



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Unand.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Unand.

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

SKRIPSI



ANTON BASRI
05 135 042

JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS ANDALAS
PADANG 2010

**PENGARUH GEOMETRI TERAS TERHADAP
TRANSMUTASI BAHAN BAKAR PADA REAKTOR PEMBIAK CEPAT
DENGAN SIKLUS BAHAN BAKAR TERTUTUP**

Disusun oleh :

ANTON BASRI
05135042

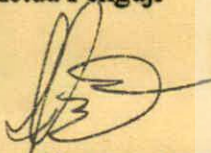
telah dipertahankan didepan Tim Penguji
pada tanggal 27 Agustus 2010
dan dinyatakan telah lulus memenuhi syarat

Susunan tim penguji

Pembimbing


Dr. Dian Fitriyani
NIP : 197012151999032001

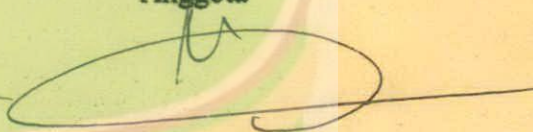
Ketua Penguji


Ardian Putra, M.Si
NIP:198304222005011002

Anggota


Afdal, M.Si
NIP:197601062000031001

Anggota


Drs Alimin Mahyuddin, M.Si
NIP: 196106031989011001

Padang, Oktober 2010

Ketua Jurusan Fisika

FMIPA Universitas Andalas



Arif Budiman, M.Si
NIP. 197311141999031004

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Kemudian Shalawat serta salam kepada nabi Muhammad SAW yang telah membawa umatnya dari zaman kebodohan ke zaman yang penuh ilmu pengetahuan seperti saat ini.

Skripsi ini diajukan sebagai syarat untuk menyelesaikan pendidikan strata 1 di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Andalas. Skripsi ini membahas tentang pengaruh variasi geometri teras terhadap transmudasi bahan bakar untuk reaktor pembiak cepat dengan waktu operasi 20 tahun dengan menggunakan program DTRIDI FBR. Kemudian dari hasil keluaran program akan dianalisa perubahan harga faktor multiplikasi neutron (k_{eff}), perubahan densitas nuklida di dalam teras reaktor, perubahan nilai *Burnup* (B) dan perubahan nilai *Breeding Ratio* (BR).

Selesainya penulisan ini tidak terlepas oleh bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua serta seluruh anggota keluarga besar penulis yang telah memberikan dorongan yang sangat besar kepada penulis.
2. Ibu Dr. Dian Fitriyani selaku pembimbing yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan, semangat dan masukan dalam pelaksanaan penelitian dan penulisan skripsi ini.

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

Abstrak

Telah dilakukan penelitian tentang pengaruh geometri teras terhadap transmudasi bahan bakar pada reaktor pembiak cepat dengan siklus bahan bakar tertutup. Penelitian dilakukan menggunakan program DTRIDI FBR dengan memvariasikan geometri teras untuk reaktor pembiak cepat berpendingin logam cair (Pb-Bi) yang beroperasi selama 20 tahun berbahan bakar UN-PuN (Nitrida). Dari hasil keluaran program untuk semua model teras reaktor, dilakukan analisis tentang 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 (β) $\pm 0,05$ 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 : Transmutasi, Reaktor Pembiak Cepat, Siklus Bahan Bakar Tertutup, Geometri Teras, *Breeding Ratio*, *Burnup*

DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	i
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR LAMPIRAN	ix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	3
1.3 Manfaat Penelitian.....	4
1.4 Batasan Masalah	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Studi Literatur.....	5
2.2 Landasan Teori	6
2.2.1 Reaktor Pemiak Cepat	6
2.2.2 Siklus Bahan Bakar FBR.....	11
2.2.3 Faktor Multiplikasi (k_{eff}).....	12
2.2.4 Analisis Susutan Bahan Bakar (<i>burnup</i>)	13
2.2.5 Transmutasi.....	16
2.2.6 Unsur-unsur Aktinida	17

BAB III METODOLOGI PENELITIAN	19
3.1 Spesifikasi Disain Reaktor	19
3.2 Diskritisasi Ruang	20
3.3 Metode Analisis.....	22
3.3.1 Perhitungan Faktor Multiplikasi (k_{eff}).....	24
3.3.2 Perhitungan <i>Burnup</i>	25
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	29
4.1 Densitas nuklida mula-mula.....	30
4.2 Faktor Multiplikasi Neutron (k_{eff})	31
4.3 Perubahan Densitas Bahan Fertile dan Bahan Fisil	32
4.3 Nilai <i>Burnup</i>	41
4.5 <i>Breeding Ratio</i>	42
4.6 Pengaruh Geometri Teras Terhadap Kinerja Reaktor	43
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	45
5.1 Kesimpulan	45
5.2 Saran	46
DAFTAR KEPUSTAKAAN	47
LAMPIRAN	48

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Skema reaktor pembiak cepat	8
Gambar 2.2 Konfigurasi teras dan blanket pada LMFBR	10
Gambar 2.3 Siklus Bahan Bakar FBR	12
Gambar 2.4 Skema keseimbangan reaksi	16
Gambar 2.5 Rantai transmudasi antara ^{238}Pu dan ^{244}Cm pada LWR	15
Gambar 3.1 Geometri teras 3 Dimensi.....	20
Gambar 3.2 Diagram alir penelitian.....	24
Gambar 3.3 Rantai transmudasi untuk analisis <i>burnup</i>	26
Gambar 4.1 Model teras reaktor	31
Gambar 4.2 Harga faktor multiplikasi neutron untuk model G1 sampai G5	33
Gambar 4.3 Perubahan densitas ^{238}U untuk model teras G3	34
Gambar 4.4 Perubahan densitas ^{239}Pu untuk model teras G3	35
Gambar 4.5 Perubahan densitas ^{238}U untuk model teras G1 sampai G5	36
Gambar 4.6 Perubahan densitas ^{239}Pu untuk model G1 sampai G5	38
Gambar 4.7 Perubahan densitas ^{241}Am untuk model G1 sampai G5.....	40
Gambar 4.8 Nilai <i>burnup</i> untuk model G1 sampai G5	41
Gambar 4.9 Nilai <i>breeding ratio</i> untuk model G1 sampai G5	42

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi mempunyai peranan penting dalam kehidupan manusia. Pemakaian energi dunia untuk waktu mendatang seperti diperkirakan *Energy Information Administration* (EIA) hingga tahun 2025 masih didominasi oleh bahan bakar dari fosil seperti minyak, gas alam dan batubara, sedangkan untuk energi terbarukan masih relatif sedikit (www.lemhannas.go.id). Kenyataannya tidak lagi ditemukan cadangan sumber energi berbasis fosil dalam jumlah yang besar pada rentang waktu terakhir ini.

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)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Studi Literatur

Simulasi tentang transmudasi bahan bakar yang telah dilakukan sebelumnya adalah analisis tingkat bahaya paska perlakuan daur ulang/transmutasi aktinida (Marsodi, 1994). Hasil penelitian Marsodi mengatakan bahwa paska perlakuan daur ulang/transmutasi aktinida dapat mereduksi tingkat bahaya pada isotop-isotop berbahaya yang dihasilkan dalam penggunaan bahan bakar sampai ke tingkat yang lebih aman.

Hasil penelitian analisa keselamatan reaktor cepat dengan daur ulang aktinida (Taufik, 2002) mengatakan bahwa dengan daur ulang aktinida berperan penting dalam sistem keselamatan *inherent* (pasif) reaktor cepat.

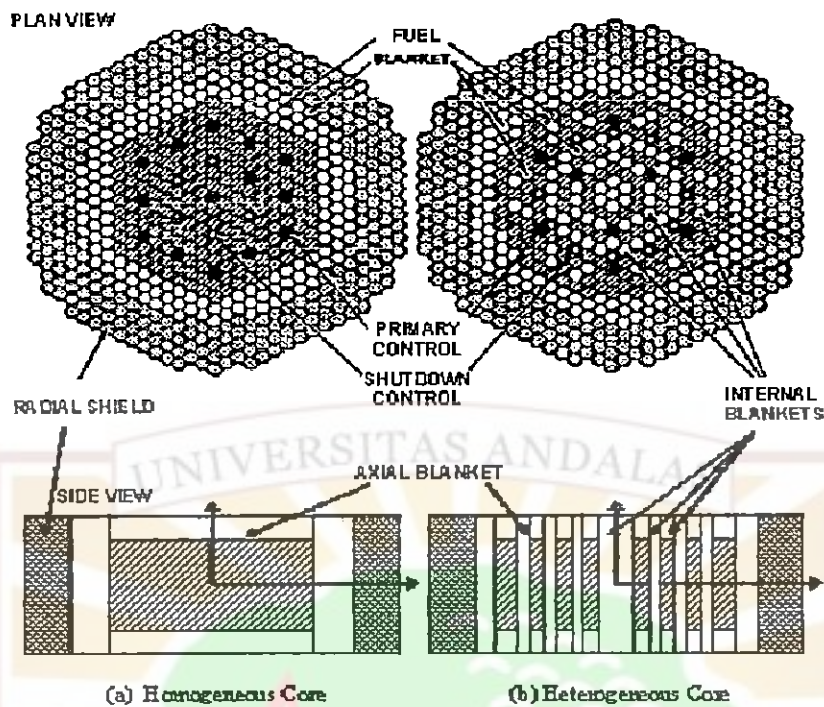
Simulasi untuk reaktor cepat dengan geometri kubus tiga dimensi (XYZ) telah dilakukan sebelumnya untuk analisis termohidrolik pada disain reaktor cepat berbasis kapal dengan beberapa model teras reaktor yang berbeda (Fitriyani, 2006). Namun hanya terbatas pada analisis termohidrolik saja.

Untuk menganalisis perubahan densitas diperlukan kode komputasi untuk analisis *burnup*, dan telah dilakukan dalam perancangan kode komputasi untuk analisis *burnup* pada reaktor pembiak cepat dengan geometri kubus tiga dimensi oleh Handayani, 2010. Kesimpulan yang diberikan pada penelitian Handayani bahwa analisis *burnup* reaktor pembiak cepat telah memberikan hasil seperti yang

Komponen-komponen yang mendukung suatu reaktor pembiak cepat secara umum adalah :

1. *Reactor Core* (teras reaktor) yaitu tempat terjadinya reaksi berantai. Teras merupakan rangkaian komponen utama dari reaktor yang terdiri dari :

- a. *Fuel* (bahan bakar), yaitu bahan bakar yang berupa bahan fisil ataupun bahan fertil. Contohnya adalah ^{235}U , ^{233}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu , ^{232}Th .
 - b. *Coolant* (bahan pendingin), yaitu fluida yang terdapat pada seluruh bagian reaktor yang berguna untuk memindahkan panas. *Coolant* ini dapat berupa gas, air, ataupun logam cair.
 - c. *Structure material* (bahan struktur), yaitu bahan pelindung yang terdapat di dalam teras seperti tabung metal sebagai *cladding* (pin bahan bakar) dan kawat pemisah, biasanya berupa *stainless steel*.
 - d. *Rod control* (batang kendali) yang berfungsi untuk pengendalian reaktivitas agar laju pembelahan atau populasi neutron di dalam teras dapat diatur sesuai dengan syarat-syarat operasi yang dikehendaki. Bahan-bahan yang sering dipakai adalah: boron, cadmium, gadolinium dan lain-lain.
2. *Reactor Blanket* (selimut) yaitu bahan fertil yang mengelilingi teras reaktor, sangat efektif digunakan untuk mengatasi kebocoran neutron yang keluar dari teras reaktor.
3. *Reflector*, yaitu bahan dengan karakteristik penampang lintang absorpsi yang rendah, ditempatkan disekeliling teras untuk merefleksikan atau menghamburkan bocoran neutron sehingga kembali masuk ke teras. Bahan-



Gambar 2.2 Konfigurasi teras dan blanket pada LMFBR
(Sumber : Waltar dan Reynolds, 1981)

Bahan pendingin pada reaktor pembiak cepat mempunyai persyaratan-persyaratan utama yaitu mampu meminimalkan moderasi neutron, mampu memindahkan panas dengan baik dari sistem densitas daya tinggi serta mampu mengurangi penyerapan neutron. Untuk memenuhi karakteristik tersebut sebagian besar reaktor menggunakan logam cair sebagai bahan pendinginnya. Dengan nomor massa dan koefisien transfer panas yang cukup besar, logam cair memiliki daya moderasi yang relatif rendah dan mampu menyerap kalor yang lebih besar.

Pada awal perkembangannya, sejumlah reaktor pembiak cepat menggunakan bahan pendingin Sodium (Natrium). Akan tetapi, selain memiliki reaktivitas umpan balik positif untuk pendingin berukuran besar, sodium juga berbahaya bila berinteraksi dengan air atau udara sehingga rawan kebakaran. Untuk mengatasi hal tersebut, diusulkan penggunaan Pb dan Pb-Bi sebagai bahan

pendingin logam cair untuk reaktor pembiak cepat. Tabel 2.1 memperlihatkan perbandingan berbagai bahan pendingin logam cair untuk reaktor cepat

Tabel 2.1 Perbandingan bahan pendingin logam cair untuk reaktor cepat

(Sumber : Takahashi, 2004)

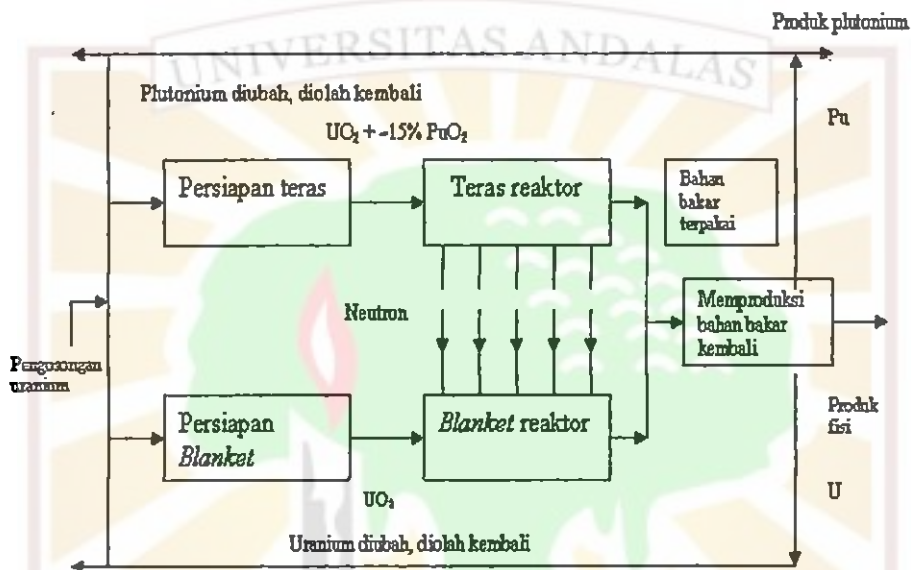
Bahan Pendingin	Cross Section absorpsi neutron (mb)	Titik Leleh (°C)	Titik Didih (°C)	Aktivasi dengan air atau udara
Na	2,35	98	883	Kuat
Pb	2,75	327	1737	Lemah
Pb-Bi	3,82	125	1670	Lemah

Kandidat utama bahan bakar pada reaktor pembiak cepat adalah campuran uranium-plutonium oksida, karbida logam atau nitrida. Bahan bakar karbida (UC-PuC) dan nitride (UN-PuN) mempunyai karakteristik yang baik sebagai bahan bakar oksida, terutama karena konduktivitas termalnya yang cukup tinggi. Dengan spektrum yang lebih keras dari bahan bakar oksida dimungkinkan untuk memperoleh rasio pembiakan yang lebih tinggi.

