

Analisis Distribusi Suhu Aksial Teras Dan Penentuan k_{eff} PLTN Pebble Bed Modular Reactor (PMBR) 10 MWE Menggunakan Metode MCNP 5

Agung Setiyo dan Mohamad Munir
Laboratorium Fisika Medik FMIPA UNDIP

Abstract

The axial temperature distribution and effective multiplication factor (K_{eff}) for PBMR 10 MWe which used uranium dioxide (UO_2) as fuel, graphite as moderator, and helium (He) gas as cooler with heterogenous reactor design which used geometry of reactor core finite cylinder has been investigated. The axial temperature distribution of reactor core analyzed by splitting core reactor become 57 layers axially and every layer has height 14,9 cm. K_{eff} of reactor calculated by MCNP 5 with fuel enrichment variation from 7 to 10% and variation range 0,5%. The result shows that reactor in critical condition with fuel enrichment 8,6% and average temperature of reactor core is 893,635 K.

Keywords: PBMR, MCNP, Temperature distribution, K_{eff}

Abstrak

Telah dianalisis distribusi suhu aksial teras dan faktor penggandaan efektif (k_{eff}) untuk reaktor tipe PBMR yang memiliki daya 10 MWe, menggunakan bahan bakar uranium dioksida (UO_2), moderator grafit dan berpendingin gas helium (He), serta menggunakan desain reaktor heterogen dengan geometri teras reaktor silinder berhingga. Analisis distribusi suhu aksial teras reaktor dilakukan dengan membagi teras reaktor menjadi 57 layer secara aksial, dan setiap layer memiliki ketinggian 14,9 cm. Penghitungan k_{eff} reaktor dilakukan menggunakan metode MCNP 5 dengan variasi pengayaan bahan bakar 7 sampai 10% dan range variasi 0,5%. Didapatkan hasil bahwa reaktor berada pada kondisi kritis dengan pengayaan bahan bakar sebesar 8,6%, dan suhu rata-rata teras reaktor adalah sebesar 893,635 K.

Kata-Kata Kunci: PBMR, MCNP, distribusi temperatur, k_{eff}

PENDAHULUAN

Energi listrik bagi umat manusia merupakan kebutuhan utama, karena hampir dalam menjalankan semua aspek kegiatan hidupnya manusia membutuhkan energi listrik [1]. Penggunaan bahan bakar fosil untuk pembangkit listrik akan meningkatkan emisi dari partikel SO_x , NO_x , dan CO_x , sehingga dapat berdampak negatif terhadap manusia dan lingkungan hidup [2].

Salah satu dari sumber energi alternatif tersebut adalah energi nuklir. Energi nuklir dibangkitkan oleh reaksi pembelahan/fisi yang terjadi di dalam teras reaktor suatu Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN). Pada dasarnya, PLTN sama seperti PLK, yaitu merubah energi panas menjadi energi listrik. Perbedaannya terdapat pada penghasil panas yang digunakan. Energi nuklir telah terbukti secara signifikan mereduksi kandungan CO_2 karena energi nuklir tidak mengemisikan CO_2 maupun gas pencemar lainnya seperti NO_x dan SO_x .

Salah satu jenis PLTN yang sedang dikembangkan saat ini adalah reaktor *Pebble Bed Modular Reactor* (PBMR). Reaktor ini termasuk ke dalam jenis *High Temperature Gas-cooled Reactor* (HTGR) dan menggunakan bahan bakar Uranium Dioksida (UO_2) yang berbentuk bola dengan lapisan TRISO (*tri structural isotropic*). PLTN PBMR adalah reaktor berdaya menengah, sehingga sangat cocok untuk daerah-daerah terpencil yang membutuhkan listrik dalam daya kecil.

Metode *Monte Carlo N- Particle* (MCNP) adalah salah satu metode yang dapat digunakan untuk menyimulasikan proses di dalam teras reaktor. Metode *Monte Carlo* melakukan simulasi secara acak (random) dengan pengulangan yang banyak sehingga dapat menggambarkan proses secara realistis. Keunggulan dari metode ini adalah dapat digunakan untuk simulasi pada geometri yang rumit.

