

# Studi Desain Neutronik Perangkat Kritis Reaktor Temperatur Tinggi Berbahan Bakar Bola

ZUHAIR

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir BATAN, Indonesia

**INTISARI:** perangkat kritis reaktor temperatur tinggi dilakukan untuk memenuhi kebutuhan riset fisika reaktor yang berhubungan dengan teknologi basis HTGR. Analisis desain ditekankan pada perilaku neutron dalam teras selama perangkat kritis beroperasi dengan memanfaatkan program perhitungan neutronik komprehensif SRAC95 dan pustaka data tampang lintang multi kelompok energi neutron JENDL-3.2. Teras perangkat berdiameter 110 cm dan tinggi 140 cm yang dikelilingi reflektor grafit pada semua sisi setebal 60 cm. Bahan bakar yang digunakan berbentuk bola (*pebble bed*) dengan spesifikasi dan teknologi fabrikasi Jerman. Hasil perhitungan menunjukkan pemuatan bahan bakar bola dengan pengkayaan  $U^{235}$  10% menghasilkan tinggi kritis 133 cm yang setara dengan 6.823 bahan bakar bola, sedangkan pemuatan bahan bakar bola dengan pengkayaan  $U^{235}$  tertinggi, yakni 19%, memberikan tinggi kritis 102 cm yang setara dengan 5.207 bahan bakar bola. Profil distribusi fluks aksial pada berbagai pengkayaan  $U^{235}$  dan hasil perhitungan faktor puncak daya sebagai fungsi pengkayaan  $U^{235}$  didiskusikan sebagai konsekuensi dari perilaku neutron di teras reaktor. Desain neutronik perangkat kritis reaktor temperatur tinggi dengan ketinggian kritis 107 cm dan spesifikasi bahan bakar bola HTR-10 dapat disimpulkan sebagai pilihan yang tepat.

**KATA KUNCI:** perangkat kritis, HTGR, bahan bakar bola, SRAC95, JENDL-3.2

**ABSTRACT:** design of critical assembly for high temperature reactor has been done to fulfill the need of reactor physics research related to HTGR basic technology. Design analysis was focused to neutron behavior in the core during operation of critical assembly by utilizing comprehensive neutronics calculation program SRAC95 and neutron energy multigroup cross-section data library JENDL-3.2. The core has diameter of 110 cm and height of 140 cm which surrounded by 60 cm thickness graphite reflector on all surface. The fuel used is spherical (pebble bed) with German specification and fabrication technology. The calculation result indicates that a loading of spherical fuel with  $U^{235}$  enrichment of 10% give critical height of 133 cm which is equivalent to 6,823 spherical fuels, while a loading of spherical fuel with maximum  $U^{235}$  enrichment, i.e. 19%, give critical height of 102 cm which is equivalent to 5,207 spherical fuels. Profile of flux distribution for various  $U^{235}$  enrichments and the calculation results of power peaking factor as a function of  $U^{235}$  are discussed in consequence of neutron behavior in reactor core. Neutronic design of critical assembly for high temperature reactor with critical height of 107 cm and HTR-10 spherical fuel specification can be concluded as accurate choice.

**KEYWORDS:** critical assembly, HTGR, spherical fuel, SRAC95, JENDL-3.2

Januari 2012

## 1 PENDAHULUAN

Reaktor Berpendingin Gas Temperatur Tinggi (*High Temperature Gas Cooled Reactor*, HTGR) [1] adalah reaktor nuklir berbahan bakar uranium keramik dalam bentuk ribuan partikel berlapis (*coated particles*) yang tersebar dalam matriks grafit. *Coated particles* tersusun dari kernel dengan komposisi  $ThO_2$  atau  $UO_2$  yang dibungkus lapisan pirokarbon dan silikon karbida. Dalam perkembangannya HTGR berubah menjadi dua tipe, yaitu tipe prismatik yang dikembangkan di USA dan Jepang dan tipe bola (*pebble bed*) yang dikembangkan di Jerman, China, Rusia, Switzerland dan Afrika Selatan yang kemudian dikenal dengan sebutan Reaktor Temperatur Tinggi (*High*

*Temperature Reactor*, HTR).

Sejarah HTGR [2,3,4] dimulai dari reaktor berpendingin gas helium pertama di Oak Ridge, USA tahun 1944. Untuk meningkatkan kinerja reaktor berpendingin gas, pada tahun 1960-an di beberapa negara dikembangkan HTGR yang beroperasi pada suhu 850-950°C, diantaranya proyek DRAGON di Inggris (1964-1974), AVR (*Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor*) di Jerman (1967-1988) dan Peach Bottom di USA (1967-1974), proyek demonstrasi teknologi HTGR di Fort St. Vrain USA (1976-1989) dan THTR (*Thorium High Temperature Reactor*) di Jerman (1986-1989).

