

---

## ANALISIS LAJU DOSIS NEUTRON REAKTOR PLTN PWR 1000 MWe MENGUNAKAN PROGRAM MCNP

Amir Hamzah

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir – BATAN  
Kawasan Puspiptek Gd. 80 Serpong, Tangerang Selatan  
email: ahamzah@batan.go.id

Diterima editor 07 Mei 2012

Disetujui untuk publikasi 04 Juni 2012

### ABSTRAK

**ANALISIS LAJU DOSIS NEUTRON REAKTOR PLTN PWR 1000 MWe MENGGUNAKAN PROGRAM MCNP.** Dalam rangka menyongsong PLTN pertama di Indonesia, dilakukan kajian dan analisis berbagai aspek teknologi reaktor tersebut. Tujuan dari penelitian ini adalah menentukan laju dosis neutron di luar perisai biologik reaktor PLTN PWR 1000 MWe yang merupakan bagian dari kegiatan besar di atas. Data hasil analisis laju dosis radiasi pada posisi tertentu sangat dibutuhkan untuk menunjukkan tingkat paparan radiasi di posisi tersebut. Analisis laju dosis neutron ditentukan berdasarkan hasil analisis fluks dan spektrum neutron. Analisis fluks dan spektrum neutron di teras reaktor daya PWR 1000 MWe dilakukan menggunakan program MCNP. Model perhitungan yang dilakukan meliputi 9 zona material yaitu, teras, air, selimut, air, tong, air, bejana tekan, beton dan lapisan udara luar. Penentuan distribusi fluks dan spektrum neutron dilakukan ke arah radial hingga di luar perisai beton dengan akurasi antara 10% hingga 30% dalam tiap kelompok energi yang jumlahnya 1 dan 50 kelompok. Hasil analisis laju dosis neutron di permukaan perisai biologik reaktor PLTN PWR 1000 MWe pada kondisi reaktor beroperasi daya penuh sudah di bawah nilai batas keselamatan. Maka dapat disimpulkan bahwa dari segi paparan radiasi neutron, penggunaan perisai radiasi beton setebal dua meter sudah memenuhi persyaratan keselamatan.

Kata kunci: PLTN PWR, fluks neutron, perisai, laju dosis neutron, MCNP.

### ABSTRACT

**NEUTRON DOSE RATE ANALYSIS OF THE NPP PWR 1000 MWe USING MCNP.** In order to meet the first nuclear power plant in Indonesia, it has been conducted a study and analysis of various aspects of reactor technology. The purpose of this study was to determine the neutron dose rates at the outside of biological shield of NPP PWR 1000 MWe reactor that is a part of the activities described above. The analysis data of radiation dose rate at a specific position is needed to show the level of radiation exposure in those positions. Analysis neutron dose rate is determined based on the results of the analysis of neutron flux. Analysis of flux and neutron spectrum in the reactor core of 1000 MWe PWR performed using MCNP program. The calculation model performed in 9 zones: reactor core, water, baffle, water, barrel, pressure vessel, concrete and the outside air. Determination of the distribution of neutron flux and spectra made to the radial direction to the outside of concrete shield with an accuracy between 10% to 30% in each energy group of 1 and 50 groups. The analysis results of neutron dose rate at the surface of the reactor biological shield of 1000 MWe PWR reactor at full power condition is lower than safety limit value. In terms of neutron radiation exposure, it can be concluded that the two meter thick concrete radiation shielding meets the safety requirements.

Key words: PWR NPP, neutron flux, shielding, neutron dose rate, MCNP.

## PENDAHULUAN

Apabila PLTN diintroduksi di dalam kebijakan bauran energi di pulau Jawa-Madura-Bali, maka secara ekonomis diperlukan PLTN yang dapat menggenerasi daya listrik sebesar 1000 MW untuk tiap unitnya. Salah satu jenis PLTN yang terbukti memiliki unjuk kerja yang baik untuk generasi daya sebesar itu adalah reaktor jenis PWR (*Pressurized Water Reactor*). Saat ini, sudah tersedia berbagai pilihan desain reaktor PWR, diantaranya reaktor AP1000 [1] yang dikategorikan sebagai PWR generasi-III+. Reaktor daya jenis ini direkomendasikan karena memaksimalkan penggunaan keselamatan pasif dan lebih sederhana sehingga memiliki keandalan keselamatan yang tinggi. Untuk menyongsong itu, telah dilakukan kajian dan analisis berbagai aspek teknologi reaktor tersebut. Pada makalah ini disajikan hasil analisis laju dosis radiasi yang merupakan bagian dari kegiatan tersebut.

