

STUDI DESAIN *DOWN SCALE* TERAS REAKTOR DAN BAHAN BAKAR PLTN JENIS *PEBBLE BED MODULAR REACTOR* – HTR 100 MWe

Slamet Parmanto^{*}, Andang Widi Harto^{*} dan Yohannes Sardjono^{**})

^{*}Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknik UGM Yogyakarta

^{**}) Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan BATAN, Jl. Babarsari Yogyakarta

Diterima editor 12 September 2011
Disetujui untuk publikasi 10 Oktober 2011

ABSTRAK

STUDI DESAIN *DOWN SCALE* TERAS REAKTOR DAN BAHAN BAKAR PLTN JENIS *PEBBLE BED MODULAR REACTOR* – HTR 100 Mwe. Telah dilakukan penelitian terhadap teras reaktor *Pebble Bed Modular Reactor* (PBMR) dengan daya 100 MWe berbahan bakar UO_2 . Reaktor ini menggunakan moderator grafit dan helium sebagai pendingin. Studi *down scale* dilakukan tanpa mengubah geometri teras maupun geometri bahan bakar. Parameter yang dianalisis adalah kritikalitas teras, reaktivitas lebih, koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar, moderator dan pendingin serta nilai ekonomis bahan bakar. Dari penelitian ini diharapkan diperoleh desain bahan bakar yang bernilai ekonomis dan memiliki fitur keselamatan melekat. Penelitian dilakukan dengan menggunakan program SRAC 2003.

Hasil yang diperoleh adalah desain bahan bakar UO_2 berbentuk *pebble* dengan pengkayaan 10% U^{235} dan 90 ppm racun dapat bakar Gd_2O_3 . Nilai faktor multipilkasi efektif k_{eff} pada *beginning of life* (BOL) adalah 1,01115 dan menjadi 1,00588 setelah 2658 hari operasi reaktor (EOL). Koefisien reaktivitas temperatur total diperoleh sebesar $-3,25900E-05 \Delta k/k/K$ saat BOL dan $-1,10615E-04 \Delta k/k/K$ saat *end of life* (EOL). Reaktor ini memenuhi karakteristik keselamatan melekat ditandai dengan nilai koefisien reaktivitas temperatur yang negatif.

Kata kunci: PBMR, desain bahan bakar, faktor multipilkasi efektif, reaktivitas lebih, koefisien reaktivitas temperatur.

ABSTRACT

DESIGN STUDY ON THE *DOWN SCALE* OF REACTOR CORE FUEL FOR THE *PEBBLE BED MODULAR REACTOR-HTR 1000 MWe*. Research of *Pebble Bed Modular Reactor* (PBMR) 100 MWe which used UO_2 fuel has been done. This reactor uses graphite as moderator and helium as coolant. Down scale studies performed without changing the core and fuel geometry. The parameter being analyzed were core criticality, excess reactivity, fuel, moderator, coolant temperature reactivity coefficient, and fuel economy. This research is expected to obtain the design that has fuel economy and inherent safety features. In this research, we have employed SRAC 2003 code. The calculation show that the UO_2 pebble fuel design with 10% enrichment of U^{235} and 90 ppm burnable poison of Gd_2O_3 results in the effective multiplication factor (k_{eff}) value of 1,01115 at beginning of life (BOL) and become 1,00588 after 2658 days of reactor operation. The core temperature reactivity coefficient is $-3.25900E-05 \Delta k/k/K$ and $-1,100615E-04 \Delta k/k/K$ at BOL and end of life (EOL), respectively. The reactor is in compliance with inherent safety characteristics indicated by the value of a negative temperature reactivity coefficient.

Keywords: PBMR, fuel design, effective multiplication factor, excess reactivity, temperature reactivity coefficient.

PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) tipe PBMR (*Pebble Bed Modular Reactor*) yang sedang dikembangkan oleh Afrika Selatan, merupakan hasil pengembangan dari reaktor jenis HTR (*High Temperatur Reactor*) dengan berpendingin helium. Reaktor ini dikembangkan sejak tahun 1996 [1]. Desain *down sacle* dengan daya 100 MWe bertujuan untuk pemenuhan listrik yang mempunyai *base load* relatif rendah di Indonesia, khususnya di luar Pulau Jawa (Pulau Sumatera, Kalimantan dan Indonesia Timur) dan dengan *electrification ratio* di bawah rata-rata nasional yakni 65.79 % [2].

Kelebihan dari reaktor ini adalah kemampuan untuk modularitas, artinya ketika diperlukan penambahan daya yang besar cukup dilakukan dengan menambah jumlah unit reaktor. Selain itu reaktor ini mampu beroperasi pada temperatur tinggi sehingga penggunaannya dapat fleksibel yaitu selain listrik juga untuk industri khususnya yang memerlukan uap panas.

