

PERHITUNGAN PENAMPANG LINTANG MIKROSKOPIK DALAM SEL BAHAN BAKAR NUKLIR

Mohammad Ali Shafii^{1*)}

¹Jurusan Fisika FMIPA Universitas Andalas, Kampus Limau Manis, Padang Sumatera Barat

*) Email: mashafii@fmipa.unand.ac.id

Abstrak

Perhitungan penampang lintang mikroskopik sel bahan bakar nuklir sangat penting dilakukan untuk menentukan distribusi fluks neutron dalam teras reaktor nuklir, karena distribusi fluks yang merata akan menentukan daya reaktor. Library data nuklir yang digunakan dalam penelitian ini adalah JFS-3-J33-70g yang dipakai oleh kode komputer SLAROM dari JAEA (Japan Atomic Energi Agency). Secara garis besar proses perhitungan adalah sebagai berikut; membaca data dari library SLAROM JFS-33 berdasarkan pada masukan spesifikasi sel bahan bakar nuklir. Kemudian menginterpolasi dari tabulasi nilai-nilai sebagai fungsi penampang lintang latar dan suhu. Selanjutnya menghitung penampang lintang latar awal untuk koreksi heterogenitas menggunakan pendekatan Wigner dengan memasukkan faktor Dancoff dan Bell. Interpolasi dengan metode cubic spline baik terhadap variabel temperatur maupun penampang lintang latar dilakukan lagi untuk mendapatkan penampang lintang serapatan dan hamburan total. Dari hasil perhitungan, nilai penampang lintang fisi, capture, elastik dan tak elastik nuklida U-235 memberikan hasil yang sesuai dengan referensi.

Abstract

Calculation of microscopic cross section of nuclear fuel cell need to be done to determine the distribution of neutron flux in the nuclear reactor core, because the distribution of flux evenly will determine the power reactor. Nuclear data library that is used in this research is the JFS-3-70-J33 used by SLAROM computer code from JAEA (Japan Atomic Energy Agency). Generally the process of calculation are as follows; read data from library of SLAROM JFS-3-70-J33 based on input specifications of nuclear fuel cells. Futhermore, interpolatation of the tabulated values as a function of background cross section and temperature is done. Initial background cross section for heterogeneity correction is calculated using Wigner approach by inserting Dancoff and Bell factors. Interpolation by cubic splines method for the variable of temperature and background cross section is evaluated again to get an absorbtion and total scattering cross section. The results show that the microscopic fission, capture, elastic and inelastic cross section of U-235 isotope are in accordance with the reference.

Keywords: *microscopic cross section, nuclear fuel cell, background cross section.*

1. Pendahuluan

Perhitungan penampang lintang mikroskopik sel bahan bakar nuklir adalah langkah awal untuk memperoleh penampang lintang makroskopik, yang sangat penting dilakukan untuk menentukan distribusi fluks neutron. Distribusi fluks yang merata akan menentukan daya reaktor. Perhitungan fluks neutron tidak dapat secara langsung dilakukan, untuk itulah dilakukan homogenisasi sel bahan bakar [1]. Homogenisasi sel adalah upaya untuk memperoleh penampang lintang efektif sebagai parameter reaksi untuk semua peristiwa yang terjadi di dalam perhitungan sel bahan bakar nuklir seperti penampang lintang fisi (*fission*), hamburan (*scattering*) dan serapan (*absorption*). Proses perhitungan grup konstan efektif melibatkan proses homogenisasi terhadap ruang dan energi.

Pada pendekatan Bondarenko, homogenisasi terhadap energi (*energi self shielding*) terlebih dahulu dilakukan untuk menghasilkan *library* yang nantinya digunakan untuk proses homogenisasi terhadap ruang (*spatial self shielding*). Proses ini dikenal sebagai homogenisasi sel bahan bakar nuklir [2].

