

## PENGEMBANGAN PROGRAM PERISAI RADIASI DENGAN TEORI TRANSPORT METODE MOMEN

Pudjijanto MS.

### ABSTRAK

**PENGEMBANGAN PROGRAM PERISAI RADIASI DENGAN TEORI TRANSPORT METODE MOMEN.** Tampang hamburan dan serapan mikroskopis foton gamma ( $\gamma$ ) Klein-Nishina dapat digunakan untuk melaksanakan perhitungan perisai radiasi dan pemanasan  $\gamma$ . Studi ini dimaksud untuk mengembangkan hargaampang foton  $\gamma$  Klein-Nishina yang selain dapat digunakan untuk melaksanakan perhitungan-perhitungan perisai radiasi "maju lurus ke depan", tetapi dapat juga digunakan dengan teori transport untuk hamburan foton  $\gamma$  baik yang isotropis maupun yang tak isotropis. Dalam merumuskan perhitunganampang foton  $\gamma$  Klein-Nishina ini juga meliputi perumusan untuk menghitungampang-tampang perpindahan tenaga momen nol, satu dua dan tiga untuk hamburan Compton. Tampang-tampang hamburan momen satu, dua dan tiga ini sangat baik digunakan dalam perhitungan efek hamburan tak isotrop dan penentuan faktor bangkit (*built-up factor*) untuk paparan. Tampang serapan tenaga hamburan momen nol dapat digunakan sebagai dasar perhitungan pemanasan  $\gamma$  (*gamma heating*) pada perisai radiasi  $\gamma$  (*gamma shielding*).

### ABSTRACT

**DEVELOPMENT OF RADIATION SHIELDING CODES BY MOMENT METHODES OF TRANSPORT THEORY.** The Klein-Nishina microscopic cross sections of scattering and absorption of gamma photon ( $\gamma$ ) can applied for calculating radiation shielding and  $\gamma$  heating.the paper investigate to develope  $\gamma$  Klein-Nishina cross sections to be applied through transport theory for gamma photon scattering either isotropic or anisotropic besides the stright forward cases. In generating the  $\gamma$  Klein-Nishina cross sections ,it is generated also a formula for calculating the energy transfer of moment zero, one, two and three for the Compton scattering. These moments are very good in calculating the anisotropic scattering effects and build factor for the radiation dose. The energy absorbing of scattering cross sections of zero moment can be used as basis calculations of *gamma heating* on *gamma shielding* .

### PENDAHULUAN

Telah ditemukan oleh Compton bahwa meskipun sinar  $\gamma$  adalah merupakan gelombang elektromagnet, namun ternyata berperilaku juga sebagai partikel yang disebut foton. Fenomena dualisme ini berdasarkan atas sifat interaksinya dengan elektron dengan cara yang dapat dijelaskan oleh adanya momentum dan tenaga yang berhingga besarnya dari masing-masing foton (sebelum dan setelah berinteraksi).

Dalam tahun 1928, Klein dan Nishina menerapkan teori relativistik Dirac dari elektron ke teori hamburan foton- $\gamma$  oleh sebuah elektron bebas yang nisbi diam. Persamaan-persamaan Klein-Nishina untuk hamburan tan-lenting dari foton- $\gamma$  oleh sebuah elektron bebas dipilih untuk perhitungan numerik dariampang hamburan foton- $\gamma$ , karena persamaan-persamaan ini terbukti

sangat baik dan sesuai dengan data hasil percobaan.

Sebagai landasan teori dalam makalah ini akan diberikan perumusanampang foton- $\gamma$  Klein-Nishina, termasuk perumusan untuk menghitungampang-tampang perpindahan tenaga momen nol, satu dua dan tiga untuk hamburan Compton. Tampang-tampang hamburan momen satu, dua dan tiga ini penting digunakan dalam perhitungan efek hamburan tak isotrop dan penentuan faktor bangkit (*built-up factor*) untuk paparan. Tampang serapan tenaga hamburan momen nol dapat digunakan sebagai dasar perhitungan pemanasan- $\gamma$  (*gamma heating*) pada perisai radiasi- $\gamma$  (*gamma shielding*). SCATPX, sebuah program lokal sederhana untuk PC dalam bahasa WATFOR-77 telah berhasil disusun untuk perhitunganampang lintang banyak kelompok. Berdasar pada teori yang dikemukakan, dapat dihitungampang-tampang lintang foton- $\gamma$  untuk maksud dan tujuan sesuai yang dikehendaki.

