

MONTERAY MARK-I  
PROGRAM KOMPUTER (VERSI PC) UNTUK PERHITUNGAN PERISAI  
RADIASI PLANAR (PAPAN DATAR) DENGAN METODE MONTE CARLO

Pudjianto MS.  
Yus R. Akhmad

**ABSTRAK**

**MONTERAY MARK-I : PROGRAM KOMPUTER (VERSI PC) UNTUK PERHITUNGAN PERISAI RADIASI PLANAR (PAPAN DATAR) DENGAN METODE MONTE CARLO.** Telah disusun program komputer versi PC untuk perhitungan perisai radiasi gamma papan datar dengan metode Monte Carlo. *Deck source* program ini ditulis dalam bahasa WATFOR77. Program MONTERAY MARK-I semula dirancang oleh James Wood. Untuk memudahkan pemakai, program ini telah dimodifikasi oleh penulis sehingga program bersifat interaktif yang sangat memudahkan dalam menginputkan data dan mengeksekusi program. Program ini menerapkan metode 'Monte Carlo' untuk mengamati perjalanan foton gamma dengan cara mensimulasi transmisi dan refleksi sinar gamma pada sebuah perisai papan datar tak berhingga luas dan tebal bervariasi. Riwayat atau sejarah hidup foton diikuti / diamati sampai foton tersebut lepas (lolos) dari sistem atau mengalami hamburan berikutnya; atau akibat adanya tumbukan beruntun, tenaganya jatuh / merosot hingga di bawah harga minimum yang ditentukan. Dalam program ini, proses terbentuknya pasangan ion diperlakukan sebagai suatu interaksi yang bersifat sebagai serapan murni dan sumbangan dari sinar-sinar gamma anihilasi yang dihasilkan tidak dipertimbangkan. Besaran-besaran utama yang dihitung dan dikeluarkan oleh program ini adalah albedo total, faktor bangkit, dan spektra arus foton. Hasil perhitungan faktor bangkit untuk sumber gamma sejajar pada energi 6 MeV baik untuk Pb maupun air hampir sesuai dengan nilai yang tertera pada berbagai literatur. Hal ini mengindikasikan bahwa program boleh dikatakan cukup baik sebagai perangkat bantu dalam merancang perisai radiasi gamma.

**ABSTRACT**

**MONTERAY MARK-I: COMPUTER PROGRAM (PC-VERSION) FOR SHIELDING CALCULATION WITH MONTE CARLO METHOD.** A computer program for gamma ray shielding calculation using Monte Carlo method has been developed. The program is written in WATFOR77 language. The MONTERAY MARK-I is originally developed by James Wood. The program was modified by the authors that the modified version is easily executed. Applying Monte Carlo method the program observe photon gamma transport in an infinity planar shielding with various thick. A photon gamma is observed till escape from the shielding or when its energy less than the cut off energy. Pair production process is treated as pure absorption process that annihilation photons generated in the process are neglected in the calculation. The output data calculated by the program are total albedo, build-up factor, and photon spectra. The calculation results for build-up factor of a slab lead and water media with 6 MeV parallel beam gamma source shows that they are in agreement with published data. Hence the program is adequate as a shielding design tool for observing gamma radiation transport in various media.

**PENDAHULUAN**

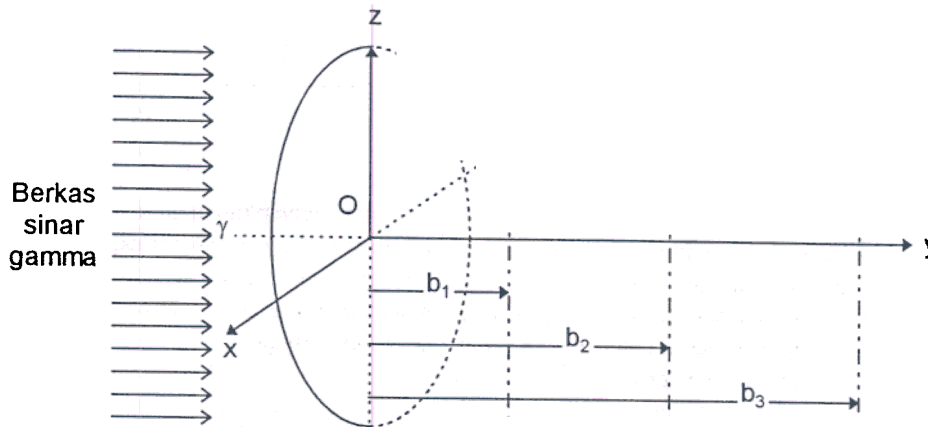
Metode Monte Carlo merupakan teknik yang andal untuk menganalisis secara detil mengenai interaksi foton gama di suatu media<sup>1,2,3</sup>). Dalam rangka penguasaan teknik ini telah dilakukan modifikasi program perhitungan perisai gama MONTERAY MARK-I sehingga bersifat interaktif dan lebih mudah dieksekusi oleh pemakai sebagai bekal awal untuk pengembangan lebih lanjut. Program ini semula

disusun oleh J. Wood<sup>4)</sup> untuk keperluan pelatihan dalam merancang perhitungan perisai radiasi gama dan bersifat fleksibel untuk dikembangkan lebih lanjut. Dalam makalah ini disajikan secara garis besar prinsip fisika -matematika yang diadopsi dan contoh perhitungannya sehingga dapat ditelusuri sejauh mana membantu pemakai dalam menganalisis permasalahan transport gama yang dihadapi.

## PROGRAM MONTERAY MARK-I

MONTERAY MARK-I adalah sebuah program komputer sederhana yang ditulis dalam bahasa Fortran yang dapat digunakan untuk menyelesaikan masalah pemantulan dan

penerobosan sinar gamma dari sebuah sumber gamma yang mengenai secara seragam pada sisi permukaan sebelah kiri suatu bahan perisai homogen berbentuk papan datar dengan luas tak berhingga dan tebal bervariasi. Ilustrasi model fisik disajikan pada Gambar 1.



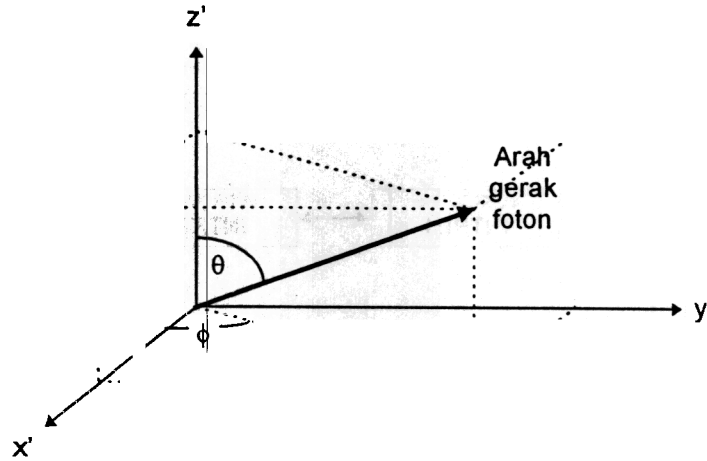
Gambar 1 Geometri sumber radiasi gamma dan perisai papan datar homogen yang diperhitungkan oleh program MONTERAY MARK-I. Sejumlah lapisan perisai papan datar yang ketebalannya bervariasi dapat diselesaikan secara serentak oleh program ini.

Metode yang digunakan dalam MONTERAY MARK-I adalah teknik Monte Carlo, di mana riwayat atau sejarah hidup sejumlah besar foton atau foton diikuti / diamati. Untuk memperoleh efisiensi perhitungan, setiap kejadian serapan foton oleh media dihindari. Tetapi untuk menghindari pendekatan itu akan menyebabkan tidak representatif, maka digunakan konsep bobot yang mengontrol bahwa interaksi yang perlu diikuti adalah semua hamburan Compton. Setiap foton yang dikeluarkan oleh sumber diberi bobot sama dengan satu. Efek serapan diperhitungkan dengan memodifikasi bobot foton setelah setiap kali tumbukan dengan menggunakan teknik reduksi varian; yaitu bobot foton setelah terjadi tumbukan adalah sama dengan bobot sebelum terjadi tumbukan dikalikan dengan nilai banding bertahan hidup,  $R = \mu_c(E)/\mu_{tot}(E)$ , yang berarti adalah kebolehjadian bahwa suatu tumbukan

akan merupakan hamburan Compton. Di sini peristiwa pasangan ion diperlakukan sebagai interaksi serapan murni sehingga sumbangan sinar gamma anihilasi yang dihasilkan tidak diperhitungkan.

