



UNIVERSITAS INDONESIA

**KALKULASI DOSIS PARU PADA PERLAKUAN
RADIOTERAPI BOOSTER UNTUK PASIEN KANKER
PAYUDARA DENGAN SIMULASI MONTE CARLO**

TESIS

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Sains

**SATRIAL MALE
1006734035**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM STUDI MAGISTER FISIKA
KEKHUSUSAN FISIKA MEDIS
DEPOK
Juli 2012**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Tesis ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : Satrial Male

NPM : 1006734035

Tanda Tangan : 

Tanggal :



HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :

Nama : Satrial Male

NPM : 1006734035

Program Studi : Magister Fisika

Judul : Kalkulasi Dosis Paru pada Perlakuan Radioterapi Booster untuk
Pasien Kanker Payudara dengan Simulasi Monte Carlo

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Sains pada Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr. Djarwani S. Soejoko

()

Penguji : Dr. rer. nat. Freddy Haryanto

()

Penguji : Prof. Dr. Wahyu Setiabudi

()

Penguji : Dr. Warsito

()

Penguji : Dr. Supriyanto Ardjo Pawiro

()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : Juli 2012

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah Yang Maha Kuasa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, penulis dapat menyelesaikan tesis ini. Penulisan tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar magister sains Jurusan Fisika pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Indonesia. Penulis menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan tesis ini, sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan tesis ini. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

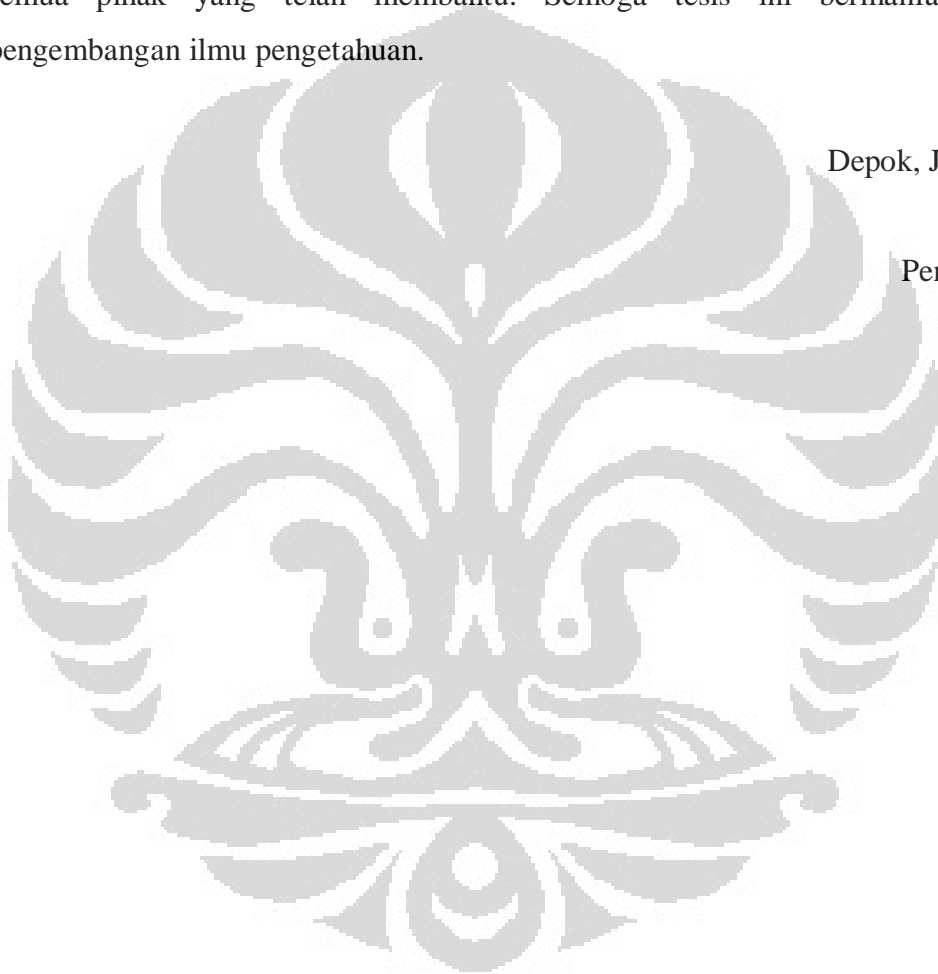
1. Prof. Dr. Djarwani S. Soejoko, selaku dosen pembimbing I yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk membimbing penulis dalam menyusun tesis ini;
2. Dr. rer. nat. Freddy Haryanto, selaku dosen pembimbing II yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk membimbing penulis dalam menyusun tesis ini;
3. Dr. Frédéric Tessier, yang telah membimbing dalam proses konsultasi setiap masalah yang berhubungan dengan program monte carlo via e-mail;
4. Ibu yang senantiasa mendoakan, memberikan semangat dan kasih sayang kepada penulis;
5. Bapak, Jul, Amin, Idul dan Mini yang telah banyak membantu penulis dalam mendoakan dan memberikan meotivasi;
6. Distamben, yang telah memberikan kesempatan belajar dan kuliah di Universitas Indonesia;
7. PT. Antam Tbk, yang telah memberikan bantuan dana pendidikan dan penulisan tesis selama penulis kuliah di Universitas Indonesia;
8. Eko Setiawan M. Si, yang telah meluangkan waktunya dalam membimbing penulis dalam penyusunan input data Program Monte Carlo.
9. Pa Bon, yang telah membimbing penulis dalam pengambilan data di Rumah Sakit Pusat Angkatan Darat (RSPAD) Gatot Subroto;

10. Teman-teman seperjuangan bu Yahya, pa Arif, pa Jon, pa Kunto, pa Saiful, pa Asri, pa Zainal, bu Iin, bu Leni, bu Misju yang telah memberikan motivasi untuk selalu berjuang bersama.
11. Teman-teman di Lab. Fisika Medis, Mas Dwi Seno, Mas Heru, Mba Gati, Areta Rey, Yakub dan Evan yang telah banyak membantu penelitian maupun penyusunan tesis ini.

Akhir kata, penulis berharap Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga tesis ini bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan.

Depok, Juli 2012

Penulis



**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIK**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Satrial Male
NPM : 1006734035
Program Studi : Magister Fisika
Departemen : Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Jenis Karya : Tesis

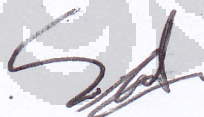
demikian demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif** (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas karya ilmiah yang berjudul:

**Kalkulasi Dosis Paru
pada Perlakuan Radioterapi Booster untuk Pasien Kanker Payudara
dengan Simulasi Monte Carlo**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalih media/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : Juli 2012
Yang menyatakan



(Satrial Male)

ABSTRAK

Nama : Satrial Male
Program Studi : Magister Fisika
Judul : Kalkulasi Dosis Paru pada Perlakuan Radioterapi Booster untuk Pasien Kanker Payudara dengan Simulasi Monte Carlo

Elektron biasanya digunakan untuk pengobatan kanker payudara sebagai dosis tambahan. Pengukuran dosis yang diterima pasien pada rentang energi 6 MeV, 10 MeV dan 12 MeV dari kepala linac, lapangan aplikator $14 \times 14 \text{ cm}^2$, SSD 95 cm disimulasikan. Dosis pada paru disimulasikan dengan sistem EGS monte carlo. Distribusi dosis yang dikalkulasi dengan teknik monte carlo berbeda dengan hasil TPS. Hal ini karena adanya koreksi dari densitas jaringan (inhomogenitas) disekitar paru pada simulasi monte carlo sedangkan pada kalkulasi TPS ISIS tidak memperhitungkan hal tersebut. Dosis 10% di paru hasil kalkulasi simulasi monte carlo diperoleh pada kedalaman 4.22 cm sedangkan pada TPS 2.98 cm untuk energi 6 MeV. Sedangkan untuk 10 MeV dan 12 MeV dosis 10% untuk simulasi monte carlo dan TPS berurut-turut adalah 4.69 cm, 5.72 cm dan 5,79 cm dan 6.95 cm.

Kata Kunci: Kanker Payudara, Berkas Elektron, Phantom Rando, dan Monte Carlo

ABSTRACT

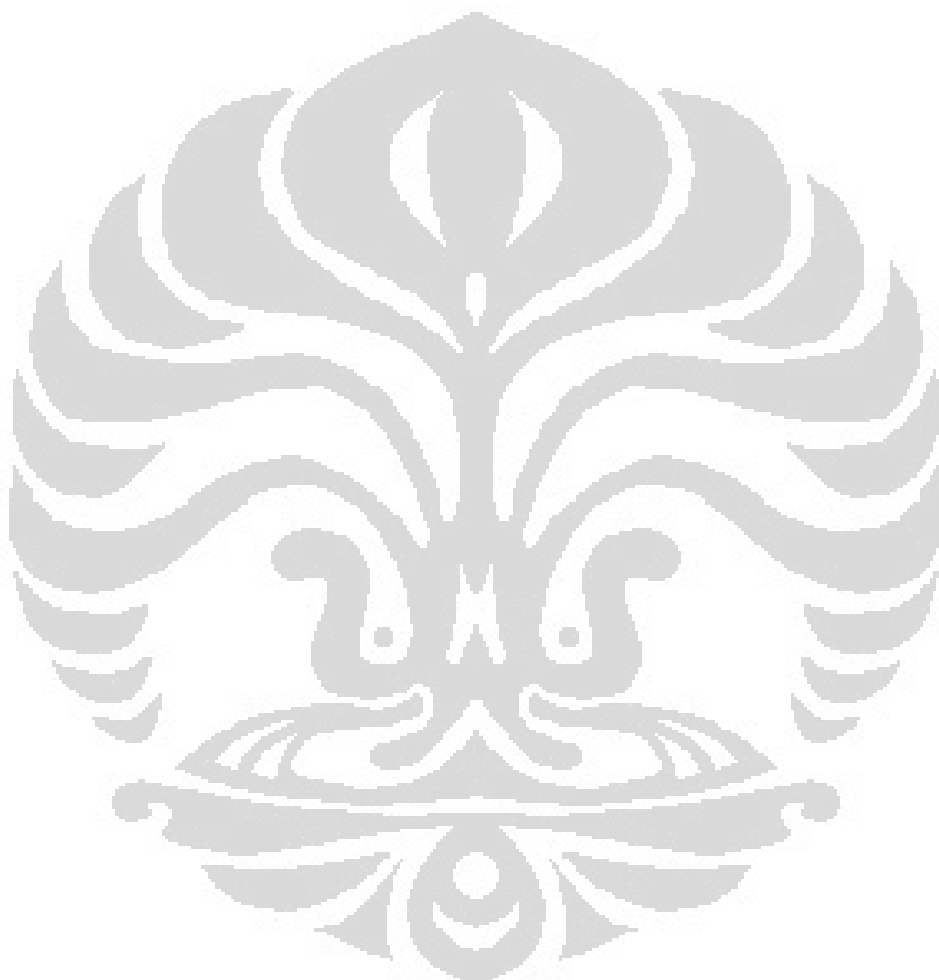
Treatment option by using electron beam is always done after surgery as booster doses. Dose measurement in patient lung in energy range 6 MeV, 10 MeV and 12 MeV, field size $14 \times 14 \text{ cm}^2$ and SSD 95 cm was simulated. The modelings in Monte Carlo simulation are modeling treatment head and water phantom by using BEAMnrc and DOSXYZnrc based on EGSnrc codes. The result from measurement and simulation is different because correction factors of inhomogeneity lung not included in the TPS ISIS. Depth Dose 10% in lung from calculation with monte carlo simulation is 4.22 cm and TPS is 2.98 cm with energy of 6 MeV. For energy of electron 10 MeV and 12 MeV, depth dose 10% from simulation monte carlo and TPS 4.69 cm, 5.72 cm and 5,79 cm, 6.95 cm.

Key Words: Breast Cancer, Electron Beam, Phantom Rando, and Monte Carlo.

