

PERHITUNGAN SPEKTRUM ENERGI FLUKS NEUTRON REAKTOR TRIGA 2000 BANDUNG

Putranto Ilham Yazid

Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknik Nuklir - BATAN

ABSTRAK

PERHITUNGAN SPEKTRUM ENERGI FLUKS NEUTRON REAKTOR TRIGA 2000 BANDUNG. Dengan memanfaatkan program MCNP yang memiliki kemampuan memodelkan reaktor secara rinci, telah dilakukan perhitungan spektrum energi fluks neutron untuk reaktor TRIGA 2000 Bandung. Geometri tiga dimensi dan bahan reaktor dimodelkan serinci mungkin, mulai dari elemen bakar, reflektor, air pendingin sampai perisai biologis, bahkan tangki *bulk shielding*. Dalam perhitungan, teras diisi sepenuhnya dengan elemen bakar dari satu jenis. Spektrum energi fluks neutron dari tiga jenis elemen bakar, yakni yang memiliki kandungan uranium sebesar 8,5 %-berat, 12 %-berat dan 20 %-berat, dikaji dan diperbandingkan dalam makalah ini. Dalam perhitungan, energi neutron dibagi dalam 29 kelompok energi, mulai dari energi termal (0,0253 eV) sampai energi tinggi (17 MeV). Hasil perhitungan menunjukkan bahwa spektrum neutron dari ketiga macam elemen bakar tersebut sangat berbeda terutama di daerah energi termal. Sedangkan pada daerah energi tinggi, spektrum neutron dari ketiga jenis elemen bakar adalah sangat mirip satu sama lain. Selain itu, spektrum neutron di ring A sampai F praktis tidak memiliki perbedaan. Akan tetapi di ring G, puncak spektrum neutron termal mengalami kenaikan yang berarti. Hal ini memperlihatkan bagaimana besarnya pengaruh reflektor terhadap spektrum neutron di dalam elemen bakar. Untuk elemen bakar yang terletak di dalam ring A sampai ring F, puncak spektrum pada energi termal dicapai dalam kelompok energi 0,05 eV – 0,152 eV, yang untuk setiap jenis elemen bakar masing-masing adalah 0,365 (MeV^{-1}), 0,278 (MeV^{-1}) dan 0,149 (MeV^{-1}). Sedangkan di dalam ring G, masing-masing berharga 0,396 (MeV^{-1}), 0,310 (MeV^{-1}) dan 0,174 (MeV^{-1}). Puncak spektrum neutron untuk energi tinggi dicapai dalam kelompok energi 0,5 MeV- 1,35 MeV. Semua jenis elemen bakar, di ring A sampai ring G menghasilkan puncak spektrum yang sama besar, yakni sekitar 0,341 (MeV^{-1}).

Kata Kunci: spektrum energi neutron, MCNP, TRIGA-2000

ABSTRACT

CALCULATION OF NEUTRON FLUX ENERGY SPECTRUM OF BANDUNG TRIGA 2000 REACTOR. By using MCNP Monte Carlo code, which

has the ability to modelling a reactor in very detail manner, the neutron flux energy spectrum of Bandung TRIGA 2000 reactor is calculated. Reactor three dimensional geometry and material are modelled as detail as possible, including: fuel elements, reflector, cooling water, as well as biological shielding and bulk shielding tank. In the calculation, the reactor core is loaded entirely with one type of fuel elements. The neutron flux energy spectrum of three different types of fuel elements are compared and analyzed in the paper, i.e. 8.5 wt-%, 12 wt-% and 20 wt-% of uranium content's fuel elements, respectively. In the calculation, neutron energy is divided into 29 energy groups, ranging from thermal energy (0.0253 eV) up to high energy (17 MeV). The results show that neutron spectrum of the three types of fuel elements differs significantly, especially in the thermal energy range. In the high energy range, the neutron spectrums of the three types of fuel elements are practically similar. Further, it is found that the neutron spectrums in A- to F-ring are very similar to each other. However, in G-ring, the peak of thermal neutron spectrum tends to be higher. This shows that the reflector has great influence to the neutron spectrum in fuel elements. For fuel elements located in A- to F-ring, the neutron spectrum's peak is achieved at the energy group of 0,05 eV – 0,152 eV. For each type of fuel elements, the corresponding spectrum's peak is 0,365 (MeV⁻¹), 0,278 (MeV⁻¹) dan 0,149 (MeV⁻¹), respectively. In G-ring, the thermal spectrum's peak is 0,396 (MeV⁻¹), 0,310 (MeV⁻¹) dan 0,174 (MeV⁻¹), respectively. For all types of fuel elements, regardless of fuel location in the core, the high energy spectrum's peak is achieved at the energy group of 0,5 MeV- 1,35 MeV. The corresponding peak is about 0,341 (MeV⁻¹).

Key words: neutron energy spectrum, MCNP, TRIGA-2000.

PENDAHULUAN

Besaran spektrum neutron sangat penting dalam perhitungan neutronik karena semua interaksi antara bahan dengan neutron, baik jenis maupun besar interaksinya tergantung pada energi neutron. Banyak faktor yang mempengaruhi spektrum neutron di dalam suatu sistem, antara lain: jenis dan komposisi bahan, bentuk dan ukuran sistem, bahkan suhu. Dengan demikian adalah sangat sukar untuk menghitung secara tepat dengan cara deterministik, bagaimana spektrum neutron di dalam suatu sistem. Untuk itulah program komputer MCNP digunakan dalam kajian ini.

MCNP [1] yang berbasis Monte Carlo digunakan dalam kajian ini karena

memiliki kemampuan yang sangat tinggi untuk melaksanakan perhitungan neutronik secara rinci. Dalam perhitungan, reaktor TRIGA 2000 Bandung dimodelkan secara rinci dalam geometri 3 dimensi. Seluruh bagian utama reaktor dimodelkan seutuhnya, yakni: elemen bakar, reflektor, tangki dan air pendingin reaktor, *thermal* dan *thermalizing column*, *beamport*, perisai biologis, tangki *bulk shielding* dan sebagainya. Bahan-bahan yang digunakan di dalam sistem reaktor pun diperhitungkan secara rinci, seperti: air, beton, UZrH, grafit, baja tahan karat, alumunium dan sebagainya. Semua ini dimaksudkan untuk menekan sekecil mungkin kesalahan perhitungan yang diakibatkan karena kerumitan geometri dan bahan reaktor.