**TEORI**

Dapat dibuktikan berdasarkan hukum kekekalan momentum dan tenaga bahwa menurut teori hamburan Compton dalam peristiwa tumbukan antara foton- $\gamma$  dan elektron bebas,

$$E'_\gamma = hv' = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{E_e}(1 - \cos\theta)} = \frac{hv}{1 + \frac{hv}{m_e c^2}(1 - \cos\theta)} \rightarrow \varepsilon' = \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon(1-x)} \rightarrow \varepsilon' = \frac{1}{\varepsilon(1 + \varepsilon - \varepsilon x)} \quad (1)$$

di mana :

$$x = \cos\theta \equiv \text{cosinus sudut hambur} \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{E_\gamma}{m_e c^2} \equiv \text{tenaga foton } \gamma \text{ sebelum terhambur} \quad (3)$$

$$\varepsilon' = \frac{E'_\gamma}{m_e c^2} \equiv \text{tenaga foton } \gamma \text{ setelah terhambur} \quad (4)$$

Untuk sudut hambur  $\theta$  yang sangat kecil, tenaga foton- $\gamma$  yang terhambur praktis tidak berubah begitu banyak karena faktor  $(1 - \cos\theta)$  mendekati nol, sehingga penyebut pada persamaan (1) di atas mendekati satu. Kehilangan tenaga yang cukup besar dari foton- $\gamma$  terjadi pada sudut hambur mendekati  $180^\circ$ . Untuk foton- $\gamma$  bertenaga rendah (orde  $\sim 50$  keV), tenaga yang hilang hanya

sebuah foton- $\gamma$  yang tenaga awal-mulanya  $E_\gamma = h\nu$  setelah terhambur oleh sebuah elektron atomis 'bebas' yang nisbi 'diam' dengan sudut simpang hambur sebesar  $\theta$  terhadap arahnya semula, tenaganya akan berubah menurun (lebih rendah) menjadi :

beberapa keV; sementara pada tenaga-tenaga foton- $\gamma$  yang lebih besar (orde  $\sim 1$  MeV), banyak tenaga yang hilang terutama untuk sudut hambur yang besar. Jika hamburannya dianggap lenting sempurna, maka sebagian dari tenaga foton- $\gamma$  yang hilang ini berubah (dikonversi) menjadi tenaga kinetik bagi elektron sasaran tersebut.

**Tampang hamburan foton momen nol (tampang hamburan total) :  $\sigma_{s0}$**

Tampang tumbukan diferensial untuk hamburan foton- $\gamma$  Klein-Nishina dari peristiwa radiasi- $\gamma$  tak terpolarisasi, di samping bergayut pada tenaga foton- $\gamma$  awal mula  $E_\gamma$ , bergayut pula pada sudut hambur  $\theta$  yang diberikan oleh persamaan berikut :

$$\sigma_s(\theta) = \frac{d\sigma_s}{d\Omega(\theta)} = \frac{r_e^2}{2} \left(\frac{E'}{E}\right)^2 \left\{ \frac{E}{E'} + \frac{E'}{E} - \sin^2\theta \right\} = \frac{r_e^2}{2} \left\{ \frac{E'}{E} + \left(\frac{E'}{E}\right)^3 - (1 - \cos^2\theta) \left(\frac{E'}{E}\right)^2 \right\} \quad (5)$$

di mana :

- $\sigma_s(\theta) = \sigma_s\{\Omega(\theta)\} \equiv$  tampang hamburan diferensial, [barn/steradial];
- $d\Omega(\theta) = 2\pi \sin\theta d\theta = -2\pi d\cos\theta \equiv$  diferensial sudut ruang hamburan, [steradial];
- $r_e = q_e^2 / (m_e c^2) = 2,817938 \times 10^{-13}$  cm  $\equiv$  jejari klasik elektron ;
- $q_e = 4,80286 \times 10^{-10}$  e(lektro) s(tatic) u(nit) =  $1,6021 \times 10^{-19}$  coulomb ;  
 $\equiv$  muatan listrik elementer (elektron)
- $m_e = 9,1083 \times 10^{-28}$  gram  $\equiv$  massa rihat elektron ;
- $c = 2,997925 \times 10^{10}$  cm/detik  $\equiv$  cepat rambat cahaya dalam hampa ;
- $m_e c^2 = 0,51100762$  MeV  $\equiv$  tenaga rihat elektron ;

- $E_\gamma = h\nu \equiv$  tenaga foton gamma sebelum menumbuk elektron, [MeV] ;
- $E'_\gamma = h\nu' \equiv$  tenaga foton gamma setelah menumbuk elektron, [MeV] ;
- $\theta \equiv$  sudut hambur foton- $\gamma$  dari arah semula, [radial] ;
- $x = \cos\theta \equiv$  cosinus sudut hambur foton  $\gamma$  dari arah semula, [tandim] ;
- $h = 6,62517 \times 10^{-27}$  erg-detik =  $4,134069 \times 10^{-21}$  MeV-detik  $\equiv$  tetapan alamiah Planck;
- $\nu \equiv$  frekuensi foton gamma sebelum menumbuk elektron, [det<sup>-1</sup>] ;
- $\nu' \equiv$  frekuensi foton gamma setelah menumbuk elektron, [det<sup>-1</sup>] ;

