

SIMULASI TRANSPORT NEUTRON DALAM PERISAI RADIASI REAKTOR DENGAN METODE MONTE CARLO

M.B. Setiawan, Pudjijanto MS.

ABSTRAK

SIMULASI TRANSPORT NEUTRON DALAM PERISAI RADIASI REAKTOR DENGAN METODE MONTE CARLO. Telah dilakukan penelitian berupa simulasi transport neutron dalam perisai radiasi reaktor dengan menggunakan program Fortran ELSCAT. Program ini menerapkan aplikasi Monte Carlo sederhana, yang melibatkan beberapa teknik simulasi seperti: penggunaan bilangan acak untuk mencuplik sebuah *pdf* (*probability density function*, fungsi kerapatan kebolehjadian); mengikuti riwayat hidup setiap partikel mulai dari "kelahirannya" hingga akhir-hidupnya, penyimpanan data yang diperoleh untuk kemudian direratakan; dan penghitungan error statistik dari hasil komputasi. Secara umum, program ELSCAT melakukan perkiraan jumlah rerata tumbukan elastis yang diperlukan untuk melambatkan neutron yang berenergi awal Energi sumber (E_s) hingga energi akhirnya (E_{min}) dalam sebuah bahan pemoderasi dengan nomor massa A. Untuk menentukan energi pasca hamburan, *pdf* yang sesuai dicuplik menggunakan bilangan acak yang digenerasi oleh komputer PC. Energi awal (*starting energy*) untuk tumbukan berikutnya dianggap sama dengan energi akhir setelah tumbukan sebelumnya. Program ini juga menghitung rerata sudut hamburan neutron. Pada penelitian ini diperoleh hasil komputasi berupa jumlah rerata tumbukan dan rerata cosinus sudut hamburan elastis neutron untuk bahan-bahan perisai dengan nomor massa: 238.0, 207.0, 56.0, 23.0, 12.0, 9.0, dan 1.0.

ABSTRACT

NEUTRON TRANSPORT SIMULATION IN REACTOR SHIELDING MATERIAL USING MONTE CARLO METHOD. Simulation of neutron transport in the reactor shielding material has been undertaken using ELSCAT code. ELSCAT utilizes Monte Carlo application which involve simulation techniques such as: the use of random number for a *pdf* (*probability density function*) sampling; tracking a particle life from its born to the end of its life; and statistical error calculation. In general, ELSCAT estimates the average number of elastic collisions needed to slow down the neutron from its source energy (E_s) to its terminal energy (E_{min}) inside a moderator with mass number A. To determine the post collision energy, the appropriate *pdf* is sampled using random number generated by computer. This code also computes the average neutron scattering angle. In this simulation, have been obtained computational results of the average number of elastic collisions and average cosinus elastic neutron scattering angles for shielding materials with mass numbers: 238.0, 207.0, 56.0, 23.0, 12.0, 9.0, and 1.0.

PENDAHULUAN

Program ELSCAT ditujukan untuk memperkirakan jumlah rerata tumbukan elastis yang diperlukan untuk memperlambat (memoderasi) "sebuah" neutron yang berenergi awal sama dengan energi sumber (E_s) hingga mencapai energi akhirnya (E_{min}), dalam bahan pemoderasi bernomor massa A . Hal ini dilakukan dengan mengikuti riwayat hidup sejumlah neutron dan merata-ratakan jumlah tumbukan yang diperlukan.

Untuk menentukan energi pasca hamburan, *pdf* (*probability density function*, fungsi sebaran probabilitas) yang sesuai dicuplik menggunakan bilangan acak (*random numbers*). Energi awal (*starting energy*) untuk tumbukan berikutnya dianggap sama dengan energi akhir setelah tumbukan sebelumnya. Program ini juga menghitung rerata sudut hamburan neutron.

Dengan demikian program ini dapat dianggap sebagai suatu program aplikasi Monte Carlo. Dengan demikian, mengingat pada program ini digunakan beberapa teknik simulasi seperti: penggunaan bilangan acak untuk mencuplik sebuah *pdf*, mengikuti riwayat hidup setiap partikel mulai dari "lahirannya" hingga "akhir-hidupnya", menyimpan data yang diperoleh untuk kemudian direratakan, dan perhitungan error statistik dari hasil komputasi.

