

# ANALISIS KOEFISIEN TEMPERATUR FUNGSI PENGKAYAAN URANIUM PERANGKAT BAHAN BAKAR PWR 1000 MWe DENGAN MCNP

Rokhmadi dan Tukiran

PUSAT TEKNOLOGI REAKTOR DAN KESELAMATAN NUKLIR-BATAN  
Kawasan PUSPIPTEK Gd. No. 80 Serpong 15310  
E-mail : rokh\_rsg@batan.go.id, tukiran@batan.go.id

## ABSTRAK

**ANALISIS KOEFISIEN TEMPERATUR FUNGSI PENGKAYAAN URANIUM PERANGKAT BAHAN BAKAR PWR 1000 MWe DENGAN MCNP.** Dalam rangka menyongsong pembangunan PLTN pertama di Indonesia, maka perlu pengkajian tentang keselamatan PLTN tersebut. Salah satu parameter keselamatan reaktor PLTN adalah parameter koefisien temperatur. Parameter ini perlu ditentukan dengan akurat karena mempunyai peranan penting dalam analisis kestabilan dan pengendalian transien operasi reaktor. Dalam makalah ini, koefisien temperatur moderator, kelongsong dan bahan bakar dihitung untuk perangkat bahan bakar PWR 1000MWe dengan pengkayaan 3%, 2,5% dan 2%. Perhitungan dilakukan menggunakan paket program metode Monte Carlo MCNP5 versi 1.3. dengan data nuklir ENDF/B-VI.2 dan ENDF/B-V. Kondisi dingin dengan temperatur sebesar 293,6K dipakai sebagai acuan. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa koefisien temperatur bahan bakar pada pengkayaan 3%, 2,5%, 2% masing-masing adalah -1,16 pcm $\Delta$ k/k/K, -1,47 pcm $\Delta$ k/k/K dan -1,61 pcm $\Delta$ k/k/K. Bahan bakar merupakan material yang paling sensitif jika terjadi perubahan temperatur, sedangkan efek pada kelongsong dapat diabaikan. Meskipun demikian, semua nilai koefisien reaktivitas bernilai negatif.

Kata kunci : bahan bakar PWR, pengkayaan,  $k_{inf}$ , koefisien temperatur, MCNP5

## ABSTRACT

**ANALYSIS OF THE TEMPERATURE COEFFICIENT OF THE PWR 1000 MWe FUEL ASSEMBLY OF ENRICHMENT FUNCTION USING MCNP CODE.** As a part of preparation for the first Nuclear Power Plant, NPP, in Indonesia, it is necessary to assess the safety of the NPP. One of the safety parameters of an NPP reactor is temperature coefficient parameters. The parameters must be determined with high accuracy because those are important values to analyze the stability and transient control of the reactor. In this paper, the moderator, cladding and fuel temperature coefficients were calculated for the PWR 1000MWe fuel assembly with enrichment of 3%, 2.5% dan 2%. The calculations were carried out using the Monte Carlo method code of MCNP5 version of 1.3. The nuclear data of ENDF/B-VI.2 is used as a main nuclear data. In hot condition, some neutron cross-section materials were taken from the ENDF/B-V nuclear data. The cold condition with temperature of 293.6K is used as a reference. The calculations showed that the temperature coefficient for fuel on 3%, 2.5%, 2% enrichment are -1.16 pcm $\Delta$ k/k/K, -1.47 pcm $\Delta$ k/k/K and -1.61 pcm $\Delta$ k/k/K respectively. The fuel is the most sensitive materials if the change of temperature occurred, while the effect on cladding material can be avoided. However, all values of the temperature coefficient are negative.