Dapat dibuktikan, bahwa tampang Klein-Nishina dari peristiwa radiasi- $\gamma$  atas seluruh hamburan foton- $\gamma$  total,  $\sigma_s$  untuk hamburan foton- $\gamma$  sudut ruang dapat disajikan sebagai :

$$\sigma_s = 2\pi r_e^2 \left( \frac{\epsilon^3 + 9\epsilon^2 + 8\epsilon + 2}{\epsilon^2(1+2\epsilon)^2} + \frac{\epsilon^2 - 2\epsilon - 2}{2\epsilon^3} \ln(1+2\epsilon) \right) \quad (6)$$

Dengan memperkenalkan tetapan tampang hamburan Thomson  $\sigma_{Th}$  berikut ini,

$$\sigma_m = \frac{8}{3}\pi r_e^2 = 0,66516 \text{ barn}; 1\text{barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2 \quad (7)$$

maka  $\sigma_s$  dapat disajikan sebagai :

$$\sigma_{s0} = \frac{3}{4}\sigma_{Th} \left( \frac{\epsilon^3 + 9\epsilon^2 + 8\epsilon + 2}{\epsilon^2(1+2\epsilon)^2} + \frac{\epsilon^2 - 2\epsilon - 2}{2\epsilon^3} \ln(1+2\epsilon) \right) \quad (8)$$

Untuk tenaga foton  $\gamma$  yang cukup besar,  $E_\gamma \rightarrow \infty$ , atau  $\epsilon \rightarrow \infty$ , maka  $\sigma_{s0}$  menjadi :

$$\lim_{\epsilon \rightarrow \infty} \sigma_{s0} = \frac{3}{4}\sigma_{Th} \left( \frac{1}{2\epsilon} \right) \cdot \left( \frac{1}{2} + \ln(2\epsilon) \right) \quad (9)$$

**Tampang hamburan foton momen satu (tampang transport) :  $\sigma_{s1}$**

Tampang hamburan diferensial foton- $\gamma$  momen satu atau disebut tampang transport foton- $\gamma$  digunakan untuk menyajikan efek hamburan foton- $\gamma$  tak isotrop dalam arah maju lurus ke depan.

Tampang transport ini diterapkan terutama untuk perhitungan perisai radiasi- $\gamma$ . Dengan menggunakan polinomial Legendre orde pertama,  $P_1(\cos\theta) = \cos\theta$ , maka tampang hamburan total momen pertama  $\sigma_{s1}$  atas seluruh sudut ruang diberikan sebagai:

$$\sigma_{s1} = \frac{3}{4}\sigma_{Th} \left( \frac{-3\epsilon^4 + 8\epsilon^3 + 23\epsilon^2 + 15\epsilon + 3}{\epsilon^3(1+2\epsilon)^2} + \frac{\epsilon^3 - \epsilon^2 - 6\epsilon - 3}{2\epsilon^4} \ln(1+2\epsilon) \right) \quad (10)$$

**Tampang hamburan foton momen dua :  $\sigma_{s2}$**

Dengan menggunakan polinomial Legendre orde dua,  $P_2(\cos\theta) = \frac{1}{2} \cdot (3 \cos^2\theta - 1)$ , maka

tampang hamburan momen ke-dua  $\sigma_{s2}$  atas seluruh sudut ruang dapat dirumuskan sbb. :

$$\sigma_{s2} = \frac{3}{4}\sigma_{Th} \left( \frac{\dots\epsilon^5 + \dots\epsilon^4 + \dots\epsilon^3 + \dots\epsilon^2 + \dots\epsilon + \dots}{\epsilon^4(1+2\epsilon)^2} + \frac{\dots\epsilon^4 + \dots\epsilon^3 + \dots\epsilon^2 + \dots\epsilon + \dots \ln(1+2\epsilon)}{2\epsilon^5} \right) \quad (11)$$

**Tampang hamburan foton momen tiga :  $\sigma_{s3}$**

Dengan menggunakan polinomial Legendre orde tiga,  $P_3(\cos\theta) = \frac{1}{2} \cdot (5 \cos^3\theta - 3 \cos\theta)$ , maka

tampang hamburan total momen ke-tiga  $\sigma_{s3}$  atas seluruh sudut ruang diberikan oleh :

$$\sigma_{s3} = \frac{3}{4}\sigma_{Th} \left( \frac{\dots\epsilon^6 + \dots\epsilon^5 + \dots\epsilon^4 + \dots\epsilon^3 + \dots\epsilon^2 + \dots\epsilon + \dots}{\epsilon^5(1+2\epsilon)^2} + \frac{\dots\epsilon^5 + \dots\epsilon^4 + \dots\epsilon^3 + \dots\epsilon^2 + \dots\epsilon + \dots \ln(1+2\epsilon)}{2\epsilon^6} \right) \quad (12)$$

di mana dalam persamaan (11) dan (12), (...) adalah konstanta yang secara teori analitis dapat ditentukan harganya.

