

**DESAIN TERAS PLTN JENIS *PEBBLE BED MODULAR REACTOR (PBMR)*  
MENGUNAKAN PAKET PROGRAM MCNP-5 PADA KONDISI *BEGINNING OF LIFE***

Ralind Re Marla<sup>1)</sup>, Yohannes Sardjono<sup>2)</sup> dan Supardi<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Jurusan Fisika Fakultas MIPA Universitas Negeri Yogyakarta-Karang Malang Yogyakarta

<sup>2)</sup>Pusat Sains dan Teknologi Akselerator BATAN - Jl. Babarsari Yogyakarta

Email: sarjono.batan@gmail.com

Diterima editor 4 Agustus 2014

Disetujui untuk publikasi 10 September 2014

**ABSTRAK**

**DESAIN TERAS PLTN TYPE *PEBBLE BED MODULAR REACTOR (PBMR)* MENGGUNAKAN PROGRAM MCNP-5 PADA KONDISI *BEGINNING OF LIFE (BOL)*.** Telah dilakukan desain teras Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) untuk jenis *Pebble Bed Modular Reactor (PBMR)* dengan daya 70 MWe untuk keperluan proses *smelter* pada keadaan *beginning of life (BOL)*. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui persen pengkayaan, distribusi suhu dan nilai keselamatan dengan koefisien reaktivitas teras yang negatif pada reaktor jenis PBMR apabila daya reaktor 70 MWe. Analisis menggunakan program *Monte Carlo N-Particle-5 (MCNP5)* dan dari hasil analisis ini diharapkan dapat memenuhi syarat dalam mendukung program percepatan pembangunan kelistrikan batubara 10.000 MWe khususnya untuk proses *smelter*, yang tersebar merata di wilayah Indonesia. Hasil penelitian menunjukkan bahwa, faktor perlipatan efektif ( $k_{\text{eff}}$ ) Reaktor jenis PBMR daya 70 MWe mengalami kondisi kritis pada pengkayaan 5,626 % dengan nilai faktor perlipatan efektif  $1,00031 \pm 0,00087$  dan nilai koefisien reaktivitas suhu pada  $-10,0006$  pcm/K. Dari hasil analisis dapat disimpulkan bahwa reaktor jenis PBMR daya 70 MWe adalah aman.

Kata kunci : Analisis, PBMR, MCNP5, 70 MWe, *smelter*.

**ABSTRACT**

**CORE DESIGN OF NPP *PEBBLE BED MODULAR REACTOR (PBMR)* TYPE USING COMPUTER CODE MCNP-5 FOR *BEGINNING OF LIFE (BOL)*.** The core design of Nuclear Power Plant for *Pebble Bed Modular Reactor (PBMR)* type with 70 MWe capacity power in *Beginning of Life (BOL)* has been performed. The aim of this analysis, to know percent enrichment, temperature distribution and safety value by negative temperature coefficient at type PBMR if reactor power become lower equal to 70 MWe. This analysis was expected become one part of overview project development the power plant with 10.000 MWe of total capacity, spread evenly in territory of Indonesia especially to support of *smelter* industries. The results showed that, effective multiplication factor ( $k_{\text{eff}}$ ) with power 70 MWe critical condition at enrichment 5,626 % is  $1,00031 \pm 0,00087$ , based on enrichment result, a value of the temperature coefficient reactivity is  $-10,0006$  pcm/K. Based on the results of these studies, it can be concluded that the PBMR 70 MWe design is theoretically safe.

Keyword : Analysis, PBMR, MCNP5, 70 MWe, *smelter*.