Pada penelitian yang lalu, penulis telah melakukan analisis distribusi fluks neutron dan *offset* aksial teras reaktor *benchmark* jenis PWR 1300 MWe rancangan KWU (*Kraftwerk Union AG, RFJ*) [2,3,4]. 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 penelitian [5] tentang analisis spektrum neutron di luar bejana tekan teras reaktor daya jenis PWR 1300 MWe yang masih berupa nilai ternormalisasi dan nilai absolut yang ditampilkan masih berupa pendekatan. Pada penelitian [6,7] mengenai analisis distribusi fluks neutron dan spektrum neutron reaktor penelitian dengan hasil sudah berupa nilai distribusi fluks dan spektrum neutron yang absolut. Salah satu hasil utama dari penelitian di atas adalah telah tervalidasinya model analisis yang dibuat. Sebagai tindak lanjut dari penelitian sebelumnya, perlu dilanjutkan dengan analisis laju dosis neutron reaktor daya jenis PWR 1000 MWe.

Tujuan dari penelitian ini adalah menentukan distribusi laju dosis neutron di reaktor PLTN PWR 1000 MWe ke arah radial mulai dari sumbu teras hingga permukaan luar perisai biologik. Data hasil analisis laju dosis radiasi pada posisi tertentu sangat dibutuhkan untuk menunjukkan tingkat keselamatan radiasi di posisi tersebut. Seperti diketahui, yang paling dominan ada dua jenis radiasi yang terpancar dari reaktor nuklir yaitu radiasi neutron dan gamma. Walaupun daya tembus radiasi neutron [8,9,10] tidak sebesar radiasi gamma namun tingkat kerusakan yang ditimbulkannya lebih besar. Analisis laju dosis neutron ini dilakukan karena jarak antara teras reaktor PWR dengan perisai biologik relatif dekat sehingga dikhawatirkan masih ada neutron yang masih dapat menembus perisai tersebut.

Analisis laju dosis neutron reaktor daya ini dilakukan menggunakan program MCNP [11]. Model perhitungan yang dilakukan meliputi 9 zona material yaitu, teras, air, selimut, air, tong, air, bejana tekan, beton dan lapisan udara luar. Penentuan laju dosis neutron dilakukan ke arah radial dari pusat teras hingga udara di luar perisai biologik melalui zona-zona tersebut.

## TEORI

### Deskripsi Reaktor Daya PWR 1000 MWe

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% [1]. 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. Bejana tekan diselubungi dengan isolasi (penyekat panas) dan perisai beton utama yang secara normal dirancang dalam dua lapisan terpisah

