

RADIOBIOLOGY
MONTE CARLO METHOD



LAPORAN PENELITIAN
DIK SUPLEMEN UNIVERSITAS AIRLANGGA
TAHUN ANGGARAN 2002

KKC
KK
571.45
Asz
P

PENENTUAN DOSIS SERAP DAN FAKTOR BUILDUP PADA SUMBER RADIASI PEMANCAR FOTON DENGAN METODE MONTE CARLO

Peneliti:

SURYANI DYAH ASTUTI, S.Si.,M.Si.
Drs. DJONI IZAK RUDYARDJO, M.Si.
Drs. EDI WINARKO

SELESAI

**MILIK
PERPUSTAKAAN
UNIVERSITAS AIRLANGGA
SURABAYA**

3000252033141

LEMBAGA PENELITIAN UNIVERSITAS AIRLANGGA

Dibiayai oleh Dana DIK Suplemen Universitas Airlangga Tahun 2002
S.K Rektor Universitas Airlangga Nomor 4879/J03/PG/2001
Tanggal 7 Juni 2002
Nomor Urut: 20

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS AIRLANGGA

Nopember, 2002

**LEMBAR IDENTITAS DAN HALAMAN PENGESAHAN
LAPORAN AKHIR HASIL PENELITIAN**

1. a. Judul Penelitian	: PENENTUAN DOSIS SERAP DAN FAKTOR <i>BUILD-UP</i> PADA SUMBER RADIASI PEMANCAR FOTON DENGAN METODE MONTE CARLO
b. Macam Penelitian	: <input type="checkbox"/> Fundamental <input checked="" type="checkbox"/> Terapan <input type="checkbox"/> Pengembangan
c. Kategori Penelitian	: <input type="checkbox"/> I <input checked="" type="checkbox"/> II <input type="checkbox"/> III
2. Kepala Proyek Penelitian :	
a. Nama Lengkap Dg. Gelar	: Suryani Dyah Astuti, S.Si, M.Si
b. Jenis Kelamin	: Perempuan
c. Pangkat/Gol. dan NIP	: Penata Muda Tk.1 / IIC, NIP. 132 125 717
d. Jabatan Sekarang	: Lektor
e. Fakultas /Puslit/Jurusan	: MIPA/Fisika
f. Univ./Inst./Akademi Instansi *)	: Universitas Airlangga
g. Bidang Ilmu Yang Diteliti	: Biofisika
3. Jumlah Tim Peneliti	: 3 Orang
4. Lokasi Penelitian	: Laboratorium Biofisika
5. Bila penelitian ini merupakan peningkatan kerjasama kelembagaan, sebutkan :	
a. Nama Instansi	: -
b. Alamat	: -
6. Jangka Waktu Penelitian	: 6 Bulan sejak penelitian diterima
7. Biaya yang diperlukan	: Rp 4.000.000,-
8. Seminar hasil penelitian	:
a. Dilaksanakan Tanggal	: Januari 2003
b. Hasil Penilaian	: () Baik Sekali (<input checked="" type="checkbox"/>) Baik () Sedang () Kurang

Surabaya, 8 Januari 2003

Mengetahui/Mengesahkan :
a.n. Rektor
Ketua Lembaga Penelitian



Prof.Dr. H. Sarmanu, M.S
NIP. 130 701 125

PENENTUAN DOSIS SERAP DAN FAKTOR *BUILD-UP*
PADA SUMBER RADIASI PEMANCAR FOTON
DENGAN METODE MONTE CARLO

(Suryani Dyah Astuti, Djoni Izak Rudyardjo, Edi Winarko, 2003, 32 halaman)

RINGKASAN

Penentuan dosis yang diserap oleh suatu materi akibat adanya partikel radiasi sangat penting karena banyaknya penggunaan sumber radiasi pemancar foton baik langsung maupun tidak langsung seperti terapi penyakit kanker dan juga penentuan tebal perisai pada suatu reaktor. Dalam penelitian ini akan ditentukan dosis serap dan faktor build-up dari sumber radiasi pemancar foton dengan simulasi komputer menggunakan metode Monte Carlo.

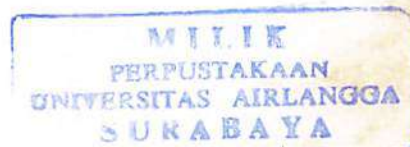
Tujuan dari penelitian ini adalah , membuat shoft-ware penghitungan dosis serap dan laju dosis serap dari sumber radiasi pemancar foton dengan metode Monte Carlo, menentukan persentasi dosis kedalaman dan faktor build-up dosis, serta menentukan laju dosis serap dari sumber radiasi pemancar foton Co-60 berdasarkan hasil penghitungan dengan metode Monte Carlo dan dibandingkan dengan hasil pengukuran.

Penelitian meliputi pembuatan perangkat lunak untuk menghitung laju dosis serap pada berkas sempit dengan metode Monte Carlo, dan menghitung faktor build-up dan laju dosis serap untuk berkas lebar dengan menambahkan interaksi Compton. Selanjutnya hasil penghitungan dengan metode Monte Carlo dibandingkan dengan hasil pengukuran phantom air.

Perangkat lunak dengan metode Monte Carlo dapat digunakan untuk menghitung laju dosis serap dari sumber ion pemancar foton. Persentasi dosis kedalaman dan faktor build-up dosis untuk jumlah partikel 10^6 mempunyai standar deviasi terkecil dan grafiknya mendekati teori, dan faktor build-up dosis ini bergantung besarnya energi foton dari sumber radiasi, energi foton yang semakin kecil maka faktor build-up dosis semakin besar. Selain itu laju dosis serap dari hasil penghitungan dengan metode Monte Carlo pada kondisi kesetimbangan partikel berbeda dengan hasil pengukuran dengan phantom air terutama pada kedalaman dosis maksimum.

(L.P. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Airlangga ;

Nomor SK Rektor : 4879/J03/PG/2002 Tanggal 7 Juni 2002)



KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian yang didanai oleh proyek DIP Unair ini.

Dari seluruh kegiatan penelitian yang telah dilakukan penulis, meliputi penelusuran pustaka, persiapan penelitian, pengambilan data, pembahasan dan diskusi serta penulisan laporan hasil penelitian.

Sehubungan dengan terselesaikannya penelitian ini, penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

Ketua proyek DIP Unair, atas kesempatan dan dana yang diberikan pada penulis untuk melaksanakan penelitian ini.

1. Ketua Lembaga Penelitian Unair, selaku pengelola penelitian.
2. Dekan FMIPA Unair, yang telah memberikan ijin dan membantu terlaksanakannya penelitian ini.
3. Semua pihak yang telah membantu terselesaikannya penelitian ini.

Semoga amal baik beliau diterima oleh Tuhan Yang Maha Esa.

Penulis mengharapkan, semoga hasil penelitian ini bermanfaat bagi kemajuan pendidikan dan penelitian, khususnya di Universitas Airlangga.

Laporan penelitian ini tidak luput dari berbagai kesalahan dan kekurangan, maka kritik dan saran yang bersifat positif sangat penulis harapkan demi sempurnanya laporan penelitian ini.

Surabaya, 8 Januari 2003

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR IDENTITAS DAN PENGESAHAN.....	ii
RINGKASAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	v
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR GRAFIK.....	ix
BAB I. PENDAHULUAN	1
1.1.Latar belakang permasalahan	1
1.2. Perumusan masalah	2
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1. Rapat Fluks.....	3
2.2. Interaksi Foton Dengan Materi	4
2.3. Dosis Serap	5
2.4. Faktor <i>Build-up</i>	6
2.5. Persentasi Dosis Kedalaman	7
2.6. Simulasi Monte Carlo	8
2.7. Jalan Bebas Rata-rata	9
2.8. Energi Partikel Setelah Hamburan.....	10
2.9. Arah Setelah Terhambur.....	11
2.10. Posisi Dari Foton.....	13
2.11. Laju Dosis Serap.....	14
BAB III. TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN	16
3.1. Tujuan penelitian	16
3.2. Manfaat penelitian	16

	Halaman
BAB IV. METODE PENELITIAN	17
4.1. Sumber Radiasi	17
4.2. Algoritma Untuk Berkas Sempit	17
4.3. Algoritma Untuk Berkas Lebar.....	18
BAB V. HASIL DAN PEMBAHASAN	22
5.1. Hasil	22
5.2. Pembahasan	28
BAB VI. KESIMPULAN DAN SARAN	30
6.1. Kesimpulan	30
6.2. Saran	30
DAFTAR PUSTAKA	31
LAMPIRAN	32

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
Tabel 5.1. PDD berdasarkan teori Lambert dan hasil penghitungan dengan metode Monte Carlo dari sumber radiasi Co-60 untuk berkas sempit	22
Tabel 5.2. Faktor <i>build-up</i> dosis secara teori menurut persamaan 2.8 dan hasil penghitungan dengan metode Monte Carlo dari sumber radiasi Co-60	23
Tabel 5.3. Laju dosis serap dan faktor <i>build-up</i> dosis untuk sumber Co-60 dengan energi 1,25 MeV	23
Tabel 5.4. Laju dosis serap dan faktor <i>build-up</i> dosis untuk sumber Co-60 dengan energi 0,5 MeV	24
Tabel 5.5. Laju dosis serap dan faktor <i>build-up</i> dosis untuk sumber Co-60 dengan energi 0,1 MeV	24

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
Gambar 2.1. Geometri dari rapat fluks.....	3
Gambar 2.2. Grafik dari ketiga macam penampang hambur untuk air	5
Gambar 2.3. Grafik PDD untuk Co-60.....	7
Gambar 2.4. Segitiga bola yang terbentuk oleh arah foton datang dengan arah foton terhambur	12
Gambar 2.5. Sistem koordinat bola	13
Gambar 2.6. Skema penentuan arah fluks	15
Gambar 4.1. Bentuk geometri dari sumber dan materi	17
Gambar 4.2. Diagram alir penentuan laju dosis serap untuk berkas sempit	19
Gambar 4.3. Diagram alir untuk menentukan laju dosis serap pada tiap daerah untuk berkas lebar.....	20
Gambar 4.4. Diagram alir untuk menentukan laju dosis serap dengan hamburan Compton untuk berkas lebar.....	21

DAFTAR GRAFIK

Grafik	Halaman
Grafik 5.1. Kurva PDD untuk berkas sempit dengan jumlah partikel 10^4	25
Grafik 5.2. Kurva PDD untuk berkas sempit dengan jumlah partikel 10^5	25
Grafik 5.3. Kurva PDD untuk berkas sempit dengan jumlah partikel 10^6	26
Grafik 5.4. Kurva faktor <i>build-up</i> dosis untuk berkas lebar dengan jumlah partikel 10^4	26
Grafik 5.5. Kurva faktor <i>build-up</i> dosis untuk berkas lebar dengan jumlah partikel 10^5	26
Grafik 5.6. Kurva faktor <i>build-up</i> dosis untuk berkas lebar dengan jumlah partikel 10^6	27
Grafik 5.7. Kurva laju dosis serap untuk sumber radiasi Co-60 hasil simulasi dengan metode Monte Carlo dan hasil pengukuran dengan phantom air.....	27
Grafik 5.8. Kurva laju dosis serap hasil simulasi dengan metode Monte Carlo pada energi foton 1,25 MeV, 0,5 MeV, dan 0,1 MeV.....	27
Grafik 5.9. Kurva faktor <i>build-up</i> dosis hasil simulasi dengan metode Monte Carlo pada energi foton 1,25 MeV, 0,5 MeV, dan 0,1 MeV.....	28

BAB I

PENDAHULUAN

1.1.Latar Belakang Masalah

Sejak ditemukan konsep faktor *build-up* dalam fisika radiasi, akibat adanya perbedaan antara teori dan percobaan untuk atenuasi suatu partikel radiasi saat melewati materi, fenomena tersebut menjadi menarik karena berhubungan dengan dosis radiasi yang diterima materi. Sebelum adanya konsep faktor *build-up*, jumlah partikel radiasi yang terserap menurut teori lebih sedikit dibanding menurut percobaan sehingga secara langsung dosis yang diserap materi akan lebih banyak menurut percobaan dibanding dengan teori (Goldstein, 1959).