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	vi
ABSTRAK	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	2
1.3 Batasan Penelitian	3
1.4 Perumusan Masalah	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
1.6 Hipotesa	3
1.7 Sistematika Penulisan.....	4
BAB II LANDASAN TEORI.....	5
2.1 Anatomi Payudara	5
2.2 Kanker Payudara	7
2.3 CT Scan	8
2.4 Heterogenitas Jaringan	9
2.5 <i>Linear Accelerator</i> (LINAC)	10
2.6 Bagian-Bagian Kepala Linac	12
2.7 <i>Treatment Planning System</i> (TPS) Algoritma	14
2.8 Simulasi Monte Carlo dengan Program EGSnrc.....	17
2.9 Karakteristik Berkas Elektron	22
2.10 Dosimetri Berkas Elektron.....	24
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	27
3.1 Pemodelan Kepala Linac.....	27
3.2 Simulasi PDD dan Profil Dosis dalam Air.....	29
3.3 Simulasi Distribusi Dosis dalam Pasien.....	31
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	33
4.1 Hasil Penelitian	33
4.2 Pembahasan	42

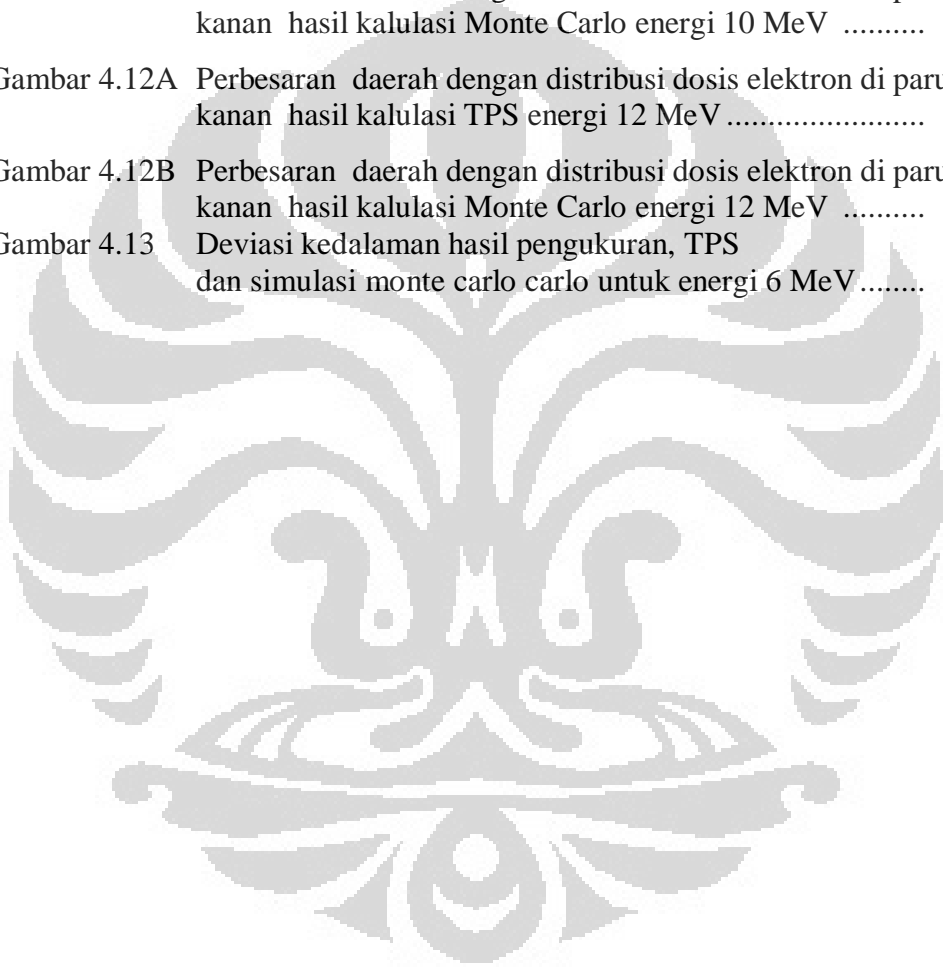
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	46
5.1 Kesimpulan.....	46
5.2 Saran.....	46
DAFTAR REFERENSI.....	48



DAFTAR GAMBAR

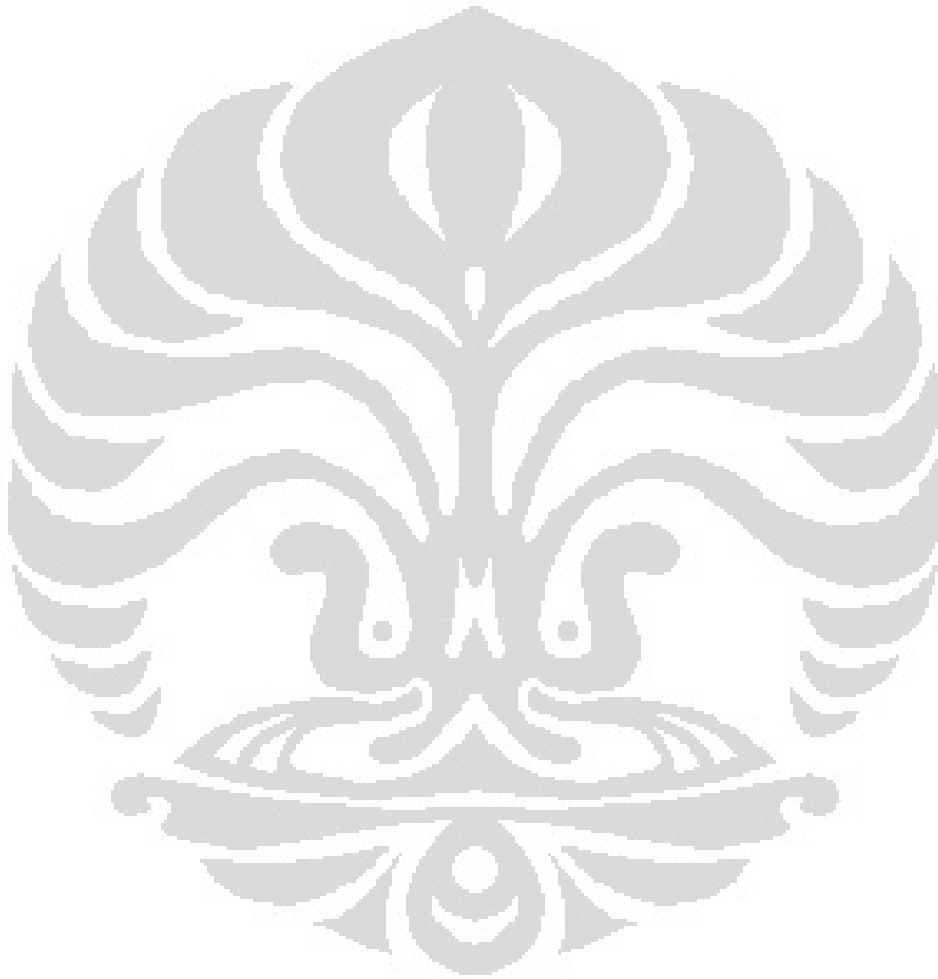
Gambar 2.1	Struktur Anatomi Payudara	5
Gambar 2.2	Anatomi Thorax	6
Gambar 2.3	Mesin CT Scan	9
Gambar 2.4	Ilustrasi efek inhomogenitas paru terhadap PDD	10
Gambar 2.5	Komponen-komponena utama linac	11
Gambar 2.6	Sistem Koordinar Berkas Pencil	15
Gambar 2.7	Algoritma Hogstrom untuk Kalkulasi Distribusi Dosis....	16
Gambar 2.8	Skema Treatment Head dengan <i>Component Module</i>	21
Gambar 2.9	Kurva PDD Berkas Elektron	23
Gambar 3.1	<i>Component Module (CM) Head Linac</i>	28
Gambar 3.2	ISOURCE-19 sebagai Sumber Berkas Elektron	29
Gambar 3.3	Model Phantom untuk Perhitungan PDD.....	30
Gambar 3.4	Model Phantom untuk Perhitungan Profil Dosis	31
Gambar 3.4	Bagan Prosedur Penelitian	32
Gambar 4.1	PDD dengan Variasi Energi Kinetik Awal pada Energi 6 MeV dengan Luas Lapangan 14 x 14 cm ²	33
Gambar 4.2	PDD dengan Variasi Energi Kinetik Awal pada Energi 10 MeV dengan Luas Lapangan 14 x 14 cm ²	34
Gambar 4.3	PDD dengan Variasi Energi Kinetik Awal pada Energi 12 MeV dengan Luas Lapangan 14 x 14 cm ²	34
Gambar 4.4	Profil Dosis untuk Energi 6 MeV dengan Luas Lapangan 14 x 14 cm ²	36
Gambar 4.5	Profil Dosis untuk Energi 10 MeV dengan Luas Lapangan 14 x 14 cm ²	36
Gambar 4.6	Profil Dosis untuk Energi 12 MeV dengan Luas Lapangan 14 x 14 cm ²	37
Gambar 4.7	Verifikasi PDD Pengukuran dan Simulasi untuk Energi 6 MeV dengan Luas Lapangan 14 x 14 cm ²	37
Gambar 4.8	Verifikasi Profil Dosis Pengukuran dan Simulasi untuk Energi 6 MeV dengan Luas Lapangan 14 x 14 cm ²	38
Gambar 4.9A	Hasil Citra CT Thorax pasien kanker payudara pasca operasi	38
Gambar 4.9B	Hail Kalkulasi TPS Citra CT Thorax pasien kanker..... Payudara pasca mastectomy energi 6 MeV	38

Gambar 4.9C	Hail Kalkulasi Monte Carlo Citra CT Thorax pasien kanker Payudara pasca mastectomy energi 6 MeV.....	38
Gambar 4.10A	Perbesaran daerah dengan distribusi dosis elektron di paru kanan hasil kalulasi TPS energi 6 MeV	39
Gambar 4.10B	Perbesaran daerah dengan distribusi dosis elektron di paru kanan hasil kalulasi Monte Carlo energi 6 MeV	39
Gambar 4.11A	Perbesaran daerah dengan distribusi dosis elektron di paru kanan hasil kalulasi TPS energi 10 MeV	39
Gambar 4.11B	Perbesaran daerah dengan distribusi dosis elektron di paru kanan hasil kalulasi Monte Carlo energi 10 MeV	39
Gambar 4.12A	Perbesaran daerah dengan distribusi dosis elektron di paru kanan hasil kalulasi TPS energi 12 MeV	40
Gambar 4.12B	Perbesaran daerah dengan distribusi dosis elektron di paru kanan hasil kalulasi Monte Carlo energi 12 MeV	40
Gambar 4.13	Deviasi kedalaman hasil pengukuran, TPS dan simulasi monte carlo carlo untuk energi 6 MeV	41



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Komponen-Komponen Utama Kepala Linca	12
Tabel 4.1	Nilai R_{50} untuk Energi disekitar 6 MeV, 10 MeV dan 12 MeV dengan Luas Lapangan $14 \times 14 \text{ cm}^2$	35
Tabel 4.2	Kedalaman kurva isodosis berkas elektron 6 MeV pada citra CT paru kanan hasil kalkulasi TPS , dalam fantom air dan simulasi monte carlo	40



DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran A Data PDD Pengukuran di Fantom Air, PDD Hasil Simulasi Monte Carlo dan Deviasi PDD Pengukuran dan Simulasi Monte Carlo.
- Lampiran B Kurva Deviasi PDD dan Profil Dosis Simulasi Monte Carlo dan Pengukuran di Fantom Air.
- Lampiran C Perbandingan Distribusi Dosis Paru pada TPS dan Monte Carlo
- Lampiran D Deviasi kedalaman distribusi dosis berkas elektron di paru kiri antara TPS dan Monte Carlo untuk energi 6 MeV, 10 MeV dan 12 MeV.
- Lampiran E Spesifikasi Aksesoris Kepala Linac Elekta.



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kanker merupakan perubahan sel yang mengalami pertumbuhan tidak normal dan termasuk jenis penyakit yang paling ditakuti karena sinonim dengan kematian. Namun, dengan kemajuan radiotherapi maka analisis survival pasien meningkat dari 39% menjadi 50% dalam kurun waktu tahun 1960-an sampai 1980-an (Ericka dan George, 2006).

Menurut Prasad (1983) radiotherapi merupakan pengobatan kanker dengan radiasi pengion. Mengingat radiasi pengion mengakibatkan efek biologi pada semua sel jaringan, maka optimasi radioterapi difokuskan pada pemberian dosis radiasi tinggi yang mungkin pada target tumor dan dosis rendah pada jaringan sehat disekitarnya.

Menurut Coleman dkk (2005) sifat fisis terapi dengan berkas elektron yang membedakan dalam *treatment cancer* adalah depth dose dan dosis permukaan yang tinggi. Selain itu, dosis akan menurun secara tajam setelah mencapai titik dosis kedalaman 80% .

Lebih lanjut Coleman dkk (2005) menyatakan bahwa terapi radiasi dengan berkas elektron telah banyak dilakukan karena sifat fisis dari distribusi dosisnya, yaitu relatif uniform dari permukaan ke kedalaman tertentu, penetrasi kedalamannya dapat dikontrol dengan energi berkas yang diberikan atau dengan menggunakan tissue kompensator, dan *mass stopping power* elektron tidak bervariasi secara signifikan untuk tissue normal.

Penentuan dosis distribusi dan akurasi sistem perencanaan untuk treatment kanker sangatlah kompleks. Informasi tentang pasien yang berhubungan dengan tebal dinding dada, inhomogenitas dan densitas elektron paru dan *rib bone* merupakan hal yang penting dalam penentuan distribusi dosis pada paru dengan berkas elektron yang digunakan (Prasad dkk, 1983).

Akurasi berhubungan dengan penentuan dosis yang diperoleh pasien sesuai dengan standar yang ditentukan. Monte Carlo merupakan salah satu teknik dalam penentuan distribusi dosis berkas elektron pada penderita kanker (tumor) baik di organ yang terkena kanker maupun distribusinya terhadap organ sehat lainnya (Isambert et al, 2010)

Hamburan dan kehilangan energi yang terus menerus merupakan dua proses yang menyebabkan turunnya dosis secara drastis pada kedalaman setelah d_{max} . Perhitungan dosis setelah d_{max} pada perlakuan radiotherapi breast cancer untuk mengukur seberapa jauh (dalam) distribusi dosis tersebut yang mungkin diterima paru atau jantung merupakan hal penting untuk diketahui.