Penelitian ini akan membahas karakteristik teras yaitu, kritikalitas teras, reaktivitas lebih, koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar, moderator dan pendingin serta nilai ekonomis bahan bakar. Studi dilakukan dengan tidak mengubah geometri teras dan geometri bahan bakar. Perhitungan teras dilakukan dengan menggunakan program SRAC2003.

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan mendapatkan desain reaktor dengan daya 100 MWe yang mempunyai sifat keselamatan melekat dengan koefisien reaktivitas temperatur bernilai negatif. Hasil perhitungan yang didapatkan dari SRAC2003 akan dianalisis pada parameter-parameter desain teras reaktor, kekritisian, reaktivitas lebih, umur teras, dan koefisien reaktivitas temperatur.

KAJIAN PUSTAKA DAN METODOLOGI

AVR (*Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor*) merupakan desain reaktor dengan bahan bakar pebble yang pertama, yang pertama kali di Julich, Jerman Barat pada Agustus 1967. AVR merupakan reaktor temperatur tinggi dengan pendingin helium dan moderator grafit. Daya termal reaktor AVR adalah 46 MWth dan dengan keluaran listrik 15 MWe. Reaktor ini menjadi awal pengembangan reaktor bertipe reaktor temperatur tinggi (HTR) lainnya seperti pada Tabel 1 [3].

Terkait dengan beberapa faktor terutama faktor keselamatan, reaktor ini mempunyai beberapa kelebihan, diantaranya [4] :

1. Daya relatif kecil, dalam orde 100-200 MW.
2. Efisiensi yang tinggi, mencapai > 40%.
3. Bisa dilakukan *on-line refueling* atau pergantian bahan bakar tanpa dilakukannya *shutdown* pada reaktor.
4. Bersifat keselamatan melekat, karena koefisien reaktivitas temperatur yang bernilai negatif.
5. Mampu beroperasi pada temperatur tinggi.
6. Memungkinkan untuk dilakukan, penambahan aplikasi sekunder seperti, produksi hidrogen maupun gasifikasi batubara.

Tabel 1. Karakter beberapa reaktor tipe HTGR [3].

Properti	HTTR	HTR-10	PBMR
Negara	Jepang	China	Afrika Selatan
Daya termal (MW)	30	10	268
Daya listrik (MW)	-	-	110
Tekanan Helium (MPa)	4	3	9
Temperatur Helium	395/950	250/700	500/900
Diameter (m)	2,3	1,8	3,5
Tinggi	2,9	1,97	8,5
Densitas daya teras (MW/m ³)	2,5	2	3,27
Bahan bakar	UO ₂	UO ₂	UO ₂
Desain	Prisma	Bola	Bola
Pengayaan (% ²³⁵ U)	3- 10	17	8
Jumlah	150	27.000	285.000
Diameter (mm)	360	60	60
Panjang	580	-	-
<i>Burn-up</i> maksimal (MWd/tU)		80.000	80.000

Reaktor PBMR didesain oleh Afrika Selatan sebagai PLTN, merupakan hasil pengembangan reaktor jenis HTR-10 yang dikembangkan oleh China. Reaktor ini beroperasi pada daya 268MWth. Tabel 1 juga menyajikan daftar perbandingan karakteristik PBMR dengan reaktor tipe HTGR (*High Temperatur Gas-Cooled Reactor*) yang lain.

PBMR mempunyai 6 batang kendali dan 18 bola penyerap untuk proses shutdown di samping reflektornya, dan reflector dalam yang bisa bergerak dengan menjatuhkan bola grafit ke bagian tengah teras. PBMR didesain secara on-line refueling, dengan memasukkan bahan bakar segar dari atas teras dan mengeluarkan bahan bakar bekas pada bagian bawah teras. Waktu tinggal bahan bakar di teras rata-rata 300 hari [1]. Proses *refueling* dilakukan melalui fuel line dengan gaya gravitasi pebble secara bertahap dari atas teras. Tabel 2 menyajikan informasi tambahan tentang karakteristik .

