

EVALUASI PARAMETER NEUTRON KASIP REAKTOR PWR AP1000

T.M. Sembiring, S. Pinem

Bidang Fisika dan Teknologi Reaktor, PTRKN-BATAN
Kawasan PUSPIPTEK Gd. No. 80, Serpong, Tangerang Selatan 15310
e-mail: tagorms@batan.go.id

ABSTRAK

EVALUASI PARAMETER NEUTRON KASIP REAKTOR PWR AP1000. Laju perubahan neutron selama manuver batang kendali sangat ditentukan oleh parameter neutron kasip. Oleh karena itu evaluasi parameter neutron kasip untuk PLTN PWR Generasi-III+, seperti reaktor AP1000, perlu dilakukan untuk mengetahui peningkatan keselamatan yang telah dilakukan desainer. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui karakteristik parameter neutron kasip reaktor AP1000 untuk kondisi *cold zero power* (dengan dan tanpa boron) dan *hot zero power* (dengan dan tanpa boron). Perhitungan parameter neutron kasip dilakukan dengan paket program metode difusi neutron 3-dimensi BATAN-3DIFF untuk 2, 4 dan 10 kelompok tenaga neutron. Perhitungan sel untuk generasi konstanta difusi dilakukan dengan paket program SRAC2006. Data neutron kasip dari Keepin, Tuttle dan Brady-England dipakai dalam penelitian ini. Hasil perhitungan menunjukkan harga fraksi neutron kasip efektif dengan data Brady-England memberikan hasil yang paling dekat dengan nilai desain dengan perbedaan 1,48%. Sedangkan untuk parameter umur hidup neutron rerata, perbedaan dengan desain 3,50%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa reaktor AP1000 memiliki kestabilan yang relatif konstan meskipun konsentrasi boron dan temperatur berubah.

Kata kunci: PWR, fraksi neutron kasip efektif, umur hidup neutron rerata, BATAN-3DIFF, SRAC2006

ABSTRACT

THE EVALUATION OF DELAY NEUTRON PARAMETERS IN THE AP1000 PWR REACTOR. The rate of change of the neutron population during control rods maneuver is determined by the delayed neutron. Therefore, the evaluation delayed neutron parameters for the PWR Generation-III+ reactor, such as the AP1000 reactor, should be carried out to evaluate the safety improvement has been prepared by designer. The purpose of this study to determine the characteristic of the delayed neutron parameters for the AP1000 reactor in the cold zero power condition (with and without boron) and the hot zero power (with and without boron). The delayed neutron parameters calculation were carried out by using the 3-dimensional neutron diffusion method code, BATAN-3DIFF, for 2, 4 and 10 neutron energy groups. The cell calculations for generating the neutron diffusion group constants were carried out by using the SRAC2006 code. The delayed neutron data from Keepin, Tuttle and Brady-England were used in this study. The calculation results show that the effective delayed neutron fraction using Brady-England data is very close to the design value with a difference of 1.48%. Then, the calculated average neutron life time has a difference of 3.50% compared to design value. The results showed that the AP1000 reactor has a constant relative stability, although the boron concentration and temperature are changed.

Keywords: PWR, effective delayed neutron fraction, average neutron life time, BATAN-3DIFF, SRAC2006

PENDAHULUAN

Karakteristik transien dan dinamika reaktor daya (PLTN) jenis PWR (*Pressurized Water Reactor*) jenis terbaru, yaitu Generasi-III+ seperti reaktor AP1000, perlu dievaluasi untuk mengetahui kemajuan desain dari aspek keselamatan yang telah diterapkan oleh desainer. Oleh karena itu beberapa riset berkaitan dengan desain reaktor PWR Generasi-III+ perlu dilakukan.

Beberapa riset yang berkaitan parameter keselamatan teras reaktor AP100 telah dilakukan^[1-2]. Hasil yang diperoleh dalam penelitian ini adalah penentuan reaktivitas padam^[1] dan koefisien reaktivitas umpan balik negatif^[2]. Oleh karena itu, parameter neutronik teras berkaitan dengan aspek keselamatan yang belum dievaluasi adalah parameter neutron kasip.