Dalam versi MONTERAY MARK I, riwayat tiap foton selalu diikuti sampai foton tersebut lolos dari sistem atau tenaganya merosot hingga di bawah harga minimum yang ditetapkan. Pada semua kasus di atas, setiap foton keluar dari sistem atau jatuh di bawah  $E_{min}$ , suatu foton 'baru' dimulai lagi dengan berbobot awal senilai 1 satuan.

Letak atau kedudukan dan arah sebuah foton ditentukan oleh 4 (empat) peubah, yaitu ( $y$ ,  $z$ ,  $\theta$ , dan  $\phi$ ), yang diacu pada sistem koordinat seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 1 dan Gambar 2.



Gambar 2. Peubah-peubah sudut ( $\theta$ ,  $\phi$ ) digunakan untuk menentukan arah foton. Sumbu-sumbu tegak ( $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$ ) adalah sejajar dengan sistem koordinat Cartesian ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1 di atas.

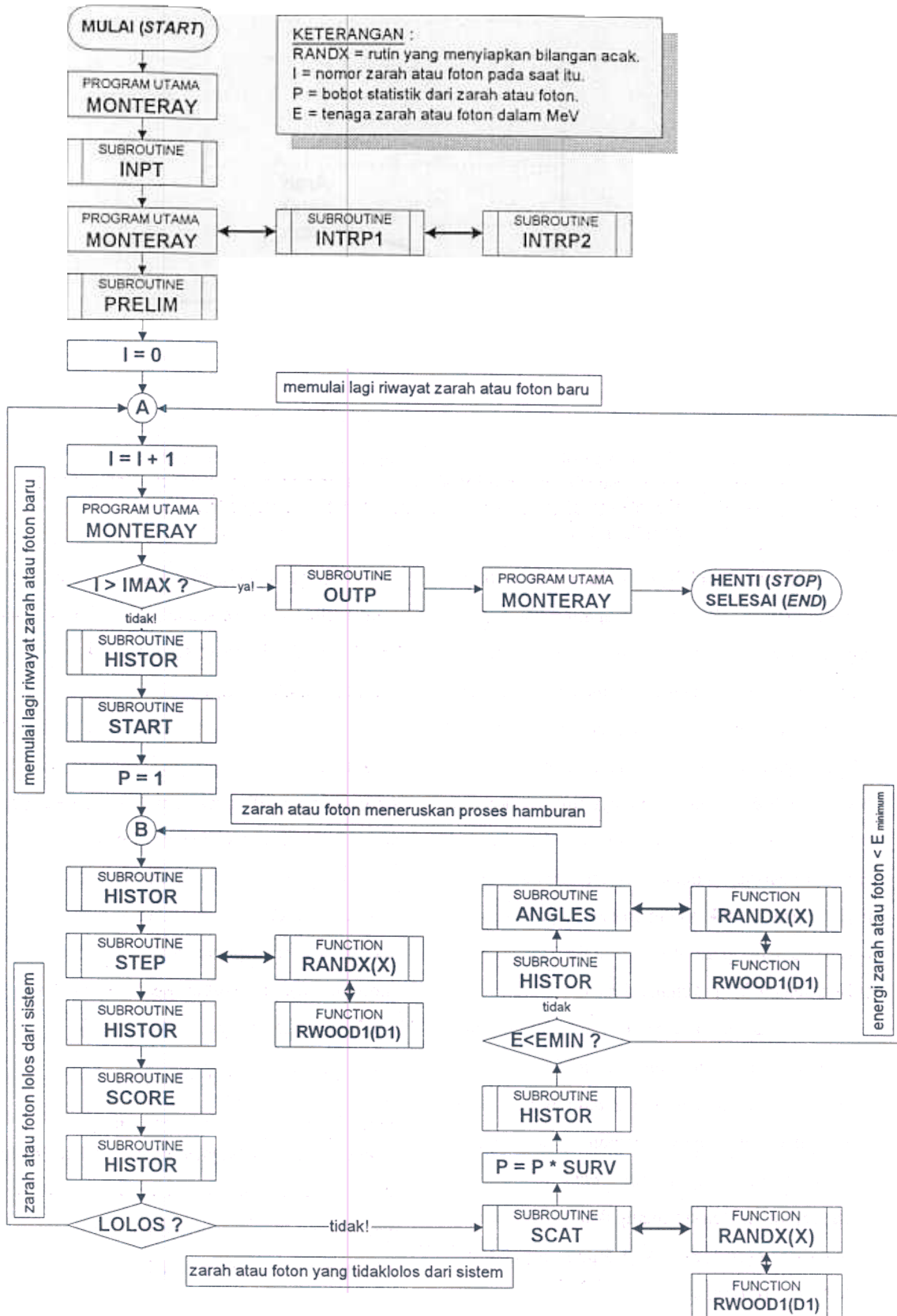
Karena diandaikan bahwa foton-foton sumber menumbuk secara seragam pada perisai papan datar yang luasnya tak berhingga, maka permasalahannya adalah simetrik terhadap sumbu- $y$ , dan oleh karenanya maka hasil-hasilnya takgayut pada koordinat ruang dari foton ( $x$ ,  $z$ ). Namun demikian, untuk mengunjukkan keberlakuan secara umum dari metode ini, kebergayutan terhadap sumbu- $z$  dipertahankan dalam perhitungan. Untuk memberikan harga- $z$  sedikit berarti dalam perhitungan, maka diandaikan bahwa semua foton dimulai dengan  $z = 0$ .

Besaran-besaran utama yang dihitung dan dikeluarkan oleh program ini adalah: *Albedo total*, yang merupakan suatu ukuran sifat-sifat pemantulan bahan perisai papan datar terhadap foton atau foton yang datang. *Faktor bangkit*,  $B$ , yang secara mendasar merupakan suatu ukuran mengenai foton-foton yang dipancar-pindahkan diperkuat (ditingkatkan intensitasnya) oleh hamburan Compton. *Spektra arus foton* yang mengalir di batas kiri dan batas kanan dari

sistem. Spektra ini merupakan banyaknya foton yang melintasi permukaan sistem dengan tenaga berada dalam interval tenaga yang ditentukan sebelumnya oleh pengguna.

Sifat/ciri khas dari program MONTERAY adalah bahwa ia mampu mempertimbangkan secara kompetitif variasi ketebalan perisai papan datar dari bahan yang sama. Ini adalah fasilitas yang berguna, karena biasanya peneliti ingin mengetahui faktor-faktor bangkit untuk berbagai ketebalan perisai papan datar, dan hal ini lebih ekonomis dalam waktu perhitungan komputer untuk memperolehnya secara serentak.

Untuk maksud pelatihan, maka riwayat atau sejarah hidup terinci dari 24 foton pertama dicetak keluar (sebagai pilihan). Hal ini dengan mencatat dari saat mereka muncul pengalaman-pengalaman fisis utama dari tiap foton. Selain itu memungkinkan dapat dilakukan pemeriksaan bahwa semua foton atau foton yang dimulai dari sumber dihitung satu per satu secara benar.



Gambar 3. Diagram alir dari program komputer MONTERAY MARK-1, tanpa proses anihilasi.

