

ANALISIS SPEKTRUM NEUTRON CEPAT DI BEJANA TEKAN PLTN PWR MENGUNAKAN PROGRAM MCNP

Amir Hamzah

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir, BATAN
Kawasan PUSPIPTEK Gd. 80, Serpong, Tangerang Selatan, 15310
Email: ahamzah@batan.go.id

ABSTRAK

ANALISIS SPEKTRUM NEUTRON CEPAT DI BEJANA TEKAN PLTN PWR MENGGUNAKAN PROGRAM MCNP. Dalam rangka penguasaan teknologi PLTN, PTRKN – BATAN mempunyai tugas menganalisis berbagai aspek reaktor PLTN. Tujuan dari penelitian ini adalah melaksanakan salah satu bagian dari tugas PTRKN tersebut yaitu analisis spektrum neutron cepat di bejana tekan PLTN. Data spektrum neutron cepat di bejana tekan ini sangat dibutuhkan dalam analisis perusakan bejana tekan PLTN PWR yang disebabkan oleh radiasi neutron cepat (*radiation damage*). Dengan didapatnya data spektrum neutron cepat di bejana tekan maka akan dapat diperkirakan umur pakai bejana tekan yang nota bene merupakan umur reaktor PLTN itu sendiri. Analisis spektrum neutron di luar bejana tekan teras reaktor daya *benchmark* jenis PWR 1300 MWe rancangan KWU (*Kraftwerk Union AG, RFJ*) dilakukan menggunakan program MCNP. Reaktor PLTN ini berbahan bakar oksida uranium (UO_2) diperkaya dan matriks 2-dimensi dari kisi terasnya adalah (15×15) yang dimuati 193 buah elemen bakar nuklir (EBN) termasuk 61 EBN yang mengandung bahan penyerap neutron sehingga totalnya terisi 103 ton uranium. Seluruh perangkat EBN terdiri dari 3 tingkat pengayaan yaitu 3,3%, 2,8% 2,25%. 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 spektrum neutron dilakukan ke arah radial di luar bejana tekan dengan tingkat akurasi antara 11% hingga 50% dalam tiap-tiap kelompok energi yang jumlahnya 47 kelompok. Perhitungan memberikan hasil spektrum neutron pada energi tinggi di atas 1.0 MeV. Sebagai perbandingan, hasil penentuan spektrum neutron dibandingkan dengan literatur yaitu pada SSAR reaktor APR-1400 dengan daya 1400 MWe yang menunjukkan nilai yang relatif dekat. 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, bejana tekan, spektrum neutron, MCNP.

ABSTRACT

FAST NEUTRON SPECTRUM ANALYSIS AT THE PRESSURE VESSEL OF PWR USING MCNP. PTRKN – BATAN has to have capability to evaluate the technology and the safety of nuclear power plant. The aim of this research is to undergo one of PTRKN duties especially to analyze the fast neutron spectrum at the pressure vessel of PWR. This data will be needed for radiation damage analysis due to fast neutron bombardment so the life-time of pressure vessel can be predicted. In this paper, the analysis result of spectrum neutron of PWR 1300 MWe KWU designed benchmark reactor using MCNP program will be exposed. This reactor using enriched UO_2 and 2-dimension lattice of 15×15 matrix loaded of 193 fuel assemblies including 61 control assemblies and 103 ton uranium in totally. There are 3 kinds of enrichment of fuel assembly i.e 3.3%, 2.8% 2.25%. Calculation model was made in 9 zone, i.e core, core baffle, water 1, core barrel, water 2, cladding, pressure vessel, biological shielding and air layer. The neutron spectrum determination has been done to radial direction at the pressure vessel with the accuracy of 11% to 50% in each of 47 energy groups. The analysis result shows that the fast neutron is quite close to fast neutron at the APR1400 SSAR. The fluence analysis of fast neutron ($E > 1.0$ MeV) at the pressure vessel shows that the NPP is still safe for 100 years operation.

Keywords: PWR NPP, pressure vessel, neutron spectrum, MCNP.