Menurut Tuathan et al (2008) metode Monte Carlo merupakan metode yang paling akurat dalam kalkulasi distribusi dosis berkas elektron dan dapat mereduksi kesalahan (error) akibat ketidakpastian volume iradiasi hingga 2%. Sebelumnya penentuan kalkulasi dosis secara klinis akibat adanya inhomogenitas seperti rongga udara dan bone dapat menyebabkan kesalahan hingga 10% atau lebih.

Sehingga dengan menggunakan teknik ini kita dapat menentukan kalkulasi dosis pasien kanker payudara pada organ sehatnya seperti paru-paru yang sangat berfungsi penting dalam tubuh manusia. sehingga diharapkan dengan kalkulasi dosis yang diterima pada paru tidak berbahaya atau menimbulkan efek buruk lainnya pada pasien.

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah

1. Mensimulasikan distribusi dosis berkas elektron di paru untuk perlakuan pasien kanker payudara pasca operasi dengan teknik Monte Carlo
2. Membandingkan distribusi dosis berkas elektron di paru untuk pasien kanker payudara pasca operasi antara hasil kalkulasi TPS (*Treat Planning System*) dengan hasil kalkulasi simulasi Monte Carlo.

1.3 Batasan Penelitian

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah penentuan dosis paru pada pasien kanker payudara untuk energi 6 MeV, 10 MeV dan 12 MeV dengan SSD 95 cm, field size 14 x 14 cm², menggunakan teknik Monte Carlo.

1.4 Perumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah

1. Berapa besar dosis paru yang diterima pasien setelah d_{max} untuk perlakuan kanker payudara dengan berkas elektron menggunakan teknik Monte Carlo pada energi 6 MeV, 10 MeV, 12 MeV dengan field size 14 x 14 cm² ?
2. Bagaimana perbandingan kalkulasi dosis yang diterima paru untuk pasien kanker payudara antara pengukuran rando phantom dan teknik Monte Carlo pada energi 6 MeV, 10 MeV, 12 MeV dengan field size 14 x 14 cm² ?

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah

1. Memberikan informasi tentang dosis kalkulasi paru dengan teknik Monte Carlo
2. Memberikan informasi tentang efek pemberian energi (MeV) terhadap penambahan dosis pada paru

1.6 Hipotesa

Adapun hipotesa dari penelitian ini adalah

1. Perlakuan radiotherapi pasien kanker payudara berhubungan dengan jaringan lunak (tissue) serta organ lain yang berada dibawahnya.
2. Dosis 100 % yang diberikan pada permukaan dengan radiasi berkas elektron yang disebut dosis maksimum (d_{mx}) pada perlakuan radiotherapi kanker payudara akan menurun secara dratis setelah mencapai d_{max} . Pengukuran dosis setelah d_{max} (80% - 0%) dapat memberikan gambaran sebera jauh (dalam) distribusi dosis yang mungkin sampai ke organ penting lainnya seperti paru atau jantung.

1.7 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan thesis ini dibagi menjadi 5 bab pokok pembahasan yang meliputi:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang penelitian, tujuan penelitian, batasan masalah, rumusan masalah, manfaat penelitian, hipotesa penelitian, metodologi penelitian dan sistematika penulisan.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini akan dibahas teori-teori penunjang penelitian, antara lain mengenai perangkat yang digunakan dan teori dasar dari permasalahan yang dibahas.

BAB 3 METODE PENELITIAN

Dalam bab ini akan dijelaskan tahapan-tahapan penelitian yang akan dikerjakan.

BAB 4 HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan ditunjukkan PDD dan profile dari hasil pengukuran dan simulasi dengan Monte Carlo, perbandingan distribusi dosis antara TPS (*Treatment Planning System*) dengan simulasi Monte Carlo.

BAB 5 KESIMPULAN

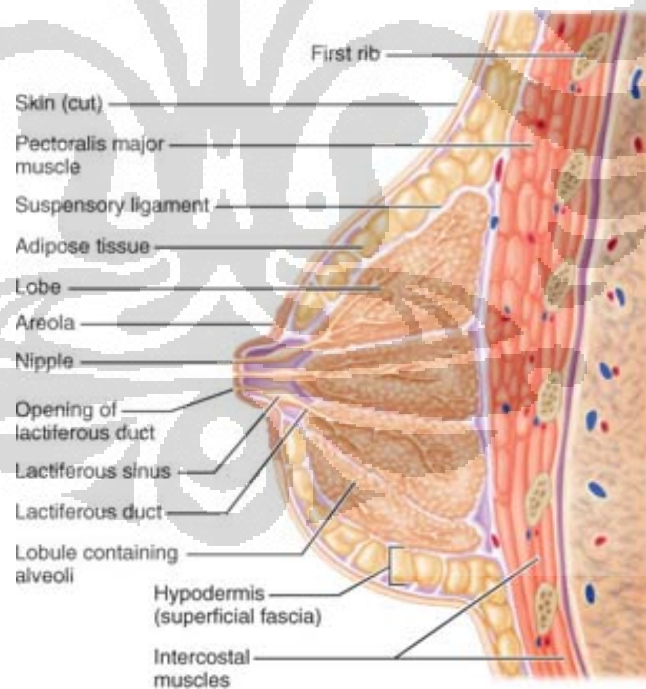
Pada bab ini penulis akan memberikan beberapa kesimpulan yang dapat ditarik dari penelitian ini, serta saran lebih lanjut.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Anatomi Payudara

Menurut Valeria dan Sander (2007) bahwa payudara tersusun dari jaringan lemak yang mengandung kelenjar-kelenjar yang bertanggung jawab terhadap produksi susu pada saat hamil dan setelah bersalin. Setiap payudara terdiri dari sekitar 15-25 lobus yang berkelompok yang disebut lobulus, kelenjar susu dan kantung-kantung yang menampung air susu (*alveoli*). Saluran untuk mengalirkan air susu ke puting susu disebut *duktus*. Sekitar 15-20 saluran akan menuju bagian gelap yang melingkar disekitar puting susu (*areola*) membentuk bagian yang menyimpan air susu (*ampullae*) sebelum keluar ke permukaan.

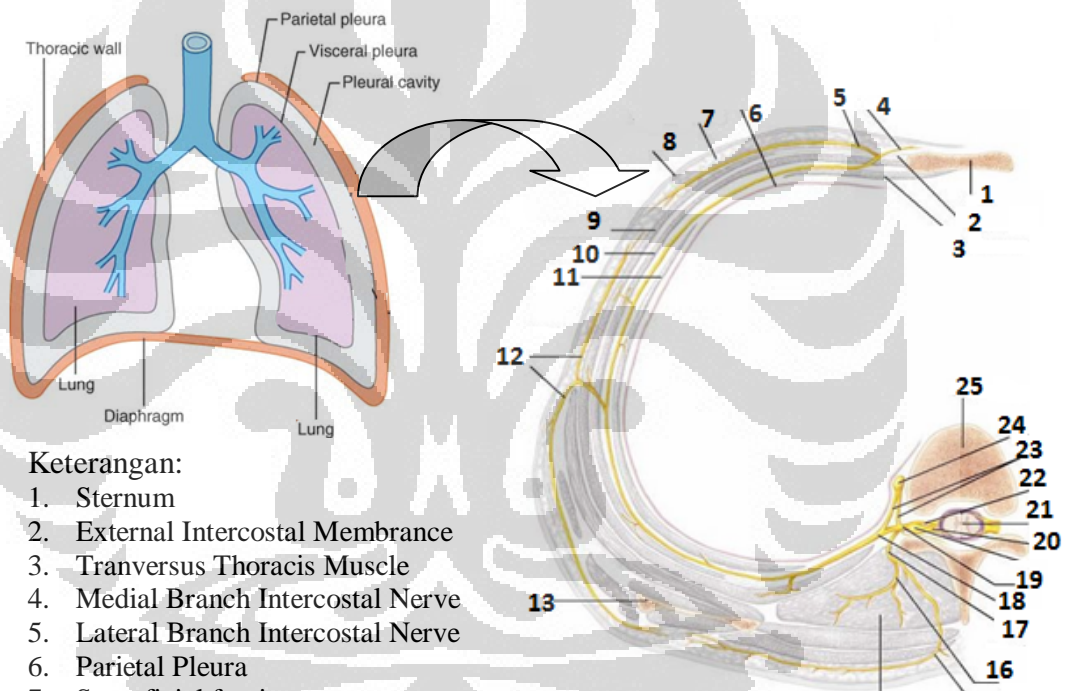


Gambar 2.1. Struktur Anatomi Payudara

Payudara akan menutupi sebagian dinding dada, payudara dibatasi oleh tulang selangka (*klavikula*) dan tulang dada (*sternum*). Jaringan payudara bisa mencapai ke daerah ketiak dan otot yang berada pada

punggung bawah sampai lengan atas. Terdapat organ penting yang terdapat dibawah payudara dan dinding thorax seperti paru dan jantung yang sangat berfungsi penting dalam kehidupan manusia.

Daerah dibawah payudara adalah thorax yang terletak antara leher dan perut. Cavuam thorax terdiri atas paru, jantung, trakea, oesophagus dan pembuluh darah. Rangka thorax dibentuk oleh columna vertebralis, tulang costa cartilago costadan sternum. Terdapat *parietal pleura* yang melapisi dinding rongga thorax yang berada di bawah dinding thorax (*thoracic wall*). Kemudian terdapat membran serosa (*visceral pleura*) yang membungkus paru. Struktur thorax ini dapat dilihat pada gambar dibawah ini:



Keterangan:

1. Sternum
2. External Intercostal Membrane
3. Tranversus Thoracis Muscle
4. Medial Branch Intercostal Nerve
5. Lateral Branch Intercostal Nerve
6. Parietal Pleura
7. Superficial fascia
8. Skin
9. External Intercostal Muscle
10. Internal Intercostal Muscle
11. Innermost Intercostal Muscle
12. Anterior and Posterior Branch
13. Scapula
14. Deep Back Muscle
15. Medial Branch Thoracic Spinal Nerve
16. Lateral Branch Thoracic Spinal Nerve
17. Dorsal Ramus
18. Ventral Ramus
19. Thoracic Spinal Nerve
20. Dorsal Root Ganglion
21. Spinal Cord
22. Ventral Root
23. White and Gray Rami Communicates
24. Sympathetic Ganglion
25. Body Thoracic Vertebra

Gambar 2.2. Anatomi Thorax

(Tank dan Thomas, 2009)

2.2 Kanker Payudara (*Breast Cancer*)

Kanker merupakan suatu kondisi dimana sel telah kehilangan pengendaliannya dan mekanisme normalnya sehingga mengalami pertumbuhan yang tidak normal, cepat dan tidak terkendali. Salah satunya adalah kanker payudara (*mamae cancer*), dimana terjadi pada jaringan payudara (*mammary gland*) dan merupakan jenis kanker paling umum yang diderita kaum wanita.

Gejala-gejala yang menandakan adanya serangan kanker payudara yang umumnya dapat dilihat dan dirasakan sendiri adalah:

1. Timbulnya benjolan pada payudara yang dapat diraba dengan tangan, makin lama benjolan tersebut makin mengeras dan bentuknya tidak beraturan.
2. Bentuk, ukuran atau berat salah satu payudara berubah
3. Timbul benjolan kecil dibawah ketiak
4. Keluar darah, nanah, atau cairan encer dari puting susu
5. Kulit payudara mengerut seperti kulit jeruk
6. Bentuk atau arah puting berubah, misalnya puting susu tertekan kearah dalam.

Menurut Elaine dan Katja (2006) invasiv kanker payudara cenderung untuk menjadi lebih buruk dan bisa berujung kepada kematian. Di Amerika 13% dari seluruh populasi wanita di sana akan mengalami kondisi seperti ini. Kanker payudara biasanya yang terserang adalah dari sel-sel epitel pada saluran yang terdapat pada *lobe* (Gambar 1) yang berdekatan dengan dinding thorax.

Lebih lanjut Elaine dan Katja (2006) menyatakan bahwa kanker payudara biasanya ditandai dengan perubahan tekstur kulit, kerutan, dan kebocoran dari *nipple*. Ketika terdiagnosa, kanker payudara biasanya ditreatment dengan 3 cara, yaitu threapi radiasi (radioterapi), kemoterapi, dan pembedahan (*surgery*) biasanya diikuti dengan radiasi. Kemoterapi bisanya dilakukan dengan pemberian obat berupa trastuzumab (herceptin), tamoxifen, dan letrozelo.

Sampai pada tahun 1970-an standar treatment kanker payudara adalah *radical mastectomy* yaitu *breast cutting* melalui pembedahan (*surgery*) dengan membuang semua payudaranya termasuk otot-otot yang berada dibawahnya, fascia dan lymph nodes. Kemudian dokter merekomendasikan metode baru yaitu *lumpectomy*, dimana hanya bagian yang terkena kanker yang akan dibedah (diangkat). Perlakuan radiasi dengan berkas elektron umumnya dilakukan setelah pasien di *mastectomy* atau di *lumpectomy*. Sedangkan radiasi dengan berkas foton biasanya dilakukan tanpa perlu di *mastectomy* atau *lumpectomy*.

Menurut data WHO setiap tahun lebih dari 250.000 kasus baru kanker payudara terdiagnosa di Eropa dan kurang dari 175.000 di Amerika Serikat. Kaum pria juga dapat terserang kanker walaupun kemungkinannya 1 diantara 1000. Pengobatan yang lazim digunakan adalah pembedahan dan jika perlu dilanjutkan dengan kemoterapi maupun radiasi (radioterapi).