Konsep desain modular HTGR [5] kemudian berkembang setelah tahun 1986 seperti MHTGR di USA berdaya 350-400 MW dan serangkaian HTR di Jerman

berdaya 200-300 MW. HTGR yang digunakan sebagai fasilitas uji saat ini adalah HTR-10 (High Temperature Reactor 10 MW)<sup>[6]</sup> China, HTTR (High Temperature Engineering Test Reactor) Jepang dan fasilitas kritik ASTRA Rusia. HTTR dan HTR-10 merupakan reaktor eksperimental yang mendukung pengembangan teknologi reaktor generasi lanjut VHTR (Very High Temperature Reactor)<sup>[7]</sup>. Beberapa proyek HTGR<sup>[8,9,10,11,12,13]</sup> yang sedang dalam taraf perencanaan adalah PBMR Afrika Selatan, HTR-PM China, GT-HTR300C Jepang, GT-MHR Rusia, ANTARES Perancis, NHDD Korea Selatan dan NGNP USA.

Hasil studi perencanaan energi<sup>[14]</sup> yang dilakukan dengan IAEA (*International Atomic Energy Agency*) menyebutkan pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) berukuran medium dan besar dapat diakomodasi untuk jaringan listrik Jawa-Bali sekitar tahun 2016, sedangkan unit yang lebih kecil dapat dibangun di pulau lain setelah tahun 2020. PLTN berukuran kecil dapat dioperasikan sebagai sistem kogenerasi untuk penyedia panas proses guna tujuan lainnya seperti desalinasi dan pengambilan minyak (*oil recovery*) yang dibutuhkan Indonesia. Dalam hal ini, HTGR dapat diseleksi sebagai PLTN yang paling potensial.

Studi desain neutronik perangkat kritik reaktor temperatur tinggi dilakukan untuk memenuhi kebutuhan riset fisika reaktor yang berhubungan dengan teknologi berbasis HTGR. Makalah ini membahas desain neutronik perangkat kritik reaktor temperatur tinggi berbahan bakar bola di fasilitas perangkat sub kritik reaktor Kartini di Yogyakarta. Analisis desain ditekankan pada perilaku neutron dalam teras selama perangkat kritik beroperasi dengan memanfaatkan program perhitungan neutronik komprehensif SRAC95<sup>[15]</sup>. Pustaka data tampang lintang multi kelompok energi neutron JENDL-3.2<sup>[16]</sup> digunakan dalam perhitungan sel dan teras untuk melengkapi analisis ini.

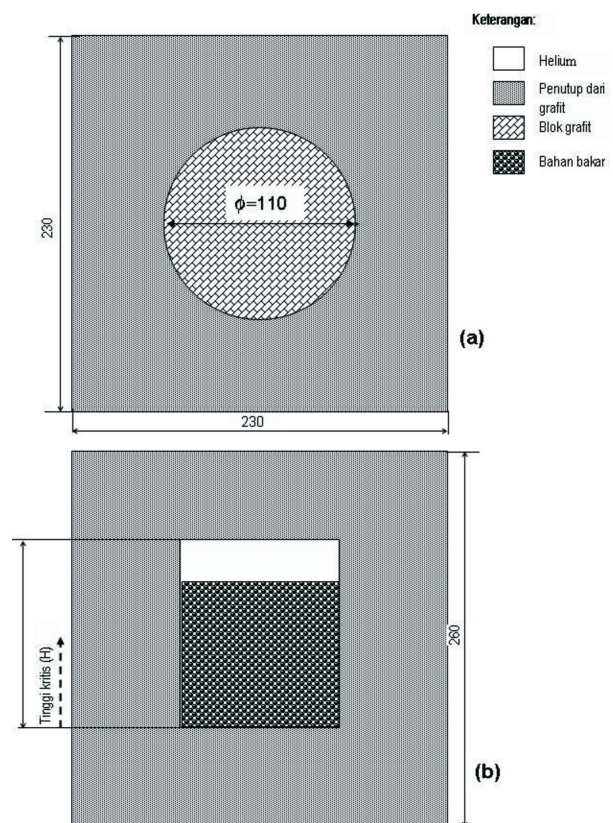
## 2 DESKRIPSI PERANGKAT KRITIK REAKTOR TEMPERATUR TINGGI

Perangkat kritik reaktor temperatur tinggi direncanakan dibangun di Indonesia untuk studi performa parameter teras reaktor dan teknologi sistem serta pemodelan skala penuh HTR. Secara umum diagram skematik konfigurasi dan spesifikasi desain perangkat kritik reaktor temperatur tinggi ditunjukkan dalam Tabel 1 dan Gambar 1.

