

PENGARUH GEOMETRI TERAS TERHADAP KINERJA NEUTRONIK PADA REAKTOR PEMBIAK CEPAT DENGAN SIKLUS BAHAN BAKAR TERTUTUP

Dian Fitriyani dan Anton Basri
Jurusan Fisika Universitas Andalas
Kampus Limau Manis UNAND Padang
difiaal@gmail.com

ABSTRAK

Telah dilakukan penelitian tentang pengaruh geometri teras terhadap kinerja neutronik pada reaktor pembiak cepat dengan siklus bahan bakar tertutup. Penelitian dilakukan melalui simulasi komputasi dengan memvariasikan geometri teras untuk reaktor pembiak cepat berpendingin logam cair (Pb-Bi) dengan bahan bakar UN-PuN (Nitrida) yang beroperasi selama 20 tahun. Analisis dilakukan terhadap hasil pengamatan perubahan harga faktor multiplikasi neutron (k_{eff}), perubahan nilai *Burnup*, perubahan nilai *Breeding Ratio*, dan perubahan densitas bahan fertil dan fisil di dalam teras reaktor. Dari keseluruhan model teras reaktor yang diamati, model G5 ($Z \gg X$) memberikan hasil yang terbaik dengan mempertahankan harga k_{eff} dalam batas toleransi reaktifitas ($\pm 0,05$) selama 13 tahun. Nilai *breeding ratio* (BR) untuk seluruh model teras masih dalam rentang yang diharapkan ($BR > 1$), namun nilai BR paling baik diberikan oleh model teras G1 ($Z \ll X$). Nilai *burnup* untuk keseluruhan model meningkat seiring dengan banyaknya nuklida yang berfisi di dalam teras reaktor dan yang paling baik diberikan oleh model teras G1. Beberapa nuklida baru hasil transmudasi bahan bakar muncul di dalam teras reaktor, contohnya ^{241}Am .

Kata Kunci : transmudasi, reaktor pembiak cepat, siklus bahan bakar tertutup, geometri teras, *breeding ratio*, *burnup*

1. PENDAHULUAN

Uranium alam mengandung sekitar 0,72% ^{235}U yang disebut bahan fisil yaitu bahan yang mudah berfisi dan 99,28% ^{238}U yang merupakan bahan fertil, yaitu bahan yang berpotensi untuk dapat diubah menjadi bahan fisil. Bahan bakar utama dari suatu reaktor menggunakan bahan fisil, tetapi berlimpahnya jumlah bahan fertil dalam uranium alam diharapkan dapat dimanfaatkan untuk mengatasi krisis energi sehingga memberikan solusi terhadap ketersediaan energi jangka panjang dengan memanfaatkannya dalam reaktor. Telah dikembangkan suatu jenis reaktor cepat yaitu reaktor yang dapat mengubah bahan fertil menjadi bahan fisil dengan memanfaatkan neutron berenergi tinggi. Telah diketahui bahwa melalui tangkapan neutron pada energi sekitar 1 MeV, ^{238}U dapat diubah menjadi bahan fisil, ^{239}Pu . (Waltar, 1981)

Jika suatu reaktor cepat dapat memproduksi bahan fisil yang lebih banyak daripada bahan fisil yang digunakan, reaktor ini disebut reaktor pembiak cepat (*Fast Breeder Reactor*). Pembangkitan energi yang cukup besar pada FBR ini disertai dengan meningkatnya produksi unsur-unsur aktinida sebagai limbah bahan bakar yang bersifat radioaktif. Untuk mengatasi jumlah aktinida yang dihasilkan oleh reaktor dapat dilakukan dengan siklus bahan bakar tertutup, yaitu dengan mendaur ulang unsur-unsur aktinida tersebut sehingga dapat dimanfaatkan kembali sebagai bahan bakar.

Perhitungan *Burnup* merupakan salah satu perhitungan standar untuk menganalisis bahan bakar reaktor, dari perhitungan ini keadaan siklus bahan bakar dan kaitannya dengan reaktifitas teras selama reaktor beroperasi dapat dipantau. Dengan demikian, pola pemakaian bahan bakar dan syarat-syarat operasional reaktor dapat diperkirakan seperti

geometri teras, lamanya reaktor dapat beroperasi tanpa pengisian ulang bahan bakar (*refueling*) dan perubahan densitas unsur-unsur aktinida selama operasi.