Pada perlakuan radioterapi kanker payudara baik itu dengan foton atau elektron, distribusi dosisnya yang diberikan kepada organ yang terkena kanker cenderung akan mengenai organ etris lainnya (jaringan sehat).

2.3 CT Scan

CT scan (*computed tomography scan*) merupakan modulator yang digunakan untuk melihat struktur anatomi tubuh pasien dimana dalam prosesnya menggunakan komputer untuk memperoleh gambaran yang diinginkan. Prinsip dasar CT scan mirip dengan perangkat radiografi yang sudah lebih umum digunakan. Kedua perangkat ini sama-sama memanfaatkan intensitas radiasi terusan setelah melewati suatu obyek untuk membentuk citra/gambar. Perbedaan antara keduanya adalah pada teknik yang digunakan untuk memperoleh citra dan pada citra yang dihasilkan. Tidak seperti citra yang dihasilkan dari teknik radiografi, informasi citra yang ditampilkan oleh *CT scan* tidak *overlap* (tumpang tindih) sehingga dapat memperoleh citra yang dapat diamati tidak hanya pada bidang tegak lurus berkas sinar (seperti pada foto rontgen), citra *CT scan* dapat menampilkan informasi tampak lintang obyek yang diinginkan. Oleh karena itu, citra ini dapat memberikan sebaran kerapatan struktur internal

obyek sehingga citra yang dihasilkan oleh *CT scan* lebih mudah dianalisis daripada citra yang dihasilkan oleh teknik radiografi konvensional.



Gambar 2.3 Mesin CT scan (CT/e from GE)

Dari berbagai CT scan yang ada di pasaran, set data CT yang dihasilkan biasanya berbentuk data DICOM, Cadplan dan Pinnacle. Pada Rumah Sakit Gatot Subroto *set data* CT yang dihasilkan berupa format DICOM.

2.4 Heterogenitas Jaringan

Distribusi dosis berkas elektron sangat dipengaruhi oleh keberadaan jaringan lunak seperti jantung atau paru dimana dosis dalam medium ini sangat sulit untuk dikalkulasi tetapi pengaruhnya sangat besar terhadap distribusi dosis elektron. Koreksi inhomogenitas jaringan yang biasanya dilakukan adalah memasukan faktor ketebalannya (densitas jaringan relatif terhadap air), dan menentukan *coefficient of equivalent thickness* (CET). CET suatu material didefinisikan sebagai densitas elektron material tersebut relatif terhadap densitas elektron air. Paru mempunyai densitas 0.25 gr/cm^3 – 0.3 gr/cm^3 ($\text{CET} = 0.25 - 0.3$) sedangkan tulang mempunyai $\text{CET} = 1.6$ (Podgorsak, 2005).

Menurut William dan Thwaites (1993), CET dapat digunakan untuk menentukan kedalaman efektif (z_{eff}) tissue equivalent air dengan rumus:

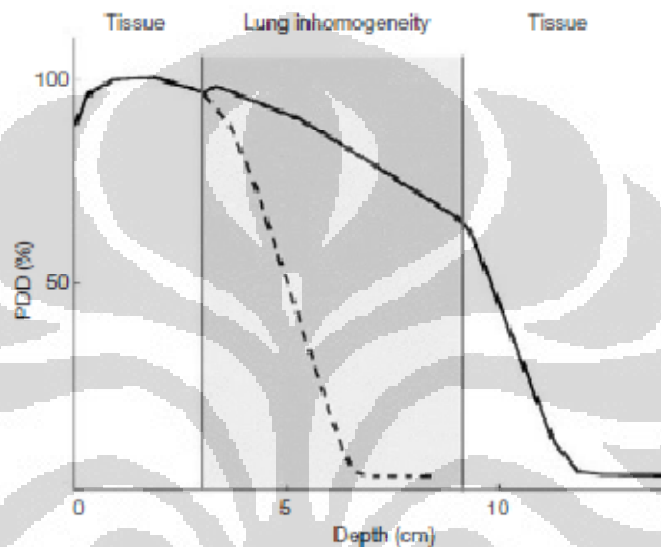
$$z_{eff} = z - t (1 - CET) \dots\dots\dots (1)$$

dengan :

z_{eff} = kedalaman efektif (cm)

z = kedalaman sebenarnya dari suatu titik dalam pasien (cm)

t = ketebalan jaringan inhomogenitas (cm)



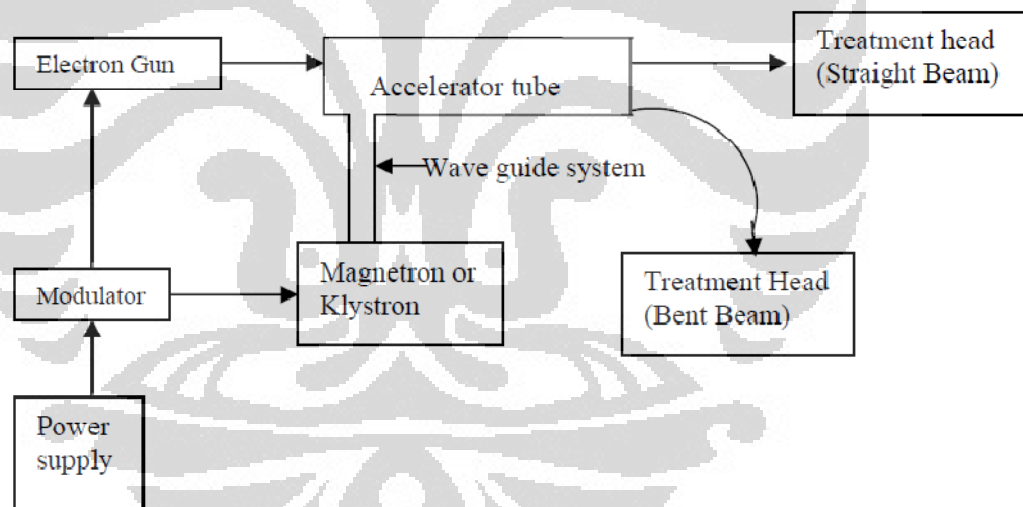
Gambar 2.4 Ilustrasi efek inhomogenitas paru terhadap kurva PDD berkas elektron (Podgorsak, 2005)

2.5 *Linear Accelerator (LINAC)*

LINAC (*Linear Accelerator*) merupakan pemercepat elektron yang dapat mempercepat elektron dengan energi kinetik 4 MeV sampai dengan 25 MeV. Elektron dipercepat dengan menggunakan gelombang mikro RF non-konservatif berfrekuensi antara 10^3 MHz (*L band*) sampai 10^4 MHz (*X band*). Dalam terapi tumor, elektron ini dapat langsung digunakan untuk terapi tumor permukaan atau terlebih dahulu dikenakan sebuah target untuk menghasilkan sinar X energi tinggi yang digunakan untuk terapi tumor pada kedalaman tertentu (Faddegon dkk, 1997).

Lebih lanjut Faddegon dkk (1997) menyatakan bahwa komponen-komponen utama sebuah linac biasanya dikelompokkan ke dalam 5 kelas yaitu sistem injeksi, sistem RF, sistem pelengkap, sistem *beam transport*, serta sistem *beam collimation and monitoring*.

Akselerator digunakan dalam radioterapi untuk mempercepat elektron dengan menggunakan frekuensi dalam rentang gelombang mikro sekitar 300 megasiklus/sec. Power supply menyediakan arus DC ke modulator yang membentuk pulsa tegangan tinggi yang kemudian dihantarkan ke *magnetron/klystron* dan *electron gun*. *Magnetron/klystron* kemudian menghasilkan pulsa gelombang mikro yang kemudian diinjeksi ke akselerator melalui tabung akselerator melalui sistem *wave guide*. Pada waktu yang sama, elektron yang dihasilkan dari *electron gun* diinjeksi ke dalam tabung akselerator. Elektron dengan energi tertentu (~50keV) berinteraksi dengan medan elektromagnetik dari tabung gelombang mikro menyebabkan elektron-elektron tersebut dipercepat ke *range* energi yang lebih besar (Khan, 2003).



Gambar 2.5 komponen-komponen utama *Linac* Medis (Khan, 2003)

2.6 Bagian-bagian Kepala *Linac*

Menurut Podgorsak dkk (1999) bahwa elektron yang berasal dari *electron gun* kemudian dipercepat dan dibawa menuju kepala *linac* melewati sistem *transport*. Kepala *linac* terdiri dari beberapa komponen yang mempengaruhi produksi, pembentukan, penempatan dan pemantauan berkas klinis foton atau elektron.

Lebih lanjut Podgorsak dkk (1999) menyatakan bahwa komponen pada kepala *linac* ada yang bersifat *patient independent* dan beberapa diantaranya *patient dependent*. Tabel 2.1 di bawah menyajikan daftar komponen-komponen yang ada pada kepala *linac* baik untuk *mode* sinar X maupun *mode* elektron.

Tabel 2.1 Komponen-komponen umum di dalam kepala *linac*

Dekripsi	Mode sinar X	Mode elektron
Komponen <i>patient independent</i>	<i>Exit Window</i>	<i>Exit Window</i>
	<i>Target</i>	
	<i>Primary collimator</i>	<i>Primary scattering foil</i>
	<i>Flattening filter</i>	<i>Primary collimator</i>
	<i>Ionisation Chamber</i>	<i>Secondary scattering foil</i>
Komponen <i>patient dependent</i>	<i>Mirror</i>	<i>Ionisation Chamber</i>
		<i>Mirror</i>
	<i>Jaw/MLC</i>	<i>Jaw</i>
	<i>Wedge, Blocks</i>	<i>Applicator</i>

Saat *linac* dioperasikan pada mode elektron, posisi target sinar X digantikan oleh *primary scattering foil* dan posisi *flattening filter* digantikan oleh *secondary scattering foil*. Kedua *foil* penghambur tersebut berfungsi untuk memperlebar berkas pensil elektron yang muncul dari *exit window*.

Ketebalan dari *foil* dipilih secara empirik untuk setiap energi agar lapangan yang diinginkan terisi cukup dengan berkas. Ketebalan *foil* juga mempengaruhi lebar sudut distribusi berkas terhambur. Berkas hambur yang mendekati *profile Gaussian* ini akan terhambur dengan sudut hambur lebih lebar jika ketebalan *foil* bertambah. Namun, dengan bertambahnya sudut hambur, intensitas flux pada bagian sentral berkas akan berkurang dikarenakan elektron-elektron yang menyebar secara lateral bertambah.

Monitor chamber berguna untuk mengukur dosis radiasi yang dihasilkan *linac*. *Monitor chamber* dapat menampilkan nilai *monitor unit* (MU), dapat memonitor *dose rate*, *beam flatness*, dan *beam energy*, dan digunakan sebagai metode untuk mematikan sistem *linac*. *Monitor chamber* terdiri dari *primary ionization chamber* dan *secondary ionization chamber*.

Kolimator pada modern linac terdiri atas dua buah yaitu kolimator primer dan kolimator sekunder, ukurannya bisa diubah-ubah sesuai dengan kebutuhan (*adjustable*). Kolimator sekunder sering dinamakan *jaws*, yang fungsi utamanya membentuk lapangan radiasi (*field size*).

Terkadang kedua kolimator ini tidak cukup untuk menghasilkan bentuk berkas yang diinginkan (*well defined beam*). Selain posisinya relatif masih jauh dari permukaan terapi, dua kolimator diatas biasanya terbuat dari material tinggi. Material dengan nomor atom Z tinggi akan menghasilkan kontaminasi foton ketika menghamburkan elektron. Untuk itu dibutuhkan sebuah aplikator yang dapat mengkolimasi elektron sedekat mungkin dengan permukaan terapi dan terbuat dari material dengan nomor atom Z rendah.

Aplikator mempunyai beberapa bentuk dan ukuran. Ada yang berbentuk susunan *scraper* dan ada juga yang berbentuk *tubular* dengan ukuran bukaannya disesuaikan dengan lapangan terapi. Selain dari ukuran bukaan, bentuk dari aplikator juga mempengaruhi mesin. Aplikator elektron ini biasanya didesain untuk pemakaian pada SSD 100 cm. Ini memungkinkan untuk kontur tubuh pasien yang relatif datar dan cembung. Tapi akan sangat sulit untuk terapi bagian bawah leher yang mana aplikator tidak selalu pas diatas bahu pasien.

2.7 Treatment Planning System (TPS) Algoritma

Menurut Khan dan Gerbi (2012) kebanyakan TPS memasukan program planning berkas elektron. Algoritma berkas elektron lebih kompleks dibandingkan dengan berkas foton dan membutuhkan pengujian dan *commissioning* yang lebih teliti untuk penggunaan klinis.

Lebih lanjut Khan dan Gerbi (2012) menyatakan bahwa metode awal dalam komputasi distribusi dosis didasarkan pada data empiris menggunakan geometri garis sinar dengan asumsi bahwa distribusi dosis kedalaman berkas dalam medium homogen. Koreksi inhomogenitas ditentukan dari transmisi data yang terukur dalam lebar yang heterogen. Masalah utama dalam berkas lebar dan geometri slab adalah kurang tepat dalam memprediksi efek berkas sempit, perubahan permukaan *countur* yang tiba-tiba, inhomogenitas medium yang lebih kecil dan terjadinya berkas miring.