Penentuan dosis yang diserap oleh suatu materi akibat adanya partikel radiasi sangat penting karena banyaknya penggunaan sumber radiasi pemancar foton baik langsung maupun tidak langsung seperti terapi penyakit kanker dan juga penentuan tebal perisai pada suatu reaktor.

Fenomena faktor *build-up* tergantung pada bentuk geometri sumber radiasi, jenis partikel radiasi yang dipancarkan sumber radiasi, jenis materi, bentuk materi dan ketebalan materi (Golstein, 1959). Karena banyaknya faktor yang mempengaruhi, maka faktor *build-up* belum dapat dirumuskan secara pasti hanya didasarkan percobaan atau pendekatan matematik (Haryanto, 1996). Dalam penelitian ini akan ditentukan dosis serap dan faktor *build-up* dari sumber radiasi pemancar foton dengan simulasi komputer menggunakan metode Monte Carlo.

Pada simulasi Monte Carlo ini, partikel radiasi direpresentasikan dengan suatu partikel yang perjalanannya diatur oleh suatu distribusi bilangan random, karena perjalanan partikel radiasi saat memasuki materi bersifat acak. Sedangkan faktor *build-up* yang diamati adalah faktor *build-up* dosis.



1.2. Perumusan Masalah

Dari uraian latar belakang dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut :

1. Bagaimanakah perangkat lunak penghitungan laju dosis serap dari sumber radiasi pemancar foton dengan metode Monte Carlo ?
2. Bagaimanakah persentasi dosis kedalaman dan faktor *build-up* dosisnya ?
3. Bagaimanakah laju dosis serap berdasarkan hasil penghitungan dengan metode Monte Carlo jika dibandingkan dengan hasil pengukuran dengan phantom air ?

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Rapat Fluks

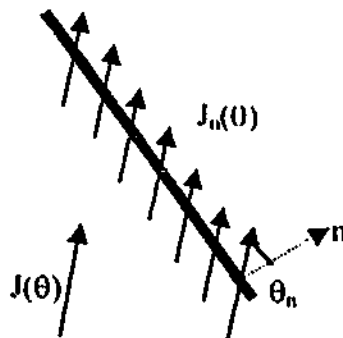
Rapat fluks didefinisikan sebagai banyaknya foton yang menembus suatu daerah dengan luas tertentu dan dalam waktu yang tertentu. Selain itu rapat fluks merupakan suatu besaran yang bergantung terhadap kedudukan (r), sudut ruang (Ω) dan energi (E). Secara matematik rapat fluks dapat dituliskan sebagai berikut (Wood,1982):

$$\Phi(r, \Omega, E) = \frac{d}{dt} \left(\frac{dN(r, \Omega, E)}{da} \right) \quad (2.1)$$

Rapat fluks berhubungan dengan rapat arus normal foton yang menembus daerah tersebut yang secara matematik hubungan tersebut dapat dituliskan sebagai berikut (Lewis,1984) :

$$\Phi(r, \Omega, E) = \frac{J_n(r, \Omega, E)}{\cos \theta} \quad (2.2)$$

dimana θ adalah sudut antara rapat arus foton dengan vektor satuan luas dari bidang tersebut. Gambar 2.1. menunjukkan geometri dari rapat fluks.



Gambar 2.1 Geometri dari rapat fluks

2.2. Interaksi foton dengan Materi

Saat foton melewati suatu materi maka terjadi interaksi antara foton tersebut dengan materi. Akibat terjadinya interaksi tersebut maka rapat fluks foton akan berubah, artinya ada foton yang tidak dapat menembus materi tersebut dan ada foton yang diserap oleh materi tersebut. Berdasarkan hukum Lambert untuk penyerapan, perubahan rapat fluks foton yang melewati suatu materi secara matematis dapat ditulis sebagai berikut :

$$\Phi(x) = \Phi_0 e^{-\mu x} \quad (2.3)$$

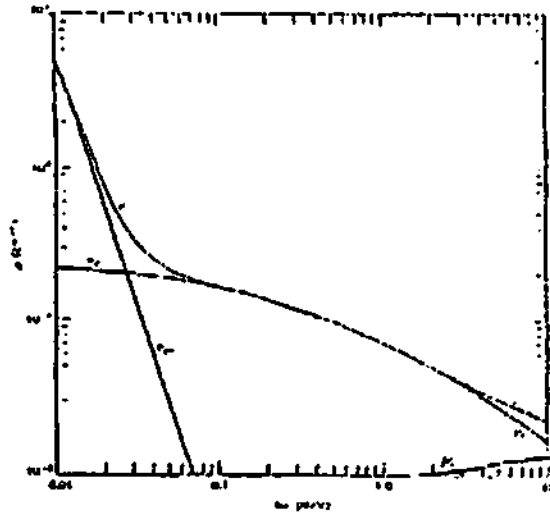
Dari persamaan 2.3 dapat dilihat bahwa perubahan rapat fluks bergantung pada rapat fluks yang masuk Φ_0 , tebal dari materi tersebut x dan konstanta μ . Dari ketiga besaran tersebut, konstanta μ merupakan besaran yang bergantung dari materi tersebut. Konstanta μ merupakan penampang hambur total yang dikalikan dengan jumlah atom dalam materi yang secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\mu = n \times \sigma \quad (2.4)$$

Penampang hamburan total dari suatu materi merupakan penjumlahan dari penampang hamburan dari setiap kemungkinan interaksi yang terjadi. Pada umumnya untuk interaksi foton dengan materi dapat dibagi menjadi tiga jenis penampang hamburan yang berhubungan erat dengan ketiga interaksi yang paling dominan terjadi. Ketiga penampang hamburan tersebut adalah :

1. penampang hamburan untuk interaksi efek fotolistrik μ_{pe} ,
2. penampang hamburan untuk interaksi produksi pasangan κ
3. penampang hamburan untuk interaksi efek compton μ_c .

Dua interaksi pertama merupakan interaksi yang menyerap foton yang datang, sedangkan interaksi yang ketiga merupakan proses hamburan foton yang datang.



Gambar.2.2 Grafik dari ketiga macam penampang hambur untuk air.

Hubungan antara ketiga penampang hamburan tersebut dengan energi dari foton yang datang untuk air dapat dilihat pada gambar 2.2. Pada gambar tersebut nampak bahwa untuk energi dibawah 1.02 MeV penampang hamburan foto listrik dan efek compton yang paling dominan. Sedangkan untuk energi lebih besar 1.02 MeV, efek compton dan produksi pasangan menjadi yang paling dominan.

2.3. Dosis Serap

Dosis Serap adalah banyaknya energi yang dilepaskan dalam suatu volume per satuan elemen massa dari volume tersebut (Kase, 1978). Bentuk umum secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut :

$$D = \frac{dE_s}{dm} \quad (2.5)$$

Pada kondisi kesetimbangan partikel bermuatan (CPE = Charge Particle Equilibrium) dimana efek radiasi dari partikel sekunder diabaikan maka laju dosis serap dapat dituliskan dalam bentuk persamaan berikut (Kase, 1978; Uehara, 1988):

$$\frac{dD}{dt} = \frac{\mu_a(E)}{\rho} * E * \Phi(E) \text{ (MeV s}^{-1} \text{ g}^{-1}) \quad (2.6)$$

Dengan $\mu_a(E)$ adalah koefisien absorpsi massa energi, yaitu koefisien yang berhubungan dengan perbandingan antara energi yang disimpan dan energi yang datang, dan secara matematik dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\mu_a(E) = \frac{E'}{E} \mu(E) \quad (2.7)$$

dimana E' adalah jumlah energi rata-rata yang disimpan per satuan volume dalam materi akibat interaksi dengan foton yang datang dengan energi E ($E' < E$).

2.4. Faktor *Build-up*

Pada persamaan 2.3 diasumsikan jika setiap foton berinteraksi dengan materi, maka foton itu akan lenyap atau diserap oleh materi tersebut. Tetapi pada kenyataannya jika foton itu mengalami interaksi efek compton maka foton itu tidak lenyap tetapi foton itu akan mengalami hamburan. Oleh karena itu, agar persamaan (3) sesuai dengan hasil percobaan maka timbullah konsep faktor *build-up* (Goldstein, 1959; Wood, 1982).

Konsep umum dari faktor *build-up* adalah perbandingan suatu besaran yang disebabkan oleh radiasi utama, hamburan dan radiasi sekunder dengan besaran lain yang terjadi hanya oleh radiasi utama. Berdasarkan konsep tersebut ada tiga macam faktor *build-up* yang bergantung dengan besaran fisis yang diukurnya, yaitu

- Faktor *build-up* rapat fluks B_ϕ , dimana besarannya adalah rapat fluks.
- Faktor *build-up* rapat energi B_E , dimana besarannya adalah intensitas foton.
- Faktor *build-up* dosis B_d , dimana besarannya adalah dosis serap.

Ketiga faktor *build-up* tersebut bergantung pada energi yang masuk dan tebal dari materi tersebut.

Dalam penentuan faktor *build-up* secara teori dengan menggunakan pendekatan eksponensial diperoleh persamaan berikut :

$$B(x) = Ae^{-u_1x} + (1 - A)e^{-u_2x} \quad (2.8)$$

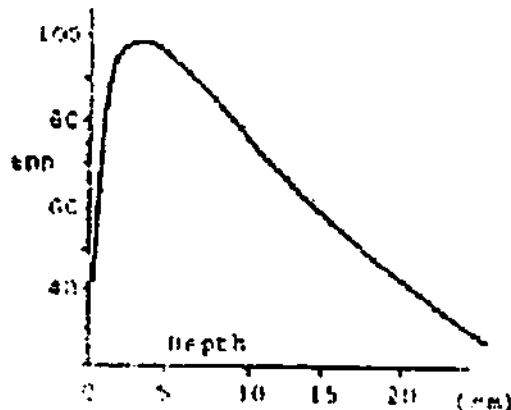
dimana konstanta A , a_1 dan a_2 bergantung pada jenis materi dan besaran yang diukur serta energi foton yang datang. J.J Taylor telah melakukan perhitungan faktor *build-up* dosis dengan menggunakan persamaan 2.5 dan dapat dilihat pada lampiran 1 (Goldstein, 1959).

2.5. Persentasi Dosis Kedalaman (PDD = Percentage Depth Dose)

Dalam dosimetri dikenal suatu istilah yang disebut dengan persentasi dosis kedalaman, dimana istilah ini penting sekali untuk menentukan kurva isodosis dari suatu sumber radiasi. PDD adalah suatu perbandingan dosis serap pada setiap kedalaman terhadap dosis serap maksimum pada suatu kedalaman tertentu. Yang secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut (Rajan, 1992):

$$PDD = \frac{D(x)}{D_{maks}(x_{ref})} * 100\% \quad (2.9)$$

Dengan x_{ref} adalah suatu kedalaman yang tertentu dimana dosis serap pada kedalaman tersebut adalah dosis serap maksimum.



Gambar 2.3 Grafik PDD untuk Co-60

Pada umumnya x_{ref} tidak terletak pada permukaan tetapi mempunyai variasi sendiri yang bergantung pada besarnya energi foton yang datang. Secara umum dapat dikatakan x_{ref} semakin dalam jika energi foton yang datang semakin besar. Peristiwa yang mengakibatkan

timbulnya x_{ref} yang tidak pada permukaan adalah akibat adanya efek partikel sekunder yang dihasilkan oleh radiasi partikel utama. Grafik PDD terhadap jarak untuk unsur Co-60 dapat dilihat pada gambar 2.3.

2.6. Simulasi Monte Carlo

Monte Carlo adalah suatu metoda simulasi yang sering digunakan untuk suatu peristiwa yang bersifat stokastik. Dalam hal ini gejala fisik yang diamati direpresentasikan dengan bilangan random yang dianalogikan dengan perilaku dari masing-masing individu yang menyebabkan gejala fisis tersebut. Untuk kasus radiasi yaitu saat gejala fisis atenuasi partikel radiasi akibat menembus materi, dengan metode monte Carlo perilaku dari masing-masing partikel radiasi tersebut direpresentasikan secara nyata, dan dalam perjalanan dari masing-masing partikel tersebut akan diamati terus sampai partikel itu lolos atau discrap oleh materi. Perilaku dari masing-masing partikel dan keadaan dari partikel tersebut selalu dikaitkan dengan bilangan random.