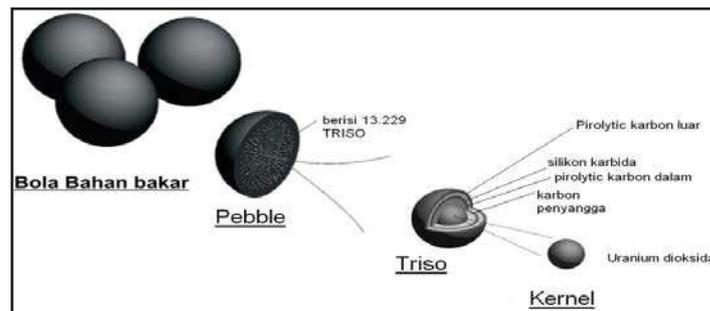
## PENDAHULUAN

Pemerintah menempatkan nuklir sebagai salah satu alternatif terakhir apabila energi lainnya telah dimanfaatkan semaksimal mungkin. Dengan demikian pemerintah memberikan waktu untuk mempelajari dan mempersiapkan kajian mengenai energi nuklir tersebut, agar pembangunan proyek menjadi lebih matang dan terencana sehingga dapat diambil manfaat penting dan dapat mengetahui cara menanggulangi bahaya yang kemungkinan dapat terjadi [1]. Daya pembangkit listrik yang akan didirikan di Indonesia pada proyek 10.000 MWe berkisar antara 7 MWe - 1500 MWe. Sehingga perlu untuk dilakukan *downscale* (kajian pada daya yang lebih rendah) [1,2]. Oleh karena itu, penting sekali, untuk mengetahui karakteristik PLTN terutama jenis PBMR-HTR. Alasan dipilihnya jenis PBMR-HTR adalah karena efisiensi termalnya yang cukup tinggi berkisar antara 41%, selain itu jenis PBMR-HTR ini termasuk kedalam jenis reaktor HTGR dimana menghasilkan suhu tinggi sehingga energi panasnya dapat digunakan untuk keperluan lain seperti pencairan batu bara dan gasifikasi [3].

Dalam makalah ini daya yang diteliti adalah 70 MWe, yang bila dirunut pada gambar proyek, sesuai dengan daya maksimum yang ditempatkan di pulau Sumatera 100 MWe atau pulau Kalimantan 65 MWe. Sehingga berdasarkan latar belakang masalah tersebut maka tujuan penelitian ini adalah mengetahui distribusi suhu pada reaktor jenis PBMR-HTR 70 MWe, mendapatkan besarnya persentase pengkayaan uranium yang dibutuhkan untuk reaktor jenis PBMR-HTR berdaya 70 MWe dan mendapatkan besarnya faktor perlipatan efektif (*k-eff*) terhadap pengkayaan dan menganalisis hubungannya dengan menggunakan paket program MCNP versi 5. Selain itu adalah melakukan analisis besar koefisien reaktivitas temperatur teras reaktor untuk membuktikan bahwa jenis reaktor ini aman dan layak dalam mengantisipasi lonjakan daya yang tidak diinginkan karena terjadi gangguan dari luar misalkan oleh perubahan laju alir pendingin maupun gangguan beban daya [3,4].

## METODE PERHITUNGAN

Pada awalnya reaktor berpendingin gas diproduksi oleh Amerika Serikat untuk produksi plutonium yang mengarah pada produksi senjata. Akan tetapi setelah perang dunia kedua selesai, penggunaan nuklir untuk hal-hal yang positif mulai dikembangkan, negara-negara maju berlomba-lomba untuk menciptakan inovasi baru dalam penelitian tentang reaktor. Salah satunya jenis reaktor PBMR. PBMR adalah singkatan dari *Pebble Bed Modular Reactor*, reaktor ini merupakan anak dari jenis reaktor HTGR yang menggunakan gas helium sebagai pendingin dan grafit sebagai moderator. Bahan bakar dari jenis reaktor ini berbentuk bola yang dilapisi oleh karbon penyangga 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*). Pelapisan ini dinamakan TRISO atau *TRistructural ISotropic*, tujuannya untuk melindungi uranium dari kebocoran produk fisi dalam bentuk gas maupun metalik dan menjaga kesatuan struktur selama kondisi normal maupun kecelakaan. Berikut ini adalah gambar 1 bahan bakar reaktor PBMR dan spesifikasinya [5,6,7,8,9].



Gambar 1. Bahan bakar PBMR [9]

Didalam satu *pebble* terdapat sejumlah 13.229 TRISO yang tersebar merata. Triso-triso ini diasumsikan tersusun secara BCC (*Body center cubic*) dalam *pebble*. Kemudian *pebble-pebble* tersebut disusun sedemikian hingga dalam teras reaktor, yang pembagian penyusunan bahan bakar ini berdasarkan 5 kanal dan 57 lapisan [9].