merupakan hasil kali dari tampang hamburan foton diferensial,  $d\sigma_{s0}$  dan nilai banding antara tenaga foton- $\gamma$  terhambur dan tenaga awal mula,  $(E_\gamma' / E_\gamma) = (h \nu') / (h \nu) = (\epsilon' / \epsilon)$ . Dapat dibuktikan, bahwa tampang hamburan tenaga total momen ke-nol,  $\sigma_{se0}$ , yang diperoleh dari integrasi atas seluruh sudut ruang adalah :

**Tampang hamburan tenaga momen nol (tampang hamburan energi total) :  $\sigma_{se0}$**

Tampang hamburan diferensial untuk perpindahan tenaga momen nol,  $d\sigma_{\epsilon\epsilon'0}$ , adalah

$$\sigma_{se0} = \frac{3}{4} \sigma_{th} \left( \frac{\frac{16}{3} \varepsilon^4 + 2\varepsilon^3 - 6\varepsilon^2 - 5\varepsilon - 1}{\varepsilon^2(1+2\varepsilon)^3} + \frac{1}{2\varepsilon^3} \ln(1+2\varepsilon) \right) \quad (13)$$

Untuk tenaga foton- $\gamma$  cukup besar,  $E_\gamma \rightarrow \infty$ , atau  $\varepsilon \rightarrow \infty$ , maka  $\sigma_{se0}$  bisa didekati sbb. :

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow \infty} \sigma_{se0} \approx \frac{3}{4} \sigma_{th} \left( \frac{1}{2\varepsilon} \right) \cdot \left( \frac{4}{3} + \frac{2}{3\varepsilon^2} \right) \quad (14)$$

**Tampang serapan tenaga tenaga hamburan Compton :  $\sigma_{ca}$**

Karena batasan bahwa kebolehhadjan total tenaga foton- $\gamma$  yang terhambur dan yang terserap adalah merupakan jumlah dari kebolehhadjan tenaga yang terhambur ditambah dengan

kebolehhadjan tenaga yang terserap, maka tampang serapan tenaga hamburan Compton,  $\sigma_{a0}$ , dapat dirumuskan sebagai selisih dari tampang hamburan foton total,  $\sigma_{s0}$ , dan tampang hamburan tenaga,  $\sigma_{se0}$ , yaitu :

$$\sigma_{a0} = \sigma_{s0} - \sigma_{se0} = \frac{3}{4} \sigma_{th} \left( \frac{\frac{10}{3} \varepsilon^4 + 17\varepsilon^3 + 31\varepsilon^2 + 17\varepsilon + 3}{\varepsilon^2(1+2\varepsilon)^3} + \frac{\varepsilon^2 - 2\varepsilon - 3}{2\varepsilon^3} \ln(1+2\varepsilon) \right) \quad (15)$$

Untuk tenaga foton- $\gamma$  cukup besar,  $E_\gamma \rightarrow \infty$ , atau  $\varepsilon \rightarrow \infty$ , maka  $\sigma_{a0}$  bisa didekati sbb. :

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow \infty} \sigma_{a0} \approx \frac{3}{4} \sigma_{th} \left( \frac{1}{2\varepsilon} \right) \cdot \left( -\frac{5}{6} + \ln(2\varepsilon) \right) \quad (16)$$

Pada tenaga rendah, tampang serapan tenaga ini lebih kecil daripada tampang hamburan tenaganya ( $\sigma_{a0} < \sigma_{se0}$  untuk  $E_\gamma < 1,685$  MeV) dan sebaliknya pada tenaga tinggi, tampang serapan tenaga ini lebih besar daripada tampang hamburan tenaganya ( $\sigma_{a0} > \sigma_{se0}$  untuk  $E_\gamma > 1,685$  MeV). Titik potong antara liku tampang serapan dan hamburan tenaga sebagai fungsi tenaga foton- $\gamma$  dipenuhi untuk keadaan di mana  $\sigma_{a0} = \sigma_{se0}$ , atau  $\Delta\sigma_{sa} = \sigma_{se0} - \sigma_{a0} = 0$ . Perhitungan coba-coba (*trial and error*) secara iteratif, diperoleh nilai terbaik untuk  $\varepsilon = 3,0586597$  dan  $E_e = m_e c^2 = 0,51100762$  MeV  $\rightarrow E_\gamma = 1,6853448$  MeV.