Penggunaan metode Monte Carlo secara penggunaannya dapat dibedakan menjadi dua bentuk yang yaitu (Wood, 1982; Lewis, 1984):

1. Analog, dalam hal ini perilaku partikel radiasi dianalogikan secara langsung dengan perilaku partikel matematik yang diatur oleh suatu program komputer.
2. Non-Analog, dalam hal ini digunakan efisiensi statistik untuk mengurangi kesalahan yang ditimbulkan oleh simulasi dari perilaku partikel radiasi tersebut.

Dalam metode Monte Carlo, cara untuk menghasilkan bilangan random yang digunakan untuk menentukan perilaku atau keadaan dari partikel radiasi merupakan suatu hal yang sangat penting. Pada setiap bahasa pemrograman memiliki fungsi yang dapat menghasilkan suatu bilangan random. Bilangan random yang dihasilkan oleh bahasa pemrograman tersebut memiliki distribusi seragam atau yang sering disebut dengan bilangan random yang memiliki distribusi kanonik (Hirayama, et al., 1999). Dalam hal ini bilangan random yang dihasilkan mempunyai nilai antara 0 dan 1, serta probabilitas keluarnya bilangan random tersebut sama.

Langkah selanjutnya yang cukup penting adalah menghasilkan suatu keadaan atau perilaku dari partikel yang dilambangkan dengan variabel x dari suatu bilangan random r .

Dalam hal ini ada dua istilah statistik yaitu fungsi rapat kebolehjadian $p(x)$ dan fungsi distribusi kebolehjadian $P(x)$ (Wood, 1982; Cashwell, 1959). Fungsi rapat kebolehjadian adalah fungsi yang menyatakan besarnya kebolehjadian suatu peristiwa x dapat terjadi. Sedangkan fungsi distribusi kebolehjadian $P(x)$ adalah fungsi yang menyatakan peluang kebolehjadian semua peristiwa yang lebih kecil dari x . Secara matematik hubungan kedua fungsi tersebut dapat dituliskan sebagai berikut :

$$P(x) = \int_0^x p(\xi) d\xi \quad (2.10)$$

Dalam penelitian ini teknik yang digunakan untuk menentukan suatu pencuplikan dari bilangan random yaitu dengan menggunakan metode inversi fungsi distribusi kebolehjadian $P(x)$. Yang dapat dituliskan sebagai berikut (Haryanto, 1996):

$$X = P^{-1}(r) \quad (2.11)$$

Dimana r adalah bilangan random yang dihasilkan oleh bahasa pemrograman.

2.7. Jalan Bebas Rata-rata

Saat partikel dilepaskan maka hal pertama yang harus diperhatikan yaitu sejauh manapartikel itu bergerak sebelum partikel mengalami interaksi dengan atom dalam materi. Jarak yang ditempuh oleh partikel sebelum berinteraksi disebut dengan jalan bebas rata-rata. Untuk menentukan jalan bebas rata-rata dari bilangan random, maka hal yang perlu diperhatikan adalah besarnya peluang terjadinya tumbukan yang pertama dalam selang l sampai $l + dl$, yang secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut (Wood, 1982; Lewis, 1984; Cashwell, 1959) :

$$P(l) = \int_0^l \exp(-\mu l') \mu dl' = 1 - \exp(-\mu l) \quad (2.12)$$

Untuk menentukan jarak bebas rata-rata l dari bilangan random maka digunakan persamaan 2.11 dan metode inversi fungsi distribusi kebolehjadian $P(x)$ sehingga diperoleh (Haryanto, 1996) :

$$l = -\frac{l}{\mu} \ln r \quad (2.13)$$

2.8. Energi Partikel Setelah Hamburan

Pada penelitian ini partikel yang diamati adalah foton sehingga interaksi hamburannya adalah interaksi compton. Pada hamburan compton hubungan antara energi yang datang dengan yang terhambur serta sudut hamburan dapat dituliskan sebagai berikut (Attix, 1986):

$$E' = \frac{E}{1 + E * (1 - \cos \theta_0)} \quad (2.14)$$

dimana E' adalah energi foton yang dihamburkan, E energi foton yang datang dan θ_0 adalah sudut hambur dari foton tersebut. E' dan E dalam satuan m_0c^2 .

Untuk menentukan E' dari bilangan random digunakan persamaan diferensial penampang hamburan Klein-Nishina yang merupakan suatu dasar untuk membentuk fungsi rapat kebolehjadian $p(x)$. Persamaan diferensial penampang hambur Klein-Nishina dapat dituliskan sebagai berikut (Attix, 1986):

$$\bar{\sigma}(E')dE' = -\frac{\pi r_0^2}{E^2} * \left\{ \frac{E'}{E} + \left(\frac{2}{E} + \frac{1}{E^2} \right) + \left(E - 2 - \frac{2}{E} \right) * \frac{1}{E'} + \left(\frac{1}{E'} \right)^2 \right\} dE \quad (2.15)$$

Dari persamaan 2.15 untuk diperoleh :

$$r = P(E') = \frac{\int_0^E \bar{\sigma}(E')dE'}{\sigma_E(\text{Compton})} \quad (2.16)$$

dimana :

$$\sigma_E(\text{Compton}) = \int_{\frac{E}{1-2E}}^{\frac{E}{1-2E}} \tilde{\sigma}(E') dE' \quad (2.17)$$

Penyelesaian persamaan 2.16 dapat dilakukan dengan pendekatan Carlson diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$E' = \frac{E}{1 + sr + (2E - s)r^2} \quad (2.18)$$

Dengan $s = E/(1 + 0.5625 E)$. Pada persamaan 2.18 energi foton yang datang harus lebih kecil atau sama dengan 2 MeV. Untuk energi foton yang datang lebih besar dari 2 MeV dan lebih kecil atau sama dengan 10 MeV, maka pada persamaan 2.18 harus ditambahkan suku sebagai berikut :

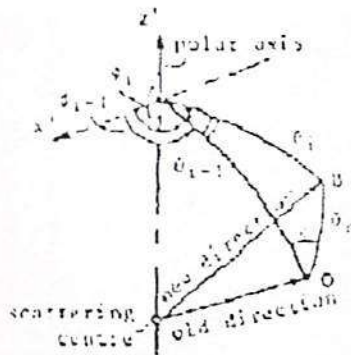
$$0.5 (E - 4)r^2 (1 - r)^2 \quad (2.19)$$

Sedang untuk menentukan θ_0 sudut hamburan dari foton tersebut dengan energi datang E dan energi yang terhambur E', dari persamaan 2.14 diperoleh:

$$\cos \theta = 1 - 1/E' + 1/E \quad (2.20)$$

2.9. Arah Foton Setelah Terhambur

Foton setelah mengalami interaksi akan terhambur dan mengalami perubahan arah dalam arah gerakannya. Penentuan perubahan arah terhadap arah semula dapat dilihat pada gambar 2.4.



Gambar 2.4. Segitiga Bola yang terbentuk oleh arah foton datang dengan arah foton terhambur.

Pada gambar 2.4 terlihat saat foton terhambur dengan sudut θ_0 dan ϕ terhadap arah semula. Arah baru (θ_1 dan ϕ_1) ditentukan yang sesuai dengan sistem koordinat yang digunakan adalah dengan menggunakan prinsip-prinsip trigonometri yang berlaku bagi segitiga bola.

Untuk menentukan $\cos \theta_1$ berdasarkan aturan cosinus untuk segitiga bola OAB pada gambar 4, maka diperoleh hubungan sebagai berikut :

$$\cos \theta_1 = \cos \theta_{i-1} \cos \theta_0 + \sin \theta_{i-1} \sin \theta_0 \cos \phi \quad (2.21)$$

Sedangkan untuk menentukan $\sin \theta_1$ dapat diperoleh dari aturan identitas trigonometri sebagai berikut :

$$\cos^2 \theta_1 + \sin^2 \theta_1 = 1 \quad (2.22)$$

Dalam penentuan $\cos \phi_1$ dan $\sin \phi_1$ digunakan aturan sinus sebagai berikut :

$$\sin (\phi_1 - \phi_{i-1}) = \sin \theta_0 \sin \phi / \sin \theta_1 \quad (2.23)$$

Dan aturan cosinus :

$$\cos \theta_0 = \cos \theta_{i-1} \cos \theta_1 + \sin \theta_{i-1} \sin \theta_1 \cos (\phi_1 - \phi_{i-1}) \quad (2.24)$$

Serta dengan menggunakan perumusan standar dalam trigonometri, maka diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$\sin \phi_i = \sin (\phi_i - \phi_{i-1}) \cos \phi_{i-1} + \cos (\phi_i - \phi_{i-1}) \sin \phi_{i-1} \quad (2.25)$$

Dan

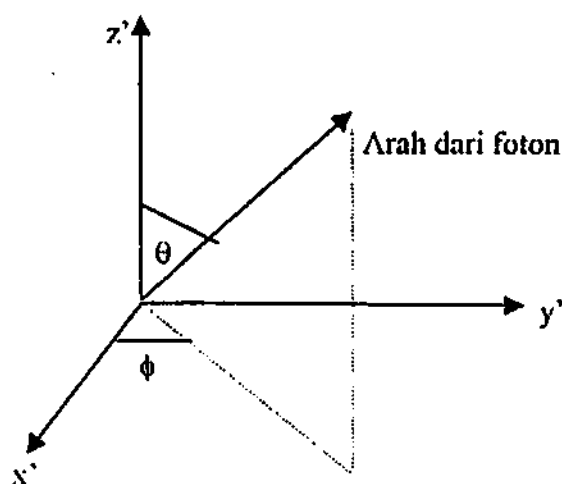
$$\cos \phi_i = \cos (\phi_i - \phi_{i-1}) \cos \phi_{i-1} - \sin (\phi_i - \phi_{i-1}) \sin \phi_{i-1} \quad (2.26)$$

Penentuan sudut ϕ saat terjadi hamburan dilakukan dengan menggunakan asumsi bahwa dalam distribusi peluang dalam menentukan sudut ϕ adalah homogen, maka untuk menentukan sudut ϕ dapat ditulis sebagai berikut :

$$r = \int_0^{\phi} \frac{d\phi}{2\pi} = \frac{\phi}{2\pi} \quad (2.27)$$

2.10. Posisi Dari Foton

Untuk menentukan posisi dari foton, maka sistem koordinat dari materi yang diambil dalam simulasi ini memegang peranan penting. Dalam penelitian ini, sistem koordinat dari materi berupa sisten koordinat bola, yang dapat dilihat pada gambar 2.5 (Wood, 1982; Lewis, 1984; Cashwell, 1959).



Gambar. 2.5. Sistem Kordinat Bola

Untuk menentukan posisi foton dalam materi berdasarkan sistem koordinat untuk setiap kali terjadi tumbukan dipergunakan persamaan berikut, dengan X_0 , Y_0 dan Z_0 adalah koordinat awal :

$$\begin{aligned} X &= X_0 + l \sin \theta \cos \phi \\ Y &= Y_0 + l \sin \theta \sin \phi \\ Z &= Z_0 + l \cos \theta \end{aligned} \quad (2.28)$$

2.11. Laju Dosis Serap

Dalam metoda Monte Carlo setiap kali terjadi suatu peristiwa akan disertai dengan penilaian suatu besaran tertentu. Untuk penelitian ini besaran tersebut adalah laju dosis serap dari foton. Seperti dalam persamaan (2.6) bahwa besarnya laju dosis serap ditentukan oleh besarnya fluks dan energi yang datang pada setiap peristiwa. Dalam hal ini penentuan laju dosis serap untuk suatu peristiwa ke i pada suatu lapisan tertentu adalah sebagai berikut :

$$\text{LajuDosisSerap} = \sum_i \left(\frac{\mu_0(E_i)}{\rho} \right) E_i w_i \Phi_i \quad (2.29)$$

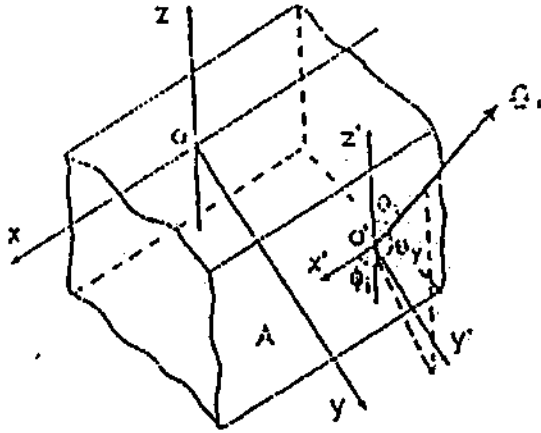
dengan w_i adalah faktor bobot yang didefinisikan sebagai berikut :

$$w_i = (\mu_c(E) / \mu(E)) * w_{i-1} \quad (2.30)$$

Pada kondisi awal faktor bobot mempunyai nilai satu.