2.2.2 Siklus Bahan Bakar FBR

Siklus bahan bakar pada reaktor cepat berbeda dari reaktor lainnya, perbedaan ini terletak pada jumlah konversi bahan bakar yang dihasilkan pada saat reaktor beroperasi. FBR menggunakan sekitar 60% hingga 70% dari energi yang tersedia di dalam uranium alami (diambil dari perubahan ^{238}U menjadi ^{239}Pu).

Siklus bahan bakar pada FBR dapat dilihat pada Gambar 2.3. Beberapa hal yang penting dalam siklus bahan bakar FBR adalah perubahan ^{238}U menjadi ^{239}Pu yang terjadi di *blanket*, *burnup* bahan bakar serta pembangkitan tenaga yang terjadi di teras.



Gambar 2.3 Siklus bahan bakar FBR
(Sumber : Duderstadt, 1976)

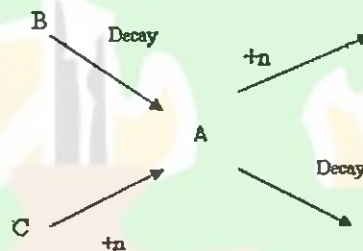
2.2.3 Faktor Multiplikasi (k_{eff})

Ketika reaktor dinyalakan maka jumlah neutron akan bertambah hingga tercapai daya yang diinginkan. Dari perubahan jumlah neutron dalam reaktor ini dapat dilihat kondisi kekritisan reaktor melalui faktor multiplikasi neutron (k_{eff}). Apabila $k_{eff} > 1$ maka reaktor dalam keadaan super kritis, bila $k_{eff} = 1$ reaktor dalam keadaan kritis, sedangkan bila $k_{eff} < 1$ maka reaktor dalam keadaan subkritis. Untuk mendapatkan nilai k_{eff} dapat digunakan persamaan (2.1) yaitu :

$$k_{eff} = \sum_g^G (v\Sigma_f)_g \phi_g \quad (2.1)$$

penyelesaian persamaan difusi multigrup untuk mendapatkan fluks neutron dan penyelesaian persamaan *burnup* yaitu pemecahan densitas inti sebagai fungsi dari waktu dan posisi. Untuk dapat menghitung persamaan *burnup* maka harus diketahui terlebih dahulu fluks neutronnya.

Perhitungan dasar dalam analisis *burnup* adalah perhitungan terhadap penyusutan dan produksi isotop sebagai fungsi dari waktu. Persamaan kecepatan reaksi yang menggambarkan densitas jumlah inti dalam teras dapat diperoleh dengan menggunakan prinsip keseimbangan yang sederhana. Misalkan $N_A(r,t)$ merupakan densitas untuk nuklida jenis A , maka persamaan laju densitas nuklida secara umum diperlihatkan oleh Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Skema keseimbangan reaksi
(Sumber : Duderstadt, 1976)

Secara matematis dinyatakan dalam persamaan (2.3) yaitu:

$$\frac{dN_A}{dt} = -\lambda_A N_A - \left[\sum_g \sigma_{ag}^A \phi_g \right] N_A + \lambda_B N_B + \left[\sum_g \sigma_{lg}^c \phi_g \right] N_c \quad (2.3)$$

sampai dengan 103. Nama-nama unsur-unsur termasuk ke dalam unsur aktinida yang diperlihatkan oleh tabel 2.2 Semua aktinida, kecuali lawrensium merupakan unsur blok-f. Unsur-unsur kelompok aktinida adalah radioaktif dengan hanya aktinium, thorium, dan uranium yang secara alami ditemukan di kulit bumi,

Tabel 2.2 Nama dan nomor atom unsur-unsur aktinida
(sumber : www.wikipedia)

No Atom	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Nama	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Pada tahun 1945, Mendeleev secara umum memperkirakan bahwa, thorium dan uranium adalah logam transisi (transuranium) antara golongan 4 dan 6. Unsur transuranium pertama kali dibuat dalam proyek Manhattan pada tahun 1944. Glenn T. Seaborg, kepala penelitian tersebut, menemukan bahwa amerisium and kurium tidak memiliki sifat-sifat unsur transisi seperti yang diperkirakan. Pada tahun 1945, ia mengusulkan perubahan pada tabel sistem periodik unsur agar unsur-unsur aktinida dibuat sebagai golongan baru dalam sistem periodik. Sama dengan golongan lantanida.

Aktinida minor adalah unsur aktinida yang digunakan dalam bahan bakar nuklir selain uranium dan plutonium, uranium dan plutonium ini biasa disebut aktinida utama. Aktinida minor termasuk neptunium, amerisium, curium, berkelium, californium, einsteinium, dan Fermium. Isotop yang berperan penting dalam menghabiskan bahan bakar nuklir adalah Neptunium-237, Amerisium-241,

Amerisium-243, Kurium -242, dan Kalifornium -249. Waktu paruh untuk unsur-unsur aktinida dapat dilihat pada Tabel 2.2

Tabel 2.2 Waktu Paruh unsur-unsur aktinida
(Sumber : www.wikipedia.com)

Actinides				Half-life (year)
²⁴⁴ Cm	²⁴¹ Pu	²⁵⁰ Cf	²⁴³ Cm	10–30
²³² U	²³⁸ Pu			69–90
²⁴⁹ Cf	²⁴² Am			141–351
²⁴¹ Am	²⁵¹ Cf			431–898
²⁴⁰ Pu	²²⁹ Th	²⁴⁶ Cm	²⁴³ Am	5–7.10 ³
²⁴⁵ Cm	²⁵⁰ Cm	²³⁹ Pu		8–24.10 ³
²³³ U	²³⁰ Th	²³¹ Pa		32–160
²³⁴ U				211–290
²⁴⁸ Cm	²⁴² Pu			340–373
²³⁷ Np				1–2.10 ³
²³⁶ U	²⁴⁷ Cm			6–23
²⁴⁴ Pu				80.103
²³² Th	²³⁸ U	²³⁵ U		0.7– 12.10 ⁶

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Spesifikasi Disain Reaktor

Simulasi reaktor dilakukan pada model reaktor cepat berukuran kecil dengan spesifikasi disain reaktor secara umum diatur seperti pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1. Spesifikasi Disain Reaktor

Parameter	Spesifikasi
Daya reaktor	150 MWt
Jenis Bahan Bakar	UN-PuN
Jenis Pendingin	Pb-Bi
Bahan Struktural	B ₄ C + Stainles Steel
Fraksi Volume Teras	
Bahan Bakar	45%
Struktur	15%
Pendingin	40%
Bahan Bakar Diperkaya	12-17%
Diameter Pin	1 cm – 10 cm
Tebal Cladding	0,05 cm
Siklus <i>Burnup</i>	20 tahun

Parameter-parameter disain reaktor ini dapat diatur dan disesuaikan dengan tujuan perancangan dan kebutuhan, tetapi dengan tetap memperhatikan batasan-batasan yang berlaku. Diantaranya, batasan nilai fraksi volume (F) masing-masing material untuk teras LMFBR adalah sebagai berikut : bahan bakar (30-45)%, bahan pendingin (35-45)%, logam (15-20)%, dan B₄C (1-2)% (Walter, 1981).

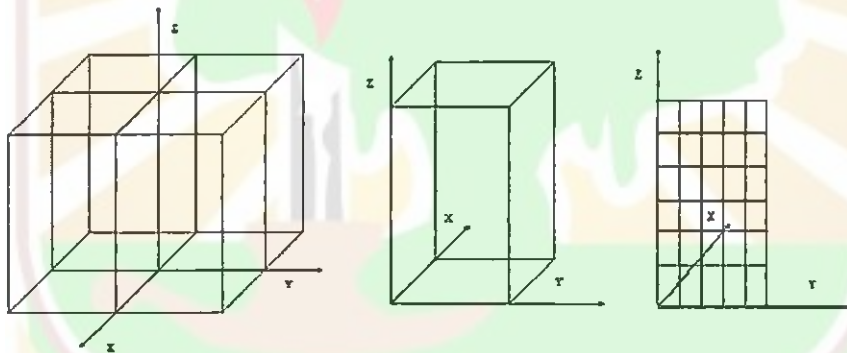
Pada Tabel 3.2 diperlihatkan komposisi bahan bakar Uranium-Nitrida dan Plutonium-Nitrida (UN-PuN) yang digunakan dalam simulasi ini.

Tabel 3.2 Spesifikasi komposisi bahan bakar teras

Jenis Bahan bakar	Komposisi (%)					
	Uranium-Nitrida	U-235		U-238		N-15
0,659		93,412		5,929		
Plutonium-Nitrida	Pu-238	Pu-239	Pu-240	Pu-241	Pu-242	N-15
	2,202	61,508	25,634	2,644	2,118	5,894

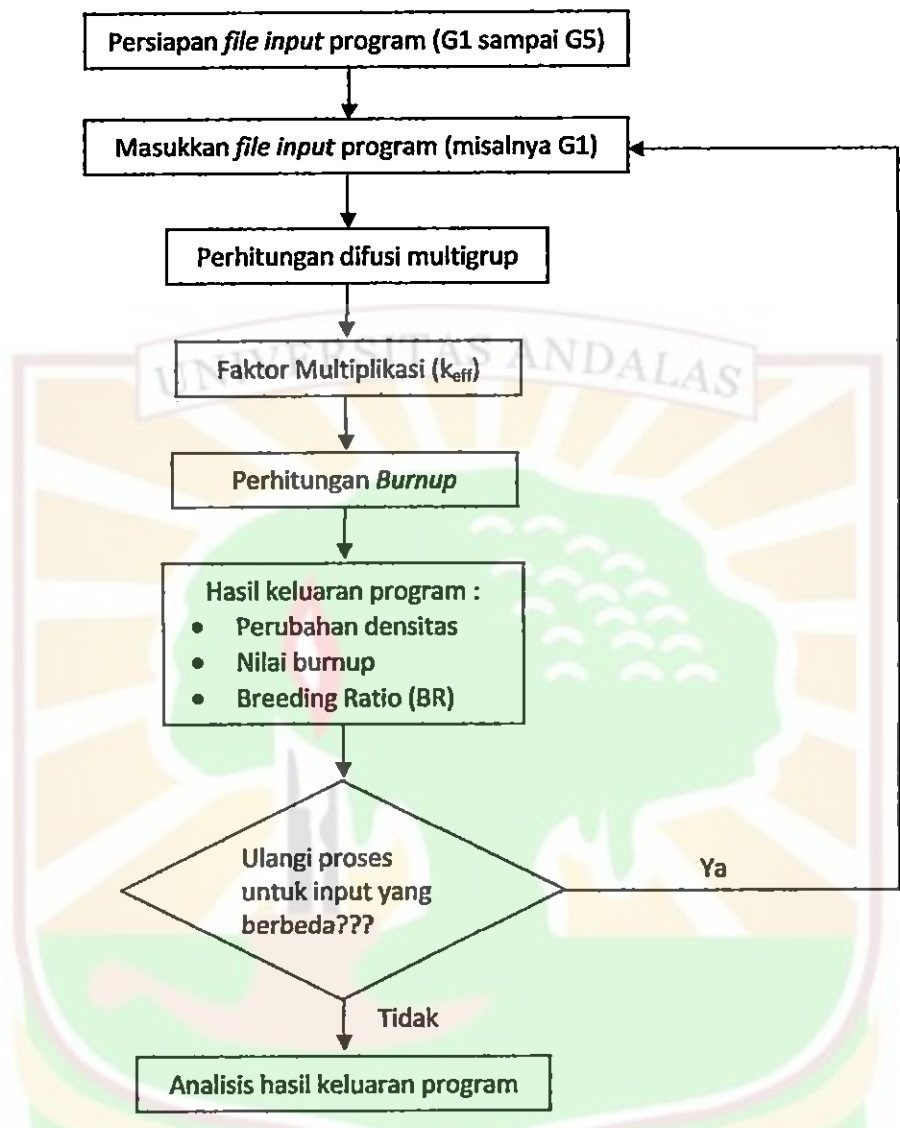
3.2 Diskritisasi Ruang

Seluruh perhitungan dilakukan untuk geometri teras tiga dimensi (XYZ) dan untuk memperoleh pendekatan dan penyesuaian terhadap model teoritik maka dilakukan diskritisasi ruang dalam pembagian teras. Diskritisasi ruang ini dapat dilihat pada Gambar 3.1



Gambar 3.1 Geometri Teras 3 Dimensi

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



Gambar 3.2 Diagram alir penelitian

3.3 Perhitungan Faktor Multiplikasi (k_{eff})

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.

Pada kelima model teras reaktor yang diamati akan diamati tingkat kekritisitas reaktor dari awal hingga akhir operasi, sehingga diharapkan diperoleh informasi model teras reaktor yang dapat beroperasi paling lama dengan tetap mempertahankan harga $k_{eff} = 1$ dalam batas toleransi reaktivitas (ρ) $\pm 0,05$ (Waltar.1981).