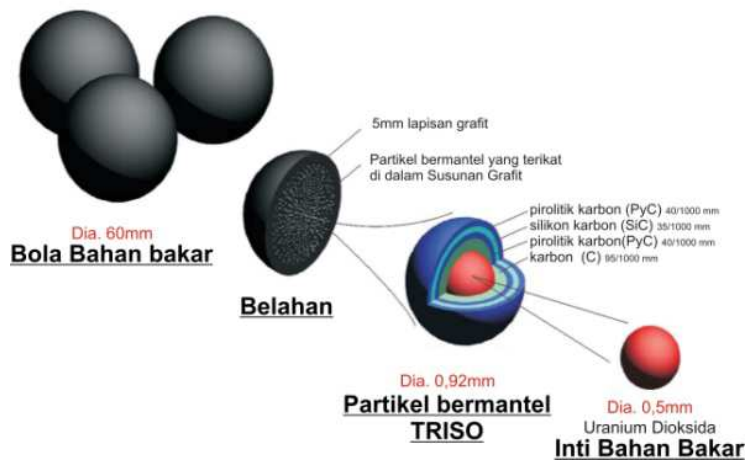
Tabel 2. Karakteristik PBMR [2].

Parameter	Nilai	Satuan
Pendingin	Helium	
Tekanan	9	MPa
Moderator	Grafit	
Temperatur <i>inlet</i>	500	°C
Temperatur <i>outlet</i>	900	°C
Daya termal	268	MWth
Diameter teras	3,5	meter
<i>Burnup</i>	80	MWd/tU
Bahan bakar	8,13 %	U-235
Jumlah bahan bakar	334.000	
Tebal reflektor atas	135	cm
Tebal reflektor bawah	261	cm
Tebal reflektor samping	75	cm

Bahan bakar PBMR berbentuk *pebble* yang tersusun dari *coated particles* di dalam elemen grafit ditunjukkan pada Gambar 1. Zona bahan bakar ini dilindungi oleh *shell* grafit, dengan diameter total *pebble* sebesar 6 cm. Tabel 3 menyajikan karakteristik dari *pebble* pada PBMR.

Tabel 3. Karakteristik dari PBMR

1. Bola Bahan Bakar	
Radius <i>pebble</i>	: 30 cm
Radius zona 1	: 25 cm
Uranium	: 9,0 g/FS
Densitas grafit	: 1,75 g/cm ³
2. Bahan bakar terlapisi	
Diameter <i>kernel</i> UO ₂	: 500 μm
Densitas UO ₂	: 10,96 g/cm ³
Material pelapis	: C/PyC/SiC/PyC
Tebal	: 95/40/35/40 μm
Densitas	: 1,05/1,90/3,2/1,90 g/cm ³



Gambar 1. Bahan bakar grafit tipe *pebble bed* [1].

PBMR mempunyai tingkat keselamatan yang tinggi karena karakteristik keselamatan inheren yang ada di dalam bahan bakarnya. Karakteristik keselamatan inheren termasuk power density teras yang rendah, bahan bakar dengan margin temperatur yang tinggi, dan teras berkapasitas panas tinggi. Tenaga yang dihasilkan reaktor dibatasi oleh efek Doppler temperatur tinggi di dalam bahan bakar. Grafit bertindak sebagai material struktur dan juga sebagai moderator. Keuntungan penggunaan grafit adalah jumlah material banyak ditemukan di alam dan mempunyai titik sublimasi cukup tinggi yaitu sebesar 3600 °C.

Analisis Neutronik Teras Menggunakan SRAC 2003

SRAC 2003 merupakan program perhitungan neutronik teras reaktor yang dikembangkan oleh Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) yang dapat digunakan untuk analisis berbagai tipe reaktor secara deterministik. SRAC telah dikembangkan lebih lanjut untuk memperkirakan karakteristik reaktor, aspek keselamatan reaktor, strategi siklus bahan bakar dan fungsi lainnya yang lebih akurat [5].

Persamaan difusi multigrup diturunkan dengan menerapkan kesetimbangan pada suatu grup energi. Persamaan kesetimbangan neutron adalah sebagai berikut:

$$\left[\begin{array}{c} \text{Sumber} \\ \text{neutron} \\ \text{di grup } g \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Neutron} \\ \text{Masuk} \\ \text{karena} \\ \text{hamburan } g \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Neutron} \\ \text{hilang} \\ \text{karena} \\ \text{hamburan } g \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Perubahan} \\ \text{karena} \\ \text{Bocoran} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Perubahan} \\ \text{karena} \\ \text{penyerapan} \\ \text{grup } g \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Laju} \\ \text{perubahan} \\ \text{neutron grup } g \end{array} \right]$$

$$S_g + \sum_g = 1 \sum_{sg} \phi_g - \sum_{sg} \phi_g + \nabla \cdot D_g \nabla \phi_g - \sum_{ag} \phi_g = \frac{1}{v_g} \frac{\partial \phi_g}{\partial t} \quad g = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

Dengan suku sumber neutron :

$$S_g = \frac{\lambda_g}{k_{\text{eff}}} \sum_g v_g \sum_{fg} \phi_g \quad (2)$$

Perubahan neutron yang hilang karena absorpsi dan hamburan dapat diintegrasikan menjadi suku removal sebagai berikut:

$$\sum R_g \phi_g = \sum a_g \phi_g + \sum s_g \phi_g \quad (3)$$

Pada persamaan (1), tanda (-) menunjukkan jumlah populasi neutron yang berkurang, sedangkan tanda (+) menunjukkan jumlah populasi neutron yang bertambah dengan indeks g adalah indeks grup, dimulai dari tingkat energi tertinggi.