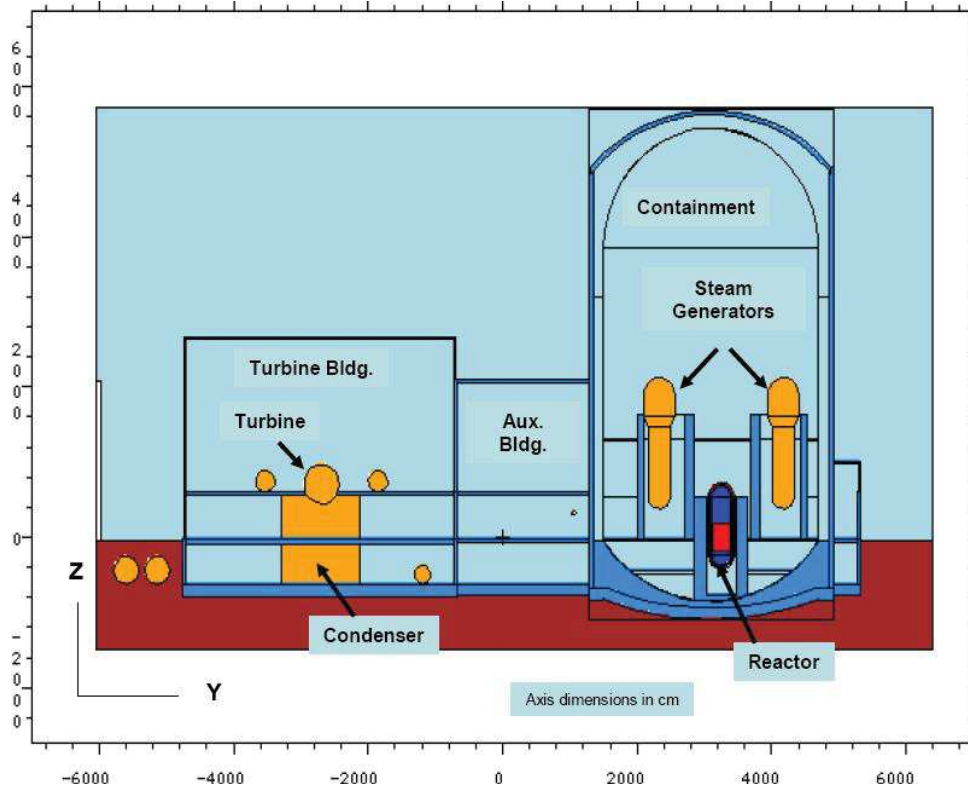
dengan ketebalan total 2 m. Data material serta dimensi pelet, batang dan perangkat bahan bakar hingga teras tertera pada Tabel 1. Konfigurasi teras PLTN dengan daya 3400 MWth atau 1117 MWe dengan panjang siklus 18 hingga 24 bulan dapat dilihat pada Gambar 2. Sebagai gambaran umum secara keseluruhan, gedung reaktor PLTN dapat dilihat pada Gambar 3.

Tabel 1. Material dan geometri komponen teras PLTN PWR 1000 MWe [1].

<b>Pelet, material</b>	<b>UO<sub>2</sub></b>		
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>	<i>(zircaloy)</i>	
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 <i>grid</i> 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	
<b>Selimut (Baffle), material, tebal</b>	SS	2,2225	cm
<b>Tong (Barrel), material</b>	SS		
Diameter dalam, in	133,75	339,725	cm
Diameter luar, in	137,75	349,885	cm
<b>Bejana Tekan, material</b>	SA-508		
Diameter dalam, in	159,00	403,8600	cm
Diameter luar, in	176,24	447,6496	cm
<b>Perisai biologi, beton</b>	SA-508		
Diameter dalam, in	186,24	473,05	cm
Diameter luar, in		873,05	cm

Keterangan: \*) FR = *fuel rod* (batang bahan bakar)  
 GT = *Guide tube* (tabung pengarah)  
 FA = *fuel assembly* (perangkat bahan bakar)





Gambar 3. Susunan tata letak komponen PLTN PWR 1000 MWe [12]

Hasil eksekusi program MCNP berupa fluks dan spektrum neutron yang masih dalam nilai ternormalisasi. Untuk itu maka diperlukan suatu besaran yang merupakan kuat sumber teras agar dapat diperoleh nilai fluks dan spektrum neutron. Secara sederhana besarnya fluks neutron rerata persatuan volume teras reaktor dapat ditentukan dengan persamaan [13]:

$$\phi_{rerata} = \frac{P}{E_R \Sigma_f V} \tag{1}$$

Karena hasil analisis *Tally F4* merupakan fluks pada volume sel, maka penentuan fluks neutron pada sel per  $\text{cm}^2$  dihitung dengan persamaan:

$$\phi_{sel} = \frac{\text{Tally} F4 \times \phi_{rerata}}{V_{sel}} \tag{2}$$

dengan:

- $P$  = daya reaktor (3400 MWth)
- $E_R$  = energi yang ditepaskan 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 fluks neutron hasil keluaran program MCNP
- $V_{sel}$  = volume sel yang dianalisis ( $\text{cm}^3$ )