Pada penelitian ini dilakukan analisis pengaruh geometri teras terhadap kinerja neutronik pada reaktor pembiak cepat dengan siklus bahan bakar tertutup (*closed fuel cycle*) yang dapat secara otomatis mendaur-ulang bahan radioaktif (unsur-unsur aktinida) untuk dimanfaatkan kembali sebagai bahan bakar oleh reaktor tersebut. Optimasi disain dilakukan dengan memvariasikan ukuran teras reaktor pada interval waktu *refuelling* tertentu. Dari penelitian ini diharapkan diperoleh suatu disain reaktor pembiak cepat yang memiliki efisiensi bahan bakar optimal dan dapat beroperasi dalam waktu yang lama (*long life*) tanpa *refuelling*.

Perhitungan diawali dengan penentuan faktor multiplikasi neutron, distribusi fluks neutron dan distribusi daya yang didapatkan dari penyelesaian persamaan difusi neutron secara numerik. Hasil penyelesaian persamaan ini digunakan untuk analisis penyusutan bahan bakar (analisis *burnup*). Selama reaktor beroperasi akan dilakukan pengamatan terhadap perubahan nilai faktor multiplikasi neutron (k_{eff}), perubahan nilai densitas aktinida, perubahan nilai *burnup* dan perubahan nilai *breeding ratio*.

2. METODE

Simulasi komputasi untuk mengetahui pengaruh geometri teras terhadap kinerja neutronik reaktor dilakukan pada disain reaktor reaktor pembiak cepat berukuran medium dengan spesifikasi disain seperti terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi disain reaktor

Parameter	Spesifikasi	
Daya reaktor	150 MWth	
Jenis bahan pendingin	Pb-Bi	
Bahan struktur	B ₄ C + <i>Stainless steel</i>	
Jenis bahan bakar	UN-PuN	
Pengayaan bahan pendingin	44,5 % Pb – 55,5 % Bi	
Fraksi volume teras	bahan bakar	45%
	bahan struktur	15%
	bahan pendingin	40%
Fraksi Enrichment	12% - 17%	
Diameter Pin bahan bakar	1cm – 10 cm	
Siklus burnup	20 tahun	

Seluruh perhitungan dilakukan untuk geometri teras tiga dimensi (XYZ) dan untuk memperoleh pendekatan dan penyesuaian terhadap model teoritik maka dilakukan dikritisasi ruang dalam pembagian teras. Teras dalam arah X, Y, dan Z dibagi dalam beberapa daerah dengan variasi lebar dan setiap daerah dibagi lagi menjadi beberapa *mesh*. Seluruh perhitungan dilakukan untuk setiap *mesh*. Pembagian teras dalam beberapa daerah ini diperlukan untuk memudahkan pengaturan komposisi dan fraksi bahan bakar, pengayaan maupun bahan pendingin di teras sehingga optimasi disain untuk memperoleh harga faktor multiplikasi yang diinginkan menjadi lebih cepat tercapai. Di dalam setiap daerah diletakkan beberapa kelompok bahan atau grup penyusun teras reaktor yang terdiri dari bahan bakar, bahan pendingin (*coolant*), dan bahan struktur. *Blanket* (bagian teras yang berisi bahan fertil) ditempatkan di sekeliling teras dan fraksi pengayaan bahan bakar (bahan fisil) untuk setiap kelompok material diatur sedemikian rupa sehingga reaktor berada dalam keadaan kritis pada tahun pertama operasi (faktor multiplikasi, $k_{eff} \sim 1.00$). Untuk setiap model geometri teras reaktor, jumlah *mesh* dan

ukuran daerah pada teras reaktor diatur sedemikian rupa dengan mempertahankan volume teras reaktor agar tetap seragam. Variasi model geometri teras diperlihatkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Variasi model geometri teras

Model Teras	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	Z/X	Definisi
G1	100	100	52	0,52	$Z \ll X$
G2	90	90	64	0,71	$Z < X$
G3	80	80	80	1	$Z = X$
G4	70	70	80	1,14	$Z > X$
G5	60	60	144	2,4	$Z \gg X$

Dari hasil keluaran program kemudian dilakukan pemantauan terhadap perubahan k_{eff} , perubahan densitas nuklida, nilai *Breeding Ratio* dan nilai *burnup* di dalam teras reaktor selama 20 tahun operasi. Perhitungan ini diulangi untuk semua geometri teras reaktor G1 hingga G5.