Teras perangkat kritik reaktor temperatur tinggi berbentuk silinder dengan panjang aksial dan radialnya masing-masing 140 cm dan 110 cm. Teras ini dikelilingi oleh blok grafit yang berfungsi sebagai reflektor dengan bentuk balok berukuran 230 cm 230 cm 260 cm. Bahan bakar yang digunakan berbentuk

TABEL 1: Spesifikasi desain perangkat kritik reaktor temperatur tinggi.

Daya termal	= 400 W
Geometri teras	: Silinder (R-Z)
Bahan bakar	: Pebble-bed
Pendingin	: Helium
Reflektor	: Grafit



GAMBAR 1: Diagram skematik konfigurasi desain perangkat kritik reaktor temperatur tinggi.

bola (*pebble bed*) dengan spesifikasi dan teknologi fabrikasi Jerman seperti diperlihatkan dalam Gambar 2 dan Tabel 2. Bahan bakar bola disusun sedemikian rupa di dalam perangkat sub kritik dimana reaktor Kartini sendiri berfungsi sebagai sumber neutron.

Bahan bakar bola ini pernah digunakan di reaktor AVR Jerman dan HTR-10 China. Setiap bola tersusun dari ribuan partikel berlapis (*coated particles*) yang melekat dalam susunan grafit heterogen ganda (*graphite shell dan graphite matrix*). *Coated particles* sendiri terdiri dari kernel  $UO_2$  yang dilapisi oleh penyangga karbon berpori (*porous carbon buffer, C*), piro karbon bagian dalam (*inner pyrolytic carbon, IPyC*), silikon karbida (*SiC*) dan piro karbon bagian luar (*outer pyrolytic carbon, OPyC*). Penyangga karbon berpori berfungsi untuk mengakomodasi gas fisi

TABEL 2: Spesifikasi bahan bakar perangkat kritik reaktor temperatur tinggi

<b>Bahan Bakar</b>	
Elemen bakar	
Diameter bola = 6 cm	
Diameter zona berbahan bakar = 5 cm	
Densitas grafit di zona berbahan baker dan <i>shell</i> bagian luar = 1,7 g/cm <sup>3</sup>	
Massa bahan bakar = 192 g	
Total volum bahan bakar = 1.131,1 cm <sup>3</sup>	
Muatan uranium per bola = 5 g	
Pengkayaan U <sup>235</sup> = 10-19%	
Impuritas boron alam dalam uranium = 4 ppm	
Fraksi <i>filling</i> volumetrik bola di teras = 0,61	
<i>Coated particles</i>	
Kernel bahan bakar	
Radius kernel bahan bakar = 0,025 cm	
Densitas UO <sub>2</sub> = 10,5 g/cm <sup>3</sup>	
<i>Coatings</i>	
Material lapisan <i>coating</i> (dimulai dari kernel) = C / IPyC / SiC / OPyC	
Ketebalan lapisan <i>coating</i> (cm) = 0,009 / 0,004 / 0,0035 / 0,0035	
Densitas lapisan <i>coating</i> (g/cm <sup>3</sup> ) = 1,0 / 1,85 / 3,2 / 1,85	
Jumlah <i>coated particle</i> dalam bahan bakar ≈ 20.000	
Fraksi <i>coated particle</i> di zona berbahan bakar = 11,55%	
<b>Reflektor grafit</b>	
Densitas grafit = 1,7 g/cm <sup>3</sup>	
Impuritas boron alam dalam grafit = 1,3 ppm	

sedangkan lapisan lainnya berfungsi sebagai perintang (*barrier*) yang efektif untuk menjaga pelepasan zat radioaktif.

Dalam reaktor *pebble bed*, bahan bakar yang telah digunakan dapat disirkulasi beberapa kali. Gas helium sebagai pendingin teras tidak berpartisipasi dalam reaksi kimia dengan grafit maupun reaksi nuklir dengan neutron. Pemanfaatan grafit sebagai material struktur dan untuk reflektor merupakan salah satu aspek yang berkaitan dengan fisika teras reaktor temperatur tinggi. Bahan bakar bola dalam desain ini memiliki pengkayaan U<sup>235</sup> rendah yang bervariasi dari 10 hingga 19%.