Awal 1980, terjadi perkembangan yang sangat pesat dalam algoritma *treatment planning* berkas elektron. Pemodelannya didasarkan pada distribusi *Gaussian pencil beam* yang merupakan aplikasi dari teori hamburan ganda (*multiple scattering theory*) Fermi-Eyges. Asumsi bahwa sudut kecil yang terjadi akibat adanya *multiple scattering* dari elektron-elektron menyebabkan distribusi spasial fluens elektron atau dosisnya mendekati distribusi *Gaussian* untuk semua kedalaman. Distribusi dosis spasial untuk *Gaussian pencil beam* dirumuskan sebagai berikut:

$$d_p(r, z) = d_p(o, z) e^{-r^2 / \sigma_r^2(z)} \dots\dots\dots(1)$$

dengan :

$d_p(r, z)$: dosis kedalaman yang dikontribusi dari berkas pensil pada suatu titik dengan jarak r dari sentral axis dan kedalaman z

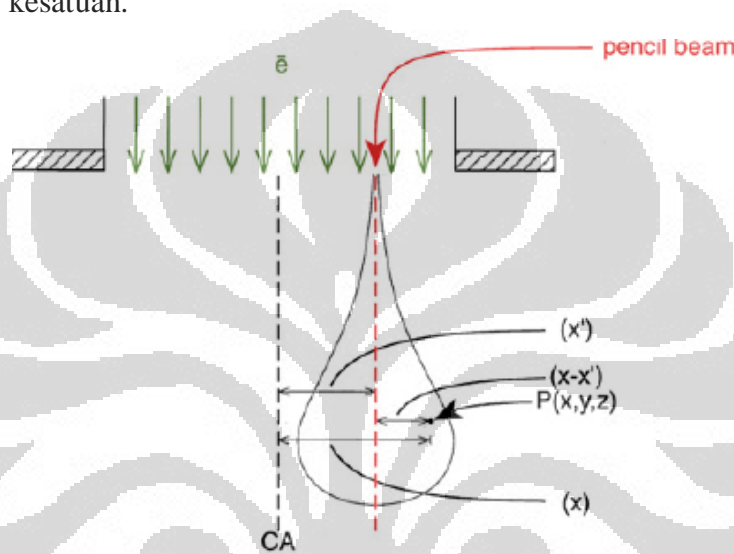
$d_p(o, z)$: dosis axial

$\sigma_r^2(z)$: kudrat rata-rata pergeseran radial elektron-elektron akibat *Coulomb multiple scattering*, $\sigma_r^2 = 2\sigma_x^2 = 2\sigma_y^2$. Dimana σ_x^2 , σ_y^2 merupakan kuadrat rata-rata pergeseran elektron secara lateral proyeksi bidang X,Y dan Y,Z.

fungsi eksponensial menyajikan off-axis ratio untuk berkas pensil. Persamaan (1) diatas dapat dituliskan sebagai berikut:

$$d_p(r, z) = D_\infty(o, z) \frac{e^{-r^2/\sigma_r^2(z)}}{\pi\sigma_r^2(z)} \dots\dots\dots(2)$$

$D_\infty(o, z)$ adalah dosis pada kedalaman z dalam sebuah lebar bidang yang takterbatas. Persamaan (2) diatas dinormalisasikan sehingga area integral dari fungsi tersebut sepanjang bidang transversal pada kedalaman z adalah suatu kesatuan.



Gambar 2.6 Sistem koordinat berkas pensil

Total distribusi dosis dalam suatu bidang dikalkulasi dengan menjumlahkan semua berkas pensil tersebut sesuai rumus:

$$D(x, y, z) = \iint d_p(x - x', y - y', z) dx', dy' \dots\dots\dots(3)$$

Integral fungsi Gaussian dalam batasan tertentu tidak dapat dievaluasi secara analitik. Untuk itu, integral tersebut memerlukan eror fungsi. Metode konvolusi menunjukkan bahwa berkas elektron dari penampang *rectangular* (2a x 2b) maka distribusi dosis spasialnya adalah

$$D(x, y, z) = D_\infty(o, o, z) \frac{1}{4} \cdot \left(\operatorname{erf} \frac{a+x}{\sigma_r(z)} + \operatorname{erf} \frac{a-x}{\sigma_r(z)} \right) x \left(\operatorname{erf} \frac{b+y}{\sigma_r(z)} + \operatorname{erf} \frac{b-y}{\sigma_r(z)} \right) \dots\dots (4)$$

dimana fungsi eror didefinisikan sebagai berikut:

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$$

Distribusi dosis spatial dari berkas elektron pencil direpresentasikan dengan fungsi *Gaussian*, dimana fungsi tersebut dikarakteristikan dengan parameter penyebaran lateral (*spread lateral*) σ yang juga merupakan parameter standar deviasi. Ketika berkas pencil elektron terjadi pada medium yang uniform, distribusi dosisnya digambarkan seperti *teardrop* atau bawang (*onion*). *spread lateral* σ meningkat dengan kedalaman sampai *spread* maksimum tercapai. Setelah kedalaman tersebut, elektron akan kehilangan energi. Anggapan bahwa $\sigma_x(z)$ jatuh dalam bidang X-Z maka:

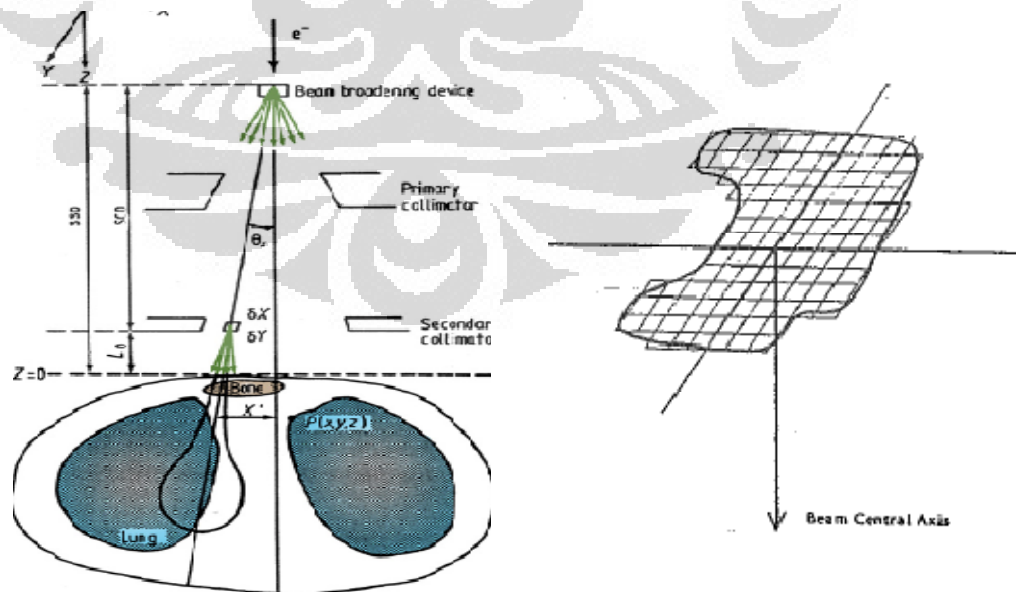
$$\sigma_x^2 = \frac{1}{2} \int_0^z \left(\frac{\theta^2}{\rho l} (z') \right) \rho(z') (z - z')^2 dz' \dots\dots\dots(5)$$

dimana ρ adalah densitas medium yang dilalui, $\theta^2/\rho l$ adalah *massa anguler scattering power*.

Distribusi dosis pada daerah central axis untuk bidang yang *rectanguler* adalah

$$D(o, o, z) = D_{\infty}(o, o, z) \operatorname{erf} \frac{a}{\sigma_r(z)} \operatorname{erf} \frac{b}{\sigma_r(z)} \dots\dots\dots(6)$$

Implementasi algoritma berkas pencil membutuhkan persamaan distribusi dosis yang di set up sehingga dosis pada titik (x,y,z) pada daerah yang diberikan dapat dikalkulasi sebagai integral dosis yang dikontribusi oleh persamaan Gaussian pencil beam.



Gambar 2.7 Algoritma Hogstrom untuk Kalkulasi Distribusi Dosis

2.8 Simulasi Monte Carlo dengan Program EGSnrc

Referensi metode Monte Carlo berawal dari Comte de Buffon (Wiley dan Son, 1981) yang mengusulkan bahwa untuk mengevaluasi kemungkinan jarum dengan panjang L jatuh ke sebuah garis-garis paralel dengan jarak d , dimana $d > L$, maka probabilitasnya adalah

$$P = \frac{2L}{\pi d} \dots\dots\dots(7)$$

Menurut Daryoush dkk (2000) metode Monte Carlo merupakan metode numerik yang mencoba memodelkan suatu proses yang real melalui proses simulasi sebuah sistem. Dalam hal ini Monte Carlo adalah solusi ke skala makroskopis dari sebuah sistem yang berinteraksi secara mikroskopis. Solusinya didasarkan pada sampling bilangan *random* atau interaksi mikroskopis sebuah sistem hingga hasilnya konvergen. Kenyataan bahwa interaksi mikroskopis dapat dimodelkan secara matematis memungkinkan solusinya dapat dieksekusi dengan komputer menggunakan logaritma tertentu.

Lebih lanjut Daryoush dkk (2000) menyatakan bahwa metode Monte Carlo telah banyak diterapkan di berbagai bidang diantaranya bidang ilmu sosial, keuangan, genetika, kimia kuantum, ilmu radiasi, radioterapi dan dosimetri radiasi. Dalam bidang fisika, tehnik Monte Carlo berguna untuk memprediksi *trajectory* elektron dan foton berenergi tinggi yang kemudian diverifikasi dengan eksperimen. Dalam hal ini, teori tidak mampu menggambarkan secara pasti dan secara matematis dari skala mikroskopis dan makroskopis tersebut. Teori hanya sebagai pengembangan intuisi untuk merancang suatu pengukuran. Monte Carlo adalah suatu perkiraan (penaksiran) terhadap proses tersebut dan dapat membantu dalam analisa eksperimen dan verifikasi perancangan.

Setiap sistem yang dapat direpresentasikan dengan fungsi distribusi probabilitas maka dapat disimulasikan dengan Monte Carlo. Bagian yang terpenting dalam metode Monte Carlo adalah *random number generator*. Random number dapat berupa suatu nilai tertentu dari variabel random kontinu yang terdistribusi dalam suatu interval tertentu. Untuk menentukan

produksi dari random number maka digunakan algoritma metematik yang disebut *pseudo random number*.

Metode fungsi distribusi probabilitas kumulatif merupakan salah satu tehnik yang sesuai dengan metode Monte Carlo. Asumsi bahwa fungsi probabilitas $p(x)$ yang dinormalisasikan dari a sampai b adalah

$$\int_a^b dx'p(x') = 1 \dots\dots\dots (8)$$

Fungsi distribusi probabilitas kumulatif dikonstruksikan sebagai berikut:

$$c(x) = \int_a^x dx'p(x') \dots\dots\dots (9)$$

Variabel x terdistribusi secara random menurut $p(x)$ jika nilai x dipilih dengan menginvers $c(x)$ menurut persamaan:

$$x = c^{-1}(R) \dots\dots\dots (10)$$

Dimana R merupakan random number yang terdistribusi secara merata antara 0 dan 1. Sebagai contoh dapat ditunjukkan bahwa jarak interaksi diberikan oleh persamaan dibawah ini:

$$x = -\frac{1}{\mu_{tot}} \log_e (1 - R) \dots\dots\dots (11)$$

Dimana μ_{tot} merupakan jumlah dari koefisien interaksi dari proses Moller scatering, Bahba Scatering, Bremsstrahlung, Positron annihilation, elastis scatering dan eksitasi. Sehingga, probabilitas distribusi jarak interaksi adalah

$$p(x) = \mu \exp (-\mu x) \quad 0 \leq x \leq \infty \dots\dots\dots (12)$$

Ketika berkas elektron melawati sebuah medium, pergerakan sinar (displacement atau rotasi) diasumsikan menggunakan konstruksi geometris sederhana, dimana partikel mempunyai posisi \vec{x}_0 , dan arah \vec{u}_0 dan jarak lintasannya s , maka posisi barunya adalah

$$\vec{x} = \vec{x}_0 + \vec{u}_0s \dots\dots\dots (13)$$

Dimana,

$$\vec{u}_0 = (u_0, v_0, w_0) = (\sin \theta_0 \cos \varphi_0, \sin \theta_0 \sin \varphi_0, \cos \theta_0) \quad \text{dan} \quad \theta_0, \varphi_0$$

adalah sudut polar dan sudut azimuth.

Rotasi setelah mengalami scatering oleh sudut polar Θ dan sudut azimuth Φ , diasumsikan sebagai berikut:

$$u = \sin \theta \cos \varphi = u_0 \cos \Theta + \sin \Theta (w_0 \cos \Phi \cos \varphi_0 - \sin \Phi \sin \varphi_0)$$

$$v = \sin \theta \sin \varphi = v_0 \cos \Theta + \sin \Theta (w_0 \cos \Phi \sin \varphi_0 - \sin \Phi \cos \varphi_0)$$

$$w = \cos \theta = w_0 \cos \Theta - \sin \Theta - \sin \theta_0 \cos \Phi \dots\dots\dots(14)$$

yang merupakan arah baru partikel setelah mengalami hamburan.