PENDAHULUAN

Dalam rangka penguasaan teknologi reaktor PLTN, PTRKN – BATAN mempunyai tugas menganalisis berbagai aspek reaktor PLTN. Tujuan dari penelitian ini adalah melaksanakan salah satu bagian dari tugas PTRKN tersebut yaitu

analisis spektrum neutron di luar bejana tekan PLTN. Data spektrum neutron di bejana tekan ini sangat dibutuhkan dalam analisis perusakan bejana tekan PLTN PWR yang disebabkan oleh radiasi neutron cepat (*radiation damage*). Dengan didapatnya data spektrum neutron khususnya neutron cepat di bejana tekan maka akan dapat

diperkirakan umur pakai bejana tekan yang nota bene merupakan umur reaktor PLTN itu sendiri. Pada penelitian yang lalu, penulis telah melakukan analisis distribusi fluks neutron dan offset aksial teras reaktor PLTN jenis PWR 1300 MWe yang telah dipublikasikan dalam seminar TKPFN ke-14 [1]. Analisis yang telah dilakukan tersebut dilakukan pada daerah teras aktif dengan model teras homogen dan jumlah kelompok energi neutron sebanyak 3 kelompok. Pada makalah ini dituangkan hasil analisis spektrum neutron, yaitu sebanyak 47 kelompok energi neutron, di luar bejana tekan teras reaktor daya jenis PWR 1300 MWe. Model yang dibuat dalam penelitian ini berupa model perangkat bahan bakar homogen. Tujuan dari penelitian ini adalah melaksanakan salah satu bagian dari tugas PTRKN tersebut yaitu analisis spektrum neutron di luar bejana tekan PLTN. Data spektrum neutron di bejana tekan ini sangat dibutuhkan dalam analisis perusakan bejana tekan PLTN PWR yang disebabkan oleh radiasi neutron cepat (*radiation damage*). Dengan didapatnya data spektrum neutron khususnya neutron cepat di bejana tekan maka akan dapat diperkirakan umur pakai bejana tekan yang nota bene merupakan umur reaktor PLTN itu sendiri. Analisis spektrum neutron di luar bejana tekan teras reaktor daya *benchmark* jenis PWR 1300 MWe rancangan KWU [2] (*Kraftwerk Union AG, RFJ*) dilakukan menggunakan program MCNP. Reaktor PLTN ini berbahan bakar oksida uranium (UO_2) diperkaya dan matriks 2-dimensi dari kisi terasnya adalah (15×15) yang dimuati 132 EBN dan 61 EBN yang mengandung bahan penyerap neutron. Seluruh perangkat EBN terdiri dari 3 tingkat pengayaan yaitu 3,3%, 2,8% dan 2,25%. 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 spektrum neutron dilakukan ke arah radial di luar bejana tekan dengan tingkat akurasi antara 11% hingga 50% dalam tiap-tiap kelompok energi. Perhitungan memberikan hasil spektrum neutron pada energi tinggi sedangkan pada energi rendah sangat kecil. Hal itu disebabkan oleh model perangkat homogen yang dibuat dalam perhitungan ini sehingga hampir semua neutron dengan energi rendah terserap dalam sistem teras. Sebagai perbandingan, hasil penentuan spektrum neutron dibandingkan dengan hasil literatur yaitu pada SSAR reaktor APR-1400 dengan daya 1400 MWe. Untuk melihat pengaruh neutron cepat terhadap kemungkinan terjadinya proses perusakan radiasi pada bejana tekan maka dilakukan analisis fluens neutron.

TEORI DAN TATA KERJA

Teori

Program MCNP

Paket program MCNP-5 telah banyak dipakai untuk menghitung fluks partikel berdasarkan metode Monte Carlo [3]. Metode Monte Carlo adalah metode penyelesaian masalah transport partikel dengan mensimulasikan sejarah jejak partikel yaitu dengan cara mengikuti jejak satu partikel dari “lahir”-nya diikuti langkah demi langkah dalam medium yang telah didefinisikan hingga partikel itu lenyap, kemudian diikuti dengan satu partikel yang lain secara berturut-turut. Dalam hal perhitungan fluks neutron menggunakan metode Monte Carlo, tampang lintang masing-masing materi (σ_c , σ_f dan σ_s) telah tersedia dalam pustaka paket programnya. Sedangkan kebolehjadian partikel neutron berinteraksi dengan media ditentukan secara acak oleh pembangkit bilangan acak (*random number generator*), setelah densitas materi diketahui dari masukan programnya. Cacah partikel neutron yang melewati suatu lokasi tertentu dihitung (*scored*), jumlah cacah partikel neutron ini merupakan fluks neutron pada titik yang diobservasi.