Keywords : PWR fuel assembly, enrichment,  $k_{inf}$ , temperature coefficient, MCNP5

## 1. PENDAHULUAN

Salah satu kandidat jenis PLTN yang akan dioperasikan di Indonesia adalah jenis reaktor air ringan bertekanan (*Pressurized Water Reactor*,

PWR). Ciri utama dari reaktor ini ialah pendingin dan moderator air ringan dipertahankan dalam fase cair dengan cara memberi tekanan. Dalam pengoperasian pada daya penuh, temperatur air ringan dapat mencapai temperatur rerata sebesar

570K atau sekitar 300°C. Pada daya yang sama, temperatur rerata kelongsong dan bahan bakar masing-masing dapat mencapai temperatur 600K dan 800K [1]. Melihat adanya kenaikan temperatur yang cukup tinggi ini, maka perubahan faktor perlipatan efektif teras pasti terjadi dengan signifikan sehingga mempengaruhi pengendalian reaktivitas lebih teras PWR.

Pengendalian reaktivitas sangat penting dalam pengoperasian suatu PWR agar aman dan handal. Oleh karena itu, analisis tentang parameter koefisien temperatur di PWR penting dilakukan, yaitu parameter yang menunjukkan karakteristik faktor perlipatan efektif teras akibat perubahan temperatur di bahan bakar selama pengoperasian reaktor. Naiknya temperatur bahan bakar akibat reaksi fisi akan berpindah (*transfer*) ke kelongsong kemudian ke moderator. Selama proses perpindahan panas terjadi, terjadi perubahan parameter neutronik, diantaranya nilai faktor perlipatan efektif ( $k_{eff}$ ). Oleh karena itu, akurasi perhitungan parameter ini sangat dipengaruhi oleh ketersediaanampang lintang neutron sebagai fungsi temperatur untuk bahan material penyusun bahan bakar PWR.

Paket program metode Monte Carlo MCNP5 versi 1.3 merupakan salah satu program yang dapat menghitung parameter  $k_{eff}$  dengan akurat [2]. Akurasi yang tinggi ini diperoleh karena pemodelan geometri dapat dilakukan dengan detail, data tampang lintangnya merupakan kontinyu terhadap energi neutron dan lengkap. Ketiga hal tersebut merupakan alasan digunakannya MCNP5 dalam menganalisis parameter reaktivitas teras PWR.

Penelitian yang berkaitan dengan parameter reaktivitas teras PWR menggunakan MCNP5 dilakukan dalam tiga tahap. Tahap pertama adalah pengkajian parameter pin bahan bakar. Tahap kedua adalah pengkajian parameter perangkat bahan bakar. Kemudian dilanjutkan dengan tahap ketiga yaitu perhitungan parameter teras penuh PWR. Kajian tahap pertama sudah selesai dilakukan [3,4]. Makalah ini merupakan pengembangan tahap kedua yaitu dengan variasi pengkayaan 2%, 2,5% dan 3,1% bahan bakar  $UO_2$ . Hal ini perlu dilakukan untuk mengetahui pengaruh pengkayaan pada tiap-tiap perangkat bakar sebelum melakukan perhitungan tahap ketiga yaitu perhitungan teras PWR.

Dalam makalah ini dikembangkan dengan memvariasi pengkayaan uranium kemudian dihitung pengaruhnya terhadap koefisien temperatur bahan bakar, kelongsong dan moderator. Pada kasus ini digunakan PWR 1000 MWe dengan pengkayaan 2%, 2,5% dan 3% dengan konfigurasi 17×17. Tujuan penelitian ini adalah mendapatkan karakteristik koefisien

temperatur perangkat bahan bakar akibat pengkayaan uranium.

## 2. TEORI

Bahan bakar di dalam teras reaktor nuklir disusun dalam barisan geometris yang teratur. Untuk reaktor jenis PWR barisan ini terdiri dari batang bahan bakar berbentuk silinder dengan kelongsong Zirkaloy yang diletakkan dalam air dan diatur dalam barisan persegi. Barisan ini biasanya disebut dengan kisi (*lattice*) reaktor dan jarak antara pusat batang bahan bakar yang berdekatan disebut dengan *pitch* [1]. Bahan dan ketebalan kelongsong serta volume air diantara batang bahan bakar dinyatakan sebagai parameter-parameter kisi. Air di antara batang bahan bakar berfungsi sebagai zat alir (fluida) kerja dalam sistem pembawa panas dan sebagai bahan moderator untuk perlambatan neutron. Persamaan faktor multiplikasi neutron untuk sistem tak berhingga ( $k_{inf}$ ) adalah sebagai berikut[1],

