

## ANALISIS DISTRIBUSI FLUKS DAN SPEKTRUM NEUTRON REAKTOR PLTN PWR 1000 MWe MENGGUNAKAN PROGRAM MCNP

**Amir Hamzah**

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir  
Kawasan Puspipstek Gd. 80 Serpong, Tangerang Selatan  
email: [ahamzah@batan.go.id](mailto:ahamzah@batan.go.id)

### ABSTRAK

**ANALISIS DISTRIBUSI FLUKS DAN SPEKTRUM NEUTRON REAKTOR PLTN PWR 1000 MWe MENGGUNAKAN PROGRAM MCNP.** Dalam rangka penguasaan teknologi PLTN, PTRKN – BATAN mempunyai tugas menganalisis berbagai aspek reaktor PLTN. Tujuan dari penelitian ini adalah analisis distribusi fluks dan spektrum neutron teras reaktor PLTN. Data distribusi fluks dan spektrum neutron ini sangat dibutuhkan dalam analisis teras dan lainnya diantaranya analisis perusakan bejana tekan PLTN PWR yang disebabkan oleh radiasi neutron cepat (*radiation damage*). Dengan didapatnya data fluks neutron cepat di bejana tekan maka akan dapat diperkirakan umur pakai bejana tekan yang merupakan umur reaktor PLTN itu sendiri. Analisis spektrum neutron di teras reaktor daya PWR 1000 MWe dilakukan menggunakan program MCNP. Reaktor PLTN ini berbahan bakar oksida uranium ( $UO_2$ ) dan matriks 2-dimensi dari kisi terasnya adalah  $(15 \times 15)$  yang dimuati 197 buah elemen bakar nuklir sehingga totalnya terisi 96 ton uranium. Seluruh perangkat EBN terdiri dari 3 tingkat pengayaan yaitu 2,35%, 3,40% 4,45%. Model perhitungan yang dilakukan meliputi 9 zona material yaitu, teras, air atas/bawah teras, air samping teras, tong, air, kelongsong, bejana tekan, beton dan lapisan udara luar. Penentuan distribusi fluks dan spektrum neutron dilakukan ke arah radial di luar bejana tekan dengan tingkat akurasi antara 10% hingga 40% dalam tiap kelompok energi yang jumlahnya 4 dan 50 kelompok. Perhitungan memberikan hasil distribusi fluks spektrum neutron pada tiap daerah tersebut. Hasil analisis fluens neutron cepat ( $E > 1,0$  MeV) pada bejana tekan menunjukkan bahwa pengoperasian selama 100 tahun PLTN ini masih di bawah batas nilai perusakan radiasi pada bejana tekan.

**Kata kunci:** PLTN PWR, fluks neutron, spektrum neutron, MCNP.

### ABSTRACT

**ANALYSIS OF DISTRIBUTION OF NEUTRON FLUX AND SPECTRUM OF 1000 MWe PWR REACTOR USING MCNP.** In order to mastering of nuclear technology, PTRKN – BATAN has the task of analyzing the various aspects of nuclear power reactors. The purpose of this study is neutron flux distribution and spectrum analysis of nuclear power plant reactor core. Neutron flux distribution and spectrum data is needed in the analysis of core and analysis of radiation damage of pressure vessels by fast neutron radiation. With fast neutron data acquired in the pressure vessel would be expected useful life of pressure vessels which are reactor nuclear power plant life itself. The analysis of neutron flux distribution and spectrum in the 1000 MWe PWR reactor power using the MCNP program. This nuclear reactor fueled by uranium oxide ( $UO_2$ ) and 2-dimensional matrix of the core lattice is  $(15 \times 15)$  is loaded with 197 pieces of nuclear fuel elements for a total loaded of 96 tons of uranium. All fuel assemblies consist of three levels of enrichment is 2.35%, 3.40% 4.45%. The calculations model are made of materials which include nine zones, reactor core, water upper and under the core, water beside the core, barrel, water, cladding, pressure vessels, concrete and the outside air. Determination of the distribution of neutron fluxes and spectra made toward the radial outside pressure vessel with an accuracy rate between 10% to 40% in each energy group of 4 and 50 groups. Calculation gives the distribution of neutron flux and spectrum in each area. The analysis results of fast neutron fluens ( $E > 1.0$  MeV) in pressure vessels showed that the operation of nuclear plants over the 100 years is still below the limit value of the radiation damage on the pressure vessel.