Penelitian ini menitikberatkan pada perhitungan simulasi transport neutron dalam beberapa konfigurasi moderator, dengan menekankan pada pemodifikasian program ELSCAT yang ditulis oleh James Bond (University of London, UK). Program yang semula ditujukan untuk dioperasikan pada komputer mainframe, dimodifikasi agar dapat *runable* pada komputer berbasis PC dengan menggunakan compiler FORTRAN-77. Disamping itu, program yang pada awalnya dimaksudkan untuk tujuan edukasi ini, juga telah dikembangkan untuk keperluan penelitian-penelitian dasar, terutama yang berkaitan dengan transport neutron pada bahan-bahan moderator reaktor, sehingga pada akhirnya, bersama-sama dengan program (*code*) yang lain, seperti BMIX, CASK dan CADRE, dapat digunakan untuk perancangan dan analisis perisai reaktor.

TEORI

Batasan Model Hamburan ELSCAT

Dalam pembahasan berikut, perlu diberikan batasan yang dipergunakan dalam program ELSCAT, terutama yang berkaitan dengan telaah perisai penetrasi neutron. Batasan akan disampaikan dalam 3 pembahasan berikut ini:

1. Asumsi bahwa inti target dalam keadaan diam.

Hal ini memberikan implikasi bahwa neutron-neutron tidak akan "diikuti" lagi oleh program ketika energi mereka telah lebih kecil dari sekitar 1 eV. Di bawah energi 1 eV, dibutuhkan model hamburan lain yang tidak diperhitungkan dalam program ini, seperti energi kinetik atom-atom sasaran (target), efek ikatan kimia sebuah atom dalam molekul. Pembatasan ini diambil semata-mata untuk studi awal aplikasi program ini menggunakan PC tidak mengkonsumsi waktu *run-time* yang terlalu besar.

2. Pengabaian proses hamburan inelastis.

Untuk penghitungan pelemahan neutron cepat, proses hamburan inelastis seharusnya tidak diabaikan, terutama jika terdapat inti-inti berat yang sangat besar kemungkinan terdapat dalam komposisi bahan-bahan perisai. Hamburan inelastis merupakan sebuah threshold event, yaitu neutron datang memerlukan suatu energi minimum untuk berinteraksi. Hampir semua neutron yang telah dilambatkan sehingga energinya lebih kecil dari ambang inelastis, dapat dipenuhi dengan tumbukan-tumbukan elastis dengan inti hidrogen yang ada pada berbagai bentuk perisai.

3. Asumsi: hamburan elastis bersifat isotropis dalam sistem C.M.

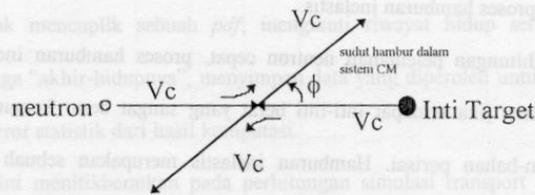
Untuk bahan pemoderasi hidrogen, cukup akurat untuk menaganggap bahwa neutron-neutron dengan energi hingga 14 MeV akan terhambur secara isotropis dalam sistem C.M. Untuk inti lain, hanya dapat diasumsikan untuk neutron-neutron di bawah 0,1 MeV. Derajat anisotropis meningkat sesuai dengan kenaikan energi neutron yang datang, terutama untuk inti-inti berat.

