

ANALISIS REAKTIVITAS TERAS RGTT200K DALAM SKENARIO KECELAKAAN WATER INGRESS

Zuhair, Suwoto, Sumijanto
Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir – BATAN
Kawasan Puspiptek, Gedung No. 80, Serpong, Tangerang 15310
Tel. (021)756-0912, Fax. (021)756-0913, E-mail: zuhairbasjmeleh@yahoo.com

ABSTRAK

ANALISIS REAKTIVITAS TERAS RGTT200K DALAM SKENARIO KECELAKAAN WATER INGRESS. Problema keselamatan utama HTR *pebble bed* secara tipikal diklasifikasikan ke dalam tiga tipe kecelakaan dasar desain, yaitu LOCA, kecelakaan *air ingress* dan kecelakaan *water ingress*. Dibandingkan dengan LOCA dan *air ingress*, kecelakaan *water ingress* lebih rumit karena masuknya air menyebabkan korosi teras reaktor grafit dan insersi reaktivitas positif. Makalah ini menganalisis reaktivitas teras RGTT200K dalam skenario kecelakaan *water ingress*. Efek reaktivitas dari air yang masuk ke dalam teras diobservasi untuk mengetahui risiko *water ingress* di teras RGTT200K pada berbagai jumlah partikel TRISO dalam bahan bakar *pebble*. Perhitungan dilakukan dengan program MCNPX dan pustaka ENDF/B-VII pada temperatur 1200K. Hasil perhitungan memperlihatkan bahwa semakin banyak jumlah partikel TRISO dalam *pebble* semakin tinggi nilai insersi reaktivitas maksimum yang diperoleh dalam skenario kecelakaan *water ingress*. TRISO dengan jumlah kurang dari 10.000 partikel tidak menimbulkan masalah *water ingress* yang signifikan dari sudut pandang reaktivitas namun masih tetap akan menjadi masalah dari sudut pandang korosi grafit. Dapat disimpulkan bahwa nilai insersi reaktivitas puncak 4,56 % $\Delta k/k$ yang dicapai oleh 15.000 partikel TRISO akibat *water ingress* harus dipertimbangkan sebagai dasar desain RGTT200K karena terkait erat dengan keselamatan reaktor.

Kata-kunci: reaktivitas, *water ingress*, RGTT200K, MCNPX, ENDF/B-VII

ABSTRACT

ANALYSIS ON REACTIVITY OF RGTT200K's CORE IN WATER INGRESS ACCIDENT SCENARIO. *Main safety problems of HTR pebble bed are typically classified into three types of design basis accidents, i.e. LOCA, air ingress accident and water ingress accident. Compared to LOCA and air ingress, water ingress accident is more complicated due to the ingress of water causes the corrosion of the graphite reactor core and positive reactivity insertion. This paper analyzes the RGTT200K's core reactivity in water ingress accident scenario. The reactivity effect of water ingress into the core was observed to determine the risk of water ingress in RGTT200K core at various number of TRISO particles in fuel pebble. Calculations were performed with MCNPX code and ENDF/B-VII library at temperature of 1200K. The calculation results show that the greater number of TRISO particles in pebble the higher maximum insertion reactivity value obtained in water ingress accident scenario. TRISO with number of less than 10,000 particles creates no significant problem of water ingress from viewpoint of reactivity but still will be a problem from viewpoint of graphite corrosion. It can be concluded that peak reactivity insertion value of 4.56 % $\Delta k/k$ achieved by 15,000 TRISO particles due to water ingress should be considered as a design basis of RGTT200K because it strongly related to reactor safety.*

Keywords: reactivity, *water ingress*, RGTT200K, MCNPX, ENDF/B-VII

PENDAHULUAN

Dengan populasi penduduk dunia yang diperkirakan tumbuh dari sekitar 6 milyar menjadi 10 milyar dalam dekade mendatang dan kualitas standard hidup yang makin tinggi, kebutuhan energi diekspektasi meningkat secara signifikan[1]. Untuk mengatasi meningkatnya kebutuhan energi, diperlukan pasokan energi dengan biaya efektif, dapat diandalkan, aman dan bersih. Energi nuklir menjadi sebuah alternatif sumber energi yang akan memainkan peranan penting dalam pemenuhan kebutuhan energi dunia masa depan[2]. Energi nuklir diperlukan tidak hanya terbatas untuk memenuhi kebutuhan listrik tetapi juga untuk aplikasi panas proses industri seperti desalinasi air laut dan produksi hidrogen. Penggunaan energi nuklir untuk produksi hidrogen dan listrik untuk transportasi akan

membuka pasar baru yang besar dengan potensi reduksi emisi gas CO₂. Dalam hal ini, reaktor temperatur tinggi (*high temperature reactor*, HTR) merupakan kandidat yang paling menjanjikan diantara enam desain reaktor Generasi IV[3].