Ketelitian hasil perhitungan dengan paket program MCNP ditentukan oleh 3 parameter yaitu:

- Kesalahan relatif dengan simpang baku 1-sigma:

$$R = \frac{S_x}{\bar{x}} \quad (1)$$

dimana S_x adalah deviasi standar dan \bar{x} adalah harga rerata fluks terhitung. Perhitungan dengan lokasi deteksi titik (*point detector*) dianggap memenuhi kriteria ketelitian apabila nilai $R < 0,05$.

- Variance of variance (VOV)* didefinisikan sebagai:

$$VOV = \frac{\sum_{i=1}^C (x_i - \bar{x})^4}{\left[\sum_{i=1}^C (x_i - \bar{x})^2 \right]^2} - \frac{1}{C} \quad (2)$$

dengan C adalah cacah partikel terunut. Perhitungan MCNP dianggap memenuhi syarat ketelitian bila harga $VOV < 0,1$

- Figure of merit (FOM)* didefinisikan sebagai:

$$FOM = \frac{1}{RT}, \quad (3)$$

di sini T adalah waktu simulasi yang dikerjakan oleh computer (detik). Hasil simulasi komputer dianggap teliti apabila nilai FOM -nya adalah relatif konstan untuk setiap urutan pengambilan sejumlah partikel yang dirunut.

Apabila parameter tersebut belum tercapai maka dilakukan penghitungan ulang dengan cara menambah cacah neutron terunut atau waktu perhitungan komputer sampai nilai parameter tersebut dicapai.

Deskripsi reaktor daya 1300 MWe jenis PWR

Gambar 1 menyajikan suatu pandangan tampang irisan melintang dari teras reaktor, selimut teras (*core baffle*), tong teras (*core barrel*), dan bejana tekan reaktor. Teras berisi 193 perangkat bahan bakar dengan 103 ton uranium

yang diperkaya 3.2% dan 61 batang kendali. Air bertindak sebagai pendingin dan moderator pada tekanan 158 bar dengan suhu *inlet* (temperatur air masuk teras) 291 °C dan suhu *outlet* (temperatur air keluar teras) 326 °C. Tinggi aktif teras adalah 3.9 m dan garis tengah radial 3.45 m sepanjang sumbu (poros) utama. Tameng (perisai) bahang adalah sebuah tong (silinder) baja tahan-karat dengan garis tengah dalam 4.21 m dan tebalnya 8 cm. Bejana tekan reaktor austenitis bagian dalam mempunyai garis tengah 5 m dan tebal total 25.6 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-data global mengenai teras reaktor daya 1300 MWe jenis PWR ini dimuat dalam Tabel 1.



Gambar 1. Konfigurasi teras reaktor daya 1300 MWe jenis PWR [2].

Tabel 1. Deskripsi singkat data teras reaktor daya 1300 MWe jenis PWR [2].

Deskripsi	Dimensi
Ukuran matriks 2-dimensi kisi teras	15 × 15
Jumlah perangkat elemen bahan bakar yang termuat dalam teras	193 EBN
Massa total dari uranium yang termuat dalam teras	103 ton
Tingkat perkayaan rerata U-235 dalam perangkat bakar (BOC)	3,2%
Jumlah perangkat elemen batang kendali	61 CE
Tekanan air yang disiapkan sebagai pendingin dan moderator	158 bar
Temperatur <i>inlet</i> (temperatur air masuk teras)	291 °C
Temperatur <i>outlet</i> (temperatur air keluar teras)	326 °C
Tinggi bagian aktif dari teras	3,9 m
Garis tengah radial sepanjang sumbu utama	3,45 m
Garis tengah bagian dalam dari tabung SS sebagai perisai termal	4,21 m
Ketebalan tabung SS perisai termal	8 cm
Garis tengah bagian dalam kelongsong austenitis dari bejana tekan	5 m
Ketebalan total dari bejana tekan reaktor (Besi)	25,6 cm
Ketebalan total dari dua lapisan pemisah antara penyekat termal dan perisai beton utama yang menyelubungi bejana tekan	200,0 cm

Tata Kerja

Pemodelan struktur reaktor

Teras reaktor PLTN dimodelkan ke dalam beberapa zona yaitu teras, selimut, air 1, tong, air 2, kelongsong, bejana tekan dan beton. Tabel 2 memuat semua zona reaktor PLTN jenis PWR 1300 MWe beserta ukurannya.