Dua puluh sembilan kelompok energi digunakan untuk menyatakan spektrum energi fluks neutron dalam perhitungan ini. Kelompok energi tersebut mewakili energi termal, energi pertengahan sampai energi cepat.

Untuk mempermudah dalam memperoleh gambaran yang lebih baik mengenai faktor apa saja yang mempengaruhi spektrum energi neutron di dalam teras reaktor, maka dalam setiap perhitungan, teras reaktor sepenuhnya diisi oleh hanya satu jenis elemen bakar saja. Selanjutnya akan diperbandingkan spektrum neutron yang dihasilkan oleh tiga jenis elemen bakar yang digunakan di dalam teras reaktor TRIGA 2000 Bandung saat ini, yakni yang berkandungan uranium sebesar 8,5, 12 dan 20 %-berat.

TEORI

Spektrum Neutron

Spektrum energi fluks neutron $\phi(E)$, disingkat sebagai spektrum neutron, adalah besaran yang menyatakan jumlah neutron (per satuan energi) yang berenergi di sekitar E dan $E+dE$. Secara teoritis, neutron di dalam teras reaktor akan memiliki spektrum energi yang sangat luas, dari 0,0253 eV (neutron termal), bahkan lebih kecil

lagi, sampai ke energi tinggi sekitar 17 MeV , bahkan lebih besar lagi. Akan tetapi, secara umum energi neutron akan terdistribusi atas tiga kelompok besar, yakni: termal, menengah dan cepat. Kelompok energi cepat berasal dari neutron cepat yang dihasilkan dari peristiwa fisi nuklir. Neutron ini akan bertumbukan dengan bahan bakar maupun moderator sehingga energinya berkurang, yang kemudian akan membentuk kelompok energi menengah. Dalam kelompok ini setiap neutron yang melakukan tumbukan dengan inti lain akan memberikan sebagian energinya kepada inti yang ditumbuk sehingga energi neutron tersebut selalu berkurang. Selanjutnya, neutron yang sudah sedemikian kecil energinya tidak lagi dapat memberikan energi kepada inti yang ditumbuknya. Bahkan ia mungkin saja menerima energi dari inti lain sehingga justru energi bertambah setelah tumbukan terjadi. Dengan demikian neutron tersebut akan berada dalam keadaan setimbang dengan energi inti pembentuk teras di sekitarnya, sehingga terbentuklah kelompok energi termal.

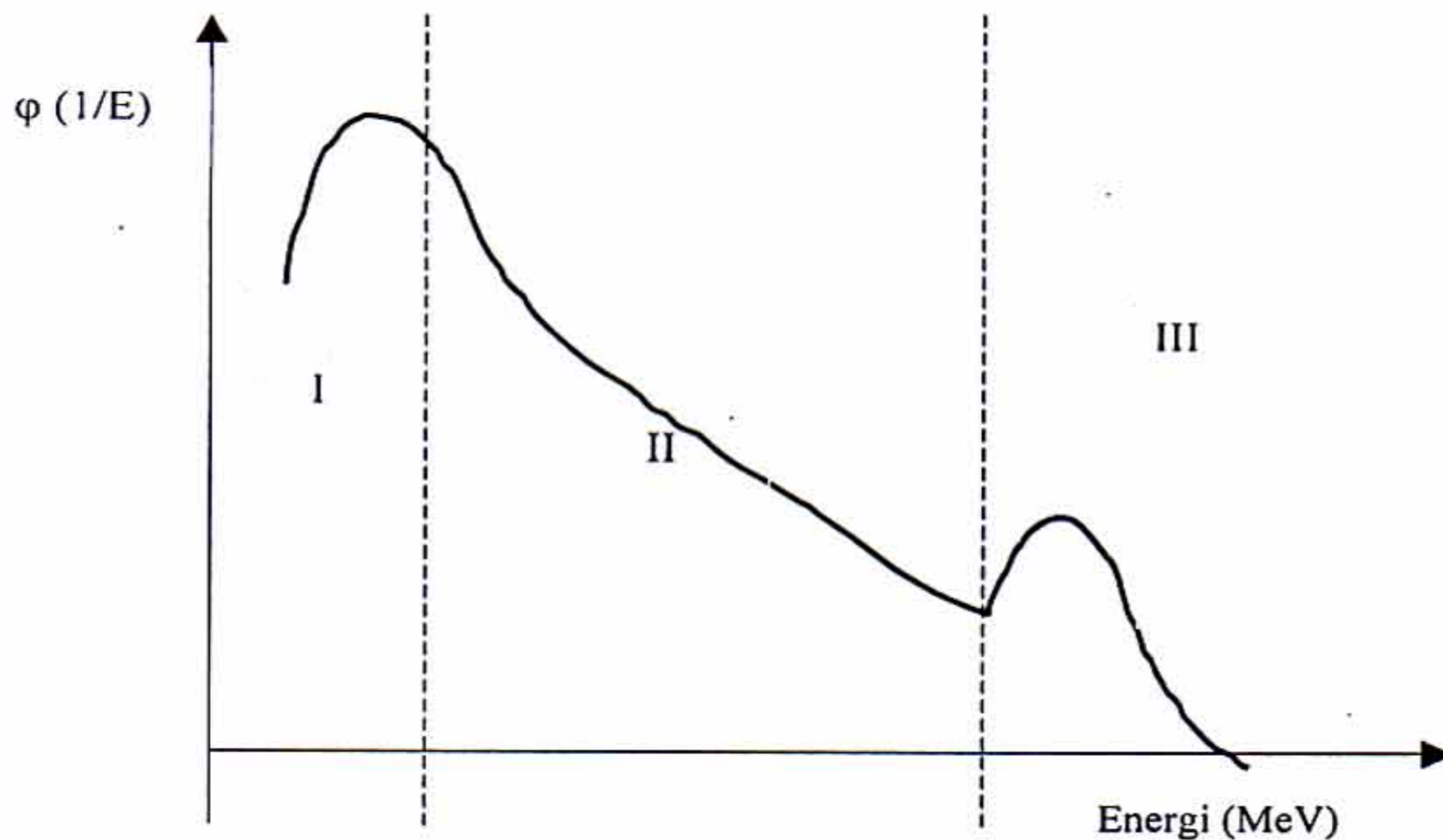
Bentuk spektrum neutron di dalam teras dipengaruhi oleh banyak faktor, seperti: komposisi dan jenis bahan teras, konfigurasi teras dan bahkan suhu/daya reaktor. Akan tetapi secara umum spektrum neutron di dalam teras reaktor termal adalah seperti tampak dalam Gambar 1. Daerah energi I adalah kelompok energi termal, yakni $< 0,6$ eV. Energi neutron dalam kelompok ini tersebar secara matematis menurut distribusi Maxwell, yakni:

$$\varphi(E) = \varphi_0 * \frac{2}{\sqrt{\pi}} * \frac{E}{E_0^2} * \exp\left(-\frac{E}{E_0}\right)$$

dengan $E_0 = kT$ (k =konstanta Boltzmann dan T adalah suhu dalam K). Daerah II disebut sebagai kelompok energi menengah, yakni berkisar antara 0,6 eV sampai 0,1 MeV. Di dalam daerah ini energi neutron terdistribusi menurut:

$$\varphi(E) \sim \frac{1}{E}$$

Dalam daerah III yang disebut daerah cepat, distribusi energi neutron dapat dinyatakan sebagai sebaran Watt, yakni: $\phi(E) \sim \exp(-E) * \sinh(\sqrt{2E})$



