

## KOEFISIEN REAKTIVITAS TEMPERATUR BAHAN BAKAR REAKTOR KARTINI

Budi Rohman

Pusat Pengkajian Sistem dan Teknologi Pengawasan Instalasi dan Bahan Nuklir  
Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN)  
Jl. 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 ( $\alpha_T$ ) 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  $\alpha_T = -1.108 \times 10^{-4} \Delta \rho / \rho_C$ , atau 8% lebih rendah dari pada nilai yang tercantum di LAK, yakni  $\alpha_T = -1.20 \times 10^{-4} \Delta \rho / \rho_C$ .

**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 ( $\alpha_T$ ) 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  $\alpha_T = -1.108 \times 10^{-4} \Delta \rho / \rho_C$ , 8 % lower than that of listed in the SAR, i.e.  $\alpha_T = -1.20 \times 10^{-4} \Delta \rho / \rho_C$ .

**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<sup>[1]</sup>. 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 izinnnya.

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

keselamatan tersebut. Kajian-kajian ini mencakup analisis neutronik dan termohidrolik dan hasil kajian-kajian ini akan digunakan untuk mengevaluasi Laporan Analisis Keselamatan (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<sup>[2]</sup>.

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.

Kajian ini dimaksudkan untuk memperoleh nilai koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar reaktor Kartini dengan menggunakan paket program MCNP5. Kajian ini dilakukan 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 ( $\alpha_T$ ) yang ditulis menurut persamaan:

$$\alpha_T = \frac{d\rho}{dT} \quad (1)$$

Dengan

$$\rho = \frac{k-1}{k} \quad (2)$$

di mana

$\rho$  = 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  $\Gamma$  pada energi  $E_r$  dirumuskan dalam formula Breit-Wigner<sup>[3]</sup> berikut:

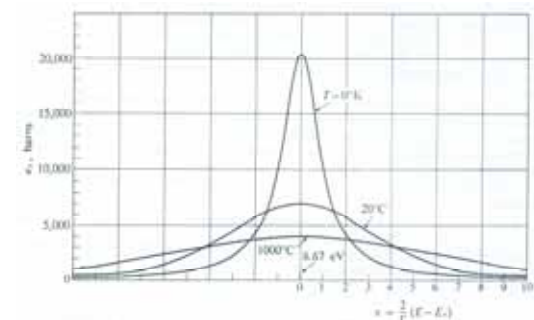
$$\sigma_{\gamma}(E) = \frac{\lambda_r^2 g}{4\pi} \frac{\Gamma_n \Gamma_{\gamma}}{(E - E_r)^2 + \Gamma^2/4} \quad (3)$$

dengan  $\Gamma = \Gamma_n + \Gamma_{\gamma}$ , di mana

- $\sigma_{\gamma}$  = tampang lintang tangkapan radiatif
- $\lambda_r$  = panjang gelombang neutron pada energi  $E_r$
- $g$  = konstanta faktor statistik
- $\Gamma_n$  = konstanta lebar neutron
- $\Gamma_{\gamma}$  = konstanta lebar radiasi
- $\Gamma$  = 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 eV<sup>[3]</sup>.

Bila neutron mengalami proses perlambatan di dalam reaktor termal dan melalui daerah resonansi maka jumlah neutron ( $F_a$ ) yang diserap tiap  $cm^3/detik$  di daerah resonansi diberikan oleh persamaan:

$$F_a = \phi_{av} \int \Sigma_a(E) d(E) \quad (4)$$

di mana

- $\phi_{av}$  = fluks neutron rata-rata yang melewati daerah resonansi
- $\Sigma_a$  = 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 ( $\phi_{av}$ ) yang melewati daerah tersebut.

Dapat pula dengan mudah dijelaskan bahwa  $\phi_{av}$  bergantung pada temperatur. Ketika temperatur bahan bakar naik, besarnya nilai tampang lintang serapan turun akibat efek Doppler, yang selanjutnya menyebabkan  $\phi_{av}$  yang melewati daerah

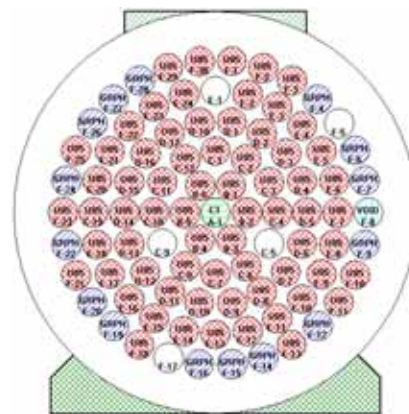
tersebut naik. Karena  $\phi_{av}$  naik dengan temperatur dan jumlah neutron yang diserap di daerah resonansi proporsional dengan  $\phi_{av}$ , sehingga dapat difahami bahwa serapan resonansi naik dengan naiknya temperatur. Keadaan ini selanjutnya menurunkan harga  $k$  sehingga nilai koefisien temperatur bahan bakar akan bernilai negatif.

