KOEFISIEN REAKTIVITAS TEMPERATUR BAHAN BAKAR REAKTOR KARTINI

Budi Rohman

Pusat Pengkajian Sistem dan Teknologi Pengawasan Instalasi dan Bahan Nuklir Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) JI. Gajah Mada No. 8 Jakarta 10120 E-mail : b.rohman@bapeten.go.id

ABSTRAK

KOEFISIEN REAKTIVITAS TEMPERATUR BAHAN BAKAR REAKTOR KARTINI Saat ini pihak pengoperasi reaktor Kartini sedang mengajukan perpanjangan izin operasi reaktor ke Badan Pengawas sehubungan izin operasi reaktor tersebut akan habis masa berlakunya pada tahun 2010. Untuk mendukung evaluasi terhadap Laporan Analisis Keselamatan (LAK) yang dilampirkan di dalam pengajuan ini, unit pengkajian BAPETEN melakukan pengkajian independen guna melakukan verifikasi terhadap nilai-nilai parameter yang terkait dengan keselamatan yang ada di dalam LAK, di mana aspek neutronik termasuk di dalamnya. Pada aspek ini dilakukan verifikasi terhadap nilai koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar (α_T) melalui perhitungan menggunakan paket program MCNP. Koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar merupakan parameter yang penting karena memberikan umpan-balik reaktivitas terbesar pada reaktor jenis TRIGA dalam hal terjadinya perubahan suhu di teras reaktor. Dalam perhitungan ini diperoleh nilai $\alpha_T = -1.108 \times 10^{-4} \frac{4\rho}{c}$, atau 8% lebih rendah dari pada nilai yang tercantum di LAK, yakni $\alpha_T = -1.20 \times 10^{-4} \frac{4\rho}{c}$.

Kata kunci: verifikasi, koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar, reaktor Kartini, MCNP.

ABSTRACT

FUEL TEMPERATURE REACTIVITY COEFFICIENT OF KARTINI REACTOR. Currently the operator of Kartini reactor is submitting application for renewal of operating license to the Regulatory Agency since the operating license of the reactor will be expired in 2010. In order to support the evaluation of the Safety Analysis Report (SAR) incorporated in the submission, the assessment unit of BAPETEN is carrying out independent assessment in order to verify safety related parameters in the SAR including neutronic aspect. The verification is performed to the fuel temperature reactivity coefficient (α_T) by computational method using MCNP. Fuel temperature reactivity coefficient is among the most important neutronic parameters since it produces the largest portion of reactivity feedback in case of changes of temperature in the core. This verification calculation results an estimate of fuel temperature reactivity coefficient $\alpha_T = -1.108 \times 10^{-4} \frac{\Delta \rho}{\rho_c}$.

Key words : verification, fuel temperature reactivity coefficient, Kartini reactor, MCNP.

1. PENDAHULUAN

Dalam pengajuan izin operasi reaktor, dokumen Laporan Analisis Keselamatan (LAK) merupakan salah satu dokumen yang dipersyaratkan oleh Badan Pengawas untuk dilampirkan^[1]. Dokumen pengajuan izin dan dokumen pendukung ini kemudian dievaluasi oleh Badan Pengawas. Dalam kegiatan evaluasi ini, Badan Pengawas perlu melakukan pengkajian secara independen terhadap keselamatan reaktor yang diajukan izinnya.

Berkaitan dengan reaktor Kartini yang izin pengoperasian reaktornya berlaku sampai 2010, Badan Pengawas telah melakukan beberapa kajian terhadap

tersebut. keselamatan Kajian-kajian ini mencakup analisis neutronik dan termohidrolik dan hasil kajian-kajian ini akan digunakan untuk mengevaluasi Laporan Analisis Keselamaran (LAK) reaktor Kartini yang telah diberikan oleh Badan Pelaksana pengoperasian reaktor tersebut. Kegiatan evaluasi ini antara lain mencakup kegiatan verifikasi terhadap nilai-nilai parameter keselamatan yang tertera di LAK^[2].