Sepanjang sejarahnya HTR memiliki dua tipe, yaitu HTR prismatic dan HTR *pebble bed*. Dalam HTR prismatic, sejumlah partikel TRISO yang terdispersi dalam elemen bakar silindris dimasukkan ke dalam blok grafit berbentuk heksagonal sedangkan dalam HTR *pebble bed*, partikel TRISO dengan jumlah tertentu didistribusikan ke dalam bahan bakar *pebble* berbentuk bola. Problema keselamatan utama HTR *pebble bed* secara tipikal diklasifikasikan ke dalam tiga tipe kecelakaan dasar desain (*design basis accidents*), yaitu kecelakaan kehilangan pendingin (*loss of coolant accidents*, LOCAs), kecelakaan masuknya udara (*air ingress accidents*) dan kecelakaan masuknya air (*water ingress accidents*)[4]. Problema pembuangan panas peluruhan setelah LOCA diatasi sepenuhnya melalui proses fisika seperti konduksi panas, radiasi dan konveksi alam. Kecelakaan *air ingress* merupakan proses yang relatif lambat walaupun udara dapat menimbulkan korosi. Korosi grafit dalam teras reaktor tidak akan dimulai hingga sirkulasi udara secara alami terjadi antara teras reaktor dan lingkungan. Jadi ada penundaan waktu beberapa puluh jam sebelum korosi sebenarnya berlangsung. Dibandingkan dengan LOCA dan *air ingress*, kecelakaan *water ingress* lebih rumit karena masuknya air menyebabkan korosi teras reaktor grafit dan insersi reaktivitas positif. Reaktivitas positif dan perbedaan tekanan yang tinggi antara sistem pendingin primer dan sekunder mendorong kecelakaan menjadi lebih cepat dan berat.

Fenomena *water ingress* merupakan salah satu kecelakaan khusus dan penting dalam HTR[5] yang sama sekali berbeda dengan kecelakaan dalam LWR. Aktivitas teoretik dan eksperimental telah dieksplorasi untuk memahami mekanisme *water ingress*. Kecelakaan *water ingress* terjadi karena pecahnya generator uap mengakibatkan air masuk ke dalam teras reaktor. Potensi bahaya yang disebabkan oleh *water ingress* tetap tersimpan jika siklus turbin uap digunakan dalam HTR sehingga harus dievaluasi secara hati-hati untuk pertimbangan keselamatan. RGTT200K akan memanfaatkan siklus turbin uap mengingat teknologinya yang sudah berkembang dan tidak banyak masalah yang perlu diselesaikan.

Makalah ini menganalisis reaktivitas teras RGTT200K dalam skenario kecelakaan *water ingress*. Efek reaktivitas dari air yang masuk ke dalam teras diobservasi untuk mengetahui risiko *water ingress* di teras RGTT200K pada berbagai jumlah partikel TRISO dalam bahan bakar *pebble*. Jumlah partikel TRISO merupakan salah satu parameter fisika teras HTR yang digunakan untuk mendapatkan dan mengatur reaktivitas awal yang diinginkan. Perhitungan reaktivitas dalam skenario kecelakaan *water ingress* mengasumsikan teras pada awalnya dalam kondisi void dari pendingin apapun. Reaktivitas teras kemudian dihitung dari faktor multiplikasi reaktor (k_{eff}) sebagai fungsi densitas air yang masuk ke dalam celah-celah kosong diantara *pebble* yang ditempati helium. Perhitungan k_{eff} dilakukan dengan program transport Monte Carlo MCNPX[6] dan pustaka tampang lintang energi kontinu ENDF/B-VII[7] pada temperatur 1200K. Program MCNPX dipilih dalam studi ini karena lebih dapat diandalkan dan aplikatif daripada program untuk reaktor temperatur tinggi sebelumnya[8] meski membutuhkan waktu eksekusi yang cukup lama. Lima opsi jumlah partikel TRISO dengan kernel UO₂ dipertimbangkan untuk memperoleh komparasi efek *water ingress* pada reaktivitas teras RGTT200K.

DESKRIPSI BAHAN BAKAR TRISO DAN TERAS RGTT200K

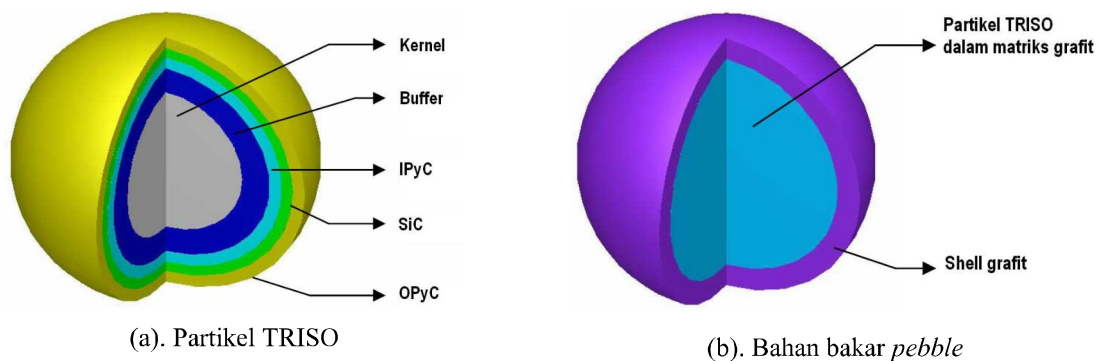
RGTT200K adalah reaktor nuklir temperatur tinggi bermoderator grafit dan berpendingin gas helium. Reaktor dengan daya termal 200 MW terdiri dari bejana silindris yang dikelilingi oleh reflektor grafit dan mengandung ~360.000 bahan bakar *pebble* yang ditumpuk secara acak. Bahan bakar *pebble* yang ditumpuk membentuk teras *pebble bed* dengan diameter 3 m dan tinggi 9,43 m.