$$k_{inf} = \eta \cdot f \cdot \epsilon \cdot p \quad (1)$$

dengan,

$$\eta = \frac{\nu \sum_f^F}{\sum_a^F} \quad (2)$$

dengan  $\nu$  adalah jumlah neutron yang dilepaskan per reaksi fisi

$$f = \frac{\sum_a^F}{\sum_a^M} = \frac{N^F}{N^M} \frac{\sigma_a^F}{\sigma_a^M} \quad (3)$$

sehingga

$$k_{inf} = \frac{N^F}{N^M} \frac{\nu \sigma_f^F}{\sigma_a^M} \quad (4)$$

$N^F$  dan  $N^M$  adalah masing-masing rapat atom uranium dan rapat atom moderator. Rapat atom secara umum dapat ditentukan dengan persamaan seperti berikut[6] :

$$N_i = \left[ \frac{\rho_i x N_{Avo}}{A_i} \right] \times 10^{-24} \quad (5a)$$

$$= \left[ \frac{\rho_{mixt} x w_i x N_{Avo}}{A_i} \right] \times 10^{-24} \quad \text{atom/barn cm}$$

dengan:

- $w_i$  = fraksi berat isotop  $i$  (%)
- $\rho_i$  = densitas isotop  $i$  ( g/cc )
- $N_{Avo}$  = bilangan Avogadro =  $0,602252 \times 10^{24}$  (g mol)<sup>-1</sup>
- $A_i$  = nomor atom isotop  $i$  ( g/mol )

Kerapatan campuran  $\rho_{mixt}$  dihitung dengan persamaan :

$$\rho_{mixt} = \frac{1}{\sum_{i=1}^I \frac{w_i}{\rho_i}} \text{ (g/cc)} \quad (5b)$$

Apabila  $N^M/N^F$  meningkat maka neutron akan lebih banyak termoderasi sehingga fraksi neutron yang mencapai energi termal bertambah. Dengan neutron termal meningkat maka lebih banyak fisi yang terjadi dalam bahan bakar sehingga  $k_{inf}$  menjadi lebih besar. Meskipun demikian harga  $N^M/N^F$  yang besar menyebabkan fraksi neutron termal yang diserap oleh moderator juga bertambah. Pada suatu harga  $N^M/N^F$  tertentu dimana neutron termal cenderung menjadi jenuh,  $k_{inf}$  kemudian berkurang karena bertambahnya serapan neutron termal dalam moderator.

Pada kondisi kritis berlaku :

$$k_{eff} = k_{inf} P_{nl} = 1 \quad (6)$$

dengan,

$k_{eff}$  = faktor multiplikasi efektif,

$P_{nl}$  = keboleh jadian neutron tidak bocor

Koefisien temperatur adalah jumlah yang menyatakan reaktivitas akan berubah untuk berubahnya temperatur parameter reaktor, didefinisikan sebagai berikut:

$$\alpha_T = \frac{(k_n - k_{n-1})}{(k_n \times k_{n-1}) \Delta T} \times 100\% \quad (7)$$

dengan,

$\alpha_T$  = koefisien temperatur elemen bakar

[% $\Delta k/k/K$ ]