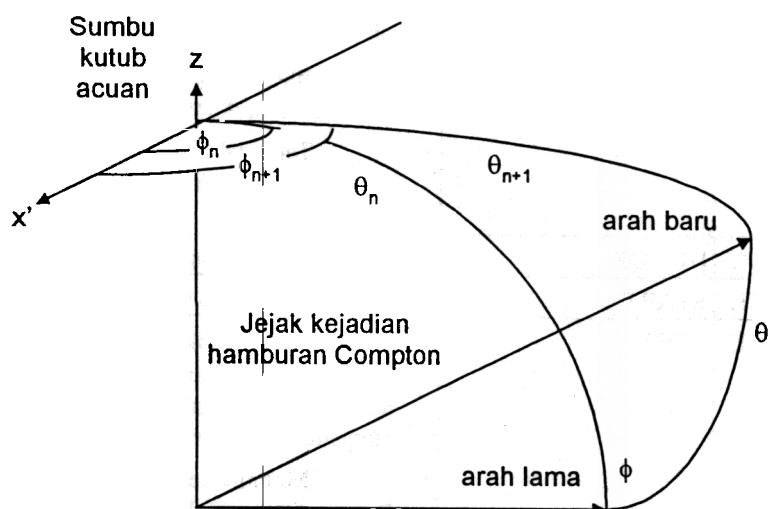
Tabel Struktur program MONTERAY MARK-I

No.	Program / Sub	Nama Mnemonik	Tugas dan fungsi	Keterangan
1.	PROGRAM	MONTE	Mengendalikan seluruh aliran kerja program perhitungan	
2.	SUBROUTINE	INPT	Membaca masuk data basis dan parameter-parameter kendali yang diperlukan oleh program dalam bentuk 'terformat'	
3.	SUBROUTINE	PRELIM	Mengerjakan perhitungan persiapan itu dalam program MONTERAY. Tabel-tabel lain yang disusun dalam PRELIM adalah : <ul style="list-style-type: none"> <li>Harga-harga sinus dan cosinus sudut hambur, dalam derajat</li> <li>Tabel-tabel mesh tenaga untuk menyimpan spektra foton pada saat keluar dari sistem</li> </ul>	'sekali untuk semua'
4.	SUBROUTINE	HISTOR	Mencatat riwayat hidup setiap foton	
5.	SUBROUTINE	START	Mendefinisikan keadaan awal dari foton	
6.		STEP	<ul style="list-style-type: none"> <li>Memantapkan kedudukan foton dalam tabel panjang gelombang mesh-halus, untuk pencarian tabel-tabel tampang lintang berikutnya</li> <li>Memilih secara acak panjang lintasan foton untuk titik tumbukan berikutnya : <math display="block">x = -\frac{1}{\mu_t} \cdot \ln \varepsilon \quad (1)</math> </li> <li>Menghitung koordinat dari titik tumbukan berikutnya : <math display="block">x_{i+1} = x_i + s_i(\sin \theta_i \cos \phi_i), \quad (2)</math> <math display="block">y_{i+1} = y_i + s_i(\sin \theta_i \sin \phi_i), \quad (3)</math> <math display="block">z_{i+1} = z_i + s_i(\cos \theta_i), \quad (4)</math> </li> </ul>	$\mu_t$ $\equiv$ koefisien pelemahan linier total dari medium, $[\text{cm}^{-1}]$ ; $x$ $\equiv$ harga panjang lintasan, $[\text{cm}]$ , $\varepsilon$ $\equiv$ bilangan acak (random), $0 \leq \varepsilon \leq 1$
7.			<ul style="list-style-type: none"> <li>Memodifikasi faktor bobot foton, P, pada harga barunya setelah mengalami hamburan..</li> <li>Menentukan peubah-peubah (<math>\theta_{n+1}</math>, <math>\phi_{n+1}</math>) yang membatasi arah baru dari foton setelah mengalami hamburan Compton.</li> </ul>	
8.		SCORE	Mencatat sumbangan foton pada besaran yang dikehendaki.	Lihat Gambar 5.
9.	SUBROUTINE	OUTPUT	Mencetak hasil perhitungann	
10.	SUBROUTINE	INTRP1(N,X,Y,B,C,D)	Interpolasi tahap awal	
11.	SUBROUTINE	INTRP2(N,X,Y,B,C,D,U,SPY)	Melaksanakan prosedur interpolasi splin kubik tahap kedua dan mengevaluasi fungsi splin kubik, dengan menggunakan koefisien-koefisien : B, C, dan D, yang telah dihitung sebelumnya oleh subroutine INTRP1	
12.	FUNCTION	RANDX(X)	Menyiapkan bilangan acak	Pustaka 6

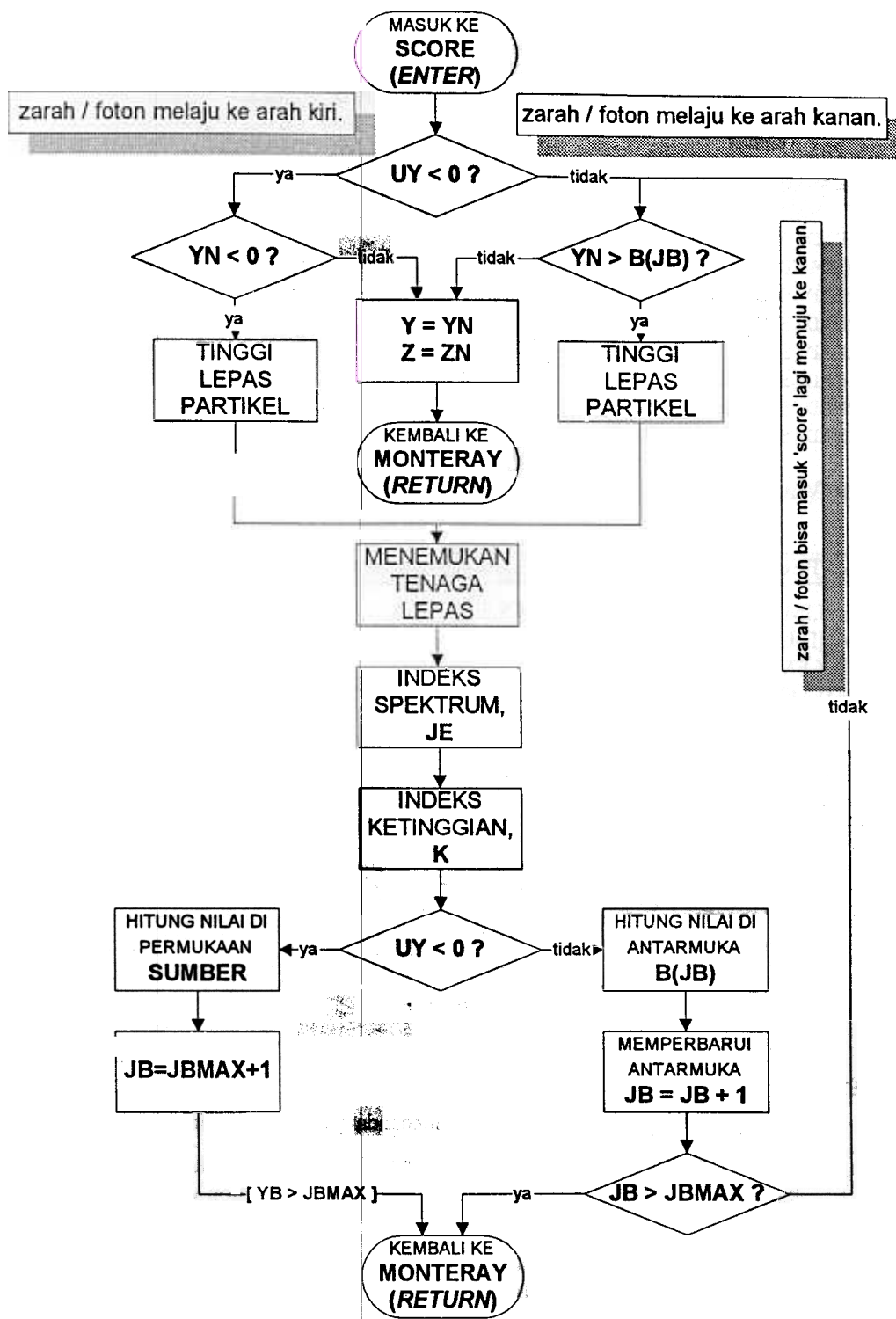
### Struktur dan Diagram Alir Program

Program ini semula dirancang untuk dapat di'run' pada komputer besar CDC-7600, tetapi telah dimodifikasi sedemikian sehingga dapat di'run' dengan PC-XT/AT serasi pasang IBM, dengan bantuan program kompilasi

WATFOR-77; pustaka (5). Secara singkat, struktur program MONTERAY MARK I meliputi tugas dan fungsinya ditunjukkan dalam Tabel 1 dan diagram aliran kerjanya ditunjukkan dalam Gambar 3.



Gambar 4. Segi-tiga permukaan bola yang dibentuk oleh arah lama (sebelum) dan arah baru dari foton setelah mengalami hamburan Compton.  $\theta$  adalah sudut hamburan Compton.



