

## DESAIN TERAS DAN BAHAN BAKAR PLTN JENIS HTR-PBMR PADA DAYA 50 MWe DENGAN MENGGUNAKAN PROGRAM SRAC2006

Bima Caraka Putra<sup>1</sup>, Yosaphat Sumardi<sup>1</sup>, Yohannes Sardjono<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Program Studi Fisika, Jurusan pendidikan Fisika, Fakultas MIPA - UNY

<sup>2</sup> Pusat Sains dan Teknologi Akselerator BATAN

Jl. Babarsari Kotak Pos 6101 YKBB, Yogyakarta 55281

Telp : (0274)488435, (0274)484436. Fax: (0274) 489762

Email: psta@batan.go.id

Diterima	Diterima dalam bentuk revisi	Disetujui
13 Februari 2014	08 April 2014	22 April 2014

### ABSTRAK

**DESAIN TERAS DAN BAHAN BAKAR PLTN JENIS HTR-PBMR PADA DAYA 50 MWe DENGAN MENGGUNAKAN PROGRAM SRAC2006.** Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji desain teras dan bahan bakar PLTN jenis HTR-PBMR (HIGH TEMPERATURE REACTOR - PEBBLE BED MODULAR REACTOR) 50 MWe dari keadaan Beginning of Life (BOL) sampai Ending of Life (EOL) dengan masa operasi 8 tahun. Parameter yang dianalisis dalam penelitian ini adalah distribusi suhu di dalam teras, persen pengkayaan  $U^{235}$ , komposisi bahan bakar, kekritisitas, dan koefisien reaktivitas suhu teras. Penelitian dilakukan dengan menyiapkan data parameter desain teras antara lain densitas nuklida, dimensi bahan bakar dan teras, dan distribusi suhu aksial teras. Paket program SRAC2006 digunakan untuk mendapatkan nilai faktor multiplikasi efektif ( $k_{eff}$ ) teras dari data input yang telah disiapkan. Hasil penelitian menunjukkan nilai kekritisitas teras berbanding lurus dengan penambahan pengkayaan  $U^{235}$ . Pengayaan optimum tanpa penggunaan burnable poison didapatkan pada nilai 10,125% dengan reaktivitas lebih sebesar 3,12% pada BOL. Penambahan burnable poison  $Gd_2O_3$  didapat nilai optimumnya sebesar 12 ppm dengan nilai reaktivitas lebih pada BOL sebesar 0,38%. Untuk penggunaan  $Er_2O_3$  nilai optimumnya adalah 290 ppm dengan reaktivitas lebih 1,24% pada saat BOL. Koefisien reaktivitas suhu teras tanpa burnable poison dan penggunaan  $Gd_2O_3$  dan  $Er_2O_3$  bernilai negatif yang menunjukkan sifat inherent safety-nya.

**Kata kunci:** desain, teras, bahan bakar, PLTN, SRAC2006.

### ABSTRACT

**DESIGN OF 50 MWe HTR-PBMR REACTOR CORE AND NUCLEAR POWER PLANT FUEL USING SRAC2006 PROGRAMME.** This research aims to assess the design of core and fuel of nuclear power plant type High Temperature Reactor-Pebble Bed Modular Reactor 50 MWe from the Beginning of Life (BOL) to Ending of life (EOL) with eight years operating life. The parameters that need to be analyzed in this research are the temperature distribution inside the core, quantity enrichment of  $U^{235}$ , fuel composition, criticality, and temperature reactivity coefficient of the core. The research was conducted with a data set of core design parameters such as nuclides density, core and fuel dimensions, and the axial temperature distribution inside the core. Using SRAC2006 program package, the effective multiplication factor ( $k_{eff}$ ) values obtained from the input data that has been prepared. The results show the value of the criticality of core is proportional to the addition of  $U^{235}$  enrichment. The optimum enrichment obtained at 10.125% without the use of burnable poison with an excess reactivity of 3.12% at BOL. The addition  $Gd_2O_3$  obtained an optimum value of 12 ppm burnable poison with an excess reactivity 0.38 %. The use of  $Er_2O_3$  with an optimum value 290 ppm has an excess reactivity 1.24% at BOL. The core temperature reactivity coefficient with and without the use of burnable poison has a negative values that indicates the nature of its inherent safety.

