
OPTIMASI GEOMETRI TERAS REAKTOR DAN KOMPOSISI BAHAN BAKAR BERBENTUK BOLA PADA DESAIN HIGH TEMPERATURE FAST REACTOR (HTFR)

Mega Agustina, Andang Widiharto dan Sihana
Jurusan Teknik Fisika Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada

Diterima editor 31 Maret 2010
Disetujui untuk dipublikasi 02 Juni 2010

ABSTRAK

OPTIMASI GEOMETRI TERAS REAKTOR DAN KOMPOSISI BAHAN BAKAR BERBENTUK BOLA PADA DESAIN HIGH TEMPERATURE FAST REACTOR (HTFR).

Telah dilakukan desain *High Temperature Fast Reactor* (HTFR) tipe *pebble* dengan bahan bakar uranium plutonium nitrida berpendingin Pb-Bi. Parameter yang dianalisis adalah kritikalitas teras, koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar, koefisien reaktivitas *void* pendingin dan kemampuan *breeding* reaktor. Perhitungan dilakukan dengan paket program SRAC2K3. Dari penelitian ini diharapkan diperoleh desain teras berumur lama dan memiliki fitur keselamatan melekat. Dari penelitian ini diperoleh desain reaktor dengan diameter 520 cm dan tinggi 480 cm. Bahan bakar berbentuk *pebble* dengan 63 % UN-37 % PuN pada *zona core* dan 95,5 % UN-4,5 % PuN pada *zona blanket*. Reaktor tidak kritis setelah kurang lebih 800 hari dan k_{eff} pada BoL 1,078223 dan k_{eff} setelah 800 hari adalah 0,986379. Dari penelitian ini diperoleh koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar sebesar $-2,190014\text{E}-05$ pada saat BoL dan $-1,390773\text{E}-05$ setelah 800 hari serta koefisien reaktivitas *void* pendingin sebesar $-2,160402\text{E}-04/\%$ *void* pada saat BoL dan setelah 800 hari sebesar $-2,942364\text{E}-03/\%$ *void*. Reaktor merupakan jenis *fast breeder* ditandai dengan naiknya densitas plutonium 239.

Kata Kunci : desain, teras, HTFR, keselamatan, umur, koefisien reaktivitas.

ABSTRACT

Geometry Optimization Of Reactor Core And Pebble Fuel Composition In The Design Of High Temperature Fast Reactor (HTFR). Design of pebble bed type High Temperature Fast Reactor (HTFR) with uranium plutonium nitride fuel and Pb-Bi cooled has been done. The parameters being analyzed were core criticality, fuel temperature coefficient, void coefficient and reactor breeding ability. Calculation was done by using SRAC2K3 computer code. This research is expected to obtain the design with long life core and inherent safety features. This research obtained core design with a diameter of 520 cm and 480 cm core high. Shaped pebble fuel bed with the 63 % UN-37 % PUN on core zone and 95.5 % UN-4.5 % Pu on blanket zone and k_{eff} value is 1.078223 with approximately 800 day of core life. The fuel temperature coefficient is $-2.190014\text{E}-05$ at BOL and is $1.390773\text{E}-05$ at EOL and void coefficient is $-2.160402\text{E}-04 / \%$ void at BOL and is $-2.942364\text{E}-03 / \%$ void at EOL. Reactor has fast breeder feature marked by an increase in the density of plutonium 239.

Keywords: design, core, HTFR, safety, core life, coefficient.

PENDAHULUAN

Sumber daya energi nuklir merupakan sumber daya energi yang tersedia di alam dan hanya dapat dikonversi menjadi bentuk energi yang dapat dikonsumsi oleh manusia melalui reaksi nuklir. Energi nuklir yang dibangkitkan oleh reaksi pembelahan atau reaksi fisi tersebut terjadi dalam sebuah teras reaktor Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN). Berdasarkan data IAEA, pada tahun 2002 terdapat sebanyak 441 PLTN di dunia yang memberikan kontribusi energi listrik sebesar 17 %.