Gambar 5. Diagram alir untuk subroutine SCORE dalam program utama MONTERAY MARK-1

## Statemen Dalam Subroutine INPT

```

      READ (5,202) NRUN, IMAX, KPRI, MEN, MAT, KMAX, JBMAX
202  FORMAT (8I10)
      READ (5,205) QRAND, UYL
      READ (5,205) EMAX, EMIN, RHO, DNORM
205  FORMAT (4F10.0)
      READ (5,209) (EB (M) , M=1, MAT)
209  FORMAT (8F10.0)
      READ (5,209) (DOSB (M) , M=1, MAT)
      READ (5,209) (SURVB (M) , M=1, MAT)
      READ (5,209) (ATB (M) , M=1, MAT)
      READ (5,205) CONZ, CONB
      READ (5,209) (B (J) , J=1, JBMAX)
      READ (5,209) (H (K) , K=1, KMAX)
    
```

## Format Data Masukan

Rekord(*)	PEUBAH-PEUBAH YANG DIBACA MASUK	FORMAT	KETERANGAN
1	NRUN,IMAX,KPRI,MEN,MAT,KMAX,JBMAX	8I10	bilangan integer
2	QRAND,UYL	2F10.0	bilangan riil
3	EMAX,EMIN,RHO,DNORM	4F10.0	bilangan riil
4-7	EB(M),M=1,MAT	8F10.0	bilangan riil
8-11	DOSB(M),M=1,MAT	8F10.0	bilangan riil
12-15	SURVB(M),M=1,MAT	8F10.0	bilangan riil
16-19	ATB(M),M=1,MAT	8F10.0	bilangan riil
20	CONZ,CONB	2F10.0	bilangan riil
21	B(J),J=1,JBMAX	8F10.0	bilangan riil
22	H(K),K=1,KMAX	8F10.0	bilangan riil

(\* Banyaknya kartu atau rekord data masukan bergantung pada mesh data yang digunakan dalam suatu penerapan tertentu.

## Keterangan Mengenai Peubah Data Masukan

Kartu ke-1 : NRUN, IMAX, KPRI, MEN, MAT, KMAX, JBMAX

- NRUN   ≡ Bilangan bulat yang digunakan untuk menandai pelaksanaan komputer.
- IMAX   ≡ Bilangan bulat yang digunakan untuk menentukan / menetapkan jumlah atau banyaknya maksimum riwayat (sejarah) hidup foton atau foton yang dipelajari (diamati dan dicatat perilakunya).
- ≡ Bilangan bulat yang digunakan untuk mengendalikan hasil cetakan keluar terinci selama perhitungan. Jika  $KPRI < 0$ , maka cetakan keluar (khususnya untuk sejarah atau riwayat hidup foton) ditekan, sehingga menjadi lebih hemat.
- MEN    ≡ Jumlah (banyaknya) interval-interval yang dibutuhkan dalam tabel spektrum tenaga foton.
- MAT    ≡ Jumlah (banyaknya) tenaga-tenaga (mesh kasar) untuk mana data tampang lintang basis di baca masuk ke dalam program.
- KMAX   ≡ Jumlah (banyaknya) maksimum tempat-tempat kedudukan dalam tabel ketinggian (dikurangi 1); lihat H.
- JBMAX   ≡ Jumlah (banyaknya) maksimum lapisan perisai papan datar yang dihitung / dipertimbangkan secara bersaing dalam persoalan.



**Kartu ke-2 : QRAND, UYL**

QRAND  $\equiv$  Bilangan riil (sembarang) yang dibutuhkan untuk 'pengumpanan' pembangkit bilangan acak komputer.

UYL  $\equiv$  Tetapan perbandingan untuk UY. Dalam hal ini, tak ada harga-harga bagi UY yang lebih kecil daripada UYL yang diterima ketika sedang menilai hitungan fluks foton (foton).

**Kartu ke-3 : EMAX, EMIN, RHO, DNORM**

EMAX  $\equiv$  Tenaga foton maksimum dalam persoalan, sebagai contoh tenaga sumber; ( $EMAX \leq 10$  MeV).

EMIN  $\leq$  Tenaga 'cut-off' dalam MeV. Apabila tenaga foton berkurang menurun sampai kurang atau lebih kecil daripada EMIN, maka sejarah atau riwayat hidupnya diakhiri; ( $EMIN \geq 0,018$  MeV).

RHO  $\equiv$  Rapat massa bahan-bahan perisai radiasi berbentuk papan datar,  $\rho$  (gram/cm<sup>3</sup>).

DNORM  $\equiv$  Tetapan normalisasi untuk menjamin / memastikan bahwa hasil-hasil luaran untuk 'dosis' tersaji dalam satuan yang dikehendaki, yang dalam hal ini mengkonversi satuan dari besaran [ $\mu, E \Phi$ ] ke dalam satuan laju dosis. Jika laju dosis dinyatakan dalam satuan rem per jam atau rad per jam, maka :

$$D_{\text{NORM}} = \frac{1,6021 \times 10^{-13} \frac{\text{Joule}}{\text{MeV}} \times 3600 \frac{\text{detik}}{\text{jam}}}{10^{-5} \frac{\text{Joule}}{\text{gram}} \cdot \text{rad}} = 5,767 \times 10^{-5} \frac{\frac{\text{rad}}{\text{jam}}}{\frac{\text{MeV/detik}}{\text{gram}}} \quad (5)$$

**Kartu ke-4 s.d. 7 : EB(M), M=1, MAT**

EB  $\equiv$  Deret tenaga yang secara inisial digunakan untuk mendaftar tenaga-tenaga (mesh kasar) untuk mana data tampang lintang basis dibaca masuk. Nanti data ini digunakan untuk mesh spektrum foton; lihat MAT.

**Kartu ke-8 s.d. 11 : DOSB(M), M=1, MAT**

DOSB  $\equiv$  Tabel data koefisien serapan massa (mesh kasar) untuk udara  $(\mu/\rho)_{\text{udr}}$  atau untuk jaringan hidup  $(\mu/\rho)_{\text{tis}}$ , yang dibaca masuk oleh program sebagai data masukan, cm<sup>2</sup>/gram. Dari data ini, data yang diperbesar (mesh halus) disusun.

**Kartu ke-12 s.d. 15 : SURVB(M), M=1, MAT**

SURVB  $\equiv$  seperti untuk SURV, kecuali bahwa ini adalah Tabel data (mesh kasar), yang dibaca masuk sebagai tampang hamburan Compton,  $\sigma_c$ . Dari daftar ini, data yang diperbesar (mesh halus) disusun.

**Kartu ke-16 s.d. 19 : ATB(M), M=1, MAT**

ATB  $\equiv$  Tabel masukan (mesh kasar) dari data koefisien pelemahan massa untuk bahan perisai, dari mana tabel terinci dibangkitkan,  $(\mu/\rho)$ , (cm<sup>2</sup>/gram).

**Kartu ke-20 : CONZ, CONB**

- CONZ**   ≡ Nomor atom bahan,  $Z$ , untuk bahan yang terdiri dari atom sejenis atau jumlah elektron per molekul untuk bahan-bahan yang terdiri dari beberapa jenis atom.
- CONB**   ≡ Faktor konversi untuk bahan perisai papan datar =  $N_A \cdot 10^{-24}/A$ , (barn/atom  $\rightarrow$   $\text{cm}^2/\text{gram}$ ); Relasi antara  $\mu/\rho$  dan  $\sigma$  ditetapkan dengan pasti secara mudah. Untuk sinar- $\gamma$ , demikian juga seperti halnya untuk neutron,ampang makroskopis dan mikroskopis terhubung oleh persamaan :  $\mu = N_o \sigma$ .

**Kartu ke-21 : B(J), J=1, JBMAX**

- B**       ≡ Tebal bahan perisai, dalam satuan jarak bebas purata, dari berbagai lapisan perisai papan homogen yang diperhitungkan secara serentak.

**Kartu ke-22 : H(K), K=1, KMAX**

- H**       ≡ Tabel ketinggian untuk FL dan FR, dalam cm.
- FL**     ≡ Menyimpan sumbangan dosis dari foton-foton yang masuk melintasi bidang sumber dari sisi sebelah kiri perisai papan datar di berbagai ketinggian.
- FR**     ≡ Menyimpan sumbangan dosis dari foton-foton yang lolos melintasi bidang antar-muka dari sisi sebelah kanan perisai papan datar pada berbagai ketinggian.

Tabel 2. Koefisien serapan massa dari beberapa bahan perisai radiasi- $\gamma$  28 kelompok.