Dengan densitas daya rendah (3 MW/m^3), RGTT200K memastikan perpindahan panas berlangsung dengan baik dan cukup jika terjadi kondisi kehilangan pendingin. Pendingin helium mengalir melalui rongga-rongga kosong yang berada di antara bahan bakar *pebble* dan melalui reflektor grafit. Sistem pendingin primer dapat mengangkut panas yang dihasilkan di dalam teras reaktor ke sistem pendingin sekunder yang berisi air bertekanan untuk diteruskan ke turbin uap. Mekanisme pasif seperti radiasi, konduksi dan konveksi panas dari pendingin helium menyediakan cukup pendinginan untuk mencegah kerusakan teras. Temperatur *outlet* teras rerata RGTT200K adalah 750°C , sedangkan temperatur *inlet* helium dingin reratanya 250°C . Parameter reaktor dan spesifikasi teras RGTT200K diberikan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Parameter reaktor dan spesifikasi teras RGTT200K.

Parameter reaktor:	
Daya termal reaktor (MW)	200
Volume teras (m^3)	66,657
Temperatur <i>inlet</i> / <i>outlet</i> helium ($^\circ\text{C}$)	550 / 950
Tekanan helium (MPa)	5,2
Laju aliran helium (kg/s)	120
Densitas helium pada 273,16K, 10^5 Pa (g/cm^3)	$1,78 \times 10^{-4}$
Spesifikasi teras:	
Diameter / tinggi teras (m)	3 / 9,43
Jumlah <i>pebble</i> per m^3	5.394
Jumlah <i>pebble</i> dalam teras	359.548
Fraksi <i>packing pebble</i> dalam teras (%)	61
Impuritas boron alam dalam struktur grafit (ppm)	2

Bahan bakar RGTT200K serupa dengan yang digunakan di HTR-10 China[9]. Dalam setiap bahan bakar *pebble* terdapat ribuan partikel TRISO berdiameter 0,92 mm yang tersebar dalam matriks grafit untuk membentuk zona bahan bakar berdiameter 5 cm yang dilapisi *shell* grafit berketebalan 0,5 cm. Partikel TRISO dikomposisi oleh kernel bahan bakar uranium dioksida dengan diameter $500 \mu\text{m}$ dan dikelilingi oleh empat lapisan *coating* dengan ketebalan tipikal total $210 \mu\text{m}$. Selain menjaga produk fisi agar tidak terlepas dari integritas bahan bakar, lapisan *coating* berfungsi mempertahankan bahan bakar dan produk fisi berada di bawah temperatur 1600°C serta mencegah pelepasan radiasi yang signifikan ke lingkungan. Fitur keselamatan pasif ini telah berhasil diuji di HTR-10 China[9].



Gambar 1. Skema geometrik bahan bakar RGTT200K[10].

Bahan bakar *pebble* dimuatkan melalui bagian atas teras reaktor dan dikeluarkan di bagian bawah teras. RGTT200K masih mempertimbangkan strategi manajemen bahan bakar dengan skema

Multipass dan OTTO. Dalam skema Multipass, bahan bakar yang belum mencapai *burnup* final akan dikembalikan lagi ke dalam teras reaktor. Sirkulasi bahan bakar *pebble* dapat dilakukan secara berulang hingga 9 kali. Dalam skema OTTO, bahan bakar *pebble* hanya digunakan sekali lewat untuk kemudian dikeluarkan setelah satu siklus operasi sehingga tidak dibutuhkan mekanisme pemuatan yang kompleks seperti peralatan untuk pengukuran *burnup* bahan bakar, resirkulasi bahan bakar dan peralatan ekstraksi yang membatalkan bahan bakar yang akan digunakan kembali.

Dalam analisis ini, jumlah TRISO untuk setiap bahan bakar *pebble* bervariasi dari 5.000 hingga 15.000 partikel. Kernel UO₂ yang digunakan memiliki pengkayaan ²³⁵U 8,2 %. Untuk 15.000 partikel berlapis TRISO, massa uranium dalam *pebble* adalah ~9 gram. Nilai ini diperoleh dari perhitungan densitas, komposisi dan volume bahan bakar. Skema geometrik bahan bakar RGTT200K diperlihatkan dalam Gambar 1.