Besaran fluks neutron tersebut 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. Karena faktor konversi laju dosis neutron ( $F_i$  untuk kelompok energi ke- $i$ ) sangat bergantung pada energi neutron, maka dalam menentukan laju dosis neutron total digunakan persamaan:

$$D' = \sum_i (\phi_{sel,i} \times F_i) \quad (3)$$

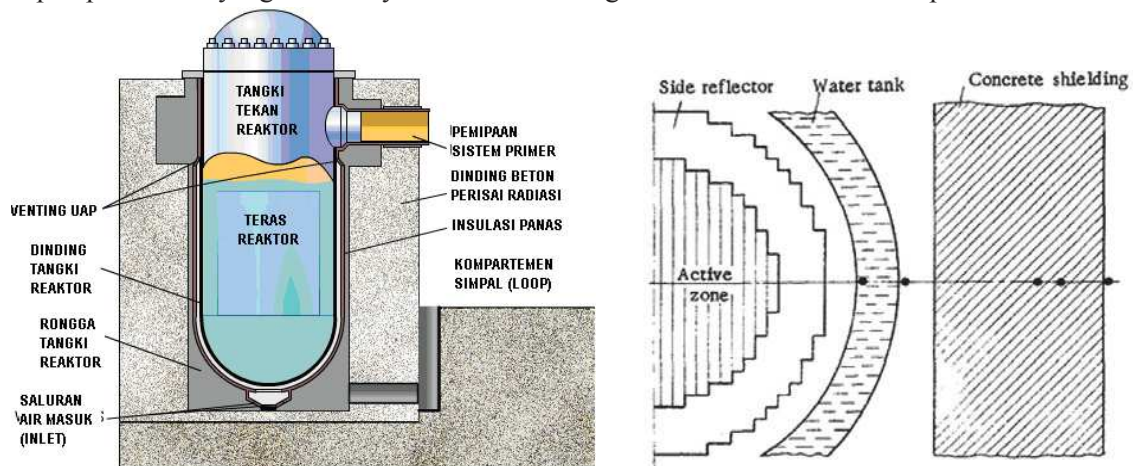
## TATA KERJA

### 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 [8,9,10] dari tiap-tiap atom di dalam bahan. Neutron umumnya mudah diperlambat oleh bahan dengan kandungan atom ringan seperti hidrogen, karbon, dll. dan sangat mudah diserap oleh kadmium, boron dan lain-lain.

### Pemodelan Teras Reaktor Dan Perisai

Teras reaktor PLTN dimodelkan ke dalam beberapa zona yaitu teras, selimut, air 1, tong, air 2, kelongsong, bejana tekan dan beton serta udara. Pemodelan dilakukan sesederhana mungkin namun tidak mengurangi akurasi hasil analisis. Pemodelan reaktor dilakukan menggunakan program VisEd [14] berdasarkan data-data komposisi dan geometri reaktor PWR 1000 MWe. Susunan konstruksi teras reaktor serta perisai radiasi dan perkiraan pemodelan sederhananya dapat dilihat pada Gambar 4. Adapun pemodelan yang sebenarnya dilakukan dituangkan di dalam bab hasil dan pembahasan.



Gambar 4. Susunan konstruksi teras reaktor serta perisai dan pemodelan sederhana.

### Analisis Fluks Dan Laju Dosis 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 indentifikasi yang tertera di dalam pustaka tampak 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 ditentukan sebanyak 22 ke arah radial mulai dari sumbu teras hingga udara luar perisai biologik. Pengelompokan energi dalam analisis distribusi spektrum neutron dilakukan dalam 50 kelompok energi.

Eksekusi program MCNP dilakukan dengan mengoptimumkan jumlah histori (kelayakan statistik) dan lama unit pemroses (*CPU time*). Penentuan nilai spektrum neutron dilakukan berdasarkan hasil keluaran eksekusi program dan diolah menggunakan persamaan (2). Sedangkan penentuan laju dosis dilakukan menggunakan persamaan (3) berdasarkan hasil penentuan spektrum neutron di atas dengan faktor konversi,  $F_i$  pada seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 2.