Harga pdf untuk Hamburan Elastis Neutron

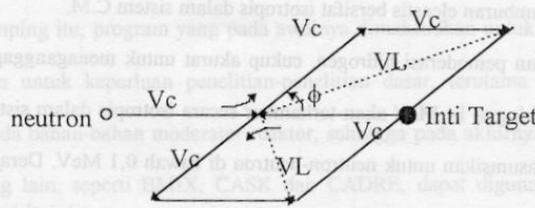
Hubungan yang diterapkan dalam penentuan pdf ini didasarkan pada dua asumsi dasar, yaitu bahwa:

- (1) sebelum tumbukan, inti-inti target (dalam hal ini atom-atom bahan moderator) dalam keadaan diam di dalam sistem laboratorium (L),
- (2) sudut hamburan isotropis dalam sistem koordinat pusat massa (CM)

dengan demikian, bila digunakan sistem koordinat CM, maka setelah tumbukan, neutron mempunyai kebolchjadian yang sama untuk menempuh arah mana saja dalam ruang. Gambaran fisis dari tumbukan elastis dua-benda disajikan pada Gambar 1 dan Gambar 2. Efek keseluruhan dari suatu tumbukan elastis (lenting) dalam sistem koordinat CM adalah suatu rotasi sistem partikel dengan sudut ϕ , yang merupakan sudut hamburan dalam kerangka sistem CM.



Gambar 1. Tumbukan elastis dalam sistem CM

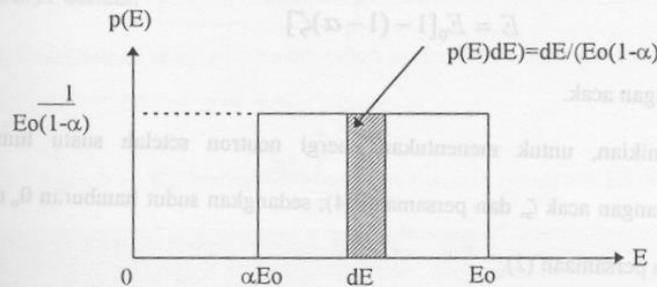


Gambar 2. Tumbukan dipandang dari kerangka CM dan L

Pencuplikan pdf

Untuk tumbukan-tumbukan elastis yang memenuhi asumsi (1) dan (2) di atas, dapat disimpulkan dengan suatu pernyataan statistik bahwa neutron akan mempunyai energi pasca tumbukan dengan kebolehhjadian yang sama.

Secara figuratif, pernyataan tersebut dapat digambarkan dalam distribusi kebolehhjadian berikut:



Gambar 3. Sebaran kebolehhjadian energi neutron setelah tumbukan

Secara matematis, pernyataan tersebut dapat diberikan dalam bentuk persamaan berikut ini:

$$p(E) = \frac{1}{E_0(1 - \alpha)} \tag{1}$$

dengan

E_0 = energi awal neutron = E_s

E = energi neutron setelah hamburan

$$\alpha = [(A-1)/(A+1)]^2$$

A = nomor massa inti target

Sudut hamburan yang bersesuaian dengan sistem lab (L) diberikan dalam kerangka energi awal dan energi setelah tumbukan, dapat dituliskan dalam bentuk persamaan berikut:

$$\cos \theta_o = \frac{A+1}{2} \sqrt{\frac{E}{E_0}} - \left(\frac{A-1}{2}\right) \sqrt{\frac{E_0}{E}} \quad (2)$$

Cuplikan pdf untuk persamaan (1) dapat diperoleh dengan menggunakan skema pdf pada Gambar 3, yaitu:

$$E = E_0[\alpha + (1-\alpha)\zeta] \quad (3)$$

atau

$$E = E_0[1 - (1-\alpha)\zeta] \quad (4)$$

dengan ζ adalah bilangan acak.

Dengan demikian, untuk menentukan energi neutron setelah suatu tumbukan elastis, digunakan sebuah bilangan acak ζ , dan persamaan (4); sedangkan sudut hamburan θ_o dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (2).

Pada fenomena hamburan elastis berulang, terdapat beberapa hasil analitis yang berkaitan dengan perlambatan neutron, yaitu (1) jumlah tumbukan yang diperlukan untuk melambatkan sebuah neutron hingga mencapai E_{min} dan (2) rerata cosinus sudut hamburan.