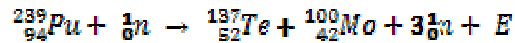
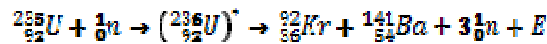
DASAR TEORI

Reaksi Fisi Nuklir

Reaksi fisi nuklir adalah reaksi pembelahan inti atom akibat tumbukan inti atom lainnya, dan menghasilkan energi dan atom baru yang bermassa lebih kecil, serta radiasi elektromagnetik. Fisi nuklir terjadi pada pembelahan inti atom berat akibat ditumbuk oleh neutron, pembelahan ini menghasilkan energi, inti atom yang lebih ringan, neutron tambahan dan photon dalam bentuk sinar gamma. Reaksi fisi dapat dituliskan sebagai [3].

Reaksi Pembelahan Uranium

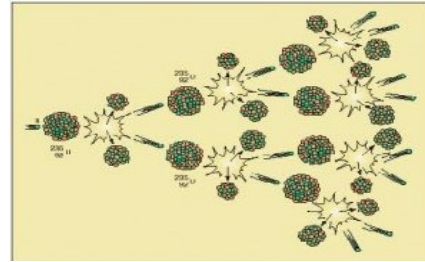
Inti atom isotop uranium-235 ditembak dengan neutron sehingga terjadi reaksi fisi. Hasil belah fisi menjadi dua grup, yaitu inti ringan dengan nomor massa 80-100 dan inti berat dengan nomor massa 125-155. Dalam reaksi fisi neutron ditangkap oleh inti atom dan menghasilkan suatu inti atom yang bersifat sangat labil. Kemudian, inti tersebut akan membelah menjadi dua belahan inti untuk suatu atom yang membelah [4]. reaksi pembelahan uranium yang sering terjadi adalah sebagai berikut :



Reaksi fisi terjadi antara partikel neutronik dengan inti sehingga inti tersebut membelah diri menjadi fragmen inti-inti atom disertai pembebasan energi yang sangat besar. Energi pembelahan dari satu inti atom U^{235} adalah sekitar 200 MeV.

Reaksi Fisi Berantai

Reaksi nuklir yang pertama kali ditemukan oleh Hann dan Strassmann hanya terjadi apabila dilakukan penembakan U^{235} dengan neutron termik. Karena reaksi ini berlangsung terus-menerus sampai semua atom U^{235} melakukan pembelahan, maka reaksi semacam ini disebut reaksi nuklir berantai [5]. Proses reaksi fisi berantai pada U^{235} terjadi seperti gambar 1,



Gambar 1. Reaksi Fisi Berantai (Cullen, 1986)

Neutron

Neutron adalah partikel tidak bermuatan, oleh karena itu, interaksinya dengan materi sangat berbeda dengan interaksi partikel bermuatan. Neutron bebas dari pengaruh medan listrik Coulomb. Akibatnya neutron bebas mendekati bahkan masuk ke inti atom atau pun menembusnya.

Berdasarkan energinya, neutron diklasifikasikan ke dalam 3 golongan, yaitu neutron termik, epitermik, dan neutron cepat.

Faktor Pelipatan Neutron

Faktor pengali k merupakan perbandingan antara neutron yang diproduksi oleh pembelahan pada satu generasi dengan jumlah neutron yang hilang melalui penyerapan pada generasi sebelumnya. Kondisi kritis reaktor dicapai saat nilai k_{eff} sama dengan satu.

Faktor pelipatan tak hingga (k_{∞}) merupakan perbandingan antara neutron yang diproduksi oleh pembelahan di dalam satu generasi dengan jumlah neutron yang hilang melalui penyerapan generasi sebelumnya.

Faktor pelipatan yang memperhitungkan kebocoran adalah faktor pelipatan efektif (k_{eff}) yang didefinisikan sebagai perbandingan jumlah neutron yang dihasilkan oleh fisi pada satu generasi dengan jumlah neutron yang hilang melalui penyerapan dan kebocoran pada generasi berikutnya. Dituliskan dengan persamaan,

$$k_{eff} = \frac{\epsilon p f \eta}{1 + \epsilon^2 \left\{ \left(\frac{2.405}{R} \right)^2 + \left(\frac{\pi}{H} \right)^2 \right\}} \epsilon^{-1} \left\{ \left(\frac{2.405}{R} \right)^2 + \left(\frac{\pi}{H} \right)^2 \right\} \tau \tag{1}$$

dengan ϵ : faktor fisi cepat

p : probabilitas tangkapan resonansi

f : faktor pemanfaatan termal

η : faktor reproduksi

B : kelengkungan teras reaktor (cm)