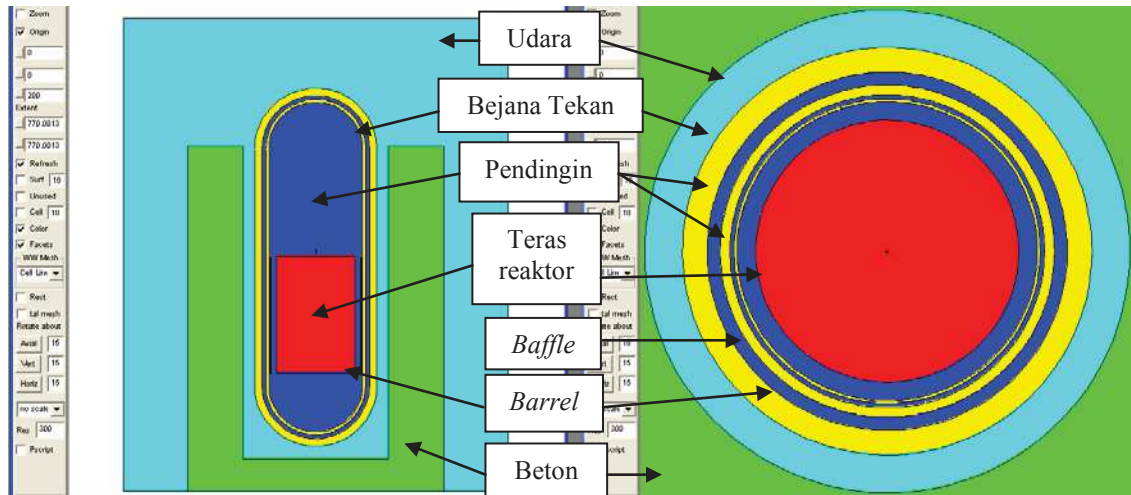
Tabel 2. Faktor konversi fluks ke laju dosis neutron ( $F_i$ ) [12]

Grup	Energi atas neutron (MeV)	Faktor konversi, $F_i$	Grup	Energi atas neutron (MeV)	Faktor konversi, $F_i$
1	14,90	2,27E-04	12	1,110	1,25E-04
2	12,20	2,08E-04	13	0,550	1,32E-04
3	10,00	1,47E-04	14	0,111	9,26E-05
4	8,18	1,47E-04	15	3,35E-03	3,56E-06
5	6,36	1,47E-04	16	5,83E-04	3,76E-06
6	4,96	1,56E-04	17	1,01E-04	3,76E-06
7	4,06	1,56E-04	18	2,90E-05	4,18E-06
8	3,01	1,56E-04	19	1,07E-05	4,18E-06
9	2,46	1,25E-04	20	3,06E-06	4,54E-06
10	2,35	1,25E-04	21	1,12E-06	4,54E-06
11	1,83	1,25E-04	22	4,14E-07	4,46E-06

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Model Teras Reaktor Dan Perisai

Model teras reaktor PLTN PWR 1000 MWe beserta perisai radiasinya dibuat dan divisualisasikan menggunakan program VisEd. Dengan program tersebut, input yang dibuat untuk program MCNP dan dari segi geometri dapat dicek kebenarannya. Model secara melintang dan membujur dapat dilihat pada Gambar 5. 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 meterial tersebut mengalami proses interaksi dengan neutron yang dihasilkan dari reaksi fisi di teras reaktor.



Gambar 5. Hasil pemodelan 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.