Jumlah tumbukan yang diperlukan untuk melambatkan sebuah neutron hingga mencapai E_{min} , dapat dinyatakan dalam persamaan analitis berikut:

$$n = \frac{1}{\xi} \log_e [E_s / E_{min}] \quad (5)$$

dimana E_s adalah energi awal neutron, dan ξ adalah rerata logaritmik penurunan energi neutron per tumbukan, yang biasa dinyatakan dalam bentuk persamaan:

$$\xi = 1 - \frac{(A-1)^2}{2A} \log_e \left(\frac{A+1}{A-1}\right) \quad (6)$$

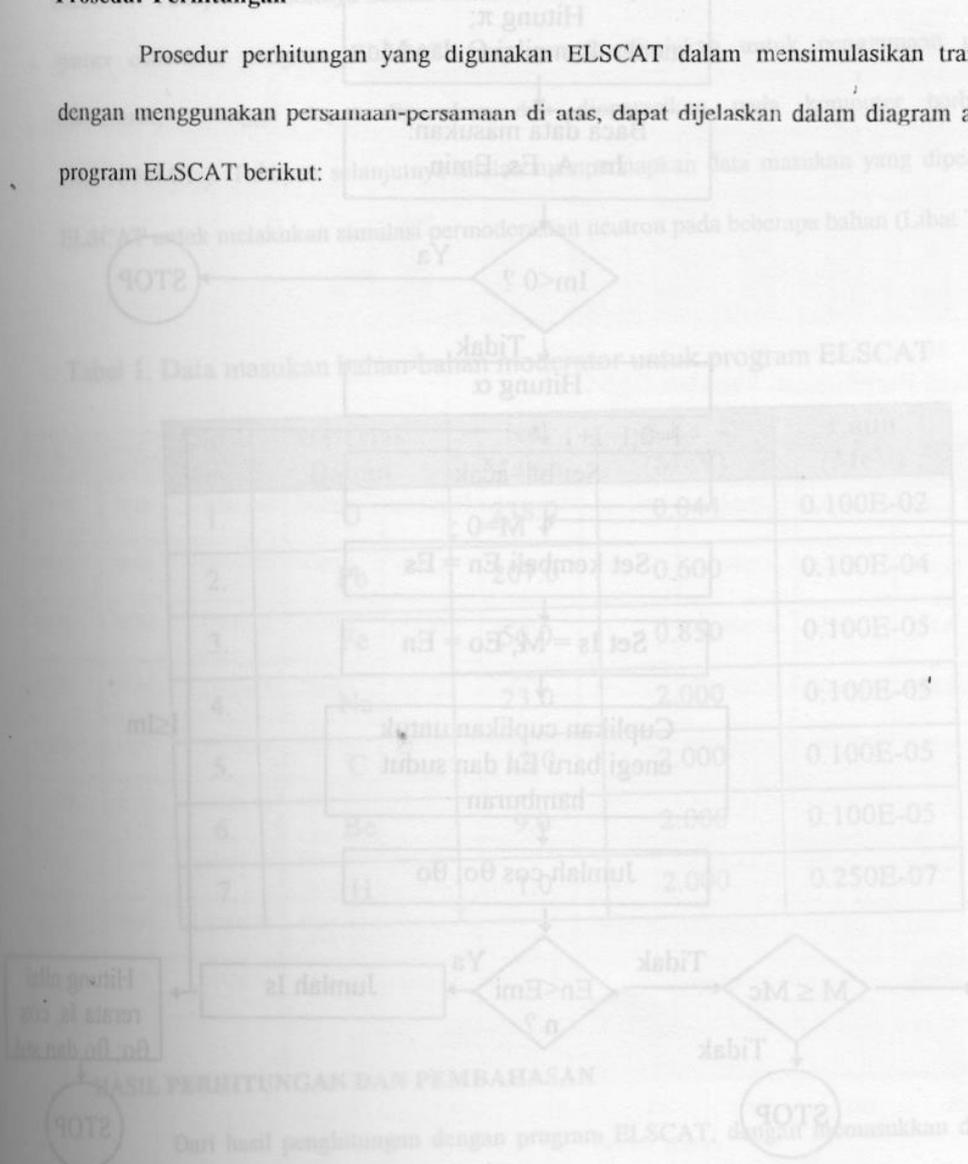
Sedangkan rerata cosinus sudut hamburan suatu tumbukan, dapat dinyatakan dalam fungsi nomor massa, sebagai:

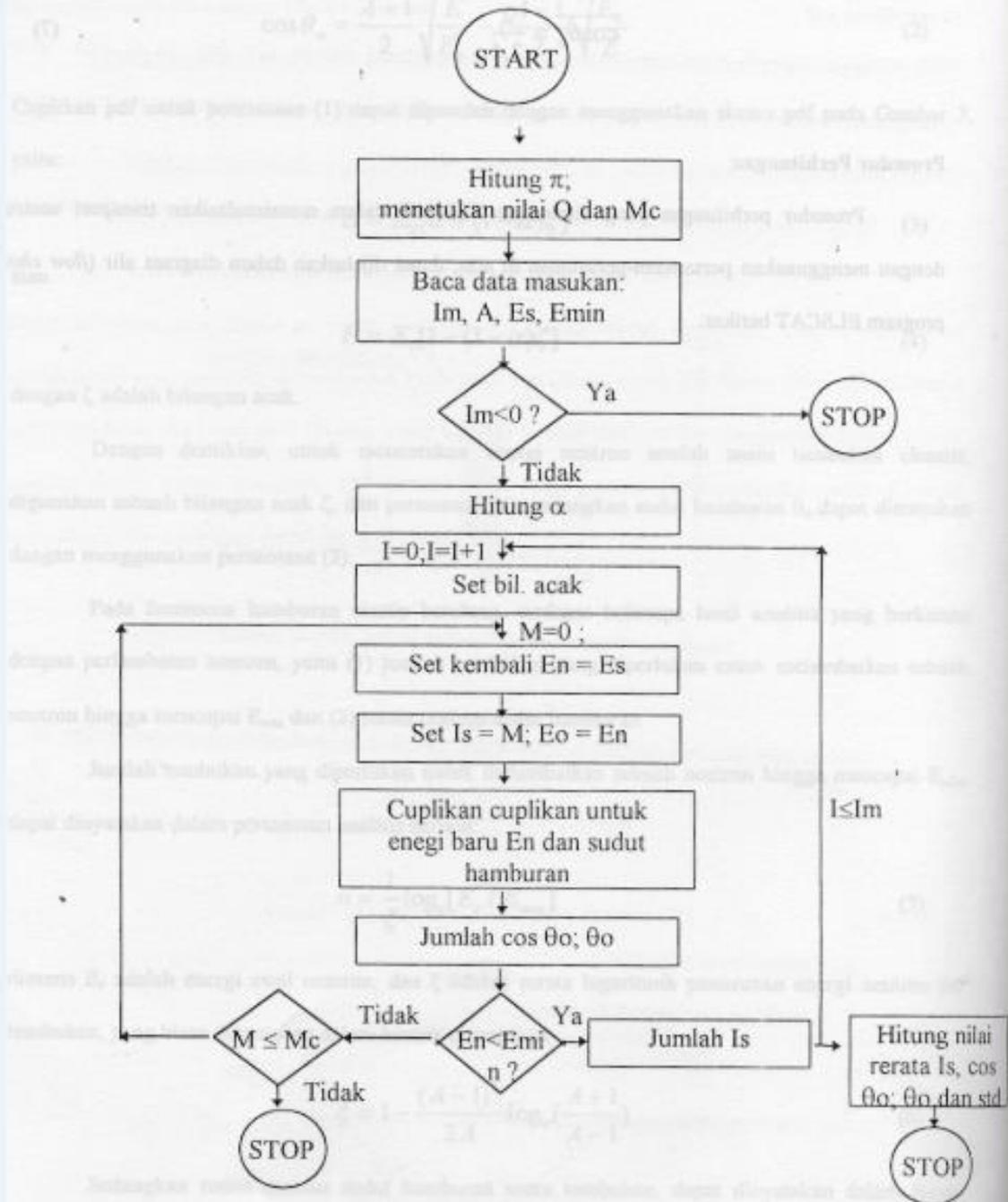
TATA KERJA

$$\overline{\cos\theta_0} = \frac{2}{3A} \tag{7}$$

Prosedur Perhitungan

Prosedur perhitungan yang digunakan ELSCAT dalam mensimulasikan transport neutron dengan menggunakan persamaan-persamaan di atas, dapat dijelaskan dalam diagram alir (flow chart) program ELSCAT berikut:





TATA KERJA

Langkah awal penelitian simulasi ini, dimulai dengan penelusuran literatur yang berkaitan dengan teori transport dan perisai reaktor, serta dasar fisis perhitungan yang diterapkan dalam program ELSCAT. Tahapan berikutnya adalah melakukan beberapa modifikasi dalam hal yang berkaitan dengan *syntax command* program ELSCAT yang semula ditujukan untuk penggunaan pada komputer mainframe, sehingga dapat digunakan dan dioperasikan pada komputer berbasis PC (PC 386DX/50MHz). Tahapan selanjutnya adalah mempersiapkan data masukan yang diperlukan program ELSCAT untuk melakukan simulasi permoderasian neutron pada beberapa bahan (Lihat Tabel 1).

Tabel 1. Data masukan bahan-bahan moderator untuk program ELSCAT

No	Material/ Bahan	No Massa	Es (MeV)	Emin (MeV)
1.	U	238.0	0.044	0.100E-02
2.	Pb	207.0	0.600	0.100E-04
3.	Fe	56.0	0.850	0.100E-05
4.	Na	23.0	2.000	0.100E-05
5.	C	12.0	2.000	0.100E-05
6.	Be	9.0	2.000	0.100E-05
7.	H	1.0	2.000	0.250E-07

HASIL PERHITUNGAN DAN PEMBAHASAN

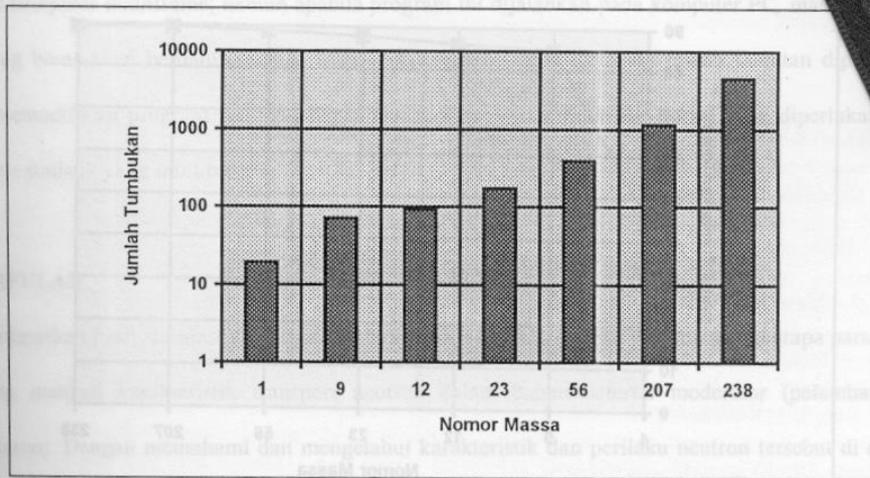
Dari hasil penghitungan dengan program ELSCAT, dengan memasukkan data-data masukan seperti yang telah dibahas pada Tata Kerja, diperoleh keluaran berupa beberapa parameter yang menggambarkan perilaku neutron di dalam bahan moderator. Parameter-parameter tersebut adalah:

- (1) Jumlah rerata tumbukan yang diperlukan neutron sampai mencapai energi akhirnya (Emin)
- (2) Rerata cosinus sudut tumbukan
- (3) Besar sudut tumbukan (derajat)