Nama & sifat fisis unsur / bahan perisai			Udara / Jaringan	Timah hitam (Pb)	Air biasa (H <sub>2</sub> O)
Jumlah elektron, #Z				82	10
Rapat massa, $\rho$ , [gram/cm <sup>3</sup> ]				11,34	1,00
Faktor normalisasi,  (rad/jam)/{(MeV/det)/gram}				0,00005767	0,00005767
Faktor konversi, $N_{AVO} / A$				0,0029065	0,033427
Tenaga cut-off, [MeV]				0,025	0,019
Kelompok i	$E_{\gamma}$ , [MeV]	$\sigma_C$ , [barn/elektron]	$(\mu/\rho)_{udara}$ , [cm <sup>2</sup> /gram]	$(\mu/\rho)_{Pb}$ , [cm <sup>2</sup> /gram]	$(\mu/\rho)_{air}$ , [cm <sup>2</sup> /gram]
	30,0	0,021995	0,0146	0,0696	0,0170
2.	20,0	0,030246	0,0145	0,0606	0,0181
3.	15,0	0,037707	0,0155	0,0548	0,0193
4.	10,0	0,050982	0,0156	0,0484	0,0221
5.	8,0	0,059876	0,0163	0,0457	0,0242
6.	6,0	0,073220	0,0173	0,0434	0,0276
7.	5,0	0,082855	0,0182	0,0423	0,0303
8.	4,0	0,095962	0,0195	0,0414	0,0340
9.	3,0	0,115077	0,0211	0,0415	0,0396
10.	2,0	0,146340	0,0237	0,0450	0,0493
11.	1,5	0,171554	0,0256	0,0509	0,0574
12.	1,0	0,211181	0,0280	0,0689	0,0706
13.	0,8	0,234930	0,0289	0,0856	0,0785
14.	0,6	0,267463	0,0296	0,1196	0,0894
15.	0,5	0,289130	0,0297	0,1538	0,0967
16.	0,4	0,316639	0,0295	0,2196	0,1059
17.	0,3	0,353405	0,0287	0,3836	0,1182
18.	0,2	0,406431	0,0268	0,9456	0,1362
19.	0,15	0,443549	0,0250	1,8903	0,1490
20.	0,10	0,492685	0,0234	5,2329	0,1675
21.	0,08	0,517219	0,0243	2,0706	0,1788
22.	0,06	0,545550	0,0305	4,4316	0,1973
23.	0,05	0,561435	0,0406	7,2256	0,2144
24.	0,04	0,578664	0,0668	13,1300	0,2483
25.	0,03	0,597417	0,1480	28,3649	0,3378
26.	0,02	0,617907	0,5120	83,2751	0,7113
27.	0,015	0,628881	1,2700	131,3288	1,4839
28.	0,010	0,640387	4,6300	128,0415	4,9944

**Contoh Data Masukan**

Berikut di bawah ini diberikan 2 (dua) buah contoh riil penulisan data masukan yang akan dibaca oleh subroutine INPT dengan format dan keterangan sebagaimana telah diberikan pada Subbab sebelumnya berturut-turut untuk perisai papan datar dari bahan Pb dan H<sub>2</sub>O. Untuk keperluan penyiapan data pokok yang diperlukan

di sini, tampang hamburan Compton  $\sigma_C$ , [barn/elektron], koefisien serapan energi untuk udara atau jaringan,  $(\mu/\rho)_{a, \text{tis}}$ , koefisien pelemahan massa total untuk air (H<sub>2</sub>O),  $(\mu/\rho)_{\text{air}}$  dan timbel (Pb),  $(\mu/\rho)_{\text{Pb}}$ , [cm<sup>2</sup>/gram], dapat dilihat pada Tabel 2 untuk 28 kelompok tenaga foton- $\gamma$ .

Contoh data masukan 1

82	10001							
321.	.005							
6.0	0.025	11.34	.00005767					
30.0	20.0	15.0	10.0	8.	6.			
	2.	1.5	1.	.8	.6	.5	.4	
.3	.2	.15	.1	.08	.06	.05	.04	
.03	.02	.015	.01					
.0146	.0145	.0155	.0156	.0163	.0173	.0182	.0195	
.0211	.0237	.0256	.028	.0289	.0296	.0297	.0295	
.0287	.0268	.025	.0234	.0243	.0305	.0406	.0668	
.148	.512	1.27	4.63					
02199	.03025	.03771	.05098	05988	07322	08286		
.1151	.1463	.1716	.2112	.2349	.2675	.2891		
	.4064	.4435	.4927	.5172	.5456			
	.6179	.6289	.6404					
	0.0606	0.0548	0.0484	0.0457				
0.0415	0.0450	0.0509	0.0689	0.0856	0.1196	0.1538		
0.3378	0.9456	1.8903	5.2329	2.0706	4.4316	7.2256		
	83.2751	1.3288	128.0415					
	0029065							
1	1.5	2.0						
-3	-1.	0.0						

Contoh data masukan 2 Air

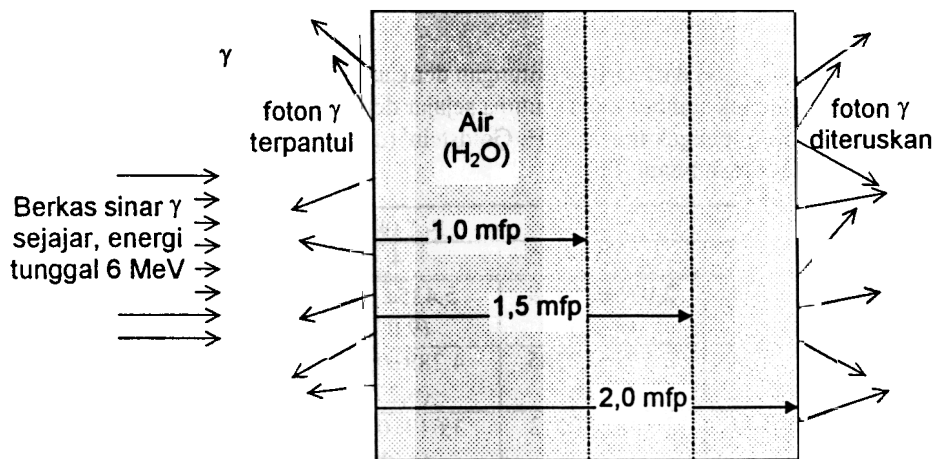
10	10001							
21.	.005							
6.0	0.019							
0.0	20.0	15.0	10.0	8.				
3.	2.	1.5		.8	.6			
	.2	.15	1	.08	.06			
	.02	.015						
	.0145	.0155	.0156	.0163	.0173	.0182	.0195	
	.0237	.0256	.028	.0289	.0296	.0297	.0295	
.0287	.0268	.025	.0234	.0243	.0305	.0406	.0668	
.148	.512	1.27	4.63					
.02199	.03025	.03771	.05098	05988	07322	08286	.096	
.1151	.1463	.1716	.2112	.2349	.2675	.2891	.3166	
.3534	.4064	.4435	.4927	.5172	.5456	.5614	.5787	
.5974	.6179	.6289	.6404					
0.0170	0.0181	0.0193	0.0221	0.0242	0.0276	0.0303	0.0340	
0.0396	0.0493	0.0574	0.0706	0.0785	0.0894	0.0967	0.1059	
0.1182	0.1362	0.1490	0.1675	0.1788	0.1973	0.2144	0.2483	
0.3378	0.7113							
10	033427							
	1.5							
-3.	-1.	0.0						

PEMBAHASAN

Ditinjau kasus seberkas sinar gamma sejajar berenergi tunggal  $E_0 = 6$  MeV, menumbuk tegak lurus slab air dengan luas dianggap takhingga dan tebal bervariasi seperti ditunjukkan pada Gambar 6. Kasus yang sama juga dicoba pada permukaan perisai planar timah hitam Pb.