### 3 MODEL PERHITUNGAN NEUTRONIK

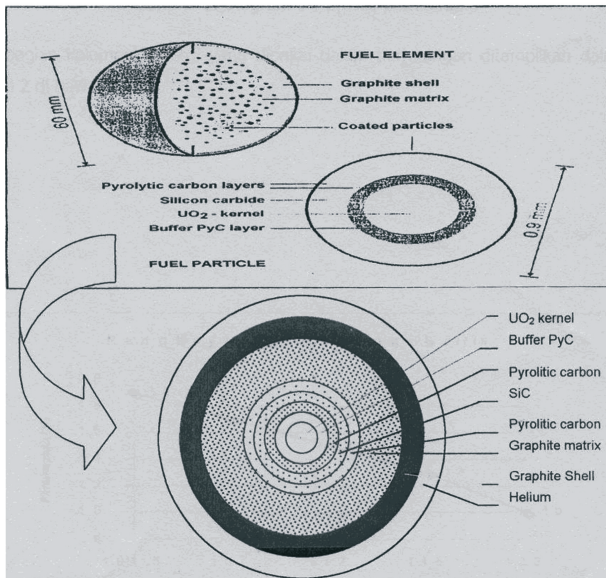
Perhitungan desain neutronik perangkat kritik reaktor temperatur tinggi terdiri atas perhitungan sel dan perhitungan teras dengan memanfaatkan program perhitungan neutronik komprehensif SRAC95. Perhitungan sel dengan modul CELL dalam sistem SRAC95 menggunakan metode probabilistik tumbukan (*collision probability*) untuk menyelesaikan problema sumber tetap (*fixed source*) transport neutron di daerah energi cepat dan termal. Perhitungan sel dilakukan

dengan menghomogenisasi sel bahan bakar, moderator, pendingin, reflektor dan struktur teras menggunakan metode pendekatan heterogenitas tunggal. Dalam perhitungan ini dibutuhkan geometri sel yang sesuai dengan model yang dipilih. Perhitungan perilaku neutron dalam reaktor sangat ditentukan oleh model perhitungan sel yang digunakan karena tampang lintang makroskopik dianggap sama di seluruh reaktor yang diacu dan diadopsi dari sebuah sel satuan padahal sesungguhnya karakteristik reaktor bersifat spasial. Kelompok energi neutron yang digunakan dalam perhitungan sel diperlihatkan dalam Tabel 3.

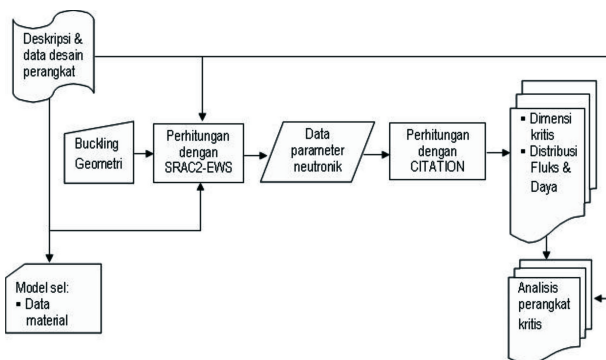
TABEL 3: Isolat Bakteri Hidrokarbon yang Lolos Seleksi Tahap I dan II

Kelompok Energi	Rentang Energi
1	10 MeV - 5,5308 keV
2	5,5308 keV - 37,266 eV
3	37,266 eV - 2,3824 eV
4	2,3824 eV - 0,36528 eV
5	0,36528 eV - 64,017 meV
6	64,017 meV - 10 $\mu$ eV

Tampang lintang yang diperoleh dikondensasikan



GAMBAR 2: Bahan bakar bola (*pebble bed*) perangkat kritik reaktor temperatur tinggi.



GAMBAR 3: Skema hirarki perhitungan dalam sistem SRAC95.

ke dalam struktur *few group* dengan fluks neutron sebagai fungsi bobot. Konstanta multi kelompok yang dihasilkan dari perhitungan sel kemudian digunakan untuk menyelesaikan persamaan difusi neutron guna mendapatkan informasi tentang distribusi fluks neutron, distribusi daya, faktor multiplikasi efektif ( $k_{eff}$ ) dan parameter teras reaktor lainnya. SRAC95 mengadopsi modul CITATION untuk memecahkan persamaan difusi neutron dengan metode numerik beda hingga. Perhitungan desain neutronik perangkat kritik reaktor temperatur tinggi dikerjakan pada berbagai tingkat pengkayaan  $U^{235}$  untuk mengestimasi berbagai tinggi teras yang paling optimum. Perhitungan dilakukan pada temperatur 300K dengan kondisi seluruh batang kendali berada di posisi paling atas (*fully up*). Gambar 3 melukiskan skema hirarki perhitungan dalam sistem SRAC95. Bahan bakar bola dalam teras secara stokastik memiliki fraksi *filling* vol-

umetrik 61% sedangkan 39% berisi void. Ketidakmurnian bahan bakar dan grafit karena adanya boron alam disimulasikan dengan konsentrasi  $B^{10}$  dan  $B^{11}$  masing-masing 20 dan 80%. Densitas atom bahan bakar dan seluruh material yang menyusun teras perangkat kritik reaktor temperatur tinggi dirangkum dalam Tabel 4 dan 5.