Metode *Monte Carlo* memiliki kemampuan untuk melakukan simulasi dalam berbagai mode yaitu neutron saja, foton saja, neutron-foton, neutron-elektron atau neutron-foton-elektron yang disimulasikan ke dalam *code-code* hingga metode ini dinamakan dengan *Monte Carlo N Particle* (MCNP). Pada awalnya, MCNP dibangun dan dikembangkan oleh *Eolus Team* di Los Alamos National Laboratory, Amerika, untuk mendukung suatu proyek yang bergerak di bidang komputasi. Perhitungan menggunakan bilangan random dalam MCNP sangat sesuai dengan sifat neutron yang ada di dalam reaktor. Kajian tentang kritikalitas neutron yang ada di dalam reaktor pada metode ini juga hampir mendekati sebenarnya, karena neutron dikelompokkan kedalam siklus-siklus neutron yang disimulasikan dari saat awal neutron dihasilkan sampai akhir neutron. Program transport Monte Carlo menggunakan 3 buah nilai  $k_{eff}$  yang berbeda yang disebut sebagai estimator, terdapat estimator tumbukan ( $k_{eff}^C$ ), serapan ( $k_{eff}^A$ ), dan panjang jejak ( $k_{eff}^{TL}$ ). Setelah ketiga estimator ini diperoleh nantinya akan dirangkum menjadi satu pada akhir siklus yang dinamakan *final k<sub>eff</sub>*. Berdasarkan persamaan ketiga estimator diatas maka besarnya estimator-estimator ini sangat bergantung pada tampang lintang mikroskopis. Dalam MCNP, tampang lintang mikroskopik digolongkan menurut suhunya sehingga memainkan peranan yang sangat besar [9,10,11,12].

Dalam melakukan simulasi program MCNP5 terlebih dahulu membuat listing program yang sesuai dengan bentuk atau sesuatu yang akan dihitung. Listing program ini memiliki lingkup data masukan antara lain :

1. *Title card* (merupakan input deskripsi awal dari persoalan yang akan diujikan).
2. *Cell card* (merupakan input yang menjabarkan pembentukan sel dari materi, jumlah sel yang digunakan, jenis bahan sel yang digunakan dalam percobaan).
3. *Surface card* (merupakan input dari permukaan teras).
4. *Data card* (merupakan input dari data material sehingga bisa menjalankan perhitungan).

Sebelum dilakukan perhitungan suhu terlebih dulu dihitung kerapatan atom masing-masing material penyusun perangkat bahan bakar. Setelah mendapatkan input *N homogenisasi* ( $U_{235}$ ,  $U_{238}$ ,  $SiC$ , *pebble*) maka kemudian dilakukan perhitungan suhu pada setiap layernya.

Setelah mengetahui data suhu pendingin, suhu luar bahan bakar dan suhu pusat bahan bakar dari setiap layer maka selanjutnya dilakukan pendekatan suhu pada MCNP5 seperti pada Tabel 1.

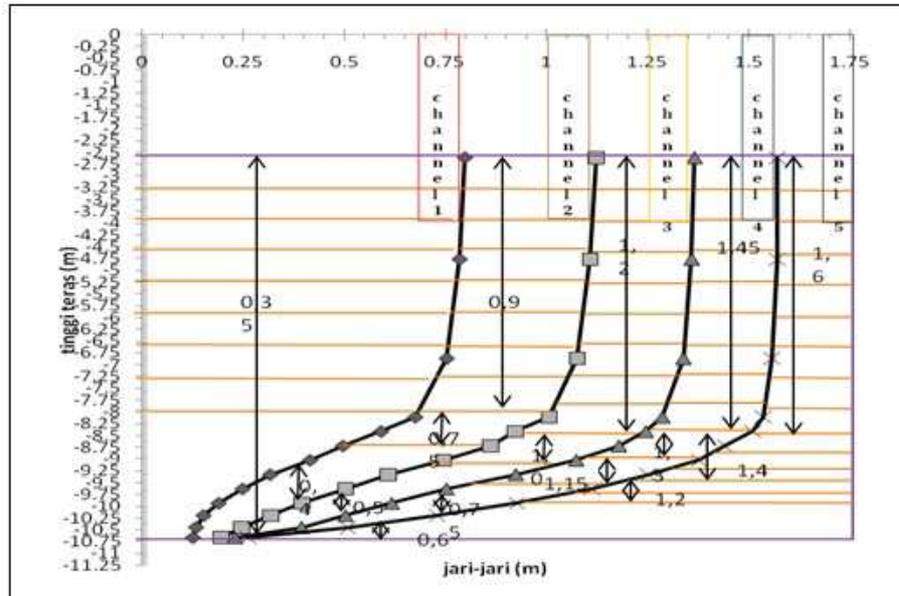
Tabel 1. Pustaka tampang lintang

Suhu (K)	Suhu yang ada di pustaka MCNP (K)	Ekstensi
750-850	800	0.15
800-880,8	880,80	0.54
880,8-900	900	0.16
>900	1200	0.17

Kemudian dimasukkan ke dalam input MCNP5 geometri sel, material data, dan simulasi jumlah neutron. Setelah 205 siklus neutron, keluaran dari program MCNP5 dapat terlihat pada final  $k_{eff}$  lengkap dengan nilai standar deviasi.