L : panjang difusi (cm)

τ : umur Fermi (cm²)

Koefisien Reaktifitas dan Aspek Keselamatan Neutronik

Koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar adalah perubahan nilai k_{eff} teras akibat adanya perubahan temperatur bahan bakar. Dituliskan sebagai,

$$\alpha_T = \frac{\Delta\rho}{\Delta T} \approx \frac{-\frac{1}{k_{eff}^{pert}} + \frac{1}{k_{eff}^{nom}}}{T^{pert} - T^{nom}} \quad (2)$$

dengan :

ρ : reaktifitas

α : koefisien reaktivitas

k_{eff}^{pert} : faktor perlipatan efektif pada kondisi perubahan temperatur

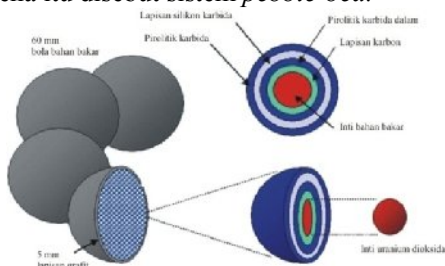
k_{eff}^{nom} : faktor perlipatan efektif pada kondisi temperatur normal

T^{pert} : temperatur yang berubah

T^{nom} : temperatur normal

Pebble Bed Modular Reactor (PBMR)

PBMR merupakan reaktor nuklir temperatur tinggi (HTR) jenis baru dengan pendingin gas helium. Bahan bakar dalam bola grafit akan bersirkulasi melalui inti reaktor karena itu disebut sistem *pebble-bed*.



Gambar 2. Bentuk bahan bakar PBMR

Bentuk TRISO (*tri structural isotropic*) seperti terdapat pada Gambar 2.6 mempunyai susunan sebagai berikut :

1. Lapisan karbon (C) densitas rendah
2. Lapisan karbon pirolitik dalam densitas tinggi (*Inner Pyrolytic Carbida*, IPyC)
3. Lapisan silikon karbida (SiC)
4. Lapisan karbon pirolitik densitas tinggi (*Outer Pyrolytic Carbida*, OPyC)

Kunci sistem keamanan reaktor PBMR terdapat pada bentuk bahan bakar yang berupa *pebble*, kemampuan partikel bahan bakar menyimpan radionuklida, kelebihan reaktifitas operasional yang kecil, mempunyai koefisien temperatur negatif, dan bentuk reaktor mempunyai kemampuan membuang kelebihan panas secara pasif.

Monte Carlo N-Particle (MCNP)

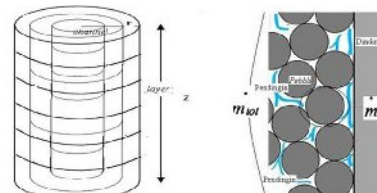
Monte Carlo merupakan metode yang digunakan untuk menyimulasikan suatu proses random. Metode *Monte Carlo* dapat digunakan untuk menduplikasi proses statistik (seperti interaksi partikel dengan bahan nuklir) secara teoritis dan berbagai masalah kompleks yang tidak dapat dikerjakan dengan metode *deterministik* [7].

MCNP tidak secara langsung menghitung nilai faktor pelipatan k_{eff} , melainkan pada setiap akhir satu generasi akan dihasilkan 3 nilai k_{eff} yang berbeda yang disebut estimator. Ketiga estimator tersebut yaitu [7]:

1. Estimator tumbukan (k_{eff}^C) yang dihitung setiap kali terjadi peristiwa tumbukan partikel yang memungkinkan terjadinya peristiwa fisi selama satu generasi neutron.
2. Estimator serapan (k_{eff}^A) yang dihitung setiap terjadi interaksi antara neutron dengan bahan dapat belah selama satu generasi neutron.
3. Estimator panjang jejak (k_{eff}^{TL}) yang dihitung setiap kali neutron berpindah tempat di dalam bahan dapat belah pada suatu jarak tertentu dari posisi semula.