Peristiwa tumbukan antara neutron dengan inti dapat menyebabkan berbagai macam reaksi. Untuk mengetahui kuantitas dari masing-masing jenis reaksi tersebut didefinisikan suatu besaran penampang lintang mikroskopik dengan cara mengukur probabilitas masing-masing reaksi. Suatu penampang lintang mikroskopik jenis reaksi x (σ_x) didefinisikan sebagai karakteristik suatu luasan tertentu sebanding dengan probabilitas bahwa suatu peristiwa jenis x yang dialami oleh suatu inti akan terjadi (cm^2). Jenis reaksi x tersebut dapat berupa

hamburan, penangkapan radiasi (*radiative capture*), penyerapan, fisi dan reaksi lain (n,γ). Penampang lintang mikroskopik diukur dengan menggunakan satuan *barn* ($1 \text{ barn} = 10^{-28} \text{ m}^2$) [3].

Penelitian ini akan memperlihatkan perilaku penampang lintang efektif nuklida penyusun sel bahan bakar nuklir yaitu U-Pu-Nitrid berdasarkan analisis energi multigrup. Komposisi sel bahan bakar nuklir berbentuk silinder ini telah dilakukan pada penelitian sebelumnya [4]. Penampang lintang efektif nuklida ini adalah penampang lintang mikroskopik fisi, *capture*, elastik dan tak elastik pada U-235 di daerah grup energi tinggi (daerah cepat), kemudian fisi Pu-239 dan hamburan U-238. Data *library* yang digunakan adalah JFS-3-J33 dari JAEA Japan. Secara umum *library* JFS-3-J33 mengandung [5]:

- Grup konstan reaksi seperti penampang lintang total, fisi dan serapan.
- Penampang lintang matriks hamburan pada peristiwa hamburan elastik, hamburan inelastik, dan reaksi ($n,2n$) (khusus untuk *fine group* terdapat reaksi ($n,3n$) dan reaksi ($n,4n$)).
- Tabel *self-shielding* disediakan bagi penampang lintang total, fisi, *capture*, elastik, dan elastik *removal*.

Hasil yang diperoleh dalam penelitian ini nantinya akan menjadi dasar dalam perhitungan penampang lintang makroskopik dan fluks neutron.

2. Metode Penelitian

Penampang lintang efektif dihitung dari penampang lintang dilusi tak berhingga σ_∞ dan faktor *self-shielding* untuk nuklida resonan f_x berdasarkan pada metode pembacaan tabel [6]

$$\sigma_{x,n}^{\text{eff}} = \sigma_{x,n}^\infty f_x(\sigma_{0,n}, T) \quad (1)$$

dengan x menunjukkan tipe reaksi dan n adalah nuklida pada resonan. Nilai f_x ditentukan oleh interpolasi dari tabulasi nilai-nilai sebagai fungsi penampang lintang latar (*background cross section*)

σ_0 dan suhu T . Proses perhitungan penampang lintang latar dimulai dengan perhitungan kerapatan atom untuk masing-masing nuklida di masing-masing *region*. Selanjutnya dihitung penampang lintang latar untuk masing-masing nuklida yang masih homogen [7]

$$\sigma_0^n = \sum_{m \neq n} \frac{N_m \sigma_t^m}{N_n} \quad (2)$$

Setelah itu hasil perhitungan di atas digunakan untuk sekali lagi menghitung penampang hamburan total, dan menghitung kembali persamaan (1). Kemudian dilakukan koreksi heterogenitas dengan memasukkan faktor Dancoff dan Bell [8]. Penampang lintang latar *region* di dalam sel bahan bakar yang heterogen dapat didefinisikan

berdasarkan pada hubungan kesetaraan integral resonan antara daerah yang homogen dan heterogen. Dengan menggunakan pendekatan rasional model Wigner pada perhitungan CP, maka penampang lintang latar didefinisikan sebagai [8]

$$\sigma_{0,k}^n = \sigma_{0,k}^{*n} + \frac{S_k}{4N_k^n V_k} \frac{a(1-C)}{1+(a-1)C} \quad (3)$$

dengan S_k adalah luas permukaan elemen *region* sel ke k , V_k adalah volume elemen *region* sel ke k ,

N_k^n adalah kerapatan nuklida ke n di elemen *region* sel ke- k , tetapan a adalah faktor Bell, dan C adalah faktor Dancoff. Tanda * menunjukkan harga untuk model homogen menurut persamaan (2). Nilai $\sigma_{0,k}^{*n}$ adalah penampang lintang latar *region* sel bahan bakar yang perhitungannya diperoleh dari persamaan (2). Setelah mendapatkan harga penampang lintang latar maka dapat dihitung kembali penampang lintang tiap nuklida untuk tiap jenis reaksi. Setelah itu perhitungan seperti pada persamaan (1) dan (2) dapat diulang kembali secara iteratif hingga konvergen.