**Keywords:** design, fuel, nuclear power plant, SRAC2006.

## 1. PENDAHULUAN

Introduksi pembangunan PLTN di Indonesia seperti yang tercantum dalam Buku Putih Energi KNRT 2005 dan Agenda Riset KNRT 2007-2009 menyebutkan bahwa walaupun PLTN sudah mencapai nilai keekonomian dan kompetitif terhadap energi fosil tetapi terkendala dengan penerimaan masyarakat yang masih rendah. Mengingat tingkat penerimaan masyarakat terhadap PLTN saat ini masih rendah, maka perlu disiasati dengan membangun PLTN HTR skala kecil sehingga selain dapat memproduksi listrik, panasnya juga dapat digunakan untuk proses gasifikasi/ pencairan batubara di Kalimantan yang memiliki cadangan batubara melimpah.

Berdasarkan hal itu pemerintah melalui KNRT membuka peluang untuk melakukan program riset insentif bidang sumber energi baru dan terbarukan dan produk target peningkatan partisipasi masyarakat, serta industri di bidang nuklir dengan sasaran teknologi reaktor dan sistem PLTN reaktor maju sebagai penyedia listrik dan panas (*co-generation*) di masa mendatang. Salah satu penelitian yang telah dilakukan adalah "Desain Teras dan Bahan Bakar PLTN *Pebble Bed Modular Reactor* (PBMR) 50 MWe dengan menggunakan Program MCNP5". Penggunaan program Monte Carlo tanpa peng-*coupling*-an dengan program lain hanya dapat melihat keadaan kekritisan teras pada keadaan *Beginning of Life* (BOL), oleh karena itu diperlukan analisis deterministik menggunakan paket program SRAC yang dapat melihat keadaan kekritisan teras selama masa operasi reaktor.

Pada kegiatan ini dilakukan "*Down Scale PBMR*" yang dibatasi pada daya teras yang diturunkan dari 260 MWe menjadi 50 MWe sesuai dengan kondisi beban listrik yang ada di luar Jawa-Madura-Bali yang berkisar antara 30 MWe sampai 70 MWe. Analisis teras dan bahan bakar dilakukan dengan menggunakan program SRAC2006 yang telah digunakan secara luas baik secara komersial maupun non-komersial. Faktor yang dianalisis antara lain pengkayaan  $U^{235}$ , dimensi dan jenis moderator yang sangat mempengaruhi operasi reaktor itu sendiri. Nilai *inherent safety* yang merupakan persyaratan wajib dari sebuah reaktor nuklir dapat dilihat dari koefisien reaktivitas suhu terasnya sehingga dapat dijamin keselamatannya.

## 2. DASAR TEORI

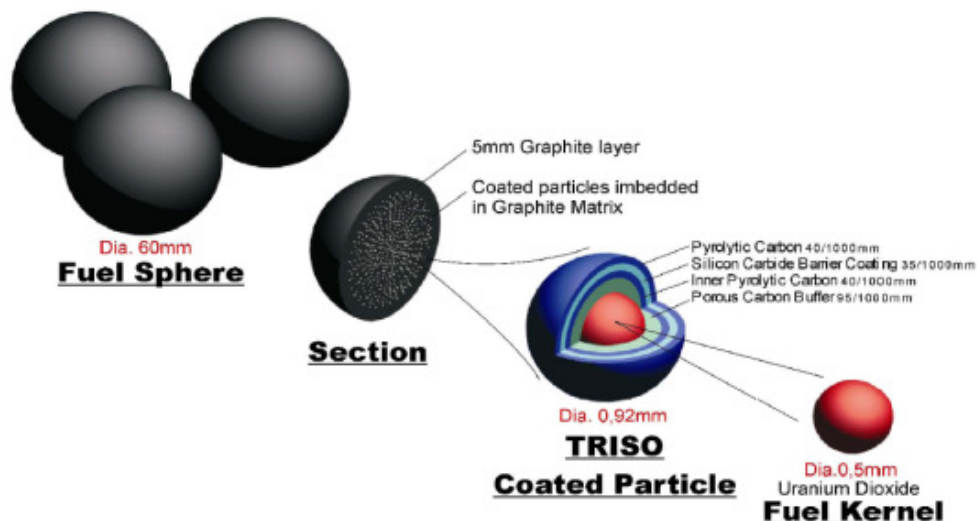
PBMR merupakan salah satu reaktor tipe HTR dengan pendingin gas helium. Konsep PBMR dikembangkan berdasarkan teknologi HTR oleh ESKOM Afrika Selatan. Keistimewaan teknologi ini adalah penggunaan pendingin gas helium dan moderator grafit yang menyebabkan reaktor dapat beroperasi pada temperatur tinggi.