## 2.2. Deskripsi Teras Reaktor Kartini

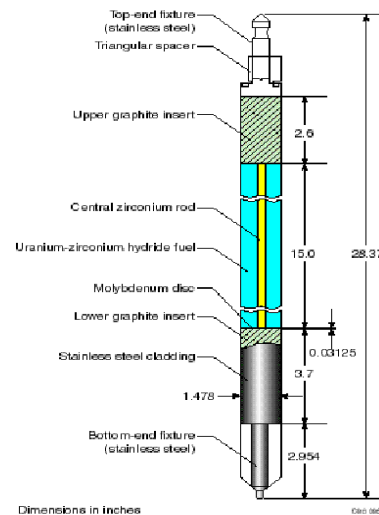
Reaktor Kartini merupakan reaktor jenis TRIGA Mark II tipe kolam terbuka yang didinginkan dengan sirkulasi alam. Reaktor Kartini dioperasikan untuk keperluan iradiasi, analisis NAA, penelitian, dan latihan personil. Berdasarkan izin yang diterbitkan oleh BAPETEN, reaktor Kartini dioperasikan dengan daya 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<sup>[4]</sup>.

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 B<sub>4</sub>C yang dimasukkan ke dalam kelongsong aluminium. Elemen bakar ini memuat bahan bakar dengan komposisi U-ZrH<sub>1.65</sub> 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<sup>[4, 5]</sup>.



Gambar 3. Elemen bakar reaktor TRIGA<sup>[7]</sup>.

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 koefisien reaktivitas 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 rata-rata partikel tersebut<sup>[6]</sup>. 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<sup>[4]</sup>. Sampai saat ini program masih terus dikembangkan 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 kontinu. MCNP dapat digunakan untuk memecahkan persoalan transport partikel di dalam bahan berbentuk tiga dimensi sembarang. Program ini mampu menghitung *eigenvalue*  $k_{\text{eff}}$  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:

- **Data nuklir dan reaksi.** MCNP menggunakan pustaka data inti dan atom untuk energi kontinu. 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 Library* (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 sejauh mungkin mempertahankan kerincian data aslinya sehingga dapat digunakan oleh pemakai dengan tingkat keyakinan yang memadai. MCNP

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 dapat memilih tabel data yang 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  $k_{\text{eff}}$ , yakni perbandingan jumlah neutron yang dihasilkan pada satu generasi dengan generasi berikutnya 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 juga dapat diperoleh dari 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 benda-benda yang dikehendaki oleh pengguna dalam geometri sel-sel yang dibatasi oleh bentuk-bentuk permukaan orde pertama dan kedua serta orde keempat torus-elips. Sel-sel tersebut didefinisikan dalam bentuk irisan, gabungan, dan komplemen daerah-daerah yang dibatasi oleh permukaan. MCNP juga menyediakan kemampuan *macrobody* di mana bentuk-bentuk dasar seperti bola, kotak, silinder, dsb. digabungkan dengan menggunakan operator *boolean*.

### 3.1.3. Perhitungan Kekritisan dalam MCNP

Perhitungan  $k_{\text{eff}}$  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:

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

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 melalui 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 ( $k_{eff}^{TL}$ ) 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 (misalnya 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.
4. Untuk memperoleh nilai akhir estimasi  $k_{eff}$ , LANL merekomendasikan untuk menggunakan kombinasi statistik dari ketiga nilai estimator tersebut.

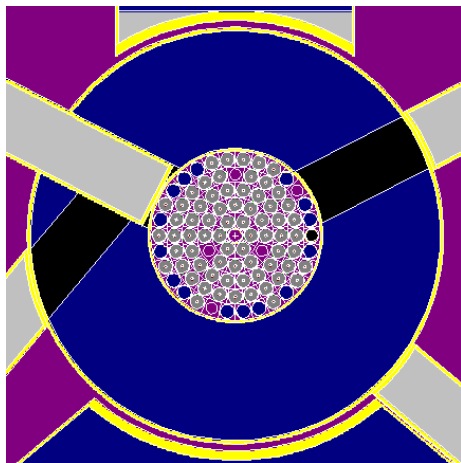
### 3.2. Pemodelan Reaktor Kartini dalam MCNP

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.