3.4 Perhitungan *Burnup*

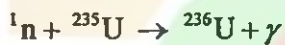
Transmutasi bahan bakar akan dapat dipantau melalui beberapa parameter yaitu perubahan densitas nuklida-nuklida, rasio pembiakan (*breeding ratio*) dan nilai *burnup* sebagai output dari perhitungan *burnup*. Perhitungan *burnup* dilakukan untuk 28 inti berat yang dihasilkan dari konversi ^{234}U sampai ^{249}Cm . Skema rantai transmutasi untuk perhitungan *burnup* dapat dilihat pada Gambar 3.3.

a. Perubahan densitas

Setelah diperoleh nilai fluks dari solusi persamaan difusi, maka perubahan densitas tiap atomik dihitung secara numerik untuk setiap interval normalisasi fluks (90 hari). Kemudian pemantauan dilakukan setiap interval *burnup* (1 tahun) selama operasi. Misalnya untuk perubahan densitas ^{235}U adalah sebagai berikut:

Perubahan densitas ^{235}U (nuklida nomor 2) dipengaruhi oleh :

Pengurangan densitas karena tangkapan neutron oleh ^{236}U (nuklida no. 3 pada Gambar 3.3)



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



secara numerik perubahan densitas ^{235}U dapat dinyatakan dengan Persamaan (3.5):

$$\begin{aligned} N_2^{j+1} - N_2^j &= -N_2^j \sigma_{a2} \phi \cdot dt + N_1^j \sigma_{c1} \phi \cdot dt \\ N_2^{j+1} &= N_2^j - N_2^j \sigma_{a2} \phi \cdot dt + N_1^j \sigma_{c1} \phi \cdot dt \end{aligned} \quad (3.2)$$

Persamaan (3.5) adalah bentuk numerik dari persamaan (2.4)

b. Perhitungan nilai *burnup*

Nilai *Burnup* dapat dinyatakan dalam persentase (%) dengan satuan MWd/kg atau MWd/ton. Persamaan *burnup* dalam persentase dapat dinyatakan dalam Persamaan (3.6)

$$B(\text{atom \%}) = 100 \frac{\sum_m N_m \sigma_{fm} \phi t}{\sum_m N_{m,0}} \quad (3.3)$$

Persamaan (3.3) dihitung untuk semua atom berat dengan $N_{m,0}$ adalah densitas pada saat $t = 0$. Nilai *burnup* yang diharapkan adalah sekitar 1% sampai 10%.

c. Perhitungan *Breeding Ratio* (BR)

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 :

$$BR = \frac{FP}{FD} \quad (3.4)$$

Didalam suatu siklus bahan bakar, bahan fisil yang dihasilkan dapat dinyatakan dalam persamaan (3.8) :

$$FP = FD + FEOC - FBOC \quad (3.5)$$

Sehingga persamaan (3.7) menjadi :

$$BR = 1 + \frac{FEOC - FBOC}{FD} \quad (3.6)$$

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 (3.6) nampak bahwa suatu reaktor 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.



Tabel 4.2. Densitas awal untuk setiap nuklida

No.	Jenis Nuklida	Densitas Awal (atom/cm ³)	No.	Jenis Nuklida	Densitas Awal (atom/cm ³)
1.	²³⁴ U	0.00000E+00	15.	²⁴² Pu	1.00828E+19
2.	²³⁵ U	2.10205E+19	16.	²⁴³ Pu	0.00000E+00
3.	²³⁶ U	0.00000E+00	17.	²⁴¹ Am	0.00000E+00
4.	²³⁷ U	0.00000E+00	18.	²⁴² Am	0.00000E+00
5.	²³⁸ U	2.94644E+21	19.	²⁴² Am	0.00000E+00
6.	²³⁹ U	0.00000E+00	20.	²⁴³ Am	0.00000E+00
7.	²³⁷ Np	0.00000E+00	21.	²⁴⁴ Am	0.00000E+00
8.	²³⁸ Np	0.00000E+00	22.	²⁴² Cm	0.00000E+00
9.	²³⁹ Np	0.00000E+00	23.	²⁴³ Cm	0.00000E+00
10.	²⁴⁰ Np	0.00000E+00	24.	²⁴⁴ Cm	0.00000E+00
11.	²³⁸ Pu	1.06643E+19	25.	²⁴⁵ Cm	0.00000E+00
12.	²³⁹ Pu	2.96634E+20	26.	²⁴⁶ Cm	0.00000E+00
13.	²⁴⁰ Pu	1.23109E+20	27.	²⁴⁷ Cm	0.00000E+00
14.	²⁴¹ Pu	1.26451E+19	28.	²⁴⁸ Cm	0.00000E+00

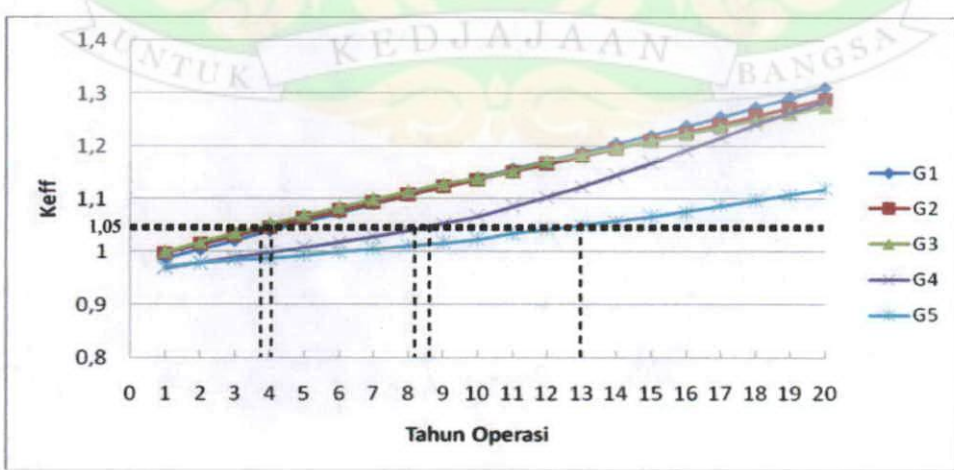
4.2 Nilai Faktor Multiplikasi Neutron (k_{eff})

Tingkat kekritisan reaktor ditandai dengan harga faktor multiplikasi neutron (k_{eff}) sama dengan 1,00. Batas nilai toleransi reaktifitas (ρ) adalah $\pm 0,05$, artinya reaktor masih berada dalam keadaan kritis dalam rentang nilai 0,95 hingga 1,05. Apabila melebihi batas nilai toleransi reaktifitas, artinya reaktor telah berada dalam keadaan superkritis, dan bila berada dibawah batas toleransi reaktifitas, reaktor berada dalam keadaan subkritis.

Gambar 4.2 memperlihatkan nilai faktor multiplikasi neutron untuk semua model G1 sampai G5. Dari grafik terlihat bahwa model teras G5 ($Z \gg X$) memberikan nilai k_{eff} paling baik, karena nilai k_{eff} berada dalam nilai toleransi reaktifitas teras dalam waktu yang paling lama yaitu 13 tahun.

Model teras G5 memberikan nilai k_{eff} yang lebih baik berkemungkinan disebabkan karena banyaknya interaksi neutron dengan reflektor pada dinding teras arah X dan Y yang lebih dekat ke pusat teras dibandingkan dengan model lainnya. Reflektor menyerap neutron hasil reaksi fisi, sehingga jika interaksi neutron dengan reflektor lebih banyak maka jumlah neutron relatif lebih sedikit, sehingga dapat mempertahankan kekritisan reaktor lebih lama dibandingkan model teras lainnya.

Meskipun model teras G5 memberikan hasil yang paling baik dalam tinjauan lamanya waktu operasi tanpa *refueling*, namun setelah tahun ke 13 bahan bakar reaktor harus diisi kembali guna mempertahankan reaktor dalam keadaan kritis. Kondisi kritis dapat dicapai dengan mengisi kembali bahan bakar reaktor (*refueling*) misalnya dengan kembali melakukan pengaturan pada fraksi pengayaan bahan bakar di tiap bagian teras. Cara lain untuk menurunkan jumlah pembangkitan neutron di dalam teras adalah dengan menambah batang kendali ke dalam teras reaktor, karena neutron akan diserap oleh batang kendali, sehingga dapat menurunkan tingkat kekritisan reaktor.

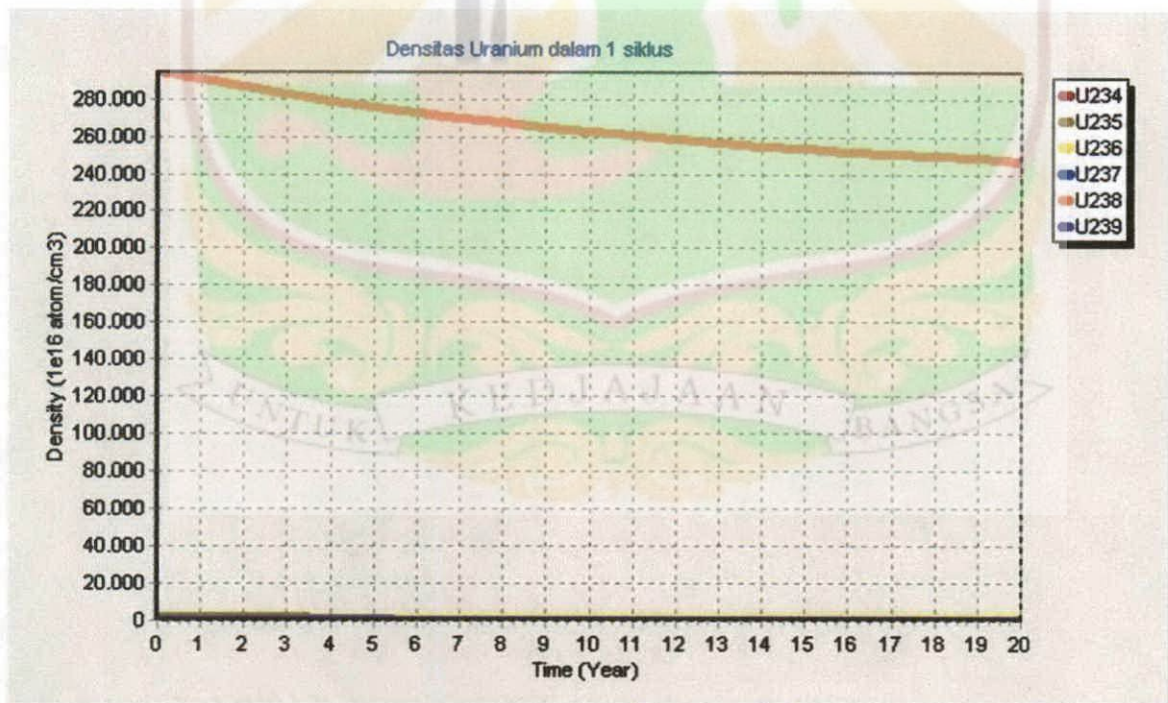


Gambar 4.2 Nilai faktor multiplikasi neutron untuk model teras G1 sampai G5

4.3 Perubahan Densitas Bahan Fertil dan Bahan Fisil

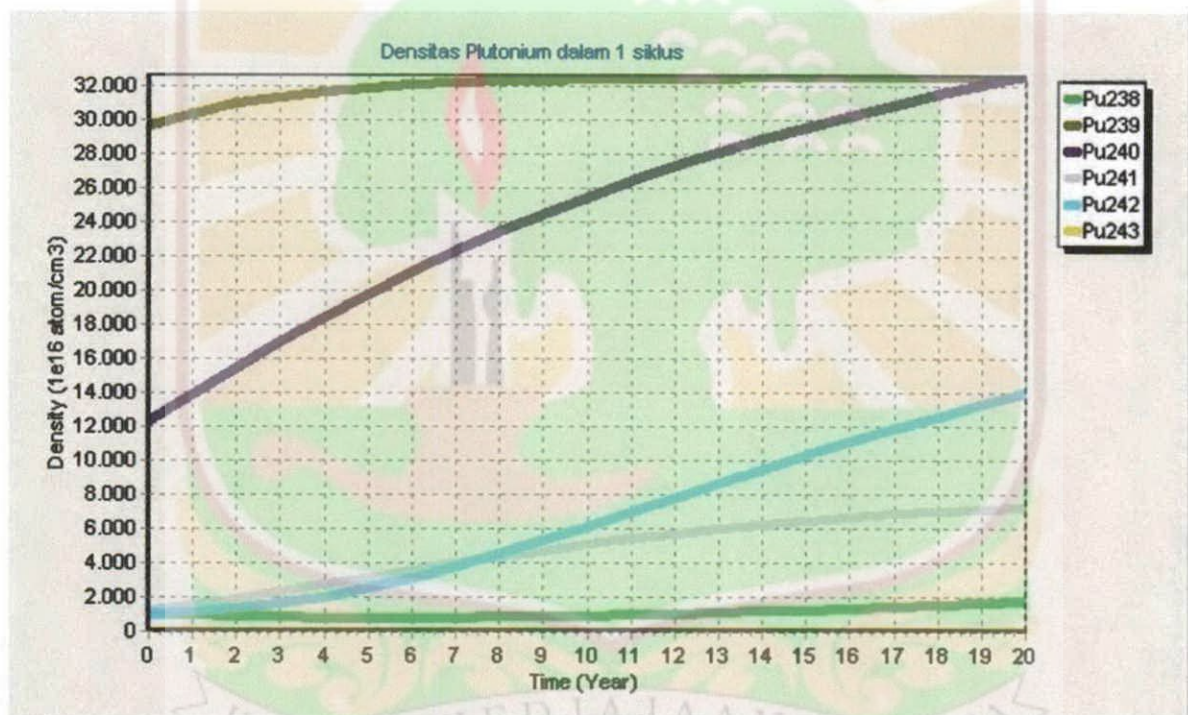
Perubahan densitas nuklida dipengaruhi oleh nilai penampang lintang absorpsi (σ_a), penampang lintang *scattering* (σ_c), konstanta peluruhan radioaktif (λ) dan juga fluks neutron (persamaan 2.3). Harga penampang lintang setiap nuklida juga dipengaruhi oleh suhu, dimana suhu tergantung pada distribusi daya di dalam teras reaktor. Secara tidak langsung, perubahan densitas juga dipengaruhi oleh banyaknya jumlah neutron di dalam teras reaktor.

Untuk memperlihatkan perubahan densitas bahan fertil dan bahan fisil yang terjadi di dalam teras reaktor, sebagai contoh diambil salah satu output densitas untuk model teras G3. Gambar 4.3 memperlihatkan perubahan densitas isotop- isotop uranium.