TABEL 4: Densitas atom (atom/barn-cm) coated particle UO2 dengan pengkayaan 10 hingga 19%.

Pengkayaan	$U^{235}$	$U^{238}$	O
$U^{235}$	( $\times 10^{-3}$ )	( $\times 10^{-2}$ )	( $\times 10^{-2}$ )
10%	2,37111	2,10705	4,68831
13%	3,08231	2,03672	4,68990
15%	3,55640	1,98984	4,69096
17%	4,03047	1,94296	4,69021
19%	4,68226	1,87851	4,69347

TABEL 5: Densitas atom (atom/barn-cm) material lapisan coating.

Material	Si	C	$B^{10}$	$B^{11}$
	( $\times 10^{-2}$ )	( $\times 10^{-2}$ )	( $\times 10^{-8}$ )	( $\times 10^{-8}$ )
C	0	5,0184	0,8057	3,2228
IPyC	0	9,2840	1,4892	5,9566
SiC	4,8176	4,8176	0,7727	3,0910
OPyC	0	9,2840	1,4892	5,9566

#### 4 HASIL PERHITUNGAN DAN DISKUSI

Hasil perhitungan desain perangkat kritik reaktor temperatur tinggi dengan program SRAC95 diperlihatkan dalam Tabel 6. Optimasi dilakukan untuk mendapatkan reaktor dalam kondisi kritis ( $k_{eff}=1$ ) dengan mengubah tinggi teras dan komposisi densitas bahan bakar sebagai fungsi pengkayaan  $U^{235}$ .

TABEL 6: Hasil perhitungan desain perangkat kritik reaktor temperatur tinggi dengan program SRAC95.

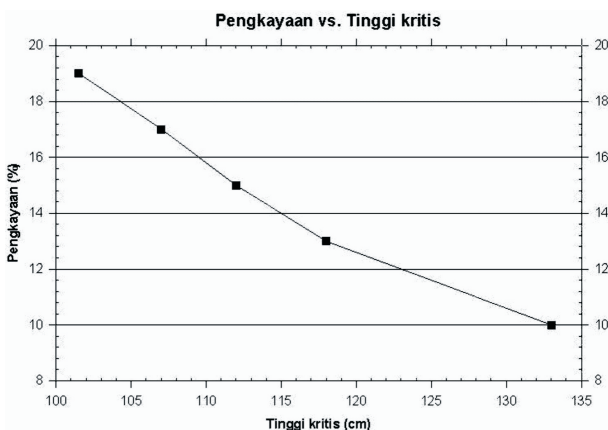
Pengkayaan	$k_{eff}$	Tinggi kritis (cm)	Jumlah bahan bakar bola
$U^{235}$			
10%	1,000	133	6.823
13%	1,000	118	6.053
15%	1,001	112	5.746
17%	1,002	107	5.489
19%	1,001	102	5.207

Tabel 6 juga memperlihatkan jumlah bahan bakar yang dimuatkan untuk ketinggian teras dan pengkayaan  $U^{235}$  tertentu yang dapat ditentukan dari ekuivalensi kenaikan tinggi teras. Setiap kenaikan tinggi

teras 1 cm setara dengan penambahan 51,3 bahan bakar bola. Desain perangkat kritik ini menggunakan manajemen bahan bakar dengan skema One-Through-Then-Out (OTTO) atau Multi-pass. Bahan bakar bola dimasukkan ke dalam tangki teras reaktor sedikit demi sedikit sampai ketinggian tertentu dimana reaktor mencapai kondisi kritis. Selama reaktor beroperasi, bahan bakar bola ditambahkan secara gradual dalam kondisi kritis untuk mengimbangi berkurangnya reaktivitas teras akibat fraksi bakar bahan bakar (*fuel burn-up*).