Harga faktor multiplikasi neutron (k_{eff}) diperoleh melalui serangkaian perhitungan difusi multigrup. Secara numerik untuk mendapatkan harga k_{eff} yang diinginkan adalah dengan memilih salah satu ukuran, konfigurasi dan komposisi teras tertentu. Pada tahun pertama operasi teras reaktor diatur agar berada dalam kondisi kritis yang ditandai dengan harga k_{eff} sama dengan satu. Kondisi kritis ini dapat dicapai dengan melakukan pengaturan pada fraksi pengayaan bahan bakar di tiap bagian teras.

Selanjutnya dilakukan perhitungan *burnup* secara numerik. Perhitungan *burnup* dilakukan untuk 28 inti berat yang dihasilkan dari konversi ^{234}U sampai ^{249}Cm . Secara umum persamaan *burnup* untuk tiap material adalah :

$$\frac{dN_i}{dt} = -(\lambda_i + \sigma_{a,t}\phi)N_i + \sum_m s_{m,t}N_m$$

dimana,

N_i = densitas atom inti ke-i

λ_i = konstanta peluruhan

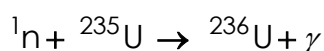
$\sigma_{a,t}$ = penampang lintang reaksi absorpsi mikroskopik

ϕ = fluks neutron

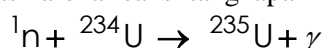
$s_{m,t}$ = kecepatan produksi inti ke-i dari inti ke-m

Nilai fluks dari solusi persamaan difusi digunakan untuk perhitungan perubahan densitas tiap atomik secara numerik untuk setiap interval normalisasi fluks (90 hari). Pemantauan dilakukan setiap 1 tahun selama operasi, misalnya untuk perubahan densitas ^{235}U adalah sebagai berikut:

Perubahan densitas ^{235}U (nuklida no.2) dipengaruhi oleh pengurangan densitas karena tangkapan neutron oleh ^{236}U



dan penambahan densitas karena reaksi tangkapan neutron dari ^{234}U (nuklida no.1)



Secara numerik perubahan densitas ^{235}U dapat dinyatakan

$$N_2^{j+1} - N_2^j = -N_2^j \sigma_{a2} \phi \cdot dt + N_1^j \sigma_{c1} \phi \cdot dt$$

$$N_2^{j+1} = N_2^j - N_2^j \sigma_{a2} \phi \cdot dt + N_1^j \sigma_{c1} \phi \cdot dt$$

Nilai *Burnup* dapat dinyatakan dalam persentase (%) dengan satuan MWd/kg atau MWd/ton. Persamaan *burnup* dalam persentase dapat dinyatakan dalam

$$B(\text{atom}\%) = 100 \frac{\sum_m N_m \sigma_{fm} \phi t}{\sum_m N_{m,0}}$$

Persamaan ini dihitung untuk semua atom berat dengan $N_{m,0}$ adalah densitas pada saat $t = 0$. Nilai *burnup* ideal yang diharapkan berkisar antara 1% sampai 10%.

Breeding ratio merupakan perbandingan antara bahan fisil yang diproduksi dengan bahan fisil yang musnah dalam suatu siklus bahan bakar akibat pemakaian dalam reaktor. Secara umum dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$BR = \frac{FP}{FD}$$

didalam suatu siklus bahan bakar. bahan fisil yang dihasilkan dapat dinyatakan dalam persamaan:

$$FP = FD + FEOC - FBOC$$

sehingga dapat dituliskan :

$$BR = 1 + \frac{FEOC - FBOC}{FD}$$

dimana :