**Keywords:** PWR NPP, neutron flux, neutron spectrum, MCNP.

## PENDAHULUAN

Dalam rangka penguasaan teknologi reaktor PLTN, PTRKN – BATAN mempunyai tugas menganalisis berbagai aspek reaktor PLTN. Tugas tersebut dituangkan di dalam renstra PTRKN dengan target pada akhir tahun 2011 adalah “satu dokumen hasil evaluasi desain nuklir parameter kinetika reaktor, desain termohidrolika sistem pendingin reaktor, desain fitur proteksi radiasi; finalisasi peningkatan efektivitas pemanfaatan RSG-GAS berbahan bakar silisida tingkat muat 4,8g U/cc”<sup>[1]</sup>. Pelaksanaan penelitian ini ditunjang dengan dana dalam bentuk program insentif peningkatan kemampuan peneliti dan perekayasa tahun 2011. Dengan demikian makalah ini merupakan bagian dari hasil kegiatan yang telah dilakukan tersebut. Tujuan dari penelitian ini adalah analisis distribusi fluks dan spektrum neutron di reaktor PLTN. Data distribusi fluks dan spektrum neutron di reaktor ini sangat dibutuhkan dalam analisis teras reaktor analisis lain diantaranya analisis perusakan radiasi bejana tekan PLTN PWR. Dengan tersedianya data distribusi fluks neutron maka diantaranya dapat ditentukan distribusi daya di dalam teras reaktor dan spektrum neutron khususnya neutron cepat di bejana tekan maka akan dapat diperkirakan umur pakai bejana tekan yang merupakan umur reaktor PLTN itu sendiri.

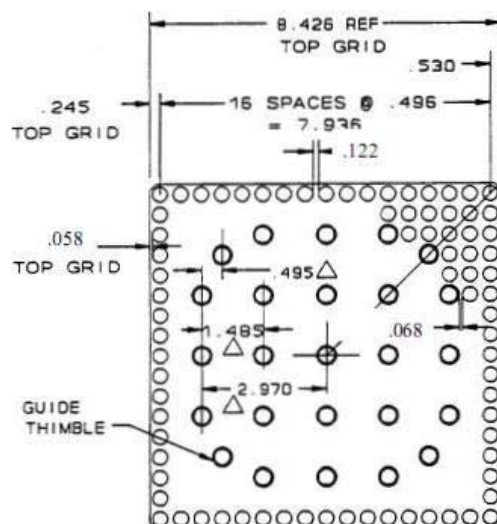
Pada penelitian yang lalu, penulis telah melakukan analisis distribusi fluks neutron dan offset aksial teras reaktor *benchmark* jenis PWR 1300 MWe rancangan KWU<sup>[2]</sup> (*Kraftwerk Union AG, RFJ*) yang telah dipublikasikan dalam seminar TKPFN ke-14<sup>[3]</sup>. Analisis tersebut dilakukan pada daerah teras aktif dengan model teras homogen dan jumlah kelompok energi neutron sebanyak 3 kelompok. Namun karena data yang dimiliki hanya berupa data rapat atom teras dan komponen teras lain, maka hasil analisis distribusi fluks neutron masih berupa nilai ternormalisasi yang belum diperoleh nilai fluks neutron absolut. Demikian pula pada publikasi dalam seminar TKPFN ke-16<sup>[4]</sup> dilakukan analisis spektrum neutron di luar bejana tekan teras reaktor daya jenis PWR 1300 MWe. Dan karena data yang dimiliki juga masih berupa rapat atom, maka nilai spektrum neutron yang diperoleh berupa nilai ternormalisasi dan nilai absolut yang ditampilkan masih berupa pendekatan. Pada makalah ini dituangkan hasil analisis distribusi fluks neutron dan spektrum neutron reaktor daya PWR jenis AP1000. Karena data komposisi bahan bakar dan komponen teras lain telah diperoleh di dalam dokumen SAR reaktor AP1000<sup>[5]</sup>, maka hasil analisis ini berupa nilai distribusi fluks dan spektrum neutron yang absolut.

Analisis distribusi fluks dan spektrum neutron di teras reaktor daya PWR 1000 MWe dilakukan menggunakan program MCNP<sup>[6]</sup>. Reaktor PLTN ini berbahan bakar oksida uranium ( $UO_2$ ) diperkaya dan matriks 2-dimensi dari kisi terasnya adalah  $(15 \times 15)$  yang dimuati 157 EBN. Seluruh perangkat EBN terdiri dari 3 tingkat pengayaan yaitu 2,35%, 3,40% dan 4,45%<sup>[5]</sup>. Model perhitungan yang dilakukan meliputi 9 zona material yaitu, teras, air teras, air samping teras, tong, air, kelongsong, bejana tekan, beton dan lapisan udara luar. Penentuan distribusi fluks dan spektrum neutron dilakukan ke arah radial dari pusat teras hingga udara di luar perisai biologi. Hasil analisis distribusi fluks dan spektrum neutron berupa distribusi fluks neutron termal epitermal dan neutron cepat serta spektrum neutron di daerah tengah teras ke arah radial hingga di luar perisai biologi.

## TEORI

### ▪ Deskripsi teras reaktor daya PWR 1000 MWe<sup>[5]</sup>

Teras reaktor berisi 157 perangkat bahan bakar (Gambar 1) dengan total sekitar 96 ton UO<sub>2</sub> yang terdiri dari 3 jenis pengayaan yaitu 2,35%, 3,40% dan 4,45%. Air bertindak sebagai pendingin dan moderator pada tekanan 153 bar dengan suhu *inlet* (temperatur air masuk teras) 279 °C dan temperatur air rerata teras 303 °C. Tinggi aktif teras adalah 4,27 m dan garis tengah radial 3,04 m sepanjang sumbu (poros) utama. Tameng (perisai) bahang adalah sebuah tong (silinder) baja tahan-karat dengan garis tengah dalam 3,4 m dengan tebal 5 cm. Bejana tekan reaktor austenitis bagian dalam mempunyai garis tengah 4,05 m dan tebal 21,3 cm.