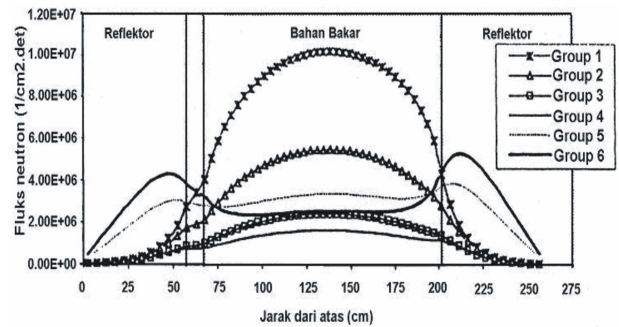
Dari Tabel 6 dapat diamati, pemuatan bahan bakar bola dengan pengkayaan  $U^{235}$  10% menghasilkan tinggi kritis 133 cm yang setara dengan 6.823 bahan bakar bola, sedangkan pemuatan bahan bakar bola dengan pengkayaan  $U^{235}$  tertinggi, yakni 19%, memberikan tinggi kritis 102 cm yang setara dengan 5.207 bahan bakar bola. Desain teras perangkat kritik memiliki tinggi 140 cm sehingga tersedia ruang kosong di bagian atas teras setinggi 7 cm yang setara dengan 359 bahan bakar bola bila pengkayaan  $U^{235}$  yang dipilih adalah 10 % atau setinggi 38 cm yang setara dengan 1.949 bahan bakar bola bila pengkayaan  $U^{235}$  yang dipertimbangkan adalah 19 %.

Relasi antara pengkayaan  $U^{235}$  dengan tinggi kritis dilukiskan dalam Gambar 4. Gambar 4 ini merefleksikan peningkatan pengkayaan  $U^{235}$  akan menurunkan tinggi kritis. Hal ini karena jumlah  $U^{235}$  yang bertambah akibat peningkatan pengkayaan  $U^{235}$  akan menyebabkan tampang lintang lintang makroskopik fisi makin meningkat, sebaliknya jumlah  $U^{238}$  berkurang yang berakibat menurunnya tampang lintang serapan neutron oleh  $U^{238}$ . Dengan demikian bertambahnya jumlah  $U^{235}$  akan menyebabkan jumlah tangkapan neutron makin tinggi, sementara berkurangnya jumlah  $U^{238}$  akan mengakibatkan probabilitas neutron yang terserap di daerah resonansi makin rendah. Konsekuensinya, jumlah neutron yang diproduksi tiap satuan volum akan bertambah besar.

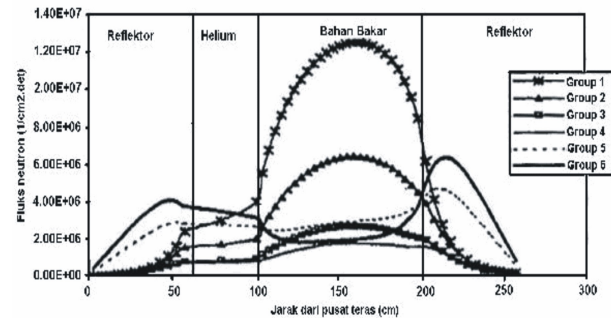


GAMBAR 4: Relasi antara pengkayaan  $U^{235}$  dengan tinggi kritis.

Perhitungan kritikalitas desain neutronik perangkat kritik reaktor temperatur tinggi ini dikerjakan pada daya 40 W. Fluks neutron yang dihasilkan dari perhitungan teras dengan modul CITATION disajikan dalam bentuk ternormalisasi. Fluks ternormalisasi didapatkan dengan membagi fluks keluaran CITATION dan daya reaktor. Bila diinginkan reaktor beroperasi pada daya tertentu, maka fluks neutron yang sesungguhnya dapat diperoleh dengan mengalikan fluks ternormalisasi dan daya yang diinginkan. Dengan cara seperti ini perubahan fluks neutron terhadap daya akan lebih mudah dipahami.



GAMBAR 5: Distribusi fluks aksial perangkat kritik reaktor temperatur tinggi pada pengkayaan  $U^{235}$  10%.



GAMBAR 6: Distribusi fluks aksial perangkat kritik reaktor temperatur tinggi pada pengkayaan  $U^{235}$  19%.