PBMR mempunyai dua komponen utama, yaitu reaktor dan *power conversion unit* (PCU) yang satu sama lain dihubungkan melalui pipa helium. Teras setinggi 852 cm berisi bola-bola bahan bakar yang terus bergerak dari atas ke bawah secara alamiah. Tabel 1 menunjukkan data teknis dari reaktor PBMR.

Bahan bakar terdiri dari uranium yang diperkaya dalam persen dan dilapisi partikel isotropik dalam *moulded graphite sphere*. Bahan bakar yang berupa *pebble bed* ini memungkinkan reaktor mampu mengungkung produk fisi dan atau zat-zat radioaktif hasil reaksi fisi ke luar lingkungan. Gambar 1 menunjukkan bahan bakar PBMR bentuk *pebble bed* mempunyai susunan sebagai berikut<sup>[9]</sup>.

Tabel 1. Data Teknis Reaktor PBMR<sup>[1]</sup>

Parameter	Nilai
<b>Bahan bakar bola (FS) :</b>	
Radius <i>pebble</i>	3,0 cm
Radius zona bahan bakar	2,5 cm
Uranium <i>Loading</i>	9,0 g/FS
<b>Lapisan partikel bahan bakar:</b>	
Densitas grafit	1,75 g/cm <sup>3</sup>
Diameter kernel $UO_2$	500 $\mu$ m
Densitas $UO_2$	10,5 g/cm <sup>3</sup>
Lapisan Material	C/PyC/SiC/PyC
Ketebalan Lapisan ( <i>layer</i> )	95/40/35/40 $\mu$ m
Densitas Lapisan	1,05/1,90/3,18/1,90 g/cm <sup>3</sup>
<b>Teras Reaktor:</b>	
Diameter teras	350 cm
Tinggi rata-rata teras	852 cm
<i>Burnup</i> Rata-rata	80.000 MWD/T
<i>Refuelling Strategy</i>	Multiple pass(x10)
Waktu radiasi rata-rata bahan bakar	874 hari
Nomor zona bahan bakar	2
<i>Moderation to Fuel Ratio</i> ( $N_C / N_U$ )	428
Jumlah bahan bakar bola ( <i>pebble</i> )	334.000
Tebal reflektor atas	1,35 m
Tebal reflektor bawah	2,61 m
Tebal daerah reflektor samping	6/13/22,5/19/14,5
Densitas grafit reflektor atas	1,53 g/cm <sup>3</sup>
Densitas grafit reflektor bawah	1,54 g/cm <sup>3</sup>
Densitas grafit reflektor samping	1,7/1,17/1,7/1,48/1,7
Daya <i>Thermal</i>	121 MWt
Daya <i>Net Electrical</i>	50 MWe
Efisiensi PBMR	41 %



Gambar 1. Struktur Bahan Bakar Bentuk *Pebble*<sup>[1,6,8,9]</sup>.

1. Fuel kernel. Berisi  $UO_2$  sebagai bahan bakar.
2. Lapisan pirolitik karbon densitas rendah (*Carbon Buffer*), yang merupakan lapisan terdalam yang melapisi *fuel* kernel dengan densitas rendah serta berpori.
3. Lapisan karbon pirolitik dalam dengan densitas tinggi (*Inner Pyrolytic Carbida/IPyC*) berfungsi mengungkung tekanan gas fisi.
4. Lapisan silikon karbida ( $SiC$ ) berfungsi sebagai pengungkung produk fisi sebagai penghalang mekanik dan penghalang kimia karena suhu dekomposisinya sangat tinggi, yaitu sekitar  $2100\text{ }^{\circ}C$ .
5. Lapisan karbon pirolitik luar densitas tinggi (*Outer Pyrolytic Carbida/OPyC*), berfungsi sebagai penghalang mekanik bahan bakar.
6. Lapisan *shell* matrik C, berfungsi sebagai material struktur dan moderator, seperti Gambar 1.