Seiring berjalannya waktu, teknologi Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir telah mengalami perkembangan. Hingga saat ini, perkembangan teknologi PLTN sudah mengalami fase regenerasi dari generasi I ke generasi II, dari generasi II ke generasi III dan yang akan datang dari generasi III ke generasi IV atau yang sering disebut reaktor nuklir generasi maju (*advanced reactor*) [1]. Reaktor maju merupakan hasil dari pengembangan energi nuklir saat ini. Pengembangan reaktor maju ditujukan untuk mengembangkan reaktor nuklir dengan mengadopsi semua pencapaian dalam aspek keselamatan, ekonomi, reliabilitas, simplifikasi yang telah dicapai baik secara aplikatif maupun konseptual pada pengembangan reaktor nuklir generasi sebelumnya.

Salah satu jenis reaktor yang menjadi kandidat di masa depan adalah reaktor cepat. Spektrum neutron yang lebih keras pada reaktor ini dapat menyebabkan elemen transuranik mengalami reaksi fisi. Selain dapat membakar limbahnya sendiri, reaktor cepat dapat juga digunakan untuk membakar plutonium yang berasal dari bekas hulu ledak senjata nuklir. Plutonium tersebut perlu dimusnahkan guna menghindari terjadinya kemungkinan penyimpanan penggunaan [2].

HTFR (*High Temperature Fast Reactor*) merupakan pengembangan dari reaktor HTR (*High Temperature Reactor*) yang menggunakan bahan bakar UN-PuN dengan pendingin Pb-Bi yang dirancang agar memperoleh kemampuan pembiakan optimal, mempertahankan nilai *excess reactivity* yang kecil serta mempunyai sifat *inherent safe* dengan koefisien reaktivitas suhu bahan bakar, koefisien reaktivitas suhu pendingin dan koefisien *void* pendingin negatif.

Penggunaan bahan bakar *Uranium-plutonium mixed nitride* (U, Pu)N yang mempunyai rentang suhu 1025 K – 1775 K serta pendingin Pb-Bi dengan titik didih sampai 1873 K memungkinkan diperolehnya reaktivitas umpan balik negatif apabila terjadi kecelakaan teras [1].

TINJAUAN PUSTAKA

High Temperature Reactor (HTR) merupakan salah satu tipe reaktor daya yang mempunyai sifat keselamatan melekat atau *inherent safe*. Dalam pengoperasiannya, HTR dikenal dengan dua konsep dasar perakitan bahan bakar, yaitu HTR tipe blok dan HTR tipe *pebble bed* [5].

Konsep dari pembuatan bahan bakar ini adalah untuk memperoleh satuan bahan bakar sekecil mungkin dan berupa partikel berlapis yang harus dapat mengungkung produk fisi [3]. Partikel berlapis yang digunakan terdiri dari dua macam bentuk, BISO (*bi structural isotropic*) dan TRISO (*tri structural isotropic*). Pada desain HTR digunakan bentuk TRISO yang mempunyai susunan *fuel kernel*, lapisan karbon pirolitik densitas rendah (*C Buffer*), lapisan karbon pirolitik dalam densitas tinggi (*Inner Pyrolytic Carbida*, IPyC), lapisan silikon karbida (SiC), lapisan karbon pirolitik densitas tinggi (*Outer Pyrolytic Carbida*, OPyC), lapisan *shell* matriks C, yang berfungsi sebagai material struktur dan moderator.