BR = *Breeding ratio*

FP = Bahan fisil yang diproduksi dalam satu siklus

FD = Bahan fisil yang musnah dalam satu siklus

$FEOC$ = Bahan fisil dalam teras dan *blanket* pada awal siklus

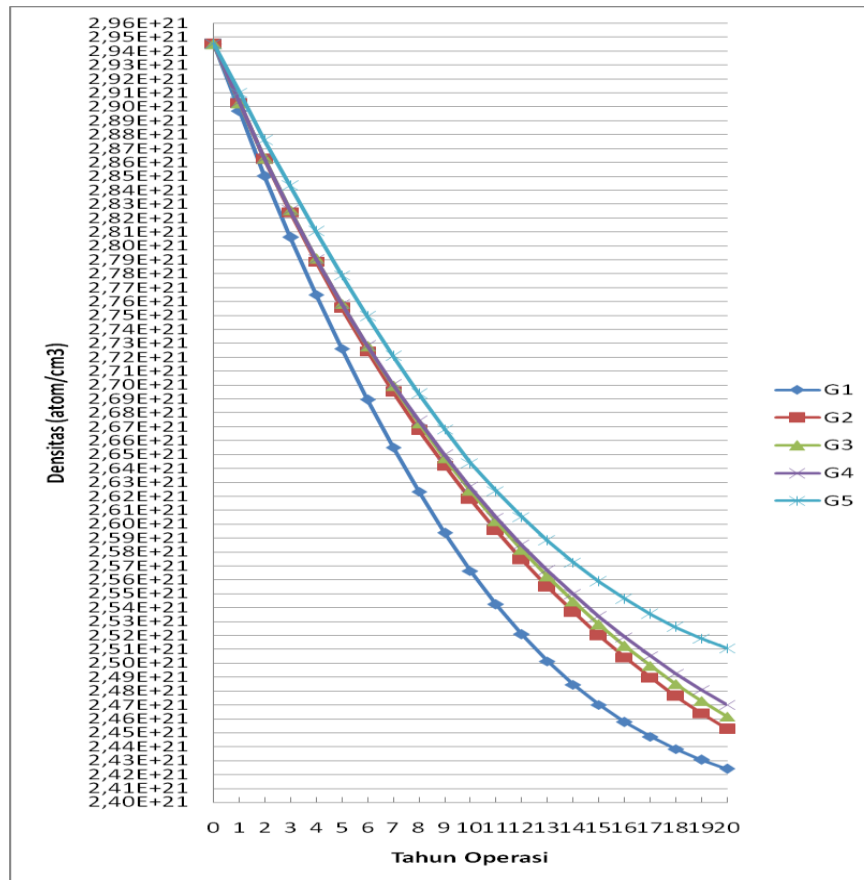
$FBOC$ = Bahan fisil dalam teras dan *blanket* pada akhir siklus.

Dari persamaan tersebut nampak bahwa suatu reaktor pembiak cepat akan berperilaku baik bila nilai *breeding ratio* lebih besar dari 1, artinya selama dioperasikan reaktor tersebut menghasilkan bahan fisil yang terus bertambah ($FEOC > FBOC$) dan berarti pula bahwa pemanfaatan bahan bakar di teras reaktor semakin efisien.

3. HASIL DAN DISKUSI

Nilai densitas awal diperlukan untuk mengetahui perubahan densitas nuklida untuk setiap iterasi *burnup* (1 tahun) yang dilakukan sehingga transmudasi nuklida-nuklida bahan bakar dapat dipantau. Hasil perhitungan densitas awal menunjukkan bahwa pada saat reaktor mulai beroperasi hanya terdapat beberapa nuklida di dalam teras yaitu nuklida-nuklida dari bahan bakar reaktor yang terdiri dari ^{235}U , ^{238}U , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu dan ^{242}Pu dengan komposisi tertentu. Bahan fertil ^{238}U yaitu bahan yang berpotensi untuk dapat diubah menjadi bahan fisil melalui proses tangkapan neutron pada energi 1 MeV atau lebih. Sedangkan ^{239}Pu adalah bahan fisil, yaitu bahan yang mudah untuk berfisi. Melalui tangkapan neutron, ^{238}U berubah menjadi ^{239}Pu sehingga menyebabkan jumlah

^{238}U di dalam teras reaktor berkurang dan jumlah ^{239}Pu bertambah, disebabkan karena perubahan bahan fertil menjadi bahan fisil. Perubahan densitas ^{238}U dan ^{239}Pu selama satu siklus diperlihatkan oleh Gambar 1 dan Gambar 2.