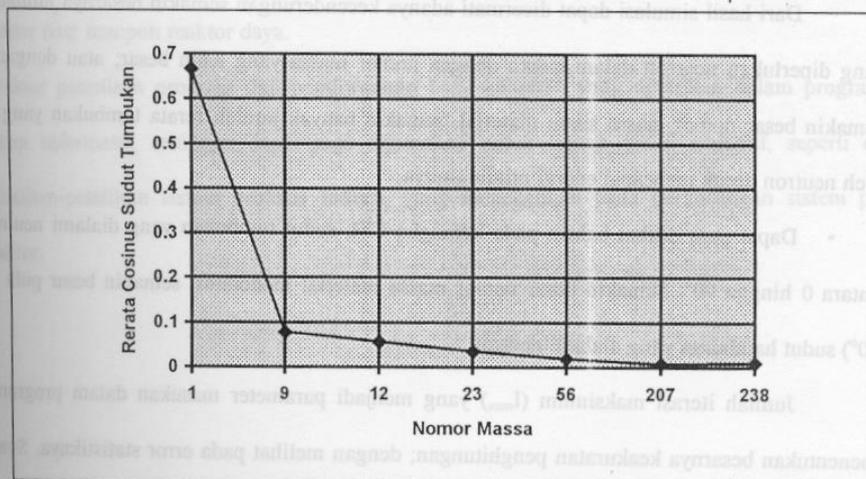
Untuk selanjutnya, hasil-hasil tersebut dirangkumkan pada Tabel 2 berikut dan Gambar 4, Gambar 5 dan Gambar 6, yang masing-masing gambar mengilustrasikan hubungan antara nomor massa bahan moderator dengan ketiga parameter: jumlah rerata tumbukan, rerata cosinus tumbukan dan besar sudut tumbukan.

Tabel 2. Hasil Perhitungan Simulasi ELSCAT

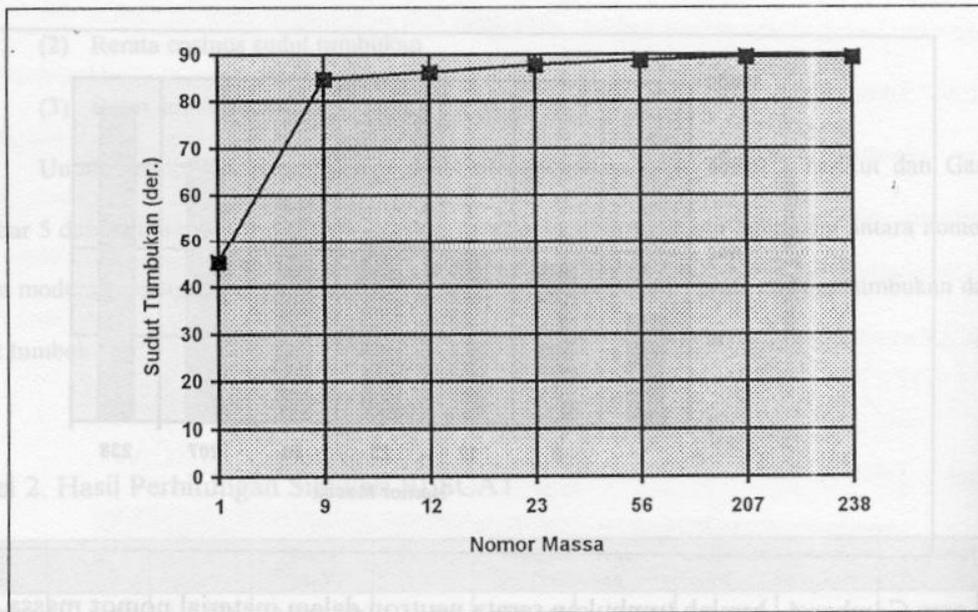
No Massa	α	E_s (MeV)	E_{min} (MeV)	l_{max}	Jumlah Rerata Tumbukan		Rerata Cosinus Sudut Tumbukan		Sudut (der.)	
238.0	0.983	0.044	0.100E-02	10	4555.2	(3.28)	0.0094	(0.0086)	89.38	(0.58)
207.0	0.981	0.600	0.100E-04	10	1147.2	(3.82)	0.0069	(0.0054)	89.49	(0.36)
56.0	0.931	0.850	0.100E-05	15	390.4	(1.95)	0.0190	(0.0075)	88.69	(0.51)
23.0	0.840	2.000	0.100E-05	15	173.3	(1.58)	0.0345	(0.0112)	87.71	(0.75)
12.0	0.716	2.000	0.100E-05	250	92.7	(0.33)	0.0556	(0.0038)	86.21	(0.26)
9.0	0.640	2.000	0.100E-05	100	71.1	(0.49)	0.0773	(0.0068)	84.70	(0.46)
9.0	0.640	2.000	0.100E-05	25	71.4	(0.92)	0.0787	(0.0135)	84.74	(0.91)
1.0	0.000	2.000	0.100E-05	1000	15.7	(0.11)	0.6688	(0.0019)	44.83	(0.16)
1.0	0.000	2.000	0.250E-07	50	19.5	(0.52)	0.6660	(0.0073)	45.22	(0.61)