MODEL PERHITUNGAN

Model perhitungan dengan MCNPX dikonstruksi untuk mensimulasikan teras reaktor RGTT200K dalam skenario kecelakaan *water ingress*. MCNPX adalah program transport radiasi Monte Carlo 3-D yang dikembangkan Los Alamos dengan kapabilitas mensimulasikan jejak 34 jenis partikel. Dalam perhitungan ini, hanya neutron dan foton yang digunakan pada seluruh level energi. Model sferis HTR *pebble bed*, seperti RGTT200K, memerlukan penanganan khusus karena sifat fisika reaktor yang agak rumit dengan heterogenitas ganda dari bahan bakar yang unik. Heterogenitas pertama adalah partikel berlapis TRISO dalam bahan bakar *pebble* dan heterogenitas kedua adalah bahan bakar *pebble* yang diimplementasikan dalam kisi teras reaktor. Klasifikasi heterogenitas ganda untuk memodelkan teras reaktor ditabulasikan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Klasifikasi heterogenitas ganda.

Heterogenitas untuk <i>pebble</i>	Radius kernel bahan bakar (cm)	0,0250
	Ketebalan <i>buffer</i> karbon (cm)	0,0095
	Ketebalan piro-karbon dalam (cm)	0,0040
	Ketebalan silikon karbida (cm)	0,0035
	Ketebalan piro-karbon luar (cm)	0,0040
	Jumlah TRISO dalam <i>pebble</i>	15.000
	<i>Pitch</i> kisi TRISO (cm)	0,163430
	Radius zona bahan bakar <i>pebble</i> (cm)	2,5
	Ketebalan <i>shell</i> grafit (cm)	0,5
Heterogenitas untuk teras	Jumlah <i>pebble</i> dalam teras	359.548
	Fraksi <i>packing pebble</i>	0,61
	<i>Pitch</i> kisi BCC (cm)	7,185259

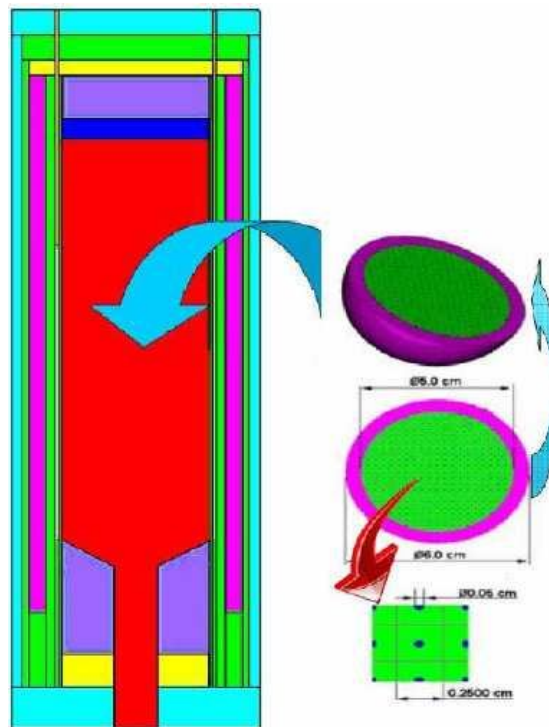
Dalam heterogenitas pertama, sel kisi kubik sederhana (*simple cubic*, SC) dipilih untuk memodelkan distribusi partikel TRISO individual dalam zona bahan bakar *pebble*. Sejumlah permukaan yang didefinisikan MCNPX dalam CELL CARDS dan SURFACE CARDS digenerasi dalam sel kisi SC dengan *pitch* yang berbeda untuk menyesuaikan jumlah partikel TRISO dalam *pebble*. *Pitch* kisi partikel TRISO (Tabel 3) yang digunakan dalam perhitungan MCNPX diperoleh dari hubungan,

$$p = r \times \sqrt[3]{\frac{4\pi}{3N}} \quad (1)$$

dimana p = *pitch* kisi SC, r = radius zona bahan bakar *pebble* (2,5 cm) dan N = jumlah partikel TRISO dalam bahan bakar *pebble*.

Tabel 3. Pitch kisi partikel TRISO dalam perhitungan MCNPX.

Jumlah partikel TRISO (N)	Pitch kisi SC (cm)
5.000	0,235706
7.500	0,205908
10.000	0,187080
12.500	0,173670
15.000	0,163430



Gambar 2. Model MCNPX untuk konfigurasi geometrik RGTT200K.

Dalam heterogenitas kedua, bahan bakar *pebble* dikonstruksi dengan sel kisi BCC (*body-centered cubic*) untuk memodelkan teras reaktor. Fraksi *packing pebble* 0,61 diseleksi untuk menyediakan rongga dalam teras reaktor yang diisi helium dengan fraksi volume pendingin 39%. Struktur berulang dengan opsi LATTICE dan FILL yang didefinisikan MCNPX digunakan untuk memodelkan partikel TRISO dalam *pebble* dan juga *pebble* dalam teras reaktor. Konus di bagian bawah teras reaktor diisi oleh hanya moderator *pebble* yang dimodelkan sebagai sel kisi BCC dengan fraksi *packing* 0,61. Moderator *pebble* yang terbuat dari grafit penuh dengan radius 3 cm diperlukan untuk memberikan moderasi ekstra pada teras reaktor. Model MCNPX untuk konfigurasi geometrik RGTT200K dengan struktur tipikal sel kisi bahan bakar diperlihatkan dalam Gambar 2.