Perhitungan komposisi material

Berdasarkan ukuran geometri teras reaktor PLTN dan massa total tiap komponen struktur reaktor maka dapat dihitung komposisi dalam satuan per cm^3 . Komposisi semua komponen reaktor PLTN jenis PWR 1300 MWe dimuat ke dalam Tabel 3.

Tabel 2. Dimensi radial sepanjang sumbu utama reaktor PLTN jenis PWR 1300 Mwe [2].

Zona	Jejari Zona [cm]	Ketebalan Zona [cm]
Teras Reaktor	172.5	-
Selimut teras (<i>core baffle</i>)	175.0	2.5
Lapisan air (1)	210.5	35.5
Tong teras (<i>core barrel</i>)	218.5	8.0
Lapisan air (2)	250.0	31.5
Kelongsong austenitis (<i>cladding</i>)	250.6	0.6
Bejana tekan	275.6	25.0
Perisai beton	475.6	200.0

Tabel 3. Komposisi bahan reaktor PLTN jenis PWR 1300 MWe [10^{24} cm^{-3}] [2].

Zona Nuklida	Teras Reaktor	Slimut, Tong, Kelongsong austenitis	Bejana tekan	Lapisan air (1) dan (2)	Perisai beton
H	2.8226E-02	-	-	5.0556E-02	4.4126E-03
O	2.7154E-02	-	-	2.5278E-02	4.7751E-02
Al	-	-	-	-	2.4553E-03
Si	-	-	-	-	9.4350E-03
Ca	-	-	-	-	6.6115E-03
Cr	-	1.6913E-02	-	-	-
Mn	-	1.1187E-03	-	-	-
Fe	9.8235E-04	6.4478E-02	8.465E-02	-	-
Ni	-	8.5357E-03	-	-	-
Zr	4.3246E-03	-	-	-	-
^{235}U	2.1040E-04	-	-	-	-
^{238}U	6.3087E-03	-	-	-	-

Masukan program MCNP

Secara umum, data masukan paket program MCNP-5 meliputi:

- 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.
- 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.
- Posisi/lokasi deteksi.

Posisi/lokasi deteksi harus ditentukan sehingga keluaran program memberikan hasil yang dikehendaki.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Model teras reaktor

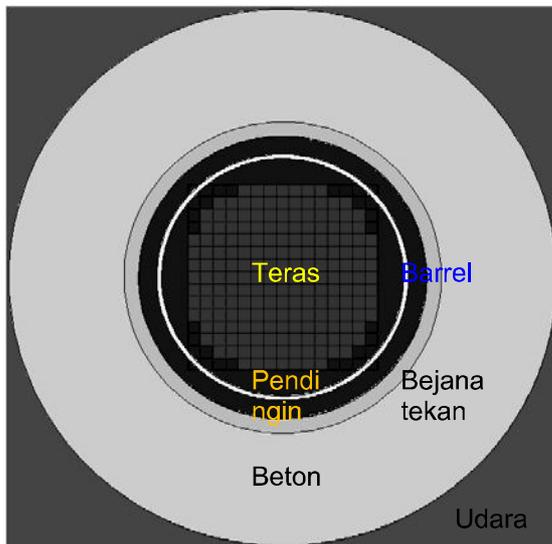
Model teras reaktor PLTN PWR 1300 MWe dibuat dan divisualisasikan menggunakan program vised. Dengan program tersebut, input yang dibuat untuk program MCNP dari segi geometri dapat dicek kebenarannya. Pada Gambar 2 dan Gambar 3 dapat dilihat model teras secara melintang dan membujur. Dengan program vised ini dapat ditampilkan kesalahan geometri sehingga dapat segera diperbaiki sebelum dijadikan masukan program MCNP.

Pada makalah terdahulu [1], peneliti membuat pendekatan dalam bentuk model teras homogen. Pada makalah ini model teras dibuat lebih rinci

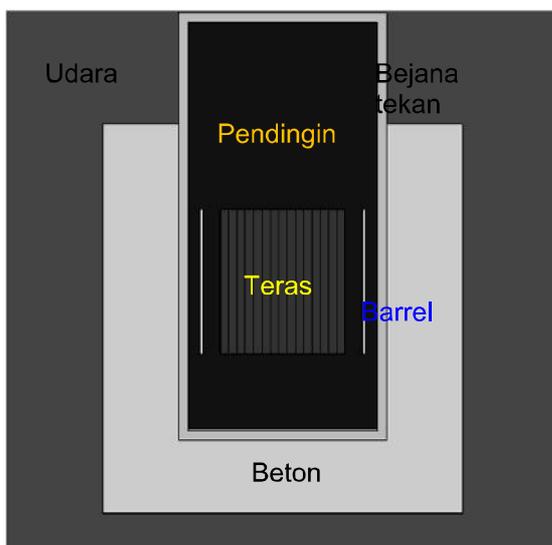
yaitu model perangkat bahan bakar homogen. Dengan model ini diharap hasil perhitungan lebih teliti namun membutuhkan waktu analisis yang lebih lama.