Makalah ini menyajikan perhitungan koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar (efek Doppler) reaktor Kartini untuk verifikasi terhadap nilai yang tercantum di dalam LAK. Koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar merupakan parameter yang penting karena memberikan umpan-balik reaktivitas terbesar pada reaktor jenis TRIGA dalam hal terjadinya perubahan temperatur di teras reaktor. Perhitungan dilakukan menggunakan paket program MCNP yang menerapkan metode Monte Carlo dalam memecahkan perhitungan kekritisan.

dimaksudkan untuk Kajian ini memperoleh koefisien nilai reaktivitas temperatur bahan bakar reaktor Kartini dengan menggunakan paket program MCNP5. Kajian dilakukan ini guna mendukung evaluasi pada perhitungan neutronik, yakni verifikasi pada nilai koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar yang tercantum di dalam LAK Reaktor Kartini.

2. TEORI

2.1. Koefisien Reaktivitas Temperatur Bahan Bakar

Nilai faktor multiplikasi (k) yang

berkaitan dengan kekritisan reaktor dipengaruhi oleh berbagai parameter, di mana parameter-parameter ini dipengaruhi oleh temperatur. Dengan demikian, perubahan temperatur reaktor akan mengakibatkan perubahan pada nilai k, sehingga mempengaruhi pula nilai reaktivitas keseluruhan sistem. Efek yang demikian memiliki pengaruh yang besar pada keselamatan operasi reaktor.

Besarnya perubahan nilai reaktivitas akibat berubahnya temperatur disebut sebagai koefisien reaktivitas temperatur (α_T) yang ditulis menurut persamaan:

$$\alpha_T = \frac{d\rho}{dT} \tag{1}$$

Dengan

$$\rho = \frac{k-1}{k} \tag{2}$$

di mana

 ρ = reaktivitas

k = faktor multiplikasi neutron

Perubahan temperatur pada reaktor terjadi pada bahan bakar dan pendingin atau moderator. Koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar adalah perubahan pada reaktivitas teras akibat perubahan temperatur bahan bakar. Koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar pada kebanyakan reaktor bernilai negatif, sebagai akibat dari fenomena yang disebut efek Doppler.

Efek Doppler ini dapat dijelaskan sebagai berikut. Tampang lintang neutron mengalami resonansi pada tingkat energi tertentu. Pada inti-inti atom berat, misalnya Uranium, resonansi ini hampir seluruhnya disebabkan oleh absorpsi, bukan hamburan. Tampang lintang neutron untuk tangkapan radiatif pada daerah resonansi dengan lebar Γ pada energi E_r dirumuskan dalam formula Breit-Wigner^[3] berikut:

$$\sigma_{\gamma}(E) = \frac{\lambda_{rg}^2}{4\pi} \frac{\Gamma_n \Gamma_{\gamma}}{(E - E_r)^2 + \Gamma^2/4}$$
(3)

dengan Γ = Γ_n + Γ_γ , di mana

- σ_{γ} = tampang lintang tangkapan radiatif
- λ_r = panjang gelombang neutron pada energi E_r
- g = konstanta faktor statistik
- Γ_n = konstanta lebar neutron
- Γ_{γ} = konstanta lebar radiasi
- Γ = lebar resonansi total

Nukleus atau inti atom yang ada di dalam atom selalu bergerak akibat energi termal yang dimilikinya. Sebagai akibat dari gerakan termal ini, suatu berkas neutron yang menumbuk inti atom, bagi inti atom yang berada di dalam atom target akan melihatnya seperti memiliki sebaran energi yang kontinu sekalipun berkas neutron tersebut bersifat monoenergetik. Keadaan ini memiliki efek seperti bentuk resonansi. Dapat difahami bahwa ketika tampang lintang dirata-ratakan terhadap seluruh gerakan inti atom, resonansi ini menjadi lebih rendah dan lebih lebar. Efek ini disebut sebagai pelebaran Doppler (Doppler broadening), dan efek ini menjadi lebih nyata ketika temperatur atom target lebih tinggi seperti dilukiskan pada Gambar 1. Patut diperhatikan bahwa meskipun bentuk daerah resonansi ini berubah terhadap temperatur, luasan total daerah resonansi

pada dasarnya adalah sama.