Pada tinjauan ini, diambil tiga variasi ketebalan slab, yaitu 1,0 ; 1,5 dan 2,0 mfp yang akan dipertimbangkan secara serentak. Dari hasil luaran program tampak bahwa untuk air dengan tebal 1 mfp = 36,23 cm, fraksi foton yang terpantul balik ke kiri adalah 10,03 % dan yang diteruskan ke kanan adalah 66,67 % sedangkan

3. sisanya yang 23,30 % terserap oleh media air. Besaran yang sama untuk perisai Pb dengan tebal 1 mfp = 2,03 cm, berturut-turut adalah 0,56 %, 47,34 % dan 52,1 %. Ini berarti bahwa bahan perisai dari unsur dengan nomor atom rendah (unsur ringan) secara nisbi memberikan efek hambur balik foton lebih besar dibandingkan dengan unsur dengan nomor atom tinggi (unsur berat), tetapi sebaliknya memberikan efek serapan foton yang lebih kecil. Untuk kasus di atas, jumlah foton yang diperhatikan riwayat hidupnya (IMAX = 10001) adalah cukup besar.



Gambar 6 Geometri untuk berkas sinar gamma sejajar berenergi tunggal 6 MeV yang menumbuk pada bidang air berbentuk planar (papan datar) tak hingga luas dengan tebal 1,0 ; 1,5 dan 2,0 mfp (1 mfp untuk energi foton 6 MeV dalam media air = 36,23 cm).

Ini menjamin bahwa ralat statistik yang diperkirakan, yang berkaitan dengan hasil-hasil perhitungan adalah cukup kecil. Pada Tabel 3 ditunjukkan hasil perhitungan faktor bangkit foton berkas sejajar  $B(\mu x)$  untuk berbagai variasi energi dan variasi ketebalan media perisai air dan Pb dengan data IMAX = 10000. Dari Tabel ini dapat ditunjukkan bahwa semakin kecil tebal bahan semakin akurat hasilnya dengan ralat statistik yang cukup kecil dan sebaliknya semakin tebal semakin jauh menyimpang dengan ralat yang begitu besar dari nilai acuannya (dalam tanda kurung). Hal ini disebabkan karena jumlah foton yang masih mampu bertahan hidup (tanpa diserap) secara acak sampai mencapai ketebalan itu semakin sedikit dibandingkan dengan jumlahnya pada ketebalan yang lebih kecil.

Ralat statistik semua besaran yang terhitung akan menjadi semakin kecil apabila banyaknya riwayat hidup foton diperbesar (IMAX = 30000 dan 100000) sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4. Akan tetapi (kerugiannya), dengan memperbesar jumlah

foton awal (IMAX) yang dalam hal ini identik dengan arus foton searah yang dinyatakan dalam satuan  $\gamma/(\text{cm}^2\text{-det})$ , waktu eksekusi (*runing time*) komputer menjadi semakin lama. Waktu eksekusi yang baku sebenarnya sulit diprakirakan karena sangat bergantung pada tingkat kerumitan masalah yang diberikan sebagai data masukan. Untuk masalah sederhana dengan umpan IMAX = 10000, KPRI = -1, MEN = 1, KMAX = 1 dan JBMAX = 1 misalnya (standar), diperlukan waktu *runing*  $\pm 1$  menit dengan program yang telah dibuat *executable* (berekstensi EXE) dan menggunakan PC berbasis chip prosesor mikro Pentium 133 (Intel). Dari hasil uji coba beberapa kali untuk kondisi yang sama memberikan waktu eksekusi berturut-turut sbb. :  $t_{\text{run}}(\text{IMAX}=30000) = \pm 2$  menit,  $t_{\text{run}}(\text{IMAX}=100000) = \pm 6$  menit dan  $t_{\text{run}}(\text{IMAX}=300000) = \pm 20$  menit. Sudah barang tentu *runing time* akan lebih lama lagi jika program masih dalam bentuk *source deck* (menggunakan kompilator WATFOR77). Pada Tabel 4 tampak bahwa nilai faktor bangkit untuk energi foton 6 MeV mendekati nilai acuannya (kolom paling kanan).

Tabel 3. Faktor-faktor bangkit  $B(\mu x)$  dari hasil perhitungan dengan program Monteray Mark-I terubah (dengan  $\pm$  ralatnya) untuk sumber foton gamma sejajar dengan intensitas  $10000 \gamma/(\text{cm}^2\text{-det})$ , terbanding dengan hasil pengukuran oleh H. Goldstein<sup>†</sup> (dalam tanda kurung) pada media perisai air ( $\text{H}_2\text{O}$ ) dan timah hitam (Pb).

E, MeV	l mfp, cm	$\mu_x$ (air),				
		1	2	4	7	10
0,5	10,34	1,912±0,0207 (2,63)	2,971±0,0419 (4,29)	5,435±1,58 (9,05)	11,63±1,02 (20,0)	22,30±6,46 (35,9)
1,0	14,16	1,784±0,0169 (2,26)	2,586±0,0385 (3,39)	4,289±0,141 (6,27)	7,764±0,941 (11,5)	7,343±3,42 (18,0)
2,0	20,28	1,668±0,0133 (1,84)	2,301±0,0323 (2,63)	3,649±0,125 (4,28)	5,583±0,723 (6,96)	9,175±4,19 (9,87)
3,0	25,25	1,548±0,0122 (1,69)	2,120±0,0301 (2,31)	3,223±0,116 (3,57)	4,111±0,585 (5,51)	6,259±3,22 (7,48)
4,0	29,41	1,496±0,0121 (1,58)	1,963±0,0296 (2,10)	2,869±0,107 (3,12)	3,627±0,543 (4,63)	6,787±3,28 (6,19)
6,0	36,23	1,419±0,0120 (1,45)	1,787±0,0279 (1,86)	2,522±0,0998 (2,63)	4,072±0,548 (3,76)	10,64±4,49 (4,86)
8,0	41,32	1,346±0,0120 (1,36)	1,651±0,0270 (1,69)	2,354±0,0952 (2,30)	2,378±0,408 (3,16)	3,385±2,39 (4,0)
10,0	45,25	1,299±0,0119 (none)	1,544±0,0265 (none)	2,152±0,0901 (none)	2,905±0,456 (none)	1,900±1,47 (none)
E, MeV	l mfp, cm	$\mu_x$ (Pb)				
		1	2	4	7	10
0,5	0,57	1,226±0,0124 (1,24)	1,392±0,0265 (1,39)	1,528±0,0798 (1,63)	1,918±0,411 (1,87)	3,586±2,30 (2,08)
1,0	1,28	1,363±0,0124 (1,38)	1,574±0,0278 (1,68)	1,940±0,0979 (2,18)	2,678±0,464 (2,80)	6,435±3,30 (3,40)
2,0	1,96	1,377±0,0122 (1,40)	1,680±0,0278 (1,76)	2,329±0,0962 (2,41)	3,070±0,499 (3,36)	1,198±0,755 (4,35)
3,0	2,12	1,344±0,0119 (1,36)	1,647±0,0265 (1,71)	2,122±0,0869 (2,42)	2,645±0,402 (3,55)	3,147±2,30 (4,82)
4,0	2,13	1,275±0,0119 (1,28)	1,554±0,0257 (1,56)	2,130±0,0846 (2,18)	2,704±0,368 (3,29)	5,090±1,95 (4,69)
6,0	2,03	1,197±0,0120 (1,19)	1,397±0,024 (1,40)	1,952±0,0813 (1,87)	3,667±0,493 (2,97)	6,474±2,58 (4,69)
8,0	1,93	1,147±0,0123 (1,14)	1,294±0,0248 (1,30)	1,677±0,0760 (1,69)	2,775±0,399 (2,61)	6,286±2,49 (4,18)
10,0	1,82	1,102±0,0123 (1,11)	1,239±0,024 (1,24)	1,560±0,0739 (1,54)	2,543±0,396 (2,27)	4,214±2,26 (3,54)

*Fundamental Aspect of Reactor Shielding*, Reading, Mass. : Addison Wesley, 1959, now available from Johnson Reprint Corp., New York.

Tabel 4. Perbandingan hasil perhitungan laju dosis berikut parameter-parameter terkait lainnya dengan program Monteray Mark-I (terubah) dari berbagai intensitas berkas sejajar foton gamma (IMAX) berenergi 6 MeV dalam media perisai air (H<sub>2</sub>O) dengan berbagai ketebalan dalam satuan mfp (*mean free path* = jarak bebas purata).