Dari persamaan 2.29 besarnya fluks (Φ_i) dari foton dapat dilihat pada gambar 2.6. Berdasarkan gambar 2.6 tersebut maka Φ_i dari foton dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\Phi_i = 1 / \sin \theta_i \sin \phi_i \quad (2.31)$$



Gambar 2.6. Skema penentuan dari arah fluks

BAB III

TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN

3.1. Tujuan penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah ,

1. Membuat perangkat lunak penghitungan laju dosis serap dari sumber radiasi pemancar foton dengan metode Monte Carlo.
2. Menentukan persentasi dosis kedalaman dan faktor *build-up* dosis.
3. Membandingkan laju dosis serap dari sumber radiasi pemancar foton hasil penghitungan dengan metode Monte Carlo dengan hasil pengukuran phantom air.

3.2. Manfaat penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat menjadi langkah awal pembuatan perangkat lunak untuk memprediksi dosis serap dan laju dosis serap radiasi yang diterima oleh suatu materi.

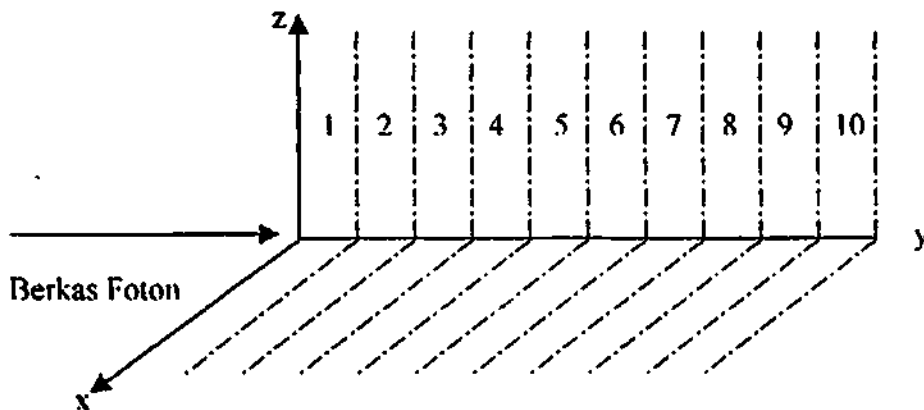
BAB IV

METODE PENELITIAN

4.1. Sumber Radiasi

Sumber radiasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah Cobalt-60 yang meluruh dengan memancarkan foton dengan energi 1,33 MeV dan 1,17 MeV. Energi sumber radiasi yang digunakan dalam perhitungan adalah energi rata-rata yaitu 1,25 MeV (Wood, 1982).

Bentuk geometri dari sumber radiasi dalam penelitian ini adalah sumber radiasi berbentuk bidang satu arah (*plane mono directional*), yaitu sumber memancarkan berkas foton pada satu arah yang tegak lurus terhadap permukaan materi. Sedangkan bentuk geometri dari materi adalah bentuk balok dengan dua sisi tak berhingga (xz) dan sisi yang lain (y) berhingga yang terdiri dari sepuluh daerah dengan panjang yang sama. Adapun bahasa pemrograman yang digunakan adalah Turbo Pascal.



Gambar 4.1. Bentuk geometri dari sumber dan materi

4.2. Algoritma Untuk Berkas Sempit

Pada berkas sempit asumsi yang digunakan adalah saat foton mengalami interaksi, foton akan lenyap dan perjalanan foton hanya dihitung sekali. Dalam berkas sempit terdapat tiga bagian yang perlu diperhatikan yaitu (Haryanto, 1999):

- Masukan

Masukan digunakan untuk menentukan jumlah foton dan energi awal dari foton

- Penentuan jalan bebas rata-rata

Bagian ini digunakan untuk menentukan posisi dari foton tersebut dalam materi untuk menghitung dosis serap. Besarnya jalan bebas rata-rata diperoleh dari persamaan 2.13.

- Penentuan laju dosis serap

Penentuan laju dosis serap menggunakan persamaan 2.29 Sesuai dengan asumsi yang digunakan, dalam hal ini fluks dan faktor bobot selalu bernilai satu. Penentuan laju dosis serap untuk kesepuluh daerah masing-masing pada materi berdasarkan jalan bebas rata-ratanya.

4.3. Algoritma Untuk Berkas Lebar

Asumsi yang digunakan untuk berkas lebar adalah setiap interaksi yang terjadi merupakan interaksi Compton dan setiap terjadi interaksi maka faktor bobot akan berkurang. Hal-hal yang perlu diperhatikan untuk berkas lebar adalah : energi yang dimiliki oleh foton mempunyai nilai bawah energi minimum. Dalam hal ini energi minimum tersebut adalah suatu energi yang dimiliki oleh foton sehingga peluang terjadinya interaksi Compton sangat kecil, dan foton telah menembus materi (Haryanto, 1999).

Algoritma untuk berkas lebar terdiri dari :

- Masukan

Masukan meliputi besarnya energi awal foton, energi minimum, jumlah foton yang diamati, dan faktor pengali yang menentukan panjang masing-masing daerah pada materi.

- Kondisi awal

Bagian ini meliputi kondisi-kondisi awal foton saat foton keluar dari sumber yaitu : arah foton dari sumber tegak lurus bidang xz atau sejajar sumbu y, faktor bobot berharga awal satu, dan pencacah untuk menentukan laju dosis serap dimulai dengan angka satu.

- Perjalanan foton

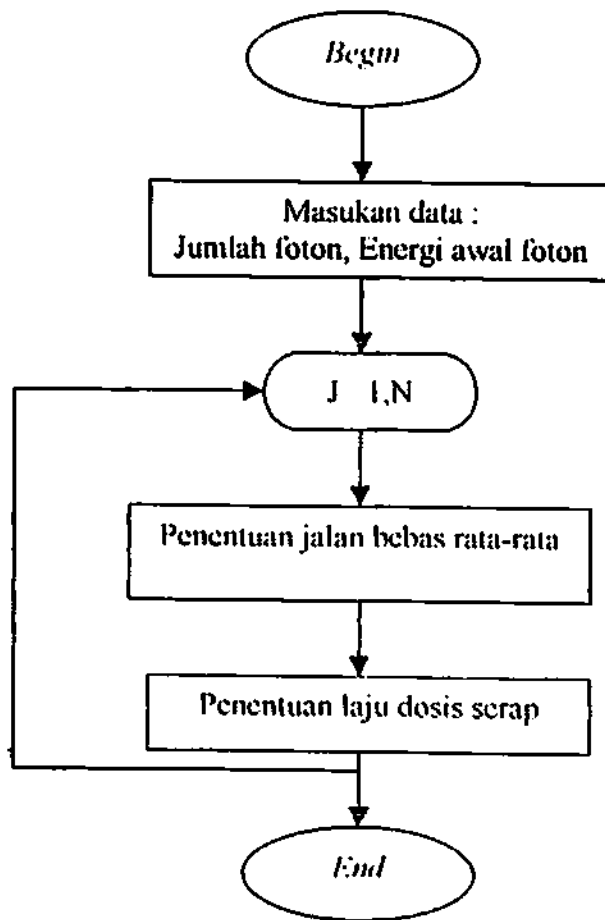
Perjalanan foton diikuti satu persatu sejak foton keluar dari sumber meliputi :

- penentuan jalan bebas rata-rata dari foton, sama seperti pada berkas sempit dan penentuan posisi foton setelah mengalami interaksi menggunakan persamaan 2.28.
- penentuan energi setelah interaksi menggunakan persamaan 2.18 dan penentuan faktor bobot menggunakan persamaan 2.30.
- penentuan sudut-sudut setelah interaksi menggunakan persamaan 2.20.

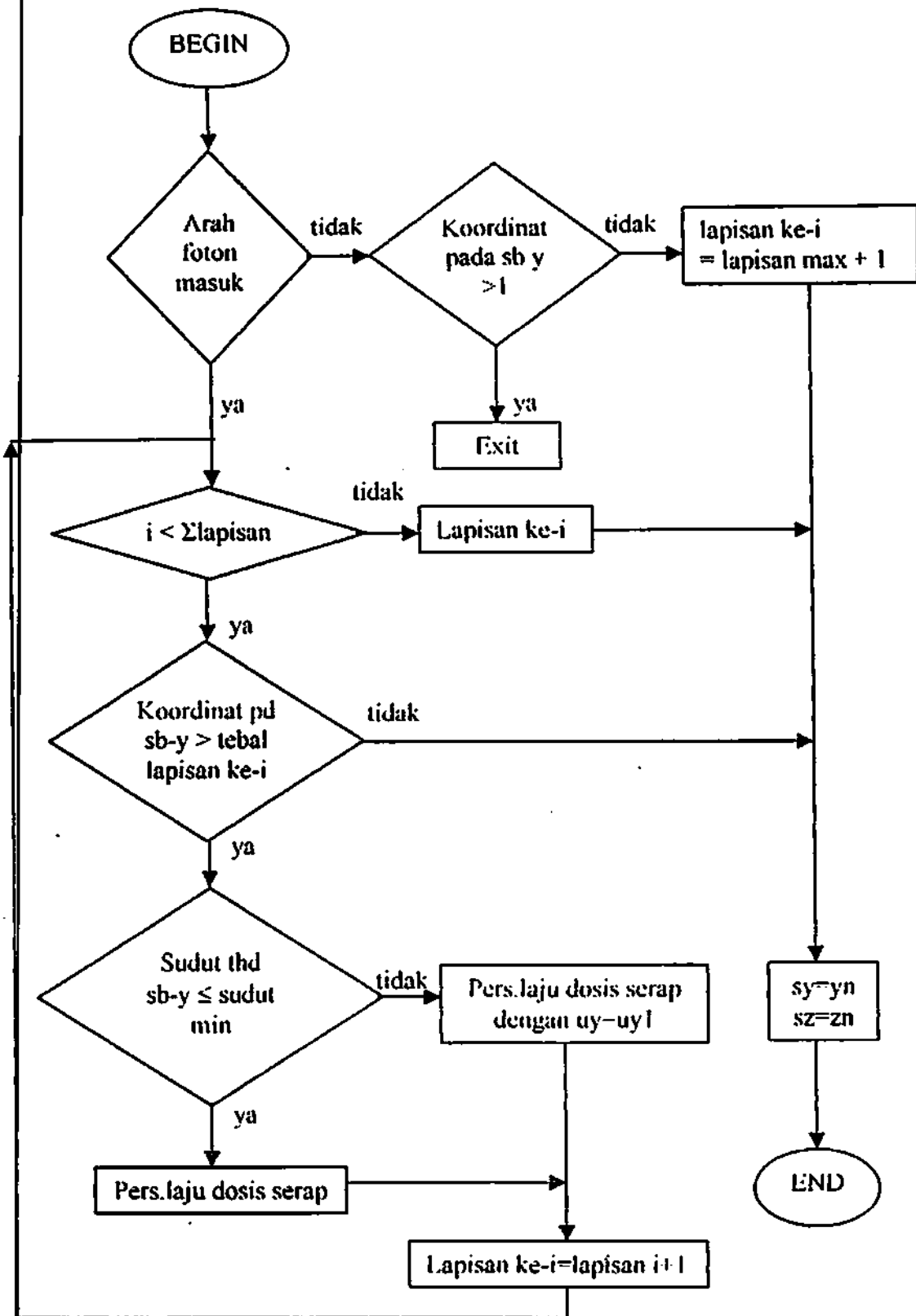
Penentuan laju dosis serap

Penentuan laju dosis serap menggunakan persamaan 2.29 dengan besarnya nilai fluks tak berhingga jika $\sin \theta$ dan $\sin \phi$ bernilai nol, sehingga perlu suatu batas nilai tertentu agar perkalian dari $\sin \theta$ dan $\sin \phi$ (uy) tidak nol. Nilai perkalian tersebut dibawah nilai batas atau sama dengan nilai batas.