Gambar 1. Pelebaran Doppler untuk tampang lintang tangkapan untuk U^{238} pada energi resonansi 6.67 e $V^{[3].}$

Bila neutron mengalami proses perlambatan di dalam reaktor termal dan melalui daerah resonansi maka jumlah neutron (F_a) yang diserap tiap cm³/detik di daerah resonansi diberikan oleh persamaan:

 $F_{a} = \phi_{av} \int \Sigma_{a}(E) d(E)$ (4)

di mana

 ϕ_{av} = fluks neutron rata-rata yang melewati daerah resonansi Σ_a = tampang lintang serapan makroskopik

Nilai di dalam tanda integral pada persamaan (4) adalah konstan dan tidak bergantung pada temperatur. Nilai ini merupakan luasan daerah resonansi yang telah dijelaskan sebelumnya, Oleh karena itu, jumlah neutron yang diserap di daerah resonansi adalah proporsional dengan fluks neutron rata-rata (ϕ_{av}) yang melewati daerah tersebut.

Dapat pula dengan mudah dijelaskan bahwa ϕ_{av} bergantung pada temperatur. Ketika temperatur bahan bakar naik, besarnya nilai tampang lintang serapan turun akibat efek Doppler, yang selanjutnya menyebabkan ϕ_{av} yang melewati daerah tersebut naik. Karena ϕ_{av} naik dengan temperatur dan jumlah neutron yang diserap di daerah resonansi proporsional dengan ϕ_{av} , sehingga dapat difahami bahwa serapan resonansi naik dengan naiknya temperatur. Keadaan ini selanjutnya menurunkan harga k sehingga nilai koefisien temperatur bahan bakar akan bernilai negatif.

2.2. Deskripsi Teras Reaktor Kartini

Reaktor Kartini merupakan reaktor jenis TRIGA Mark II tipe kolam terbuka yang didinginkan dengan sirkulasi alam. Reaktor Kartini dioperasikan untuk keperluan iradiasi, analisis NAA, penelitian, dan latihan personil. Berdasarkan izin yang diterbitkan oleh BAPETEN, reaktor Kartini dioperasikan dengan daya nominal 100 kW. Kisi reaktor Kartini berbentuk anular yang terdiri atas 91 posisi atau lubang masing-masing dengan diameter 3.823 cm yang diisi dengan elemen bakar, batang kendali, tabung iradiasi, elemen grafit, serta elemen-elemen lain. Teras reaktor memiliki ketinggian 58 cm dan dilingkupi oleh reflektor grafit berbentuk silinder dengan diameter dalam 45.7 cm. Teras dan reflektor ditopang oleh struktur penyangga yang dipasang di dasar tangki reaktor. Teras dan reflektor ini terendam dalam air setinggi 4.9 m^[4].

Dalam konfigurasi saat ini sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 2, teras reaktor Kartini memuat 69 elemen bakar standar TRIGA serta 3 batang kendali dengan bahan penyerap neutron terbuat dari serbuk B₄C yang dimasukkan ke dalam kelongsong aluminium. Elemen bakar ini memuat bahan bakar dengan komposisi U-ZrH_{1.65} dengan kandungan uranium 8.5 % berat dan pengkayaan 20 %. Bahan bakar ini berada di dalam kelongsong berbentuk tabung yang terbuat dari SS-304. Di antara bahan bakar dengan kelongsong terdapat *gap* yang diisi dengan He ketika masih baru. Elemen bakar standar reaktor TRIGA ini dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 2. Konfigurasi terasi reaktor Kartini^[4, 5].



Gambar 3. Elemen bakar reaktor TRIGA^[7].

Pada posisi di pusat teras dipasang *central thimble*. Posisi di ring terluar selain yang berisi elemen bakar berisi tabung pneumatik, sumber neutron, atau elemen bakar *dummy* yang terbuat dari grafit.