Desain teras reaktor yang dikembangkan dirancang untuk memiliki fitur *inherent safety* (*Total Power Feed Back* negatif dan *reactivity excess* kecil). *Total Power Feed Back* negatif berarti total dari perubahan parameter-parameter teras memberikan nilai reaktivitas yang negatif terhadap perubahan daya teras, sehingga reaktor tetap berada dalam kondisi aman. Beberapa parameter yang berkaitan dengan *Power Feed Back* adalah koefisien reaktivitas suhu bahan bakar, moderator, dan pendingin. Reaktor dianggap aman jika ketiga nilai reaktivitas bernilai negatif, yang artinya jika temperatur bahan bakar atau moderator naik, maka nilai  $k_{eff}$  teras akan mengecil. Sebaliknya apabila nilai kedua reaktivitas ini positif, maka reaktor dianggap berbahaya secara neutronik karena populasi neutron sulit dikendalikan.

Interaksi neutron di dalam atom  $U^{235}$ ,  $Pu^{239}$ ,  $Th^{232}$ , dan yang lainnya akan terjadi reaksi yang membangkitkan energi yang cukup besar sekitar 200 MeV yang disebut reaksi fisi. Setelah terjadi reaksi fisi berantai, neutron di dalam reaktor mengalami proses moderasi. Pada proses ini populasi neutron akan berkurang, hal ini disebabkan oleh serapan bahan moderator selama proses moderasi dan beberapa neutron yang lolos dari medium. Neutron yang dimoderasi mengalami termalisasi akibat tumbukan dengan bahan moderator, setelah itu neutron yang mengalami termalisasi akan diserap oleh bahan bakar. Neutron yang diserap oleh bahan bakar akan menyebabkan reaksi fisi dan non-fisi. Neutron yang dihasilkan oleh reaksi fisi akan menyebabkan reaksi fisi berikutnya (reaksi berantai).

Perbandingan antara jumlah reaksi fisi pada suatu generasi dengan jumlah reaksi fisi pada generasi sebelumnya biasa disebut dengan faktor multiplikasi  $k$ . Jika  $k = 1$ , maka jumlah reaksi fisi pada setiap generasi adalah tetap dan disebut kondisi kritis. Sedangkan jika  $k > 1$ , maka jumlah reaksi fisi akan meningkat pada setiap generasi dan disebut kondisi superkritis. Namun jika  $k < 1$ , maka jumlah reaksi fisi semakin berkurang pada setiap generasi dan disebut kondisi subkritis<sup>[4]</sup>.

Faktor multiplikasi pada medium *infinite* ( $k_{\infty}$ ) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$k_{\infty} = f \eta \epsilon p \dots\dots\dots(1)$$

Dimana:

- f = faktor penggunaan thermis,
- $\eta$  = jumlah neutron yang dihasilkan dalam setiap pembelahan,
- $\epsilon$  = jumlah faktor pembelahan total
- p = faktor bebas resonansi.

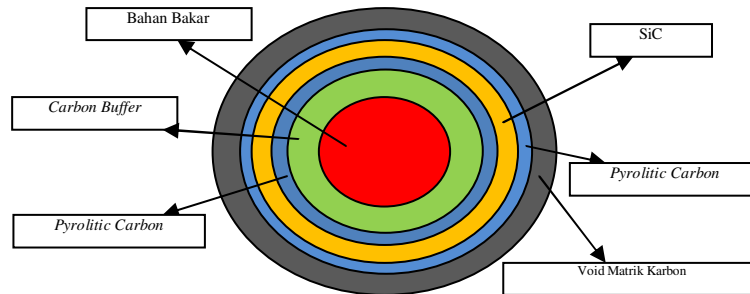
### 3. METODOLOGI PENELITIAN

Analisis desain teras dan bahan bakar PLTN HTR-PBMR 50 MWe/ 121,95 MWt menggunakan program SRAC2006 dengan inputan data berupa variabel-variabel yang

mempengaruhinya. Desain bahan bakar yang digunakan adalah bahan bakar baru (*fresh fuel*) dengan berbagai komposisi namun dimensi teras tetap.