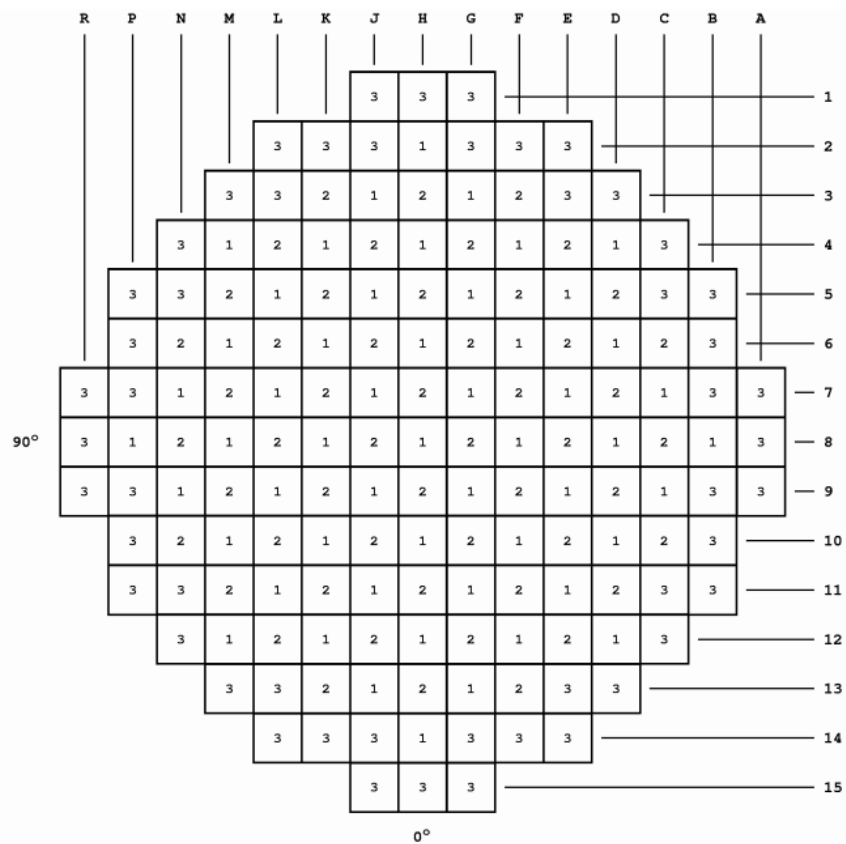
Gambar 1. Perangkat bahan bakar reaktor PWR 1000 MWe.

Tabel 1. Material dan geometri pelet, batang dan perangkat serta teras PLTN PWR 1000 MWe.

Pelet, material	UO <sub>2</sub> tersinter		
Densitas (% teori)	95,5		
Diameter, in	0,3225	0,81915	cm
panjang, in	0,387	0,98298	cm
Massa UO <sub>2</sub> /ft of FR (lb/ft)	0,366	5,45	g/cm
Densitas (teori)		10,96	g/cm <sup>3</sup>
<b>Kelongsong, material</b>	<b>ZIRLO™</b>	(zircaloy)	
Densitas		6,56	g/cm <sup>3</sup>
Diameter luar, in	0,374	0,94996	cm
Diameter dalam, in	0,329	0,83566	cm
<b>Batang Bahan Bakar (FR)</b>			
Panjang aktif, in	168	426,72	cm
Jarak batang BB, in	0,496	1,26	cm
<b>Tabung pengarah (GT), material</b>	<b>ZIRLO™</b>		
Diameter dalam, in	0,442	1,12268	cm
Diameter luar, in	0,482	1,22428	cm
<b>Parangkat Bahan Bakar (FA)</b>			
Pengkayaan	2,35%	3,40%	4,45%
Susunan batang, Jumlah FR/FA	17 x 17	264	

Jumlah GT/FA		25	
Dimensi FA, in	8,426 x 8,426	21,402 x 21,402	cm
Dimensi grid teras / jarak FA, in	8,466 x 8,466	21,504 x 21,504	cm
<b>Teras Reaktor</b>			
Susunan FA, jumlah FA	15 x 15	157	
Daya (MWth, MWe)	3400	1117	
Panjang siklus (bulan, hingga bulan)	18	24	
Selimut ( <i>Baffle</i> ), material, tebal	SS	2,2225	cm
Tong ( <i>Barrel</i> ), material	SS		
Diameter dalam, in	133,75	339,725	cm
Diameter luar, in	137,75	349,885	cm
Bejana Tekan, material	SA-508		
Diameter dalam, in	159,00	403,8600	cm
Diameter luar, in	176,24	447,6496	cm

Bejana tekan diselubungi dengan isolasi (penyekat panas) dan perisai beton utama yang secara normal dirancang dalam dua lapisan terpisah dengan ketebalan total 2 m. Data material serta dimensi pelet, batang dan perangkat bahan bakar hingga teras tertera pada Tabel 1. Konfigurasi teras PLTN dengan daya 3400 MWth atau 1117 MWe dengan panjang siklus 18 hingga 24 bulan dapat dilihat pada Gambar 2.