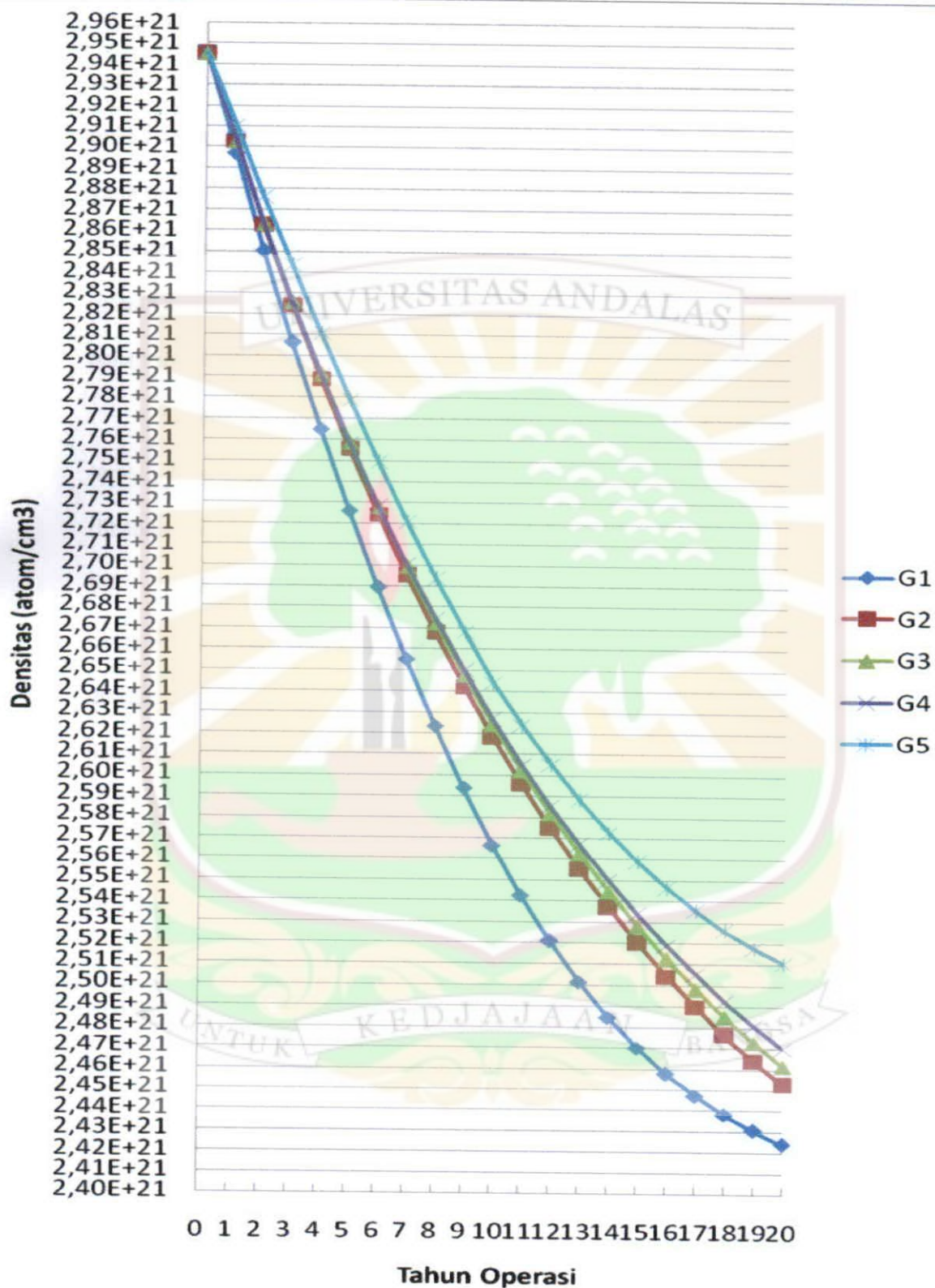
Gambar 4.3 Grafik perubahan densitas ^{238}U untuk model teras G3

^{238}U adalah bahan fertil, 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 ^{239}Pu diperlihatkan oleh Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Grafik perubahan densitas ^{239}Pu untuk model teras G3

Gambar 4.5 memperlihatkan perubahan densitas isotop ^{238}U selama 1 siklus operasi reaktor (20 tahun) untuk seluruh model teras G1 sampai G5. Terlihat untuk semua model teras bahwa densitas ^{238}U mengalami penurunan selama reaktor beroperasi.

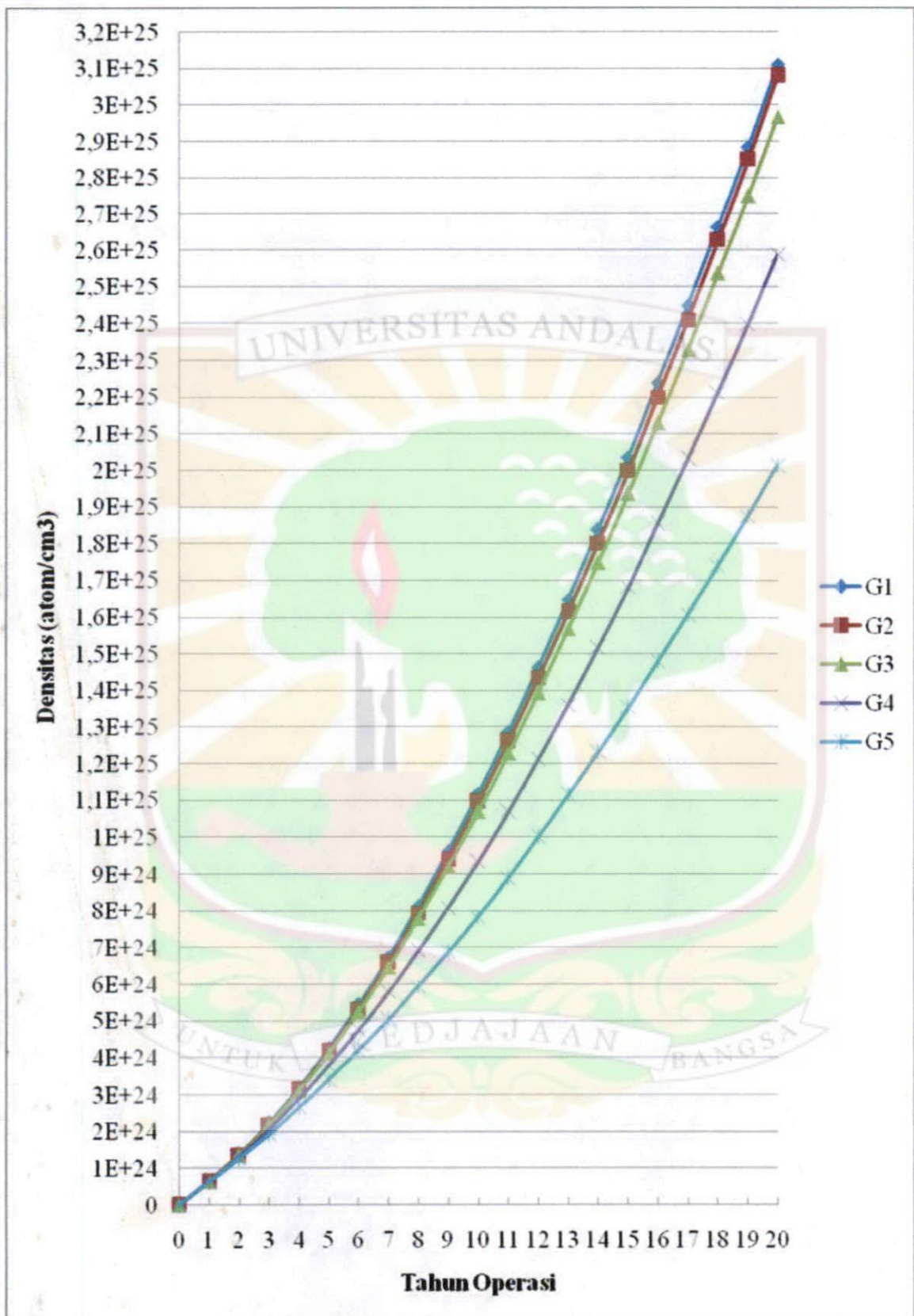


Gambar 4.5 Perubahan densitas ^{238}U untuk model G1 sampai G5

Saat awal reaktor beroperasi, hanya beberapa nuklida yang terdapat dalam teras yaitu nuklida-nuklida dari bahan bakar reaktor saat awal operasi yang terdiri dari ^{235}U , ^{238}U , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu dan ^{242}Pu dengan komposisi tertentu.

Selain perubahan dari bahan fertil menjadi bahan fisil, transmudasi bahan bakar di dalam teras reaktor juga menghasilkan beberapa nuklida baru yang sebelumnya tidak ada di dalam teras reaktor. Sebagai contoh salah satunya adalah ^{241}Am (Amerisium). Munculnya nuklida baru ini dapat dilihat dari perubahan densitas masing-masing nuklida tersebut, disebabkan oleh adanya reaksi penangkapan neutron, peluruhan alfa, beta dan gamma oleh bahan bakar di dalam teras reaktor.

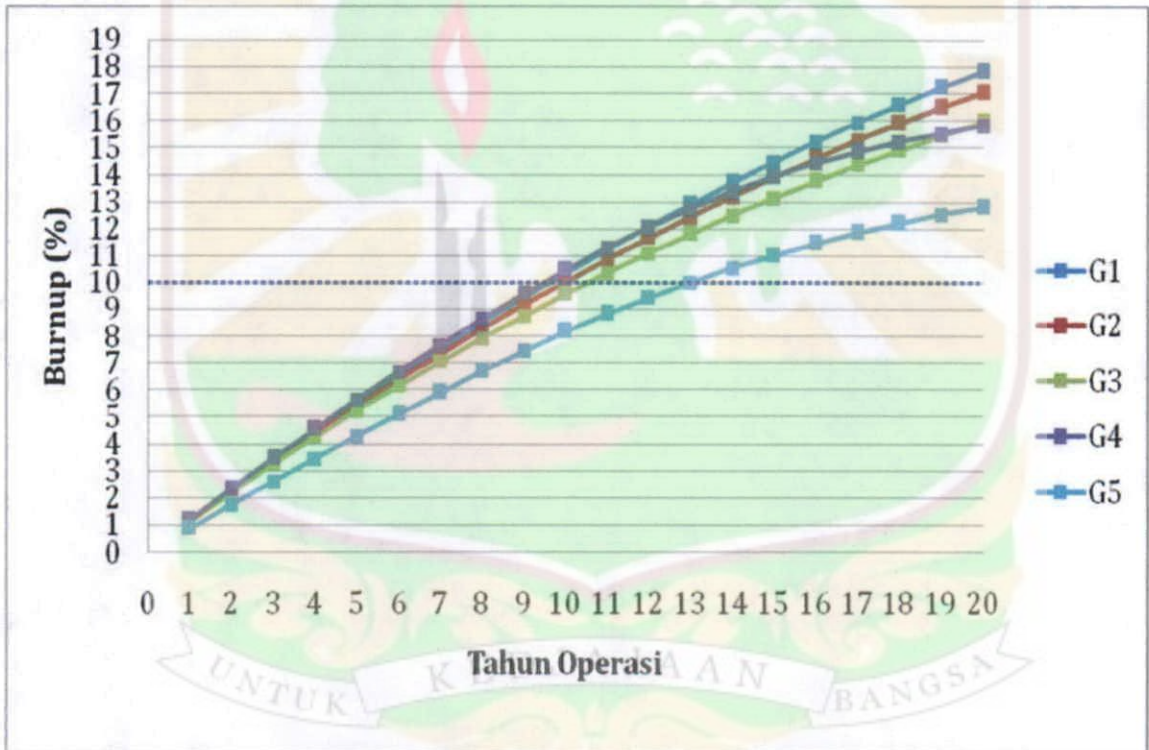
Gambar 4.7 memperlihatkan perubahan densitas Amerisium selama 1 siklus. Terlihat bahwa pada semua model teras reaktor isotop Amerisium mengalami kenaikan dari densitas semula yang bernilai nol, yang disebabkan oleh adanya tangkapan neutron dari ^{240}Pu diikuti oleh peluruhan β dari ^{241}Pu . Sedangkan densitas seluruh nuklida baru hasil transmudasi bahan bakar lainnya dapat dilihat pada lampiran 4.



Gambar 4.7 Perubahan densitas ^{241}Am untuk model G1 sampai G5

4.4 Nilai *Burnup*

Nilai *burnup* ini menunjukkan banyaknya bahan bakar yang berfisi selama reaktor beroperasi. Perhitungan nilai *burnup* dinyatakan dalam bentuk persentase. Nilai *burnup* rata-rata yang dihasilkan dari simulasi semua model G1 sampai G5 dapat dilihat pada Gambar 4.8. 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 4.8 Nilai *burnup* untuk model G1 sampai G5

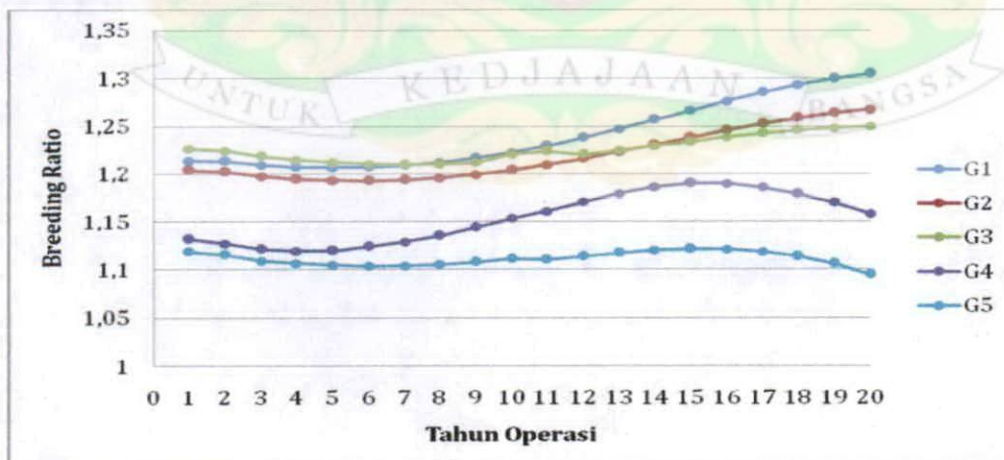
Nilai *burnup* yang diperoleh dari simulasi ini cukup baik pada model G5 dimana nilainya berkisar pada batasan harga yang diharapkan (1% sampai 10%) dalam waktu yang terlama yaitu 13 tahun. Hal ini sejalan dengan perolehan nilai

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.

Nilai *burnup* pada model teras G5 bertahan paling lama berkemungkinan disebabkan karena bentuk teras yang tinggi, 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.

4.5 Breeding Ratio (BR)

Nilai *breeding ratio* yang dihasilkan dari simulasi untuk seluruh model G1 sampai G5 dapat dilihat pada Gambar 4.9. Nilai-nilai BR yang dihasilkan ini sesuai seperti yang diharapkan untuk nilai *breeding ratio* pada reaktor pembiak cepat yaitu lebih besar dari satu ($BR > 1$).



Gambar 4.9 Nilai *breeding ratio* untuk model G1 sampai G5

Untuk keseluruhan model, dari grafik terlihat bahwa model G1 memberikan nilai *breeding ratio* yang paling baik selama 20 tahun karena terus mengalami kenaikan dan hampir tidak mengalami penurunan. Hal ini menunjukkan bahwa model teras yang pipih lebih efektif dalam aspek pembiakan bahan bakar, ini disebabkan karena interaksi neutron dengan reflektor lebih sedikit dibandingkan interaksi neutron dengan bahan fertil yang akan lebih banyak menghasilkan bahan fisil pada bentuk teras model G1 dibandingkan dengan model teras lainnya.