DASAR TEORI

Data grup konstan yang dipakai dalam perhitungan diperoleh dari hasil generasi grup konstan mikroskopik menggunakan *code* SRAC. Grup neutron yang digunakan pada perhitungan ini adalah 6 grup, yang membutuhkan solusi numerik untuk persamaan difusi. Persamaan difusi multigrup neutron dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\nabla \cdot D \nabla \phi_g + \sum_{R_g} \phi_g = \frac{\lambda_g}{k_{ef}} \sum_{g'} \nu_{g'} \Sigma_{f_{g'}} \phi_{g'} + \sum_{g'=1} \Sigma_{s_{g'g}} \phi_{g'} \quad (1)$$

Teras reaktor merupakan susunan berulang dari struktur bahan bakar biasa yang disebut sel. Sehingga pada reaktor heterogen perlu dilakukan homogenisasi teras. Dalam perhitungan tingkat sel digunakan asumsi-asumsi yang merupakan penyederhanaan dari proses yang sebenarnya terjadi. Asumsi-asumsi tersebut adalah :

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

PELAKSANAAN PENELITIAN

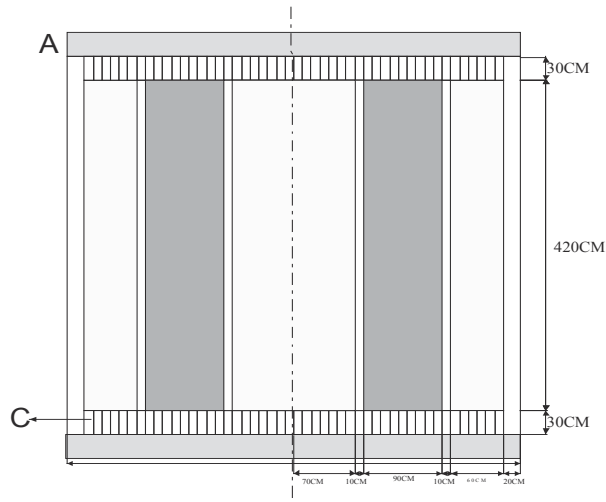
Penelitian dilakukan melalui beberapa tahap, dimulai dari studi *literature* dan hasil-hasil penelitian mengenai HTR tipe *pebble bed*, hasil penelitian mengenai reaktor dengan *fuel* (U,Pu)N dan pendingin Pb-Bi serta studi *literature* tentang disain dan analisis netronik teras reaktor nuklir.

Selanjutnya dilakukan familiarisasi penggunaan program SRAC yang digunakan dalam perhitungan. SRAC merupakan program perhitungan netronik teras reaktor yang dikembangkan oleh JAERI yang dapat digunakan untuk analisis berbagai tipe reaktor dengan disain yang *high reliability*. SRAC telah dikembangkan lebih lanjut untuk memperkirakan karakteristik reaktor, aspek keselamatan reaktor, strategi siklus bahan bakar dan beberapa fungsi lain dengan lebih akurat [4].

Hasil keluaran program SRAC kemudian dianalisis sehingga dapat memberikan beberapa koreksi yang memenuhi kriteria disain reaktor nuklir secara umum.

Desain Bahan Bakar

Komposisi bahan bakar yang diperoleh adalah 63 % UN-37 % PuN pada *zona core* dan 95,5 % UN-4,5 % PuN pada *zona blanket*. Pada disain *coated particle* diperoleh jari-jari kernel bahan bakar 0,050 cm dan jari-jari *coated particle* 0,090 cm, sedangkan disain pebel diperoleh jari-jari *fuel zone* 2,75 cm dan jari-jari pebel 3,00 cm. Gambar 1 menunjukkan konfigurasi teras reaktor potongan vertikal. Gambar 2. menunjukkan disain dari *pebble bed* dan *coated particle*.