Neutron kasip karena memiliki umur rerata yang lebih lama dibanding neutron serempak, memegang peranan penting dalam penentuan sifat transien reaktor akibat perubahan populasi neutron. Parameter teras yang berkaitan dengan neutron kasip adalah fraksi neutron kasip efektif (β_{eff}), konstanta peluruhan neutron kasip (λ_i) dan umur hidup neutron rerata (ℓ). Dalam penelitian ini disajikan hasil perhitungan dan evaluasi parameter neutron kasip reaktor PLTN PWR jenis AP1000 yang didesain Westinghouse. Tujuan dari penelitian ini adalah mendapatkan karakteristik parameter neutron kasip reaktor AP1000 untuk beberapa kondisi operasi. Kondisi operasi yang dipilih adalah kondisi daya rendah (*zero power*), karena pada kondisi ini manuver batang kendali dilakukan untuk mencapai daya penuh dilakukan sehingga stabilitas reaktor perlu terjamin. Karena reaktor AP1000 menggunakan boron dalam kendali reaktivitasnya, maka kondisi boron yang ekstrim, yaitu dengan dan tanpa boron, juga dilakukan untuk daya rendah.

Perhitungan parameter neutron kasip dihitung dengan paket program metode difusi neutron 3-dimensi, BATAN-3DIFF^[3]. Parameter neutron kasip hasil perhitungan BATAN-3DIFF dibandingkan dengan nilai desain^[4]. Karena akurasi perhitungan parameter neutron kasip dipengaruhi oleh fluks neutron *forward* dan *adjoint*, maka jumlah kelompok tenaga neutron yang digunakan dalam menyelesaikan persamaan difusi neutron mempengaruhi akurasi parameter neutron kasip^[5]. Disamping itu, pengaruh data neutron kasip dalam menentukan parameter neutron kasip juga dilakukan dalam penelitian ini.

DESKRIPSI TERAS REAKTOR AP1000

AP1000 adalah desain reaktor *Westinghouse Electric Company* dan merupakan reaktor Generasi-III+ yang telah menerima persetujuan desain (*final design*) dari US-NRC^[6]. Reaktor AP1000 menghasilkan daya termal sebesar 3400 MW yang dibangkitkan dari 157 perangkat bahan bakar UO_2 dengan pendingin dan moderator adalah air ringan (H_2O). Tabel 1 menyajikan parameter desain reaktor AP1000 yang merupakan deskripsi teras reaktor.

Dalam satu perangkat bahan bakar (*fuel assembly*, FA) AP1000, batang bahan bakar UO_2 dan tabung pengarah (*guide tube*) disusun dalam 17×17 dan spesifikasi desainnya disajikan di Tabel 2^[4]. Deskripsi detail tentang konfigurasi teras AP1000, yaitu susunan pengkayaan, jumlah bahan bakar IFBA dan PYREX dan batang kendali dapat dilihat dalam Pustaka^[4].

Tabel 1. Desain reaktor AP1000^[4]

Parameter	Nilai
Daya reaktor:	
Daya termal, MW	3400
Daya elektrik, MW	1117
Panas yang dibangkitkan di bahan bakar, %	97,4

Teras aktif:	
Tinggi bahan bakar aktif di teras pertama, cm	426,7
Diameter ekuivalen, cm	304
Komposisi dan dimensi reflektor air (H₂O):	
Bagian atas (<i>top</i>) - air dan SS304, cm	~25,4
Bagian bawah (<i>bottom</i>) - air dan SS304, cm	~25,4
Bagian samping (<i>side</i>) - air dan SS304, cm	~38,1
Jumlah perangkat dalam satu teras	157
Perangkat bahan bakar :	
Material bahan bakar	UO ₂ (<i>sintered</i>)
Susunan l (satu) perangkat	17×17
Pengkayaan ²³⁵ U, w%	2,35; 3,40 dan 4,45
Jumlah batang (rod) bahan bakar	264
Jumlah tabung pengarah/ <i>instrument guide thimbles</i>	24/1
Batang kendali (penyerap neutron):	
Jumlah <i>Rod Cluster Control Assembly</i> (RCCA)	53
Jumlah <i>Grey Rod Control Assembly</i> (GRCA)	16
Struktur teras:	
Material <i>core barrel</i>	SS304
Diameter <i>core barrel</i> , ID/OD, cm	339,72 / 349,88
Material <i>baffle</i>	SS304
Ketebalan <i>baffle</i> , cm	2,2