Gambar 1: Spektrum energi neutron di dalam reaktor termal.

Pembagian Kelompok Energi Neutron Dalam Perhitungan

Untuk kepentingan suatu perhitungan maka energi neutron dapat dikelompokkan dalam jumlah sembarang. Semakin banyak jumlah kelompok energi maka semakin baik pula hasil perhitungannya. Penentuan besar setiap selang energi juga akan mempengaruhi akurasi perhitungan. Dalam makalah ini energi neutron dibagi atas 29 kelompok sebagai berikut:

| Kelompok | Batas Energi Bawah (MeV) | Batas Energi Atas (MeV) | Daerah Energi |
|----------|--------------------------|-------------------------|---------------|
| 1 | 15 | 17 | III |
| 2 | 13,5 | 15 | III |
| 3 | 12 | 13,5 | III |
| 4 | 10 | 12 | III |
| 5 | 7,79 | 10 | III |
| 6 | 6,07 | 7,79 | III |
| 7 | 3,68 | 6,07 | III |
| 8 | 2,232 | 3,68 | III |
| 9 | 1,353 | 2,232 | III |
| 10 | 5e-1 | 1,353 | III |
| 11 | 1,84e-1 | 5e-1 | III |
| 12 | 6,76e-2 | 1,84e-1 | III |
| 13 | 2,48e-2 | 6,76e-2 | II |
| 14 | 9,12e-3 | 2,48e-2 | II |
| 15 | 3,35e-3 | 9,12e-3 | II |
| 16 | 1,235e-3 | 3,35e-3 | II |
| 17 | 4,54e-4 | 1,235e-3 | II |
| 18 | 1,67e-4 | 4,54e-4 | II |
| 19 | 6,14e-5 | 1,67e-4 | II |
| 20 | 2,26e-5 | 6,14e-5 | II |
| 21 | 8,32e-6 | 2,26e-5 | II |
| 22 | 3,06e-6 | 8,32e-6 | II |
| 23 | 1,125e-6 | 3,06e-6 | II |
| 24 | 4,14e-7 | 1,125e-6 | II |
| 25 | 1,52e-7 | 4,14e-7 | I |
| 26 | 5e-8 | 1,52e-7 | I |
| 27 | 2,5e-8 | 5e-8 | I |
| 28 | 1e-8 | 2,5e-8 | I |
| 29 | 0 | 1e-8 | I |

Pembagian kelompok di atas adalah merupakan hasil ekstraksi dari pengelompokan energi yang biasa digunakan oleh General Atomic [2] (6 kelompok) dan MCNP (30 kelompok).

TATA KERJA

Perhitungan Spektrum Neutron

Program MCNP yang berbasis Monte Carlo digunakan untuk menghitung spektrum neutron di dalam reaktor TRIGA 2000 Bandung. Kecanggihan model matematik serta kelengkapan data tampak reaksi bahan merupakan alasan utama mengapa program komputer ini digunakan dalam analisis ini.

Pemodelan Geometri Sistem Reaktor TRIGA 2000 Bandung

Hampir seluruh sistem reaktor TRIGA 2000 Bandung dimodelkan tiga dimensi secara rinci dan utuh. Sistem reaktor terdiri tersebut dari:

- a. Teras: kelongsong elemen bakar, *plug* baja tahan karat dan grafit pada elemen bakar, bahan bakar, batang zirkonium dalam elemen bakar, lempeng kisi atas dan bawah, reflektor, lubang *beamport* dalam reflektor, Lazy Susan serta air pendingin dalam teras.
- b. Tangki reaktor: dinding tangki alumunium, *beamport*, *thermal* dan *thermalizing column* serta air pendingin.
- c. Pelindung biologis: dinding beton reaktor, lubang *beamport*, *shadow shield* dan dek reaktor.
- d. Tangki *bulk shielding*: dinding beton dan air tangki *bulk shielding*.

Konfigurasi Teras

Perhitungan dilakukan untuk tiga macam konfigurasi teras, di mana dalam masing-masingnya teras reaktor seluruhnya diisi dengan satu jenis elemen bakar (jumlah total 121 elemen bakar). Dalam konfigurasi I, II dan III teras diisi dengan elemen bakar baru/segar dengan kandungan uranium masing-masing sebesar 8,5 % berat, 12 % berat dan 20 % berat.

Komposisi bahan yang terkandung di dalam masing-masing jenis bahan bakar adalah sebagai berikut:

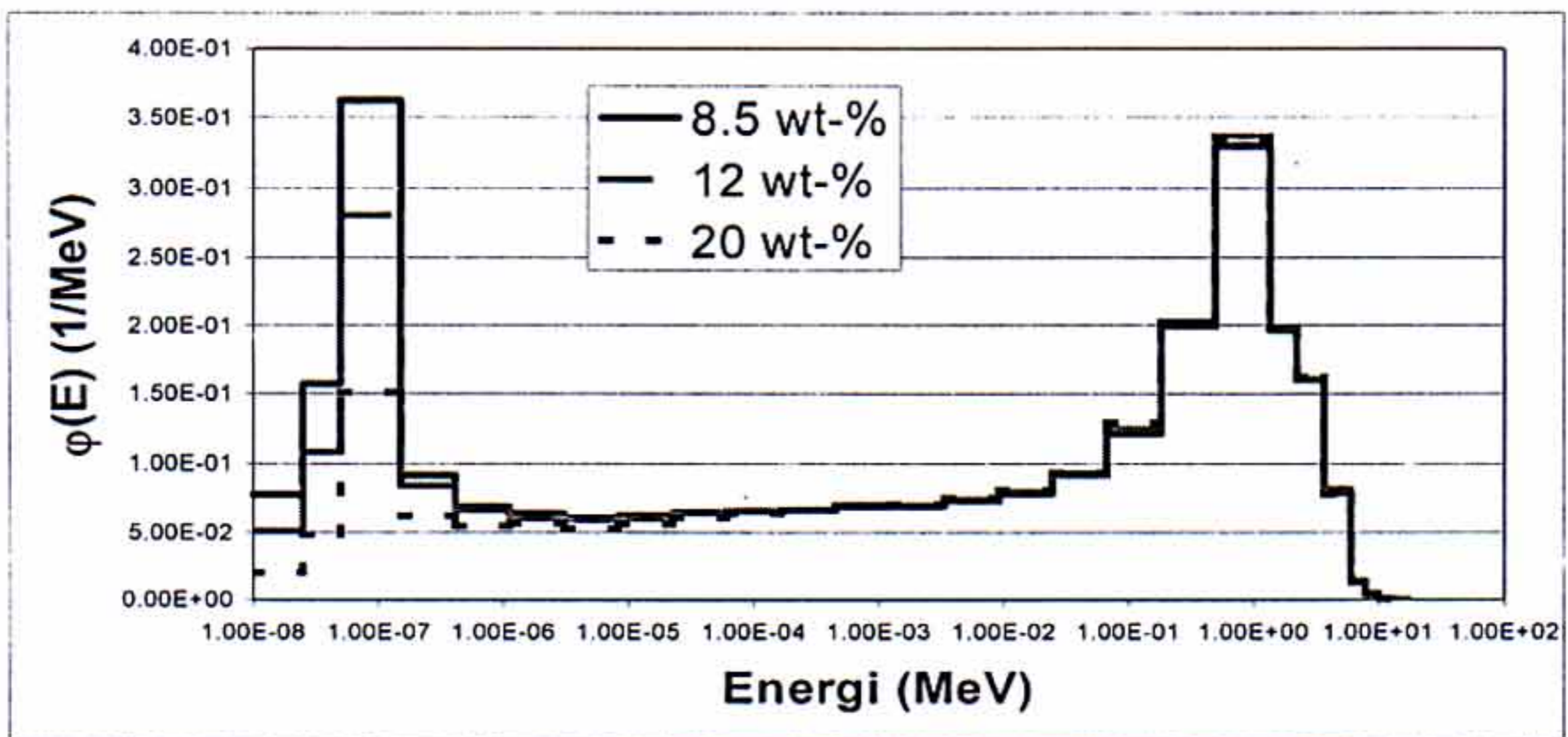
| BAHAN | Jenis Elemen Bakar | | |
|---------------------|--------------------|------------|------------|
| | 8,5 %-berat | 12 %-berat | 20 %-berat |
| U-235 (gram) | 38 | 55 | 99 |
| U-235/U (pengayaan) | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| U-238 (gram) | 152 | 220 | 396 |
| U (gram) | 190 | 275 | 495 |
| U/UZrH (w-%) | 0,085 | 0,12 | - |
| UZrH (gram) | 2235,29412 | 2291,66667 | - |
| U-235/UZrH | 0,017 | 0,024 | - |
| U-238/UZrH | 0,068 | 0,096 | - |
| ZrH (gram) | 2045,29412 | 2016,66667 | - |
| Zr/UZrH | 0,89910 | 0,86471 | - |
| H/UZrH | 0,01590 | 0,01529 | - |
| Zr (gram) | 2009,76191 | 1981,63180 | 1934,17172 |
| H (gram) | 35,53220 | 35,03487 | 34,19578 |
| U/UZrHEr (w-%) | - | - | 0,2 |
| UZrHEr (gram) | - | - | 2475 |
| ZrHEr (gram) | - | - | 1980 |
| U-235/UZrHEr | - | - | 0,04 |
| U-238/UZrHEr | - | - | 0,16 |
| Zr/UZrHEr | - | - | 0,78148 |
| H/UzrHEr | - | - | 0,01382 |
| Er/UZrHEr | - | - | 0,00470 |
| Er (gram) | - | - | 11,63250 |

Perhitungan Kekritisian dan Fluks Neutron

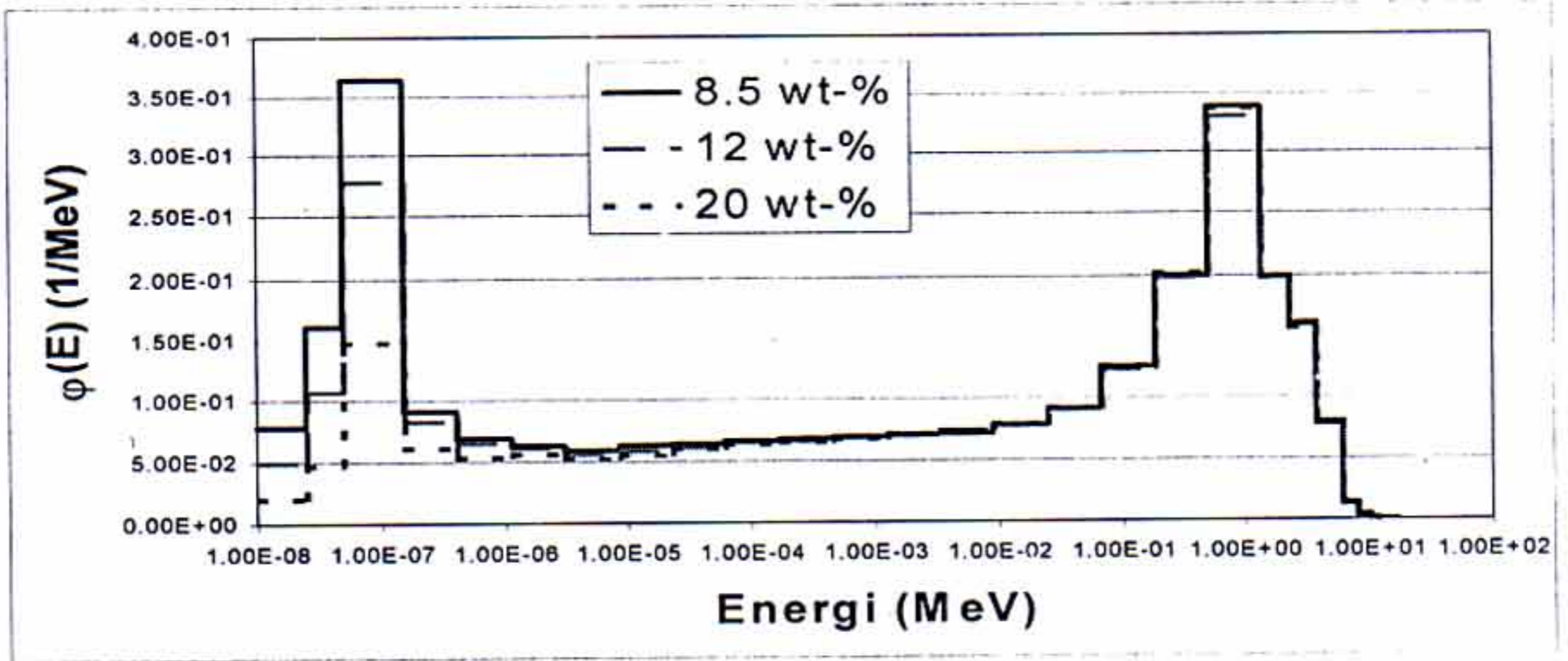
Untuk menghitung spektrum neutron maka MCNP dijalankan untuk menghitung KCODE, yakni perhitungan kekritisian dan *tally* F4, yakni fluks volume. Setiap *tally* dibagi atas 29 kelompok energi. Perhitungan fluks dilakukan di dalam setiap elemen bakar yang ada di dalam teras. Dalam setiap kali perhitungan MCNP menyimulasikan 12100 partikel neutron, 250 generasi dengan 50 generasi pertama diabaikan untuk mencapai kestabilan perhitungan. Hal ini dilakukan dengan pemberian perintah: KCODE 12100 1.0 50 250 dalam masukan MCNP. Sumber neutron awal terdistribusi secara acak dan homogen di dalam setiap elemen bakar.