Apabila reaktor dalam kondisi *steady state* :

$$\frac{1}{v_g} \frac{\partial \phi_g}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

Maka didapatkan persamaan difusi multigrup sebagai berikut:

$$-\nabla \cdot D \nabla_g \phi_g + \sum R_g \phi_g = \frac{x_g}{k_{\text{eff}}} \sum_g v_g \sum_{g'} f_{g'} \phi_{g'} + \sum_g \sum_{g'} s_{g'g} \phi_{g'} \quad (5)$$

dengan keterangan bahwa:

D_g	=	konstanta difusi grup g
v_g	=	jumlah neutron fisi rata-rata yang dihasilkan neutron grup g'
$\sum_{f_{g'}}$	=	tampang lintang makroskopik fisil grup g' (cm ⁻¹)
\sum_{a_g}	=	tampang lintang makroskopik serapan grup g (cm ⁻¹)
$\sum_{s_{g'g}}$	=	tampang lintang makroskopik transfer neutron karena hamburan dari grup g' ke grup g (cm ⁻¹)
x_g	=	fraksi neutron fisi yang terlahir dalam energi grup g
Φ_g	=	fluks neutron di grup g (neutron.cm ⁻² .s ⁻¹)
$\sum_{s_{g'}}$	=	tampang lintang makroskopik hamburan grup g (cm ⁻¹)

Homogenisasi Teras dan Konstanta Grup

Homogenisasi teras perlu dilakukan, hal ini dikarenakan teras cenderung heterogen. Upaya homogenisasi teras dimulai dengan menghitung distribusi fluks pada sebuah sel, kemudian membuat rata-rata tampang lintang dari bahan-bahan yang menyusun sel tersebut. Pada akhir perhitungan, dari sebuah sel heterogen akan diperoleh sebuah sel homogen yang dicirikan dengan tampang lintang rata-rata. Langkah terakhir adalah menggunakan tampang lintang yang diperoleh dari langkah sebelumnya untuk menentukan distribusi fluks dan daya pada teras [10]. Demi akuratnya perhitungan diperlukan koreksi pada perhitungan, diantaranya faktor koreksi Dancoff dan faktor koreksi *self-shielding*.

Pada perhitungan serapan resonansi tingkat sel, sel dianggap benar-benar terisolasi dari sel lainnya. Faktor Dancoff memperhitungkan kemungkinan sebuah neutron akan lolos dari sel dan masuk ke sel tetangga. Karenanya faktor Dancoff akan meningkatkan kebocoran neutron dari sebuah sel. Faktor *self-shielding* adalah perbandingan fluks rata-rata di bahan bakar dengan fluks rata-rata di sel secara keseluruhan. Untuk mendapatkan konstanta grup perlu penanganan yang baik mengenai masalah ketergantungan fluks neutron terhadap energi, sehingga ketergantungan fluks terhadap ruang sedikit diabaikan. Tiga langkah yang harus dilalui untuk mendapatkan konstanta-konstanta perhitungan adalah :

1. Menentukan rerata tampang lintang dengan menggunakan fluks distribusi ruang (spasial) $\phi_{i,g}$.
2. Meringkas energi neutron menjadi beberapa kelompok energi neutron.
3. Menghitung konstanta grup.

Dalam perhitungan tingkat sel diasumsikan bahwa :

1. Tidak ada arus neutron yang terjadi antar sel.
2. Tidak ada neutron yang termoderasi menjadi neutron termal di daerah bahan bakar.
3. Distribusi ruang dari proses moderasi adalah seragam.

Asumsi tersebut digunakan untuk penyederhanaan dari proses yang sebenarnya terjadi [10].