1: pengayaan 2,35% .. 53 ; 2: pengayaan 3,40% .. 52 ; 3: pengayaan 4,45% .. 52

**Gambar 2. Konfigurasi teras PLTN PWR 1000 MWe.**

▪ **Teori**

Hasil eksekusi program MCNP berupa fluks dan spektrum neutron yang masih dalam nilai ternormalisasi. Untuk itu maka diperlukan suatu besaran agar dapat diperoleh nilai fluks dan spektrum neutron. Secara sederhana besarnya fluks neutron rerata persatuan volume teras reaktor dapat ditentukan dengan persamaan<sup>[8]</sup>:

$$\phi_{rerata} = \frac{P}{E_R \sum_f V} \dots\dots\dots (1)$$

Dan penentuan fluks neutron pada sel yang dihitung dilakukan dengan persamaan:

$$\phi_{sel} = TallyF4 \times \phi_{rerata} \times V_{sel} \dots\dots\dots (2)$$

dengan:

- $P$  = daya reaktor (3400 MWth)
- $E_R$  = energi yang dilepaskan tiap reaksi fisi (3,2E-11 Joule)
- $\Sigma_f$  = tampang lintang makroskopis fisi ( $\text{cm}^2 \cdot \text{g}$ ,  $\sigma_f \times m$ ;  $\sigma_f$ : tampang lintang mikroskopis fisi ( $\text{cm}^2$ ),  $m$ : massa bahan fisil (g))
- $V$  = volume teras reaktor ( $\text{cm}^3$ )
- $Tally F4$  = Data hasil keluaran program MCNP
- $V_{sel}$  = volume sel yang dianalisis ( $\text{cm}^3$ )

Besaran fluks neutron ini merupakan kuat sumber neutron teras reaktor PLTN PWR 1000 MWe (3400 MWth) dengan komposisi dan dimensi yang telah dibahas pada bab sebelumnya. Fluks neutron ini dipakai untuk mendapatkan nilai fluks neutron hasil analisis menggunakan program MCNP.

**TATA KERJA**

▪ **Perhitungan komposisi material**

Berdasarkan ukuran geometri teras reaktor PLTN dan massa total tiap komponen struktur reaktor maka dihitung komposisi dalam satuan atom/barn.cm. Seluruh bagian dari reaktor dimasukkan ke dalam pemodelan geometri karena semua memiliki kontribusi dalam penyerapan radiasi neutron yang dihasilkan dari reaksi fisi di teras reaktor. Selain perisai, komponen dan bahan yang ada di dalam reaktor termasuk air pendingin masing-masing memiliki kontribusi dalam penyerapan neutron. Tingkat penyerapan masing-masing bahan terhadap neutron dan gamma sangat ditentukan oleh tampang lintang serapan dari tiap-tiap atom di dalam bahan. Neutron umumnya mudah diperlambat oleh bahan dengan kandungan atom ringan seperti hidrogen, karbon, boron dan sangat mudah diserap oleh kadmium.

▪ **Pemodelan teras reaktor**

Teras reaktor PLTN dimodelkan ke dalam beberapa zona yaitu teras, selimut, air 1, tong, air 2, kelongsong, bejana tekan dan beton. Pemodelan dilakukan sesederhana mungkin namun tidak mengurangi akurasi hasil analisis. Pemodelan reaktor dilakukan menggunakan program VisEd<sup>[7]</sup>

berdasarkan data-data komposisi dan geometri reaktor PWR 1000 MWe. Kebenaran model yang dibuat akan sangat menentukan kebenaran analisis selanjutnya.

#### ▪ Analisis fluks neutron

Seperti disebutkan di atas, masukan paket program MCNP yang utama diantaranya meliputi:

##### a. Geometri objek.

Geometri objek dibuat sesuai dengan ukuran dimensi objek yang sebenarnya dan divisualisasikan dengan program vised (*visual editor*) untuk mengecek kebenaran model yang dibuat.

##### b. Jenis dan kerapatan nuklida yang menempati objek.

Jenis objek yang diasukkan sesuai dengan penamaan yang tertera di dalam pustaka tampang lintang. Kerapatan nuklida yang dianalisis dapat berupa rapat atom atau rapat massa tiap-tiap nuklida yang hadir.