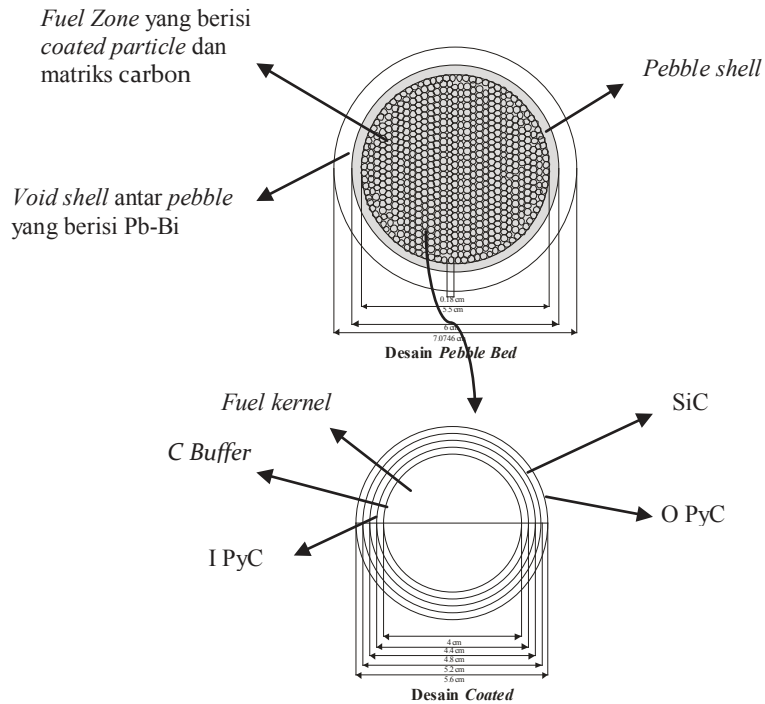


Gambar 1. Konfigurasi teras reaktor potongan vertikal

Data teras ditunjukkan oleh Tabel 1.

Tabel 1. Data-data teras

Teras	
Daya termal (MWth)	1000
Radius teras (cm)	260
Tinggi teras (cm)	480
Tebal zone blanket A (cm)	70
Tebal zone blanket E (cm)	60
Tebal zone reflektor B dan D (cm)	10
Tebal zone reflektor F (cm)	20
Tebal zone core C (cm)	90
Tinggi core dan blanket (cm)	420
Ketebalan reflektor radial atas (cm)	30
Ketebalan reflektor aksial bawah (cm)	30
Jumlah pebble	16750
Pengkayaan bahan bakar zone fuel (%)	63 % UN – 37 % PuN
Pengkayaan bahan bakar zone blanket (%)	95.5 % UN - 4.5 % PuN



Gambar 2. Desain pebble bed dan coated particle

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kekritisitan dan Umur Teras

Umur teras adalah waktu sejak bahan bakar dimuatkan dalam teras reaktor hingga bahan bakar tidak mampu lagi mengkritiskan reaktor. Umur teras ini tergantung pada komposisi awal bahan bakar, perbandingan bahan bakar dan geometri teras. Tabel 2 menunjukkan nilai k_{eff} teras yang menggambarkan umur teras reaktor. Dari Tabel 2, diketahui bahwa nilai k_{eff} pada saat *Beginning of Life* (BoL) sebesar 1,078223. Nilai k_{eff} teras menjadi tidak kritis pada 800 hari. Hal ini berarti, bahan bakar dapat digunakan selama ~800 hari secara terus menerus tanpa perlu diisi ulang. Akan tetapi, untuk reaktor dengan konsep *off line refuelling* ini pergantian bahan bakar dilakukan ketika reaktor masih kritis, dengan kata lain mempunyai nilai k_{eff} lebih sedikit dari 1. Pada desain reaktor HTFR *refuelling* dilakukan setelah ~750 hari. Karena reaktor yang menggunakan konsep ini harus tetap memiliki level reaktivitas positif untuk pengendalian pada saat reaktor memiliki potensi reaktivitas terendah.

Tabel 2. Nilai k_{eff} teras

Hari	k_{eff}
0	1.078223
200	1.030283
400	1.022480
600	1.014878
800	0.986379

Koefisien Reaktivitas Suhu Bahan Bakar

Koefisien reaktivitas suhu bahan bakar dihitung dengan cara menghitung besarnya perubahan k_{eff} terhadap kenaikan suhu bahan bakar. Pada perhitungan ini, k_{eff} teras dihitung pada kondisi BoL dan EoL untuk tiap kenaikan suhu bahan bakar 25 °C dengan suhu pendingin dan void pendingin tetap. Perubahan temperatur bahan bakar memberikan hasil seperti pada Tabel 3.