Aspek Keselamatan Neutronik

Aspek keselamatan neutronik adalah segala sesuatu yang menyangkut masalah keselamatan neutronik. Aspek ini diharapkan dapat memberikan gambaran tentang keselamatan operasi secara neutronik. Aspek keselamatan neutronik yang dimaksud adalah koefisien reaktivitas umpan balik temperatur moderator, koefisien reaktivitas umpan balik temperatur bahan bakar dan koefisien reaktivitas temperatur pendingin. Reaktor dianggap aman jika ketiga nilai reaktivitas ini bernilai negatif, yaitu jika temperatur bahan bakar, moderator maupun pendingin naik maka nilai keff teras akan mengecil, sehingga reaktor akan menuju subkritis. Hal ini disebut dengan keselamatan melekat (*inherent safety*) Keselamatan melekat juga meliputi reaktivitas lebih yang kecil. Reaktivitas lebih adalah reaktivitas yang lebih besar dari pada yang dibutuhkan untuk mencapai kritis. Reaktivitas lebih diperlukan untuk pengendalian reaktor. Nilai reaktivitas lebih yang kecil menunjukkan bahwa reaktor mudah untuk dikendalikan.

Pemodelan Teras

Pemodelan dilakukan dengan menggunakan kode program SRAC 2003 yang inputnya dibuat di dalam Gedit, kemudian dilakukan pemodelan tingkat sel yang diatur pada modul PIJ. Pada pemodelan ini diperlukan data geometri sel dan data material penyusun. Pada pemodelan tingkat teras dilakukan dengan modul CITATION dengan pemodelan berupa slab dua dimensi.

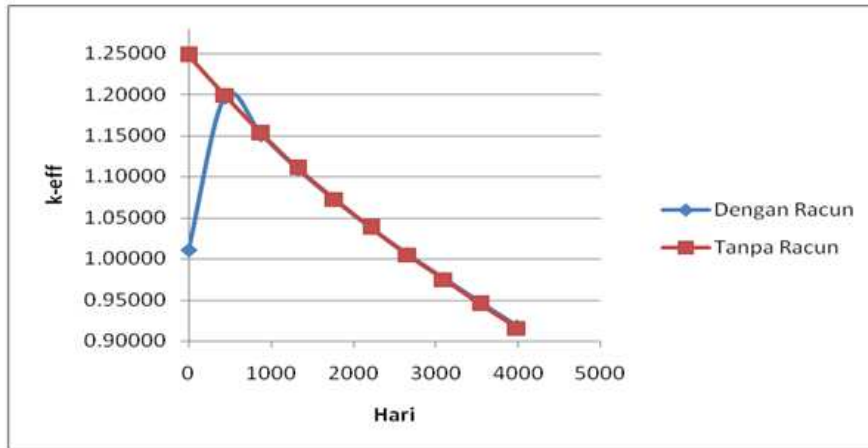
Teras dibagi menjadi 8 daerah aksial (z) yang memiliki temperatur pendingin, shell, dan *fuel zone* yang berbeda-beda. Dengan nilai $z = 0$ berada pada bagian atas teras dan $z = 852$ m berada pada bagian bawah teras.

Temperatur *shell* yang digunakan adalah temperatur rata-rata dari temperatur *shell* bagian dalam dengan temperatur *shell* bagian luar. Temperatur *fuel zone* yang digunakan adalah temperatur rata-rata *fuel zone*. Diasumsikan densitas daya homogen seluas *fuel zone*. Lebih jauh lagi, koefisien konduktivitas panas diasumsikan konstan dan berharga sama untuk *fuel zone* dan *pebble shell*. Diasumsikan pula tidak ada perbedaan temperatur antara *fuel kernel* dan matriks grafit, yang berarti temperatur rata-rata *fuel* akan identik dengan temperatur rata-rata grafit di dalam *fuel zone* [10].

Perhitungan temperatur pendingin, *shell*, dan bahan bakar membutuhkan data distribusi densitas daya untuk arah aksial pada teras. Data distribusi daya teras diambil dari penelitian sebelumnya [3], diasumsikan sama disetiap daerah aksial.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari perhitungan modul PIJ yang dilakukan pada *coated particle* diperoleh nilai dan koefisien reaktivitas. Kemudian, nilai dan koefisien reaktivitas dimasukkan ke dalam input PIJ selanjutnya, di mana hasilnya akan digunakan oleh CITATION untuk menghitung k_{eff} teras. Hasil perhitungan modul CITATION adalah pada Gambar 2.



Gambar 2 Perubahan nilai k_{eff} teras.

Dari tabel di atas, nilai k_{eff} teras pada saat bahan bakar segar atau Beginning Of Life (BOL) adalah sebesar 1,01115. Sedangkan pada saat 2658 hari, saat End Of Life (EOL), nilai k_{eff} menjadi 1,00588. Hal ini berarti, bahan bakar dapat digunakan selama ~2658 hari secara terus menerus tanpa perlu dilakukan refuelling. Hasil di atas dilakukan saat kondisi normal operasi teras, artinya tidak ada perubahan suhu pada inlet pendingin.