Tabel 2. Data desain perangkat bahan bakar^[4]

Parameter	Nilai
Bahan bakar UO₂:	
Jarak antar rod (<i>pitch</i>), cm	1,260
Diameter pelet, cm	0,81915
Tebal celah, cm	0,01645
Tebal kelongsong, cm	0,0572
Material kelongsong	ZIRLO
Tabung pengarah:	
Diameter dalam/luar, cm	1,123/1,224
Material tabung	ZIRLO

METODE PERHITUNGAN

Parameter fraksi neutron kasip efektif (β_{eff}) dan konstanta peluruhan neutron kasip (λ_i) secara teoritis hanya dapat dihitung jika data fraksi dan konstanta peluruhan neutron kasip untuk setiap kelompok prekursor, β_i dan λ_i dibobot dengan fluks neutron *forward* dan *adjoint*. Kemudian perhitungan parameter umur hidup neutron rerata (ℓ), *average neutron life time*, memerlukan kecepatan neutron rerata untuk tiap kelompok tenaga neutron. Oleh karena itu, paket program metode transpor kebolehdijadian tumbukan, PIJ (SRAC2006)^[7] digunakan dalam penelitian ini untuk menggenerasi konstanta kelompok difusi neutron dan kecepatan rerata neutron. Selanjutnya, paket program BATAN-3DIFF^[3] digunakan untuk perhitungan β_{eff} , λ_i dan ℓ dengan melakukan perhitungan fluks neutron *forward* dan *adjoint*.

Tabel 3 dan Gambar 1 menunjukkan langkah tata cara perhitungan parameter neutron kasip reaktor AP1000. Berdasarkan Tabel 3 nilai β_{eff} dan ℓ reaktor AP1000 pada kondisi *cold zero power* (20 °C) dan tanpa boron (0 ppm) dievaluasi melalui:

- variasi jumlah kelompok tenaga neutron: 2, 4 dan 10
- variasi jenis data neutron kasip: Keepin^[8], Tuttle^[9] dan Brady-England^[10]

Dalam perhitungan ini, spektrum neutron kasip dari Saphier^[11] digunakan untuk seluruh perhitungan teras. Kemudian seluruh hasil perhitungan dibandingkan dengan nilai desain. Perhitungan parameter neutron kasip untuk kondisi lainnya dilakukan dengan:

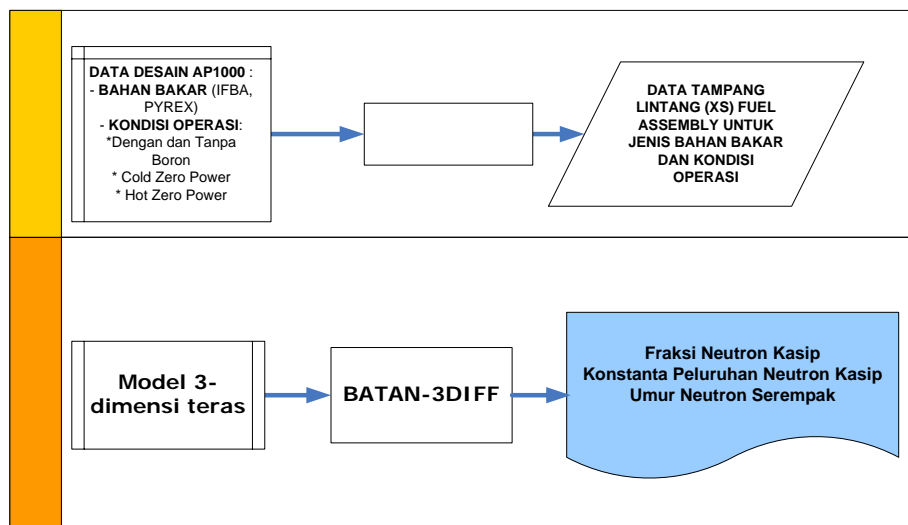
1. menggunakan jumlah kelompok neutron yang waktu komputasinya paling cepat tetapi akurasinya relatif tetap memuaskan.
2. menggunakan data nuklir yang memberikan akurasi perhitungan relatif paling memuaskan

Dengan demikian, β_i , β_{eff} , λ_i dan ℓ dilakukan untuk:

- *cold zero power* (20 °C) dengan boron (1574 ppm)
- *hot zero power* (291,7 °C) tanpa boron (0 ppm)
- *hot zero power* (291,7 °C) dengan boron (1574 ppm)

Tabel 3. Input dan output untuk perhitungan sel dan teras

Perhitungan/Paket Program	Input	Output
Sel / PIJ (SRAC 2006)	Data dimensi dan material bahan bakar dan teras	- Konstanta difusi (tampang lintang makroskopis) untuk seluruh material dalam 2, 4 dan 10 kelompok tenaga neutron - kecepatan rerata neutron untuk 2 dan 10 kelompok tenaga neutron
	Temperatur: 20 °C (<i>cold</i>) dan 291,7 °C (<i>hot</i>)	
	Konsentrasi boron: 1574 ppm dan 0 ppm (tanpa boron)	
	Kelompok tenaga neutron : 2, 4 dan 10	
Teras / BATAN-3DIFF	Konstanta difusi dan kecepatan neutron	- β_i , β_{eff} - λ - ℓ (s)
	Model 3-dimensi teras AP1000	
	Data neutron kasip: Keepin, Tuttle dan Brady-England	
	Spektrum neutron kasip	
	<i>Forward</i> fluks neutron	
	<i>Adjoint</i> fluks neutron	



Gambar 1. Diagram alir perhitungan parameter neutron kasip reaktor AP1000

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 4 menunjukkan nilai fraksi neutron kasip efektif (β_{eff}) sebagai fungsi jumlah kelompok tenaga neutron dan jenis data neutron kasip. Tampak jelas semakin banyak jumlah kelompok tenaga neutron, nilai perhitungan semakin dekat ke nilai desain, yaitu berubah 0,62% - 0,70% jika kelompok dinaikkan dari 2 kelompok menjadi 10 kelompok. Hal ini dipengaruhi oleh semakin akuratnya pembobot fluks neutron (*forward* dan *adjoint*) dengan naiknya jumlah kelompok tenaga neutron. Dari fakta ini, diyakini jika dilakukan perhitungan menggunakan jumlah kelompok tenaga neutron lebih besar dari 10 kelompok, maka akurasi perhitungan dapat ditingkatkan. Hanya saja perlu dicatat waktu komputasi perhitungan 10 kelompok tenaga neutron memerlukan waktu komputasi yang sangat lama jika dibanding dengan 2 dan 4 kelompok. Padahal peningkatan akurasi yang diperoleh sangat kecil dan tidak sebanding dengan waktu komputasi yang digunakan.

Tabel 4. Hasil perhitungan β_{eff} reaktor AP100 untuk kondisi *cold zero power* tanpa boron

Data neutron kasip	Fraksi neuron kasip efektif, β_{eff}		
	2 kelompok	4 kelompok	10 kelompok
Keepin	$6,51 \times 10^{-3}$ (13,18 %)*	$6,52 \times 10^{-3}$ (13,07 %)	$6,56 \times 10^{-3}$ (12,56 %)
Tuttle	$6,82 \times 10^{-3}$ (9,12 %)	$6,83 \times 10^{-3}$ (9,00 %)	$6,86 \times 10^{-3}$ (8,47 %)
Brady-England	$7,34 \times 10^{-3}$ (2,18 %)	$7,35 \times 10^{-3}$ (2,05 %)	$7,39 \times 10^{-3}$ (1,48 %)
Desain^[4]	$7,50 \times 10^{-3}$		

Keterangan: * = perbedaan relatif dibanding nilai desain

Perbedaan dengan nilai desain sebesar 2,18% hasil perhitungan 2 kelompok tenaga neutron bukan angka yang signifikan karena identik dengan perbedaan reaktivitas sebesar 16 pcm $\Delta k/k$. Dengan demikian meskipun jumlah kelompok tenaga neutron ditingkatkan menjadi 10 kelompok, peningkatan akurasi naik 0,78% atau identik dengan berbeda 5,1 pcm $\Delta k/k$. Dengan demikian perbedaan hasil perhitungan dengan 2 kelompok dan 10 kelompok tidak signifikan.