Analisis yang dapat dilakukan program SRAC adalah analisis deterministik. Metode deterministik adalah pendekatan dengan merumuskan hukum-hukum alam menjadi teori yang diformulasikan dalam persamaan-persamaan matematis seperti teori transport neutron.

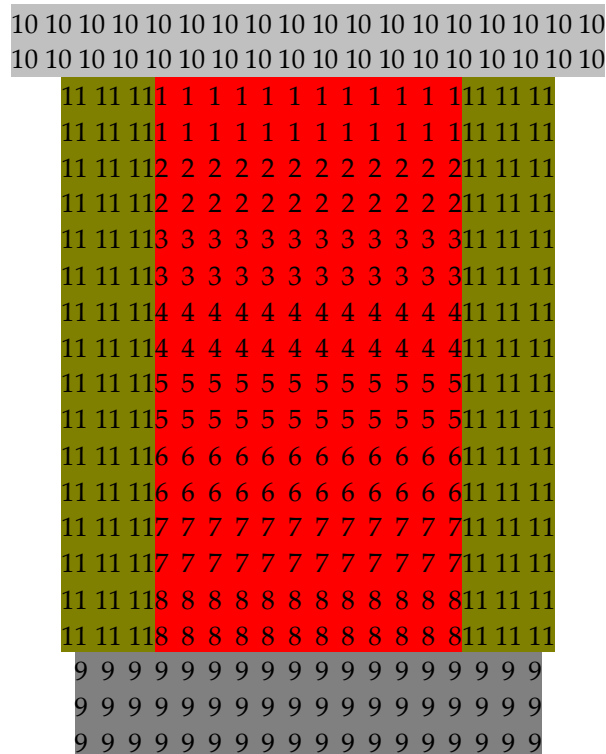
Pemodelan secara rinci dapat digambarkan seperti Gambar 2 berikut:



Gambar 2. Skematik Coated Particle.

Sebanyak 130.962 *coated particle* diasumsikan tersebar secara merata pada *fuel zone* dengan perhitungan jarak *void* antar partikel yang diisi oleh matrik karbon menggunakan perbandingan jumlah volume partikel dengan volume *fuel zone*. Model geometri bola dipilih karena sesuai dengan bentuk partikel itu sendiri dan untuk matrik karbon diasumsikan memiliki volume yang sama dengan geometri bola.

Perhitungan difusi pada teras menggunakan bagan kode *CITATION* yang memerlukan beberapa input untuk melakukan perhitungan, oleh karena itu perlu dilakukan beberapa permodelan pada desain teras PBMR yang ada pada Tabel 1. permodelan teras dapat diperlihatkan pada bagan Gambar 3.



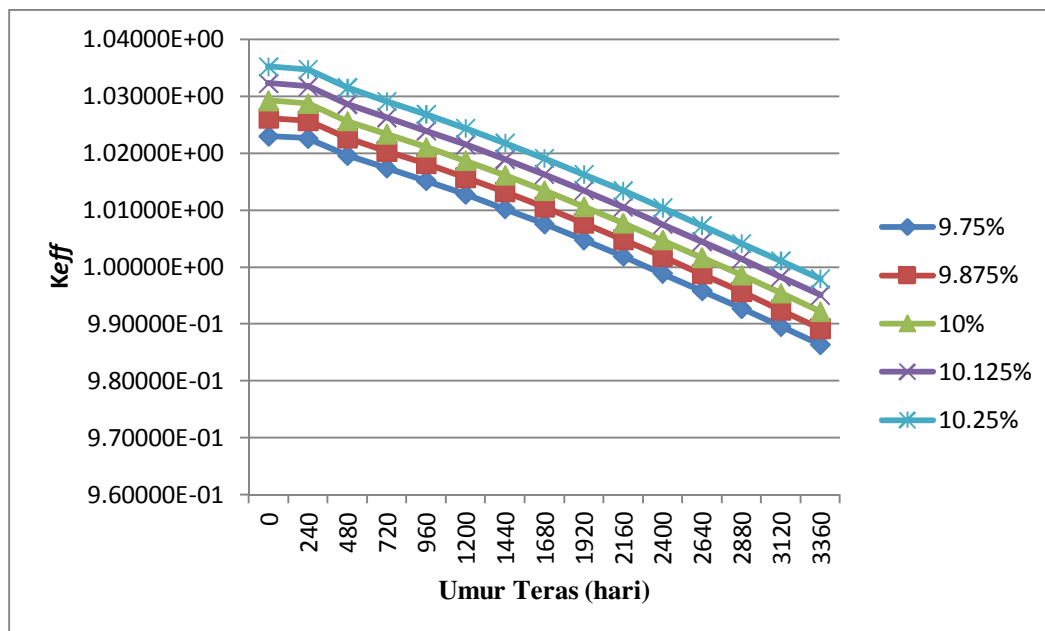
Gambar 3. Model Citation Teras PBMR.