**Tampang hamburan tenaga foton momen satu (tampang transport tenaga) :  $\sigma_{se1}$**

Tampang hamburan tenaga diferensial foton- $\gamma$  momen satu atau disebut tampang transport tenaga foton- $\gamma$  digunakan untuk menyajikan efek hamburan tenaga foton- $\gamma$  tak isotrop dalam arah maju lurus ke depan. Tampang transport ini diterapkan terutama untuk perhitungan pemanasan radiasi- $\gamma$  (*gamma heating*). Dengan menggunakan polinomial Legendre orde pertama,  $P_1(\cos\theta) = \cos\theta$ , maka tampang hamburan total momen pertama atas seluruh sudut ruang,  $\sigma_{se1}$ , dapat diperoleh sebagai :

$$\sigma_{se1} = \frac{3}{4} \sigma_{th} \left( \frac{16\varepsilon^5 + 16\varepsilon^4 - 69\varepsilon^3 - 108\varepsilon^2 - 54\varepsilon - 9}{3\varepsilon^3(1+2\varepsilon)^3} + \frac{-\varepsilon^2 + 3\varepsilon + 3}{2\varepsilon^4} \ln(1+2\varepsilon) \right) \quad (17)$$

**Tampang hamburan tenaga momen dua :  $\sigma_{se2}$**

Dengan menggunakan polinomial Legendre orde dua,  $P_2(\cos\theta) = \frac{1}{2} \cdot (3 \cos^2\theta - 1)$ , maka

tampang hamburan tenaga total momen ke-dua atas seluruh sudut ruang,  $\sigma_{se2}$ , diberikan oleh :

$$\sigma_{se2} = \frac{3}{4} \sigma_{th} \left( \frac{16\varepsilon^6 + 72\varepsilon^5 - 129\varepsilon^4 - 501\varepsilon^3 - 480\varepsilon^2 - 189\varepsilon - 27}{3\varepsilon^4(1+2\varepsilon)^3} - \frac{3\varepsilon^3 - 4\varepsilon^2 - 18\varepsilon - 9}{2\varepsilon^5} \ln(1+2\varepsilon) \right) \quad (18)$$

**Tampang hamburan tenaga foton momen tiga :  $\sigma_{se3}$**

Dengan menggunakan polinomial Legendre orde tiga,  $P_3(\cos\theta) = \frac{1}{2} \cdot (5 \cos^3\theta - 3 \cos\theta)$ , maka

tampang hamburan tenaga total momen ke-3 atas seluruh sudut ruang,  $\sigma_{se3}$ , adalah :

$$\sigma_{\text{sc3}} = \frac{3}{4} \sigma_{\text{th}} \left( \frac{16\varepsilon^7 + 186\varepsilon^6 - 44\varepsilon^5 - 1508\varepsilon^4 - 2586\varepsilon^3 - 1834\varepsilon^2 - 600\varepsilon - 75}{3\varepsilon^5(1+2\varepsilon)^3} - \frac{6\varepsilon^4 + 2\varepsilon^3 - 53\varepsilon^2 - 75\varepsilon - 25}{2\varepsilon^6} \ln(1+2\varepsilon) \right) \quad (19)$$

**PERHITUNGAN DAN PEMBAHASAN**

Meskipun disiplin Litbang Iptek ini termasuk bidang fisika teori, tetapi bersifat praktis aplikatif karena hasilnya banyak diterapkan dalam praktek dan teknologi. Penyajian makalah ini dimaksud untuk memperkenalkan beberapa formulasi matematik baru mengenaiampang hamburan danampang hamburan energi foton- $\gamma$  momen tinggi berhingga secara analitis. Sebagian besar dari rumusan analitis yang disajikan di sini jarang atau

mungkin belum pernah dikemukakan penulis lain, setidaknya penulis belum sempat menemukan dalam literatur lain kecuali secara numeris. Tujuan penelitian ini adalah agar para pengguna tidak selalu bergantung pada tabelampang-tampang interaksi foton- $\gamma$  yang banyak dijumpai di berbagai literatur mengenai perisai radiasi.

Hasil perhitunganampang lintang mikroskopis berdasar metode momen dengan program SCATPX diberikan pada Tabel 1.



Tabel 1. Tampang hamburan foton gamma momen banyak multi energi dari hasil perhitungan dengan program SCATPX.