Terlihat dari Gambar 4.9 bahwa ada beberapa model reaktor yang mengalami penurunan nilai BR pada beberapa tahun, hal ini dikarenakan jumlah bahan fisil yang diproduksi untuk setiap tahun mengalami pengurangan karena penggunaannya sebagai bahan bakar reaktor.

4.6 Pengaruh Geometri Teras Terhadap Kinerja Reaktor

Dari hasil simulasi pada pembahasan 4.2 sampai 4.5 untuk keseluruhan model teras reaktor G1 hingga G5 perlu ditentukan model teras mana yang dapat beroperasi lebih lama (*long life*) tanpa pengisian ulang kembali bahan bakar, tetapi juga dapat menunjukkan parameter-parameter transmudasi bahan bakar yang baik sehingga memenuhi kriteria reaktor pembiak cepat.

Secara keseluruhan semua model teras G1 hingga G5 memberikan hasil seperti yang diharapkan pada reaktor pembiak cepat. Dalam tinjauan transmudasi bahan bakar, model G1 memberikan efektifitas yang paling baik, ditunjukkan dengan tingginya rasio pembiakan 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.

Lamanya waktu operasi reaktor ditentukan oleh tingkat kekritisannya reaktor yakni nilai faktor multiplikasi neutron (k_{eff}). Dalam hal ini model teras G5 memberikan waktu operasi yang paling lama yaitu 13 tahun. Meskipun nilai *burnup*, nilai *breeding ratio* dan transmudasi bahan bakar pada model lain lebih baik, namun hal tersebut tidak bisa menjadikan reaktor dapat beroperasi lebih lama karena berdasarkan nilai k_{eff} pada model lain tersebut, reaktor telah berada dalam keadaan superkritis yang bisa menyebabkan reaksi fisi berantai menjadi tidak terkendali dan membahayakan tingkat keamanan reaktor. Lamanya waktu pengoperasian reaktor tanpa *refueling* ini memberikan banyak keuntungan, diantaranya lebih sedikit campur tangan operator dalam pengoperasian reaktor, hal 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 nilai faktor multiplikasi neutron (k_{eff}), densitas nuklida, nilai *burnup* dan nilai *breeding ratio* akan berubah pula.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. 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, ($k_{eff}=1,05$), maka reaktor dengan model teras G5 ($Z \gg X$) memberikan waktu operasi yang paling lama yaitu 13 tahun.
2. Transmutasi bahan bakar dapat diamati dari perubahan densitas nuklida di dalam teras. Model teras G1 ($Z \ll X$) memberikan penurunan nilai densitas bahan fertil paling cepat karena pada teras yang pipih neutron lebih banyak berinteraksi dengan bahan fertil daripada interaksi neutron dengan bahan reflektor. Seiring dengan menurunnya bahan fertil, kenaikan bahan fisil terbesar diberikan oleh model teras G1. Untuk semua model teras, pada akhir siklus muncul beberapa nuklida baru hasil transmudasi bahan bakar reaktor.
3. Model teras reaktor yang paling tinggi (G5) memberikan nilai *burnup* yang baik (1%-10%) untuk waktu yang paling lama yaitu selama 13 tahun.

4. Model teras reaktor G1 ($Z \gg X$) memberikan nilai *breeding ratio* paling besar yaitu 1,3 yang sesuai dengan nilai yang diharapkan ($BR > 1$).
5. 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 .

5.2. Saran

1. Program simulasi yang digunakan masih perlu disempurnakan dalam menampilkan *output* maupun di beberapa bagian lain. Program simulasi diharapkan mampu memberikan hasil ataupun gambaran kinerja reaktor secara komprehensif untuk rancangan *Fast Breeder Reactor* (FBR).
2. Perlu dilakukan optimasi-optimasi neutronik lanjutan, misalnya dengan memvariasikan komposisi bahan bakar, fraksi volume dan lain-lain agar diperoleh desain teras yang optimal untuk FBR.
3. Perlu dilakukan simulasi lanjutan untuk mengetahui pengaruh model-model teras tersebut terhadap distribusi daya reaktor dan perubahan temperatur di dalam reaktor (analisis termohidrolik).

Taufik, M., 2002, *Analisa Keselamatan Reaktor Cepat dengan Daur Ulang Aktinida Proceedings of Computation in Nuclear Science & Teknologi XII*, Jakarta

Waltar, A.E. dan Reynolds, A.B., 1981, *Fast Breeder Reactor*, Pergamon Press, New York

www.worldnuclearassociation.com, (diakses : 10 Mei 2010)

www.lemhannas.go.id/id/content/view/16/82/, (diakses : 10 Mei 2010)

www.wikipedia.org/wiki/Actinide (diakses : 10 Mei 2010)

www.wikipedia.org/wiki/Transmutation (diakses : 10 Mei 2010)



Lampiran 1

Data Massa Atomik dan Densitas Nuklida

No.	Nuklida	Massa atomik	Densitas (g/cm ³)
1.	²³⁴ U	234,040	18,60
2.	²³⁵ U	235,044	18,65
3.	²³⁶ U	236,046	18,70
4.	²³⁷ U	237,049	18,80
5.	²³⁸ U	238,051	18,90
6.	²³⁹ U	239,054	18,90
7.	²³⁷ Np	237,048	18,70
8.	²³⁸ Np	238,051	18,80
9.	²³⁹ Np	239,053	18,90
10.	²⁴⁰ Np	240,056	18,90
11.	²³⁸ Pu	238,050	19,74
12.	²³⁹ Pu	239,052	19,74
13.	²⁴⁰ Pu	240,054	19,74
14.	²⁴¹ Pu	241,057	19,74
15.	²⁴² Pu	242,059	19,74
16.	²⁴³ Pu	243,062	19,74
17.	²⁴¹ Am	241,057	20,00
18.	²⁴² Am	242,060	20,00
19.	²⁴² Am	242,060	20,00
20.	²⁴³ Am	243,061	20,00
21.	²⁴⁴ Am	244,064	20,00
22.	²⁴² Cm	242,059	20,00
23.	²⁴³ Cm	243,061	20,00
24.	²⁴⁴ Cm	244,063	20,00
25.	²⁴⁵ Cm	245,065	20,00
26.	²⁴⁶ Cm	246,067	20,00
27.	²⁴⁷ Cm	247,070	20,00
28.	²⁴⁸ Cm	249,072	20,00

```

18.9  19.74  7.783  2.1824  19.74  14.3  14.2
struc1: Nat. Uranium
  2  0.007  5  0.993
struc2: Plutonium-equilibrium composition
  11 0.0234  12 0.6536  13 0.2724  14 0.0281  15 0.0225
struc3: HT9
  32 0.0021  33 0.00009  34 0.00031  35 0.0021  36 0.00002  37 0.0033  38 0.121  39
0.005  40 0.844473  41 0.0057  42 0.0004  43 0.0103  44 0.0052  45 0.000007
struc4: B4C
  32 0.2308  45 0.7692
struc5: Plutonium-equilibrium composition
  11 0.00  12 1.0  13 0.0  14 0.0  15 0.0
struc6: Nat. Uranium
  2  0.00658  5  0.93412  31 0.05929
struc7: Plutonium-equilibrium composition
  11 0.02202  12 0.61508  13 0.25634  14 0.02644  15 0.02117  31 0.05894
composition of group matt  1 = blanket =====
45.0000  15.0000  40.00
%weight of UN
-6 1.0
% weight in structure : _C_N_Al_Si_Ti_V_Cr_Mn_Fe_Ni_Cu_Mo_W_B
-3 1.0
% weight of coolant : Pb-Bi
  46 0.445  47 0.555
composition of group matt  2 = blanket =====
45.0000  15.0000  40.00
%weight of UN
-6 1.0
% weight in structure : _C_N_Al_Si_Ti_V_Cr_Mn_Fe_Ni_Cu_Mo_W_B
-3 1.0 41 0.00
% weight of coolant : Pb-Bi
  46 0.445  47 0.555
composition of group matt  3 = core =====
45.0000  15.0000  40.00
%weight of UN-PuN
-6 0.877  -7 0.1283
% weight in structure : _C_N_Al_Si_Ti_V_Cr_Mn_Fe_Ni_Cu_Mo_W_B
-3 1.0
% weight of coolant : Pb-Bi
  46 0.446  47 0.554
composition of group matt  4 = core =====
45.0000  15.0000  40.00
%weight of UN
-6 0.860  -7 0.140
% weight in structure : _C_N_Al_Si_Ti_V_Cr_Mn_Fe_Ni_Cu_Mo_W_B
-3 1.00 41 0.00
% weight of coolant : Pb-Bi
  46 0.445  47 0.555
composition of group matt  5 = core =====
45.0000  15.0000  40.00
%weight of UN-PuN
-6 0.866  -7 0.134
% weight in structure : _C_N_Al_Si_Ti_V_Cr_Mn_Fe_Ni_Cu_Mo_W_B
-3 1.0
% weight of coolant : Pb-Bi
  46 0.445  47 0.555
composition of group matt  6 = core =====
45.0000  15.0000  40.00
%weight of UN
-6 0.861  -7 0.139
% weight in structure : _C_N_Al_Si_Ti_V_Cr_Mn_Fe_Ni_Cu_Mo_W_B
-3 1.00 41 0.00
% weight of coolant : Pb-Bi
  46 0.445  47 0.555
composition of group matt  7 = core =====

```

```

45.0000 15.0000 40.00
%weight of UN-PuN
-6 0.832 -7 0.138
% weight in structure : C_N_Al_Si_Ti_V_Cr_Mn_Fe_Ni_Cu_Mo_W_B
-3 1.0
% weight of coolant : Pb-Bi
46 0.445 47 0.555
composition of group matt 8 = reflector =====
0. 0. 100.00
%weight of UN
-6 1.0
% weight in structure : C_N_Al_Si_Ti_V_Cr_Mn_Fe_Ni_Cu_Mo_W_B
-3 1.0
% weight of coolant : Pb-Bi
46 0.445 47 0.555
composition of group matt 9 = reflector =====
0. 0. 100.00
%weight of UN
-6 1.0
% weight in structure : C_N_Al_Si_Ti_V_Cr_Mn_Fe_Ni_Cu_Mo_W_B
-3 1.0
% weight of coolant : Pb-Bi
46 0.445 47 0.555
composition of group matt 10 = reflector =====
0. 0. 100.00
%weight of UN
-6 1.0
% weight in structure : C_N_Al_Si_Ti_V_Cr_Mn_Fe_Ni_Cu_Mo_W_B
-3 1.0
% weight of coolant : Pb-Bi
46 0.445 47 0.555
composition of group matt 11 = reflector =====
0. 0. 100.00
%weight of UN
-6 1.0
% weight in structure : C_N_Al_Si_Ti_V_Cr_Mn_Fe_Ni_Cu_Mo_W_B
-3 1.0
% weight of coolant : Pb-Bi
46 0.445 47 0.555
composition of group matt 12 = reflector =====
0. 0. 100.00
%weight of UN
-6 1.0
% weight in structure : C_N_Al_Si_Ti_V_Cr_Mn_Fe_Ni_Cu_Mo_W_B
-3 1.0
% weight of coolant : Pb-Bi
46 0.445 47 0.555
composition of group matt 13 = Na reflector =====
0. 0. 100.00
%weight of UN
-6 1.0
% weight in structure : C_N_Al_Si_Ti_V_Cr_Mn_Fe_Ni_Cu_Mo_W_B
-3 1.0
% weight of coolant : Pb-Bi
46 0.445 47 0.555
modeg(>0 arho(i,1)from inp.) std(smear*theoretical dens)
1 0 0 0.90
((arho(i,j),i=1,nrgmat),j=1,ncomp)
14.2 14.2 14.21 14.21 14.212 14.212 14.212 14.2 14.2 14.2 14.2 14.2 14.2 15.9 15.9
15.9 15.9 15.9 15.9 15.9 15.9 15.9 15.9 15.9 15.9 15.9 15.9 15.9 15.9 15.9 15.9 15.9
15.9 15.9 15.9 15.9 15.9 15.9 15.9 15.9 15.9
13-density for each nuclide r1: U234 U235 U236 U237 U238 U239 Np237 Np238 Np239 Np240
Pu238 Pu239 Pu240 Pu241 Pu242 Pu243 Am241Am242 Am242mAm243 Am244 Cm242 Cm243 Cm244
Cm245 Cm246 Cm247 Cm248 Cm249 FP N-15 C N Al Si Ti V Cr Mn Fe Ni Cu Mo W B Pb Bi

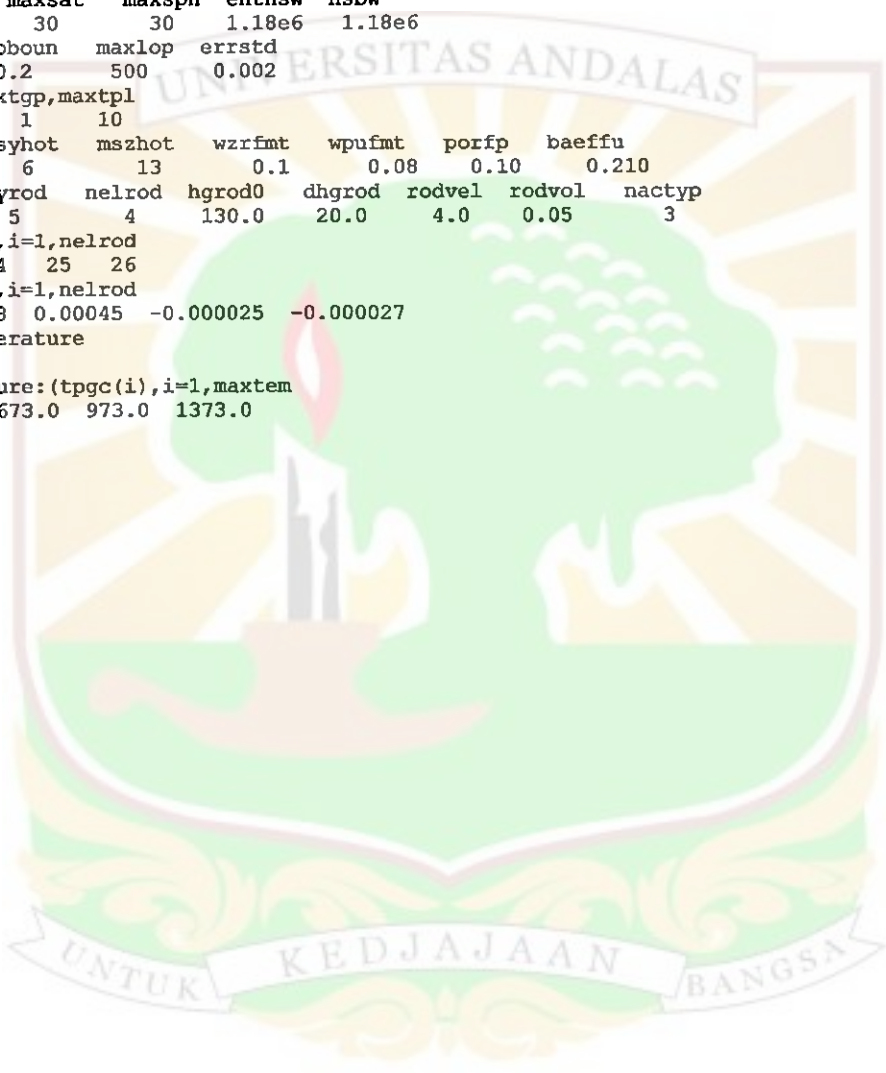
```



```

(tpsat(i),i=1,maxsvp)
285.8 294.98
(tpshv(i),i=1,maxsvt)
200.0 220.0 240.0 260.0 280.0 300.0 320.0 340.0 360.0 380.0
400.0 420.0 440.0 460.0 480.0 500.0 520.0 540.0 560.0 580.0
600.0 620.0 640.0 660.0 680.0 700.0 720.0 740.0 760.0 780.0
800.0 820.0 840.0 860.0 880.0 900.0 920.0 940.0 960.0 980.0
maxz wp ws ro ri pitch tpin tsin ztihx nbundl mxithx err
80 4500.0 100.0 0.0100 0.0085 0.0300 550.0 225.0 4.0 500 100 1.0e-3
psys csf sftens enthfg aboun bboun tsat hshv
7.0e6 0.0133 55.0 1.5e6 1.5 2.5 286.00 3.01e6
maxsub maxsat maxsph enthsw hsbw
20 30 30 1.18e6 1.18e6
daboun dbboun maxlop errstd
0.2 0.2 500 0.002
maxtcl,maxtgp,maxtpl
3 1 10
msxhot msyhot mszhot wzrfmt wpufmt porfp baeffu
6 6 13 0.1 0.08 0.10 0.210
nxrod nyrod nelrod hgrod0 dhgrod rodvel rodvol nactyp
5 5 4 130.0 20.0 4.0 0.05 3
nelth(i),i=1,nelrod
11 24 25 26
xnrod(i),i=1,nelrod
0.00088 0.00045 -0.000025 -0.000027
max-temperature
4
temperature:(tpgc(i),i=1,maxtem
473.0 673.0 973.0 1373.0