3. METODE PERHITUNGAN

Perhitungan reaktivitas koefisien temperatur bahan bakar ini dilakukan dengan menggunakan paket program MCNP yang menerapkan metode Monte Carlo yang bersifat statistik dalam mencari penyelesaiannya. Hal ini berlainan dengan metode transport yang bersifat deterministik. Dalam metode deterministik, cara yang paling umum diterapkan adalah metode ordinat diskret yang menyelesaikan persamaan transport untuk perilaku partikel rata-rata. Metode Monte Carlo tidak memecahkan persamaan yang eksplisit, tetapi mencari penyelesaian dengan cara mensimulasikan partikel-partikel secara individual serta mencatat beberapa aspek (disebut tally atau cacah) dari perilaku ratarata partikel tersebut^[6]. Jadi, metode Monte Carlo menyelesaikan permasalahan transport dengan melakukan simulasi atas riwayat atau jalannya partikel, bukan memecahkan persamaan. Tidak perlu disediakan persamaan transport guna menyelesaikan persoalan dalam metode Monte Carlo.

3.1. Deskripsi Program MCNP

MCNP, kependekan dari Monte Carlo N-Particle, adalah program komputer yang dikembangkan sejak tahun 1963 di Los Alamos National Laboratory (LANL), Amerika Serikat^[4]. Sampai saat ini program masih dikembangkan terus dan disempurnakan. Program yang digunakan dalam tulisan ini adalah versi 5 yang dikeluarkan pada tahun 2003. Program MCNP menerapkan metode Monte Carlo dalam menyelesaikan berbagai macam persoalan transport partikel, antara lain neutron, foton, elektron, gabungan neutron / foton, neutron / foton / elektron maupun foton / elektron. Sifat-sifat bahan serta interaksi partikel dengan bahan dinyatakan dalam fungsi energi kontinyu. MCNP dapat digunakan untuk memecahkan persoalan transport partikel di dalam bahan berbentuk tiga dimensi sembarang. Program ini mampu menghitung *eigenvalue* k_{eff} dalam suatu sistem bahan dapat belah dengan akurasi tinggi.

3.1.1. Fitur-fitur Penting MCNP

MCNP5 memiliki berbagai fitur yang memungkinkannya untuk digunakan dalam simulasi pergerakan partikel pada berbagai aspek. Di antara fitur-fitur tersebut adalah:

nuklir dan reaksi. MCNP Data menggunakan pustaka data inti dan atom untuk energi kontinyu. Sumber utama data nuklir ini berasal dari sistem Evaluated Nuclear Data File (ENDF), Advanced Computational Technology Initiative (ACTI), Evaluated Nuclear Data Library (ENDL), Evaluated Photon Data Library (EPDL), Activation Librarv (ACTL) hasil kompilasi Livermore National Laboratory, serta Grup Nuclear Physics (T-16) di Los Alamos National Laboratory. Data tersebut diproses ke dalam format yang dapat dibaca oleh program MCNP dengan menggunakan program lain misalnya NJOY. Pustaka data nuklir yang sudah diproses ini telah mungkin mempertahankan sejauh kerincian data aslinya sehingga dapat digunakan oleh pemakai dengan tingkat keyakinan memadai. MCNP yang

menyediakan tabel data nuklir untuk interaksi neutron, foton hasil interaksi neutron, interaksi foton, dosimetri atau aktivasi neutron. serta hamburan partikel termal $S(\alpha,\beta)$. Tabel data yang tersedia di MCNP dimasukkan ke dalam satu file direktori XSDIR. Pengguna memilih tabel dapat data vang dikehendaki dengan menggunakan penanda khusus untuk masing-masing tabel yang disebut ZAID. Penanda ini biasanya memuat nomor atom Z, nomor massa A, dan identitas pustaka ID. MCNP5 menyediakan lebih dari 836 tabel reaksi neutron untuk lebih dari 100 isotop dan elemen yang berlainan.