HASIL DAN PEMBAHASAN

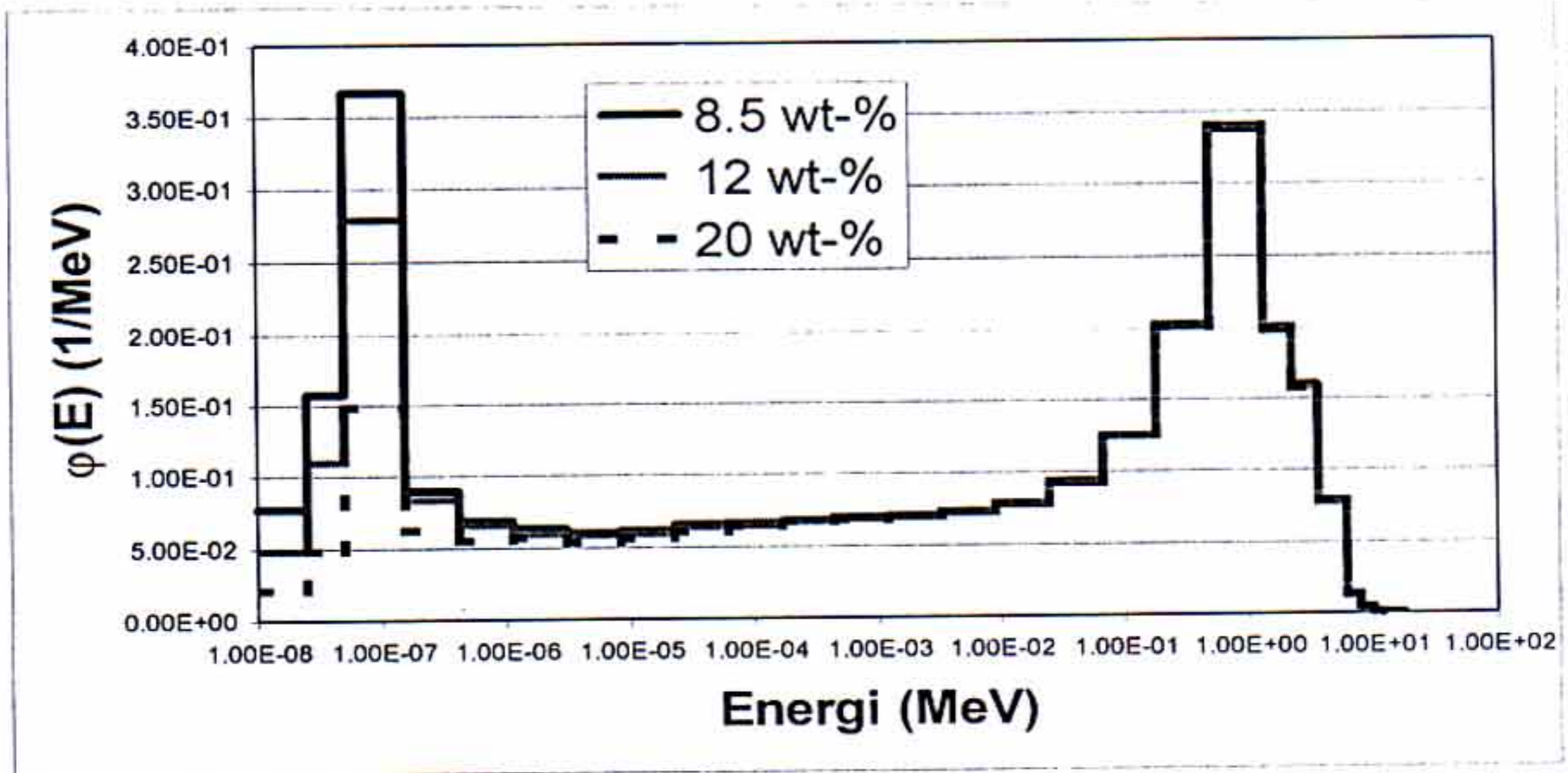
Gambar 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 menunjukkan spektrum neutron yang ternormalisasi masing-masing pada ring A, B, C, D, E, F dan G.