#### 4. PEMBAHASAN

Hasil perhitungan distribusi suhu secara aksial dengan suhu masukan pendingin 500 °C pada daya 50 MWe/ 121,95 MWth dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Distribusi Suhu Aksial di Dalam Teras

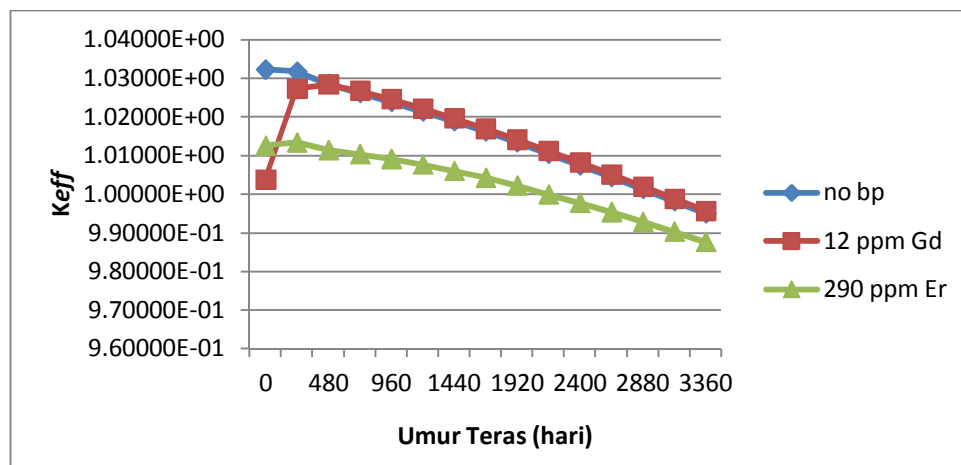
z (meter)	$T_{fuel,av}$ (K)	$T_{shell,av}$ (K)	$T_{coolant,z}$ (K)
1	782,58	782,52	782,51
2	810,73	810,60	810,58
3	857,60	857,40	857,36
4	923,17	922,91	922,86
5	1007,45	1007,13	1007,06
6	1110,43	1110,05	1109,97
7	1232,12	1231,67	1231,58
8	1452,89	1452,34	1452,23



Gambar 4.  $K_{eff}$  terhadap Umur Teras tanpa *Burnable Poison* dengan Pengkayaan Berbeda-Beda.

Gambar 4 menunjukkan nilai  $k_{eff}$  teras pada saat BOL tanpa menggunakan *burnable poison* memiliki nilai *excess reactivity* yang berkisar antara 2,25 - 3,39%. Nilai tersebut sangatlah besar jika merujuk pada batasan nilai *excess reactivity* yang seharusnya tidak melebihi 1,3% pada saat BOL. Untuk kondisi EOL yang harus memenuhi batasan nilai  $K_{eff}$  tepat sama dengan 1 pada masa operasi yang telah ditentukan yaitu 8 tahun dapat dipenuhi oleh pengayaan  $U^{235}$  sebesar 10,125 dan 10,25%.