Tabel 4. Profil densitas air.

Temperatur (K)	Densitas (g/cm ³)
277	1,00000
293	0,99820
311	0,99300
323	0,98800
348	0,97500
373	0,95800
398	0,94360
423	0,92860
448	0,91370
473	0,89860
498	0,88360
523	0,86861
548	0,85360
573	0,83870

Perhitungan reaktivitas dalam skenario kecelakaan *water ingress* mengasumsikan teras pada awalnya dalam kondisi void dari pendingin apapun. Reaktivitas teras kemudian dihitung dari faktor multiplikasi reaktor (k_{eff}) sebagai fungsi densitas air yang masuk ke dalam celah-celah kosong diantara *pebble* yang ditempati helium mengikuti persamaan,

$$\Delta\rho = \frac{k_{eff}^n - k_{eff}^{void}}{k_{eff}^n \times k_{eff}^{void}} \times 100\% \quad (2)$$

dimana $\Delta\rho$ = perubahan reaktivitas,

k_{eff}^n = faktor multiplikasi reaktor dalam skenario kecelakaan *water ingress* pada densitas air n

k_{eff}^{void} = faktor multiplikasi reaktor dalam kondisi void dari pendingin.

Densitas air menggunakan profil densitas[11] yang diberikan dalam Tabel 4. Pustaka hamburan termal $S(\alpha,\beta)$ sebagai fungsi temperatur untuk air diterapkan untuk mempertimbangkan interaksi neutron termal dengan air di bawah energi ~ 4 eV. Pustaka hamburan termal $S(\alpha,\beta)$ untuk grafit juga diaplikasikan untuk melengkapi validitas perhitungan MCNPX. Kondisi vakum dikerjakan pada batas luar dari sistem reaktor RGTT200K.

HASIL PERHITUNGAN DAN DISKUSI

Seluruh perhitungan faktor multiplikasi reaktor (k_{eff}) dikerjakan dengan program MCNPX. MCNPX dikenal sebagai program transport Monte Carlo yang mengkopel neutron, foton dan elektron gayut waktu dengan geometri tergeneralisasi, energi kontinu dan berfungsi umum. Solusi untuk parameter-parameternya, juga *tally*, diperoleh dengan teknik *sampling* yang secara statistik diderivasi dari persamaan transport integral Boltzmann. Eksplanasi detail program ini ditemukan dalam berbagai referensi dan manual MCNPX. MCNPX memuat pustaka data atomik dari tampang lintang dengan jangkauan yang luas dari reaksi nuklir. Data nuklir pada temperatur 1200K diderivasi dari pemrosesan menggunakan modul ACER dalam program pengolah data NJOY99.304. Dalam studi ini data nuklir yang digunakan diperoleh dari ENDF/B-VII.

Dua opsi KCODE dan KSRC digunakan untuk memproduksi nilai k_{eff} teras RGTT200K. KCODE mendefinisikan sejumlah siklus aktif untuk menstabilkan reaksi berantai dalam teras reaktor yang digunakan untuk memonitor perkembangan populasi neutron. Dalam perhitungan ini 10 siklus

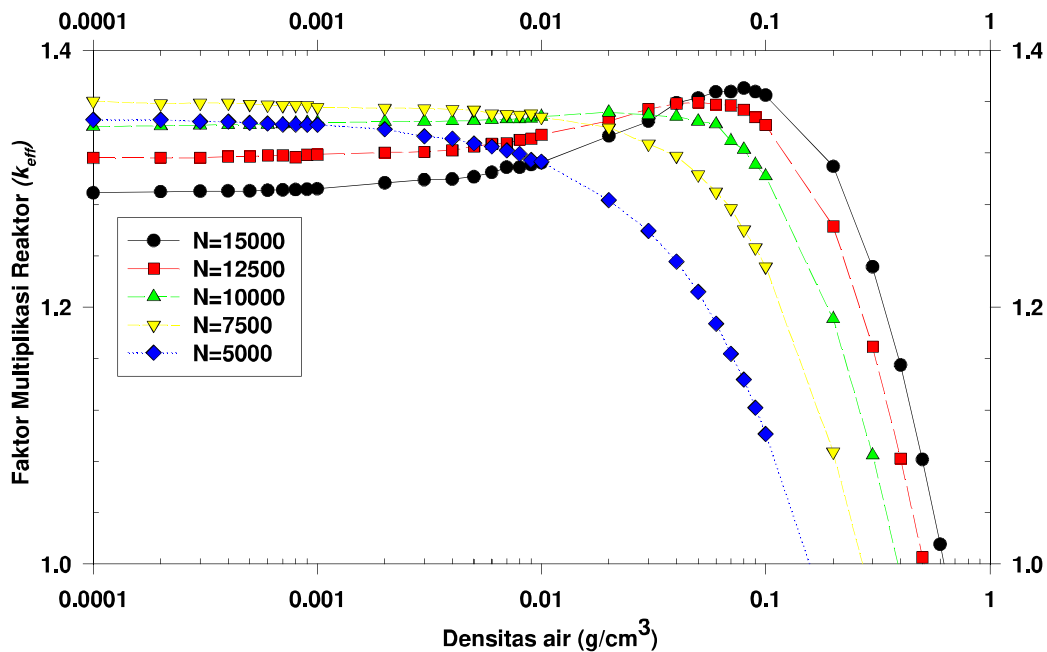
non aktif dan 100 siklus aktif dengan 5.000 neutron setiap siklusnya disimulasikan untuk memperoleh nilai k_{eff} teras RGTT200K dengan tingkat akurasi cukup baik.