Hasil analisis

Analisis spektrum neutron di teras PLTN PWR 1300 MWe menggunakan program MCNP telah memenuhi ke-3 kriteria ketelitian perhitungan. Parameter kesalahan relatif telah mencapai angka yang lebih rendah dari 0,05 (0,04). Parameter *Variance of variance (VOV)* telah mencapai nilai kurang dari 0,1 (0,08) dan parameter *Figure of merit (FOM)* telah tercapai nilai konstan untuk setiap urutan pengambilan sejumlah partikel yang dirunut.



Gambar 2. Model potongan melintang teras reaktor PLTN PWR



Gambar 3. Model potongan membujur teras reaktor PLTN PWR

Hasil perhitungan spektrum neutron di permukaan luar bejana tekan PLTN PWR 1300 MWe menggunakan program MCNP diplot pada Gambar 4. Analisis spektrum neutron dilakukan dalam 47 kelompok energi neutron, dengan model perangkat bahan bakar homogen. Analisis dilakukan melalui beberapa iterasi dengan mengubah faktor perlipatan fluks neutron hingga didapat hasil spektrum neutron yang cukup dekat dengan nilai spektrum neutron di dalam acuan. Pada Gambar 4 tersebut terlihat bahwa hasil analisis spektrum neutron hanya memberikan spektrum pada daerah energi tinggi sedangkan pada daerah energi rendah menghasilkan nilai yang rendah. Hal itu disebabkan oleh model perangkat bahan bakar homogen yang dibuat dalam perhitungan ini sehingga hampir semua neutron dengan energi rendah terserap dalam sistem teras. Sebagai perbandingan, hasil penentuan spektrum neutron dibandingkan dengan nilai yang tertera di dalam SSAR reaktor APR-1400 dengan daya 1400 MWe [4] dan menunjukkan perbedaan sekitar 30%. Perbedaan ini relatif dekat, karena model yang dibuat masih perlu ditingkatkan yaitu dalam bentuk model perangkat aktual yaitu sesuai dengan geometri yang sebenarnya.

Pada Gambar 4 juga dimuat hasil analisis spektrum neutron di permukaan dalam bejana tekan. Fluks neutron rerata yang berenergi di atas 1 MeV pada posisi ini sebesar $1,2 \times 10^{10}$ n/cm²/det. Sedangkan fluks neutron yang berenergi di atas 1 MeV di permukaan dalam bejana tekan sebesar $3,3 \times 10^7$ n/cm²/det. Dengan menggunakan persamaan atenuasi, maka diperoleh nilai fluks neutron rerata di dalam dinding bejana tekan sebesar $7,1 \times 10^8$ n/cm²/det. Semua nilai fluks neutron tersebut memiliki kesalahan yang masih cukup tinggi yaitu sekitar 30%.