Peningkatan akurasi perhitungan β_{eff} lebih sensitif pada jenis data nuklir dibanding dengan jumlah kelompok tenaga neutron, karena dengan memakai data nuklir Brady-England dibanding Keepin akurasi meningkat sekitar 11% untuk seluruh kelompok tenaga neutron. Hal ini dapat dimengerti karena data neutron kasip Brady-England lebih terbaru dibanding dengan Tuttle dan Keepin. Oleh karena itu, peningkatan akurasi perhitungan masih dapat ditingkatkan lagi jika digunakan data lebih baru dari Brady-England. Mengingat fakta ini, perbedaan dengan nilai desain kemungkinan diakibatkan penggunaan data neutron kasip yang berbeda, karena jenis data neutron kasip yang digunakan tidak dinyatakan dalam dokumen desain.

Tabel 5 menunjukkan bahwa hasil perhitungan parameter umur hidup neutron rerata (ℓ) dengan 2 kelompok memberikan hasil yang paling dekat dengan nilai desain dibanding dengan 2 dan 10 kelompok. Perbedaan hasil perhitungan 2, 4 dan 10 kelompok dengan nilai desain masing-

masing sebesar 3,50 %, 39,00 % dan 31,00 %. Perlu dicatat, karena parameter ℓ hanya bergantung pada fluks neutron maka pengaruh data neutron kasip tidak ada.

Karena parameter ℓ dihitung melalui pembobotan kecepatan neutron tiap kelompok pembobotan dengan fluks neutron *forward* dan *adjoint (importance factor)*, maka seharusnya jumlah kelompok neutron yang tinggi akan memberikan hasil yang lebih akurat. Akan tetapi dalam penelitian ini, justru jumlah kelompok yang paling kecil memberikan kesesuaian yang paling dekat dengan nilai desain. Oleh karena itu, diduga disainer menggunakan 2 kelompok tenaga neutron dalam menentukan nilai ℓ reaktor AP1000. Disamping itu, konstanta kelompok difusi memberikan pengaruh besar dalam perhitungan ℓ , sehingga hasil perhitungan sel di dalam penelitian ini juga dapat menjadi penyebab adanya perbedaan dengan nilai desain. Meskipun demikian, perbedaan sebesar 3,50% dari hasil perhitungan 2 kelompok sudah sangat memuaskan.

Tabel 5. Hasil perhitungan ℓ reaktor AP1000 untuk kondisi *cold zero power* tanpa boron

	Jumlah kelompok tenaga neutron			Nilai desain
	2	4	10	
ℓ , s	$1,93 \times 10^{-5}$	$2,78 \times 10^{-5}$	$2,62 \times 10^{-5}$	$2,00 \times 10^{-5}$
Perbedaan relatif, %	3,50	39,00	31,00	-

Berdasarkan hasil-hasil di atas, data neutron kasip Brady-England dengan 2 kelompok tenaga neutron digunakan dalam menghitung parameter neutron kasip untuk kondisi *cold zero power* tanpa boron, *cold zero power* dengan boron, *hot zero power* tanpa dan *hot zero power* dengan boron yang masing-masing disajikan di Tabel 6, 7, 8 dan 9.

Tabel 6. Parameter neutron kasip reaktor AP1000 untuk *cold zero power* tanpa boron

Kelompok	Fraksi neutron kasip (β_i)	Konstanta peluruhan neutron kasip (λ_i)
1	$2,79121 \times 10^{-4}$	$1,33000 \times 10^{-2}$
2	$1,40883 \times 10^{-3}$	$3,25000 \times 10^{-2}$
3	$1,20316 \times 10^{-3}$	$1,21900 \times 10^{-1}$
4	$2,52017 \times 10^{-3}$	$3,16900 \times 10^{-1}$
5	$1,28102 \times 10^{-3}$	$9,88600 \times 10^{-1}$
6	$6,53732 \times 10^{-4}$	2,95440
Fraksi neutron kasip efektif: $7,34604 \times 10^{-3}$		
Umur hidup neutron rerata: $1,93149 \times 10^{-5}$ s		

Tabel 7. Parameter neutron kasip reaktor AP1000 untuk *cold zero power* dengan boron