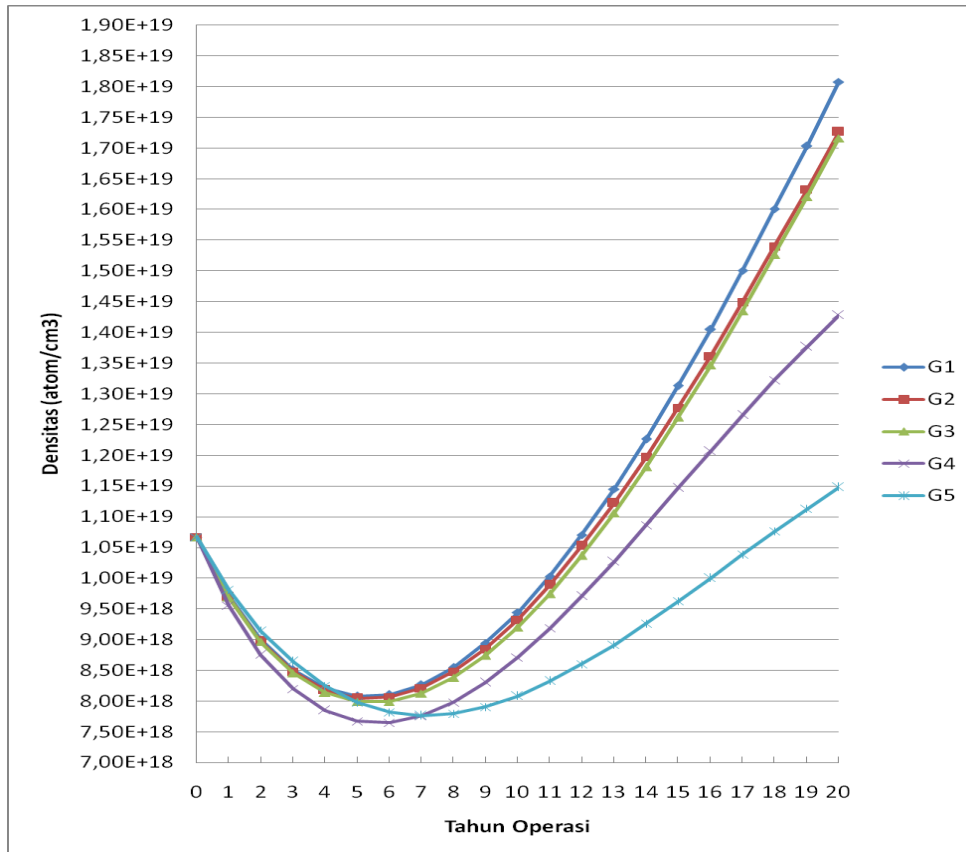


Gambar 1. Perubahan densitas ^{238}U

Model teras G1 memberikan kenaikan densitas ^{239}Pu paling cepat dibandingkan model lainnya, disebabkan oleh banyaknya interaksi neutron dengan bahan fertil lebih banyak karena bentuk teras yang pipih, dimana reflektor berjarak lebih jauh dari pusat teras.