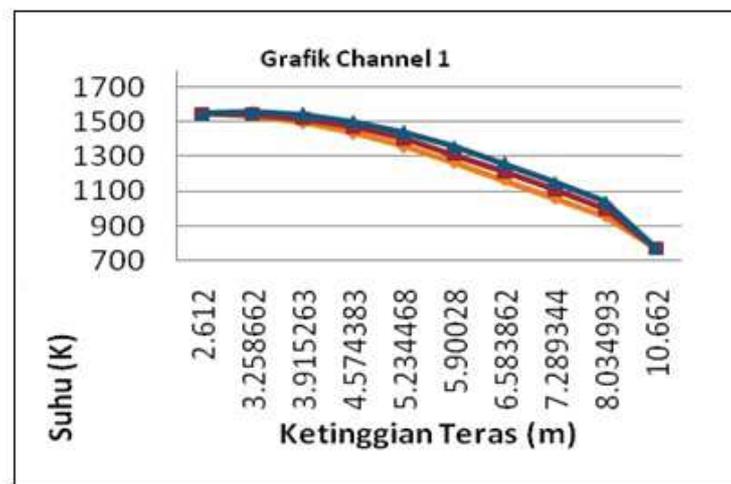
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Jari-jari dan ketinggian teras pada Gambar 2 berperan penting dalam menentukan distribusi suhu bahan bakar ( $T_C$ ) baik itu ke arah aksial maupun radial pada teras reaktor, karena terdapat variabel penambah panas volumetrik yang terdistribusi sesuai dengan fungsi besel untuk koordinat tabung [13,14].