Tabel 3. Pengaruh perubahan temperatur bahan bakar terhadap k_{eff}

ΔT (K)	BoL		800 hari	
	k_{eff}	$\alpha_T^F K^{-1}$	k_{eff}	$\alpha_T^F K^{-1}$
100	1.080824	-2.231911E-05	0.987731	-1.388004E-05
75	1.080156	-2.212970E-05	0.987383	-1.375453E-05
50	1.079499	-2.192552E-05	0.987042	-1.362371E-05
25	1.078853	-2.166355E-05	0.986703	-1.332426E-05
0	1.078223	-	0.986379	-
-25	1.077601	-2.141331E-05	0.986057	-1.323017E-05
-50	1.076988	-2.127049E-05	0.985741	-1.312128E-05
-75	1.076390	-2.105828E-05	0.985433	-1.297655E-05
-100	1.075507	-2.342113E-05	0.984693	-1.735132E-05
Rata-rata		-2.190014E-05		-1.390773E-05

Dari Tabel 3. dapat diketahui pengaruh perubahan temperatur bahan bakar terhadap k_{eff} teras yang memberikan nilai α_T^F -2,190014E-05 pada saat BoL dan -1,390773E-05 pada saat EoL. Kenaikan temperatur bahan bakar akan mengakibatkan *Doppler broadening of resonance* yang meningkatkan serapan resonansi dan akan menurunkan faktor serapan diri. Hal ini berarti bahwa kenaikan suhu bahan bakar akan menurunkan k_{eff} teras reaktor. Penurunan ini akan mengurangi jumlah reaksi fisi yang terjadi pada generasi selanjutnya, sehingga populasi neutron di dalam teras akan berkurang. Berkurangnya populasi neutron akan menurunkan daya reaktor. Turunnya daya reaktor mengakibatkan suhu teras menjadi turun sehingga teras reaktor menjadi aman. Dengan demikian teras reaktor mempunyai kemampuan untuk menjamin keselamatannya sendiri (*inherent safety*).

Koefisien Reaktivitas Void Pendingin

Void pendingin akan terbentuk pada keadaan temperatur saturasi. Void pendingin menyebabkan perubahan fraksi cair dan fraksi uap yang dalam penelitian ini diasumsikan perubahan fraksi tersebut hanya merubah densitas fluida pendingin. Koefisien reaktivitas pendingin dihitung dengan cara menghitung besarnya perubahan nilai k_{eff} terhadap kenaikan presentase void pendingin Pb-Bi. Tabel 4. menunjukkan pengaruh terjadinya void pada pendingin

Tabel 4. Pengaruh Terjadinya void pada pendingin

Void	BoL		800 hari	
	k_{eff}	$\alpha_{Void} / \% void$	k_{eff}	$\alpha_{Void} / \% void$
0%	1.078223E+00		9.863786E-01	
10%	1.076662E+00	-1.344668E-04	9.851066E-01	-8.766664E-03
20%	1.074761E+00	-1.493745E-04	9.835114E-01	-4.465655E-03
30%	1.072469E+00	-1.658652E-04	9.815238E-01	-3.045736E-03
40%	1.069717E+00	-1.843690E-04	9.790781E-01	-2.347926E-03
50%	1.066410E+00	-2.054742E-04	9.760813E-01	-1.941058E-03
60%	1.062453E+00	-2.294363E-04	9.724048E-01	-1.682106E-03
70%	1.057693E+00	-2.571714E-04	9.678900E-01	-1.510333E-03
80%	1.051940E+00	-2.896579E-04	9.623156E-01	-1.396352E-03
90%	1.044909E+00	-3.285468E-04	9.553455E-01	-1.325442E-03
Rata-rata		-2.160402E-04		-2.942364E-03

Pada reaktor cepat, terbentuknya void pada pendingin tidak menyebabkan berkurangnya moderasi energi neutron. Akan tetapi dapat menyebabkan peningkatan pada *resonance absorbance*. Peningkatan *resonance absorbance* akan menyebabkan penurunan kekritisan teras. Dari Tabel 4. diketahui bahwa koefisien reaktivitas void pada saat BoL sebesar -2,160402E-04/%void dan pada saat EoL sebesar -2,942364E-03/%void.