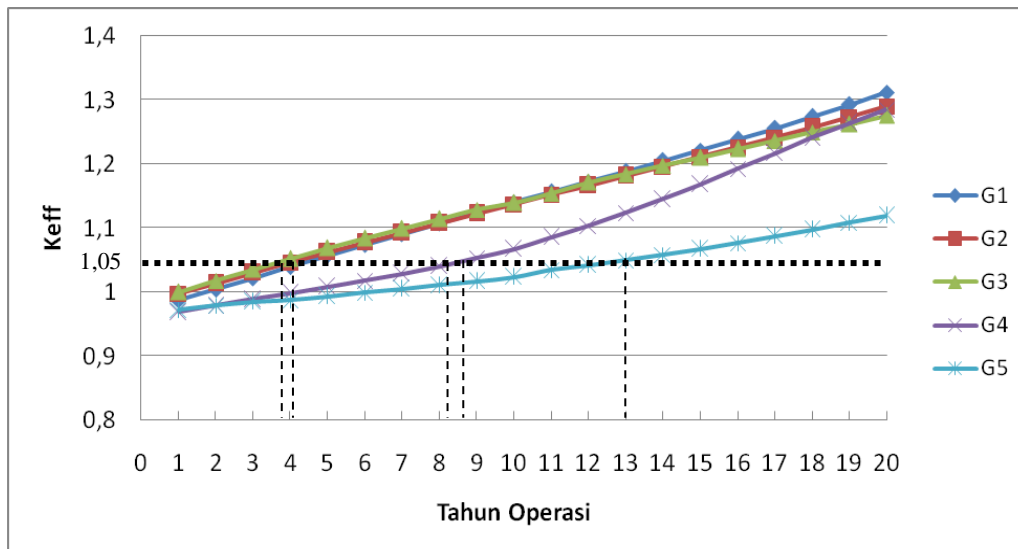
Gambar 3 dan Gambar 4 memperlihatkan nilai faktor multiplikasi neutron dan nilai breeding ratio selama 20 tahun operasi reaktor untuk semua model yang dipantau. Tingkat kekritisan reaktor ditandai dengan harga faktor multiplikasi neutron (k_{eff}) sama dengan 1,00. Batas nilai toleransi reaktifitas (\$) adalah $\pm 0,05$, artinya reaktor masih berada dalam keadaan kritis dalam rentang nilai 0,95 hingga 1,05. Dalam hal ini model teras G5 dapat mempertahankan kekritisan teras hingga 13 tahun, lebih lama dibandingkan dengan model lainnya.

Dalam tinjauan transmudasi bahan bakar, model G1 memberikan efektifitas daur ulang bahan bakar yang paling baik, ditunjukkan dengan tingginya rasio pembiakkan bahan fisil (*breeding ratio*). Namun kondisi ini memicu semakin banyak reaksi fisi yang terjadi di pusat teras sehingga reaktor hanya sebentar berada dalam kondisi kritis, dengan kata lain waktu operasi reaktor menjadi lebih singkat sehingga interval *refueling* semakin pendek.

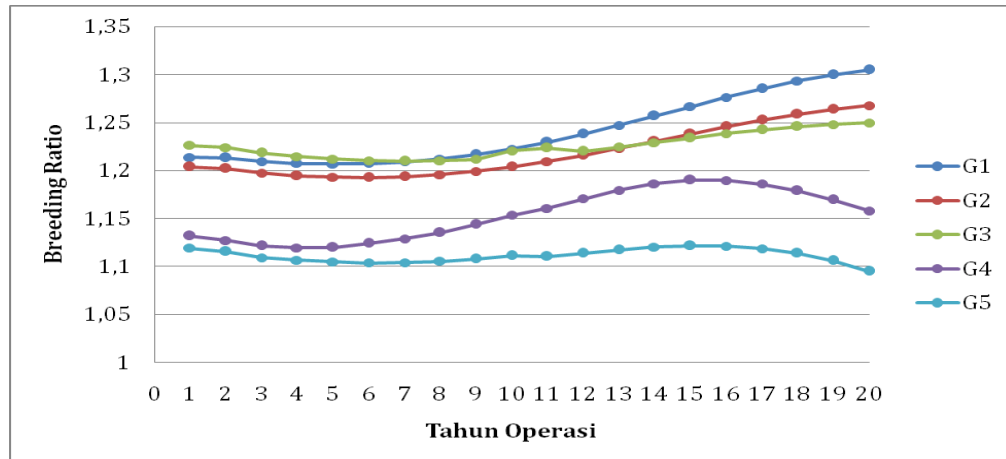


Gambar 2. Perubahan densitas ²³⁹Pu

Nilai *burnup* menunjukkan banyaknya bahan bakar yang berfisi selama reaktor beroperasi. Nilai *burnup* rata-rata yang dihasilkan dari simulasi semua model G1 sampai G5 dapat dilihat pada Gambar 5. Nilai *burnup* untuk semua model mengalami kenaikan dalam 1 siklus (20 tahun). Kenaikan ini menunjukkan bahwa semakin banyak atom berat dalam bahan bakar yang mengalami fisi selama 1 siklus.