```



Lampiran 3

File input data penampang lintang mikroskopik

Nama file : Lbn0600.mic

```

Region
1 U-234 core          W00N55XX LBN10924      pbn008.mic
  4.3221E+00  1.3073E-01  1.5108E+00  1.4213E+00  4.2688E+00
  4.9707E+00  2.9090E-01  1.3131E+00  6.0651E-01  3.3356E+00
  6.4488E+00  2.3318E-01  5.2368E-01  2.8544E-01  1.2797E+00
  9.1265E+00  2.0256E-01  5.8169E-02  3.1782E-01  1.3936E-01
  1.1664E+01  3.5722E-01  2.4340E-02  2.4796E-01  5.7930E-02
  1.3684E+01  6.4707E-01  1.0201E-02  9.1495E-02  2.4210E-02
  1.7309E+01  1.3950E+00  1.0975E-02  1.1110E-02  2.6022E-02
  2.8120E+01  7.7983E+00  2.2612E-01  0.0000E+00  5.3591E-01
  0.00000  0.64458  0.57198  0.17089  0.02929  0.00396  0.00060  0.00000
  0.00000  0.00000  0.45310  0.12400  0.02506  0.00383  0.00053  0.00000
  0.00000  0.00000  0.00000  0.28503  0.00003  0.00028  0.00010  0.00000
  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000  0.31661  0.00102  0.00019  0.00000
  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000  0.22211  0.02577  0.00008
  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000  0.09149  0.00000
  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000  0.01111
  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000
2          1  925          U-235          lbnbc600.mic
  4.4170E+00  1.4730E-02  1.2269E+00  1.8120E+00  3.5142E+00
  4.8475E+00  8.8670E-02  1.2265E+00  1.0914E+00  3.1670E+00
  6.2929E+00  1.7850E-01  1.1703E+00  6.3196E-01  2.9040E+00
  8.9784E+00  3.4273E-01  1.3652E+00  3.9271E-01  3.3594E+00
  1.1672E+01  5.6084E-01  1.7085E+00  1.7391E-01  4.1389E+00
  1.4041E+01  7.7437E-01  2.1590E+00  9.6981E-02  5.2244E+00
  1.8012E+01  1.7418E+00  4.1046E+00  9.1766E-03  9.9306E+00
  3.5869E+01  7.1843E+00  1.5824E+01  0.0000E+00  3.8080E+01
  0.00000  0.74062  0.77485  0.24665  0.04316  0.00584  0.00091  0.00000
  0.00000  0.00000  0.66502  0.35112  0.06508  0.00881  0.00137  0.00000
  0.00000  0.00000  0.00000  0.56445  0.05448  0.01058  0.00243  0.00001
  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000  0.34248  0.04291  0.00728  0.00004
  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000  0.14924  0.02443  0.00024
  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000  0.09698  0.00000
  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000  0.00918
  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000
3 U-236 core          W00N55XX LBN10926      pbn008.mic
  4.4030E+00  3.1451E-02  9.2038E-01  2.1343E+00  2.6474E+00
  5.0420E+00  1.3487E-01  5.5835E-01  1.3463E+00  1.4331E+00
  6.5279E+00  1.8310E-01  2.1354E-02  3.2963E-01  5.2540E-02
  9.3868E+00  1.9471E-01  2.6750E-03  3.2254E-01  6.4100E-03
  1.1794E+01  3.4799E-01  2.9040E-03  2.2347E-01  6.9100E-03
  1.3950E+01  6.1221E-01  3.8880E-03  9.2484E-02  9.2280E-03
  1.7564E+01  1.2148E+00  1.0682E-02  4.6870E-03  2.5323E-02
  3.3343E+01  6.7661E+00  1.1117E-01  0.0000E+00  2.6348E-01
  0.00000  0.79562  0.94086  0.32994  0.05876  0.00795  0.00121  0.00000
  0.00000  0.00000  0.89332  0.36900  0.06941  0.01224  0.00228  0.00000
  0.00000  0.00000  0.00000  0.31293  0.01272  0.00315  0.00083  0.00000
  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000  0.32210  0.00037  0.00007  0.00000
  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000  0.19888  0.02453  0.00007
  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000  0.09248  0.00000
  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000  0.00469
  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000
4 Np-237 as U237 core          W00N55XX LBN10pbn008.mic
  4.0184E+00  2.0256E-02  1.6379E+00  1.2550E+00  5.0300E+00
  4.8523E+00  1.2381E-01  1.5202E+00  1.0523E+00  4.1517E+00
  6.4577E+00  3.8673E-01  4.6238E-01  8.3507E-01  1.2141E+00

```

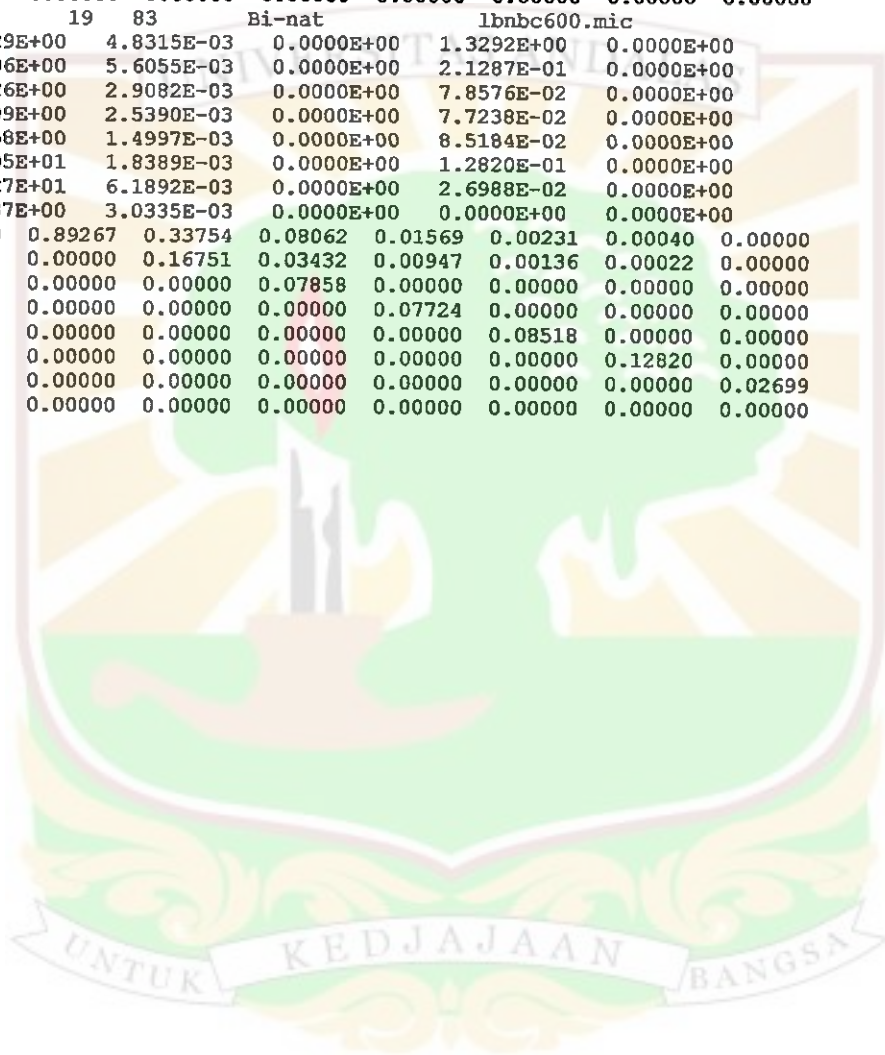
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.30973	0.00014	0.00003	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.21225	0.02158	0.00006
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.11507	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.02370
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
16 Am-243 as Pu243 core W00N55XX LBN1pbn008.mic							
4.1874E+00	1.5532E-02	1.5051E+00	1.4734E+00	5.7204E+00			
5.1403E+00	1.5896E-01	1.1777E+00	1.5597E+00	4.0454E+00			
6.8014E+00	4.2136E-01	6.6831E-02	1.0548E+00	2.2137E-01			
9.8851E+00	7.7797E-01	1.0617E-02	6.2942E-01	3.4424E-02			
1.2309E+01	1.5740E+00	6.7410E-03	2.3980E-01	2.1707E-02			
1.3804E+01	2.3578E+00	7.3080E-03	7.9704E-02	2.3484E-02			
1.6817E+01	4.4209E+00	1.3540E-02	6.3700E-03	4.3470E-02			
3.1230E+01	1.7462E+01	5.3603E-02	0.0000E+00	1.7204E-01			
0.00000	0.51912	0.66515	0.23477	0.04601	0.00715	0.00116	0.00000
0.00000	0.00000	1.09350	0.37659	0.07577	0.01189	0.00196	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.88017	0.14488	0.02538	0.00431	0.00001
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.53093	0.08876	0.00972	0.00001
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.19466	0.04498	0.00017
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.07970	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00637
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
17 Am-241 core W00N55XX LBN10951 pbn008.mic							
4.1800E+00	1.7471E-02	1.8682E+00	1.1073E+00	7.0427E+00			
5.0929E+00	1.9329E-01	1.5267E+00	1.1767E+00	5.2414E+00			
6.7123E+00	5.3673E-01	1.4953E-01	7.8877E-01	4.9607E-01			
9.7685E+00	9.5605E-01	2.2402E-02	4.0576E-01	7.2905E-02			
1.2227E+01	1.6076E+00	1.4383E-02	1.9273E-01	4.6519E-02			
1.3865E+01	2.4603E+00	1.5929E-02	8.2491E-02	5.1409E-02			
1.7381E+01	4.9501E+00	2.7934E-02	5.7010E-03	9.0071E-02			
3.4849E+01	2.0923E+01	1.1152E-01	0.0000E+00	3.5950E-01			
0.00000	0.43818	0.47929	0.15523	0.02935	0.00450	0.00072	0.00000
0.00000	0.00000	0.82470	0.28169	0.05956	0.00927	0.00152	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.67847	0.09878	0.00987	0.00163	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.35965	0.04065	0.00545	0.00001
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.16721	0.02544	0.00008
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.08249	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00570
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
18 Am-242 core W00N55XX LBN10952 pbn008.mic							
4.1822E+00	2.8995E-02	1.7637E+00	1.3908E+00	6.8835E+00			
4.9520E+00	2.7459E-01	1.5443E+00	1.1710E+00	5.4076E+00			
6.4551E+00	4.2170E-01	1.9726E+00	2.5073E-01	6.6205E+00			
9.3267E+00	3.7532E-01	2.6200E+00	1.1580E-01	8.6643E+00			
1.2135E+01	4.8671E-01	2.9440E+00	8.8243E-02	9.6759E+00			
1.4484E+01	6.7933E-01	3.5616E+00	7.1415E-02	1.1678E+01			
1.9090E+01	1.4013E+00	6.3855E+00	4.1010E-03	2.0916E+01			
3.9960E+01	5.8399E+00	2.2042E+01	0.0000E+00	7.2178E+01			
0.00000	0.51099	0.62008	0.21146	0.04092	0.00634	0.00102	0.00000
0.00000	0.00000	0.69436	0.37159	0.08884	0.01393	0.00230	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.21436	0.02951	0.00597	0.00089	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.11220	0.00306	0.00055	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.08096	0.00725	0.00003
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.07141	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00410
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
19 Am-242m core W00N55XX LBN10950 pbn008.mic							
4.1764E+00	8.9290E-03	1.7772E+00	1.3919E+00	6.9211E+00			
4.9539E+00	1.3836E-01	1.6816E+00	1.1670E+00	5.8890E+00			
6.4601E+00	2.3951E-01	2.0980E+00	3.8926E-01	7.0430E+00			
9.3255E+00	3.5604E-01	2.5156E+00	1.7699E-01	8.3195E+00			
1.2132E+01	5.5451E-01	2.8123E+00	7.8994E-02	9.2439E+00			
1.4629E+01	7.6997E-01	3.4227E+00	7.2838E-02	1.1223E+01			
1.8727E+01	1.2979E+00	6.0595E+00	4.0530E-03	1.9848E+01			
3.6092E+01	4.5514E+00	1.9660E+01	0.0000E+00	6.4379E+01			