$k_n$  = nilai faktor perlipatan,  $k$ , pada temperatur ke  $n$

$k_{n-1}$  = nilai faktor perlipatan,  $k$ , pada temperatur ke  $n-1$

$\Delta T$  = perubahan temperatur dari  $n-1$  ke  $n$

Metode perhitungan  $k_{eff}$  pada Monte Carlo didasarkan pada prosedur iteratif. Setelah menebak nilai distribusi sumber awal, histori neutron diikuti untuk menghasilkan sumber fisi pada generasi berikutnya untuk mengestimasi nilai  $k_{eff}$  yang baru. Distribusi sumber fisi baru akan terus mengikuti histori untuk generasi kedua dan menghasilkan distribusi sumber fisi yang lain dan mengestimasi nilai  $k_{eff}$ . Generasi demi generasi neutron yang sering disebut dengan siklus neutron berulang hingga distribusi sumber menjadi konvergen. Jika distribusi sumber fisi sudah konvergen ke suatu keadaan stabil, tally menentukan laju reaksi dan nilai  $k_{eff}$  diakumulasi

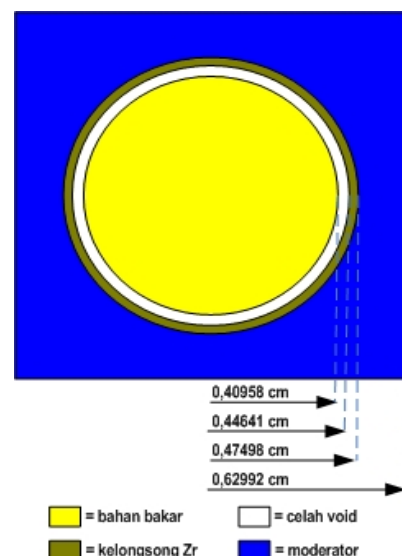
dengan menambah beberapa siklus hingga ketidakpastian secara statistik menjadi cukup kecil. Dengan menganalisis prosedur iterasinya dapat menyelesaikan perhitungan *eigenvalue*  $k_{eff}$  hingga distribusi sumber fisi konvergen. Nilai  $k_{eff}$  *eigenvalue* diestimasi berdasarkan perhitungan di atas.

## DISKRIPSI PERANGKAT BAHAN BAKAR PWR 1000 Mwe

Reaktor PWR 1000 MWe mempunyai bahan bakar  $UO_2$  jenis pelet silindris dan kelongsong Zircaloy-4 [5]. Di dalam kelongsong bahan bakar baik di bagian atas maupun bagian bawah terdapat ruang yang dimanfaatkan untuk menampung gas-gas hasil produk fisi. Setiap perangkat bahan bakar yang berukuran 289 (17x17) diisi oleh 264 batang bahan bakar dan 25 tabung pengarah. Perangkat elemen bakar berbentuk persegi simetris 90 dengan dimensi 21,42 cm x 21,42 cm. Adapun 1 pin bahan bakar PWR 1000Mwe seperti terlihat pada Gambar 1.

**Tabel 1 : Geometri perangkat bahan bakar PWR[5]**

	Nilai [cm]
Jari-jari bahan bakar	0,40958
Tebal celah	0,03683
Tebal kelongsong Zr	0,02858
Pitch bahan bakar	1,25984
Jari-jari tabung pengarah	0,56134
Jari-jari luar tabung pengarah	0,60198



**Gambar 1. Pin bahan bakar PWR 1000**

Data rapat material penyusun bahan bakar, kelongsong dan moderator seperti terlihat pada Tabel 2.

**Tabel 2. Kerapatan Material [4,7]**

Material	Kerapatan (g/cc)
H <sub>2</sub> O (dingin)	~1,0
H <sub>2</sub> O (panas)	~1,0(diasumsikan sama dengan dingin)
Zirkaloy-4	6,44
UO <sub>2</sub>	10,5312
Rapat atom (/barn cm)	
O	$3,34302 \times 10^{-2}$
H	$6,68604 \times 10^{-2}$