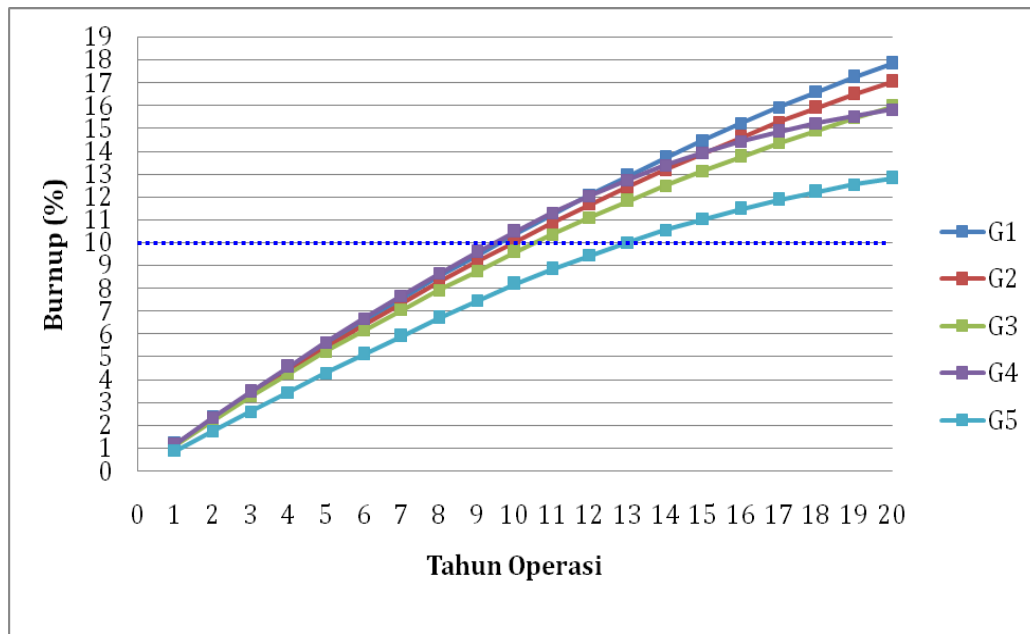


Gambar 3. Nilai faktor multiplikasi neutron



Gambar 4. Nilai breeding ratio untuk model

Pada model G5, nilai burnup berkisar pada batasan harga yang diharapkan (1% sampai 10%) dalam waktu yang terlalu lama yaitu 13 tahun. Hal ini sejalan dengan perolehan nilai k_{eff} yang mampu mempertahankan kekritisan reaktor hingga 13 tahun pada model teras G5. Jika nilai *burnup* lebih dari 10 % maka akan semakin banyak jumlah atom berat yang berfisi di dalam teras reaktor. Jika reaksi fisi terlalu banyak dan tidak terkendali maka akan membahayakan tingkat keamanan reaktor. Kondisi ini kemungkinan disebabkan karena bentuk teras yang tinggi pada model G5 sehingga jarak dari pusat teras ke reflektor pada dinding teras X dan Y lebih dekat dibandingkan dengan model lainnya. Interaksi neutron dengan reflektor lebih banyak dibandingkan dengan interaksi neutron dengan bahan fisil sehingga dapat mempertahankan nilai *burnup* lebih lama dibandingkan model teras lainnya.



Gambar 5. Nilai *burnup* untuk model G1 sampai G5

Secara keseluruhan semua model teras memberikan hasil seperti yang diharapkan pada reaktor pembiak cepat. Namun meskipun nilai *burnup*, nilai *breeding ratio* dan transmudasi bahan bakar pada model G1 sampai G4 lebih baik, hal tersebut tidak bisa menjadikan reaktor dapat beroperasi lebih lama. Model G5 merupakan teras yang dapat beroperasi paling lama (*long life operation*) tanpa pengisian ulang kembali bahan bakar dengan tetap menunjukkan parameter-parameter transmudasi bahan bakar dengan baik

sehingga tetap memenuhi kriteria reaktor pembiak cepat. Lamanya waktu pengoperasian reaktor tanpa *refueling* ini memberikan banyak keuntungan, diantaranya lebih sedikit campur tangan operator dalam pengoperasian reaktor, kondisi ini akan meningkatkan faktor keamanan reaktor. Disamping itu juga akan lebih memudahkan dalam hal pemeliharaan reaktor (*maintenance*).