Gambar 5 dan 6 melukiskan profil distribusi fluks aksial perangkat kritik reaktor temperatur tinggi pada pengkayaan  $U^{235}$  10% dan 19%. Distribusi fluks neutron diperoleh dari titik tengah reaktor yang memanjang dari atas ke bawah. Kelompok 1 hingga 3 menunjukkan kelompok cepat dan kelompok 4 hingga 5 menunjukkan kelompok termal. Kelompok cepat mencapai puncaknya di tengah-tengah teras sedangkan kelompok termal mencapai puncaknya di daerah reflektor. Pemuncakan yang berbeda ini disebabkan oleh ukuran reaktor yang kecil dan panjang jelajah neutron dalam grafit melebihi jari-jari teras (55 cm). Akibatnya sebagian besar neutron cepat akan cepat mencapai reflektor dan mengalami perlambatan sehingga popu-

lasi neutron termal membengkak dan tertinggi terletak di reflektor.

Di daerah yang hanya terdiri atas helium, distribusi fluks neutron berbentuk garis lurus dengan kemiringan tertentu atau bahkan terkadang datar. Ini menunjukkan bahwa helium tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap populasi neutron karena secara umum tidak berpartisipasi dalam reaksi nuklir dengan neutron. Neutron hanya terdifusi ketika berada di daerah helium tanpa mengalami hamburan atau serapan yang cukup berarti. Dengan demikian perubahan densitas helium tidak memberikan perubahan reaktivitas reaktor, hal yang sangat berbeda bila dibandingkan dengan reaktor yang memanfaatkan air sebagai pendingin.

Di daerah batas bahan bakar atau teras dan reflektor, fluks termal mencapai nilai yang tinggi. Reaksi fisi memerlukan neutron termal dan di daerah batas teras dan reflektor terjadi populasi neutron termal yang tinggi sehingga fraksi bakar dan panas yang ditimbulkan di daerah ini menjadi lebih tinggi daripada di daerah lainnya. Fluks termal yang tinggi di daerah batas teras dan reflektor juga akan mengakibatkan pembangkitan daya di daerah ini menjadi lebih tinggi daripada di daerah lainnya. Untuk menggambarkan pemuncakan daya di reaktor, maka faktor puncak daya (*power peaking factor*) yang didefinisikan sebagai perbandingan daya pada suatu titik tertentu dan daya rata-rata di teras, ditentukan dengan perhitungan. Daya yang dihasilkan oleh keenam kelompok energi neutron adalah besaran skalar sehingga daya pada suatu titik tertentu dalam reaktor merupakan penjumlahan kumulatif keenam kelompok tersebut.

Hasil perhitungan faktor puncak daya sebagai fungsi pengkayaan  $U^{235}$  disajikan dalam Tabel 7. Faktor puncak daya maksimum akan bertambah dengan meningkatnya pengkayaan  $U^{235}$ , sebaliknya faktor puncak daya minimum akan berkurang dengan meningkatnya pengkayaan  $U^{235}$ . Pada umumnya faktor puncak daya maksimum terjadi di daerah batas teras dan reflektor sedangkan faktor puncak daya minimum terjadi di tengah-tengah teras reaktor. Dimensi reaktor yang kecil juga turut menyebabkan banyaknya neutron cepat menuju ke arah reflektor dan mengalami perlambatan sebelum terjebak di daerah batas teras dan reflektor sebagai neutron termal. Tingginya populasi neutron termal di daerah reflektor memberi alasan mengapa batang kendali ditempatkan di daerah ini.

Membuat dimensi reaktor lebih kecil pada reaktor temperatur tinggi dan meningkatkan densitas reflektor tidak akan menguntungkan karena akan menyebabkan pemuncakan daya yang tidak bisa ditoleransi. Pemuncakan daya ini bisa dikurangi dengan menempatkan bahan bakar berpengkayaan lebih rendah di daerah batas teras dan reflektor atau dengan menempatkan racun (*burnable poison*) di daerah reflektor yang kon-

sekuensinya berakibat pada menurunnya pemanfaatan neutron.

Namun dengan ukuran yang kecil diharapkan dapat mempersempit periode konstruksi, khususnya untuk reaktor temperatur tinggi sesungguhnya. Pengoperasian dan pemeliharaan menjadi lebih mudah dan murah. Bila pengkayaan disesuaikan dengan spesifikasi bahan bakar bola yang digunakan di HTR-10 China, yakni 17%, maka desain neutronik teras perangkat kritik reaktor temperatur tinggi berdiameter 110 cm dengan ketinggian kritis 107 cm merupakan pilihan yang tepat.

## 5 KESIMPULAN

Studi desain perangkat kritik reaktor temperatur tinggi yang direncanakan dibangun di fasilitas perangkat sub kritik reaktor Kartini di Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Maju (P3TM) BATAN, Yogyakarta telah dilakukan untuk memenuhi kebutuhan riset fisika reaktor yang berhubungan dengan teknologi basis HTGR.