Pada Gambar 2 dapat dilihat bahwa nilai k_{eff} dari BOL hingga 443 hari pertama di mana terjadi kenaikan nilai k_{eff} hingga 1,19651, lalu kemudian mengalami penurunan hingga 1,00588 saat 2658 hari. Kondisi EOL ditentukan dengan batasan k_{eff} tepat kritis ($k_{eff} = 1$) ditambah dengan besarnya fraksi neutron kasip ($k_{eff} EOL = k + \beta$) dan diperoleh batasan k_{eff} EOL adalah 1,00598. Batasan tersebut dimaksudkan untuk pengendalian daya teras sehingga pada saat diperlukan peningkatan daya maka daya teras dapat dinaikkan dengan mudah karena kondisi teras masih dalam kondisi kritis. Kondisi EOL pada penelitian ini terjadi pada hari ke 2628 tanpa menggunakan Gd_2O_3 dan ketika menggunakan Gd_2O_3 EOL terjadi pada hari ke-2658.

Penggunaan pengayaan yang lebih tinggi akan memberikan umur teras yang lebih lama, namun biaya bahan bakar juga akan bertambah besar. Tabel 4 menunjukkan perbandingan biaya pengayaan dan biaya total yang diperlukan tiap pengayaan bahan bakar.

Tabel 4. Perbandingan biaya pengayaan dengan pendapatan listrik total [6].

Pengkayaan (% U-235)	Jumlah BB (ton)	Biaya BB/ton (Ribuan \$)	Umur Teras (hari)	Produksi Listrik (kWh)	Harga Listrik per kWh (\$)	Total Biaya (Ribuan \$)	Total Produksi Listrik (Ribuan \$)	Untung (Rugi) [Ribuan \$]
10	23.04	7142.42	2658	6379200000	0.11	164539.41	708800	544260.59
12	23.04	8702.44	3101	7442400000	0.11	200477.49	826933.33	626455.84
14	23.04	10268.08	3987	9568800000	0.11	236545.17	1063200	826654.83

- Catatan:
1. Biaya dalam ribuan US\$
 2. Biaya BB per 7 Februari 2011.
 3. 1 US\$ = Rp. 9.000,-.
 4. 1 kWh = Rp. 1.000,-.

Berdasarkan Tabel 4 semakin besar pengayaan bahan bakar semakin besar pula biaya total pengayaan bahan bakar. Sehingga aspek ekonomis akan terlihat dari sisi efisiensi penggunaan bahan bakar dibandingkan dengan nilai untung/rugi produksi listrik yang dihasilkan serta melihat indikator keselamatan neutronik. Dalam penelitian ini semakin tinggi pengayaan maka nilai ekonomis akan semakin tinggi pula karena terlihat bahwa umur teras akan lebih lama jika dibanding dengan pengayaan yang lebih kecil. Namun dengan bertambahnya pengayaan terlihat bahwa reaktor tidak memenuhi indikator keselamatan neutronik, karena reaktivitas lebih (ρ) tentu akan menjadi lebih besar dari desain requirement. Dalam analisis selanjutnya digunakan pengayaan 10% U-235 dan 90 ppm Gd₂O₃, penggunaan pengayaan ini bertujuan untuk membandingkan besarnya pengayaan pada reaktor dengan daya yang berbeda namun di-setting dengan umur teras yang sama yaitu 2658 hari.

Penggunaan racun dapat bakar Gd₂O₃ pada komposisi bahan bakar ditujukan untuk mengurangi reaktivitas lebih khususnya saat BOL, sehingga reaktor mudah untuk dikendalikan. Pengaruh racun dapat bakar pada komposisi bahan bakar terhadap nilai reaktivitas lebih disajikan dalam Tabel 5.

Tabel 5. Pengaruh racun dapat bakar pada komposisi bahan bakar terhadap nilai reaktivitas lebih.

Hari	Dengan Gd ₂ O ₃		Tanpa Gd ₂ O ₃	
	k _{eff}	ρ	k _{eff}	ρ
0	1.01115	0.01115	1.24807	0.19876
443	1.19651	0.19651	1.19896	0.16594
886	1.15075	0.15075	1.15278	0.13252
1329	1.10917	0.10917	1.11053	0.09952
1772	1.07192	0.07192	1.07246	0.06756
2215	1.03793	0.03793	1.03777	0.03639
2658	1.00588	0.00588	1.00506	0.00503
ρ rata-rata		0.08333	0.10082	
Reaktivita lebih (%) BOL		1.11	19.87	

Pada saat BOL reaktivitas berlebih (ρ) sangat penting, karena diperlukan agar teras mampu untuk kritis. Pada Tabel 5 penggunaan racun dapat bakar mampu menurunkan reaktivitas lebih saat BOL menjadi 1,11 % dari reaktivitas lebih saat BOL sebesar 19,87 % saat tanpa Gd₂O₃ pada komposisi bahan bakarnya. Hal ini berarti memenuhi *design requirement*, yaitu $\Delta k/k \leq 1,3\%$. Reaktivitas berlebih selanjutnya akan dikompensasi dengan menggunakan batang kendali hingga nilai ρ mendekati β (neutron kasip). Dari penelitian didapatkan nilai β rata-rata adalah 0,598 %.