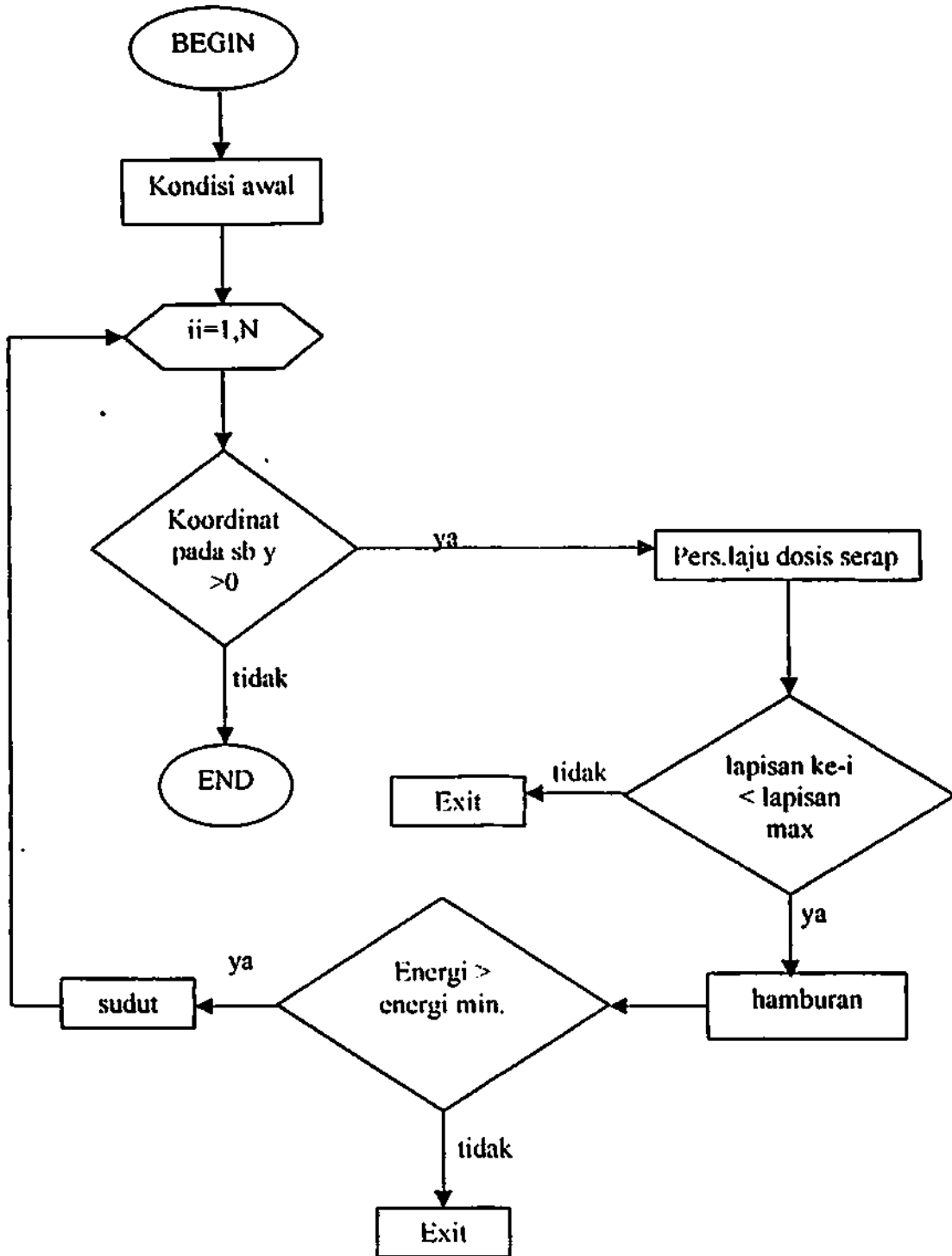
Diagram alir penentuan dosis serap dan laju dosis serap untuk berkas sempit dan berkas lebar ditunjukkan oleh gambar berikut :



Gambar 4.2. Diagram alir penentuan laju dosis serap untuk berkas sempit



Gambar 4.3. Diagram alir untuk menentukan laju dosis serap pada tiap daerah untuk berkas lebar



Gambar 4.4. Diagram alir untuk menentukan laju dosis serap dengan hamburan Compton untuk berkas lebar

BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1. Hasil

Berdasarkan program dengan metode Monte Carlo diperoleh data laju dosis serap dalam bentuk PDD (*Percentage Depth Dose* = persentasi dosis kedalaman) untuk berkas sempit dan berkas lebar. Untuk berkas lebar diperoleh data faktor *build-up* dosis untuk berbagai jarak dan laju dosis serap dalam bentuk PDD. Tiap data merupakan hasil rata-rata dari 10 kali pengulangan.

Tabel 5.1 dan 5.2 merupakan hasil penghitungan PDD dan faktor *build-up* dosis dengan metode Monte Carlo dari sumber radiasi Co-60 dengan variasi tiga macam jumlah partikel, dan PDD menurut teori Lambert. Tabel 5.3, 5.4, dan 5.5 menunjukkan hasil penghitungan laju dosis serap dan faktor *build-up* dosis dengan metode Monte Carlo dari sumber radiasi Co-60 dengan energi foton 1,25 MeV, 0,5 MeV, dan 0,1 MeV.

Ketebal-an	Teori Lambert (PDD)	Monte Carlo (PDD)		
		N = 10 ⁴	N = 10 ⁵	N = 10 ⁶
		Rata-rata* ± SD	Rata-rata* ± SD	Rata-rata* ± SD
1	36,788	37,176 ± 0,4312	37,3166 ± 0,1261	37,3119 ± 0,0503
2	13,534	13,939 ± 0,3132	13,9124 ± 0,0662	13,9209 ± 0,0314
3	4,979	5,235 ± 0,1783	5,1592 ± 0,0540	5,1988 ± 0,0197
4	1,832	2,009 ± 0,1147	1,9257 ± 0,0483	1,9432 ± 0,0132
5	0,6738	0,747 ± 0,0704	0,7258 ± 0,0425	0,7280 ± 0,0065
6	0,2479	0,2966 ± 0,0528	0,2690 ± 0,0160	0,2722 ± 0,0060
7	0,0912	0,111 ± 0,0264	0,1006 ± 0,0121	0,1011 ± 0,0041
8	0,034	0,04 ± 0,0141	0,0341 ± 0,0067	0,0377 ± 0,0023
9	0,012	0,017 ± 0,0082	0,0122 ± 0,0025	0,0145 ± 0,0013
10	0,0045	0,007 ± 0,0082	0,0049 ± 0,0016	0,0056 ± 0,0013

* replikasi 10 kali

Tabel 5.1. PDD berdasarkan teori Lambert dan hasil penghitungan dengan metode Monte Carlo dari sumber radiasi Co-60 untuk berkas sempit

Ketebal-an	Teori	Monte Carlo (Faktor <i>build-up</i> dosis)		
		N = 10 ⁴	N = 10 ⁵	N = 10 ⁶
		Rata-rata* ± SD	Rata-rata* ± SD	Rata-rata* ± SD
1	2,155	1,789 ± 0,031	1,790 ± 0,003	1,791 ± 0,002
2	3,200	2,669 ± 0,020	2,669 ± 0,006	2,676 ± 0,007
3	4,486	3,703 ± 0,075	3,661 ± 0,019	3,658 ± 0,007
4	5,773	4,720 ± 0,087	4,722 ± 0,010	4,741 ± 0,027
5	7,303	5,976 ± 0,302	5,925 ± 0,065	5,907 ± 0,004
6	8,834	7,295 ± 0,305	7,259 ± 0,047	7,206 ± 0,055
7	10,365	8,918 ± 0,947	8,384 ± 0,262	8,463 ± 0,042
8	12,233	9,637 ± 1,246	9,555 ± 0,568	9,739 ± 0,139
9	14,100	10,385 ± 0,470	10,244 ± 0,174	11,375 ± 0,236
10	15,968	14,209 ± 3,207	11,860 ± 0,079	12,852 ± 0,448

Tabel 5.2. Faktor *build-up* dosis secara teori menurut persamaan 2.8 dan hasil penghitungan dengan metode Monte Carlo dari sumber radiasi Co-60 untuk berkas lebar

Ketebalan (cm)	Monte Carlo	
	Laju dosis serap	Faktor <i>build-up</i> dosis
	Rata-rata* ± SD	Rata-rata* ± SD
2,7	96,0826 ± 0,03538	1,1389 ± 0,00042
5,3	90,2564 ± 0,02722	1,2681 ± 0,00038
8	83,9754 ± 0,04032	1,3984 ± 0,00067
10,6	77,6029 ± 0,04668	1,5318 ± 0,00092
13,3	71,2820 ± 0,05099	1,6677 ± 0,00119
15,9	65,1777 ± 0,06695	1,8075 ± 0,00186
18,6	59,3278 ± 0,05914	1,9501 ± 0,00194
21,2	53,8124 ± 0,07976	2,0967 ± 0,00311
23,9	48,6461 ± 0,07270	2,2466 ± 0,00336
26,5	43,8316 ± 0,06415	2,3933 ± 0,00351

Tabel 5.3. Laju dosis serap dan faktor *build-up* dosis untuk sumber Co-60 dengan energi 1,25 MeV

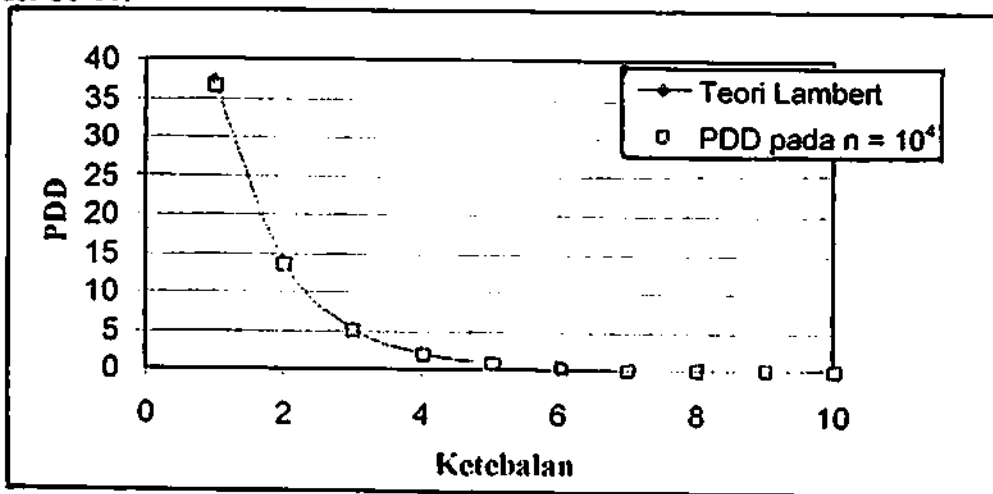
Ketebalan (cm)	Monte Carlo	
	Laju dosis serap	Faktor <i>build-up</i> dosis
	Rata-rata* \pm SD	Rata-rata* \pm SD
2,6	97,6674 \pm 0,06421	1,2541 \pm 0,00082
5,2	90,8126 \pm 0,03861	1,4973 \pm 0,00064
7,7	82,8199 \pm 0,08026	1,7533 \pm 0,00170
10,3	74,5275 \pm 0,08366	2,0259 \pm 0,00227
12,9	66,4044 \pm 0,07280	2,3177 \pm 0,00254
15,5	58,7352 \pm 0,05122	2,6323 \pm 0,00230
18,1	51,5338 \pm 0,06521	2,9656 \pm 0,00375
20,6	44,9125 \pm 0,05052	3,3186 \pm 0,00373
23,2	38,9641 \pm 0,08081	3,6968 \pm 0,00767
25,8	33,6216 \pm 0,05434	4,0960 \pm 0,00662

Tabel 5.4. Laju dosis serap dan faktor *build-up* dosis untuk sumber Co-60 dengan energi 0,5 MeV