##### c. Posisi/lokasi deteksi dan pengelompokan energi neutron

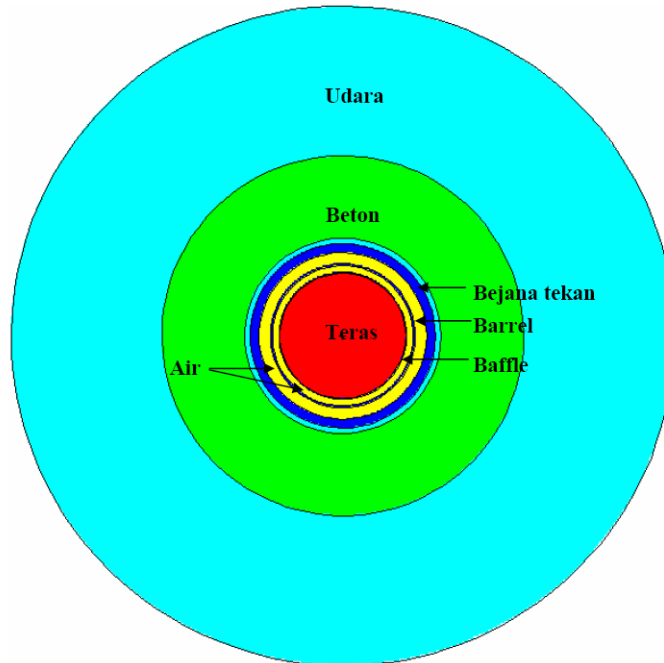
Posisi/lokasi deteksi harus ditentukan sehingga keluaran program memberikan hasil yang dikehendaki. Pengelompokan energi dalam analisis distribusi fluks neutron mengikuti pengelompokan energi yang dilakukan oleh group neutronik yaitu  $E < 6,25E-7$  MeV,  $6,25E-7 < E < 5,53E-3$  MeV,  $5,53E-3 < E < 1,0$  MeV dan  $E > 1,0$  MeV. Sedangkan dalam analisis spektrum neutron dilakukan dalam 50 kelompok energi neutron.

Eksekusi program MCNP dilakukan dengan mengoptimalkan jumlah histori (kelayakan statistik) dan lama unit pemroses (*CPU time*). Penentuan nilai fluks dan spektrum neutron dilakukan berdasarkan hasil keluaran eksekusi program dan diolah menggunakan persamaan (2).

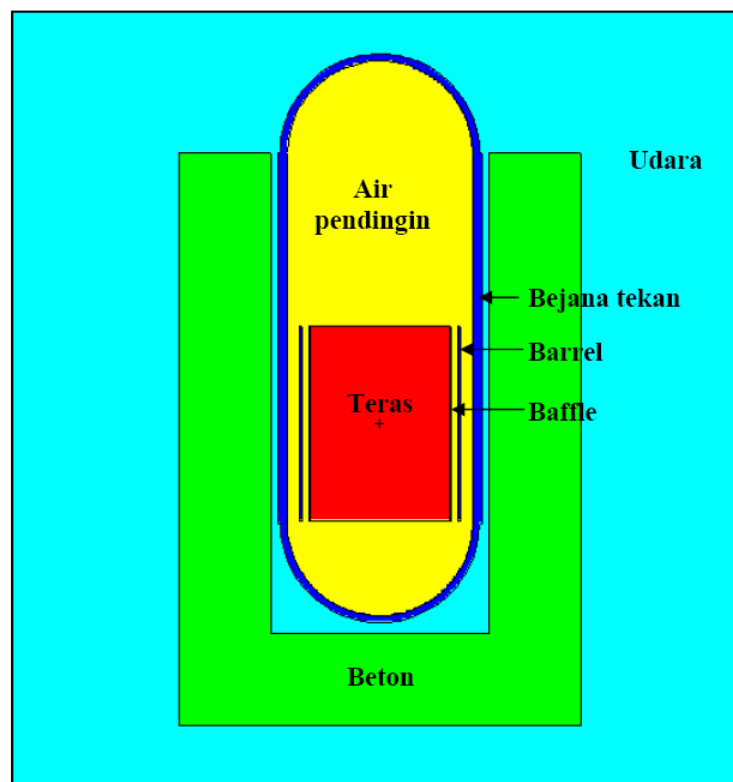
## HASIL DAN PEMBAHASAN

#### ▪ Model perangkat dan teras reaktor

Model teras reaktor PLTN PWR 1000 MWe dibuat dan divisualisasikan menggunakan program VisEd. Dengan program tersebut, input yang dibuat untuk program MCNP dan dari segi geometri dapat dicek kebenarannya. Model teras secara melintang dan membujur dapat dilihat pada Gambar 3 dan 4. Hal terpenting dalam pemodelan dengan MCNP adalah geometri. Akurasi hasil pemodelan juga sangat ditentukan oleh kesesuaian dengan geometri obyek yang akan dimodelkan. Geometri reaktor yang dimodelkan meliputi komponen teras reaktor, selimut, tong, bejana tekan perisai biologi dan tentunya air pendingin serta udara. Seluruh bagian dari reaktor dimasukkan ke dalam pemodelan geometri karena semua material tersebut mengalami proses interaksi dengan neutron yang dihasilkan dari reaksi fisi di teras reaktor.



Gambar 3. Model melintang reaktor PWR 1000 MWe.



Gambar 4. Model membujur reaktor PWR 1000 MWe.