Untuk sel bahan bakar berbentuk silinder digunakan modifikasi faktor Dancoff dengan menggunakan pendekatan Bell [8]

$$C = 1 - r - r^4(1-r) \quad (4)$$

dengan $r = \frac{1}{1 + \Sigma_{01}/\Sigma_1}$, $\Sigma_{01} = \frac{S_0}{4V_0}$ dan Σ_1 adalah

penampang lintang makroskopik di *region* yang dihitung. Persamaan (4) dapat diterapkan pada kasus dimana *region* yang dihitung tersusun atas pelindung, pendingin dan material struktur dengan cara menghomogenisasikannya secara spasial.

Faktor *self-shielding* di tabelkan untuk tiga harga penampang lintang latar dan tiga harga suhu pada *library* yang menggunakan *library* data JFS versi 2, sedangkan untuk data JFS versi 3 menggunakan delapan harga penampang lintang latar dan empat harga suhu. Metode interpolasinya juga berbeda untuk kedua tipe data tersebut. Fungsi hiperbolik digunakan untuk tipe data JFS versi 2, sedangkan fungsi *cubic spline* digunakan untuk tipe data JFS versi 3. Interpolasi faktor *self-shielding* dengan menggunakan fungsi hiperbolik dinyatakan dengan menggunakan kaitan berikut [8]

$$f(x) = \frac{C}{x-A} - B \quad (5)$$

dengan

$$x = \log_{10} \sigma_0 \quad (6)$$

dan koefisien A , B dan C diperoleh dari metode *cubic spline* menggunakan polinomial orde 3.

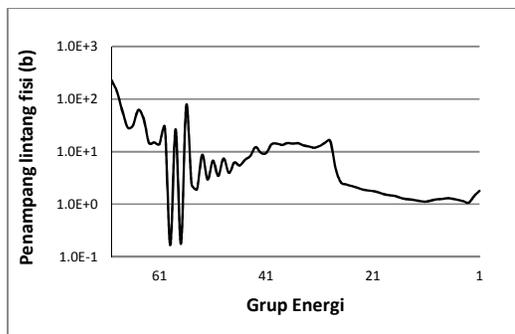
Secara garis besar, algoritma perhitungan penampang lintang mikroskopik homogenisasi sel adalah sebagai berikut :

- Membaca data dari *library* Slarom JFS-33.

- Membaca masukan spesifikasi sel bahan bakar.
- Menghitung nilai f_x yang ditentukan oleh interpolasi dari tabulasi nilai-nilai sebagai fungsi penampang lintang latar σ_0 dan suhu T .
- Menghitung *background cross section* awal.
- Menghitung *background cross section* awal untuk koreksi heterogenitas menggunakan pendekatan rasional model Wigner dengan memasukkan faktor Dancoff dan Bell.
- Interpolasi dengan metode *cubic spline* baik terhadap variabel temperatur maupun *background cross section* dilakukan lagi untuk mendapatkan penampang lintang serapatan dan hamburan total.
- Proses terus dilakukan sampai *cross section* yang telah terhomogenisasi mencapai konvergen.

3. Hasil dan Pembahasan

Dari hasil perhitungan homogenisasi sel bahan bakar dapat diperoleh perilaku penampang lintang fisi U-235 berdasarkan analisis energi multigrup. Gambar 1 memperlihatkan hasil perhitungan penampang lintang U-235.