Kelompok	Fraksi neutron kasip (β_i)	Konstanta peluruhan neutron kasip (λ_i)
1	$2,77480 \times 10^{-4}$	$1,33000 \times 10^{-2}$
2	$1,40054 \times 10^{-3}$	$3,25000 \times 10^{-2}$
3	$1,19608 \times 10^{-3}$	$1,21900 \times 10^{-1}$
4	$2,50535 \times 10^{-3}$	$3,16900 \times 10^{-1}$
5	$1,27349 \times 10^{-3}$	$9,88600 \times 10^{-1}$
6	$6,49886 \times 10^{-4}$	2,95440
Fraksi neutron kasip efektif: $7,30282 \times 10^{-3}$		
Umur hidup neutron rerata: $1,40607 \times 10^{-5}$ s		

Tabel 8. Parameter neutron kasip reaktor AP1000 untuk hot zero power tanpa boron

Kelompok	Fraksi neutron kasip (β_i)	Konstanta peluruhan neutron kasip (λ_i)
1	$2,74794 \times 10^{-4}$	$1,33000 \times 10^{-2}$
2	$1,38699 \times 10^{-3}$	$3,25000 \times 10^{-2}$
3	$1,18451 \times 10^{-3}$	$1,21900 \times 10^{-1}$
4	$2,48110 \times 10^{-3}$	$3,16900 \times 10^{-1}$
5	$1,26116 \times 10^{-3}$	$9,88600 \times 10^{-1}$
6	$6,43597 \times 10^{-4}$	2,95440
Fraksi neutron kasip efektif: $7,23215 \times 10^{-3}$		
Umur hidup neutron rerata: $2,28894 \times 10^{-5}$ s		

Tabel 9. Parameter neutron kasip reaktor AP1000 untuk hot zero power dengan boron

Kelompok	Fraksi neutron kasip (β_i)	Konstanta peluruhan neutron kasip (λ_i)
1	$2,77892 \times 10^{-4}$	$1,33000 \times 10^{-2}$
2	$1,40262 \times 10^{-3}$	$3,25000 \times 10^{-2}$
3	$1,19786 \times 10^{-3}$	$1,21900 \times 10^{-1}$
4	$2,50907 \times 10^{-3}$	$3,16900 \times 10^{-1}$
5	$1,27538 \times 10^{-3}$	$9,88600 \times 10^{-1}$
6	$6,50852 \times 10^{-4}$	2,95440
Fraksi neutron kasip efektif: $7,31367 \times 10^{-3}$		
Umur hidup neutron rerata: $1,71761 \times 10^{-5}$ s		

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai β_{eff} berkurang 0,55% dengan adanya boron untuk kondisi *cold zero power* akan tetapi naik 1,11% dengan adanya boron untuk kondisi *hot zero power*. Perbedaan ini tidak signifikan karena masing-masing setara dengan perubahan reaktivitas sebesar 4 pcm $\Delta k/k$ dan 8 pcm $\Delta k/k$. Selanjutnya untuk parameter ℓ berkurang masing-masing dengan adanya boron sebesar 27 % dan 25 % untuk kondisi *cold zero power* dan *hot zero power*. Dibanding dengan parameter β_{eff} , perubahan parameter ℓ lebih besar akibat adanya boron. Karena komposisi nuklida dapat belah identik untuk seluruh kondisi operasi maka perubahan parameter β_{eff} , relatif kecil. Sedangkan pada perhitungan parameter ℓ bergantung pada kecepatan rerata neutron di tiap kelompok yang energi reratanya dipengaruhi spektrum neutron. Akibat adanya peningkatan laju serapan neutron dengan adanya boron, maka spektrum neutron bergeser sehingga parameter ℓ mengalami perubahan yang relatif tinggi.

KESIMPULAN

Dalam penelitian ini telah dievaluasi parameter neutron kasip reaktor PWR AP1000 dengan paket program metode difusi neutron 3-dimensi, BATAN-3DIFF untuk 2, 4 dan 10 kelompok tenaga neutron. Hasil perhitungan fraksi neutron kasip efektif, β_{eff} , menunjukkan bahwa penggunaan 10 kelompok tenaga neutron dengan data neutron kasip Brady-England memberikan hasil yang sangat memuaskan jika dibanding dengan nilai desain. Akan tetapi, untuk nilai umur hidup neutron rerata, ℓ , justru penggunaan 2 kelompok tenaga neutron memberikan hasil yang memuaskan. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan 2 kelompok tenaga neutron dan data nuklir Brady-England dapat menghitung parameter neutron kasip reaktor AP1000 dengan hasil yang memuaskan. Disamping itu, hasil perhitungan menunjukkan bahwa reaktor PWR AP1000 memiliki pengendalian neutron yang