Tampang hamburan foton gamma tipe 0, momen 0 s.d. 9											
I	E, (MeV)	SGMS0	SGMS1	SGMS2	SGMS3	SGMS4	SGMS5	SGMS6	SGMS7	SGMS8	SGMS9
1	1.00E-02	6.3706E-01	6.1506E-03	4.7817E+01	-5.1078E+03	-2.1177E+02	6.6152E+04	-2.3197E+10	-3.6756E+12	-1.1028E+15	-3.9901E+16
2	2.50E-02	6.0756E-01	2.1291E-02	6.7200E-01	-3.9942E+01	3.3475E+03	-6.4164E+04	-1.1340E+07	4.4950E+08	-2.0005E+10	1.6246E+12
3	3.75E-02	5.8324E-01	2.8359E-02	2.1536E-02	-4.9874E+00	-1.3984E+02	4.8789E+01	-2.3377E+05	-1.7505E+07	-2.0732E+08	-6.0780E+09
4	5.75E-02	5.4940E-01	4.1909E-02	6.2207E-02	-2.5107E-02	-8.9871E+00	-1.2503E+02	5.3286E+01	5.7295E+04	-4.9664E+06	-5.0295E+07
5	8.50E-02	5.1077E-01	5.3189E-02	5.5480E-02	4.5360E-02	-5.1422E-01	-4.6104E-01	-4.5828E+02	8.2324E+00	1.3149E+05	-2.6727E+06
6	1.25E-01	4.6625E-01	6.4459E-02	5.2672E-02	-3.7520E-04	5.5810E-02	-2.0175E+00	2.8141E+00	6.0684E+01	7.2322E+02	1.4608E+04
7	2.25E-01	3.9101E-01	7.8222E-02	5.0644E-02	1.2666E-02	1.9885E-04	-3.5487E-02	3.2153E-01	5.2762E-01	5.1613E+01	-3.3798E+02
8	3.75E-01	3.2478E-01	8.3612E-02	4.8829E-02	1.6364E-02	4.6004E-03	2.2722E-03	4.1179E-03	6.3159E-02	-2.1323E-01	1.1868E+00
9	5.75E-01	2.7245E-01	8.2825E-02	4.6826E-02	1.9206E-02	7.0866E-03	2.6867E-03	1.7359E-03	-3.0332E-04	6.5802E-03	-7.4544E-01
10	8.50E-01	2.2835E-01	7.8588E-02	4.4282E-02	2.1009E-02	9.2610E-03	3.9156E-03	1.5609E-03	2.6263E-03	3.5371E-03	3.1197E-02
11	1.25E+00	1.8880E-01	7.2073E-02	4.1082E-02	2.1789E-02	1.1090E-02	5.4982E-03	2.7023E-03	1.0001E-03	1.8308E-03	1.4823E-02
12	1.75E+00	1.5774E-01	6.5195E-02	3.7840E-02	2.1646E-02	1.2166E-02	6.7318E-03	3.6206E-03	1.9955E-03	1.1485E-03	-4.2624E-04
13	2.25E+00	1.3674E-01	5.9659E-02	3.5224E-02	2.1101E-02	1.2602E-02	7.4699E-03	4.3875E-03	2.5276E-03	1.7940E-03	2.7137E-04
14	2.75E+00	1.2136E-01	5.5133E-02	3.3057E-02	2.0442E-02	1.2726E-02	7.9076E-03	4.8813E-03	3.0183E-03	1.8644E-03	1.5739E-03
15	3.50E+00	1.0452E-01	4.9698E-02	3.0401E-02	1.9443E-02	1.2633E-02	8.2452E-03	5.3770E-03	3.5102E-03	2.3273E-03	8.0316E-04
16	5.00E+00	8.2856E-02	4.1910E-02	2.6459E-02	1.7662E-02	1.2089E-02	8.3713E-03	5.8281E-03	4.0587E-03	2.8369E-03	1.9995E-03
17	7.00E+00	6.5797E-02	3.5079E-02	2.2834E-02	1.5786E-02	1.1244E-02	8.1391E-03	5.9445E-03	4.3590E-03	3.2188E-03	2.2156E-03
18	9.50E+00	5.2921E-02	2.9461E-02	1.9711E-02	1.4019E-02	1.0295E-02	7.7029E-03	5.8287E-03	4.4325E-03	3.3975E-03	2.6037E-03
Tampang hamburan foton gamma tipe 1, momen 0 s.d. 9											
I	E, (MeV)	SGMS0	SGMS1	SGMS2	SGMS3	SGMS4	SGMS5	SGMS6	SGMS7	SGMS8	SGMS9
1	1.00E-02	6.2716E-01	8.8377E-03	-7.5659E+00	1.2770E+04	1.7988E+02	2.6354E+08	-1.8888E+06	1.1028E+13	-2.6917E+10	2.6653E+17
2	2.50E-02	5.7981E-01	2.7503E-02	-6.3092E-01	-1.9918E+01	4.4759E+03	-1.2854E+05	1.5084E+07	4.5052E+08	2.6818E+10	8.1367E+11
3	3.75E-02	5.4627E-01	4.6238E-02	2.7003E-02	2.4542E+00	2.0912E+02	-3.2317E+01	2.3420E+05	1.4033E+07	-2.7586E+06	1.2475E+10
4	5.75E-02	4.9973E-01	5.8543E-02	5.3038E-02	4.2506E-02	-4.5982E+00	2.5035E+02	-1.1036E+04	-2.8760E+03	3.3462E+06	-1.9849E+08
5	8.50E-02	4.4816E-01	7.1731E-02	5.1803E-02	-4.1219E-02	6.5556E-02	4.5463E-01	-4.6343E+02	1.0297E+04	5.5976E+04	-1.0149E+05
6	1.25E-01	3.9114E-01	8.4036E-02	5.0666E-02	1.5057E-02	6.2076E-02	-1.6580E+00	6.4995E+00	-3.2171E+02	1.5335E+03	1.1224E+03
7	2.25E-01	3.0054E-01	9.5065E-02	4.9710E-02	1.6018E-02	1.2690E-03	2.5957E-02	4.5516E-02	4.0194E-02	-1.2950E+01	3.7798E+02
8	3.75E-01	2.2717E-01	9.4156E-02	4.9201E-02	2.0069E-02	7.1162E-03	1.2550E-03	5.5386E-04	-4.3138E-02	-1.6477E-01	4.1124E+00
9	5.75E-01	1.7399E-01	8.6480E-02	4.7601E-02	2.2824E-02	9.8732E-03	3.8984E-03	6.3611E-04	-2.4796E-04	-7.4010E-03	-2.2415E-01
10	8.50E-01	1.3307E-01	7.5790E-02	4.4627E-02	2.4199E-02	1.2237E-02	5.8773E-03	2.7256E-03	1.4977E-03	2.8844E-03	-1.2577E-02
11	1.25E+00	9.9954E-02	6.3634E-02	4.0300E-02	2.4210E-02	1.3875E-02	7.6556E-03	4.0809E-03	2.1835E-03	1.5922E-03	-3.1724E-03
12	1.75E+00	7.6603E-02	5.2912E-02	3.5686E-02	2.3154E-02	1.4525E-02	8.8612E-03	5.2826E-03	3.0837E-03	1.7040E-03	1.1831E-03
13	2.25E+00	6.2230E-02	4.5308E-02	3.1957E-02	2.1821E-02	1.4505E-02	9.4296E-03	6.0154E-03	3.7842E-03	2.3414E-03	1.2810E-03
14	2.75E+00	5.2451E-02	3.9646E-02	2.8926E-02	2.0501E-02	1.4201E-02	9.6543E-03	6.4605E-03	4.2638E-03	2.7735E-03	1.7361E-03
15	3.50E+00	4.2484E-02	3.3426E-02	2.5334E-02	1.8706E-02	1.3546E-02	9.6589E-03	6.7981E-03	4.7318E-03	3.2598E-03	2.2981E-03
16	5.00E+00	3.0823E-02	2.5505E-02	2.0331E-02	1.5838E-02	1.2142E-02	9.1955E-03	6.8943E-03	5.1246E-03	3.7768E-03	2.7536E-03
17	7.00E+00	2.2586E-02	1.9431E-02	1.6141E-02	1.3132E-02	1.0537E-02	8.3685E-03	6.5918E-03	5.1569E-03	4.0123E-03	3.1069E-03
18	9.50E+00	1.6939E-02	1.5003E-02	1.2869E-02	1.0833E-02	9.0059E-03	7.4194E-03	6.0693E-03	4.9364E-03	3.9951E-03	3.2190E-03