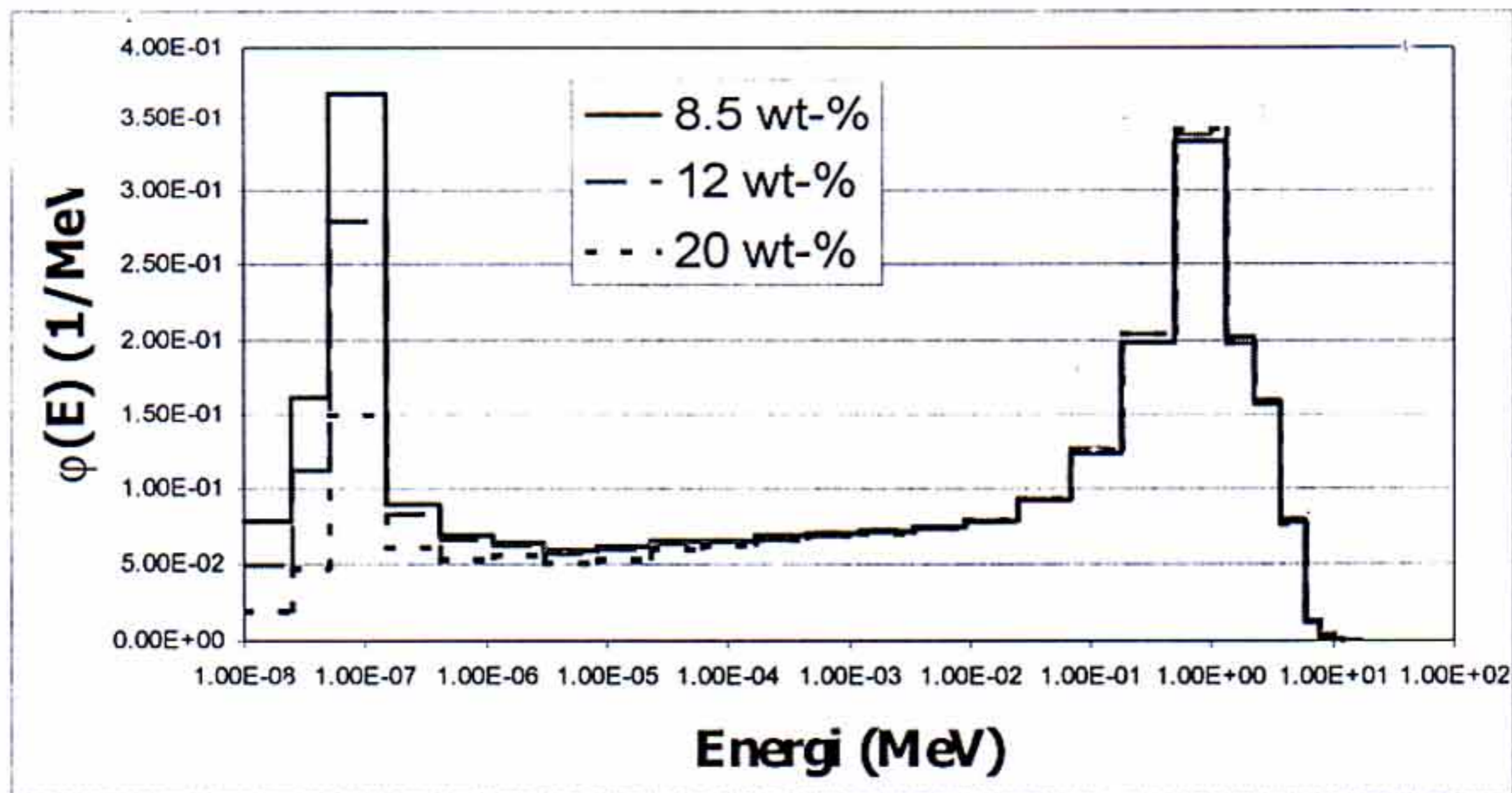
Gambar 2. Spektrum neutron pada ring A.



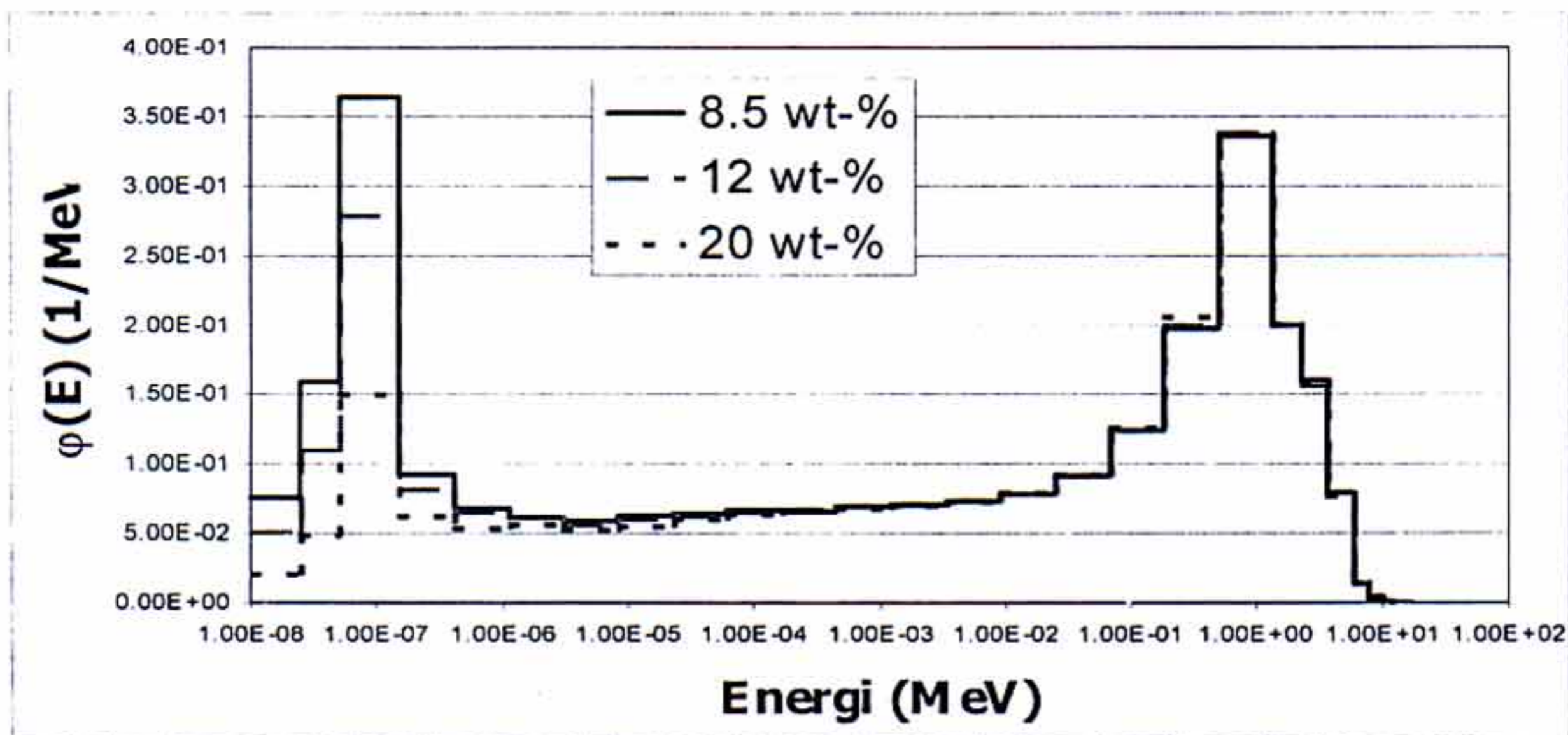
Gambar 3. Spektrum neutron pada ring B.