relatif tidak berubah dari kondisi *zero* ke *hot* maupun dari kondisi tanpa dan dengan boron, karena fraksi neutron kasip efektifnya tidak berubah signifikan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. SEMBIRING, T.M. Analisis model teras 3-dimensi untuk evaluasi parameter kritikalitas reaktor PWR maju kelas 1000 MW. Jurnal Teknologi Reaktor Tri Dasa Mega Volume 13 Nomor 2, hal 78-95 (2011).
- [2]. SEMBIRING, T.M., PINEM, S. Evaluasi Koefisien Reaktivitas Temperatur Moderator Reaktor Daya PWR 1000 MWe. Prosiding Seminar Nasional ke-17 Teknologi dan Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir; 1 Oktober 2011; Yogyakarta. PTRKN-BATAN; 2011. Hal. 164-174.
- [3]. LIEM, P.H. Pengembangan program difusi neutron banyak kelompok standar Batan (Batan-3DIFF). Prosiding Lokakarya Komputasi Sains dan Teknologi Nuklir ke 5, BATAN; 1995.
- [4]. WESTINGHOUSE. AP1000 European Design Control Document. Chapter 4, Rev.1; 2009
- [5]. CARTA, M. , et. al. Calculation of effective delayed neutron fraction by deterministic and Monte Carlo methods. Science and Technology of Nuclear Installations Volume 2011, 8 pages (2011).
- [6]. UNITED KINGDOM HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE. IAEA generic review for UK HSE of new reactor designs against IAEA safety standard AP100. Diunduh dari: www.hse.gov.uk/newreactors/reports/ap1000iaea.pdf, 3 Desember 2011.
- [7]. JAEA. SRAC2006 : A comprehensive neutronics calculation code system. JAEADData/Code 2007-004. Tokai-mura, Japan: Japan Atomic Energy Agency (JAEA); 2007
- [8]. KEEPIN, G. R. Physics of Nuclear Kinetics. Addison-Wesley Publishing Co; 1965.
- [9]. TUTTLE, R.J. Delay Neutron Data For Reactor Physics Analysis. Nuclear Science Engineering . **56**, 37, 1975
- [10]. BRADY, M. C. and ENGLAND, T. R. Nucl. Sci. Eng, 103, 129; 1989.
- [11]. SAPHIER, D., et.al., Nuclear Science and Engineering, **62**; 1977

DISKUSI/TANYA JAWAB:

1. PERTANYAAN: (Daddy Setyawan, BAPETEN)

- Apa code yang di gunakan oleh pendisaian AP1000?

JAWABAN: (Tagor M. Sembiring, PTRKN-BATAN)

- *Code yang dipakai desainer adalah menggunakan metode nodal. Sedangkan code yang di pakai untuk penelitian ini adalah metode finite difference method.*

2. PERTANYAAN: (Azizul Khakim, BAPETEN)

- Apakah β_{eff} terpengaruh oleh tingkat burn-up?

- ☑ Bagaimana perubahan β_{eff} tahap kemudahan mengendalikan reaktor
- ☑ Bagaimana metode perhitungan β_{eff} pada code yang berbasis Monte Carlo *method* (misalnya MCNP, MVP, dll.)

JAWABAN: (Tagor M. Sembiring, PTRKN-BATAN)

- ☑ Karena jumlah nuklida hasil belah meningkat seiring waktu, maka nilai β_{eff} di awal siklus (BOC) dan di akhir siklus (EOC) berubah $\beta_{\text{eff}} \text{ BOC} > \beta_{\text{eff}} \text{ EOC}$
- ☑ Karena nilai β_{eff} di akhir siklus (EOC) paling kecil, maka pengendalian reaktor di akhir siklus lebih sulit. Oleh karena itu analisis keselamatan PWR paling baik menggunakan nilai $\beta_{\text{eff}} \text{ EOC}$.
- ☑ MCNP yang versi open belum dapat menghitung β_{eff} , akan tetapi untuk code MVP kemungkinan bisa tetapi harus melalui proses olah hasil keluarannya.