Koefisien reaktivitas dianalisis baik pada BOL maupun pada EOL. Koefisien reaktivitas dihitung untuk perubahan suhu bahan bakar dan suhu moderator (*shell*). Dengan memasukkan perubahan temperatur bahan bakar pada masukan CITATION, sedangkan paramater lainnya dibiarkan tetap tak berubah. Pada perhitungan ini, k_{eff} teras dihitung pada kondisi BOL dan EOL untuk tiap perubahan suhu bahan bakar 50°C. Didapatkan nilai k_{eff} dari teras seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 6.

Tabel 6. Pengaruh perubahan temperatur bahan bakar terhadap k_{eff} dan koefisien reaktivitas temperatur rata-rata bahan bakar pada kondisi BOL dan EOL.

BOL		EOL	
ΔT (K)	k_{eff}	ΔT	k_{eff}
-150	1.01229	-150	1.01731
-100	1.01191	-100	1.01348
-50	1.01153	-50	1.00966
0	1.01115	0	1.00588
50	1.01074	50	1.00212
100	1.01030	100	0.99840
150	1.00981	150	0.99471
α_t rata-rata ($\Delta k/k/K$)	-8.19071E-06		-7.53463E-05

Pengaruh temperatur bahan bakar terhadap k_{eff} teras memberikan nilai α_t (negatif) sebesar -8,19071E-06($\Delta k/k/K$) saat BOL dan -7,53463E-05($\Delta k/k/K$) pada saat 2658 hari. Dengan nilai α_{TF} negatif, maka kenaikan suhu bahan bakar akan menurunkan k_{eff} teras begitu pula sebaliknya. Hal ini dikarenakan kenaikan temperatur bahan bakar akan menyebabkan efek Doppler yang menyebabkan berkurangnya *self shielding* serta meningkatkan *resonance absorbance*, sehingga neutron akan lebih banyak terserap akhirnya terjadi penurunan k_{eff} . Sedangkan penurunan temperatur bahan bakar, *resonance absorbance* akan melemah sehingga akan meningkatkan *resonance escape probability*, yang pada nantinya akan meningkatkan nilai k_{eff} .

Pada reaktor PBMR, *shell* berfungsi sebagai moderator dengan bahan grafit. Pada perhitungan ini k_{eff} teras dihitung pada kondisi BOL dan EOL untuk tiap perubahan suhu moderator 50°C, dan membiarkan masuknya lainnya tetap tidak berubah. Didapatkan nilai k_{eff} dari teras seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 7.

Tabel 7 Pengaruh perubahan temperatur moderator terhadap k_{eff} dan koefisien reaktivitas temperatur rata-rata moderator pada kondisi BOL dan EOL.

BOL		EOL	
ΔT (K)	k_{eff}	ΔT (K)	k_{eff}
-150	1.01470	-150	1.01105
-100	1.01356	-100	1.00936
-50	1.01237	-50	1.00763
0	1.01115	0	1.00588
50	1.00988	50	1.00411
100	1.00860	100	1.00233
150	1.00728	150	1.00053
α_t rata-rata ($\Delta k/k/K$)	-2.47600E-05		-3.51107E-05

Pada penelitian kali ini pengaruh perubahan temperatur moderator terhadap k_{eff} memberikan nilai αt bernilai $-2,47600\text{E-}05$ ($\Delta k/k/K$) saat BOL dan $-3,51107\text{E-}05$ ($\Delta k/k/K$) pada saat 2658 hari.

Pada reaktor PBMR, pendingin menggunakan helium. Pada perhitungan ini k_{eff} teras dihitung pada kondisi BOL dan EOL untuk tiap perubahan suhu helium 50C , dan membiarkan masukkan lainnya tetap tidak berubah. Nilai koefisien reaktivitas temperatur pendingin disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8 Pengaruh perubahan temperatur pendingin terhadap k_{eff} dan koefisien reaktivitas temperatur rata-rata pendingin pada kondisi BOL dan EOL.