Terbentuknya void pendingin akan terjadi apabila temperatur pendingin mencapai 1670⁰ C. Pada temperatur 1670⁰ C, Pb-Bi akan mengalami pendidihan dan mulai terbentuk fase uap.

Kemampuan Breeding Reactor

Kemampuan *breeding* atau pembiak suatu reaktor ditandai dengan peningkatan densitas plutonium-239 dalam teras serta nilai rasio konversi (CR) >1. CR merupakan rasio antara serapan non fisi nuklida fertile yang berhasil membentuk nuklida fisil. Sehingga nilai CR>1 mempunyai arti bahwa laju pembentukan bahan bakar fisil lebih tinggi daripada laju pembakaran bahan bakar fisil. Dalam hal ini akan terjadi peningkatan kandungan bahan bakar fisil sehingga dapat meningkatkan nilai *excess reactivity* dari kondisi BoL hingga EoL. Peningkatan densitas Pu-239 ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Densitas rata-rata Pu-239

Hari	Densitas rata-rata Pu (atom/cm ³)
0	3.687979E+20
200	3.699176E+20
400	3.709386E+20
600	3.718870E+20
800	3.727693E+20
1000	3.735902E+20

Dari Tabel 5. terlihat bahwa densitas nuklida Pu-239 mengalami peningkatan. Hal ini menunjukkan bahwa desain reaktor HTFR dengan bahan bakar berbentuk *pebble* merupakan jenis reaktor *fast breeding*

KESIMPULAN DAN SARAN

Telah dilakukan analisis unjuk kerja reaktor cepat modular berpendingin timbal-bismuth (Pb-Bi) dengan daya 1000 MWt.

Analisis terhadap hasil perhitungan fisika teras desain reaktor menunjukkan bahwa reaktor cepat ini mempunyai sifat *inherent safety*. Diperoleh desain reaktor HTFR dengan komposisi 63 % UN-37 % PuN pada *zona core* dan 95,5 % UN - 4,5 % PuN pada *zona blanket*. Diameter teras 520 cm dengan tinggi teras 480 cm. Umur teras dapat mencapai ~ 800 hari dengan k_{eff} pada BoL 1,078223 dan k_{eff} pada 800 hari adalah 0,986379. reaktor mempunyai sifat *inherent safety* ditandai dengan nilai dari koefisien reaktivitas baik untuk suhu bahan bakar maupun *void* pendingin negatif. Peningkatan densitas rata-rata Pu pada teras reaktor menunjukkan bahwa reaktor tipe *HTFR* ini mempunyai kemampuan pembiakan (*breeding*).

DAFTAR PUSTAKA

1. Aziz, Ferhat, dkk. Design Study of Modular Lead-Bismuth Cooled Fast Reactors with Nitride Fuel, Kontribusi Fisika Indonesia Vol. 13 No.4, Oktober 2002.
2. Buletin asn ind files ivovasi vol5 XVII November 2005. Diakses dari <http://202.46.15.118/index.php?modul=document&menu=public&words=&opt=doc&item=file&GroupId=34&DocumentId=126>; 12 Februari 2010
3. Verkerk, E.C. Dynamics of the pebble bed nuclear reactor in the direct brayton cycle; Ph.D. Thesis. Delft University of Technology; 200
4. Okumura, K., Kaneko, K., Kugo, T. SRAC 2003 comprehensive neutronics calculation code system. Department of Nuclear Energy System. Japan Atomic Energy Research Institute; Ibaraki-ken; 2003
5. Herhady, R.D. dan Sukarsono, R. Pengaruh suhu dan waktu sintering terhadap kualitas bahan bakar kernel UO₂ dalam furnace jenis fluidized bed. Prosiding Seminar Nasional ke-13 Teknologi dan Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir; Jakarta 6 Nopember 2007.