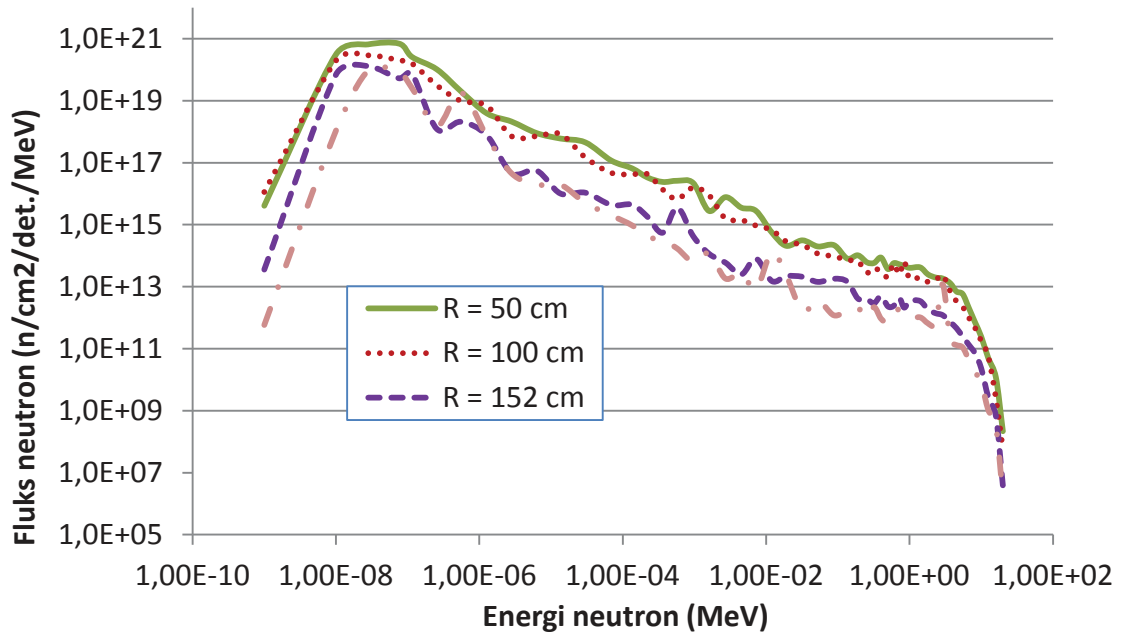
### Hasil Analisis

Analisis spektrum neutron di teras PLTN PWR 1000 MWe menggunakan program MCNP telah memenuhi ke-3 kriteria ketelitian perhitungan [11]. Parameter kesalahan relatif telah mencapai angka yang lebih kecil 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 mencapai nilai konstan untuk setiap urutan pengambilan sejumlah partikel yang diruntut.

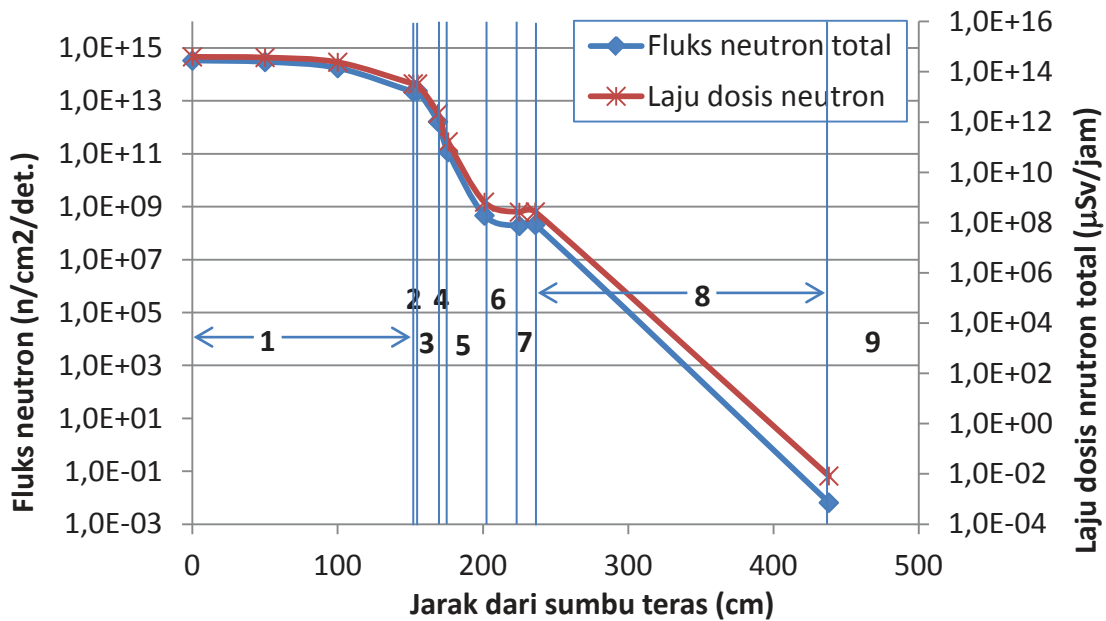
Hasil analisis spektrum neutron pada arah radial mulai dari sumbu pusat teras reaktor PLTN PWR 1000 MWe menggunakan program MCNP diplot pada Gambar 4. Seperti terlihat pada Gambar 4, spektrum neutron dari sumbu teras hingga radius 100 cm tidak terdapat perbedaan yang berarti. Spektrum neutron di luar teras mengalami distorsi karena terjadi penyerapan neutron pada kelompok energi tertentu. Hal itu terlihat pada spektrum neutron pada jarak 152 dan 155 cm dari sumbu teras reaktor yaitu pada daerah *baffle* dan *barrel*. Demikian pula terjadi pada spektrum yang lebih jauh lagi dari sumbu teras reaktor yaitu pada zona bejana tekan dan beton, namun karena distorsi spektrum neutron makin besar maka tidak ditampilkan pada gambar tersebut.