Arus foton, $\gamma/(\text{cm}^2\text{-det})$	10000	30000	100000	BU
<b>Tebal perisai = 1 mfp</b>				
Laju dosis $\rightarrow$ , rem/jam	0,3121E-01	0,9322E-01	0,3114E+00	
Laju dosis $\leftarrow$ , rem/jam	0,3081E-03	0,9092E-03	0,3011E-02	
Faktor bangkit, $B(1)$	1,417 $\pm$ 0,012	1,411 $\pm$ 0,00698	1,414 $\pm$ 0,0038	1,45
Fraksi foton $\rightarrow$	0,6682	0,6685	0,6700	
Albedo foton, $\alpha$	0,1029 $\pm$ 0,00274	0,1005 $\pm$ 0,00157	0,1001 $\pm$ 0,000855	
Albedo dosis, $\beta$	0,005147	0,005062	0,005030	
<b>Tebal perisai = 2 mfp</b>				
Laju dosis $\rightarrow$ , rem/jam	0,1446E-01	0,4352E-01	0,1450E+00	
Laju dosis $\leftarrow$ , rem/jam	0,3166E-03	0,9355E-03	0,3097E-02	
Faktor bangkit, $B(2)$	1,785 $\pm$ 0,0279	1,790 $\pm$ 0,0161	1,790 $\pm$ 0,00881	1,86
Fraksi foton $\rightarrow$	0,3517	0,3520	0,3523	
Albedo foton, $\alpha$	0,1078 $\pm$ 0,00279	0,1056 $\pm$ 0,00159	0,1048 $\pm$ 0,000869	
Albedo dosis, $\beta$	0,005288	0,005209	0,005173	
<b>Tebal perisai = 4 mfp</b>				
Laju dosis $\rightarrow$ , rem/jam	0,2754E-02	0,8317E-02	0,2734E-01	
Laju dosis $\leftarrow$ , rem/jam	0,3167E-03	0,9358E-03	0,3098E-02	
Faktor bangkit, $B(4)$	2,512 $\pm$ 0,0996	2,528 $\pm$ 0,0574	2,494 $\pm$ 0,0313	2,63
Fraksi foton $\rightarrow$	0,07329	0,07496	0,07413	
Albedo foton, $\alpha$	0,1079 $\pm$ 0,00279	0,1057 $\pm$ 0,00159	0,1049 $\pm$ 0,000869	
Albedo dosis, $\beta$	0,005290	0,005211	0,005175	
<b>Tebal perisai = 7 mfp</b>				
Laju dosis $\rightarrow$ , rem/jam	0,2232E-03	0,6224E-03	0,1951E-02	
Laju dosis $\leftarrow$ , rem/jam	0,3167E-03	0,9358E-03	0,3098E-02	
Faktor bangkit, $B(7)$	4,089 $\pm$ 0,548	3,800 $\pm$ 0,304	3,574 $\pm$ 0,165	3,76
Fraksi foton $\rightarrow$	0,006388	0,6076E-02	0,5703E-02	
Albedo foton, $\alpha$	0,1079 $\pm$ 0,00279	0,1057 $\pm$ 0,00159	0,1049 $\pm$ 0,000869	
Albedo dosis, $\beta$	0,005290	0,005211	0,005175	
<b>Tebal perisai = 10 mfp</b>				
Laju dosis $\rightarrow$ , rem/jam	0,2892E-04	0,4939E-04	0,1189E-03	
Laju dosis $\leftarrow$ , rem/jam	0,3167E-03	0,9358E-03	0,3098E-02	
Faktor bangkit, $B(10)$	10,64 $\pm$ 4,49	6,058 $\pm$ 1,84	4,376 $\pm$ 0,869	4,86
Fraksi foton $\rightarrow$	0,0005508	0,0004797	0,3246E-03	
Albedo foton, $\alpha$	0,1079 $\pm$ 0,00279	0,1057 $\pm$ 0,00159	0,1049 $\pm$ 0,000869	
Albedo dosis, $\beta$	0,005290	0,005211	0,005175	

Tabel 5 Perbandingan hasil perhitungan laju dosis berikut parameter-parameter terkait lainnya dengan program Monteray Mark-I (terubah) dari berbagai intensitas berkas sejajar foton gamma (IMAX) berenergi 6 MeV dalam media perisai timbal (Pb) dengan berbagai ketebalan dalam satuan mfp (*mean free path* = jarak bebas purata).

Arus foton, $\gamma$ /(cm <sup>2</sup> -det)	10000	30000	100000	BU
<b>Tebal perisai = 1 mfp</b>				
Laju dosis $\rightarrow$ , rem/jam	0,2635E-01	0,7881E-01	0,2625E+00	
Laju dosis $\leftarrow$ , rem/jam	0,3079E-04	0,8706E-04	0,2891E-03	
Faktor bangkit, $B(1)$	1,196 $\pm$ 0,0120	1,193 $\pm$ 0,00691	1,192 $\pm$ 0,00379	1,19
Fraksi foton $\rightarrow$	0,4792	0,4774	0,4770	
Albedo foton, $\alpha$	0,00575 $\pm$ 0,000444	0,00540 $\pm$ 0,000247	0,00534 $\pm$ 0,000134	
Albedo dosis, $\beta$	0,0005143	0,0004848	0,0004830	
<b>Tebal perisai = 2 mfp</b>				
Laju dosis $\rightarrow$ , rem/jam	0,1133E-01	0,3389E-01	0,1131E+00	
Laju dosis $\leftarrow$ , rem/jam	0,3079E-04	0,8713E-04	0,2893E-03	
Faktor bangkit, $B(2)$	1,399 $\pm$ 0,0248	1,394 $\pm$ 0,0143	1,396 $\pm$ 0,00785	1,40
Fraksi foton $\rightarrow$	0,2199E+00	0,2184E+00	0,2184E+00	
Albedo foton, $\alpha$	0,00575 $\pm$ 0,000444	0,00540 $\pm$ 0,000247	0,00534 $\pm$ 0,000134	
Albedo dosis, $\beta$	0,0005143	0,0004851	0,0004832	
<b>Tebal perisai = 4 mfp</b>				
Laju dosis $\rightarrow$ , rem/jam	0,2154E-02	0,6235E-02	0,2062E-01	
Laju dosis $\leftarrow$ , rem/jam	0,3079E-04	0,8713E-04	0,2893E-03	
Faktor bangkit, $B(4)$	1,964 $\pm$ 0,0817	1,895 $\pm$ 0,0463	1,881 $\pm$ 0,0251	1,87
Fraksi foton $\rightarrow$	0,4553E-01	0,4383E-01	0,4360E-01	
Albedo foton, $\alpha$	0,00575 $\pm$ 0,000444	0,00540 $\pm$ 0,000247	0,00534 $\pm$ 0,000134	
Albedo dosis, $\beta$	0,0005143	0,0004851	0,0004832	
<b>Tebal perisai = 7 mfp</b>				
Laju dosis $\rightarrow$ , rem/jam	0,2044E-03	0,4742E-03	0,1477E-02	
Laju dosis $\leftarrow$ , rem/jam	0,3079E-04	0,8713E-04	0,2893E-03	
Faktor bangkit, $B(7)$	3,744 $\pm$ 0,496	2,895 $\pm$ 0,228	2,705 $\pm$ 0,118	2,97
Fraksi foton $\rightarrow$	0,004429	0,003751	0,003467	
Albedo foton, $\alpha$	0,00575 $\pm$ 0,000444	0,00540 $\pm$ 0,000247	0,00534 $\pm$ 0,000134	
Albedo dosis, $\beta$	0,0005143	0,0004851	0,0004832	
<b>Tebal perisai = 10 mfp</b>				
Laju dosis $\rightarrow$ , rem/jam	0,1760E-04	0,3522E-04	0,1221E-03	
Laju dosis $\leftarrow$ , rem/jam	0,3079E-04	0,8713E-04	0,2893E-03	
Faktor bangkit, $B(10)$	6,474 $\pm$ 2,58	4,319 $\pm$ 1,20	4,493 $\pm$ 0,676	4,69
Fraksi foton $\rightarrow$	0,0004454	0,0002896	0,0002976	
Albedo foton, $\alpha$	0,00575 $\pm$ 0,000444	0,00540 $\pm$ 0,000247	0,00534 $\pm$ 0,000134	
Albedo dosis, $\beta$	0,0005143	0,0004851	0,0004832	

Jika hanya besaran-besaran integral saja yang diinginkan, seperti faktor bangkit dan albedo misalnya, maka banyaknya foton awal (IMAX) bisa direduksi seperlunya sesuai kebutuhan asal masih dalam batas-batas toleransi yang dikehendaki. Tetapi untuk memperoleh nilai yang akurat dalam spektrum energi arus foton yang lolos dari sistem, apalagi jika ketebalan sistem cukup besar, perlu diberikan

jumlah umpan foton awal yang sangat besar (misal IMAX = 100000). Hal ini disebabkan karena dalam kebanyakan terapan Monte Carlo pada masalah transport partikel atau foton, kesalahan statistik pada besaran-besaran 'diferensial' adalah selalu lebih besar daripada besaran-besaran 'integral' yang berkaitan.