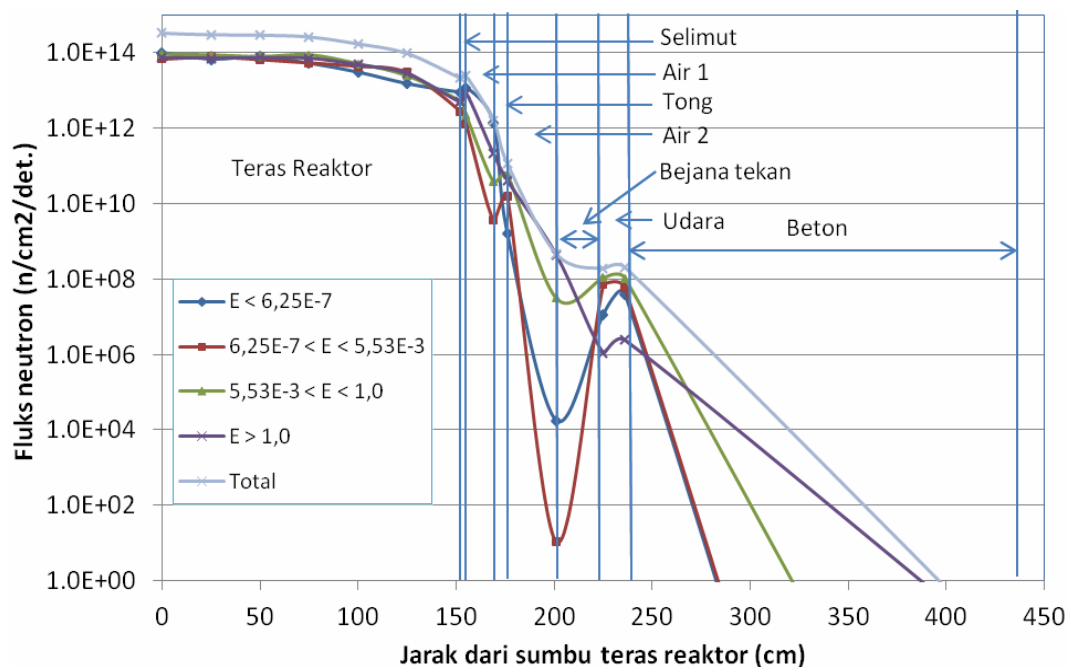
Hasil eksekusi program MCNP atas model teras PLTN PWR 1000 MWe tersebut tanpa adanya bahan penyerap seperti pirek, IFBA, boron, xenon dan batang kendali memberikan nilai faktor perlipatan efektif sebesar  $1,36071 \pm 0,00006$ . Dengan demikian dapat diyakini bahwa model

yang dibuat telah sesuai dengan kondisi teras reaktor tersebut, sehingga analisis selanjutnya dapat dilakukan dengan baik.

#### ■ Hasil analisis

Analisis spektrum neutron di teras PLTN PWR 1000 MWe menggunakan program MCNP telah memenuhi ke-3 kriteria ketelitian perhitungan<sup>[6]</sup>. Parameter kesalahan relatif telah mencapai angka yang lebih rendah dari 0,05 (diperoleh 0,04). Parameter *Variance of variance (VOV)* telah mencapai nilai kurang dari 0,1 (diperoleh 0,08) dan parameter *Figure of merit (FOM)* telah tercapai nilai konstan untuk setiap urutan pengambilan sejumlah partikel yang dirunut.

Hasil perhitungan distribusi fluks dan spektrum neutron pada arah radial mulai dari sumbu pusat teras reaktor PLTN PWR 1000 MWe menggunakan program MCNP diplot pada Gambar 5, 6 dan 7. Seperti terlihat pada Gambar 5, fluks neutron di dalam teras reaktor untuk semua kelompok energi tidak jauh berbeda. Pada daerah 'Air 1' fluks neutron termal timbul kenaikan karena terjadi pemantulan namun hal itu tidak terjadi pada daerah 'Air 2'. Kenaikan fluks termal dan epitermal terjadi di daerah 'udara' yaitu celah antara bejana tekan dan beton sedangkan fluks neutron cepat hanya sedikit mengalami kenaikan di daerah ini. Pada Gambar 5 ini juga terlihat bahwa daya tembus neutron cepat pada daerah perisai biologi (beton) paling jauh.