Dengan memasukkan faktor konversi fluks ke laju dosis pada tiap kelompok energi, maka hasil analisis distribusi radial laju dosis neutron total bersamaan dengan fluks neutron total pada tiap zona material reaktor hingga permukaan luar beton diplot pada Gambar 5. Garafik distribusi fluks neutron total dan laju dosis neutron tersebut ditampilkan dalam skala logaritmik dan sumbu fluks neutron berada di sebelah kiri sedangkan sumbu laju dosis berada di sebelah kanan. Hasil analisis fluks neutron total di teras reaktor PLTN PWR 1000 MWe menggunakan program MCNP menunjukkan tingkat kesalahan statistik sekitar 15%. Pada Gambar 5 terlihat bahwa besarnya fluks neutron dan laju dosis tampak sedikit mengalami kenaikan di zona air pendingin dan menurun tajam di bejana tekan. Demikian pula terjadi sedikit kenaikan fluks neutron dan laju dosis neutron di udara luar bejana tekan dan menurun tajam di zona perisai beton. Hal itu dapat dimengerti bahwa neutron tidak banyak mengalami penyerapan dan bahkan mengalami pemantulan yang signifikan pada media air dan udara. Sedangkan pada media bejana tekan dan beton terjadi penyerapan neutron yang besar sehingga fluks neutron dan laju dosis neutron mengalami penurunan yang besar pula.





Gambar 4. Spektrum neutron di teras reaktor PWR 1000 MWe.



1=teras, 2=baffle, 4=barrel, 3=5=pendingin, 6=bejana tekan, 7=9=udara, 8=beton

Gambar 5. Distribusi radial fluks dan laju dosis neutron total reaktor PWR 1000 MWe.

Pada gambar tersebut juga terlihat bahwa, fluks neutron total di permukaan luar perisai biologis sebesar  $6,5 \times 10^{-3}$  n/cm<sup>2</sup>/detik dan laju dosis neutronnya sebesar  $8,3 \times 10^{-3}$  µSv/jam ( $8,3 \times 10^{-4}$  mRem/jam). Besaran fluks neutron total dan laju dosis tersebut merupakan besaran pada kondisi reaktor PLTN PWR 1000 MWe beroperasi pada daya penuh 3400 MWth dan laju dosis neutron di permukaan luar perisai biologik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai laju dosis neutron di permukaan perisai biologik telah memenuhi persyaratan keselamatan yaitu lebih kecil dari nilai batas 25 µSv/jam (2,5

mRem/jam) [15]. Penelitian ini baru pada tahap penentuan laju dosis neutron di permukaan perisai biologik PLTN PWR 1000 MWe. Pada reaktor PLTN juga terdapat perisai radiasi lain di luar perisai biologik yaitu diantaranya pengungkung reaktor. Di masa yang akan datang, penelitian akan dilanjutkan hingga tahap penentuan laju dosis di luar pengungkung reaktor PLTN, sehingga dapat terlihat bahwa paparan radiasi di luar pengungkung reaktor PLTN benar-benar aman bagi pekerja dan lingkungan.