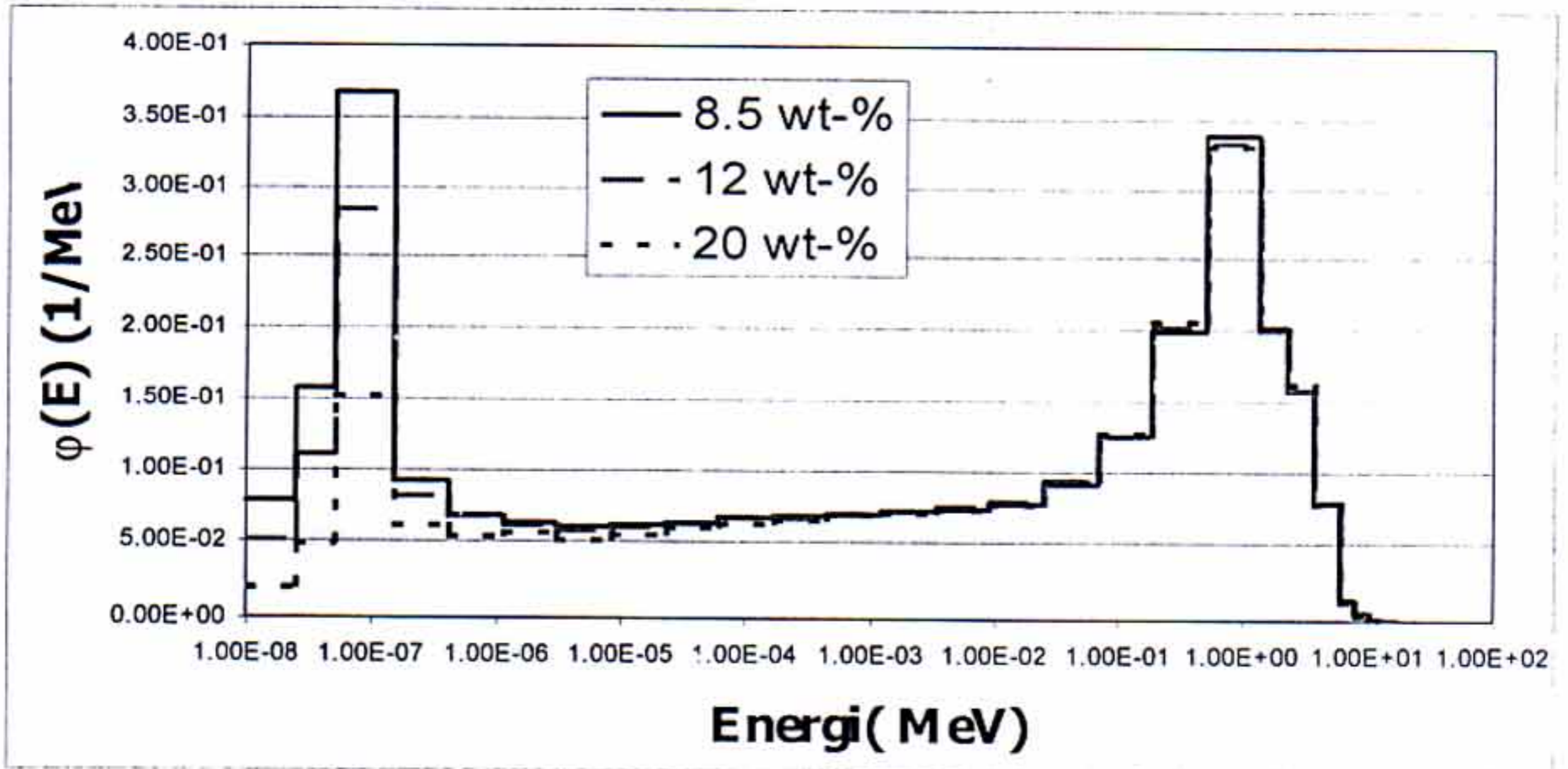
Gambar 4: Spektrum neutron pada ring C.



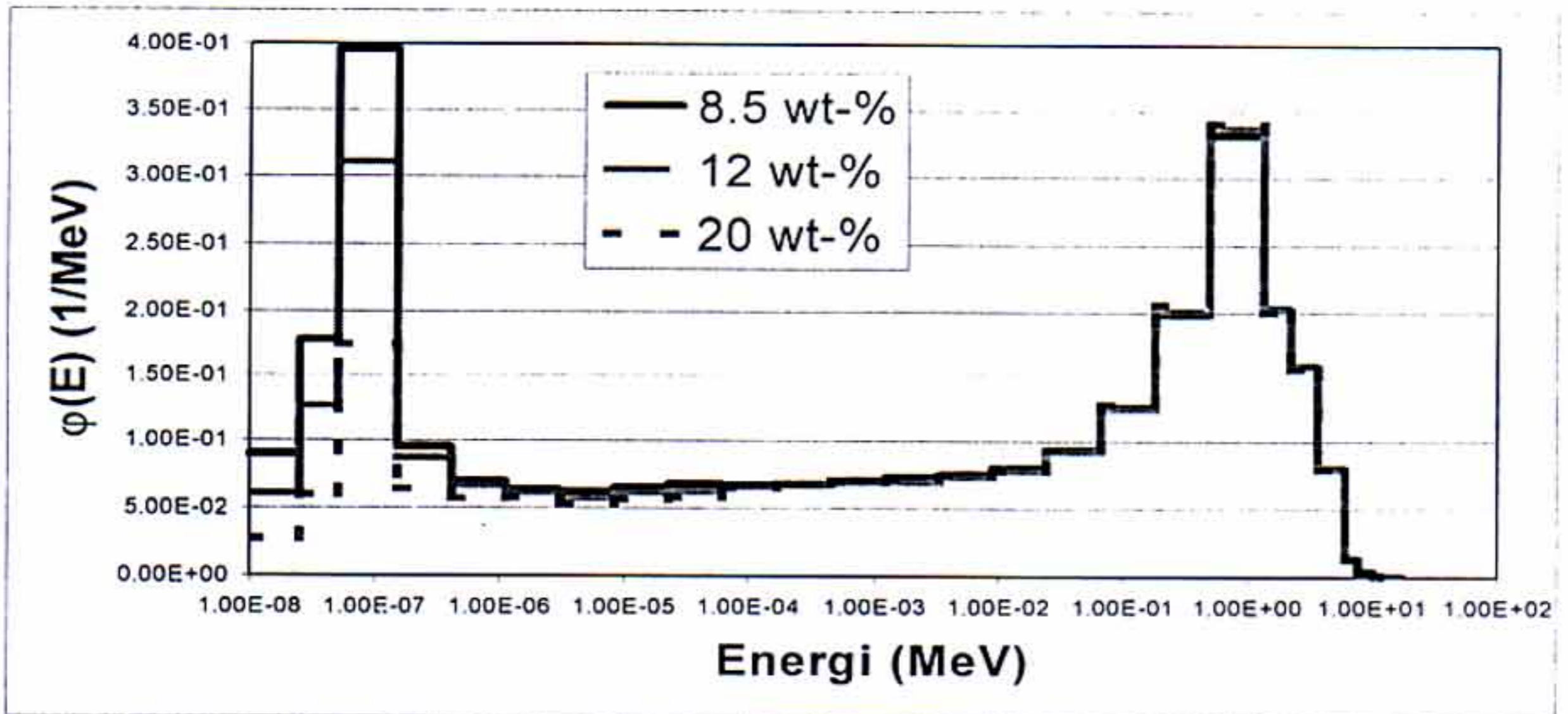
Gambar 5: Spektrum neutron pada ring D.