- Spesifikasi sumber. MCNP dapat menerima masukan yang menggambarkan berbagai macam kondisi sumber dengan energi, waktu, posisi, dan arah; maupun sel atau permukaan dari mana sumber tersebut berasal ditentukan oleh pengguna. Selain itu, MCNP juga menyediakan berbagai fungsi spektrum energi fisi dan fusi seperti spektrum Watt, Maxwellian dan Gaussian; Gaussian untuk waktu; serta isotropik, cosinus, dan monodireksional untuk arah. MCNP juga menyediakan model sumber neutron untuk menghitung nilai estimasi keff, perbandingan jumlah neutron vakni yang dihasilkan pada satu generasi generasi berikutnya dengan dalam sistem dapat belah (fisil).
- Cacah (tally). Untuk memperoleh besaran fisik, MCNP menyediakan berbagai macam cacah yang berkaitan dengan arus partikel, fluks partikel, dan

deposisi energi. Semua cacah dinormalisir per jumlah partikel yang disimulasikan. Arus partikel dapat dinyatakan sebagai fungsi arah terhadap suatu permukaan atau bagian permukaan tertentu. Fluks partikel dapat dinyatakan dalam suatu permukaan atau bagian permukaan tertentu; serta dalam sel atau bagian sel. Fluks partikel dapat diperoleh dari juga cacah detektor, baik berbentuk titik maupun cincin, serta cacah detektor radiografi. Cacah pemanasan dan fisi memberikan deposisi energi di dalam suatu sel. Cacah yang lain meliputi jumlah fisi, jumlah absorpsi, serta berbagai macam fluks sebagai hasil dari reaksi standar yang ada di pustaka yang digunakan oleh MCNP.

3.1.2. Geometri dalam MCNP

MCNP mampu memodelkan bentuk tiga dimensi sembarang terhadap bendabenda yang dikehendaki oleh pengguna dalam geometri sel-sel yang dibatasi oleh bentuk-bentuk permukaan orde pertama dan kedua serta orde keempat torus-elips. Selsel tersebut didefinisikan dalam bentuk irisan, gabungan, dan komplemen daerahdaerah yang dibatasi oleh permukaan. menyediakan MCNP juga kemampuan macrobody di mana bentuk-bentuk dasar kotak, dsb. seperti bola, silinder. digabungkan dengan menggunakan operator boolean.

3.1.3. Perhitungan Kekritisan dalam MCNP

Perhitungan k_{eff} mencakup

perhitungan jumlah rata-rata neutron fisi yang dihasilkan dalam satu generasi untuk tiap-tiap sumber neutron fisi. Yang dimaksud dengan satu generasi adalah masa hidup neutron dari saat ia dilahirkan dari reaksi fisi sampai dengan hilang karena lolos dari sistem, tangkapan parasitik, atau absorpsi yang akan menimbulkan fisi berikutnya.

Untuk melakukan perhitungan kekritisan, pengguna perlu menyediakan file input yang memuat kartu KCODE yang berisi informasi mengenai sumber dan siklus, serta kartu KSRC yang berisi informasi mengenai koordinat sumber yang disimulasi.

Dalam MCNP, k_{eff} didefinisikan sebagai:

$$k_{eff} = \frac{neutron fisi pada generasi ke i + 1}{neutron fisi pada generasi i}$$

MCNP menggunakan 3 buah nilai k_{eff} yang berbeda yang disebut sebagai estimator. Ketiga buah estimator tersebut adalah:

- 1. Estimator tumbukan (k_{eff}^{c}) adalah jumlah neutron yang dihasilkan dari seluruh proses fisi dalam tumbukan, atau merupakan jumlah rata-rata neutron fisi yang dihasilkan tiap siklus melaui proses tumbukan. Estimator ini memberikan estimasi harga k_{eff} yang terbaik untuk sistem yang sangat besar.
- 2. Estimator serapan (k_{eff}^{A}) adalah estimator yang dihitung setiap kali terjadi interaksi antara neutron dengan inti bahan dapat belah. Estimator ini memberikan estimasi harga k_{eff} dengan kesalahan terkecil pada sistem reaktor termal.