KSRC mendefinisikan lokasi neutron sumber siklus pertama yang terletak di dalam material fisil untuk mengawali perhitungan faktor multiplikasi reaktor (k_{eff}) dari satu generasi kejadian fisi ke generasi berikutnya. Posisi mutlak neutron sumber awal tidak memainkan peranan pada hasil akhir jika sistem dekat pada kondisi kritikalitas. Ini dikarenakan posisi sumber dari satu siklus ke siklus selanjutnya digunakan untuk membangkitkan generasi neutron sumber berikutnya sehingga secara cepat mencakup posisi keseluruhan material fisil dalam sistem. Dalam perhitungan ini, posisi sumber neutron awal dilokasikan di sejumlah titik untuk mengurangi waktu konvergensi distribusi sumber.

Tabel 5. Hasil perhitungan faktor multiplikasi reaktor (k_{eff}) RGTT200K dalam skenario kecelakaan water ingress.

Densitas air (g/cm^3)	Faktor multiplikasi reaktor (k_{eff})				
	N = 5.000	N = 7.500	N = 10.000	N = 12.500	N = 15.000
0,0001	1,34583±0,00115	1,36025±0,00111	1,34053±0,00115	1,31613±0,00119	1,28901±0,00129
0,0002	1,34581±0,00105	1,35839±0,00120	1,34105±0,00117	1,31635±0,00104	1,28980±0,00111
0,0003	1,34449±0,00125	1,35881±0,00101	1,34163±0,00099	1,31636±0,00117	1,29012±0,00111
0,0004	1,34439±0,00117	1,35881±0,00115	1,34177±0,00124	1,31725±0,00108	1,29033±0,00111
0,0005	1,34335±0,00103	1,35824±0,00107	1,34189±0,00117	1,31728±0,00123	1,29040±0,00118
0,0006	1,34300±0,00112	1,35733±0,00124	1,34221±0,00123	1,31824±0,00136	1,29103±0,00121
0,0007	1,34222±0,00123	1,35716±0,00125	1,34258±0,00125	1,31824±0,00124	1,29118±0,00127
0,0008	1,34218±0,00130	1,35709±0,00111	1,34307±0,00121	1,31674±0,00139	1,29136±0,00127
0,0009	1,34202±0,00117	1,35701±0,00106	1,34370±0,00110	1,31850±0,00136	1,29175±0,00119
0,001	1,34200±0,00106	1,35557±0,00118	1,34395±0,00111	1,31879±0,00125	1,29202±0,00117
0,002	1,33850±0,00108	1,35503±0,00124	1,34439±0,00120	1,32047±0,00124	1,29668±0,00106
0,003	1,33291±0,00111	1,35449±0,00124	1,34464±0,00093	1,32096±0,00118	1,29922±0,00113
0,004	1,33124±0,00109	1,35385±0,00106	1,34483±0,00109	1,32208±0,00119	1,29959±0,00107
0,005	1,32740±0,00098	1,35353±0,00095	1,34508±0,00118	1,32505±0,00117	1,30150±0,00116
0,006	1,32501±0,00102	1,35036±0,00100	1,34594±0,00113	1,32703±0,00112	1,30483±0,00114
0,007	1,32198±0,00100	1,35024±0,00093	1,34627±0,00116	1,32746±0,00120	1,30884±0,00108
0,008	1,31916±0,00091	1,34962±0,00111	1,34637±0,00108	1,33031±0,00111	1,30882±0,00107
0,009	1,31456±0,00099	1,35065±0,00104	1,34677±0,00108	1,33102±0,00103	1,31088±0,00137
0,01	1,31320±0,00101	1,34803±0,00107	1,34832±0,00119	1,33415±0,00115	1,31245±0,00115
0,02	1,28332±0,00103	1,33964±0,00096	1,45169±0,00124	1,34480±0,00114	1,33328±0,00120
0,03	1,25932±0,00102	1,32694±0,00108	1,34956±0,00095	1,35416±0,00104	1,34477±0,00112
0,04	1,23555±0,00094	1,31764±0,00093	1,34829±0,00109	1,35845±0,00103	1,35890±0,00105
0,05	1,21185±0,00097	1,30297±0,00102	1,34464±0,00103	1,35938±0,00093	1,36283±0,00102
0,06	1,18726±0,00091	1,28970±0,00088	1,34249±0,00079	1,35772±0,00106	1,36757±0,00098
0,07	1,16375±0,00081	1,27697±0,00093	1,32931±0,00107	1,35691±0,00101	1,36776±0,00102
0,08	1,14357±0,00080	1,26028±0,00093	1,32259±0,00092	1,35350±0,00098	1,37033±0,00099
0,09	1,12157±0,00071	1,24629±0,00088	1,31106±0,00086	1,34777±0,00089	1,36771±0,00111
0,1	1,10109±0,00079	1,23164±0,00076	1,30199±0,00078	1,34175±0,00097	1,36495±0,00094
0,2	0,92261±0,00054	1,08733±0,00065	1,19088±0,00068	1,26286±0,00078	1,30948±0,00080
0,3	0,78897±0,00050	0,96363±0,00060	1,08464±0,00056	1,16917±0,00066	1,23132±0,00070
0,4	0,69015±0,00039	0,86546±0,00046	0,99044±0,00059	1,08215±0,00062	1,15496±0,00063
0,5	0,61090±0,00036	0,78182±0,00047	0,90772±0,00058	1,00527±0,00049	1,08123±0,00046
0,6	0,54885±0,00037	0,71206±0,00044	0,83753±0,00059	0,93694±0,00056	1,01535±0,00053
0,7	0,49869±0,00032	0,65535±0,00039	0,77728±0,00049	0,87801±0,00049	0,95665±0,00061
0,8	0,45641±0,00037	0,60758±0,00049	0,72593±0,00049	0,82501±0,00054	0,90589±0,00064
0,9	0,42296±0,00034	0,56630±0,00040	0,68197±0,00050	0,77793±0,00057	0,85768±0,00070
1,0	0,39327±0,00032	0,52920±0,00042	0,64061±0,00044	0,73473±0,00048	0,81194±0,00057