Termohidrolika Reaktor

Pada reaktor *High Temperature Reactor* (HTR) menggunakan pendingin reaktor berupa gas helium. Pendingin berada diantara kelongsong bahan bakar dan mengambil panas dari hasil reaksi fisi bahan bakar.



Gambar 3. Laju pendingin di dalam teras (Lebenhaft, 2001)

Neraca energi pada saluran pendingin dapat dinyatakan dengan persamaan [8],

$$\dot{m}C_p \frac{dT}{dz} = q' \quad (3)$$

dengan :

\dot{m} : Laju aliran massa pendingin (Kg/s)

C_p : Kapasitas panas pendingin (J/Kg.K)

T : Suhu pendingin (K)

z : layer (m)

q' : Neraca energi (J/s)

Laju aliran pendingin pada saluran pendingin dapat dihitung berdasarkan rasio terhadap laju alir total sebagai berikut,

$$\dot{m} = \left(\frac{R_0}{R_{core}} \right)^2 \dot{m}_{tot} \quad (4)$$

dengan :

R_0 : jari-jari pebble (m)

R_{core} : jari-jari teras reaktor (m)

Sedangkan distribusi suhu pendingin teras secara aksial dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut,

$$T_f(z) = T_{in} + A \left[\sin\left(\frac{\pi z}{He}\right) + \sin\left(\frac{\pi H}{2He}\right) \right] \quad (5)$$

$$A = \frac{q_0' He}{\left(\frac{R_0}{R_{core}} \right)^2 \dot{m}_{tot} C_p \pi}$$

dengan,

T_f : Suhu fluida pendingin (K)

T_{in} : Suhu pendingin masukan (K)

H : Tinggi teras (m)

He : Tinggi teras tereksplorasi (m)

METODE PENELITIAN

Analisis Distribusi Suhu Aksial Teras Reaktor

Analisis teras reaktor dilakukan dengan cara membagi teras menjadi 57 layer (bagian) secara aksial. Setiap layer diasumsikan berisi material dengan jumlah dan posisi yang sama. Distribusi suhu dihitung tiap 14,9 cm dengan dimulai dari bagian terbawah teras sampai bagian teratas teras.

Setelah didapatkan suhu teras pada masing-masing layer, kemudian dicari suhu rata-rata teras yang akan digunakan pada input MCNP pada penentuan nilai k_{eff} .

Penentuan faktor pelipatan efektif (k_{eff})

Untuk menentukan besarnya k_{eff} pada reaktor PBMR digunakan program MCNP 5. Metode *Monte Carlo* mensimulasikan proses di dalam teras secara berulang-ulang hingga didapatkan nilai k_{eff} . Penentuan nilai k_{eff} neutron dilakukan dengan melakukan variasi terhadap pengkayaan bahan bakar reaktor.

Penentuan koefisien reaktifitas reaktor

Penentuan nilai koefisien reaktifitas reaktor dilakukan dengan melakukan penghitungan nilai k_{eff} pada dua kondisi reaktor, yaitu pada kondisi *fresh cold* (suhu kamar) dan pada *fresh hot* (suhu saat reaktor beroperasi).

PEMBAHASAN

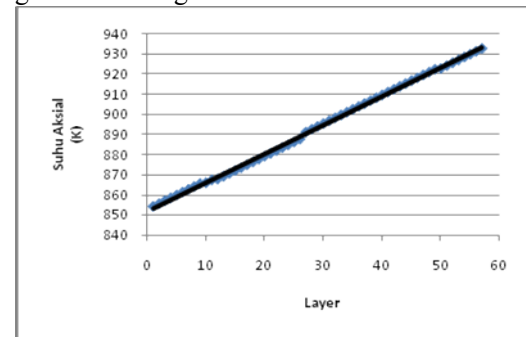
Pemodelan Program MCNP 5

Program ini adalah salah satu metode yang dapat digunakan untuk mensimulasikan perjalanan neutron di dalam teras secara *random* (acak). *Input* program berisi representasi material bahan bakar, moderator dan pendingin yang terdapat di dalam teras, sedangkan *output* program berupa hasil penghitungan k_{eff} neutron.

Program MCNP 5 melakukan simulasi dengan menembakkan sebanyak 5000 neutron awal ke dalam *fuel kernel*. Penghitungan terhadap nilai k_{eff} dilakukan pengulangan sebanyak 200 kali dengan melewati 5 kali putaran. Pengulangan diperlukan agar hasil penghitungan terhadap nilai k_{eff} didapatkan hasil yang lebih tepat.