0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.05536	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00464
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
35	10	14	Si-nat		lbnbc600.mic		
1.4635E+00	1.8982E-02		0.0000E+00		6.5393E-01	0.0000E+00	
2.1453E+00	5.7684E-04		0.0000E+00		4.5966E-01	0.0000E+00	
2.7921E+00	4.2369E-04		0.0000E+00		3.0505E-01	0.0000E+00	
4.4209E+00	6.1343E-04		0.0000E+00		3.5740E-02	0.0000E+00	
2.2450E+00	1.9689E-03		0.0000E+00		7.1339E-02	0.0000E+00	
1.7988E+00	1.1914E-03		0.0000E+00		1.2805E-01	0.0000E+00	
2.0873E+00	5.3078E-03		0.0000E+00		1.3156E-02	0.0000E+00	
2.1184E+00	1.1486E-03		0.0000E+00		0.0000E+00	0.0000E+00	
0.00000	0.52544	0.12554	0.00248	0.00040	0.00006	0.00001	0.00000
0.00000	0.00000	0.44373	0.01306	0.00245	0.00036	0.00006	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.30505	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.03574	0.00000	0.00000	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.07134	0.00000	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.12805	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.01316
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
36	Ti-22	core	W00N55XX	LBN10022		pbn008.mic	
2.3148E+00	8.1980E-03		0.0000E+00		1.0457E+00	0.0000E+00	
2.2956E+00	3.0560E-03		0.0000E+00		3.8967E-01	0.0000E+00	
2.1305E+00	4.0510E-03		0.0000E+00		1.2840E-01	0.0000E+00	
2.0772E+00	6.1030E-03		0.0000E+00		8.3951E-02	0.0000E+00	
8.9563E+00	7.5560E-03		0.0000E+00		3.6356E-01	0.0000E+00	
5.4158E+01	6.0916E-02		0.0000E+00		3.1468E+00	0.0000E+00	
2.5560E+01	5.9326E-02		0.0000E+00		8.1240E-03	0.0000E+00	
4.3424E+00	5.4762E-02		0.0000E+00		0.0000E+00	0.0000E+00	
0.00000	0.82328	0.15539	0.05093	0.01293	0.00268	0.00050	0.00000
0.00000	0.00000	0.32076	0.05685	0.00997	0.00180	0.00029	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.12840	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.08081	0.00264	0.00049	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.36356	0.00000	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	3.14677	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00812
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
37	V-23	core	W00N55XX	LBN10023		pbn008.mic	
2.3225E+00	2.2630E-03		0.0000E+00		9.5070E-01	0.0000E+00	
2.9264E+00	1.9960E-03		0.0000E+00		4.1201E-01	0.0000E+00	
3.5129E+00	3.0340E-03		0.0000E+00		3.8210E-01	0.0000E+00	
6.1556E+00	6.0840E-03		0.0000E+00		2.7824E-01	0.0000E+00	
6.9286E+00	1.6255E-02		0.0000E+00		1.8917E-01	0.0000E+00	
2.0389E+01	3.4603E-02		0.0000E+00		1.0698E+00	0.0000E+00	
7.5228E+01	1.2755E-01		0.0000E+00		6.9820E-03	0.0000E+00	
4.3870E+00	4.1749E-02		0.0000E+00		0.0000E+00	0.0000E+00	
0.00000	0.58453	0.30977	0.04691	0.00802	0.00126	0.00020	0.00000
0.00000	0.00000	0.36672	0.03314	0.01010	0.00178	0.00029	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.35112	0.02555	0.00464	0.00079	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.27824	0.00000	0.00000	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.18917	0.00000	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1.06979	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00698
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
38	11	24	Cr-nat		lbnbc600.mic		
2.0228E+00	8.3080E-03		0.0000E+00		1.0046E+00	0.0000E+00	
2.4116E+00	3.0825E-03		0.0000E+00		2.9611E-01	0.0000E+00	
2.6894E+00	3.3591E-03		0.0000E+00		1.1861E-01	0.0000E+00	
4.4336E+00	4.1758E-03		0.0000E+00		1.9513E-01	0.0000E+00	
4.2471E+00	5.5106E-03		0.0000E+00		2.3193E-01	0.0000E+00	
2.3731E+00	8.0522E-03		0.0000E+00		7.8270E-02	0.0000E+00	
1.1761E+01	3.6023E-02		0.0000E+00		8.0847E-03	0.0000E+00	
2.5852E+00	2.2902E-02		0.0000E+00		0.0000E+00	0.0000E+00	
0.00000	0.76563	0.17340	0.05145	0.01185	0.00195	0.00034	0.00000
0.00000	0.00000	0.24533	0.03943	0.00935	0.00167	0.00033	0.00000

0.00000	0.00000	0.00000	0.11683	0.00118	0.00049	0.00011	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.19513	0.00000	0.00000	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.23193	0.00000	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.07827	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00808
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
39	12	25	Mn-nat		lbnbc600.mic		
2.3061E+00	2.9288E-03	0.0000E+00	0.0000E+00	1.1186E+00	0.0000E+00		
2.6317E+00	2.4886E-03	0.0000E+00	0.0000E+00	4.3134E-01	0.0000E+00		
3.1311E+00	4.5623E-03	0.0000E+00	0.0000E+00	2.8673E-01	0.0000E+00		
4.5174E+00	8.4636E-03	0.0000E+00	0.0000E+00	2.8052E-01	0.0000E+00		
7.6817E+00	1.6187E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	2.4199E-01	0.0000E+00		
1.3966E+01	3.5732E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	1.0711E-01	0.0000E+00		
4.9749E+01	1.4468E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	6.9081E-02	0.0000E+00		
1.1267E+02	1.5568E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00		
0.00000	0.77595	0.25629	0.07108	0.01188	0.00269	0.00067	0.00000
0.00000	0.00000	0.38711	0.03618	0.00662	0.00123	0.00020	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.28673	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.27249	0.00681	0.00122	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.24199	0.00000	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.10711	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.06908
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
40	13	26	Fe-nat		lbnbc600.mic		
2.1524E+00	1.6222E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	9.1690E-01	0.0000E+00		
2.0752E+00	3.5668E-03	0.0000E+00	0.0000E+00	4.6302E-01	0.0000E+00		
2.3065E+00	5.5740E-03	0.0000E+00	0.0000E+00	1.1921E-01	0.0000E+00		
2.6334E+00	5.3270E-03	0.0000E+00	0.0000E+00	1.1054E-01	0.0000E+00		
3.5601E+00	6.1958E-03	0.0000E+00	0.0000E+00	1.4949E-01	0.0000E+00		
4.4166E+00	9.0551E-03	0.0000E+00	0.0000E+00	1.1601E-01	0.0000E+00		
6.9610E+00	1.8493E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	2.6088E-02	0.0000E+00		
9.6408E+00	2.2428E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00		
0.00000	0.70681	0.15440	0.04724	0.00711	0.00107	0.00025	0.00000
0.00000	0.00000	0.32621	0.10862	0.02631	0.00186	0.00002	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.11854	0.00056	0.00009	0.00002	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.11038	0.00013	0.00003	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.14949	0.00000	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.11591	0.00010
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.02609
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
41	14	28	Ni-nat		lbnbc600.mic		
2.2032E+00	1.8684E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	8.3246E-01	0.0000E+00		
2.5996E+00	1.7351E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	2.5183E-01	0.0000E+00		
3.6328E+00	9.8760E-03	0.0000E+00	0.0000E+00	1.9901E-01	0.0000E+00		
6.2069E+00	1.6939E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	1.9432E-01	0.0000E+00		
8.1854E+00	2.0387E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	1.8351E-01	0.0000E+00		
2.6030E+01	4.0452E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	2.0096E+00	0.0000E+00		
2.3869E+01	5.5929E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	4.5762E-02	0.0000E+00		
1.6628E+01	3.5618E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00		
0.00000	0.63447	0.14955	0.04153	0.00613	0.00069	0.00010	0.00000
0.00000	0.00000	0.22498	0.02470	0.00184	0.00026	0.00004	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.19848	0.00039	0.00013	0.00001	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.19427	0.00002	0.00003	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.18293	0.00058	0.00001
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	2.00962	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.04576
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
42	Cu-29	core	W00N55XX	LBN10029	pbn008.mic		
2.3934E+00	4.4317E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	1.3213E+00	0.0000E+00		
2.7339E+00	1.4123E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	5.4808E-01	0.0000E+00		
3.8191E+00	1.3888E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	1.8106E-01	0.0000E+00		
6.4686E+00	1.3721E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	1.7822E-01	0.0000E+00		
7.5038E+00	1.6217E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	2.0259E-01	0.0000E+00		
9.2719E+00	6.6261E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	1.9879E-01	0.0000E+00		
1.3701E+01	2.0612E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	7.6330E-03	0.0000E+00		

1.0125E+01	1.9054E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
0.00000	0.83345	0.32489	0.11381	0.03878	0.00870	0.00171	0.00000
0.00000	0.00000	0.40678	0.11172	0.02359	0.00504	0.00095	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.17805	0.00245	0.00048	0.00008	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.17822	0.00000	0.00000	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.20259	0.00000	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.19879	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00763
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
43	15	42	Mo-nat	lbnbc600.mic			
2.8920E+00	1.8514E-02	0.0000E+00	1.5485E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
3.9229E+00	3.4437E-02	0.0000E+00	8.8925E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
5.9105E+00	5.4245E-02	0.0000E+00	2.7731E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
7.8123E+00	6.0446E-02	0.0000E+00	1.8037E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
8.3551E+00	1.0095E-01	0.0000E+00	1.4424E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
8.3808E+00	2.0088E-01	0.0000E+00	1.5819E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
9.0375E+00	4.7016E-01	0.0000E+00	1.1674E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
1.1913E+01	1.8106E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
0.00000	0.89777	0.49586	0.13243	0.01952	0.00252	0.00038	0.00000
0.00000	0.00000	0.61669	0.22553	0.04289	0.00377	0.00037	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.26075	0.01355	0.00255	0.00046	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.17749	0.00247	0.00042	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.14424	0.00000	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.15819	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.01167
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
44	16	74	W-nat	lbnbc600.mic			
3.7721E+00	1.7698E-02	0.0000E+00	2.4665E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
4.6083E+00	5.7160E-02	0.0000E+00	1.3609E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
5.3414E+00	6.0957E-02	0.0000E+00	5.6960E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
6.8653E+00	9.8729E-02	0.0000E+00	3.3623E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
9.5477E+00	1.9953E-01	0.0000E+00	1.4575E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
1.3339E+01	2.6042E-01	0.0000E+00	1.4128E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
2.0050E+01	6.7730E-01	0.0000E+00	3.5724E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
4.1132E+01	5.6490E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
0.00000	1.32242	0.77986	0.28551	0.06552	0.01121	0.00199	0.00001
0.00000	0.00000	0.99704	0.26701	0.08029	0.01402	0.00255	0.00001
0.00000	0.00000	0.00000	0.54930	0.01715	0.00268	0.00048	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.28974	0.04000	0.00648	0.00001
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.12710	0.01851	0.00014
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.14128	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.03572
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
45	17	105	B-10	lbnbc600.mic			
1.6165E+00	3.3777E-01	0.0000E+00	6.1017E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
2.1457E+00	3.5203E-01	0.0000E+00	7.1004E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
3.9237E+00	7.4920E-01	0.0000E+00	8.4697E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
4.6173E+00	1.4408E+00	0.0000E+00	5.4384E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
4.7451E+00	2.3395E+00	0.0000E+00	4.0558E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
5.8530E+00	3.7768E+00	0.0000E+00	4.0600E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
1.0851E+01	8.8631E+00	0.0000E+00	3.7671E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
3.5419E+01	3.3433E+01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
0.00000	0.57673	0.02632	0.00596	0.00096	0.00016	0.00004	0.00000
0.00000	0.00000	0.69635	0.01024	0.00288	0.00052	0.00005	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.84667	0.00003	0.00016	0.00011	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.54384	0.00000	0.00000	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.40558	0.00000	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.40600	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.03767
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
46	18	82	Pb-nat	lbnbc600.mic			
4.1402E+00	9.6012E-04	0.0000E+00	1.0963E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
4.1430E+00	2.6747E-03	0.0000E+00	2.7563E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
4.8058E+00	2.9761E-03	0.0000E+00	8.1901E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
7.0600E+00	3.7821E-03	0.0000E+00	7.2820E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00

9.2431E+00	3.3735E-03	0.0000E+00	8.2950E-02	0.0000E+00			
9.1921E+00	5.5565E-03	0.0000E+00	9.0096E-02	0.0000E+00			
1.0681E+01	7.4062E-03	0.0000E+00	9.0600E-03	0.0000E+00			
1.1216E+01	2.0195E-03	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00			
0.00000	0.80795	0.22495	0.05239	0.00924	0.00146	0.00026	0.00000
0.00000	0.00000	0.21782	0.04681	0.00943	0.00144	0.00013	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.07807	0.00282	0.00081	0.00020	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.07282	0.00000	0.00000	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.08295	0.00000	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.09010	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00906
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
47	19	83	Bi-nat	lbnbc600.mic			
4.0429E+00	4.8315E-03	0.0000E+00	1.3292E+00	0.0000E+00			
4.1506E+00	5.6055E-03	0.0000E+00	2.1287E-01	0.0000E+00			
5.5026E+00	2.9082E-03	0.0000E+00	7.8576E-02	0.0000E+00			
7.3709E+00	2.5390E-03	0.0000E+00	7.7238E-02	0.0000E+00			
9.3758E+00	1.4997E-03	0.0000E+00	8.5184E-02	0.0000E+00			
1.1505E+01	1.8389E-03	0.0000E+00	1.2820E-01	0.0000E+00			
1.0927E+01	6.1892E-03	0.0000E+00	2.6988E-02	0.0000E+00			
8.0137E+00	3.0335E-03	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00			
0.00000	0.89267	0.33754	0.08062	0.01569	0.00231	0.00040	0.00000
0.00000	0.00000	0.16751	0.03432	0.00947	0.00136	0.00022	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.07858	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.07724	0.00000	0.00000	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.08518	0.00000	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.12820	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.02699
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000