Perbandingan kekritisan dan umur teras dengan dan tanpa penggunaan racun dapat dilihat pada Gambar 5. Penggunaan racun mengakibatkan *excess reactivity* berkurang pada BOL sehingga reaktor mudah dikendalikan pada saat *star-up*.



Gambar 5.  $k_{eff}$  terhadap Umur Teras dengan dan tanpa *Burnable Poison* (no bp).

Tabel 3. Koefisien Reaktivitas Suhu Bahan Bakar tanpa *Burnable Poison*

$\Delta T$	BOL	$\alpha_{Tm}(BOL) \times 10^{-5}$	EOL	$\alpha_{Tm}(EOL) \times 10^{-5}$
-50	1,03698	-9,14196	1,00576	-8,66209
-25	1,03459	-9,10118	1,00356	-8,59737
0	1,03224	-	1,00141	-
25	1,02990	-9,09218	0,99928	-8,51013
50	1,02758	-9,06792	0,99717	-8,50289
Rata-rata		-9,10081	Rata-rata	-8,56812

Tabel 4. Koefisien Reaktivitas Suhu Bahan Bakar dengan  $Gd_2O_3$

$\Delta T$	BOL	$\alpha_{Tm}(BOL) \times 10^{-5}$	EOL	$\alpha_{Tm}(EOL) \times 10^{-5}$
-50	1,00786	-8,06657	1,00641	-8,75591
-25	1,00582	-8,03326	1,00422	-8,83871
0	1,00380	-	1,00200	-
25	1,00184	-7,83362	0,99988	-8,48583
50	0,99984	-7,90803	0,99779	-8,43221
Rata-rata		-7,96037	Rata-rata	-8,62816

Tabel 5. Koefisien Reaktivitas Suhu Bahan Bakar dengan  $Er_2O_3$

$\Delta T$	BOL	$\alpha_{Tm}(BOL) \times 10^{-4}$	EOL	$\alpha_{Tm}(EOL) \times 10^{-5}$
-50	1,01775	-1,01538	1,00669	-8,82100
-25	1,01515	-1,01266	1,00444	-8,73321
0	1,01258	-	1,00225	-
25	1,01001	-1,01702	1,00000	-8,99640
50	1,00748	-1,01283	0,99783	-8,85903
Rata-rata		-1,01447	Rata-rata	-8,85241

Tabel 3, 4 dan 5 menunjukkan hasil koefisien reaktivitas suhu bahan bakar tanpa *burnable poison* pada BOL sebesar  $-9,10081 \times 10^{-5} /K$  dan  $-8,56812 \times 10^{-5} /K$  pada EOL. Sementara itu, penggunaan  $Gd_2O_3$  memberikan hasil koefisien reaktivitas suhu bahan bakar sebesar  $-7,96037 \times 10^{-5} /K$  pada kondisi BOL dan  $-8,62816 \times 10^{-5} /K$  pada kondisi EOL. Untuk  $Er_2O_3$  secara

berturut-turut pada BOL dan EOL nilai koefisien reaktivitas temperaturnya adalah  $-1,01447 \times 10^{-4}/K$  dan  $-8,85241 \times 10^{-5}/K$ . Perubahan suhu bahan bakar memberikan pengaruh terhadap nilai  $k_{eff}$  teras. Pada saat suhu bahan bakar mengalami kenaikan terjadi fenomena efek *dopler* yang menyebabkan berkurangnya *self shielding*. Berkurangnya *self shielding* mengakibatkan meningkatnya serapan resonansi sehingga neutron akan lebih banyak diserap oleh material fertil seperti  $U^{238}$  daripada melakukan fisi. Hal ini menyebabkan  $k_{eff}$  mengalami penurunan. Namun, pada saat suhu bahan bakar mengalami penurunan serapan resonansi akan berkurang sehingga akan meningkatkan probabilitas neutron lolos resonansi. Meningkatnya neutron lolos resonansi mengakibatkan reaksi fisi bertambah sehingga nilai  $k_{eff}$  mengalami kenaikan. Demikian juga dengan moderator dan pendingin, diperoleh nilai koefisien reaktivitas suhu yang negatif.