Penentuan Disitribusi Suhu Aksial Teras Reaktor

Teras reaktor berbentuk silinder berlubang bagian tengah, dengan tinggi 852 cm dan memiliki diameter 350 cm. Analisis distribusi suhu aksial teras dilakukan dengan membagi teras menjadi 57 layer. Penghitungan terhadap distribusi suhu aksial teras digunakan persamaan (5). Grafik hubungan antara layer dengan suhu aksial teras dapat dilihat pada gambar 4 sebagai berikut :



Gambar 4. Hubungan antara layer teras dengan suhu aksial teras

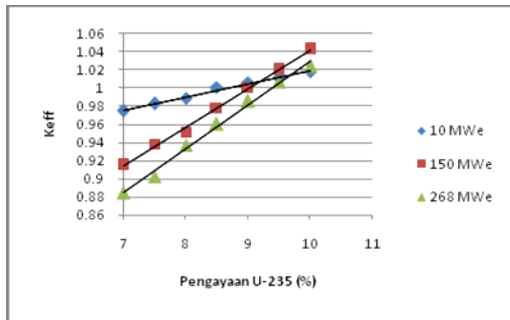
Berdasarkan grafik di atas dapat disimpulkan bahwa semakin ke atas, maka suhu teras akan semakin naik. Grafik di atas menunjukkan bahwa suhu minimum berada pada bagian terbawah, sedangkan suhu maksimum berada pada bagian teratas dari teras reaktor. Hal tersebut disebabkan karena pendingin primer masuk ke dalam teras reaktor melalui bagian bawah teras dan keluar melalui bagian atas teras. Jadi, pendingin yang berada pada bagian bawah teras adalah pendingin yang berasal dari bagian luar teras dan telah mengalami proses transfer panas, sedangkan

pendingin pada bagian atas adalah pendingin yang akan keluar dari teras reaktor.

Penentuan Nilai k_{eff}

Penghitungan nilai k_{eff} reaktor dilakukan dengan menggunakan program MCNP 5, dengan variasi pengayaan U-235 dari 7% sampai tingkat pengayaan 10% dengan range variasi sebesar 0,5%. Perubahan variasi pengayaan terhadap bahan bakar akan berpengaruh terhadap besarnya densitas penyusun bahan bakar. Densitas nuklida penyusun bahan bakar akan dimasukkan ke dalam input MCNP.

Setelah dilakukan penghitungan menggunakan MCNP 5, didapatkan nilai k_{eff} seperti pada gambar 5.



Gambar 5. Hubungan antara Pengayaan U-235 dengan k_{eff}

Gambar 5 di atas merupakan grafik hubungan antara pengayaan bahan bakar dengan nilai k_{eff} yang merupakan perbandingan antara PLTN PBMR 10 MWe, 150 MWe [9], dan 268 MWe [10]. Berdasarkan grafik di atas, dapat dilihat bahwa semakin kecil daya keluaran suatu PLTN PBMR, maka untuk mencapai kondisi kritis memerlukan pengayaan bahan bakar yang semakin kecil pula. Kondisi kritis reaktor ditandai dengan nilai k_{eff} sebesar 1 yang menunjukkan bahwa jumlah neutron selalu tetap dari satu generasi ke generasi berikutnya.

Berdasarkan Gambar 5 di atas, reaktor dengan daya 10 MWe kondisi kritis terjadi pada pengayaan bahan bakar sebesar 8,6%, sedangkan pada reaktor yang berdaya 150 dan 268 MWe kondisi kritis terjadi pada pengayaan bahan bakar 9,01% dan 9,4%. Hal tersebut disebabkan karena semakin besar daya listrik yang dikeluarkan, maka semakin besar pula energi panas yang dibutuhkan. Agar energi panas yang dihasilkan semakin besar, maka

dibutuhkan lebih banyak reaksi fisi yang terjadi di dalam teras reaktor.

Penentuan Koefisien Reaktifitas Reaktor

Penentuan nilai koefisien reaktifitas reaktor dilakukan untuk mengetahui tingkat keamanan reaktor akibat dari perubahan suhu teras reaktor pada saat reaktor tersebut beroperasi. Penentuan koefisien reaktifitas dilakukan dengan melakukan penghitungan nilai k_{eff} pada dua suhu. Reaktor diasumsikan berada pada kondisi *fresh cold* (300 K) dan *fresh hot* (saat beroperasi).