Pendekatan konvensional yang digunakan untuk kalkulasi taksiran kesalahan dengan mengasumsikan bahwa simulasi yang digunakan untuk N partikel histori, maka rata-rata nilai x adalah

$$\langle x \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \dots\dots\dots(15)$$

Taksiran untuk varians yang berhubungan dengan distribusi x_i adalah

$$s_x^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \langle x \rangle)^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i^2 - \langle x \rangle^2) \dots\dots\dots(16)$$

Masalah yang mendasar dalam kalkulasi transport partikel dengan teknik Monte Carlo adalah menemukan jarak partikel yang melintas untuk mengintersect suatu permukaan. Ini dilakukan dengan menggunakan notasi Olmsted, permukaan kuadratik 3-D:

$$f(\vec{x}) = \sum_{i,j=0}^3 a_{ij} x_i x_j = 0 \dots\dots\dots(17)$$

Untuk menghitung jarak *intercept* dari permukaan kuadratik, anggapan bahwa lintasan partikel mengikuti persamaan dibawah ini:

$$\vec{x} = \vec{p} + \vec{u}s \dots\dots\dots(18)$$

Sehingga persamaannya menjadi:

$$s^2 \left(\sum_{i,j=0}^3 a_{ij} \mu_i \mu_j \right) + 2s \left(\sum_{i,j=0}^3 a_{ij} p_i \mu_j \right) + \left(\sum_{i,j=0}^3 a_{ij} p_i p_j \right) = 0 \dots\dots\dots(19)$$

Dalam radioterapi, kuantitas yang paling penting untuk dihitung adalah distribusi dosis. Telah dibuktikan pada beberapa riset bahwa, dosis kurang sekitar 5% pada tumor, akan menyebabkan kenaikan dosis pada jaringan sehat sehingga melebihi dosis yang dapat ditoleransi. Meskipun teori tentang transportasi radiasi baik itu foton maupun elektron sudah cukup diketahui, namun perhitungan secara analitik untuk dosis sering mengakibatkan kesalahan yang cukup besar.

EGSnrc merupakan program untuk mensimulasikan transport berkas elektron dan foton dengan metode *Monte Carlo*. EGSnrc merupakan

pengembangan dari EGS4 yang telah dilakukan oleh *National Research Council of Canada* (NRCC). EGSnrc dapat digunakan untuk mensimulasikan foton dari energi 1 keV hingga ratusan GeV, dan mensimulasikan transportasi elektron dari energi keV hingga ratusan GeV (Rogers dkk, 2006).

Terdapat beberapa program Monte Carlo *general-purpose* yang dibuat menggunakan EGSnrc. Diantaranya BEAMnrc, DOSXYZnrc, dan BEAMDP. BEAMnrc merupakan program yang sudah dibuat dengan modul-modul tertentu, sehingga *user* tidak perlu mendesain geometri dari awal. BEAMnrc ini sangat berguna untuk mendesain kepala akselerator DOSXYZnrc adalah program untuk menentukan dosis yang dideposisi pada medium dengan voxel berbentuk *rectilinear*. Sedangkan BEAMDP adalah program untuk menganalisa *phase space file* yang dihasilkan dari BEAMnrc (Rogers dkk, 2006)

Menurut Rogers dkk (2006) bahwa dalam simulasi berkas (*beam simulators*) dengan menggunakan BEAMnrc untuk berkas elektron dengan menggunakan teknik Monte Carlo dibangun dari beberapa seri komponen module (CM). Berikut ini adalah *Component Modules* (CMs) yang digunakan dalam simulasi berkas elektron:

1. SLABS

Digunakan untuk mendefinisikan multiple bidang dengan ketebalan yang berbeda-beda dan merupakan CM yang paling sederhana tetapi mempunyai banyak aplikasi.

2. CONESTAK

Digunakan untuk mendefinisikan *secondary flattening filter*, dimana daerah terdalam didefinisikan sebagai *heavy material* dan daerah terluar didefinisikan sebagai udara.

3. FLATFIT

Digunakan untuk mendefinisikan *Primary Scattering Foil* dan merupakan component modules yang paling kompleks.

4. CHAMBER

Digunakan untuk mendefinisikan ionisasi chamber dan berbagai struktur lainnya dengan simetri selinder yang berpusat di beam axis. *Component module* ini digunakan juga untuk menghitung dosis kedalaman central axis (*depth dose central axis*) di dalam phantom.

5. JAWS

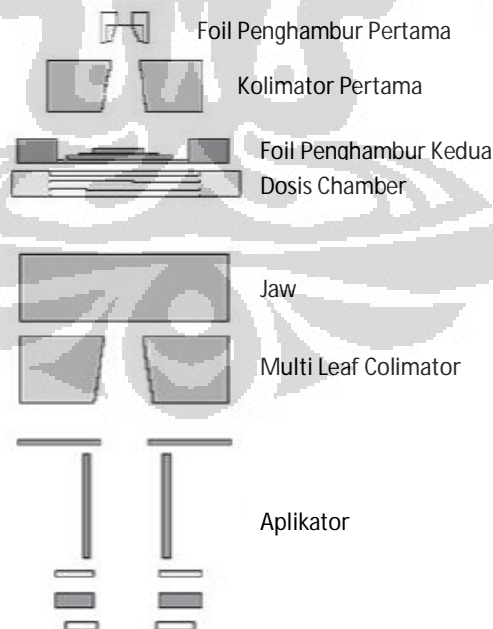
Merupakan *component module* yang memodelkan permukaan flat yang tegak lurus terhadap arah x dan y.

6. MLC

Component Module ini digunakan untuk memodelkan Multi-Leaf Collimator double fokus dengan permukaan yang flat (datar).

7. APPLICATOR

Component Module ini mendefinisikan aplikator yang digunakan, berapa ketebalan yang digunakan dan lebar X dan Y serta posisinya relatif terhadap bidang referensi (*reference plan*).



Gambar 2.8 Skema Treatment Head dengan Component Modules (CM) yang digunakan di dalam simulasi Monte Carlo.

(Tuathan, 2008).

Menurut Faddegon dkk (2006) DOSXYZnrc merupakan kode simulasi Monte Carlo yang didasarkan pada EGSnrc untuk kalkulasi distribusi dosis tiap voxel phantom. Densitas dan material dalam setiap medium mungkin bervariasi. Variasi berkas energi yang diradiasi pada phantom berasal dari phase space BEAMnrc. Program pembantu seperti ctcreate menyebabkan program dapat membaca set data CT dalam satuan Hounsfield Unit dan mengkonversinya ke informasi yang dibutuhkan oleh DOSXYZnrc untuk proses simulasi transport dalam phantom. Lebih lanjut Faddegon dkk (2006) menyatakan bahwa statdose merupakan program yang digunakan untuk menganalisis dosis (*depth dose*) distribusi 3-dimensi yang dibangkitkan dari DOSXYZnrc dan memplot dalam 1-dimensi menggunakan *package plot xvrg/xmrg*.

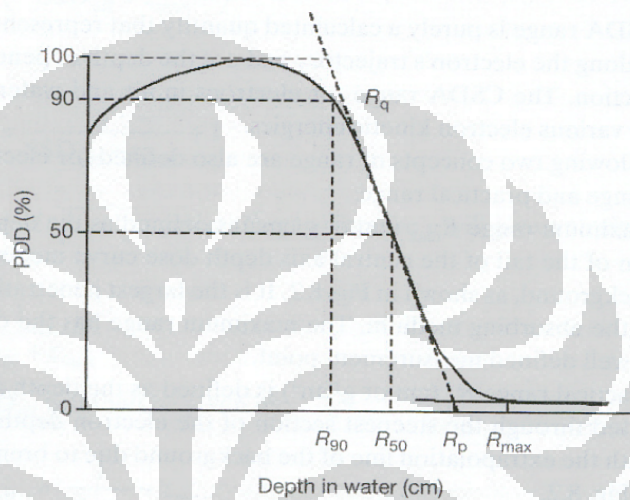
2.9 Karakteristik Berkas Elektron

Elektron adalah partikel subatom yang bermuatan negatif dan ketika dipercepat, dia dapat menyerap ataupun memancarkan energi dalam bentuk foton. Dalam terapi radiasi, berkas elektron dihasilkan oleh pemercepat linear accelerator untuk pengobatan tumor superficial. Hal ini dikarenakan berkas elektron hanya mampu menembus kedalaman yang terbatas sebelum diserap biasanya sampai dengan 5 cm untuk energi 5 – 20 MeV (Khan dkk, 1991).

Lebih lanjut Khan dkk (1991) menyatakan bahwa elektron sebelum sampai ke pasien, akan berinteraksi terlebih dahulu dengan ionisasi chamber di dalam head akselerator, kolimator, udara dan aplikator sehingga energi yang sampai ke pasien berkurang. Saat elektron melewati medium, elektron berinteraksi dengan atom dengan variasi gaya Coulomb. Variasi gaya Coulomb yang terjadi antara lain tumbukan tidak elastis dengan elektron-elektron atom yang menghasilkan ionisasi dan eksitasi dari atom, tumbukan elastis dengan inti atom menghasilkan hamburan elastis dengan mengubah arah pergerakan elektron tanpa kehilangan energi, tumbukan tidak elastis dengan inti atom menghasilkan sinar-X *bremstrahlung* sehingga elektron

kehilangan energinya, dan tumbukan elastis dengan elektron atom menghasilkan elektron sekunder.

Tumbukan tidak elastis menghasilkan ionisasi atom atau berubah menjadi bentuk lain seperti energi foton, energi eksitasi. Tumbukan elastis tidak menyebabkan energi kinetik elektron berkurang hanya saja terjadi perubahan arah elektron atau energi terbesar diantara partikel yang bertumbukan.



Gambar 2.9 Kurva berkas elektron

Pada daerah *build-up* persentase dosis kedalaman (Gambar 3), kemungkinan terjadi tumbukan keras (*hard collision*) antara berkas elektron dengan elektron atom medium, jika elektron atom menyerap energi lebih tinggi dari energi ikatnya maka atom mengalami ionisasi. Elektron yang keluar akibat tumbukan keras tersebut memiliki kecepatan tinggi yang disebut sinar delta, elektron tersebut turut memberikan kontribusi kenaikan dosis pada daerah *build-up*. Pada energi berkas elektron rendah *build-up* lebih curam dibandingkan dengan energi berkas elektron tinggi hal ini dikarenakan pada energi rendah berkas elektron lebih mudah terhambur sehingga persentase dosis permukaan energi rendah terjadi pada kedalaman yang lebih rendah dibandingkan dengan elektron yang lebih tinggi. Pada daerah setelah *build-up* energi elektron terus menerus berkurang dan terjadi hamburan. Energi yang hilang akibat interaksi elektron tergantung dari besar energi berkas elektron dan densitas dari medium. Tingkat energi yang

hilang disebut *stopping power* dan nilainya lebih besar pada medium yang memiliki sedikit nomor atom karena elektron yang dimiliki lebih banyak dibandingkan dengan nomor atom yang lebih besar dan juga nomor atom yang lebih besar memiliki ikatan elektron yang kuat.

Kontaminasi sinar-X *bremstrahlung* dipengaruhi oleh besarnya energi berkas elektron. Pada energi 4 MeV kontaminasi kurang dari 1% dan energi berkas 20 MeV kurang dari 4%.

2.10 Dosimetri Berkas Elektron

Menurut Bruce dkk (2009) bahwa energi yang sampai ke permukaan phantom berbeda dengan energi nominal berkas elektron karena adanya interaksi elektron dengan perangkat linac. Energi yang sampai ke permukaan adalah

$$\bar{E}_0 = C_4 R_{50} \dots\dots\dots (20)$$

dengan $C_4 = 2,33 \text{ MeV.cm}^{-1}$, R_{50} adalah kedalaman pada posisi 50% dari dosis maksimum. R_{50} ditentukan dari distribusi dosis kedalam air pada jarak sumber ke detektor (SSD) 100 cm. Karakteristik lain berkas elektron dengan menentukan energi pada kedalaman medium.

$$\bar{E}_z = \bar{E}_0 (1 - z/R_p) \dots\dots\dots (21)$$

dengan R_p adalah jangkauan praktis yang merupakan garis tangensial pada kurva dosis kedalaman saat kurva memotong daerah *bremstrahlung*. Persamaan ini hanya dapat digunakan untuk energi kurang dari 10 MeV atau untuk kedalaman pendek pada energi besar.

Panduan pengukuran dosimetri berkas elektron telah banyak diterbitkan untuk keperluan klinis. American Association of Physicists in Medicine (AAPM) telah banyak menerbitkan protokol dalam dosimetri yang terus diperbaharui. Referensi yang umum digunakan adalah AAPM 1983 yang membahas dosimetri untuk foton dan berkas elektron.