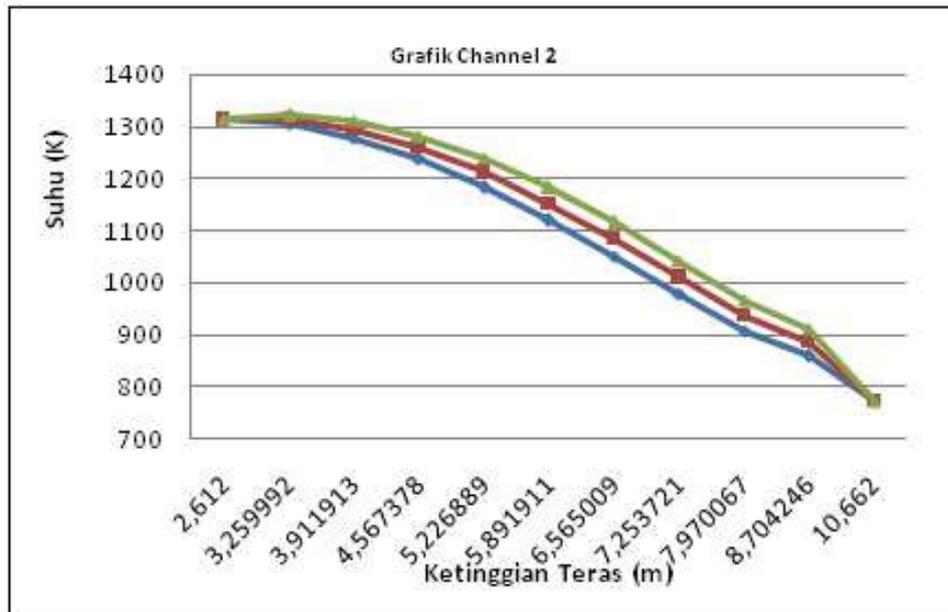


Gambar 2. Pembagian teras reaktor

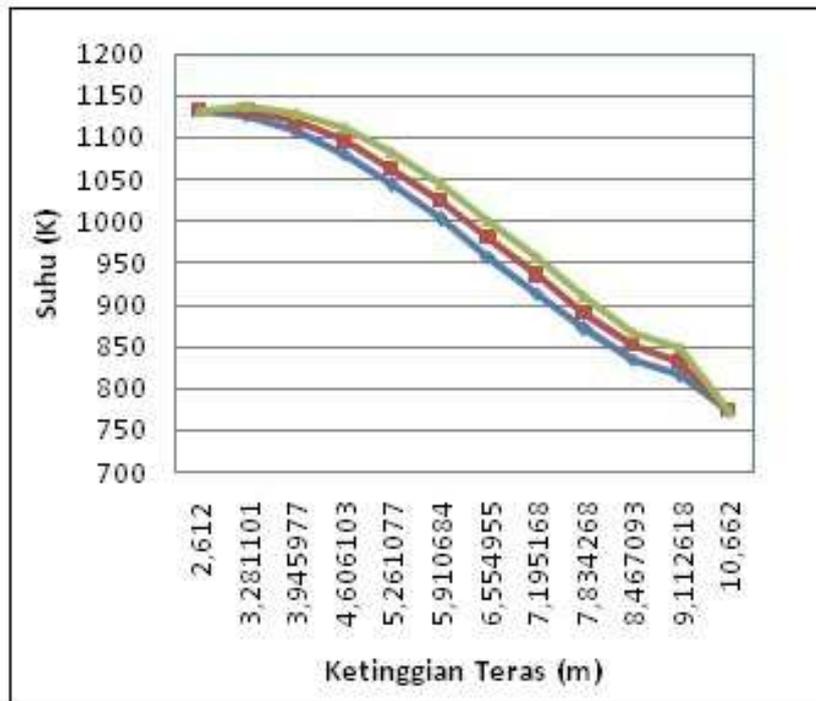
Jari-jari berperan dalam distribusi suhu arah radial mengikuti fungsi besel orde nol, semakin besar jari-jarinya semakin kecil panas yang dihasilkan sehingga terlihat pada grafik masing-masing *channel* suhu paling tinggi terletak di wilayah *channel* 1. Ketinggian ( $z$ ) berperan dalam distribusi suhu arah aksial mengikuti pola kosinus, semakin keatas semakin tinggi suhunya. Hasil perhitungan dari distribusi suhu  $T_c$ ,  $T_{c0}$ , dan  $T_f$  untuk masing-masing *channel* berturut-turut dapat dilihat pada Gambar 3, 4, 5, 6 dan 7.



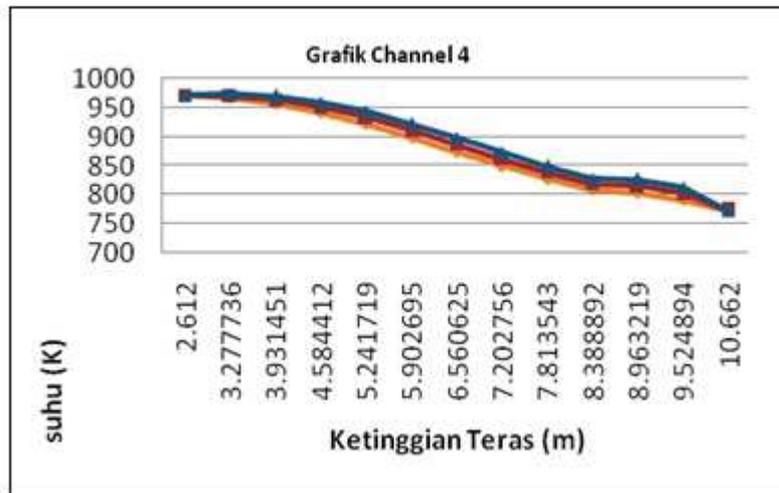
Gambar 3. Grafik distribusi temperatur pada *channel* 1



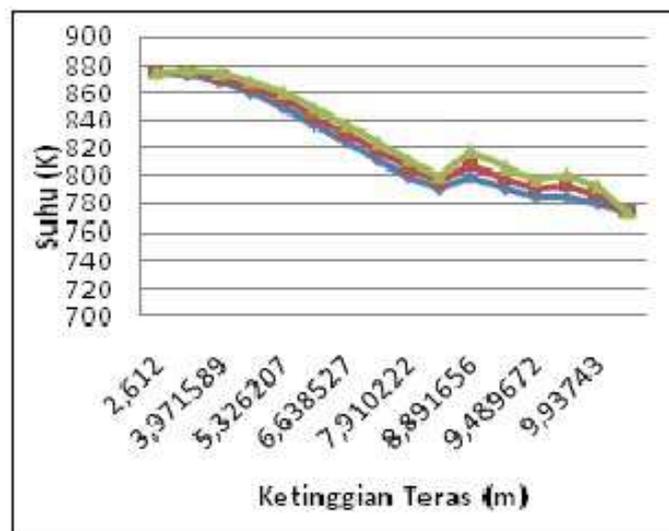
Gambar 4. Grafik distribusi temperatur pada channel 2