Tabel 1. Nilai k_{eff} pada *fresh cold* dan *fresh hot*

NO	Variasi Pengayaan U ₂₃₅ (%)	k_{eff}	
		<i>Fresh cold</i>	<i>Fresh hot</i>
1	7,0	1.08341	0.97574
2	7,5	1.09067	0.98343
3	8,0	1.09813	0.98912
4	8,5	1.10808	1.00114
5	9,0	1.11235	1.00617
6	9,5	1.12098	1.01127
7	10,0	1.12224	1.01836

Nilai koefisien reaktifitas dihitung menggunakan persamaan (2), sehingga akan didapatkan nilai koefisien reaktifitas teras pada masing-masing pengayaan seperti pada tabel 2 sebagai berikut :

Tabel 2. Nilai koefisien reaktifitas reaktor

No	Variasi Pengayaan U ₂₃₅ (%)	Koefisien Reaktifitas ($\times 10^{-4}$) /K
1	7,0	-2,03703
2	7,5	-1,99963
3	8,0	-2,00721
4	8,5	-1,92799
5	9,0	-1,88575
6	9,5	-1,93558
7	10,0	-1,81792

Berdasarkan hasil penghitungan koefisien reaktifitas reaktor pada tabel 2 di atas, dapat dilihat bahwa nilainya selalu negatif pada setiap variasi pengayaan bahan bakar. Hal tersebut dapat diartikan bahwa apabila terjadi peningkatan suhu teras reaktor, maka nilai k_{eff} akan turun. Apabila nilai k_{eff} turun, maka jumlah neutron yang dihasilkan dari reaksi fisi berantai di dalam teras juga akan semakin berkurang.

KESIMPULAN

Setelah melakukan penelitian ini, maka dapat disimpulkan bahwa Suhu rata-rata pendingin dalam teras reaktor adalah sebesar 893,635 K, Kondisi kritis reaktor PLTN PBMR 10 MWe didapatkan pada pengayaan bahan bakar sebesar 8,6% dan Reaktor memiliki nilai koefisien reaktifitas negatif pada semua pengayaan bahan bakar, sehingga memenuhi standar keamanan reaktor.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Supriatna, Piping. 2008. *Konsep Rancangan Sistem Pemurnian Gas Pendingin Primer Pada High Temperature Reactor (HTR)*. Seminar Nasional IV SDM Teknologi Nuklir. Yogyakarta.
- [2] Sugiyono, Agus. 2008. *Prospek Penggunaan Teknologi Bersih untuk Pembangkit Listrik dengan Bahan Bakar Batubara di Indonesia*. Jurnal Teknologi Lingkungan. Vol.1. No.1 (90-95).
- [3] Lamarsh, J.R. 1965. *Introduction To Nuclear Reactor Theory*. New York: Addison-Wesley Publishing Company.
- [4] Sekitomo, Hiroshi. 2007. *Nuclear Reactor Theory*. Tokyo Institute of Technology.
- [5] Akhadi, Muhlis. 1997. *Pengantar Teknologi Nuklir*. PT Rineka Cipta : Jakarta.
- [6] Ridwan, M. dkk. 1986. *Pengantar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir*. Jakarta: Badan Tenaga Atom Nasional.
- [7] Briesmeister, J.F. 2003. *MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code Version 5 Volume I*. Los Alamos : LA-13709-M. Los Alamos National Laboratory.
- [8] Melese, G. dan Katz, R. 1984. *Flow Design of Helium-Cooled Reactors*. American Nuclear Society, LA Grange Park, Illinois.
- [9] Wirawan, Ayi. 2010. *Desain Bahan Bakar PLTN Tipe PBMR (Pebble Bed Modular Reactor) 150 MW Menggunakan Program MCNP 5 (Monte Carlo N-Particle)*. Skripsi. Yogyakarta: Teknik Fisika Universitas Gajah Mada.
- [10] Lebenhaft, J. R. 2001. *MCNP4B Modeling of Pebble Bed Reactors*. Nuclear Engineer and Master of Science in Nuclear Engineering. MIT.