- 3. Estimator panjang jejak $(k_{e\!f\!f}^{TL})$ adalah estimator yang dihitung setiap kali neutron berpindah tempat di dalam bahan dapat belah pada suatu jarak tertentu. Estimator ini memberikan prediksi harga k_{eff} terbaik untuk bahan bakar yang tipis (misalny bentuk pelat) dan sistem reaktor cepat di mana variasi tampang-lintang neutron adalah besar karena efek resonansi sehingga penggunaan kedua estimator yang disebutkan terdahulu mungkin memberikan nilai varian yang tinggi.
- Untuk memperoleh nilai akhir estimasi k_{eff}, LANL merekomendasikan untuk menggunakan kombinasi statistik dari ketiga nilai estimator tersebut.

3.2. Pemodelan Reaktor Kartini dalam MCNP

Komponen reaktor yang berada di dalam tangki dan teras reaktor, termasuk materialnya, dimodelkan dalam bentuk geometri, dimensi, dan komposisi sedekat mungkin dengan benda aslinya. Dalam pemodelan ini komposisi bahan bakar reaktor dianggap baru dengan tidak memperhitungkan pengaruh burn-up bahan bakar selama operasi reaktor. Ketiga batang kendali diasumsikan dalam posisi ditarik ke atas sepenuhnya sehingga pada posisi yang ditinggalkannya di dalam teras berisi air. Dalam pemodelan ini daerah aktif bahan bakar dibagi menjadi 15 sel aksial.

Geometri teras reaktor Kartini yang dimodelkan di dalam perhitungan verifikasi ini didasarkan pada konfigurasi sebagaimana diuraikan di atas. Komponenkomponen utama reaktor yang dimodelkan

- Elemen bakar sejumlah 69 batang.
- Elemen grafit (*dummy*) sejumlah 15 batang.
- Central thimble.
- Struktur teras, termasuk *grid plate* atas dan bawah.
- Reflektor grafit.
- Rak spesimen putar (Lazy Susan).
- Kolom termal dan thermalizing column.
- 4 buah tabung berkas neutron (*beamport*).



Gambar 4. Representasi teras reaktor Kartini dalam MCNP.



Gambar 5. Representasi elemen bakar reaktor Kartini dalam MCNP.

Dalam menyusun input dari model ini program TrigaMCNP^[5] digunakan vang memiliki kemampuan untuk menyusun konfigurasi teras reaktor ienis TRIGA sekaligus membangkitkan input untuk MCNP.

3.2.1. Kartu KCODE

Untuk menghitung kekritisan reaktor, perlu didefinisikan kartu KCODE yang berisi informasi mengenai jumlah partikel sumber yang disimulasi, harga awal keff, jumlah siklus yang dilompati sebelum perhitungan akumulasi keff dimulai, dan jumlah siklus total yang dikehendaki dalam perhitungan. Jumlah partikel yang disimulasi dalam perhitungan disesuaikan dengan kompleksitas sistem lazimnya teras, terdapat minimal 1 partikel dalam material dapat belah. Semakin banyak partikel yang disimulasikan, akan semakin kecil standar deviasinya sehingga memberikan hasil yang lebih baik. Kartu KCODE ini memiliki bentuk sebagai berikut:

KCODE nsrck rkk ikz kct di mana

nsrck : jumlah neutron sumber pada tiap siklus

rkk : harga awal untuk k_{eff}

ikz : jumlah siklus yang akan
 dilompati sebelum perhitungan
 k_{eff} diakumulasikan

kct : jumlah siklus dalam perhitungan
Dalam perhitungan ini digunakan nsrck=
13800, rkk= 1.0, ikz= 50, dan kct= 250.

3.2.2. Kartu KSRC

Partikel sumber yang disimulasikan ditempatkan tersebar di setiap daerah

bahan bakar yang mengandung bahan belah. dapat Lokasi partikel yang disimulasikan ini harus cukup jauh dari batas-batas sel. Biasanya satu titik sumber pada tiap daerah bahan dapat belah sudah MCNP cukup. karena akan segera menghitung dan menggunakan distribusi sumber fisi yang baru. Kartu KSRC digunakan untuk menentukan posisi partikel sumber yang disimulasikan, berisi informasi mengenai koordinat spasial partikel sumber dalam sumbu x, y, dan z dalam format berikut:

$$\begin{array}{cccc} \mathsf{KSRC} & x_1 & y_1 & z_1 \\ & & x_2 & y_2 & z_2 \\ & & \mathsf{dst.} \end{array}$$

sampai sejumlah *nsrck* triplet, sehingga dalam model ini terdapat 13800 triplet posisi partikel sumber.