Gambar 5. Grafik distribusi temperatur pada channel 3



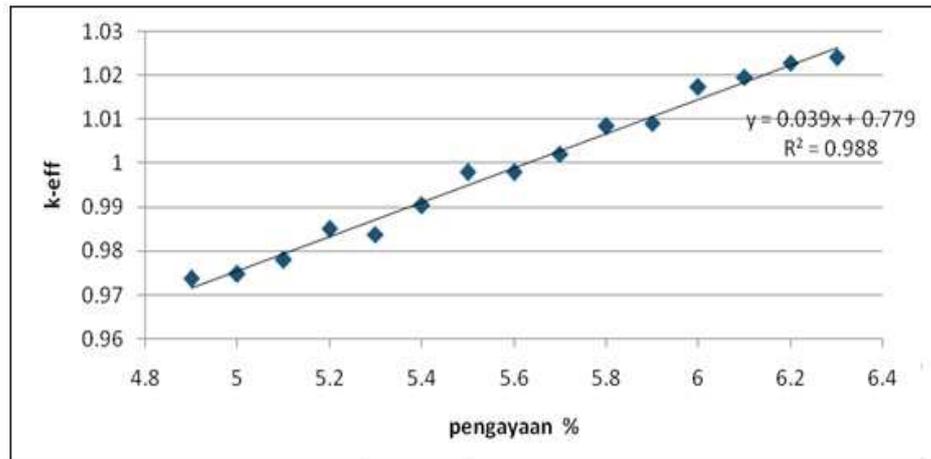
Gambar 6. Grafik distribusi temperatur pada *channel 4*



Gambar 7. Grafik distribusi temperatur pada *channel 5*

Berdasarkan Gambar 3, 4, 5, 6 dan 7 terlihat terjadi lonjakan suhu pada setiap *channel*, yang mana mulai terjadi pergolakan pada ketinggian 8 meter, hal ini terjadi karena jari-jari yang mulai menyempit pada ketinggian tersebut sehingga mempengaruhi nilai ( $q''$ ). Disamping itu, perhitungan untuk bilangan Reynolds ternyata juga menunjukkan nilai 10890,05. Angka ini berarti helium dalam reaktor mengalami pergerakan turbulen yang secara kasarnya, helium masuk dari atas reaktor kemudian turun ke bawah dengan membawa panas yang mengakibatkan distribusinya bergejolak.

Adapun hubungan faktor pelipatan efektif terhadap pengkayaan bahan bakar teras adalah seperti pada gambar 8 yang mana merupakan grafik hubungan linier yang dapat dituliskan dengan persamaan linier gradien  $Y = 0,039x + 0,779$ . Apabila menggunakan regresi linier didapatkan hasil kondisi kritis reaktor pada pengayaan 5,62624% dan hasil sebesar  $1,00031 \pm 0,00087$ . Kondisi kritis reaktor ditandai dengan nilai  $k_{eff}$  sebesar 1 yang menunjukkan bahwa jumlah neutron selalu tetap dari satu generasi ke generasi berikutnya[15,16].



Gambar 8. Grafik hubungan  $k_{eff}$  dengan variasi pengayaan bahan bakar

Penentuan nilai  $\alpha T$  dilakukan seperti hasil perhitungan pada tabel 2 untuk mengetahui tingkat keamanan reaktor akibat dari perubahan suhu teras reaktor pada saat reaktor tersebut beroperasi. Penentuan koefisien reaktivitas suhu dilakukan dengan melakukan penghitungan nilai  $k_{eff}$  pada dua suhu yang kondisinya dihitung dengan metode yang sama. Reaktor diasumsikan sedang berada pada keadaan *beginning of life* (BOL), dimana fase ini adalah fase saat reaktor mulai dioperasikan. Dalam Penelitian ini, menghitung  $\alpha T$  diberlakukan dua suhu sebagai perbandingan. yaitu pertama, pada saat suhu masih stabil yang berada pada suhu 293,6 K (selanjutnya disebut dengan  $T_1$ ) kemudian dibandingkan dengan saat reaktor beroperasi (selanjutnya di sebut dengan  $T_2$  ). Pada saat reaktor beroperasi suhu menjadi bertambah sesuai perhitungan distribusi suhu aksial dimana untuk mendapatkan kedua suhu tersebut akan dibandingkan.