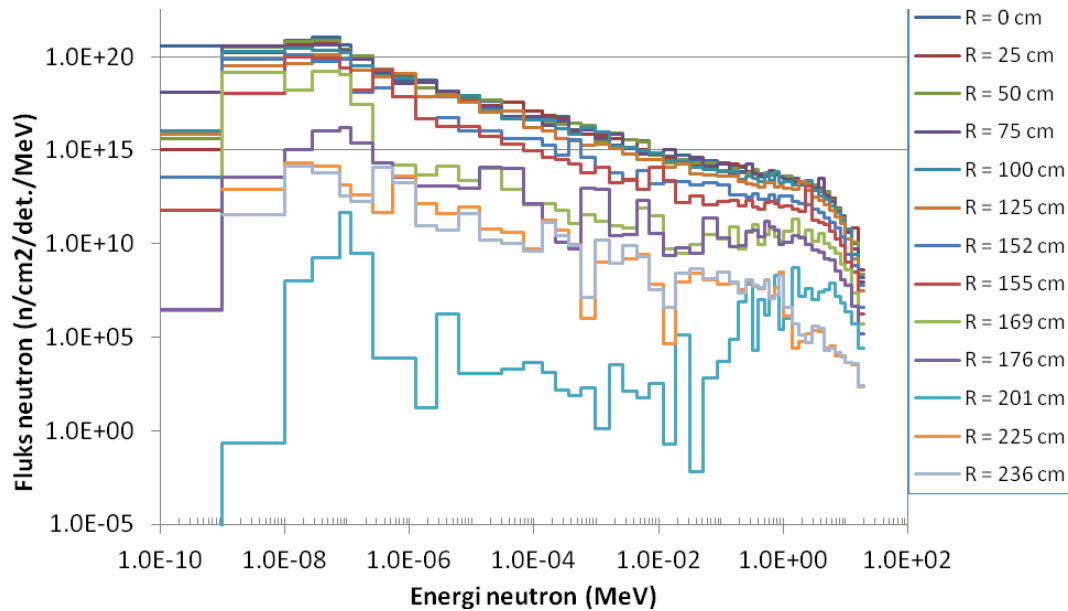


**Gambar 5. Distribusi fluks neutron kearah radial dari sumbu teras reaktor PWR 1000 MWe.**

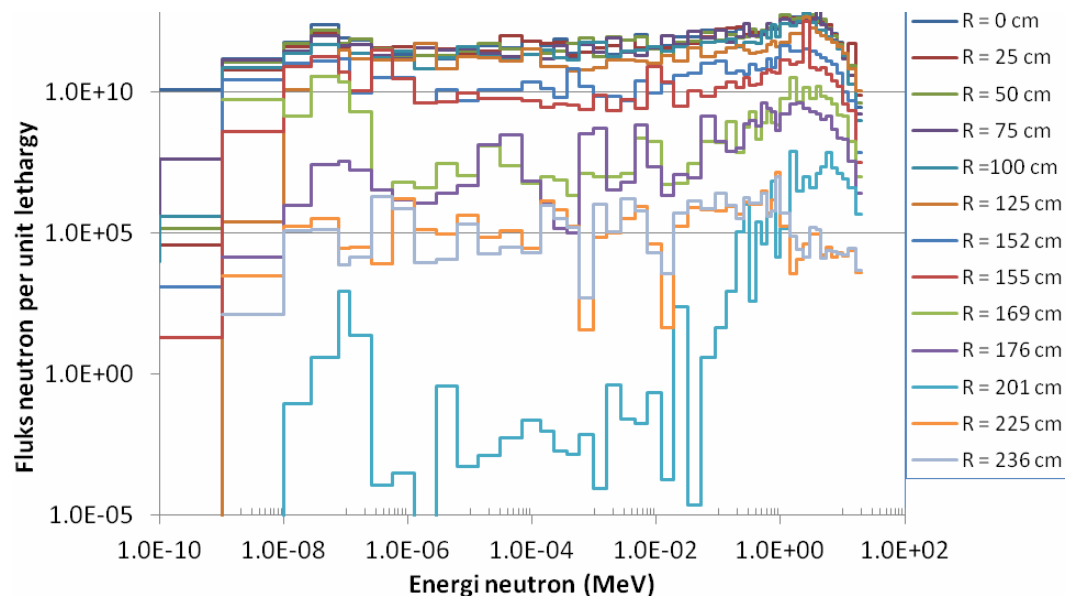
Hasil analisis spektrum neutron reaktor yang ditunjukkan pada Gambar 6 dan 7 menunjukkan hal yang senada dengan Gambar 5, yaitu bahwa spektrum neutron pada jarak 201 cm (bejana tekan) dari pusat teras lebih rendah dari spektrum pada jarak 225 dan 236 cm. Pada Gambar 6 dan 7 juga terlihat penurunan spektrum neutron di dalam teras reaktor yaitu pada jarak sekitar atau kurang dari 150 cm terjadi secara gradual, hal yang tidak terjadi di luar radius tersebut. Pada



gambar-gambar tersebut juga menunjukkan fluks neutron di daerah bejana tekan. Fluks neutron rerata yang berenergi di atas 1 MeV pada posisi ini berorde  $10^7$  n/cm<sup>2</sup>/det. Nilai fluks neutron tersebut memiliki kesalahan yang masih cukup tinggi yaitu sekitar 25%.



Gambar 6. Spektrum neutron pada arah radial dari sumbu teras reaktor PWR 1000 MWe.



Gambar 7. Spektrum neutron dalam satuan *lethargy* pada arah radial dari sumbu teras reaktor PWR 1000 MWe.