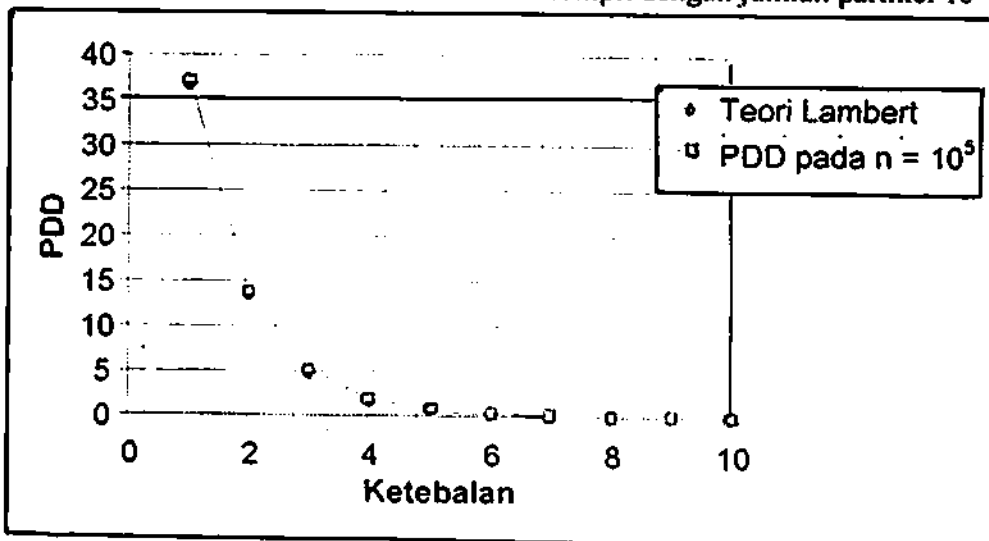
Ketebalan (cm)	Monte Carlo	
	Laju Dosis serap	Faktor <i>build-up</i> dosis
	Rata-rata* \pm SD	Rata-rata* \pm SD
2,6	104,4447 \pm 0,16149	1,6380 \pm 0,00253
5,3	96,0000 \pm 0,11420	2,3612 \pm 0,00281
7,9	84,2115 \pm 0,15491	3,2484 \pm 0,00598
10,5	71,4183 \pm 0,09170	4,3206 \pm 0,00555
13,2	59,0153 \pm 0,07877	5,5992 \pm 0,00747
15,8	47,7185 \pm 0,09743	7,1003 \pm 0,01450
18,4	37,8857 \pm 0,06072	8,8410 \pm 0,01417
21,2	29,6077 \pm 0,08433	10,8359 \pm 0,03086
23,7	22,8779 \pm 0,05853	13,1314 \pm 0,03359
26,3	17,4672 \pm 0,04113	15,7235 \pm 0,03703

Tabel 5.5. Laju dosis serap dan faktor *build-up* dosis untuk sumber Co-60 dengan energi 0,1 MeV

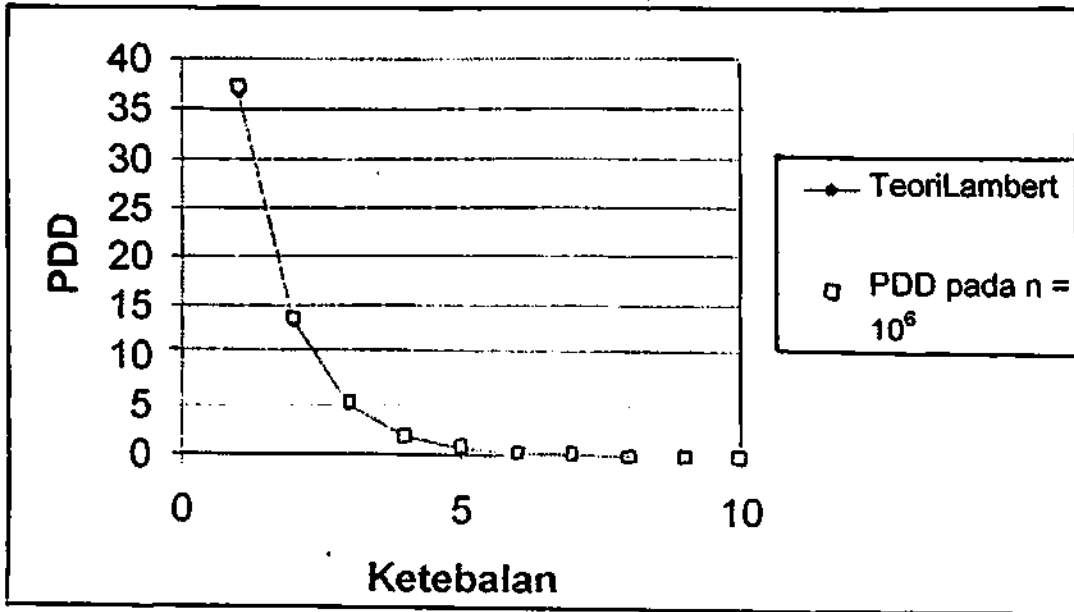
Grafik 5.1 sampai 5.3 menunjukkan hubungan antara PDD hasil penghitungan dengan metode Monte Carlo untuk berkas sempit dari masing-masing jumlah partikel dan menurut teori Lambert versus ketebalan/kedalaman. Sedangkan grafik 5.4 sampai 5.6 menunjukkan hubungan antara faktor *build-up* dosis hasil penghitungan dengan metode Monte Carlo untuk berkas lebar dari masing-masing jumlah partikel dan menurut teori versus ketebalan/kedalaman. Grafik 5.7 menunjukkan kurva laju dosis serap versus kedalaman untuk sumber radiasi Co-60 hasil penghitungan dengan metode Monte Carlo dibandingkan dengan hasil pengukuran menggunakan phantom air (Utami, 1996). Grafik 5.8 dan 5.9 menunjukkan kurva laju dosis serap dan faktor *build-up* dosis versus ketebalan untuk ketiga macam energi (1,25 MeV, 0,5 MeV, dan 0,1 MeV) dari sumber radiasi Co-60.



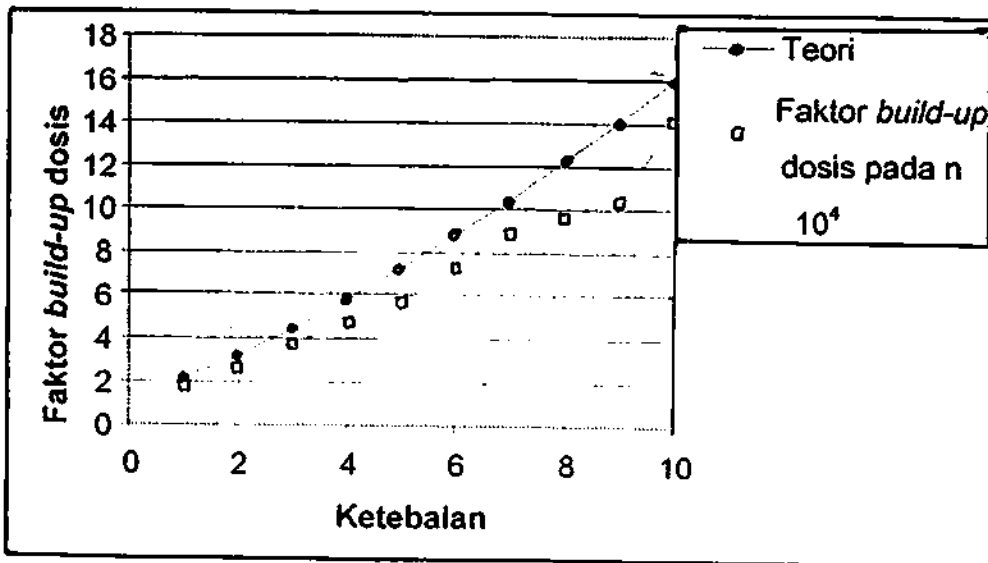
Grafik 5.1 Kurva PDD untuk berkas sempit dengan jumlah partikel 10^4



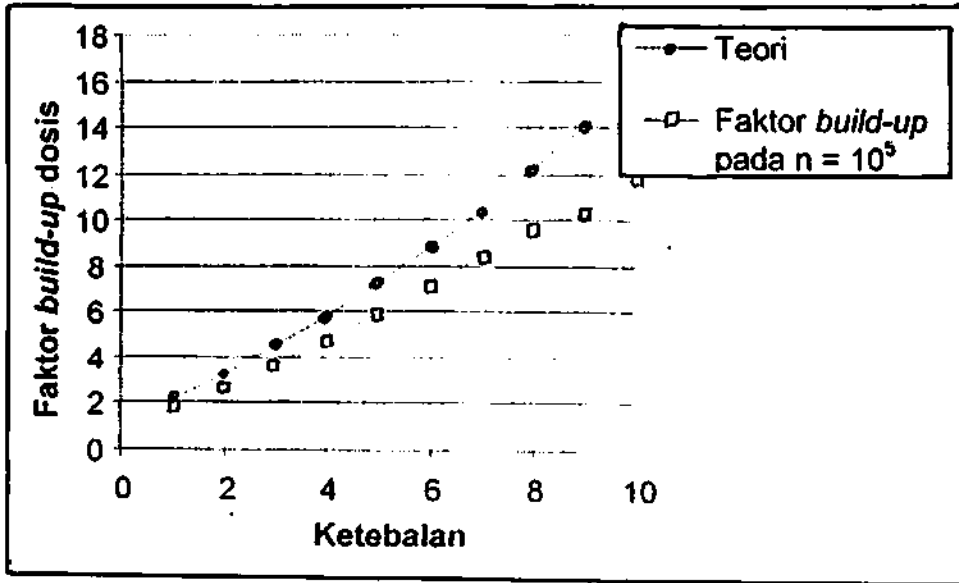
Grafik 5.2 Kurva PDD untuk berkas sempit dengan jumlah partikel 10^5



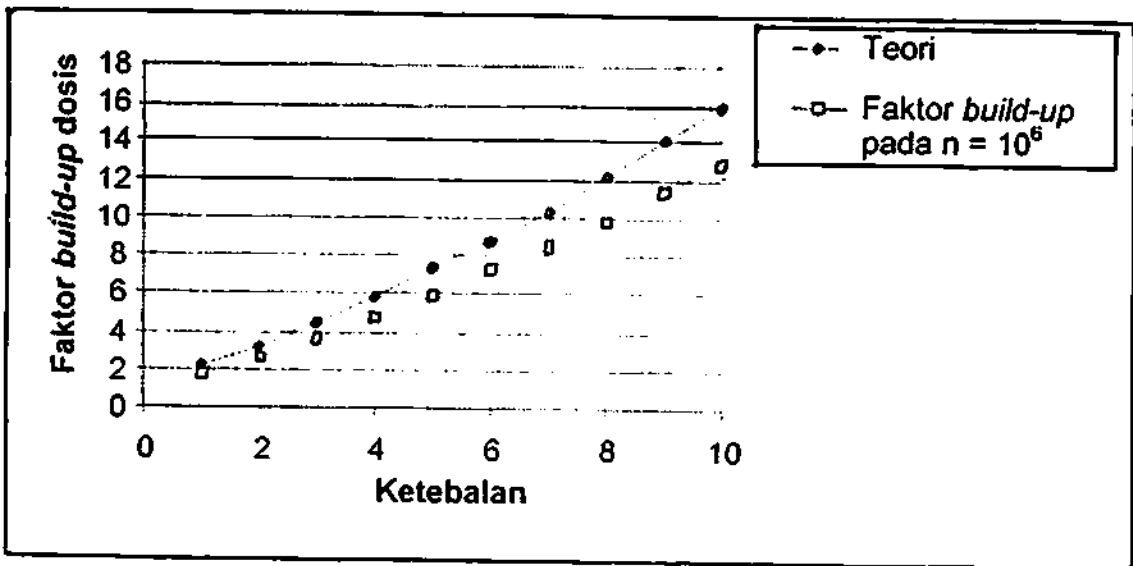
Grafik 5.3 Kurva PDD untuk berkas sempit dengan jumlah partikel 10^6



