasar desain *water ingress*. Memanfaatkan lapisan tipis SiC pada permukaan bahan bakar *pebble* merupakan salah satu konsep untuk mengurangi dampak akibat kecelakaan *water ingress* yang banyak mendapat perhatian fisikawan reaktor temperatur tinggi.

KESIMPULAN

Analisis efek kecelakaan *water ingress* terhadap reaktivitas Doppler teras RGTT200K telah dilakukan dengan memanfaatkan program transport Monte Carlo MCNPX dan pustaka data nuklir energi kontinu ENDF/B-VII untuk perubahan temperatur bahan bakar dari 800K hingga 1800K. Tiga opsi kernel bahan bakar UO₂, ThO₂/UO₂ dan PuO₂ dengan tiga model kisi bahan bakar *pebble* di teras reaktor diterapkan untuk kondisi *water ingress* dengan densitas air dari 0 hingga 1000 kg/m³.

Koefisien reaktivitas Doppler tetap negatif untuk seluruh opsi bahan bakar yang dipertimbangkan dalam teras RGTT200K bahkan untuk kemungkinan *water ingress* yang besar. Efek *water ingress* lebih kuat pada model kisi dengan fraksi *packing* lebih rendah karena lebih banyak volume yang tersedia untuk air yang memasuki teras reaktor. Efek *water ingress* juga lebih kuat di teras uranium dibandingkan teras thorium dan plutonium sebagai konsekuensi dari fenomena Doppler dimana absorpsi neutron di daerah resonansi ²³⁸U lebih besar daripada ²³²Th dan ²⁴⁰Pu.

Dari analisis dapat disimpulkan bahwa, koefisien Doppler teras RGTT200K mampu mengkompensasi insersi reaktivitas yang diintroduksi oleh kecelakaan *water ingress*. Teras RGTT200K dengan bahan bakar UO_2 , ThO_2/UO_2 dan PuO_2 dapat mempertahankan fitur keselamatan melekat (*inherently safety*).

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih kami sampaikan kepada Ir. Tagor M. Sembiring dan Dr. Geni Rina Sunaryo, M.Sc. yang memberikan inspirasi dan motivasi dalam riset ini. Diskusi dan koreksi dari Prof. Surian Pinem, M.Sc. dan Ir. Iman Kuntoro, APU serta rekan-rekan di Bidang Fisika dan Teknologi Reaktor sangat kami hargai.

DAFTAR PUSTAKA

1. Andreas van Wijk, "Computational Modeling of the Flow Field in a Molten Salt Reactor Core", Bachelor Thesis, Delft University of Technology, June 22, 2008.
2. John E. Kelly, "Generation IV International Forum: A Decade of Progress through International Cooperation", Progress in Nuclear Energy, Volume 77, pages 240-246, November 2014.
3. Kazuhiko Kunitomi, "R&D on High-Temperature Gas-Cooled Reactor technology Utilizing Japan's HTTR", Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 51, No. 11-12, 2014.
4. Chen Yang, Chao Fang, Jianzhu Cao, "The Design and Thermohydraulics Study of the HTR-10 High Temperature Helium Experimental Loop", Progress in Nuclear Energy, Volume 77, Pages 329-335, November 2014.
5. Zuhair, Suwoto, "Analisis Perhitungan Koefisien Reaktivitas Bahan Bakar dan Moderator Teras RGTT200K", Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Nuklir, Bandung, 4 Juli 2013.
6. Zuhair, Suwoto, Sumijanto, "Analisis Reaktivitas Teras RGTT200K dalam Skenario Kecelakaan *Water Ingress*", Prosiding ke Seminar Nasional Ke-19 Teknologi dan Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir, Yogyakarta, 24 September 2013.
7. M.L. Fensin, J.S. Hendricks, S. Anghaie, "The Enhancements and Testing for the MCNPX 2.6.0 Depletion Capability", Journal of Nuclear Technology, Volume 170, pages 68-79, April 2010.
8. M. Herman, "Development of ENDF/B-VII and Its Covariance Component", Journal of the Korean Physical Society, Vol. 59, No. 2, pages 1034-1039, August 2011.
9. Gerhard Strydom, Hans D. Gougar, "Preliminary Reactor Physics Assessment of the HTR Module with 14% Enriched UCO Fuel", Nuclear Engineering and Design, Volume 256, pages 304-321, March 2013.
10. Trevor Dudley, *et al.*, "The Reactor Core Neutronic Model for the Pebble Bed Modular Reactor", Journal of Nuclear Engineering and Design, 238, pages 3002-3012, 2008.
11. S.K. Gintner, "Thorium-based Fuel Cycles: Saving Uranium in a 200 MWth Pebble Bed High Temperature Reactor", North West University, Master of Engineering Thesis, October 27, 2010.
12. Z. Yanhua, S. Lei, W. Yan, "Water-ingress Analysis for the 200MWe Pebble-bed Modular High Temperature Gas-cooled Reactor", Nuclear Engineering and Design 240, pages 3095-3107, 2010.
13. Rainer Moormann, "Fission Product Transport and Source Terms in HTRs: Experience from AVR Pebble Bed Reactor", Journal of Science and Technology of Nuclear Installations, Volume 2008, Article ID 597491, 2008.