### 3. METODE PERHITUNGAN

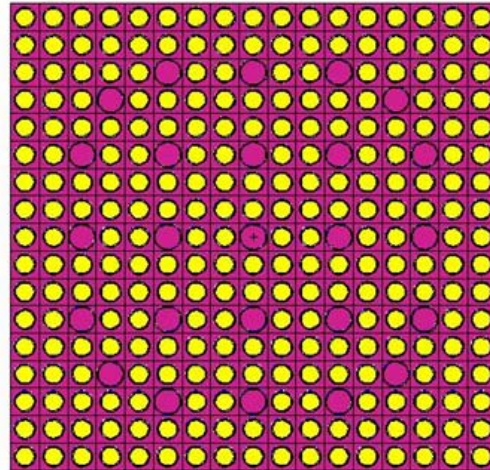
Sebelum melakukan perhitungan, maka terlebih dahulu dilakukan perhitungan kerapatan atom masing-masing material penyusun perangkat bahan bakar. Disamping itu, penentuan jenis tampang lintang neutron juga dilakukan. Data pada Tabel 2 dan dengan pers. (5), maka diperoleh kerapatan atom penyusun bahan bakar, moderator dan kelongsong, seperti terlihat pada Tabel 3.

Tampang lintang neutron yang digunakan dalam perhitungan adalah kombinasi ENDF/B-VI dan ENDF/B-V. Kondisi dingin yang dipilih adalah 293,6K dan kondisi panas sebesar 3000,1K untuk bahan bakar dan 587,2K untuk air dan kelongsong. Khusus untuk atom H dan Zr dipakai data nuklir ENDF/B-V (53c) dalam kondisi panas karena tidak tersedianya di ENDF/B-VI. Data pustaka tampang lintang MCNP5 yang digunakan dalam perhitungan disajikan pada Tabel 4.

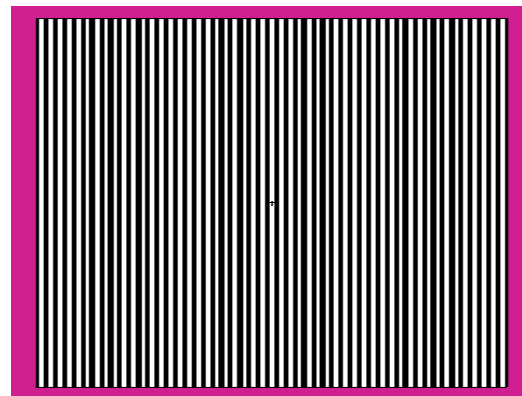
**Tabel 3. Kerapatan atom**

Atom/ Molekul	Massa Atom/ Molekul	Kerapatan (atom/barn cm) pada pengkayaan (%)		
		3	2,5	2
U-235	235,0439	$7,136 \times 10^{-4}$	$5,946 \times 10^{-4}$	$4,757 \times 10^{-4}$
U-238	238,0508	$2,278 \times 10^{-2}$	$2,290 \times 10^{-2}$	$2,302 \times 10^{-2}$
UO <sub>2</sub>	269,139	$7,048 \times 10^{-2}$	$7,048 \times 10^{-2}$	$7,047 \times 10^{-2}$
H <sub>2</sub> O	18,0152	$1,003 \times 10^{-1}$	$1,003 \times 10^{-1}$	$1,003 \times 10^{-1}$
Zr-4	91,2200	$4,251 \times 10^{-2}$	$4,251 \times 10^{-2}$	$4,251 \times 10^{-2}$

Perhitungan dilakukan dengan memodelkan 1 perangkat bahan bakar PWR menggunakan paket program MCNP5. Perangkat bahan bakar tersusun dari pelet UO<sub>2</sub> yang berada didalam kelongsong zirkonium dan dikungkung dengan moderator air. Pemodelan perangkat bahan bakar menggunakan MCNP5 yang detail ditampilkan pada Gambar 2.a dan 2.b.