## KESIMPULAN DAN SARAN

Dengan diperolehnya rumusan-rumusan analitis untuk tampang mikroskopis hamburan foton- $\gamma$  per elektron momen 0, 1, 2 dan 3 dan tampang serapan energi hamburan foton- $\gamma$  per elektron momen 0, 1, 2 dan 3 sebagai fungsi energi awal (tunggal) foton- $\gamma$ , maka :

- Dapat digunakan untuk menentukan secara langsung tampang mikro dan makroskopis hamburan foton- $\gamma$  per atom momen 0, 1, 2 dan 3 dan tampang serapan energi hamburan foton- $\gamma$  per atom momen 0, 1, 2 dan 3 dari berbagai unsur dengan nomor atom dari  $Z = 1$  hingga 100 tanpa harus bergantung lagi pada tabel data dari literatur.
- Tampang hamburan momen 0 digunakan untuk menaksir kebolehdjian sebuah foton- $\gamma$  akan terhambur, sedangkan tampang hamburan momen 1 (transport foton) digunakan untuk

menaksir kebolehdjian sebuah foton- $\gamma$  akan terhambur maju kedepan pada energi yang diberikan. Ini sering diterapkan pada perhitungan perisai radiasi- $\gamma$  (*gamma shielding*).

- Tampang hamburan energi momen 0 digunakan untuk menaksir kebolehdjian energi yang dikandung oleh sebuah foton- $\gamma$  akan terhambur, sedangkan tampang hamburan energi momen 1 (transport energi) digunakan untuk menaksir kebolehdjian energi yang dimiliki foton- $\gamma$  tersebut akan terhambur maju kedepan pada energi yang diberikan. Ini sering diterapkan pada perhitungan pemanasan - $\gamma$  (*gamma heating*).