Dari hasil simulasi untuk model G1 hingga G5 terlihat bahwa geometri teras reaktor mempengaruhi kinerja reaktor secara keseluruhan. Bila geometri teras reaktor diubah maka akan menyebabkan densitas nuklida, nilai faktor multiplikasi neutron (k_{eff}), nilai *burnup* dan nilai *breeding ratio* akan berubah pula.

4. KESIMPULAN

Analisis terhadap hasil simulasi untuk model teras reaktor yang pipih hingga teras reaktor yang paling tinggi (G1-G5) memberikan gambaran mengenai pengaruh geometri teras terhadap transmudasi bahan bakar pada reaktor pembiak cepat. Dari hasil analisis tersebut dapat disimpulkan :

1. Dalam tinjauan harga multiplikasi neutron yang masih dalam batas toleransi nilai reaktifitas teras, ($k_{\text{eff}} = 1,05$), maka reaktor dengan model teras G5 ($Z \gg X$) memberikan waktu operasi yang paling lama yaitu 13 tahun.
2. Model teras reaktor yang paling tinggi (G5) memberikan nilai *burnup* yang baik (1%-10%) dengan waktu operasi tanpa *refueling* paling lama yaitu selama 13 tahun.
3. Dari keseluruhan model teras yang diamati, model G5 (bentuk teras dengan rasio $Z/X \gg 1$) menunjukkan kinerja terbaik yang ditunjukkan dengan waktu operasi yang paling lama yaitu 13 tahun dengan parameter-parameter transmudasi bahan bakar yang masih dalam batas-batas yang ditentukan untuk reaktor pembiak cepat yaitu nilai *burnup* berada dalam batasan harga 1%-10% dan *breeding ratio* > 1 .

DAFTAR PUSTAKA

1. Agostini, P dan Bertacci, G., (2002), Natural Circulation of Lead-Bismuth in One-Dimensional Loop: Experiment and code predictions, *Proceedings of 10th International Conference on Nuclear Engineering*, Arlington, 14-18.
2. Chang, J-E dan kune Y.S., (2000), Natural Circulation Heat Transfer Analysis for A Liquid Metal Reactor, *Proceedings of 8th I International Conference on Nuclear Engineering*, Baltimore, MD, USA, 2-6.
3. Duderstadt, J.J. dan Hamilton, L.J., (1978), *Nuclear Reactor Analysis*, John Wiley & Sons, Inc., Kanada.
4. Fitriyani, D., (2006), *Studi Disain Reaktor daya Nuklir Berbasis Kapal*, Disertasi, Departemen Fisika, Institut Teknologi Bandung (ITB).
5. Jaluria, Yogesh, 1980, *Natural Convection*, Rutgers University, New Jersey.
6. Kazimi, M.S. dan Todreas, N.E., (1993), *Thermal Hydraulic Fundamentals*, Taylor&Francis, Amerika.
7. Krane, K.S., (1988), *Introductory Nuclear Physics*, John Wiley & Sons Inc., new York.
8. Novitrian dan H.Sofue., (2004), *Study on Pb-Bi natural Circulation Phenomena*, INES-1, Tokyo-japan, 1-4.
9. Sekimoto, H. dan Makino, S., 2001, *LBE-Cooled Long-Life Safe Simple Small Portable Proliferation-Resistant Reactor (LSPR)*, Bulletin of the Research Laboratory for Nuclear Reactor, Special Issue No.4 ISSN 0387-6144.

10. Takahashi, M., 2004, *Conceptual Design And R&D Of Steam Lift Pump Type Lead-Bismuth Colled Boiling Water Small Fast Reactor*, COE-INES Newsletter, Vol 1 No.6.
11. Waltar A.E. dan Reynolds, A.B., (1981), *Fast Breeder Reactors*, Pergamon Press, New York.