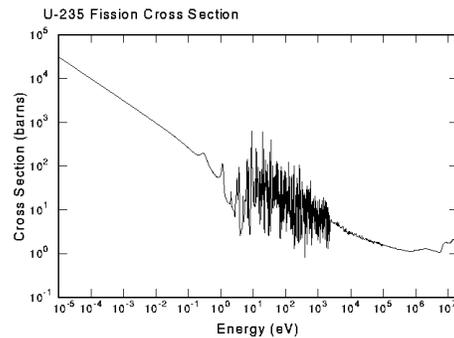


Gambar 1. Penampang lintang fisi U-235

Dari Gambar 1 terlihat bahwa penampang lintang fisi U-235 sangat besar pada energi rendah. Di sinilah sebagian besar reaksi terjadi dalam reaktor daya. Pada energi menengah (*intermediate*), penampang lintang U-235 mengalami resonansi. Di daerah energi tinggi (grup energi ke-1 sampai dengan 30), jika dibandingkan dengan Gambar 2 perhitungan memberikan hasil yang sama, namun di daerah epitermal dan termal (grup energi ke-30 sampai dengan 70) terjadi perbedaan yang cukup tajam, terutama di daerah resonan. Perbedaan ini terjadi karena penelitian ini dirancang hanya untuk jenis reaktor cepat. Selain itu, perbedaan pemilihan tipe *library* juga memberikan kemungkinan terjadinya perbedaan tersebut.

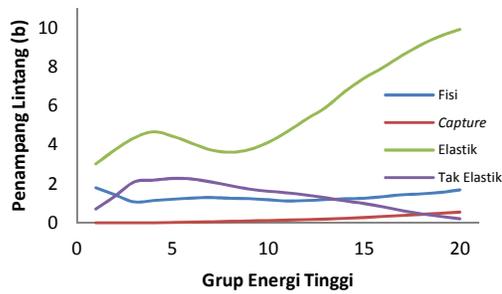
Daerah energi resonan terjadi pada grup energi ke-30 sampai grup 65, atau berada pada kisaran energi 1 eV sampai dengan 1 keV jika digambarkan sebagai fungsi energi seperti terlihat pada Gambar 2. Daerah resonan ini adalah karakteristik energi di mana nuklida mudah untuk tereksitasi yang ditandai dengan adanya penampang lintang yang sangat berbeda dengan rentang energi yang sangat dekat. Secara umum, daerah energi resonan terletak pada daerah energi antara 1 eV sampai dengan 100 keV.

Untuk semua jenis reaktor, neutron banyak diserap di daerah energi resonan, namun daerah resonan dapat berubah dengan adanya perubahan suhu pada bahan bakar akibat adanya efek pelebaran Doppler [9]. Sebuah neutron dikatakan memiliki energi termal ketika neutron mengalami perlambatan (*slowing down*) menjadi berada dalam kesetimbangan termal terhadap sekitarnya, yaitu ketika energi kinetik neutron serupa dengan yang dimiliki oleh atom-atom sekitarnya karena gerakan acak termalnya.



Gambar 2. Penampang lintang fisi U-235 [3].

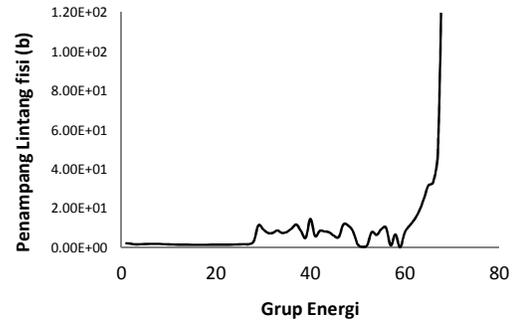
Pada penelitian ini, perhitungan resonan menggunakan metode Tone, karena metode Tone sangat cocok diterapkan untuk analisis reaktor cepat maupun termal yang menggunakan metode *collision probability* multigrup [10]. Di daerah energi rendah atau sering disebut sebagai daerah *resolved resonance* akan bergantung pada sifat dasar nuklida yang digunakan. Untuk nuklida fertil daerah *resolved resonance* sampai pada beberapa energi keV, sedangkan untuk nuklida fissil berada pada daerah sekitar 50 eV. Pada energi tinggi atau daerah *unresolved resonance*, parameter resonan yang diperoleh secara eksperimen tidak dapat digunakan. Dalam hal ini perlu digunakan tinjauan teoretik untuk menyimpulkan kemungkinan penyebab utama terjadinya resonan dalam pengukuran penampang lintang sebagai fungsi energi. Hal ini sangat penting untuk reaktor cepat, karena banyak neutron memiliki energi di daerah *unresolved resonance* ini.