Hasil perhitungan faktor multiplikasi reaktor (k_{eff}) dalam skenario kecelakaan *water ingress* disajikan dalam Tabel 5 dan diplot ke dalam Gambar 3 sebagai fungsi densitas air. Perubahan nilai k_{eff} diobservasi untuk jumlah TRISO dalam bahan bakar *pebble* yang bervariasi dari 5.000 hingga 15.000 partikel. Secara umum, efek awal dari keberadaan air dalam pendingin teras reaktor adalah nilai k_{eff} relatif konstan kemudian meningkat hingga densitas air tertentu. Ini berarti perilaku reaktivitas menunjukkan sistem berada dalam kondisi *undermoderated* tipikal. Peningkatan reaktivitas sebagai hasil termalisasi spektral diikuti oleh fase dimana air yang bertambah menyebabkan sistem berubah menjadi *overmoderated*. Air sebagai moderator bertukar fungsi dan bertindak sebagai racun neutron karena absorpsinya yang tinggi menghasilkan penurunan reaktivitas cukup tajam.



Gambar 3. Faktor multiplikasi reaktor (k_{eff}) RGTT200K dalam skenario kecelakaan *water ingress*.

Dari Gambar 3 dapat diamati faktor multiplikasi reaktor (k_{eff}) sangat bergantung pada densitas air. Efek reaktivitas dari *water ingress* hanya dominan pada densitas air tertentu. Kasus dengan jumlah TRISO kurang dari 10.000 partikel dekat sekali dengan kondisi dimana masuknya air ke dalam teras reaktor tidak menimbulkan masalah yang signifikan dari sudut pandang reaktivitas. Kandungan uranium dalam bahan bakar *pebble* yang rendah diprediksi sebagai penyebabnya namun korosi grafit bagaimanapun masih tetap akan menjadi masalah. Partikel TRISO dengan jumlah yang lebih kecil menghasilkan nilai k_{eff} yang lebih besar karena grafit dengan jumlah yang lebih besar daripada nuklida fisil termal ^{235}U dalam UO_2 memoderasi teras secara optimal, namun efek *water ingress* nampak lebih kuat pada partikel TRISO dengan jumlah yang lebih besar.

Hasil perhitungan perubahan reaktivitas teras RGTT200K disajikan dalam Tabel 6 yang memperlihatkan nilai insersi reaktivitas puncak semakin tinggi dengan semakin banyaknya jumlah partikel TRISO dalam *pebble*. Reaktivitas puncak tidak ditemui untuk kasus 5.000 partikel TRISO. Setelah tidak berubah hingga densitas air $0,001 \text{ g/cm}^3$, penurunan reaktivitas terjadi secara agresif seperti dapat dilihat kembali dalam Gambar 3. Peningkatan reaktivitas yang sangat kecil, yakni $0,07 \text{ \%}\Delta k/k$ atau 70 pcm , diamati untuk 7.500 partikel TRISO dalam *pebble* pada densitas air $0,0004 \text{ g/cm}^3$

yang ekuivalen dengan ~10 kg air masuk ke dalam teras reaktor. Nilai insersi reaktivitas terbesar 4,56 % Δ k/k dicapai oleh 15.000 partikel TRISO setelah ~2.081 kg air mengisi ruang antar *pebble* dalam teras yang ditempati pendingin helium. Nilai ini hampir tiga belas kali lebih tinggi dari nilai reaktivitas puncak 10.000 partikel TRISO dalam *water ingress* ~520 kg.