**Gambar 2a. Model perangkat bahan bakar hasil keluaran MCNP5**



**Gambar 2b. Penampang perangkat bahan bakar keluaran MCNP5**

Gambar 2.a berbasis XY atau dilihat dari sumbu Z, terlihat matriks 17 x 17 yang berisi bundel-bundel bahan bakar UO<sub>2</sub>. Sedangkan Gambar 2.b. hasil pemodelan perangkat bahan bakar berbasis YZ atau dilihat dari sumbu X, bundel-bundel bahan bakar UO<sub>2</sub> terlihat dari samping, sehingga nampak benda pipih berukuran dan jarak sama antar bundel yang berdekatan. Dari Gambar 2.a dan 2.b. tampak jelas *input* yang digunakan sudah benar dalam memodelkan perangkat bahan bakar PWR 17x17 berdimensi 21,42 cm x 21,42 cm. Jika pemodelannya sudah benar, maka perhitungan yang dihasilkan akan akurat.

Berdasarkan data-data di Tabel 1, Tabel 2, Tabel 3 dan Tabel 4 disusunlah *input* yang terdiri

dari geometri cell, surface cell dan material data dengan simulasi jumlah neutron.

**Tabel 4. Pustaka tampang lintang [2]**

Material	ZAID	Temperatur (K)
H-1	1001.66c	293,6
H-1	1001.53c	587,2
O-16	8016.66c	293,6
O-16	8016.53c	587,2
Zr-40	40000.66c	293,6
Zr-40	40000.58c	587,2
U-235	92235.66c	293,6
U-235	92235.65c	3000,1
U-238	92238.66c	293,6
U-238	92235.65c	3000,1

Dalam perhitungan faktor perlipatan, jumlah neutron persiklus adalah 10.000 dengan jumlah total siklus sebanyak 300. Sebanyak 50 siklus diabaikan (*skip*) sebelum menghitung faktor perlipatan. Agar faktor perlipatan yang didapat merupakan faktor perlipatan tak-hingga ( $k_{inf}$ ), maka dimensi ke arah-z dianggap tak berhingga dan permukaan terluar di perangkat menggunakan syarat batas reflektif.

Adapun urutan perhitungan seperti berikut :

1. Menghitung  $k_{inf}$  perangkat bahan bakar dengan kondisi semua material bahan bakar, kelongsong dan moderator pada temperatur kamar 293,6K. Hasil perhitungan ini dipakai sebagai nilai acuan.
2. Menghitung  $k_{inf}$  perangkat bahan bakar dengan kondisi temperatur pelet bahan bakar  $UO_2$  sebesar 3000,1K, sedangkan temperatur kelongsong dan moderator sebesar 293,6K.
3. Menghitung  $k_{inf}$  perangkat bahan bakar dengan kondisi temperatur kelongsong sebesar 587,2K, sedangkan temperatur bahan bakar  $UO_2$  dan moderator sebesar 293,6K.
4. Menghitung  $k_{inf}$  perangkat bahan bakar dengan kondisi temperatur moderator  $H_2O$  sebesar

587,2K, sedangkan temperatur bahan bakar  $UO_2$  dan kelongsong sebesar 293,6K.

5. Menghitung nilai koefisien temperatur bahan bakar  $UO_2$ , kelongsong dan moderator  $H_2O$ .

#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Terlihat dari Tabel 5., bahwa dengan naiknya temperatur pada bahan bakar, kelongsong dan moderator, maka nilai  $k_{inf}$  perangkat bahan bakar semakin mengecil. Digunakannya variasi temperatur bahan bakar, kelongsong dan moderator pada temperatur 293,6K, 587,2K dan 3000,1K karena mengacu tersedianya data nuklir pada program MCNP5, seperti terlihat pada Tabel 4.

Setelah dilakukan perhitungan koefisien temperatur dengan persamaan (7), maka diperoleh hasil koefisien temperatur untuk masing-masing penyusun perangkat bahan bakar seperti disajikan pada Tabel 6. Koefisien temperatur pada pengkayaan 3%, 2,5%, 2% untuk bahan bakar  $UO_2$ , masing-masing adalah -1,16 pcm $\Delta$ k/k/K, -1,47 pcm $\Delta$ k/k/K dan -1,16 pcm $\Delta$ k/k/K sedang untuk kelongsong Zr, masing-masing adalah -0,03 pcm $\Delta$ k/k/K, -0,34 pcm $\Delta$ k/k/K, -0,20 pcm $\Delta$ k/k/K dan untuk moderator  $H_2O$  masing-masing adalah -0,52 pcm $\Delta$ k/k/K, -0,51 pcm $\Delta$ k/k/K dan -0,34 pcm $\Delta$ k/k/K