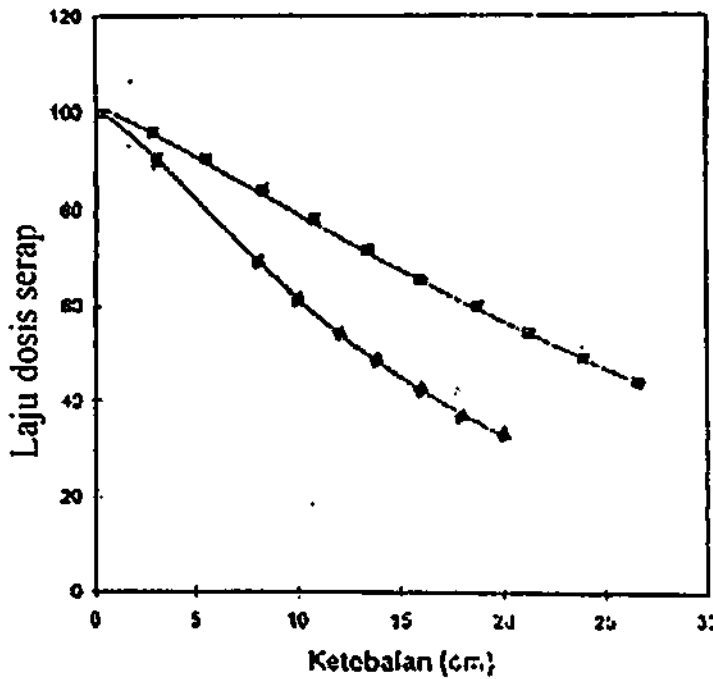
Grafik 5.4. Kurva faktor *build-up* dosis untuk berkas lebar dengan jumlah partikel 10^4



Grafik 5.5. Kurva faktor *build-up* dosis untuk berkas lebar dengan jumlah partikel 10^5



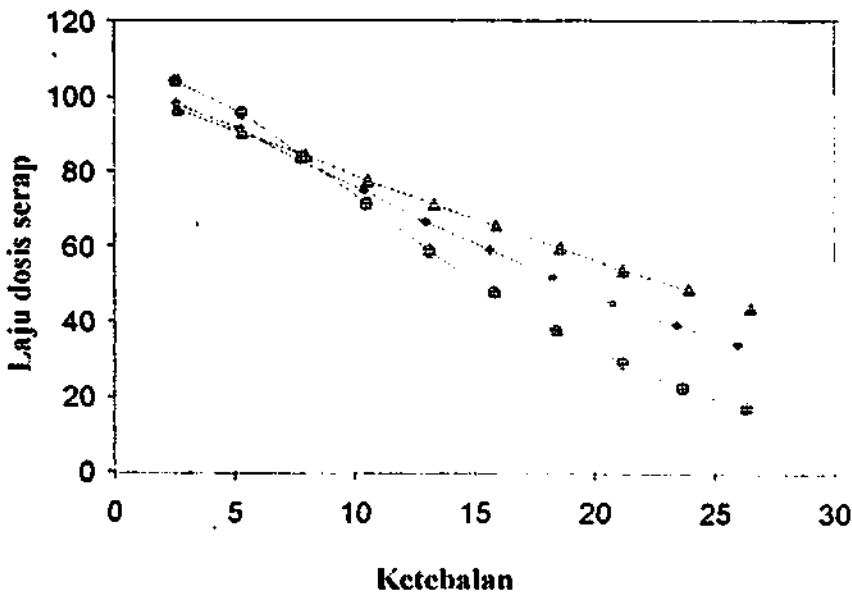
Grafik 5.6. Kurva faktor *build-up* dosis untuk berkas lebar dengan jumlah partikel 10^6



Keterangan :

- ◆ Laju dosis serap hasil simulasi
- Laju dosis serap hasil pengukuran phantom air

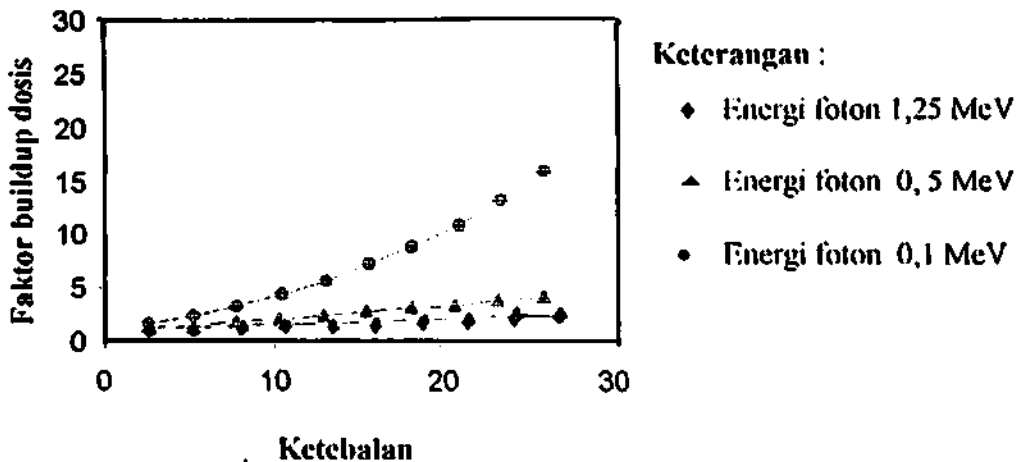
Grafik 5.7. Kurva laju dosis serap untuk sumber radiasi Co-60 hasil simulasi dengan metode Monte Carlo dan hasil pengukuran dengan Phantom Air



Keterangan :

- ▲ Energi foton 1,25 MeV
- ◆ Energi foton 0,5 MeV
- Energi foton 0,1 MeV

Grafik 5.8. Kurva laju dosis serap hasil simulasi dengan metode Monte Carlo pada energi foton 1,25 MeV, 0,5 MeV, dan 0,1 MeV



Grafik 5.9 Kurva faktor *build-up* dosis hasil simulasi dengan metode Monte Carlo pada energi foton 1,25 MeV, 0,5 MeV dan 0,1 MeV

5.2. Pembahasan

Dari grafik 5.1 sampai 5.3 terlihat bahwa PDD untuk sumber radiasi Co-60 hasil penghitungan dengan metode Monte Carlo untuk berkas sempit pada masing-masing jumlah partikel mendekati PDD menurut teori Lambert. Jumlah partikel 10^6 mempunyai standar deviasi terkecil.

Dari grafik 5.4 sampai 5.6 terlihat bahwa faktor *build-up* dosis untuk sumber radiasi Co-60 hasil penghitungan dengan metode Monte Carlo untuk berkas lebar berbeda dengan teori, tetapi mempunyai kecenderungan bentuk kurva yang sama. Kurva dengan jumlah partikel 10^6 mempunyai standar deviasi terkecil, menunjukkan hasil kurva yang mendekati teori (Goldstein, 1959)

Kurva laju dosis serap menurut hasil penghitungan dengan metode Monte Carlo dan hasil pengukuran dengan phantom air (Utami, 1996) pada grafik 5.7 menunjukkan perbedaan terutama dalam penentuan kedalaman maksimum. Dari hasil penghitungan nampak bahwa dosis serap maksimum terjadi pada permukaan materi, sedang dari pengukuran phantom air, dosis serap maksimum terjadi pada kedalaman 0,5 cm dari permukaan materi. Adanya perbedaan kedalaman dosis serap ini disebabkan karena dalam penghitungan dengan metode Monte Carlo hanya foton saja yang diperhitungkan (kondisi

kesetimbangan partikel bermuatan), sedangkan elektron atau partikel radiasi sekunder tidak diperhitungkan (ICRU, 1992; Haryanto, 1996)

Grafik 5.8 menunjukkan bahwa untuk energi sumber radiasi yang semakin besar maka kurva PDD-nya semakin melebar. Hal ini sesuai teori bahwa semakin besar energi sumber radiasi maka kurva PDD semakin melebar.

Dari Grafik 5.9 terlihat bahwa faktor *build-up* dosis bergantung pada besarnya energi foton dari sumber radiasi. Hal ini sesuai dengan hasil penghitungan J.J. Taylor bahwa energi foton yang semakin kecil akan menghasilkan faktor *build-up* dosis yang semakin besar (Goldstein, 1959).



BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. Kesimpulan

Dari hasil penghitungan program dengan metode Monte Carlo dan analisisnya maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Perangkat lunak dengan metode Monte Carlo dapat digunakan untuk menghitung laju dosis serap dari sumber ion pemancar foton
2. Persentasi dosis kedalaman dan faktor *build-up* dosis hasil penghitungan dengan metode Monte Carlo untuk jumlah partikel 10^6 mempunyai standar deviasi terkecil dan grafiknya mendekati persentasi dosis kedalaman dan faktor *build-up* dosis menurut teori. Faktor *build-up* dosis bergantung besarnya energi foton dari sumber radiasi dimana energi foton yang semakin kecil maka faktor *build-up* dosis akan semakin besar.
3. Laju dosis serap dari hasil penghitungan dengan metode Monte Carlo pada kondisi kesetimbangan partikel (yang hanya memperhatikan gerak foton) berbeda dengan hasil pengukuran dengan phantom air terutama pada kedalaman dosis serap maksimum.

6.2. Saran

Penelitian ini dapat dikembangkan dengan memperhatikan elektron yang terhambur akibat interaksi Compton. Dari penambahan ini diharapkan hasil penghitungan persentasi dosis kedalaman sesuai dengan pengukuran dengan phantom air.

DAFTAR PUSTAKA

1. Attix.F.H., 1984, **Introduction To Radiological Physics And Radiation Dosimetry**, John Wiley & Sons
2. Cashwell E.D., Everett.C.J., 1959, **Monte Carlo Method For Random Walk Problem**, Pergamon Press
3. Goldstein, H., 1959, **Fundamental Aspects of Reactor Shielding**, Addison Wesley
4. Govinda Rajan, K.N., 1992, **Advanced Medical Radiation Dosimetry**, Prentice Hall of India Private Limited
5. Haryanto, F., 1996, **Metode Monte Carlo untuk penentuan Faktor Buildup Dosis dan Persentasi Dosis Kedalaman dari Sumber Radiasi Co60**, Tesis Pasca Sarjana ITB, Bandung
6. Hirayama H. et. al., 1999, **EGS4 Shower Display System EGS4PICT(2), Windows Version**, KEK (High Energy Accelerator Research Organization) Journal, Ibaraki-Japan
7. ICRU Report 46, **Photon, Electron, Proton And Neutron Interaction Data For Body Tissues**, 1992
8. Kaze. W.R. Nelson, 1978, **Concepts of Radiation Dosimetry**, Pergamon Press
9. Lewis, E.E, 1984, **Computational Methods of NeutronTransport**, John Wiley & Son
10. Turner, 1986, **Monte Carlo Primer for Health Physical**, Health Physics, 48:717
11. Utami, T., 1996, **Penentuan Isodosis Pada Teleterapi Untuk Iradiasi Satu Arah Dalam Perencanaan Radioterapi**, Pasca-Sarjana ITB
12. Wood, J., 1982, **Computational Methods In Reactor Shielding**, Pergamon Press

LAMPIRAN

LAMPIRAN II

PROGRAM MONTE CARLO UNTUK BERKAS SEMPT

Program Jabera:

Uses

Crt;

Var

i,n : integer;

j,m: longint;

r1,r2,b,d :real;

cek : boolean;

c : array[1.. 100] of real;

a : array[1.. 100] of longint

Begin

Randomize;

Clrscr;

a[1] := 0;n := 10;m :=10000000;

for i := 1 to n do

Begin

 c[i] := i/0.0632;

 a[i] :=0;

end;

For j := 1 to m do

Begin

 r2 := random;

 b := - ln(r2)/0.0632;

 i:= 1;cek =false;

 repeat

 If(b >= c[i]) then

 Begin

 a[i] := a[i] + 1;

 i:=i + 1;

 end

 else

 cek := true;

 until (i>n) or (cek = true);

 end;

d :=0;

clrscr;

for i := 1 to n do

Begin

```
d :=d+a[i];  
Writeln('A['.i.']= ',a[i]/m:10:5);  
If(i = 24) or (i = 48) or (i = 72) or (i = 96) then readln;  
end  
Writeln('Total = ',d/m:10:5);  
readln;  
end.
```