Tabel 2. Hasil perhitungan koefisien reaktivitas teras

Channel	TC rata-rata (T2)	(T1)	$\Delta T$	$\Delta \rho$	koef
			(T2-T1)	(1/keff1 - 1/keff2)	
1	1200,00	293,60	906,40	-0,076175569	-8,40419E-05
2	1168,08	293,60	874,48	-0,076175569	-8,71096E-05
3	1114,69	293,60	821,09	-0,076175569	-9,27736E-05
4	1035,26	293,60	741,67	-0,076175569	-1,02709E-04
5	864,64	293,60	571,04	-0,076175569	-1,33398E-04
Rata-rata					-1,00006E-04
pcm/K					-10,0006

Penentuan nilai  $\alpha T$  dilakukan untuk mengetahui tingkat keamanan reaktor akibat dari perubahan suhu teras reaktor pada saat reaktor tersebut beroperasi. Penentuan koefisien reaktivitas suhu dilakukan dengan melakukan penghitungan nilai  $k_{eff}$  pada dua suhu yang kondisinya dihitung dengan metode yang sama. Reaktor diasumsikan sedang berada pada keadaan *beginning of life* (BOL), dimana fase ini adalah fase saat reaktor mulai dioperasikan. Dalam Penelitian ini, menghitung  $\alpha T$  diberlakukan dua suhu sebagai perbandingan. yaitu pertama, pada saat suhu masih stabil yang berada pada suhu 293,6 K (selanjutnya disebut dengan  $T_1$ ) kemudian dibandingkan dengan saat reaktor beroperasi (selanjutnya di sebut dengan  $T_2$  ). Pada saat reaktor beroperasi suhu menjadi bertambah sesuai perhitungan distribusi suhu aksial dimana untuk mendapatkan kedua suhu tersebut akan dibandingkan.

Reaktor yang mempunyai koefisien negatif demikian termasuk dalam nilai negatif yang  $\alpha_T^F < 0$  dan besar. Maka yang akan terjadi dalam reaktor 70 MWe, ketika suhu naik, daya reaktor akan naik tiba-tiba dan pada saat tertentu, suhu tersebut akan mempengaruhi nilai  $k_{eff}$  dan kemudian daya akan turun kembali. Pada kasus ini, kenaikan suhu bahan bakar akan menyebabkan meningkatnya serapan oleh  $U_{238}$  sehingga membuat neutron sulit untuk lolos dari serapan resonansi dan menyebabkan harga probabilitas lolos resonansi akan rendah. Harga probabilitas lolos resonansi ( $p$ ) adalah salah satu parameter yang berkaitan dengan  $k_{eff}$ . Jika probabilitas lolos resonansi kecil, maka yang terjadi adalah neutron akan lebih banyak terserap oleh  $U_{238}$  daripada melakukan reaksi fisi, sehingga nilai  $k_{eff}$  juga ikut kecil. Begitu pula sebaliknya, jika peluang neutron untuk lolos dari serapan  $U_{238}$  besar, maka akan terdapat banyak neutron yang memiliki kesempatan untuk melakukan reaksi fisi, akibatnya akan bertambah besar nilai  $k_{eff}$ . Selama suhu di dalam bahan bakar dan moderator meningkat (dalam hal ini moderator grafit) kerapatan dalam bahan grafit berkurang. Berkurangnya kerapatan ini menyebabkan neutron lebih banyak yang masuk ke dalam bahan bakar dan diserap oleh  $U_{238}$  daripada  $U_{235}$ . (DOE-HDBK, 1993, hal:3), sehingga kenaikan suhu menyebabkan neutron tidak dapat melakukan reaksi fisi kemudian daya turun kembali dalam waktu singkat.