Kalau dilihat dari laju serapan neutron di bahan bakar  $UO_2$  untuk seluruh rentang tenaga neutron (Gambar 3), maka terlihat bahwa turunnya nilai  $k_{inf}$  pada kondisi panas diakibatkan tingginya laju serapan di daerah tenaga neutron  $10^{-6}$  MeV –  $10^{-2}$  MeV. Tingginya laju serapan ini diakibatkan melebarnya tampang lintang serapan neutron di daerah resonansi tersebut (efek Doppler). Pelebaran terjadi pada rentang tenaga neutron  $2 \times 10^{-4}$  MeV dan  $2 \times 10^{-3}$  MeV. Laju serapan neutron pada Gambar 3 dan 4 diperoleh dari hasil perhitungan tally F4 di MCNP

**Tabel 5. Nilai  $k_{inf}$  fungsi pengkayaan**

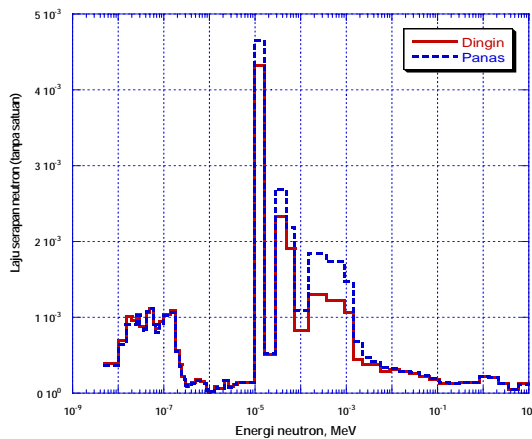
No.	Temperatur (K)			$k_{inf}$		
	$UO_2$	Zr	$H_2O$	3%	2,5%	2%
1.	293,6	293,6	293,6	1,39820±0,00031	1,36143±0,00031	1,35423±0,00031
2.	3000,1	293,6	293,6	1,39934±0,00034	1,35872±0,00034	1,35210±0,00034
3.	293,6	587,2	293,6	1,39803±0,00032	1,35243±0,00032	1,34851±0,00032
4.	293,6	293,6	587,2	1,39522±0,00032	1,34321±0,00032	1,34231±0,00032

**Tabel 6. Nilai koefisien temperatur ( $\alpha$ ) variasi pengkayaan**

No.	Temperatur			$\alpha$ (pcm $\Delta k/k/K$ ) pd pengkayaan (%)		
	UO <sub>2</sub>	Zr	H <sub>2</sub> O	3	2,5	2
1.	293,6	293,6	293,6			
2.	3000,1	293,6	293,6	-	-	-
				1,16	1,47	1,16
3.	293,6	587,2	293,6	-	-	-
				0,03	0,34	0,20
4.	293,6	293,6	587,2	-	-	-
				0,52	0,51	0,34

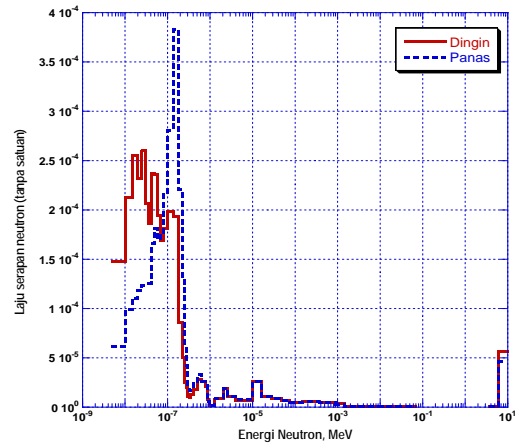
UO<sub>2</sub> ; Bahan Bakar, Zr:Kelongsong,  
H<sub>2</sub>O:moderator