Semua nilai koefisien reaktivitas suhu pada setiap bagian bernilai negatif, sehingga nilai koefisien reaktivitas suhu teras total dipastikan bernilai negatif. Hal ini menandakan ketika terjadi kenaikan suhu di dalam teras, maka daya akan menurun dan suhu akan secara berangsur turun ke suhu kamar sehingga tidak menimbulkan kecelakaan yang berskala besar.

## 5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Desain PLTN HTR-PBMR dengan daya 50 MWe / 121,95 MWt memiliki geometri teras dan bahan bakar yang sesuai dengan desain PBMR yang dikembangkan oleh ESKOM-Afrika Selatan. Daya dan pengkayaan  $U^{235}$  dirubah agar dapat menyesuaikan dengan beban dasar listrik yang ada di luar Jawa, Madura, dan Bali sebesar 50 MWe.
2. Peningkatan pengayaan memberikan kontribusi peningkatan nilai  $k_{eff}$  teras.
3. Penggunaan  $Gd_2O_3$  dapat menurunkan *excess reactivity* pada BOL sebesar 0,38 % dengan  $k_{eff}$  sebesar 1,003798 dan 1,002000 pada BOL dan EOL secara berturut-turut. Sedangkan penambahan  $Er_2O_3$  juga dapat menurunkan *excess reactivity* sebesar 1,24 % namun masa operasi tidak mencapai 8 tahun. Nilai  $k_{eff}$  yang dimiliki pada BOL sebesar 1,012581 dan 1,00249 pada EOL yang dicapai pada 2160 hari.
4. Nilai koefisien reaktivitas suhu reaktor teras yang merupakan total dari bahan bakar, moderator, dan pendingin bernilai negatif sehingga syarat karakteristik *inherent safety* pada penelitian ini telah terpenuhi.

Perlu dilakukan analisis desain baik secara neutronik maupun termohidrolik menggunakan program komputasi, seperti MCNP-ORIGEN, VSOP, SCALE, HELIOS/MASTER dll. Selain itu, perlu dilakukan variasi geometri bahan bakar dalam analisis *down scale* untuk mengetahui pengaruhnya terhadap kekritisian teras reaktor. Penelitian lebih lanjut dengan sistem *on-line refuelling* agar meningkatkan efektivitas penggunaan bahan bakar.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1]. ARIES ADINUGROHO, "Analisis Neutronik Teras HTR Tipe Pebble Bed Modular Reactor Berpendingin  ${}^7LiF+BeF_2$  dengan Menggunakan Bahan Bakar Uranium Oksida", Skripsi, Jurusan Teknik Fisika: Fakultas Teknik, Universitas Gajah Mada, 2005.
- [2]. ALEXANDER AGUNG, "Diktat Analisis Reaktor Nuklir", Yogyakarta: Fakultas Teknik, Universitas Gajah Mada, 2007.
- [3]. LIEM PENG HONG, "Fuel Burn-up Characteristics of Small High Temperature Reactor", Serpong: BATAN, 2010.
- [4]. LAMARSH, JOHN R., "Introduction to Nuclear Reactor Theory", New York: Addison-Wesley Publishing Company, 1966.



- [5]. LAMARSH, JOHN R., & BARTTA, ANTHONY J, "Introduction to Nuclear Engineering.3<sup>rd</sup>. ed". New York: Prentice-Hall, Inc, 2001.
- [6]. PITRI MARIANA, "Desain Teras dan Bahan Bakar PLTN Pebble Bed Modular Reactor (PBMR) 50 MWe dengan Menggunakan Program MCNP5", Skripsi, Jurusan Pendidikan Fisika: Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Yogyakarta, 2009.
- [7]. STACEY, WESTON M., "Nuclear Reactor Physics. 2<sup>nd</sup>", ed. Darmstadt: Wiley-VCH, 2007.
- [8]. WEIL, JENNY, "Pebble-Bed Design Returns", pada IEEE Spectrum, November 2001.
- [9]. WINDA DARYANI, "Analisis Desain Teras dan Bahan Bakar PLTN Pebble Bed Modular Reactor (PBMR) 100 MWe dengan Menggunakan Program MCNP5 2009". Jurusan Teknik Fisika: Fakultas Teknik, Universitas Gajah Mada, 2009.