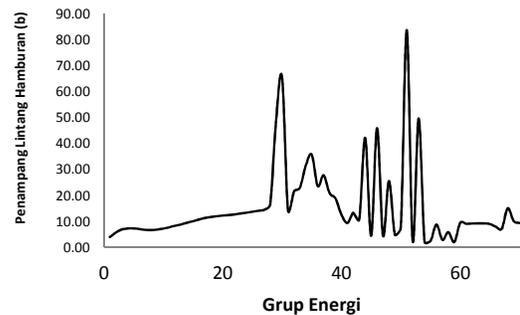
Gambar 3. Penampang lintang U-235 untuk reaksi yang berbeda

Reaktor cepat bekerja pada energi tinggi, antara 0,1 eV sampai dengan 10 MeV. Gambar 3 memperlihatkan penampang lintang untuk reaksi yang berbeda seperti penampang lintang fisi, capture, elastik dan tak elastik pada U-235 di daerah grup energi tinggi (daerah cepat). Pada peristiwa ini ditunjukkan bagaimana reaksi hamburan mendominasi dalam kisaran MeV karena sebagian besar neutron fisi memiliki energi yang tepat di atas 1 MeV. Untuk reaktor cepat komersial, sebagian besar neutron akan mengalami populasi di daerah sekitar 100 keV. Untuk nuklida berat, energi yang hilang dalam peristiwa tumbukan elastik jauh lebih kecil daripada dalam tumbukan tak elastik. Sebuah neutron dalam peristiwa tumbukan elastik dengan inti yang berat, energinya hampir sama dengan energi awal sehingga memberikan energi yang sangat sedikit untuk inti. Tapi, dalam sebuah tumbukan tak elastik sebagian besar energi neutron digunakan untuk usaha dalam meninggalkan inti pada keadaan tereksitasi. Sedangkan pada peristiwa penangkapan radiatif, inti berat cenderung turun seiring dengan kenaikan energi. Secara umum, proses hamburan neutron mendominasi dalam reaktor cepat karena probabilitas penangkapan radiatif sangat kecil. Dengan alasan inilah, maka penelitian ini menggunakan tipe reaktor jenis reaktor cepat.

Penampang lintang hamburan total untuk dua nuklida penyusun bahan bakar nuklir yaitu Pu-239 dan U-238, merupakan jumlah total dari penampang lintang hamburan elastik, tak elastik dan reaksi $(n,2n)$. Untuk material fisil seperti Pu-239, pelebaran Doppler menaikkan penampang lintang efektif fisi dan tangkapan radiatif. Profil penampang lintang hamburan total untuk Pu-239 diperlihatkan pada Gambar 4. Daerah resonannya berada pada daerah *resolved resonance* sampai pada energi neutronnya sekitar 50 eV, sehingga secara substansial semua efek reaktivitas di daerah neutron cepat akan muncul dari pelebaran daerah *unresolved resonance*. Untuk U-238, pelebaran Doppler akan menaikkan serapan resonan namun menurunkan reaktivitas.



Gambar 4. Penampang lintang fisi Pu-239.



Gambar 5. Penampang lintang hamburan U-238.

Untuk beberapa reaktor nuklir, penampang lintang serapan dan fisi di daerah energi resonan untuk beberapa bahan fisil dan fertil menjadi sangat tinggi. Hal ini dapat menyebabkan lekukan tajam pada fluks sesuai dengan masing-masing daerah energi resonan, akibatnya terjadi penyimpangan spektrum. Penyimpangan spektrum ini dapat menyebabkan ketidaktelitian penampang lintang grup, yang disebut efek *resonance self-shielding* [11]. Dari Gambar 4 dan 5 terlihat bahwa daerah energi resonan untuk U-238 dan Pu-239 terjadi tumpang tindih (*overlap*) sangat kuat di daerah energi tinggi. Oleh karena itu, pelebaran Doppler hanya menghasilkan sedikit perubahan. Hal berbeda untuk energi menengah, dimana pengaruh efek pelebaran Doppler terhadap reaktivitas menjadi sangat penting. Energi tersebut berada di sekitar 1 keV, meskipun untuk daerah neutron cepat berada pada daerah di atas 1 keV. Pada reaktor cepat, efek interferensi resonan pada nuklida-nuklida baik pada bahan bakar, struktur material maupun pendingin memegang peranan penting dalam evaluasi karakteristik nuklir. Efek interferensi resonan ditunjukkan oleh parameter resonan dan penampang lintang *background* hanya untuk efek pada U-238 dengan resonan U-235, Pu-238 oleh Pu-239 dan Pu-239 oleh U-238 [12]. Penampang lintang hamburan ini digunakan sebagai landasan utama dalam perhitungan matriks *Collision Probability*.