## KESIMPULAN DAN SARAN

Hasil analisis spektrum neutron di zona bejana tekan dan di perisai biologi reaktor PLTN PWR 1000 MWe telah banyak mengalami distorsi dibandingkan dengan di teras. Distribusi fluks neutron total mengalami sedikit peningkatan pada zona air pendingin serta udara dan mengalami penurunan yang tajam pada zona bejana tekan dan beton. Distribusi laju dosis neutron total reaktor PLTN PW 1000 MWe pada zona-zona yang dianalisis mengikuti distribusi fluks neutron karena terjadi penyerapan dan pantulan oleh media yang dilalui. Hasil analisis laju dosis neutron di permukaan perisai biologi reaktor PLTN PWR 1000 MWe pada kondisi reaktor beroperasi pada daya penuh telah memenuhi persyaratan keselamatan radiasi yaitu di bawah nilai batas  $25 \mu\text{Sv/jam}$  ( $2,5 \text{ mRem/jam}$ ).

Analisis selanjutnya akan ditentukan nilai laju dosis di luar perisai radiasi pengungkung yang dapat menurunkan laju dosis hingga benar-benar dapat diyakini tingkat keselamatan radiasi reaktor PLTN PWR 1000 MWe. Untuk meningkatkan ketelitian analisis dan pengembangan analisis ke daerah yang lebih luas, maka dibutuhkan perangkat komputer yang lebih handal diantaranya berupa komputer paralel. Disamping itu juga diupayakan peningkatan model dan metoda agar eksekusi MCNP lebih efisien sehingga waktu eksekusi program MCNP dapat lebih cepat.

## 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 2011, sehingga penulis dapat mempublikasikan hasil penelitian dalam bentuk karya tulis ini kepada khalayak.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Anonim. AP 1000 European Design Control Document. Westinghouse Electric Company LLC: EPS-GW-GL-700; 2009.
2. Hehn G and KOBAN J. Reactor Shielding Benchmark no.2 for a Pressurized Water Reactor. OECD Nuclear Energy Agency; Committee on Reactor Physics: NEACRP-L-151; 1976.
3. Borio di Tigliole A. Benchmark evaluation of reactor critical parameters and neutron fluxes distributions at zero power for the TRIGA Mark II reactor of the University of Pavia using the Monte Carlo code MCNP. *Progress in Nuclear Energy*. 2010;52;5:494-502.
4. 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. p. 188 – 196.
5. Hamzah A. Analisis spektrum neutron cepat di bejana tekan PLTN PWR menggunakan program MCNP. *Prosiding seminar TKPFN ke-16*. 2010. p. 29 – 35.

6. Khattab K. Calculations of the thermal and fast neutron fluxes in the Syrian miniature neutron source reactor using the MCNP-4C code. *Applied Radiation and Isotopes*. 2009;67;4:535-8.
7. Snoj L. Analysis of neutron flux distribution for the validation of computational methods for the optimization of research reactor utilization. *Applied Radiation and Isotopes*. 2011;69;1:136-41.
8. Yılmaz E. Gamma ray and neutron shielding properties of some concrete materials. *Annals of Nuclear Energy*. 2011;38;10:2204-12.
9. Takashi Nakamura. Overview of recent experimental works on high energy neutron shielding. *Progress in Nuclear Energy*. 2004;44;2:85-187.
10. Ghassoun J. Neutron and photon doses in high energy radiotherapy facilities and evaluation of shielding performance by Monte Carlo method. *Annals of Nuclear Energy*. 2011;38;10:2163-7.
11. X-5 MONTE CARLO TEAM. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code. Version 5. LANL; 2004.
12. Blakeman ED. PWR Facility Dose Modeling Using MCNP5 and the CADIS/ADVANTG Variance-Reduction Methodology. ORNL/TM-2007/133; 2007.
13. Lamarsh JR. Introduction to Nuclear Reactor Theory. American Nuclear Society. ASIN/ISBN 0894480405; 2002.
14. Schwarz AL. MCNP/MCNPX Visual Editor Computer Code Manual For VisEd Version 22S; 2008.
15. Bapeten. Ketentuan keselamatan kerja terhadap radiasi. Perka No. 01/Ka-BAPETEN/V-99. BAPETEN; 1999.