Tabel 6. Hasil perhitungan perubahan reaktivitas teras RGTT200K.

Jumlah partikel TRISO (N)	Densitas air (g/cm ³)	Massa air (kg)	Reaktivitas puncak (% Δ k/k)
5.000	0	0	0
7.500	0,0004	10,4264	0,07156
10.000	0,02	520,1319	0,36743
12.500	0,05	1.300,3296	2,48615
15.000	0,08	2.080,5274	4,55928

KESIMPULAN

Analisis reaktivitas teras RGTT200K dalam skenario kecelakaan *water ingress* telah dilakukan dengan memanfaatkan program transport Monte Carlo MCNPX dan pustaka data nuklir energi kontinu ENDF/B-VII pada temperatur 1200K.

Hasil perhitungan memperlihatkan bahwa semakin banyak jumlah partikel TRISO dalam *pebble* semakin tinggi nilai insersi reaktivitas maksimum yang diperoleh dalam skenario kecelakaan *water ingress*. TRISO dengan jumlah kurang dari 10.000 partikel tidak menimbulkan masalah *water ingress* yang signifikan dari sudut pandang reaktivitas namun masih tetap akan menjadi masalah dari sudut pandang korosi grafit.

Dapat disimpulkan bahwa nilai insersi reaktivitas puncak 4,56 % Δ k/k yang dicapai oleh 15.000 partikel TRISO akibat *water ingress* harus dipertimbangkan sebagai dasar desain RGTT200K karena terkait erat dengan keselamatan reaktor.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih kami sampaikan kepada Ir. Tagor M. Sembiring yang memberikan inspirasi dan motivasi untuk melakukan riset ini. Dorongan semangat, diskusi dan saran dari rekan-rekan di Bidang Pengembangan Reaktor sangat kami hargai.

DAFTAR PUSTAKA

1. International Energy Agency, "Energy Technology Perspectives: Scenario & Strategies to 2015", Technical Report, OECD/IEA, France, 2008.
2. International Energy Agency, "World Energy Outlook 2010", ISBN 978-92-64-08624-1, 2010.
3. OECD Nuclear Energy Agency, "The Generation IV International Forum", www.gen-4.org, 2006.
4. Zuoyi Zhang, Yujie Dong, and Winfried Scherer, "Assessments of Water Ingress Accidents in a Modular High-Temperature Gas-Cooled Reactor", Nuclear Technology, Vol. 149, 253-264, Mar 2005
5. G.H. Lohnert, "The Consequences of Water Ingress into the Primary Circuit of an HTR-Module – from Design Basis Accident to Hypothetical Postulates", Nuclear Engineering and Design, 134, 159–176, 1992.

6. J.S. Hendricks, G.W. McKinney, et al., "MCNPX 2.6.0 Extensions, LA-UR-08-2216", Los Alamos National Laboratory, 11 April 2008.
7. M.B. Chadwick, P. Oblozinsky, M. Herman, et al., "ENDF/B-VII: Next Generation Evaluated Nuclear Data Library for Nuclear Science and Technology", Nuclear Data Sheets, 107, 2931-3060, 2006.
8. J. Chen, "On-line Interrogation of Pebble Bed Reactor Fuel using Passive Gamma-ray Spectroscopy", Doctoral dissertation, University of Cincinnati.
9. Y. Xu, S. Hu, F. Li and S. Yu, "High Temperature Reactor Development in China", Progress in Nuclear Energy, Volume 47, Number 1-4, pp. 260-270, 2005.
10. A. Kaissavelu, "Criticality Analyses of the Used and Spent Fuel Storage Facility of the 400 MWth PBMR Plant", Master of Science Thesis, Centurion, August 2009.
11. R. Khan, T. Hamid and S. Bakhtyar, "Feedback Reactivity Coefficients and their Coupling", Nuclear Engineering and Design 235, pp. 972-977, 2007.

DISKUSI/ TANYA JAWAB :

PERTANYAAN : (Sihana, Universitas Gadjah Mada)

- Apakah temperatur air disesuaikan dengan temperatur teras ?
- Bagaimana memodelkan air dalam mt card ?

JAWABAN : (Zuhair, PTRKN-BATAN)

- Temperatur air disesuaikan dengan profil densitas (Tabel 6) sedangkan temperatur teras (bahan bakar, moderator dan struktur grafit) dibuat tetap 1.200K. Temperatur air tidak selalu sesuai dengan temperatur teras.
- Dalam mt card, air dimodelkan dengan lwtr.01t hingga lwtr.64t sebagai fungsi temperatur dalam pustaka hamburan termal $S(\alpha,\beta)$.