Pada Gambar 4 ditunjukkan bahwa penurunan nilai  $k_{inf}$  akibat naiknya temperatur moderator H<sub>2</sub>O (panas) yang diakibatkan naiknya laju serapan neutron pada rentang tenaga neutron  $9 \times 10^{-8}$  MeV dan  $2 \times 10^{-7}$  MeV. Karena perhitungan koefisien temperatur moderator ini dilakukan tanpa merubah (menyesuaikan) kerapatan air dengan temperatur pada keadaan panas (587,2 K), maka penurunan nilai  $k_{inf}$  murni diakibatkan perubahanampang lintang serapan neutron di moderator.



**Gambar 3. Distribusi laju serapan neutron untuk bahan bakar UO<sub>2</sub>**

Jika dibandingkan laju serapan neutron di bahan bakar UO<sub>2</sub> (3000,1 K) dan moderator H<sub>2</sub>O (587,2 K), maka tampak jelas laju serapan neutron di bahan bakar memiliki selisih 11 kali lipat lebih besar dibanding di moderator H<sub>2</sub>O. Oleh karena itu koefisien temperatur bahan bakar jauh lebih besar 2,2 kali dibanding koefisien temperatur moderator.



**Gambar 4. Distribusi laju serapan neutron untuk moderator H<sub>2</sub>O**

Berdasarkan Tabel 6, besarnya koefisien temperatur kelongsong yang lebih kecil 38,7 kali dibanding koefisien temperatur bahan bakar mengindikasikan bahwa koefisien ini tidak memiliki dampak dalam mempengaruhi reaktivitas teras.

## 5. KESIMPULAN

Semua parameter temperatur bahan bakar UO<sub>2</sub>, kelongsong dan moderator H<sub>2</sub>O bernilai negatif. Semakin tinggi pengkayaan bahan bakar nilai koefisien temperaturnya semakin besar. Nilai  $k_{inf}$  semakin kecil dengan naiknya temperatur bahan bakar dan moderator. Dipandang dari sisi reaktivitas, bahan bakar memiliki karakteristik reaktivitas yang lebih sensitif terhadap perubahan temperatur jika dibandingkan dengan moderator. Perubahan temperatur di kelongsong tidak memiliki pengaruh yang besar pada parameter koefisien temperatur.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian dapat diselesaikan berkat bantuan berbagai pihak terutama Ir. Tagor Malem Sembiring dan Prof. Drs. Surian Pinem, M. Si, atas arahan dan diskusinya.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] LAMARSH, J.R., *Introduction to Nuclear Engineering*, 2<sup>nd</sup> Edition, Addison-Wesley Publishing Company, Inc, 1983
- [2] BROWN, F.B., et al., *MCNP- A General Monte Carlo N-Particle Transport Code Version-5*, Los Alamos, April 24, 2003

- 
- [3] ROKHMADI, *Perhitungan Parameter Neutronik Pin Bahan Bakar PWR dengan MCNP*, Laporan Penelitian Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir BATAN Tahun 2007, Serpong, 29 April 2008
- [4] ROKHMADI, *Analisis Faktor Multiplikasi Tak Hingga Bahan Bakar PWR Akibat Perubahan Temperatur dan Data Nuklir*, Prosiding Seminar Nasional Teknologi dan Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir ke13, UIN-BATAN, Jakarta, 6 Nopember 2007
- [5] DUDERSTADT, J.J dan HAMILTON, L.J., *Nuclear Reactor Analysis*, John Wiley & Sons Inc, 1976
- [6] GOORLEY, T. (Ed.), *Criticality Calculations with MCNP5; A Primer 2<sup>nd</sup> Edition*, LA-UR-04-0294, LANL , 2004
- [7] TUKIRAN, *Penentuan Parameter Kinetik Reaktor PWR AP 600*, Prosiding Laporan Tahunan P2TRR Tahun 2004

**TANYA JAWAB**