Seperti diketahui, material dominan di bejana tekan adalah besi. Terhadap neutron termal dan epitermal, isotop-isotop besi mengalami reaksi aktivasi. Dengan demikian pengaruh fluks

neutron termal terhadap perusakan radiasi tersebut sangat kecil sehingga diabaikan. Lain halnya terhadap neutron cepat dengan energi di atas 1,0 MeV, selain terjadi reaksi aktivasi, kemungkinan yang sangat tidak diharapkan adalah terjadinya tumbukan elastik neutron terhadap atom-atom besi didalam struktur kristalnya. Tumbukan neutron yang energinya cukup tinggi tersebut dapat mengakibatkan terjadinya perusakan radiasi diantaranya penggetasan pada material bejana tekan. Dengan demikian efek dari proses ini mengakibatkan umur bejana tekan akan semakin pendek.

Satuan dari perusakan radiasi ini dikenal sebagai *displacements per atom* (dpa) per tahun. Sedangkan parameter yang menunjukkan kuantisasi perusakan radiasi adalah fluens neutron yaitu fluks neutron dikali waktu. Besarnya fluens neutron cepat ( $E > 1,0$  MeV) yang dapat mengakibatkan terjadinya perusakan radiasi adalah berorde  $10^{20}$  n/cm<sup>2</sup> atau  $10^{24}$  n/m<sup>2</sup>[9]. Untuk kasus pada penelitian ini orde fluks neutron cepat adalah  $10^7$  n/cm<sup>2</sup>/detik. Maka untuk pengoperasian PLTN PWR ini selama 100 tahun, fluens neutron cepat di bejana tekan berorde  $10^{17}$  n/cm<sup>2</sup>. Dengan demikian dari sisi fluens neutron cepat di bejana tekan dapat dikatakan PLTN ini masih aman dioperasikan hingga 100 tahun.

#### **KESIMPULAN DAN SARAN**

Hasil analisis distribusi fluks relatif senada dengan spektrum neutron teras PLTN PWR 1000 MWe pada daerah-daerah teras, selimut, air 1, tong, air 2, bejana tekan, uadara dan perisai biologi. Nilai fluens neutron cepat ( $E > 1$  MeV) di bejana tekan untuk masa operasi reaktor PLTN selama 100 tahun masih di bawah angka batas fluens yang dapat mengakibatkan terjadinya perusakan radiasi.

Untuk meningkatkan ketelitian analisis, pada penelitian yang akan datang akan ditingkatkan model dan dicari cara agar eksekusi MCNP lebih efisien karena waktu eksekusi program masih cukup lama.

#### **UCAPAN TERIMA KASIH**

Pada kesempatan ini, penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada Kementerian Riset dan Teknologi atas kesempatan yang diberikan kepada penulis untuk melakukan penelitian dalam wadah PI PKPP tahun 2012, sehingga penulis dapat mempublikasikan karya tulis ini kepada khalayak.

#### **DAFTAR PUSTAKA**

- [1]. ANONIM, Rencana strategik BATAN Tahun 2010-2014, Sub Kegiatan Pengembangan Pemanfaatan Reaktor riset dan Verifikasi Desain Teras Reaktor Daya PWR, 2010.
- [2]. HEHN, G. and KOBAN, J., Reactor Shielding Benchmark no.2 for a Pressurized Water Reactor, OECD Nuclear Energy Agency, Committee on Reactor Physics, document no. NEACRP-L-151, Paris, 1976.

- [3]. HAMZAH, A., Analisis Distribusi Fluks Neutron dan Offset Aksial Teras Reaktor PLTN Jenis PWR 1300 MWe Menggunakan Program MCNP, Prosiding seminar TKPFN ke-14, 2008, p188 – 196.
- [4]. HAMZAH, A., Analisis Spektrum Neutron Cepat Di Bejana Tekan PLTN PWR Menggunakan Program MCNP, Prosiding seminar TKPFN ke-16, 2010, p29 – 35.
- [5]. ANONIM, AP 1000 European Design Control Document, Westinghouse Electric Company LLC, EPS-GW-GL-700, (2009).
- [6]. X-5 MONTE CARLO TEAM, MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, Los Alamos National Laboratory, June 30, 2004.
- [7]. SCHWARZ, A.L. at.all., MCNP/MCNPX Visual Editor Computer Code Manual For Vised Version 22S, Februari, 2008.
- [8]. LAMARSH, J.R., Introduction to Nuclear Reactor Theory, American Nuclear Society, ASIN/ISBN 0894480405, September (2002).
- [9]. COURTNEY, T.H., Mechanical Behavior of Materials, McGraw-Hill Publishing Company, New York, 1990.

### **DISKUSI/TANYA JAWAB:**

#### **1. PERTANYAAN: (Daddy Setyawan, BAPETEN)**

- Apakah metode yang digunakan dalam menghitung fluks tersebut?.

*JAWABAN: (Amir Hamzah, PTRKN-BATAN)*

- *Metode yang digunakan dalam analisis adalah metode statistik dalam program komputer MCNP5.*

#### **2. PERTANYAAN: (Dr. Toshio Wakbayashi, JICC)**

- What code do you use to calculate?.
- What kind of library do you use?

*JAWABAN: (Amir Hamzah, PTRKN-BATAN)*

- *We use MCNP5 computer code.*
- *ENDF/B-VII cross-sections library was used in this calculation.*