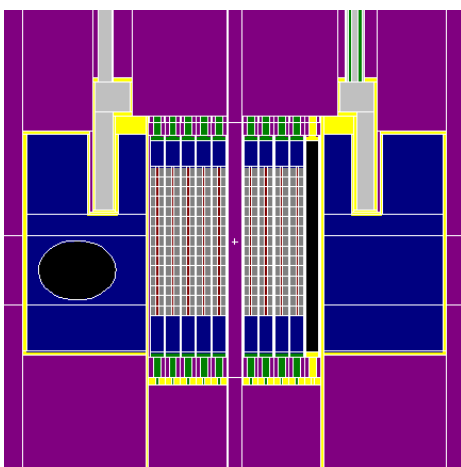
Geometri teras reaktor Kartini yang dimodelkan di dalam perhitungan verifikasi ini didasarkan pada konfigurasi sebagaimana diuraikan di atas. Komponen-komponen utama reaktor yang dimodelkan

(lihat Gambar 4 dan 5) meliputi:

- 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 digunakan program TrigaMCNP<sup>[5]</sup> yang memiliki kemampuan untuk menyusun konfigurasi teras reaktor jenis 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  $k_{eff}$ , jumlah siklus yang dilompati sebelum perhitungan akumulasi  $k_{eff}$  dimulai, dan jumlah siklus total yang dikehendaki dalam perhitungan. Jumlah partikel yang disimulasi dalam perhitungan disesuaikan dengan kompleksitas sistem teras, lazimnya 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 dapat belah. Lokasi partikel yang disimulasikan ini harus cukup jauh dari batas-batas sel. Biasanya satu titik sumber pada tiap daerah bahan dapat belah sudah cukup, karena MCNP 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:

```

KSRC      x1  y1  z1
           x2  y2  z2
           dst.
    
```

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

### 3.2.3. Pustaka Tampang Lintang

Dalam menghitung faktor pelipatan efektif guna memperoleh nilai reaktivitas temperatur bahan bakar digunakan pustaka tampang lintang neutron yang ada di modul XSection MCNP5. Bahan bakar (*meat*) divariasikan 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 elemen-elemen 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.

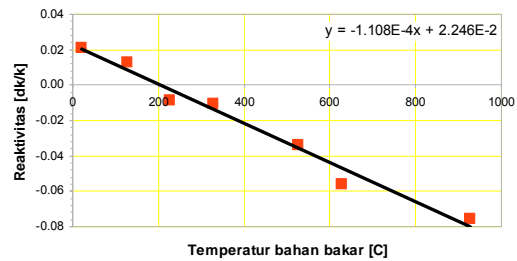
Elemen	U-235		U-238		H di dalam ZrH	
	ZAID	Pustaka	ZAID	Pustaka	ZAID	Pustaka
294	92235.60c	endf60	92238.60c	endf60	h/zr.60t	endf6.3
400	92235.12c	endf62mt	92238.12c	endf62mt	h/zr.61t	endf6.3
500	92235.13c	endf62mt	92238.13c	endf62mt	h/zr.62t	endf6.3
600	92235.14c	endf62mt	92238.14c	endf62mt	h/zr.62t	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

Tabel 2. Nilai  $k_{eff}$  sebagai fungsi temperatur bahan bakar.

T <sub>bahan bakar</sub>		k <sub>eff</sub>	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 reaktivitas temperatur bahan bakar dinyatakan dalam satuan  $\Delta\rho/\rho_C$  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  $\alpha_T = -1.108 \times 10^{-4} \Delta\rho/\rho_C$ , 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  $\alpha_T = -1.20 \times 10^{-4} \Delta\rho/\rho_C$  [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 perhitungan.
- 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 ini diperoleh estimasi nilai koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar untuk reaktor Kartini  $\alpha_T = -1.108 \times 10^{-4} \Delta p / ^\circ C$ , sedangkan nilai yang tercantum di LAK adalah  $\alpha_T = -1.20 \times 10^{-4} \Delta p / ^\circ C$ . 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 penghargaan 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

1. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 43 tahun 2006 tentang Perizinan Reaktor Nuklir.
2. International Atomic Energy Agency, Safety of research reactors: (IAEA safety standard series No NS-R-4, Vienna; 2005.
3. Lamarsh, John R. Introduction to nuclear engineering (2nd ed): Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, Reading; 1983.
4. Badan Tenaga Nuklir Nasional. Laporan analisis keselamatan reaktor Kartini Rev 7. Yogyakarta: Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan (PTAPB)-BATAN;2008.
5. Yazid, Putranto Ilham, Triga MCNP Ver. 9.0 (program komputer). Bandung; Pusat Teknologi Nuklir Bahan dan Radiometri (PTNBR)-BATAN;2006.
6. 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.
7. Ravnik M. Description of TRIGA Reactor, ([www.rcp.ijs.si/ric/description-a.html](http://www.rcp.ijs.si/ric/description-a.html)).