Perhitungan desain perangkat kritik reaktor temperatur tinggi terdiri memanfaatkan program perhitungan neutronik komprehensif SRAC95 dan pustaka data tampang lintang multi kelompok energi neutron JENDL-3.2. Hasil perhitungan menunjukkan pemuatan bahan bakar bola dengan pengkayaan  $U^{235}$  10% menghasilkan tinggi kritis 133 cm yang setara dengan 6.823 bahan bakar bola, sedangkan pemuatan bahan bakar bola dengan pengkayaan  $U^{235}$  tertinggi, yakni 19%, memberikan tinggi kritis 102 cm yang setara dengan 5.207 bahan bakar bola.

Profil distribusi fluks aksial pada berbagai pengkayaan  $U^{235}$  dan hasil perhitungan faktor puncak daya sebagai fungsi pengkayaan  $U^{235}$  telah didiskusikan sebagai konsekuensi dari perilaku neutron di teras reaktor. Desain neutronik perangkat kritik reaktor temperatur tinggi dengan ketinggian kritis 107 cm dan spesifikasi bahan bakar bola HTR-10 dapat disimpulkan sebagai pilihan yang tepat.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih kami sampaikan kepada Dr. Ir. As Natio Lasman dan Dr. Ferhat Aziz, M.Sc. yang memberikan dorongan semangat dan diskusi yang sangat bermanfaat dalam analisis makalah ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] "Current Status and Future Development of Modular High Temperature Gas-Cooled Reactor Technology", IAEA-TECDOC-1198, February 2001
- [2] "Plutonium in High Temperature Reactors", DRAGON Project Report 899, 1974
- [3] "AVR - Experimental High-Temperature Reactor, 21 Years of Successful Operation for a Future Energy Technology", Association of German Engineers (VDI) - The Society for Energy Technologies (Publ.), Dsseldorf, June 1990

- [4] "HTR-GmbH: THTR-300 MW Kernkraftwerk Hamm-Uentrop", Kurzbeschreibung, December 1983
- [5] H. REUTLER and G.H. LOHNERT, "Der Modulare HTR - Ein neues Konzept fuer den Kugelhaufenreaktor", Atomwirtschaft, p. 18-21, Januar 1982
- [6] "The Final Safety Analysis Report for HTR-10", Institute of Nuclear Energy of Tsinghua University (INET), 2000
- [7] Finis H. SOUTHWORTH, "Very-High-Temperature Gas-Cooled Reactor (VHTR), Program Plan Appendix", GIF and US Department Of Energy, March 2005
- [8] "Reactor Safety Analysis Report of the South-African Pebble-Bed Modular Reactor (PBMR)", Rev. E, PBMR Ltd., Centurion, South-Africa, 2000
- [9] Kazuhiko KUNITOMI, Xing YAN, Shusaku SHIOZAWA, Nozomu FUJIMOTO, "GTHTR300C for Hydrogen Cogeneration", The 2-nd International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology (HTR-2004), paper D18, Beijing, China, September 22-24, 2004
- [10] A.I. KIRYUSHIN, N.G. KODOCHIGOV, N.G. KOUZAVKOV, N.N. PONOMAREV-STEPNOI, E.S. GLOUSHKOV, V.N. GREBENNIK, "Project of the GT-MHR High-Temperature Helium Reactor with Gas Turbine", Nuclear Engineering and Design, Vol. 173, p. 119-129, 1997
- [11] Jean-Claude HAUTHIER, Gerd BRINKMANN, Bernie COPSEY, Michel LECOMTE, "ANTARES: The HTR/VHTR Project at Framatome ANP", The 2-nd International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology (HTR-2004), paper A10, Beijing, China, September 22-24, 2004
- [12] "Next Generation Nuclear Plant - Design Methods Development and Validation Research and Development Program Plan", Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, INEEL/EXT-04-02293 Rev. 0, September 2004
- [13] "A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems", US DOE Nuclear Energy and the Generation IV International Forum (GIF), December 2002
- [14] Hudi HASTOWO, "Status of International GCR Programmes", TWG-GCR 19 Meeting Report, 19-th Meeting of the Technical Working Group on Gas-Cooled Reactors, University of Manchester, UK, January 17-19, 2005
- [15] K. OKUMURA, K. KANEKO and K. Tschuchihashi, "SRAC95: The Comprehensive Neutronics Calculation Code System", JAERI, Tokai, Japan, 1995
- [16] T. NAKAGAWA, et al., "Japanese Evaluated Nuclear Data Library - Version 3 Revision 2: JENDL-3.2", Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 32, p. 1259, 1995