Menurut Coleman dkk (2005) bahwa pengukuran dosimetri berkas elektron dapat dibagi dalam 2 kategori yakni pengukuran dosis pada suatu titik dan distribusi dosis relatif. Pengukuran dosis pada suatu titik untuk menentukan kolaborasi dosis dan pengukuran *in vivo* untuk memastikan dosis pada pasien. Distribusi dosis relatif seperti pengukuran kurva dosis kedalaman, profil dan distribusi isodos. Secara umum ada tiga tipe dosimetri yang digunakan yakni bilik ionisasi (*ionization chamber*), film dan dosimetri solid (TLD). Bilik ionisasi merupakan dosimetri yang paling banyak dipakai karena keakuratan, tingkat ketelitian yang tinggi dan mudah dalam penggunaannya.

Sekarang ini, berkas elektron memiliki peranan penting dalam terapi radiasi pengion. Berkas elektron biasanya digunakan untuk treatment pasien untuk kanker yang berada pada lapisan permukaan seperti kulit, bibir, dinding dada, dada dan leher. Secara klinis, kuantitas yang paling penting dalam kalkulasi radioterapi adalah distribusi dosis tiap monitor unit (MU) pada pasien yang mengalami *treatment* kanker dengan radiasi pengion (Jabbari dkk, 2011).

Menurut Prasad dkk (1983) bahwa sifat berkas elektron yang memiliki keuntungan dalam *treatment planning* sangat baik digunakan untuk lesion (penyakit) pada daerah *superficial* (daerah permukaan) dimana dosisnya tinggi pada daerah permukaan dan akan menurun secara tajam dibawah *depth dose* 80%.

Informasi tentang ketebalan dinding dada pasien serta densitas elektron seperti paru dan *rib bone* sangat penting dalam penentuan distribusi dosis ketika berkas elektron yang digunakan. Absorpsi dan scattering dari berkas elektron sangat dipengaruhi oleh ketidakhomogenan dari volume yang diradiasi.

Lebih lanjut Jabbari dkk (2011) menyatakan bahwa sifat dosimetri dari berkas elektron yang dihasilkan oleh mesin modern radiotherapy sangat bervariasi berdasarkan manufacturnya, biasanya perbedaannya terletak pada perancangan *treatment head*. Bahkan linac yang dihasilkan dari pabrik yang

sama dapat menghasilkan karakteristik berkas yang berbeda (spektrum energi dan distribusi angular-nya).

Untuk kasus *breast-conserving therapy*, terdiri atas pembedahan pada kanker payudara dan dilanjutkan dengan treatment dengan radioterapi yang merupakan salah satu metode yang digunakan untuk wanita dengan kanker payudara *stage 1* dan *2*. Radiasi hambur yang mengenai jantung dan paru dapat menyebabkan kerusakan pada jaringan itu sendiri pada wanita yang melakukan radioterapi untuk kanker payudara.

Dalam mencoba menghitung dosis yang diterima pasien secara akurat, ada beberapa pendekatan (metode) yang dilakukan. Metode yang paling akurat dalam menghitung dosis atau melihat distribusi dosis yang diterima pasien adalah metode Monte Carlo. Metode ini merupakan simulasi transport partikel.

Dalam studi ini, Monte Carlo digunakan untuk menghitung dosis yang diterima pasien kanker payudara pada organ parunya dari treatment radiotherapy. Data yang dihasilkan nantinya akan dijadikan sebagai taksiran relevansi klinis dari penggunaan algoritma dosis kalkulasi untuk planning treatment planning dengan radiasi pengion.

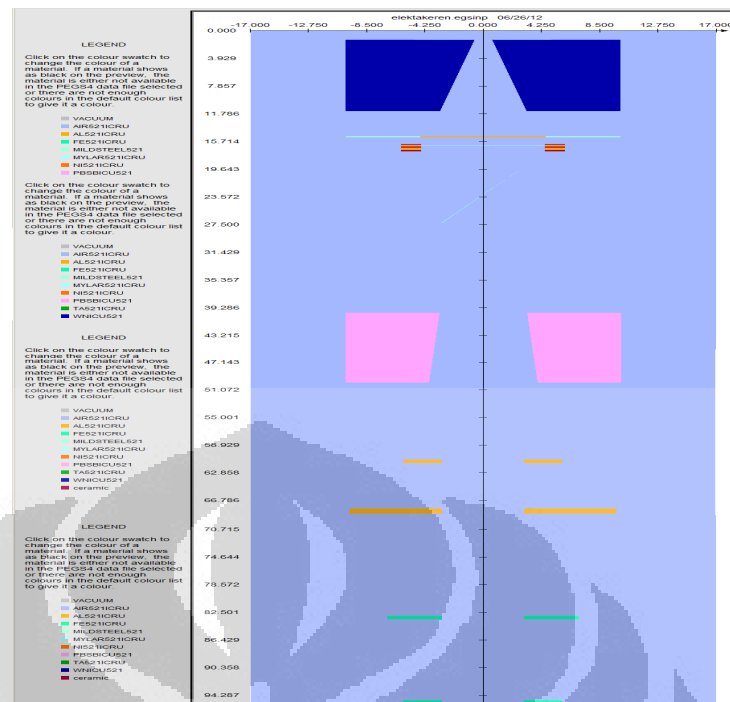
BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Dalam penelitian ini energi elektron yang diamati 6 MeV, 10 MeV, dan 12 MeV yang diproduksi oleh linac Elekta dengan menggunakan lapangan aplikator $14 \times 14 \text{ cm}^2$, $10 \times 10 \text{ cm}^2$, dan $6 \times 6 \text{ cm}^2$ disimulasikan. Proses simulasi dilakukan dalam 3 tahap, yang pertama adalah pemodelan kepala linac dengan menggunakan sistem BEAMnrc. Kedua, simulasi PDD dan profil dosis dalam air menggunakan DOSXYZnrc. Ketiga, dengan DOSXYZnrc dilakukan simulasi interaksi berkas elektron dengan medium yang direpresentasikan oleh citra CT.

3.1 Pemodelan Kepala Linac

Spesifikasi aksesoris kepala linac yang digunakan untuk simulasi berkas elektron diambil sama dengan penelitian Eko Setiawan[29] yang dapat dilihat pada lampiran E. Bagian ini tersusun dari beberapa komponen, yaitu: *exit window*, *primary scattering foil*, *primary collimator*, *secondary scattering foil*, *monitor chamber*, *mirror*, *jaw* dan *applicator*. Gambar 3.2 menunjukkan visualisasi component module BEAMnrc.

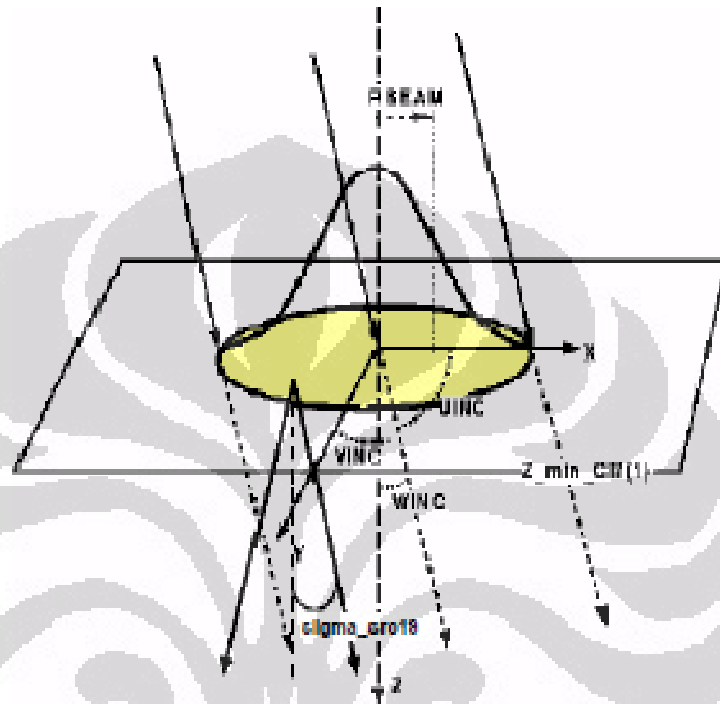


Gambar 3.1 Visualisasi *Component Module Beamnrc*

Berkas elektron yang keluar dari *exit window* dalam simulasi ini juga dimodelkan, dimana diasumsikan mempunyai bentuk melingkar dengan distribusi radial Gaussian terhadap sumbu-z. Dalam sistem BEAMnrc, berkas yang berbentuk demikian direpresentasikan oleh ISOURCE-19, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 3.3

Ada beberapa parameter masukan pada ISOURCE-19 ini. Pertama adalah parameter untuk menentukan arah datangnya berkas. Dalam simulasi ini, berkas diarahkan sejajar sumbu-z sehingga nilai UINC, VINC dan WINC berturut-turut adalah 0, 0, dan 1. Kedua, parameter untuk menentukan lebar distribusi radial berkas didefinisikan dengan FWHM (*Full Width Half Maximum*). Nilai FWHM yang digunakan dalam simulasi ini adalah 0.05 cm. Ketiga, parameter yang divariasikan yaitu nilai energi berkas yang digunakan dalam simulasi. Untuk mensimulasikan linac dengan keluaran berkas energi nominal 6 MeV, 10 MeV dan 12 MeV maka energi awal elektron pada parameter nilai energi berkas divariasikan.

Hasil simulasi BEAMnrc ini berupa file dinamakan *phase space* yang berisi informasi energi, distribusi spasial dan sudut lintasan partikel terhadap partikel awal. Selanjutnya, data *phase space* digunakan sebagai input DOSXYZnrc.