3.2.3. Pustaka Tampang Lintang

Dalam menghitung faktor perlipatan efektif guna memperoleh nilai reaktivitas temperatur bahan bakar digunakan pustaka tampang lintang neutron yang ada di modul XSection MCNP5. Bahan bakar (*meat*) divariasi pada temperatur antara 294 K (20.85 °C, temperatur kamar) s/d 1200 K (926.85 °C), sedangkan material reaktor selain bahan bakar diset pada suhu kamar. Pustaka tampang lintang untuk elemenelemen dalam bahan bakar yang digunakan dapat dilihat di Tabel 1.

4. HASIL PERHITUNGAN DAN PEMBAHASAN

Dengan menggunakan model seperti dijelaskan sebelumnya diperoleh estimasi nilai k_{eff} untuk masing-masing temperatur bahan bakar yang diterapkan dalam perhitungan sehingga reaktivitas yang bersesuaian dapat dihitung menurut persamaan (2), dengan k adalah nilai k_{eff} yang dihitung oleh MCNP.

Ketika bahan bakar berada pada temperatur kamar 294 K (20.85 °C) diperoleh nilai k_{eff} = 1.02126 atau setara dengan reaktivitas 0.02082. Selanjutnya nilai k_{eff} turun seiring dengan naiknya temperatur, dan pada temperatur bahan bakar 1200 K (926.85 °C) diperoleh k_{eff} = 0.92967 atau setara dengan reaktivitas -0.07565. Hasil perhitungan lengkap disajikan dalam Tabel 2.

Tabel 1	Pustaka	tampang	lintang
---------	---------	---------	---------

Elemen	U-235		U-238		H di dalam ZrH	
T [K]	ZAID	Pustaka	ZAID	Pustaka	ZAID	Pustaka
294	92235.60c	endf60	92238.60c	endf60	h/zr.60t	endf6.3
400	92235.12c	endf62mt	92238.12c	endf62mt	h/zr.61t	endf6.3
500	92235.13c	endf62mt	92238.13c	endf62mt	h/zr.62t	endf6.3
600	92235.14c	endf62mt	92238.14c	endf62mt	h/zr.62t	endf6.3
800	92235.15c	endf62mt	92238.15c	endf62mt	h/zr.63t	endf6.3
900	92235.16c	endf62mt	92238.16c	endf62mt	h/zr.64t	endf6.3
1200	92235.17c	endf62mt	92238.17c	endf62mt	h/zr.65t	endf6.3

ISSN 1411 - 3481

Tabel	2.	Nilai	k _{eff}	sebagai	fungsi	temperatur
bahan	ba	akar.				

T _{bahan bakar}		k _{eff}	Reaktivitas
[K]	[°C]		
294	20.85	1.02126	0.02082
400	126.85	1.01302	0.01285
500	226.85	0.99122	-0.00886
600	326.85	0.98971	-0.01040
800	526.85	0.96731	-0.03379
900	626.85	0.94703	-0.05593
1200	926.85	0.92967	-0.07565

Koefisien temperatur reaktivitas bahan bakar dinyatakan dalam satuan $\Delta \rho / {}^{o}_{C}$ atau perubahan reaktivitas terhadap temperatur bahan bakar dianggap linear. Program-program termohidrolik pada umumnya memerlukan data koefisien reaktivitas void dalam satuan ini sebagai inputnya. Untuk itu, lintasan kurva yang menggambarkan hubungan antara temperatur bahan bakar dengan nilai reaktivitas perlu didekati dengan garis linear, sehingga gradien garis tersebut merupakan nilai koefisien reaktivitasnya.