Lampiran 4

File input data spektrum fisi

Nama file : **pbnit00.fis**

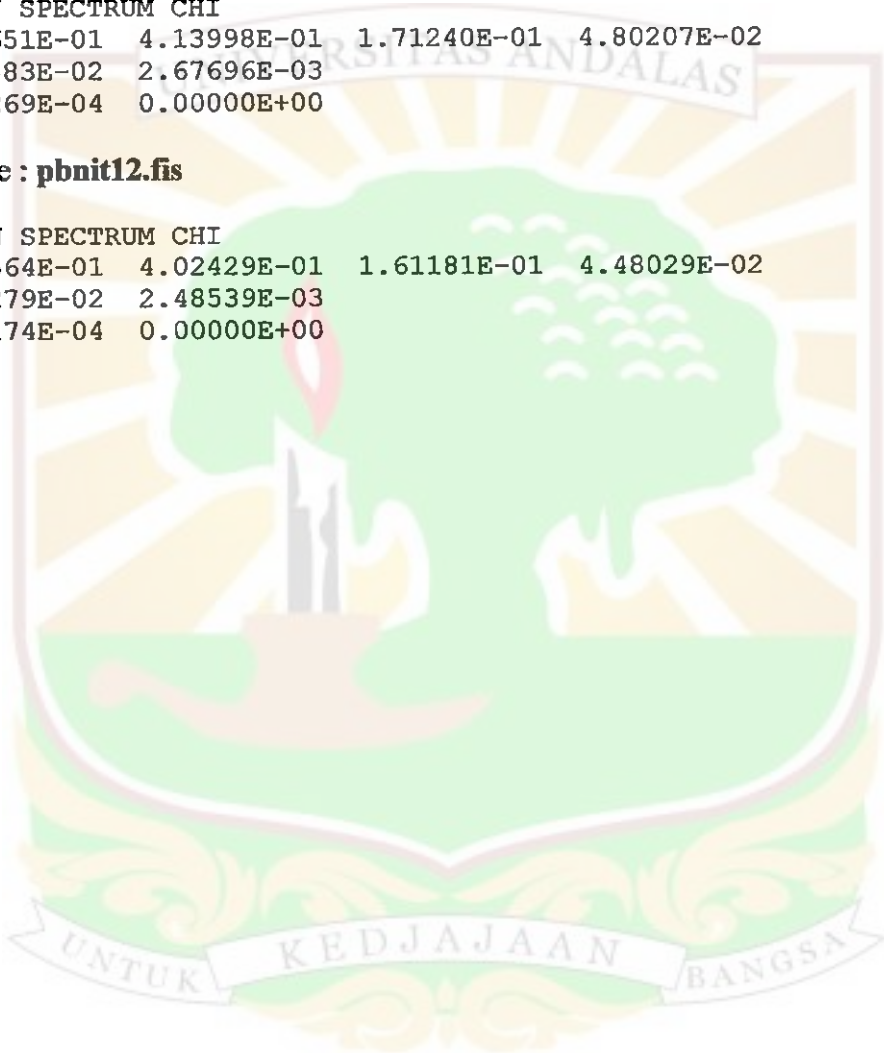
FISSION SPECTRUM CHI

3.51651E-01	4.13998E-01	1.71240E-01	4.80207E-02
1.16483E-02	2.67696E-03		
7.65269E-04	0.00000E+00		

Nama file : **pbnit12.fis**

FISSION SPECTRUM CHI

3.77564E-01	4.02429E-01	1.61181E-01	4.48029E-02
1.08279E-02	2.48539E-03		
7.10174E-04	0.00000E+00		



Lampiran 5

Hasil simulasi program salah satu model reaktor

Nama file : buG3.out

Tahun	K-eff	Breeding Ratio	Avr. BurnUp	Peak BurnUp
1	1.0001190942	1.2261700247	1.1252344958	7.2444867556
2	1.0177642519	1.2238123841	2.2092596556	13.7674602412
3	1.0353180040	1.2183579530	3.2522524076	19.5179228669
4	1.0522179385	1.2145024283	4.2556932384	24.5167739328
5	1.0685269728	1.2118413396	5.2211903746	28.8238359266
6	1.0842696920	1.2102403027	6.1504742247	32.5151250172
7	1.0994934481	1.2096713307	7.0451339096	35.6692157034
8	1.1142301474	1.2101279566	7.9066776713	38.3588963464
9	1.1285327431	1.2115819560	8.7364460061	40.6488594030
10	1.1396539134	1.2206145995	9.5584693791	42.5464517807
11	1.1537680031	1.2232732505	10.3509255864	44.1640664489
12	1.1710078780	1.2200472680	11.0892853850	45.5753030794
13	1.1841734931	1.2244365978	11.7982468630	46.7701130122
14	1.1972374865	1.2291389987	12.4778538342	47.7807640251
15	1.2102548959	1.2338281535	13.1278882458	48.6351849183
16	1.2232619867	1.2382625363	13.7479352132	49.3574771131
17	1.2362570110	1.2422372202	14.3378056578	49.9684104159
18	1.2492510974	1.2455449001	14.8972565665	50.4855973227
19	1.2622447847	1.2479724326	15.4261391439	50.9240103889
20	1.2752207851	1.2493854890	15.9245841348	51.2963051919



Nuklida	Densitas Awal	Tahun ke 1	Tahun ke 2	Tahun ke 3	Tahun ke 4	Tahun ke 5	Tahun ke 6	Tahun ke 7	Tahun ke 8
²³⁴ U	0	7,91E+22	1,49E+23	2,12E+23	2,70E+23	3,25E+23	3,79E+23	4,33E+23	4,87E+23
²³⁵ U	2,10E+25	1,86E+25	1,67E+25	1,52E+25	1,39E+25	1,28E+25	1,20E+25	1,12E+25	1,06E+25
²³⁶ U	0	1,53E+24	2,71E+24	3,63E+24	4,37E+24	4,95E+24	5,43E+24	5,81E+24	6,13E+24
²³⁷ U	0	1,27E+22	1,36E+22	1,41E+22	1,42E+22	1,40E+22	1,37E+22	1,33E+22	1,28E+22
²³⁸ U	2,95E+27	2,90E+27	2,86E+27	2,83E+27	2,79E+27	2,76E+27	2,73E+27	2,70E+27	2,67E+27
²³⁹ U	0	0	0	0	0	0	0	0	0
²³⁷ Np	0	3,97E+23	8,01E+23	1,19E+24	1,55E+24	1,88E+24	2,18E+24	2,46E+24	2,72E+24
²³⁸ Np	0	5,14E+20	1,04E+21	1,52E+21	1,94E+21	2,29E+21	2,57E+21	2,79E+21	2,96E+21
²³⁹ Np	0	4,05E+23	3,78E+23	3,53E+23	3,30E+23	3,09E+23	2,89E+23	2,71E+23	2,54E+23
²⁴⁰ Np	0	0	0	0	0	0	0	0	0
²³⁸ Pu	1,07E+25	9,69E+24	8,97E+24	8,48E+24	8,18E+24	8,04E+24	8,06E+24	8,21E+24	8,47E+24
²³⁹ Pu	2,97E+26	3,04E+26	3,10E+26	3,14E+26	3,17E+26	3,20E+26	3,21E+26	3,22E+26	3,23E+26
²⁴⁰ Pu	1,23E+26	1,39E+26	1,55E+26	1,70E+26	1,85E+26	1,98E+26	2,11E+26	2,23E+26	2,34E+26
²⁴¹ Pu	1,26E+25	1,57E+25	1,93E+25	2,32E+25	2,73E+25	3,14E+25	3,55E+25	3,95E+25	4,34E+25
²⁴² Pu	1,01E+25	1,12E+25	1,33E+25	1,64E+25	2,05E+25	2,55E+25	3,14E+25	3,80E+25	4,52E+25
²⁴³ Pu	0	0	0	0	0	0	0	0	0
²⁴¹ Am	0	6,43E+23	1,38E+24	2,22E+24	3,18E+24	4,25E+24	5,44E+24	6,73E+24	8,13E+24
²⁴² Am	0	0	0	0	0	0	0	0	0
²⁴² Am	0	7,20E+21	2,89E+22	6,58E+22	1,19E+23	1,90E+23	2,78E+23	3,83E+23	5,06E+23
²⁴³ Am	0	3,36E+23	7,45E+23	1,30E+24	2,05E+24	3,05E+24	4,33E+24	5,90E+24	7,77E+24
²⁴⁴ Am	0	0	0	0	0	0	0	0	0
²⁴² Cm	0	1,49E+22	4,58E+22	8,61E+22	1,35E+23	1,91E+23	2,52E+23	3,19E+23	3,88E+23
²⁴³ Cm	0	3,89E+20	2,44E+21	6,86E+21	1,41E+22	2,42E+22	3,73E+22	5,33E+22	7,17E+22
²⁴⁴ Cm	0	2,55E+22	1,07E+23	2,65E+23	5,29E+23	9,37E+23	1,52E+24	2,32E+24	3,36E+24
²⁴⁵ Cm	0	8,80E+20	6,96E+21	2,42E+22	6,08E+22	1,27E+23	2,36E+23	4,02E+23	6,36E+23
²⁴⁶ Cm	0	7,68E+19	1,21E+21	6,21E+21	2,04E+22	5,22E+22	1,14E+23	2,21E+23	3,92E+23
²⁴⁷ Cm	0	1,21E+18	3,58E+19	2,59E+20	1,07E+21	3,22E+21	8,00E+21	1,73E+22	3,35E+22

Nuklida	Tahun ke 9	Tahun ke 10	Tahun ke 11	Tahun ke 12	Tahun ke 13	Tahun ke 14	Tahun ke 15	Tahun ke 16	Tahun ke 17
²³⁴ U	5,43E+23	6,01E+23	6,63E+23	7,29E+23	7,99E+23	8,75E+23	9,55E+23	1,04E+24	1,13E+24
²³⁵ U	1,01E+25	9,61E+24	9,20E+24	8,85E+24	8,55E+24	8,28E+24	8,05E+24	7,85E+24	7,67E+24
²³⁶ U	6,39E+24	6,62E+24	6,81E+24	6,96E+24	7,09E+24	7,21E+24	7,30E+24	7,39E+24	7,46E+24
²³⁷ U	1,23E+22	1,21E+22	1,16E+22	1,06E+22	1,00E+22	9,45E+21	8,89E+21	8,33E+21	7,79E+21
²³⁸ U	2,65E+27	2,63E+27	2,60E+27	2,58E+27	2,57E+27	2,55E+27	2,53E+27	2,52E+27	2,51E+27
²³⁹ U	0	0	0	0	0	0	0	0	0
²³⁷ Np	2,95E+24	3,17E+24	3,37E+24	3,54E+24	3,71E+24	3,86E+24	4,00E+24	4,13E+24	4,25E+24
²³⁸ Np	3,07E+21	3,23E+21	3,29E+21	3,20E+21	3,17E+21	3,13E+21	3,06E+21	2,97E+21	2,88E+21
²³⁹ Np	2,38E+23	2,29E+23	2,15E+23	1,95E+23	1,82E+23	1,70E+23	1,59E+23	1,48E+23	1,37E+23
²⁴⁰ Np	0	0	0	0	0	0	0	0	0
²³⁸ Pu	8,85E+24	9,32E+24	9,89E+24	1,05E+25	1,12E+25	1,20E+25	1,28E+25	1,36E+25	1,45E+25
²³⁹ Pu	3,24E+26	3,24E+26	3,25E+26	3,25E+26	3,25E+26	3,26E+26	3,26E+26	3,26E+26	3,26E+26
²⁴⁰ Pu	2,45E+26	2,55E+26	2,65E+26	2,73E+26	2,81E+26	2,89E+26	2,96E+26	3,03E+26	3,09E+26
²⁴¹ Pu	4,70E+25	5,07E+25	5,42E+25	5,71E+25	5,99E+25	6,24E+25	6,46E+25	6,66E+25	6,84E+25
²⁴² Pu	5,29E+25	6,11E+25	6,97E+25	7,81E+25	8,65E+25	9,48E+25	1,03E+26	1,11E+26	1,19E+26
²⁴³ Pu	0	0	0	0	0	0	0	0	0
²⁴¹ Am	9,62E+24	1,12E+25	1,29E+25	1,46E+25	1,65E+25	1,84E+25	2,04E+25	2,24E+25	2,45E+25
²⁴² Am	0	0	0	0	0	0	0	0	0
²⁴² Am	6,46E+23	8,07E+23	9,83E+23	1,17E+24	1,36E+24	1,57E+24	1,79E+24	2,01E+24	2,25E+24
²⁴³ Am	9,92E+24	1,24E+25	1,51E+25	1,80E+25	2,11E+25	2,43E+25	2,76E+25	3,10E+25	3,44E+25
²⁴⁴ Am	0	0	0	0	0	0	0	0	0
²⁴² Cm	4,59E+23	5,41E+23	6,15E+23	6,69E+23	7,31E+23	7,90E+23	8,44E+23	8,92E+23	9,34E+23
²⁴³ Cm	9,22E+22	1,15E+23	1,40E+23	1,64E+23	1,88E+23	2,12E+23	2,35E+23	2,57E+23	2,78E+23
²⁴⁴ Cm	4,65E+24	6,23E+24	8,08E+24	1,01E+25	1,24E+25	1,49E+25	1,75E+25	2,02E+25	2,29E+25
²⁴⁵ Cm	9,53E+23	1,37E+24	1,88E+24	2,49E+24	3,20E+24	4,00E+24	4,89E+24	5,85E+24	6,88E+24
²⁴⁶ Cm	6,47E+23	1,01E+24	1,50E+24	2,13E+24	2,92E+24	3,87E+24	4,98E+24	6,24E+24	7,66E+24
²⁴⁷ Cm	5,98E+22	1,00E+23	1,58E+23	2,36E+23	3,39E+23	4,69E+23	6,27E+23	8,15E+23	1,03E+24

Nuklida	Tahun ke 18	Tahun ke 19	Tahun ke 20
²³⁴ U	1,23E+24	1,34E+24	1,45E+24
²³⁵ U	7,51E+24	7,37E+24	7,25E+24
²³⁶ U	7,53E+24	7,59E+24	7,65E+24
²³⁷ U	7,26E+21	6,75E+21	6,26E+21
²³⁸ U	2,49E+27	2,48E+27	2,47E+27
²³⁹ U	0	0	0
²³⁷ Np	4,37E+24	4,48E+24	4,58E+24
²³⁸ Np	2,77E+21	2,65E+21	2,53E+21
²³⁹ Np	1,27E+23	1,18E+23	1,09E+23
²⁴⁰ Np	0	0	0
²³⁸ Pu	1,54E+25	1,63E+25	1,73E+25
²³⁹ Pu	3,26E+26	3,26E+26	3,27E+26
²⁴⁰ Pu	3,16E+26	3,21E+26	3,27E+26
²⁴¹ Pu	7,00E+25	7,14E+25	7,25E+25
²⁴² Pu	1,26E+26	1,33E+26	1,40E+26
²⁴³ Pu	0	0	0
²⁴¹ Am	2,66E+25	2,89E+25	3,11E+25
²⁴² Am	0	0	0
²⁴² Am	2,49E+24	2,73E+24	2,98E+24
²⁴³ Am	3,77E+25	4,11E+25	4,44E+25
²⁴⁴ Am	0	0	0
²⁴² Cm	9,68E+23	9,94E+23	1,01E+24
²⁴³ Cm	2,97E+23	3,15E+23	3,30E+23
²⁴⁴ Cm	2,57E+25	2,85E+25	3,12E+25
²⁴⁵ Cm	7,95E+24	9,05E+24	1,02E+25
²⁴⁶ Cm	9,21E+24	1,09E+25	1,26E+25
²⁴⁷ Cm	1,28E+24	1,55E+24	1,84E+24