Gambar 6: Spektrum neutron pada ring E.



Gambar 7: Spektrum neutron pada ring F.



Gambar 8: Spektrum neutron pada ring G.

Spektrum neutron yang terpampang dalam Gambar 2 sampai Gambar 8 di atas merupakan spektrum neutron di dalam elemen bakar, yakni di bagian bahan aktifnya.

Dari Gambar 2 sampai Gambar 8 di atas terlihat jelas bahwa spektrum neutron di reaktor TRIGA 2000 Bandung, seperti juga umumnya reaktor termal, di dominasi oleh neutron termal dan neutron cepat. Terlihat pula bahwa kedua puncak spektrum tersebut secara kualitatif memenuhi distribusi Maxwell maupun Watt. Yang menarik adalah bahwa spektrum neutron di daerah energi menengah sama sekali tidak menampakkan ciri distribusi $1/E$, melainkan agak mendatar bahkan cenderung menaik. Hal ini menunjukkan bahwa terjadi kompetisi yang sengit antara proses perlambatan/moderasi neutron (yang akan menghasilkan spektrum $1/E$) dengan proses tangkapan/fisi neutron (yang akan menurunkan populasi neutron). Hal ini dapat dimengerti karena bahan bakar reaktor TRIGA 2000 Bandung adalah U-235 yang memiliki penampang reaksi fisi yang tinggi di daerah energi epitermal (0,5 eV – beberapa keV). Sifat inilah yang menyebabkan populasi neutron yang berenergi menengah menjadi sangat sedikit, yang berarti pula spektrum neutron pada energi tersebut menjadi sangat rendah.

Spektrum neutron di daerah energi cepat terlihat memiliki bentuk dan bahkan harga yang sama untuk ketiga jenis bahan bakar. Bahkan posisi elemen bakar di dalam teras juga tidak mempengaruhi harga maupun bentuk spektrum. Hal ini masuk akal karena spektrum neutron di daerah energi tinggi semata-mata adalah berasal dari neutron cepat yang dihasilkan oleh fisi U-235. Puncak spektrum tersebut dicapai oleh kelompok energi 0,5 – 1,35 MeV, dengan harga puncak spektrum sekitar $0,341 \text{ MeV}^{-1}$.

Gambar 2 sampai Gambar 7 menunjukkan pula bahwa untuk setiap jenis bahan bakar, bentuk maupun tinggi puncak spektrum energi termal adalah sama, yakni sekitar $0,365 \text{ MeV}^{-1}$, $0,278 \text{ MeV}^{-1}$ dan $0,149 \text{ MeV}^{-1}$, masing-masing untuk bahan bakar jenis 8,5 %-berat, 12 %-berat dan 20 %-berat, di mana puncak spektrum dicapai pada kelompok energi 0,05 – 0,152 eV. Fenomena ini menunjukkan bahwa untuk setiap

jenis bahan bakar, pada ring A sampai F, teras reaktor adalah dapat dikatakan homogen sempurna. Hal ini adalah dengan mengingat bahwa dalam perhitungan ini teras reaktor seluruhnya diisi oleh elemen bakar segar dari satu jenis bahan bakar. Selanjutnya, semakin tinggi kandungan U-235 dalam elemen bakar maka semakin tinggi pula kemampuan serap neutronnya. Hal inilah yang menerangkan mengapa puncak spektrum termal akan semakin rendah bila kadar U-235 semakin tinggi.

Fenomena lain yang terungkap dalam perhitungan ini adalah bahwa pada ring G, seperti nampak dalam Gambar 8, puncak spektrum termal untuk semua jenis bahan bakar terlihat semakin tinggi dibandingkan dengan puncak spektrum termal di ring A sampai F. Hal ini memperlihatkan dengan jelas betapa besar pengaruh reflektor terhadap spektrum neutron di dalam elemen bakar, terutama yang terletak di ring terluar. Reflektor, yang terbuat dari grafit, adalah bahan yang sangat baik dalam memperlambat laju neutron. Akibatnya adalah bahwa semakin banyak pula neutron yang mencapai daerah energi termal.

KESIMPULAN

Dari hasil perhitungan dan analisis di atas dapat ditarik beberapa kesimpulan berikut:

- Spektrum neutron dalam elemen bakar bergantung pada jenis dan komposisi bahan serta konfigurasi teras.
- Untuk teras TRIGA 2000 Bandung yang di isi sepenuhnya dengan satu jenis elemen bakar yang masih segar, spektrum neutron di ring A – F adalah persis sama, sedang di ring G, puncak spektrum termal akan cenderung berharga lebih tinggi, sementara puncak spektrum cepat tidak berubah.
- MCNP telah berhasil digunakan dengan baik untuk menghitung spektrum neutron reaktor TRIGA 2000 Bandung.