Pemilihan harga batas tenaga terendah sembarang ( $E_{MIN} = E_{cut-off}$ ) dan harga batas



terkecil sembarang (UYL) yaitu tetapan perbandingan terhadap arah normal (sumbu-y) untuk  $UY = \sin \theta \sin \phi$ , tidak berdasarkan atas kriteri yang baku, tetapi dipilih atas dasar pengalaman dan coba-coba (*trial and error*). Kriteri penting yang lazim digunakan untuk menentukan harga kedua besaran tersebut adalah bahwa hasil akhir harus tidak terpengaruh oleh harga-harga tertentu yang telah dipilih itu. Pada kasus ini telah dipilih  $E_{\text{cut-off}} = 19 \text{ keV}$  untuk media air dan  $25 \text{ keV}$  untuk Pb, sedangkan nilai pembanding  $UYL = 0,0005$  baik untuk air maupun Pb.

Spektrum arus foton yang lolos dari perisai planar oleh program disajikan dalam bentuk histogram, yang ternormalisasi untuk satu foton. Dimulai dari titik terendah pada mesh energi, harga-harga di samping kanan dari  $0 \text{ MeV}$  berturut-turut menyatakan banyaknya foton yang lolos pada permukaan sebelah kanan dan kiri dari slab dengan energi yang terletak dalam interval  $0 \leq E_\gamma < 0,5 \text{ MeV}$ . Kemudian diikuti di atasnya dengan banyaknya foton yang mempunyai energi dalam jangkau  $0,5 \leq E_\gamma < 0,5 \text{ MeV}$  dan seterusnya. Pada titik tertinggi dari mesh tenaga (ydh. =  $6 \text{ MeV}$ ) adalah banyaknya foton dengan tenaga  $E_\gamma \geq 6 \text{ MeV}$ , yang tentunya hanya berlaku untuk kondisi  $E_\gamma = 6 \text{ MeV}$  saja. Dari seluruh histogram yang dihitung oleh program menunjukkan bahwa tidak ada arus foton yang menuju ke kiri untuk energi di atas  $1 \text{ MeV}$ . Tidak seperti arus foton ke arah kanan (lepas dari sistem) yang menjangkau seluruh spektrum energi, arus foton ke arah kiri (masuk kembali ke sistem) hanya terjadi pada energi rendah dan lebih dari  $97 \%$  untuk arus ini didominasi oleh foton dengan energi  $< 0,5 \text{ MeV}$ . Arus foton ke arah kanan secara mayoritas didominasi oleh foton dengan tenaga awal (tertinggi =  $E_0$ ) yang

kuantitasnya semakin menurun seiring dengan semakin bertambah tebalnya bahan perisai sehingga arus foton dengan energi yang lebih rendah kuantitasnya semakin meningkat.

Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4, hasil perhitungan albedo foton dan albedo dosis pada perisai planar air ataupun Pb dengan tebal  $> 1 \text{ mfp}$ , secara nyata tidak bervariasi kuat terhadap perubahan tebal bahan sementara faktor bangkit merupakan fungsi yang kontinyu dari tebal bahan. Selain daripada itu, faktor bangkit juga bervariasi terhadap energi awal foton  $E_0$  dan nomor atom  $Z$  dari bahan seperti tertera pada Tabel 3.

Sehubungan dengan hal tersebut di atas, maka dengan memberikan berbagai variasi nomor atom  $Z$  dan rapat massa  $\rho$  serta sederetan data koefisien pelemahan massa total  $\mu_t$  ataupun  $(\mu_t/\rho)$  sebagai fungsi energi untuk atom unsur yang bersesuaian, dapat disusun daftar baru faktor bangkit sebagai fungsi "tebal" ( $\mu_t x$ ) untuk berkas foton sejajar berbagai energi. Dengan demikian maka kesukaran penyelesaian masalah perisai radiasi karena kendala tiadanya data faktor bangkit untuk bahan perisai yang dikehendaki dapat diselesaikan dengan penerapan program MONTERAY MARK-I terubah.

## KESIMPULAN

Program MONTERAY MARK-I versi PC-XT/AT ini telah tersusun dan teruji dengan baik dan handal untuk dapat digunakan / diterapkan dalam penentuan laju dosis paparan radiasi gamma berperisai papan datar. Selain daripada itu, program ini dapat digunakan juga untuk menentukan faktor bangkit sebagai fungsi tebal yang dinyatakan dalam satuan jalan bebas purata (mpf) dan fungsi energi foton berkas

sejajar untuk bahan perisai sembarang yang dikehendaki.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala PRSG, Pimpro PPTEN beserta staf, dan khususnya kepada Ketua / anggota KPTF PRSG yang telah membantu dalam mengoreksi kekurangan dan kesalahan secara keseluruhan dari isi / materi makalah ini sampai terselesaikan dengan baik dan benar. Selain daripada itu, penulis juga sangat berterima-kasih kepada rekan sejawat seprofesi dan siapapun juga yang tak dapat penulis sebutkan satu demi satu, yang sudi memberikan saran dan atau kritik yang bersifat membangun demi lebih sempurnanya lagi baik tulisan maupun hasil yang dilaporkan dalam makalah ini.

### DAFTAR PUSTAKA

- /1/. WILLIAM R. MARTIN (Dept. of Nuclear Engineering, Univ. of Michigan), JAMES A. RATHKOPH (Lawrence Livermore National Laboratory), and FORREST B. BROWN (Knoos Atomic Power Laboratory), "Impact of Advances in Computer Technology on Particle Transport Monte Carlo", USA.
- /2/. L. L. CARTER and K. E. HILLESLAND, "Massively Parallel Monte Carlo Calculations, with Work Stations", Westinghouse Hanford Co., USA.
- /3/. BERNADETTE L. KIRK, et al, "Implementation of the Monte Carlo Charged Particle Transport Code EGS-4 on the Hypercube", Oak Ridge National Laboratory (ORNL), USA.
- /4/. JAMES WOOD (Dept. of Nuclear Engineering, Queen Mary College, Univ. of London, United of Kingdom), "The Monte Carlo Method", the first subchapter of the Chapter-7 (Transport Theory Methods) of "Computational Methods in Reactor Shielding", Pergamon Press, Great Britain, (1982), p.374-393.
- /5/. G. COSCHL & J. B. SCHUELER, "WATFOR-77, User's Guide for IBM PC with DOS" (Language Reference Manual), WATCOM Publication Limited, 415 Phillip Sreet, Waterloo, Ontario N2L 3X2, Canada, (1985, 1986).
- /6/. CHENEY and DAVID KINCOID (Univ. of Texas at Austin), "Monte Carlo Methods and Simulation".

**TANYA JAWAB.****Penanya : Ir. Alfahari Mardi, MSc***Pertanyaan :*

Apakah ada kesesuaian mengenai hasil (luaran) antara program asli ( original code) dengan program yang telah anda modifikasi ( modified code) ?

*Jawaban :*

Kesamaan hasil-hasil secara eksak adalah tidak, tetapi kecenderungan untuk mendekati hasil itu adalah ya. Kecenderungan itu akan meningkat dengan semakin besarnya jumlah riwayat foton yang diberikan. Untuk 10000 kasus misalnya, ralatnya adalah 0,85%, 30000 kasus ralatnya 0,50%, sedangkan untuk 100000 kasus ralatnya 0,27%.

**Penanya : Drs. Yupiter S. Pane, MSc***Pertanyaan :*

Kami usulkan agar dalam diskusi dan kesimpulan ditampilkan hal-hal yang dilakukan peneliti untuk membuat program tersebut runnable dan lebih friendly used.

*Jawaban :*

Untuk didiskusikan penulis kira terlalu panjang tetapi dalam kenyataannya, penulis sudah melakukan hal-hal yang membuat program runnable bahkan untuk PC-XT sekalipun dan cukup interaktif ( friendly used ) seperti yang anda maksudkan. Usul dipertimbangkan dan akan diacu untuk pengembangan program selanjutnya.