Gambar 4. Jumlah tumbukan rerata neutron dalam material nomor massa A



Gambar 5. Jumlah rerata cosinus sudut tumbukan neutron dalam material bernomor massa A



Gambar 6. Sudut tumbukan neutron dalam material bernomor massa A

Dari hasil simulasi dapat dicermati adanya kecenderungan semakin besarnya jumlah tumbukan yang diperlukan neutron dalam bahan dengan nomor massa yang lebih besar; atau dengan kata lain, semakin besar nomor massa suatu material, semakin banyak jumlah rerata tumbukan yang diperlukan oleh neutron untuk mencapai energi minimumnya.

- Dapat pula dilihat bahwa pada kerangka CM, sudut tumbukan yang dialami neutron berkisar antara 0 hingga 90°. Semakin besar nomor massa material moderator, semakin besar pula (mendekati 90°) sudut hamburan yang dialami neutron.

Jumlah iterasi maksimum (I_{max}) yang menjadi parameter masukan dalam program ELSCAT menentukan besarnya keakuratan penghitungan; dengan melihat pada error statistiknya. Semakin besar I_{max} yang diberikan, akan semakin kecil error statistik yang ditimbulkan. Namun demikian, perlu ada kajian optimasi lebih lanjut untuk mendapatkan error yang minimal, dengan memberikan I_{max} yang tidak

terlalu besar, karena besarnya I_{\max} jelas akan memberikan *running time* computer yang cukup besar pula. Running time yang cukup besar, kemungkinan tidak terlalu berpengaruh pada pengoperasian program ini pada komputer mainframe; namun apabila program ini dijalankan pada komputer PC, maka running time yang besar akan berdampak pada biaya operasional. Untuk itu suatu telaah lanjutan diperlukan dalam memodifikasi program ini, agar dapat mengoptimasi antara jumlah iterasi yang diperlukan dan juga error statistik yang minimum.

KESIMPULAN

1. Berdasarkan hasil simulasi yang telah diberikan oleh ELSCAT dapat ditentukan beberapa parameter yang menjadi karakteristik transport neutron dalam bahan/material moderator (pelambat laju neutron). Dengan memahami dan mengetahui karakteristik dan perilaku neutron tersebut di dalam bahan moderator, dapat dijadikan sebagai penentu bahan moderasi untuk penghitungan sistem perisai reaktor.
2. Program ELSCAT yang telah dimodifikasi telah dapat dioperasikan secara baik dalam sistem komputer berbasis PC, sehingga dapat digunakan dalam perancangan awal suatu disain perisai reaktor riset maupun reaktor daya.
3. Struktur penulisan program dan pemformatan hasil keluaran yang diberikan dalam program ini cukup informatif, sehingga dapat juga digunakan untuk tujuan-tujuan edukatif, seperti dalam pelatihan-pelatihan sistem proteksi radiasi, yang menekankan pada perancangan sistem perisai reaktor.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bp. Ir. Pudjijanto MS dan Bp. Drs. Ardani yang telah banyak membantu dan memberikan advis dalam penyelesaian penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. WOOD, JAMES, Computational Methods in Reactor Shielding, Pergamon Press Ltd, New York, 1982.
2. LAMARSH, JOHN R. Nuclear Reactor Theory, Addison Wesley Publ. Co, Massachusetts, 1966
3. JAEGER, R.G, BLIZARD, E.P., Engineering Compendium on Radiation Shielding, Vol. 1, Springer-Verlag, New York, New York, 1975