LAMPIRAN II

PROGRAM MONTE CARLO UNTUK BERKAS LEBAR

```

{ R+}
Program Fluks;
uses
  crt;
Type
  indeks= 1..20;
  data = Array [indeks] of real;
  koef =Array fl..4.indeksj of real;
  Matriks Array [1..20,1..20] of real;
  data1 = arrayfl..1307] of real;
  data2 array[1..360] of real;
var
  n,nl Integer;
  zz.surva.mhuta,mhuaajaz: real;
  xx,eb,wxx l .~y1,b.h~drsq,alsq,mhuc: Data;
  mhua,inhul.surv : data; c.c1,c2.c3 : Koef;
  sch,cch : data2;
  x,y,z,fr,fl.eph,eph1 Matriks;
  tanda,objmaks~kmaks.men,jbjat: Integer;
  d.kons,emaks,emin.dnorm,uyl,psl,pcsr,c.ctWsth,cph.sph.com Real;
  det,rho,conb.conz,pcap,plen.~' min.wmaks.ch.w.p.sv.sz.uz.uv: Real;
  yn~zn,som,abair,atmax,dosr,dosl: real;
  cimaks. imaks.ii.fkel: longint;
  f: text;
Procedure enter;
var
  pesan: string[50];
  h :integer;
begin
  pesan := 'Tekan <Enter>';
  h :=78 - length(pesan);
  gotoxy(h,24):write(pesan);
  repeat until readkey #13;
  clrscr;
end;

Procedure input( Var xx,yy,surv,b,h,mhua,mhut,mhuc.cb data;
  var n,jbmaks.kmaks,men : integer;
  var emaks,emin,dnorm,uyl,rho,conz.conb :real;
  var imaks: longint);
var

```



```

i1: integer:
Begin
Clrscr:
{Emaks := 1.25;
Emin :=0.019;}
Write('Jumlah foton yang diamati = ');readln(lmaks);
write(Energi maksimum foton = ');readln(emaks);
Write('Energi minimum foton ');readln(emin);
Jbmaks :=10;
Rho:=1
UYL 0.005;
conb :=0.033427;
conz := 10;
n :=17;
enter;
mhut[1] := 1.67;
mhuc[1] :=0.17;
eb[1]:=0.015;
mhut[2]:= 0.810;
mhuc[2]:=0.177;
eb[2] :=0.020;
mhut[3]:= 0.376;
mhuc[3]:=0.183;
eb[3]:=0.030;
mhut[4]:= 0.268;
mhuc[4]:=0.183;
eb[4] := 0.040;
mhut := 0.227;
mhuc[5] :0.1800;
eb[5] : 0.050;
mhut[6] := 0.206;
mhuc[6] :=0.177;
eb[6] :=0.060;
mhut[7]:0.184;
mhuc[ 7] := 0.170;
eb[7] := 0.080;
mhut[8] := 0.1710;
mhuc[8] := 0.1630;
eb[8] =0.100;
mhut[9] =0.151;
mhuc[9] :=0.147;
eb[9] : 0.15;
mhut[10]:= 0.137;
mhuc[10]:= 0.135;
eb[10] =0.2;
mhut[11] :=0.119;

```

```

mhuc[11] :=0.118;
eb[11] :=0.300;
mhut[12] :=0.106;
mhuc[12] :=0.106;
eb[12] :=0.4;
mhut[13] := 0.0969;
mhuc[13] :=0.0966;
eb[13] :=-0.5;
mhut[14] := 0.0896;
mhuc[14] := 0.0894;
eb[14] :=0.6;
mhut[15] := 0.0787;
mhuc[15] := 0.0786;
eb[15] :=0.8;
mhut[16] := 0.0707;
mhuc[16] := 0.0707;
eb[16] :=1;
mhut[17] := 0.0575;
mhuc[17] := 0.0574;
eb[17] := 1.5;
rnhua[1] := 1.34;
rnhua[2] := 0.5370;
rnhua[3] := 0.1520;
rnhua[4] := 0.0680;
rnhua[5] := 0.0415;
rnhua[6] := 0.0315;
rnhua[7] := 0.0258;
rnhua[8] := 0.0254;
rnhua[9] := 0.0276;
rnhua[10] := 0.0297;
rnhua[11] :=0.0319;
rnhua[12] := 0.0328;
rnhua[13] := 0.0330;
rnhua[14] := 0.0328;
rnhua[15] := 0.0321;
rnhua[16] :=0.0310;
rnhua[17] := 0.0283;
For i1:=1 to n do
Begin
  { Write('Harga mhut[',i 1,'] = ');readln(mhut[i 1]);
  Write('Harga mhuc[',i 1,'] = ');readln(mhuc[i 1]);
  Write('Harga Eb[',i 1,'] = ');readln(Eb[i 1]); }
  Surv[i1] := mhuc[i1]/mhut[i1];if surv[i1] > 1 then surv[i1] 1;
end;
{b[1] := 1;
For i:=2 to jbmaks do

```

```

Begin
  B[i] := B[i-1] + 1;
end;
End;

Procedure interp(n:integer;xx,yy : data;e: real;Var zz: real);
Var
  i2,j2 : integer;
Begin
  For i2 := 1 to n - 1 do
    Begin
      If(e >= xx[i2]) and (e <= xx[i2+ 1]) then
        Begin
          zz := ((y[i2+1] - yy[i2])/(xx[i2+ 1] - xx[i2]))*
            (e - xx[i2]) + y[i2];
        end;
      end;
    end;
  end;
Procedure prelirn( Var xx,yy,surv.b.h. rnhua,m luit,mhuc~cb,drsq.a l sq : data;
  var n,jbrmaks,krnaks.men: integer;
  var ernaksernin~dnorm.uyl. rho~conz,coiib : real;
  Var mhuaamhutasurva : real;
  var eeh,sch data2;
  var fl,fr,cphr,cphl : matriks;
  var imaks~cimaks,fkel : longint;
  var c2,c3 : koef);
var
  wb : array [1..1307] of real;
  e l ,atmaks,abair,mpf,kp: real;
  i4 :integer;
Begin
  Clrscr;
  Cimaks := imaks;
  fkel := 0;
  el :=emaks;
  write('Konstanta pengali ='):readln(kp);
  interp(n,eb,mhut,e l ,atmaks);
  interp(n,eb,rnhua,e l ,abair);
  writeln('Atrmaks = ',atmaks: 10:6);
  writeln('Atrmaks = ',atmaks: 10:6);

  For i4 :=1 tojbrmaks do
    Begin
      B[i4]:= (kp*i4)/atmaks
      Drsq[i4] 0;
    end;
  end;

```

```

scatt(jat,jb,c,w,p,pcap,som,com,c3,n);
if E > Emin then
angels(cth,sth,eph,sph,uy,uz,som,com)
else
Begin
Exit;
End;
Until yn < 0;

If sy < 0 then
Begin
if abs(uy) <= nyl then
    pesl := pesl + p/uyl
else
    pesl := pesl + p/abs(uy);
end;
end;

Procedure output( Var pesl,pesr,pcap,plen,dnom,emaks,abair :real;
    var drsq,alsq,eb : data;
    var jbrnaks: integer;
    var ephr,eph1,fr,fl matriks;
    var cinmks.fkel : longint);
var
dunc,dunc 1, surndr,sumdl,surnpl,sumpr,zuinpl,sigl,
buf,dalb,sigr,frcl,frcr,frab,frle :real;
j5 integer;
Begin
clrscr;
assign(f:");
rewrite(f);
For j5 := 1 to jbrnaks do
Writeln(f,drsq[j5]: 10:6);
for j5 := 1 to jbrnaks do
Writeln(f,drsq[j5]/alsq[j5]: 10:6);
close(f);
end;

Begin
input(xx,yy, surv,b,h,mhua,mhut,mhuc,eb,n,jbrnaks,kmaks,men,
emaks,emin,dnorm,uyl,rho,conz,conb,imaks);
prelim(xx,yy,surv,b,h,mhua,mhut,mhuc,eb,drsq,alsq,n,jbrnaks,
kmaks,men,emaks,emin,dnorm,uyl,rho,conz,conb,
rnhuaa,mhua,surva,chw,sch,,fl,fr,ephr,eph1,imaks,cimaks,fkel,c2,c3);

```

```

Aisq[i4] := abair*c 1 *Cimaks*exp(-b[i4]*atmaks);
WriteLn('B[',i4,'] = ',b[i4]:15:8);
WriteLn('Aisq[',i4,'] = ',aisq[i4]:15:8);
end:
end:

Function Rand:real;
Begin
  rand := random;
end:

Procedure Start(var jb: integer;
                var c,w,cth,sth,cph,sph,yn,zn,sy,sz,uy,uz,p,corn :real);
Begin
  E := emaks;
  cth := cos(0.5*pi);
  sth := sin(0.5*pi);
  cph := cos(0.5*pi);
  sph := sin(0.5*pi);
  sy := 0;
  sz := 0;
  uz := cth;
  uy := sth*sph;
  p := 1;
  JB := 1;
  corn := 1;
end;

Procedure Step(var sy,sz,uy,uz,yn,zn,c :real;
              var mhuta :real;
              c2 : koef;
              n :integer);

Var
  s,ra,en :real;
Begin
  en := e;
  interp(n,cb, rnhut,en,rnhuta);
  Ra := ln(rand);
  s := -ra/mhuta;
  Yn := sy + s * uy;
  Zn := sz + s*uz;
End:

Procedure scatt(var jat,jb : integer;
                var c,w,p,pcap,som,corn :real;
                c3 : koef;

```

```

n : integer);
Var
  rv, anew, se, eold, POLD : real;
Begin
  Rw := rand;
  Eold := E/0.511;
  se := Eold / (1 + 0.5625*Eold);
  anew := Eold / (1 + se*rv + (2*Eold - se)*sqr(rv)*rv);
  If Eold > 4 then anew := anew + 0.5*(e-4)*sqr(rv)*sqr(1-rv);
  Corn := 1 - 1/enew + 1/eold;
  Sorn := sqrt(1.0 - sqr(corn));
  pold := p;
  E := anew * 0.511;
  interp(n, eb, surv, e, surva); if surva > 1 then surva := -1;
  P := P*Surva;
  If jb = 1 then pcap := pold - p + pcap;
end;

Procedure Angels(var cth, sth, cph, sph, uy, uz, son, corn : real);
Var
  rs, cphn, sphn, cthn, sthn, denorn, cdph, sdph: real;
Begin
  rs := rand;
  Jaz := 2*pi*rs;
  cthn := cth*corn + sth*sorn*cos(jaz);
  sthn := sqrt(1.0 - sqr(cthn));
  Denorn := sth*sthn;
  if abs(denorn) < 0.000001 then
  Begin
    cdph := -cos(jaz);
    sdph := sin(jaz);
  end
  else
  Begin
    Cdph := (com-cth*cthn)/denorn;
    sdph := som*sin(jaz)/sthn;
  end;
  cphn := cph*cdph - sph*sdph;
  sphn := sph*cdph + cph*sdph;
  cth := cthn;
  sth := sthn;
  cph := cphn;
  sph := sphn;
  uz := cth;
  uy := sth*sph;
end;

```

```

Procedure Score(var jb,jat,rnen,jbmaks,krnaks : integer;
               var e,w,yn,zn,.,sy,sz,uy,uz,uy1,pesr,pepl,dosr,dosl : real;
               var eb,b,h,drsq,alsq,mhua :data;
               var fr,fl,eph,eph1 : matriks);
Var
  Ks,jc,cacah: integer;
  zse,e2 :real;
  cek : boolean;
Begin
  If uy >0 then
  Begin
    ks := jb;
    cek := false;
    Repeat
      If (yn >= b[ks]) then
      Begin
        c2 := e;
        interp(n,cb,mhua,c2,mhua);
        if uy < uy1 then
          drsq[ks]:= drsq[ks]+ (mhuaa*e2*p/uy1)
        else
          drsq[ks]:= drsq[ks]+ (mhuaa*c2*p/uy);
        ks := ks + 1;
      end
      else
        cek := true;
    until (ks >jbmaks) or (cek = true);
    jb :=ks;
  End
  else
  Begin
    if yn> 0 then exit
    else
      jb := jbmaks+ 1;
    end;
    sy := yn;
    sz := zn;
  end;
Procedure Ilistor (var fkel : longint);
Begin
  Start(jb,c,w,cth,sth,cph,sph,yn,zn,sy,sz,uy,uz,p,com);
  Repeat
    step(sy,sz,uy,uz,yn,zn,e,mhuta,c2,n);
    score(jb,jat,men,jbmaks,kmaks,e,w,yn,zn,sy,sz,uy,uz,
          uy1,pesr,pepl,dosr,dosl,cb,b,h,drsq,alsq,mhua,fr,fl,eph,eph1);
    If jb > jbmaks then exit;

```