BOL		EOL	
ΔT (K)	k_{eff}	ΔT (K)	k_{eff}
-150	1.01108	-150	1.00590
-100	1.01111	-100	1.00589
-50	1.01113	-50	1.00589
0	1.01115	0	1.00588
50	1.01117	50	1.00587
100	1.01118	100	1.00586
150	1.01120	150	1.00586
αt rata-rata ($\Delta k/k/K$)	3.60714E-07		-1.57857E-07

Pengaruh perubahan temperatur pendingin terhadap k_{eff} teras memberikan nilai αt pendingin yang relatif kecil dibandingkan dengan αt bahan bakar maupun αt moderator. Hal ini dikarenakan helium memilikiampang lintang makroskopik serapan yang relatif kecil sehingga kemampuan moderasi neutronnya rendah. Nilai koefisien reaktivitas suhu pendingin saat BOL adalah $3,60714\text{E-}07$ dan saat 2658 hari $-1,57857\text{E-}07$.

Dari nilai koefisien reaktivitas pada Tabel 6, 7, dan 8, didapatkan nilai koefisien reaktivitas temperatur teras total bernilai $-3,25900\text{E-}05$ ($\Delta k/k/K$) saat BOL dan $-1,10615\text{E-}04$ ($\Delta k/k/K$) saat EOL. Nilai negatif ini menunjukkan bahwa terjadi pengurangan jumlah reaksi fisi yang terjadi pada generasi selanjutnya, sehingga populasi netron di dalam teras akan berkurang. Berkurangnya populasi netron akan menurunkan daya reaktor. Turunnya daya reaktor mengakibatkan suhu teras menjadi turun sehingga reaktor akan menjadi aman. Dengan demikian teras reaktor mempunyai kemampuan untuk keselamatan sendiri (*inherent safety*).

KESIMPULAN

Penelitian tentang *down scale* teras reaktor *Pebble Bed Modular Reactor* (PBMR) dengan daya 100 MWe berbahan bakar UO_2 dengan moderator grafit dan pendingin helium telah dilakukan. Dari penelitian ini diperoleh nilai faktor multiplikasi efektif adalah 1,01115 pada BOL dan 1,00588 pada EOF dengan komposisi bahan bakar 10% U^{235} dan 90 ppm racun dapat bakar Gd_2O_3 . Nilai *reaktivitas lebih* saat BOL adalah 1,11%, sehingga memenuhi syarat desain dengan $\Delta k/k \leq 1,3\%$. Nilai koefisien reaktivitas temperatur teras total $-3,25900\text{E-}05$ $\Delta k/k/K$ pada saat BOL dan $-1,10615\text{E-}04$ $\Delta k/k/K$

pada saat EOL yang berarti menunjukkan bahwa reaktor mempunyai sifat keselamatan melekat.

DAFTAR PUSTAKA

1. -----, Pebble Bed Modular Reactor (*PBMR*), Report, IAEA, Vienna; Available from:URL: <http://www.aris.iaea.org/ARIS/reactors.cgi>. Accessed 6 Februari 2011.
2. Sardjono. Prof. Yohannes. Desain down scale teras dan bahan bakar PLTN PBMR - HTR dengan menggunakan program *MCNP*, Diktat, Yogyakarta.
3. Julian Robert Lebenhaft. *MCNP4B* modeling of pebble-bed reactor. Tesis. Massachusetts Institute of Technology, Amerika, 2001. Available from:URL: http://web.mit.edu/pebble-bed/papers1_files/MIT_PBR.pdf. Accessed 6 Februari 2011.
4. Andrew C. Kadak. MIT pebble bed reactor project. Nuclear Engineering and Technology, Vol.39, No.2; 2007.
5. Okumura, K., Kaneko, K., Kugo, T. SRAC 2003 Comprehensive neutronics calculation code systems, Department of Nuclear Energy System, JAERI, Ibarkiken; 2003.
6. WISE (World Information Service on Energy) Uranium Project. Available from:URL: <http://www.wise-uranium.org>. Accessed 28 Maret 2010.
7. -----, Innovative small and medium sized reactors: Design features, safety approaches and R&D trends, Report, IAEA, 2004. Available from:URL: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1451_web.pdf. Accessed 11 Februari 2011.
8. Lamarsh. John R. Introduction to Nuclear Reactor Theory. Addison-Wesley, Inc., Ontario, 1966.
9. -----, Panduan SRAC, Diktat, Teknik Fisika, UGM, Yogyakarta.
10. Adinugraha, Aries., Analisis neutronik HTR Tipe PBMR nependingin LiF+BeF₂ Dengan Bahan Bakar Uranium Oksida, Skripsi, JTF, UGM, Yogyakarta, 2005.
11. Andang Widi Harto, Komunikasi Pribadi, Maret 2011.