Perhitungan verifikasi ini menghasilkan nilai estimasi koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar untuk reaktor Kartini α_T = -1.108×10⁻⁴ $\Delta \rho / {}^{o}_{C}$, di mana nilai ini merupakan gradien garis linear yang mendekati kurva lintasan nilai-nilai reaktivitas sebagai fungsi temperatur bahan bakar seperti ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Grafik reaktivitas sebagai fungsi temperatur bahan bakar.

Nilai koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar yang tercantum di dalam LAK Reaktor Kartini adalah α_T = -1.20×10⁻⁴ $\Delta \rho / _C^o$ ^[2], 8 % lebih tinggi dari pada nilai hasil perhitungan verifikasi ini. Perbedaan ini boleh jadi disebabkan oleh salah satu atau kombinasi dari beberapa hal di bawah ini:

- Sifat penyelesaian perhitungan. Terdapat paket program yang melakukan perhitungan secara deterministik yakni dengan menyelesaikan persamaan transport secara eksplisit, sedangkan program MCNP melakukan perhitungan secara probabilistik dengan simulasi pergerakan tiap-tiap partikel secara individual.
- Pustaka tampang lintang. Data interaksi neutron pada paket program yang berbeda bisa jadi berasal dari pustaka yang berbeda pula, sehingga memungkinkan terjadinya perbedaan pada hasil perbitungan.
- Pemodelan atau asumsi. Terdapat paket program yang memodelkan obyek dengan cara homogenisasi, sedangkan MCNP memodelkan obyek dengan menggambarkan bentuk geometri

seperti apa adanya.

Dari sudut pandang analisis keselamatan, nilai yang diperoleh dari perhitungan verifikasi dengan paket program MCNP ini bersifat lebih konservatif dibandingkan dengan nilai yang tercantum di LAK karena memberikan umpan-balik reaktivitas negatif yang lebih kecil.

5. KESIMPULAN

Dari perhitungan verifikasi dengan menggunakan program komputer MCNP 5 diperoleh estimasi nilai koefisien ini reaktivitas temperatur bahan bakar untuk reaktor Kartini $\alpha_{\rm T}$ = -1.108×10⁻⁴ $^{\Delta\rho}/^{\rm o}_{\rm C}$, sedangkan nilai yang tercantum di LAK adalah α_T = -1.20×10⁻⁴ $\Delta \rho / {}^{o}_{C}$. Nilai yang diperoleh dari perhitungan dengan MCNP ini 8 % lebih rendah dari pada nilai yang tercantum di LAK. Dari sudut pandang analisis keselamatan, hasil perhitungan dengan program MCNP ini bersifat lebih konservatif karena memberikan umpan-balik reaktivitas negatif yang lebih kecil.

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan ini penulis mengucapkan terima kasih dan penghargan yang tinggi kepada Sdr. Putranto Ilham Yazid dari Pusat Teknologi Nuklir Bahan dan Radiometri (PTNBR)-BATAN Bandung yang telah memberi kesempatan kepada penulis untuk menggunakan program "Triga MCNP Ver. 9.0" dalam membangkitkan bagian utama dari input MCNP.

7. DAFTAR PUSTAKA

- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 43 tahun 2006 tentang Perizinan Reaktor Nuklir.
- International Atomic Energy Agency, Safety of research reactors: (IAEA safety standard series No NS-R-4, Vienna; 2005.
- Lamarsh, John R. Introduction to nuclear engineering (2nd ed): Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, Reading; 1983.
- Badan Tenaga Nuklir Nasional. Laporan analisis keselamatan reaktor Kartini Rev
 Yogyakarta: Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan (PTAPB)-BATAN;2008.
- Yazid, Putranto Ilham, Triga MCNP Ver.
 9.0 (program komputer). Bandung;
 Pusat Teknologi Nuklir Bahan dan
 Radiometri (PTNBR)-BATAN;2006.
- X-5 Monte Carlo Team. MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code. Version 5, Volume I: Overview and Theory; Los Alamos National Laboratory; 2003.
- Ravnik M. Description of TRIGA Reactor, (<u>www.rcp.ijs.si/ric/description-</u> <u>a.html</u>).