4. Kesimpulan

Dari hasil perhitungan homogenisasi sel bahan bakar nuklir pada reaktor cepat, efek interferensi resonan pada nuklida-nuklida dalam bahan bakar, struktur material maupun pendingin memegang peranan penting dalam evaluasi karakteristik nuklir. Perhitungan penampang lintang mikroskopik efektif terutama untuk nuklida penyusun sel bahan bakar nuklir seperti U-235, memberikan hasil yang sama dengan referensi terutama di daerah energi tinggi. Daerah energi resonan untuk U-238 dan Pu-239 terjadi tumpang tindih (*overlap*) sangat kuat di daerah energi tinggi. Oleh karena itu, pelebaran Doppler hanya menghasilkan sedikit perubahan. Hal berbeda untuk energi menengah, dimana pengaruh efek pelebaran Doppler terhadap reaktivitas menjadi sangat penting.

Ucapan Terimakasih

Penelitian ini dibiayai oleh Ditlitabmas Dikti Kemenristekdikti melalui LPPM Unand untuk skema penelitian Strategis Nasional tahun 2015 dengan kontrak No.02/H.16/SN/LPPM/2015.

Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Prof. Zaki Su'ud di Departemen Fisika ITB atas diskusi yang mendalam tentang masalah ini.

Daftar Acuan

- [1] M. A. Shafii dan Su'ud, Z., Study of Development Homogenization Code Using General Geometry Approach, *Proceeding of International Conference on Advanced Nuclear Sciences and Engineering*, (2007), ITB-TokyoTech, Bandung.
- [2] Z. Su'ud, Kode Komputer Untuk Homogenisasi Sel Bahan Bakar Pada Reaktor Cepat, *Prosiding Lokakarya Komputasi dalam Sain dan Teknologi Nuklir*, (1998), BATAN.
- [3] J. J. Duderstadt, dan Hamilton L. J., *Nuclear Reactor Analysis*, John Wiley and Sons, New York, (1976).
- [4] M. A. Shafii, Su'ud Z, Waris A, Kurniasih N, Ariani M, Yulianti Y., Collision Probability Method for Nuclear Fuel Cell Homogenization using Finite Element Method for Neutron Flux Interpolation, *AIP Conf. Proc.* 1325, (2010), p. 253-258.
- [5] T. Hazama, Chiba, G., Sato, W. dan Numata, K., SLAROM-UF: Ultra-Fine Group Cell Calculation Code for Fast Reactor (User's Manual), (2008), *Private Communication*.
- [6] K. Okumura, Kugo, T., Kaneko, K., dan Tsuchihashi, K., *SRAC 2006: A Comprehensive Neutronics Calculation Code System*, JAEA, (2007).
- [7] Z. Su'ud, Rustandi, Y.K. dan Kurniadi, R. *Komputasi Paralel dalam Perhitungan Grup Konstan Nuklir*, Prosiding Seminar ke-7 Teknologi dan Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir, Bandung, (2002).
- [8] M. Nakagawa, dan Tsuchihashi, K., *SLAROM: A Code for Cell Homogenization Calculation of Fast Reactor*, JAERI, (1984).
- [9] G. I. Bell, dan Glasstone, S., *Nuclear Reactor Theory*, Van Nostrand Reinhold Co., New York, (1970).
- [10] A. Yamamoto, Endo, T., dan Chiba, G., Improvement of Tone's Method with Two-Term Rational Approximation, *J. Nucl. Sci. Technol.*, Vol. 48, No. 2, (2011). p. 263-271.
- [11] J. Zou, Hea, Z., Zenga, Q., Qiu, Y. dan Wangaet, M., Development and testing of multigroup library with correction of self-shielding effects in fusion-fission hybrid reactor, *Fusion Eng.*, (2010), doi:10.1016/j.fusengdes.2010.04.053.2007.
- [12] T. Hazama, Chiba G, Sugino K., Development of a Fine and Ultra-Fine Group Cell Calculation Code SLAROM-UF for Fast Reactor Analyses, *Journal of Nuclear Science and Technology*, 43 (8), (2006), p. 908-918.