## KESIMPULAN

Dari hasil analisis desain bahan bakar teras reaktor jenis PBMR daya 70 MWe bahwa untuk setiap *channel* dan semakin mendekati pusat teras reaktor semakin tinggi suhunya. Tingkat pengkayaan bahan bakar teras pada kondisi kritis BOL (*Beginning of Life*) 5,63 % dengan nilai faktor perlipatan efektif neutron sebesar  $1,00031 \pm 0,00087$  dimana hubungan antara faktor perlipatan efektif dengan tingkat pengkayaan bahan bakar mengikuti fungsi linier yang ditunjukkan dengan fungsi  $Y = 0,039x + 0,779$ . Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi pengkayaan bahan bakar maka semakin besar nilai faktor perlipatan efektif. Untuk nilai koefisien reaktivitas temperatur teras bahan bakar rata-rata menunjukkan nilai sebesar  $-10,0006 \times 10^{-5} \Delta k/k \cdot K^{-1}$  atau  $-10,0006$  pcm/K, dengan demikian reaktor jenis PBMR untuk daya 70 MWe memiliki koefisien reaktivitas teras negatif sehingga jika terjadi kenaikan suhu teras yang diakibatkan oleh parameter keselamatan maka secara otomatis reaktivitas teras akan turun dan diikuti daya reaktor akan turun dan otomatis suhu teras reaktor turun sehingga reaktor dalam keadaan aman.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Penelitian ini dapat terselesaikan berkat bantuan berbagai pihak terutama Prof. Ir. Yohannes Sardjono, APU dan Supardi, M.Si atas arahan dan diskusinya dan juga staf PTRKN yang selalu memberikan pencerahan dalam bentuk kuliah umum dan *workshop* khususnya Ir. Tagor Malem Sembiring.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Prof. Yohannes Sardjono dan Dr. Yoga Pratomo. Program Percepatan Pembangunan Pembangkit Tenaga Listrik yang Menggunakan Batubara. Presentasi Tim Koordinasi Percepatan Pembangunan Pembangkit Tenaga Listrik. Yogyakarta; 2007.
2. Ministry of Energy and Mineral Resources, Indonesia. Outlook on electricity and renewable energy development in Indonesia. Queensland Business Showcase; 2010.
3. Ayi wirawan. Desain Teras PLTN tipe PBMR 150 MWth menggunakan program MCNP5. Skripsi S-1 Teknik Nuklir Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta, TF-FT. UGM ; 2010.

4. Batan. Dasar-dasar fisika reaktor pelatihan dan peyegaran operator dan supervisor reaktor riset. Yogyakarta : BATAN; 2010.
5. Dhandang Purwadi M. Buku Pintar nuklir. Available from: <http://www.scribd.com/doc/45718680/bahan-buk-pintar-teknologi-nuklir-M-dhandang-p.pdf>. Accessed 8 March 2011.
6. DOE. USA *Neutron Life Cycle*. Available from: <http://www.free-ed.net/sweethaven/MiscTech/Nuclear/Lesson0301.pdf>, (1993). Accessed 3 March 2011.
7. Fuzaetun. Penentuan distribusi daya reaktor PLTN dengan bahan bakar yang dimuati thorium. Skripsi. Surabaya. FMIPA Fisika UNNES; 2007.
8. Lamarsh. Introduction to Nuclear Engineering. New York : Addison-Wesley Publishing Company; 1982.
9. Lebenhaft. JRM CNP4B Modeling of Pebble-Bed Reactor Thesis. Amerika : Massachusetts Institute of Technology; 2001.
10. Maman Mulyaman, dkk. Pemodelan partikel bahan bakar berlapis dalam kisi BCC, FC, dan SC untuk perhitungan factor perlipatan infinit menggunakan MCNP5. Prosiding Seminar Nasional ke-16 Teknologi dan Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir; 2010.
11. Alexander Agung. Diktat Analisis Reaktor Nuklir. Yogyakarta: Fakultas Teknik, Universitas Gajah Mada; 2007.
12. Liem Peng Hong. Fuel burn-up characteristics of small high temperature reactor. Serpong: BATAN; 2010.
13. N. Soppera, E. Dupont, and M. Bossant. Java-based Nuclear Information Software: Book of Neutron-induced Cross-sections. A technical document, Nuclear Energy Agency, Issy-les-Moulineaux; 2012.
14. Julian Robert Lebenhaft. MCNP4B modeling of pebble-bed reactor. Tesis. Massachusetts Institute of Technology, Amerika; 2001.
15. Andrew C. Kadak. MIT pebble bed reactor project. Nuclear Engineering and Technology. 2007; 39: 95-102.
16. Sue Ion, David Nicholls, Regis Matzie dan Dieter Matzner. Pebble bed modular reactor the first generation IV reactor to be constructed. World Nuclear Association Annual Symposium, London; 2003.