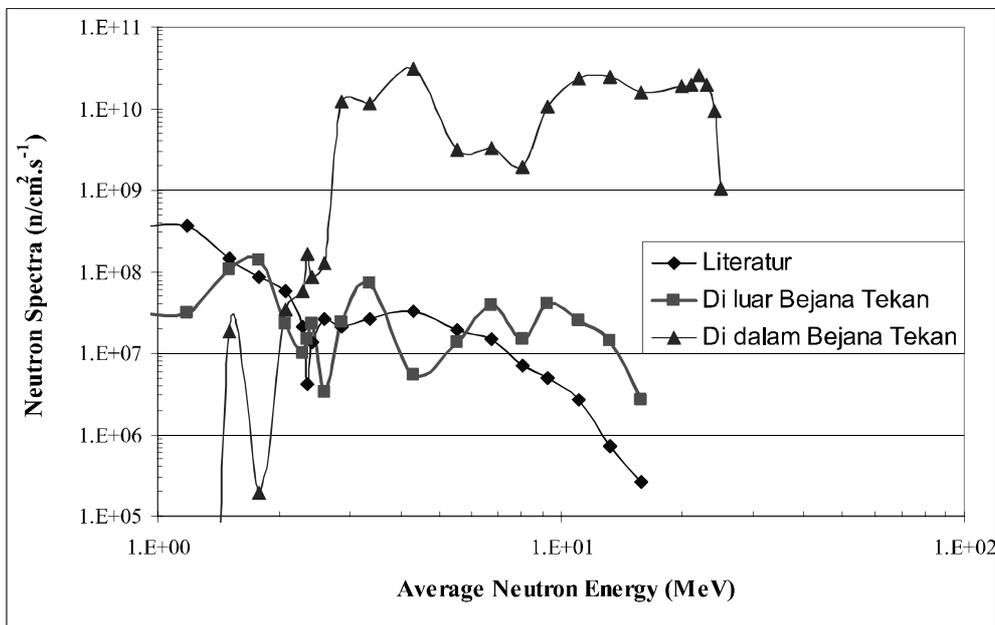
Seperti diketahui, material dominan di bejana tekan adalah besi. Isotop-isotop yang terkandung di dalam besi yang dominan adalah Fe-54, Fe-56 dan Fe-58. Terhadap neutron termal dan epitermal, isotop-isotop tersebut mengalami reaksi serapan neutron. Dengan demikian pengaruh fluks neutron termal terhadap perusakan radiasi tersebut sangat kecil sehingga diabaikan.

Lain halnya dengan 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 mengakibatkan atom-atom besi terlepas dari posisi kisi kristalnya. Terlepasnya atom-atom tersebut menyebabkan terjadinya pasangan kekosongan (*vacancy*) dan penyisipan (*interstitial*) yang dikenal sebagai *Frenkel defect* [5]. Jika energi neutron hanya cukup untuk memindahkan atom-atom besi namun

tidak punya energi lebih, maka pasangan vakansi-intertisi tersebut akan kembali menjadi keadaan semula (terjadi proses *recovery*). Namun bila energi neutron memiliki kelebihan energi yang cukup besar, setelah memindahkan atom besi, maka akan terjadi akumulasi daerah vakansi kisi dan daerah intertisi. Semakin besar akumulasi tersebut maka akan terjadi perusakan, 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/cm² atau 10^{24} n/m² [5,6,7]. Untuk kasus pada penelitian ini orde fluks neutron cepat adalah $7,1 \times 10^8$ n/cm²/detik atau $7,1 \times 10^{12}$ n/m²/detik. Maka untuk pengoperasian PLTN PWR ini selama 100 tahun, fluens neutron cepat sebesar $2,2 \times 10^{18}$ n/m² atau $2,2 \times 10^{22}$ n/m². Dengan demikian dapat dikatakan PLTN ini masih aman dioperasikan hingga 100 tahun.



Gambar 4. Spektrum neutron cepat di bejana tekan PLTN PWR KWU 1300 MWe.

KESIMPULAN DAN SARAN

Hasil analisis spektrum neutron di luar bejana tekan PLTN PWR 1300 MWe relatif dekat dengan nilai yang tercantum di dalam SSAR. 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 perangkat dan teras aktual sesuai dengan bentuk geometri yang sesungguhnya.

DAFTAR PUSTAKA

1. AMIR HAMZAH, 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.

2. G. HEHN AND J. KOBAN, 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. X-5 MONTE CARLO TEAM, MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, Los Alamos National Laboratory, June 30, 2004.
4. KSNP, Radiation Protection, APR1400 SSAR, Chapter 12.
5. THOMAS H. COURTNEY, Mechanical Behavior of Materials, McGraw-Hill Publishing Company, New York, 1990.
6. AMIR HAMZAH, Analisis Fluks dan Fluensi Neutron di Batang Kendali RSG-GAS, Jurnal TDM, Vol. 7, No. 1, Februari 2005.

7. H. M. CHUNG, W. J. SHACK, Irradiation-Assisted Stress Corrosion Cracking Behavior of Austenitic Stainless Steels Applicable to LWR Core Internals, Argonne National Laboratory, U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-6892, ANL-04/10, January 2006.

TANYA JAWAB

Pertanyaan :

Prinsip program MCNP ?

(Sahriar Nur, Fisika ITS)

Jawaban :

Prinsip program MCNP menggunakan metode statistik. Partikel neutron disimulasikan sejak lahir saat reaksi pembelahan hingga neutron terserap di dalam sistem.