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. J. BERGER and J. H. HUBBELL, "XCOM (Web Version 1.2): *Photon Cross Section Data Base*", *National Institute of Standards and technology (NIST)*, Gathersburg, MD 20899, (August 1999). Originally published as NBSIR 87-3597, "*Photon Cross Section on a Personal Computer*", (July 1987).
- [2] J. H. HUBBELL and M. J. BERGER, Section 4.1 and 4.2 in R. G. JAEGER (ed) et al: "*Engineering Compendium on Radiation Shielding* (IAEA, Vienna), Vol. I, Ch. 4, pp. 167-202, Spriner, Berlin (1968).
- [3] JAMES WOOD, "*Computational Methods in Reactor Shielding*", Pergamon Press Ltd., Headington Hill Hail, Cixford OX30BW, England (1982).

LAMPIRAN:

```

PROGRAM SCATPX
C * * ===== * * C
C * * SCATPX adalah program sederhana untuk menentukan tampang lintang
C mikroskopis hamburan foton-G (gamma) dan hamburan energi foton-G
C momen banyak; SS0,SS1, ..., SSn dan SE0, SE1, ... SEn
C Dirancang oleh: Ki Pudjijanto, 29 Pebruari 2000
*-----*
PARAMETER (NGRUP=18,MOMAX=9)
DIMENSION EGRID(0:NGRUP), EMEAN(NGRUP), EPS(NGRUP)
>, XGM(0:1,0:MOMAX), SGM(0:1,0:MOMAX)
C PARAMETER (MOMAX=7)
C DIMENSION EGRID(0:18), EMEAN(18), EPS(18)
C >, XGM(0:1,0:MOMAX), SGM(0:1,0:MOMAX)
REAL MEC2
COMMON /ANB/ A,B
CHARACTER FILEOU*40, YORN*1
DATA EGRID/ 0.0,2.00E-02,3.00E-02,4.50E-02,7.00E-02,1.00E-01
>,1.50E-01,3.00E-01,4.50E-01,7.00E-01,1.00E+00,1.50E+00,2.00E+00
>,2.50E+00,3.00E+00,4.00E+00,6.00E+00,8.00E+00,1.10E+01/
DATA MEC2/0.51100762/, STHOM/0.66516/
C----*
IOU=6
PRINT*, ' HAMBURAN FOTON GAMMA DAN ENERGI GAMMA MOMEN BANYAK'
PRINT*
250 WRITE(*,540)
READ(*,FMT='(A30)') FILEOU
OPEN(UNIT=IOU,ERR=370,FILE=FILEOU,STATUS='NEW')
C
C * * IO=0 --> hamburan foton-G; IO=1 --> hamburan energi foton-G.
C ~~~~~
260 DO 300 IO=0,1
I1=IO+1
I2=I1+1
I3=I2+1
C I4=I2
WRITE(IOU,600) IO,MOMAX
C
C * * I=1,2, ..., IGRID --> Nomor aras
C ~~~~~
DO 200 I=1,18
IF (IO .EQ. 0) THEN
EMEAN(I)=(EGRID(I)+EGRID(I-1))/2.
EPS(I)=EMEAN(I)/MEC2
ENDIF
A=-EPS(I)
B=1.+EPS(I)
C
C * * MO=0,1, ...MOMAX, --> Momen hamburan
C ~~~~~
DO 100 MO=0,MOMAX
MOP2=MO+2
Y1=(F(+1.,MO,I1)-F(-1.,MO,I1))/2.
Y2=(F(+1.,MO,I2)-F(-1.,MO,I2))/2.
Y3=(F(+1.,MO,I3)-F(-1.,MO,I3))/2.
Y4=(F(+1.,MOP2,I2)-F(-1.,MOP2,I2))/2.
100 XGM(IO,MO)=Y1-Y2+Y3+Y4
SGM(IO,0)=.75*STHOM*XGM(IO,0)
SGM(IO,1)=.75*STHOM*XGM(IO,1)
SGM(IO,2)=.75*STHOM*(3.*XGM(IO,2)- XGM(IO,0))/2.

```



```

Y=A*X+B
C X=(Y-B)/A
C DX=DY/A
F=0.
MFACT=IFACT(M)
DO 10 I=0,M
MMI=M-I
MMIN=MMI-N
IF (MMIN .EQ. -1) THEN
YSTAR=ALOG(Y)
ELSE
MMINP1=MMIN+1
FMINP1=FLOAT(MMINP1)
YSTAR=Y**MMINP1/FMINP1
ENDIF
KOE=MFACT/IFACT(I)/IFACT(MMI)
COEF=FLOAT(KOE)
SUKU=COEF*YSTAR*(-B)**I
10 F=F+SUKU
F=F/A**(M+1)
RETURN
END
C
FUNCTION IFACT(K)
C =====
C * * IFACT(K) adalah sebuah fungsi untuk menentukan harga faktorial
C atau nilai fakultas dari bilangan bulat positif k;
C IFACT(K) = K! = 1*2*3* ... (k-2)*(k-1)*K
C ~~~~~
IFACT=1
IF (K .EQ. 0 .OR. K .EQ. 1) GO TO 20
DO 10 L=2,K
10 IFACT=IFACT*L
20 RETURN
END
*-----*
```