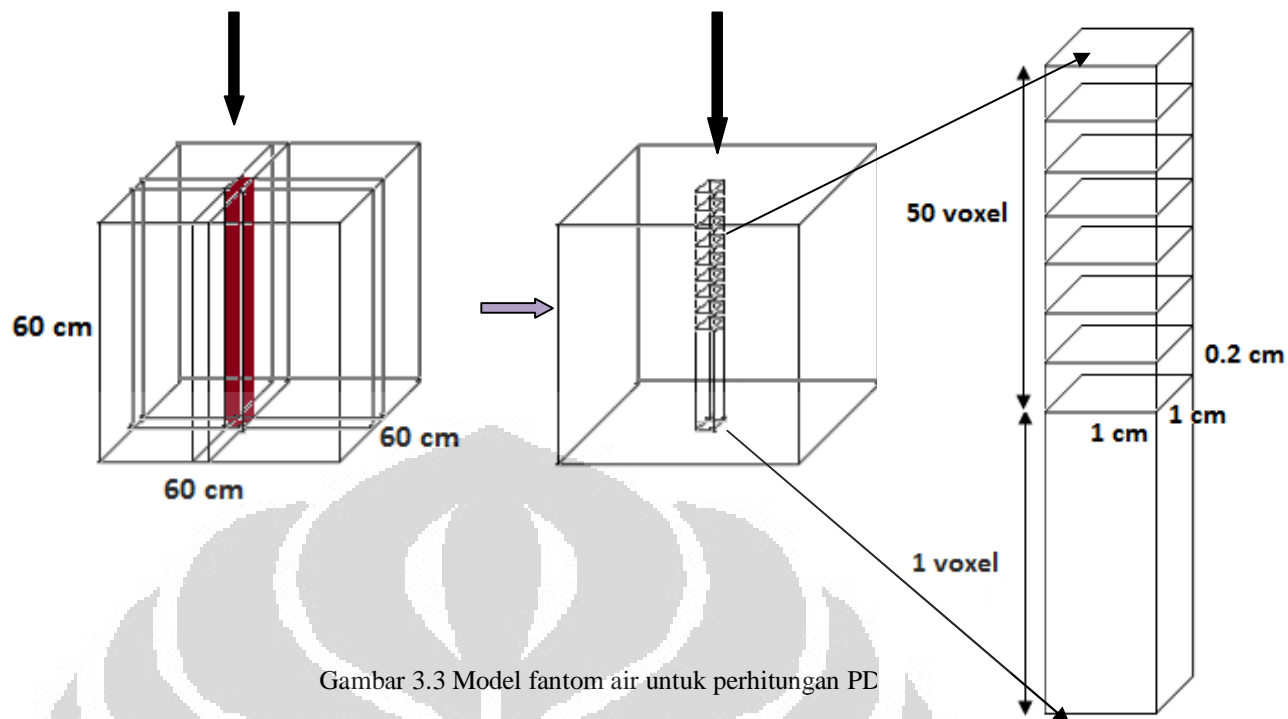


Gambar 3.2 ISOURCE-19 sebagai sumber berkas elektron

3.2 Simulasi PDD dan Profil Dosis dalam Air

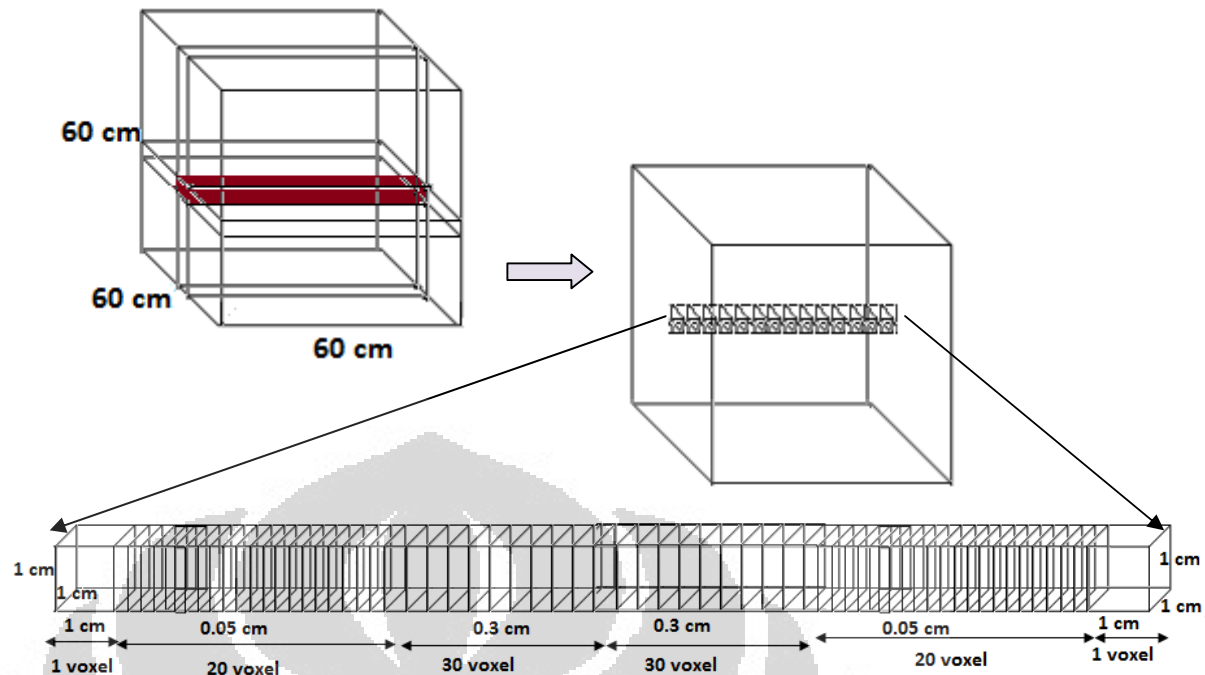
Nilai PDD dan profil dosis berkas elektron dalam simulasi monte carlo menggunakan DOSXYZnrc. Interaksi dimodelkan dimana berkas elektron berinteraksi dengan phantom air berukuran $60 \times 60 \times 60 \text{ cm}^3$.

Untuk pengukuran PDD, phantom dibagi menjadi 2 zone disebut juga dose zone. Dose zone terdiri dari lapisan-lapisan (layers) voxel. Dose zone pertama dari permukaan sampai kedalaman 10 cm, dengan memilih ukuran voxel $1 \times 1 \times 0.2 \text{ cm}^3$ maka lapisan zone pertama merupakan susunan 50 voxel. Dose zone kedua adalah kolom susunan voxel ukuran $1 \times 1 \times 50 \text{ cm}^3$. Ilustrasi pemodelan phantom dapat dilihat pada Gambar 3.4 dibawah



Gambar 3.3 Model fantom air untuk perhitungan PD

Untuk penentuan profil dosis, *dose zone* dimodelkan tegak lurus dengan sumbu utama dan berada pada kedalaman d_{max} yaitu 1.3 cm, 2.1 cm dan 2.7 cm berturut-turut untuk energi 6 MeV, 10 MeV dan 12 MeV. Ketiga kedalaman z_{max} diperoleh dari data pengukuran RSPAD Gatot Subroto. *Dose zone* terdiri dari lapisan-lapisan (*layers*) ke arah sumbu-x, berisi susunan voxel pada daerah *tail* ukuran voxel $1 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$, daerah *penumbra* $1 \times 1 \times 0.05 \text{ cm}^3$ dan daerah berkas $1 \times 1 \times 0.3 \text{ cm}^3$ seperti yang diilustrasikan pada Gambar 3.5 dibawah ini.



Gambar 3.4 Model fantom air untuk perhitungan profil dosis

Hasil simulasi PDD dan profil dosis dibandingkan dengan hasil pengukuran dengan phantom air yang dilakukan oleh RSPAD Gatot Subroto. Dari hasil perbandingan, diperoleh energi elektron yang paling sesuai dengan hasil pengukuran yang selanjutnya akan digunakan untuk simulasi dengan pasien.

3.3 Simulasi Distribusi Dosis dalam Pasien

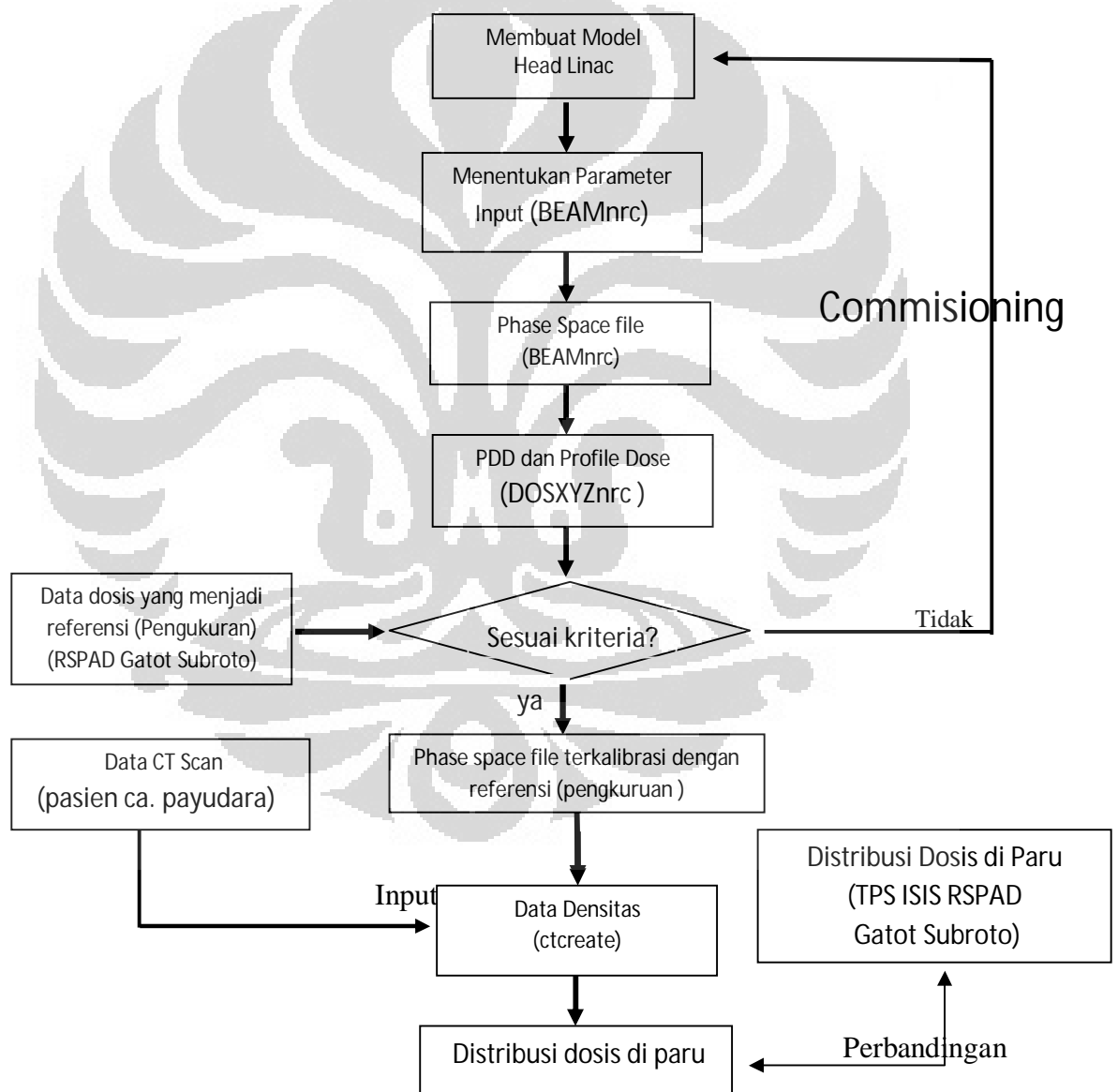
Pertama kali untuk simulasi digunakan program *ctcreate* yang mengubah citra CT sebagai phantom dalam DOSXYZnrc, *ctcreate* akan mengubah file data dari hasil CT (berupa data dicom) ke data densitas (berupa nilai densitas). Set data hasil CT Scan umumnya dalam format DICOM. Dalam data CT Scan merupakan hasil dari CT Scan bagian thorax tubuh manusia. Citra thorax yang dipilih berasal dari pasien kanker payudara yang telah menjalani pasca operasi (*mastectomy*).

Irisan (slice) yang dipilih dengan melihat data DICOM, dipilih irisan citra CT yang tepat pada sumbu utama berkas, yang hasil datanya dinamakan *egsphant*. Interaksi antara berkas elektron dengan file *egsphant* dilakukan dengan DOSYXZnrc. Hasil simulasi interaksi

berkas elektron dengan *egsphant* akan menghasilkan distribusi dosis yang berupa file *3ddose*. Hasil simulasi tersebut, dengan program linux dapat ditampilkan citra 2D.

Hasil gambar 2D dari simulasi Monte Carlo kemudian dibandingkan dengan hasil TPS ISIS milik RSPAD Gatot Subroto untuk melihat distribusi berkas elektron di paru dan jantung.

Gambar 3.6 menunjukkan *flow chart* tahapan proses pengukuran dan simulasi Monte Carlo yang dilakukan dalam penelitian ini.



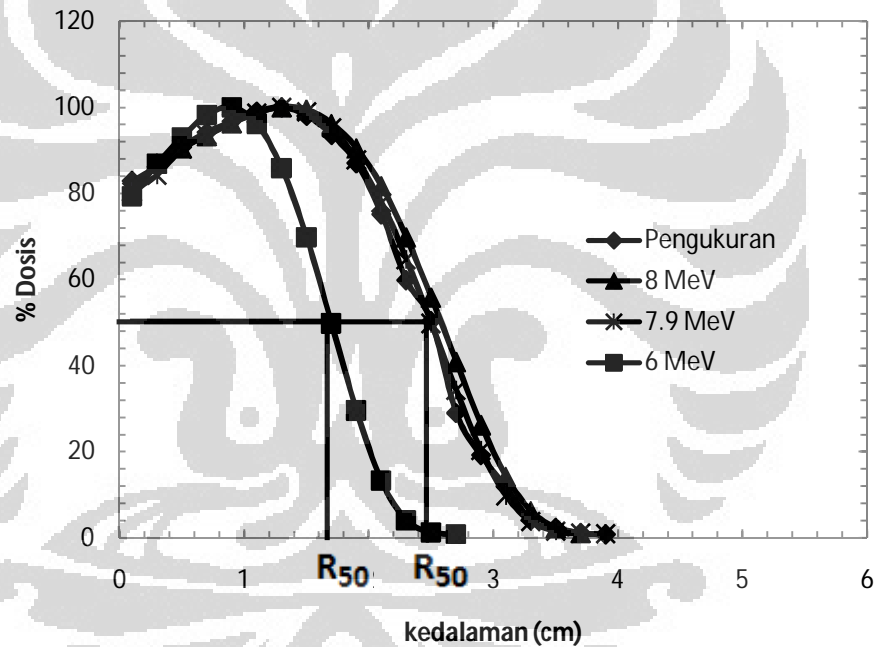
Gambar 3.5 Bagan Prosedur Penelitian

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

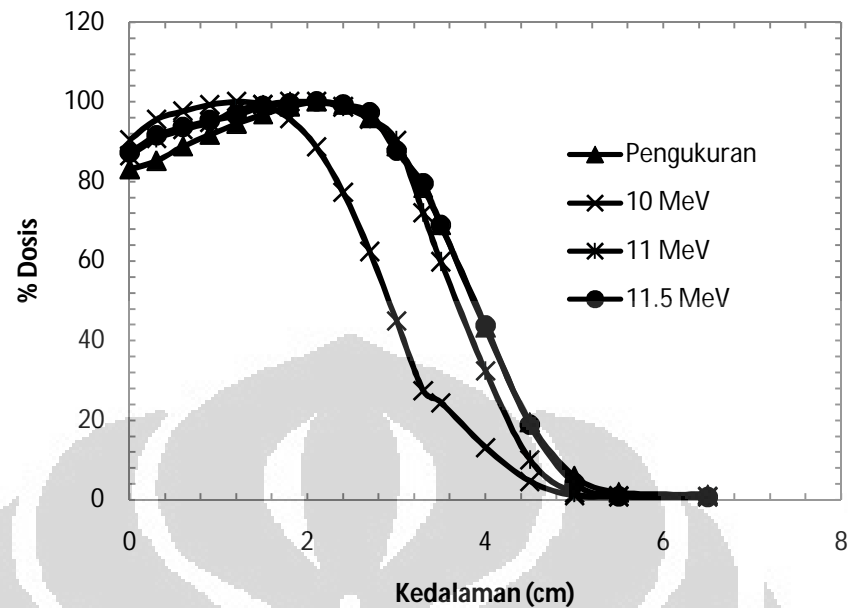
4.1 Hasil Penelitian

Pertama kali yang dilakukan adalah penentuan energi elektron yang menghasilkan PDD sama atau mendekati dengan hasil pengukuran di *water phantom*. Untuk energi berkas 6 MeV dilakukan simulasi 6 MeV, 7.9 MeV dan 8 MeV dengan lapangan $14 \times 14 \text{ cm}^2$, dimana dapat dilihat pada Gambar 4.1

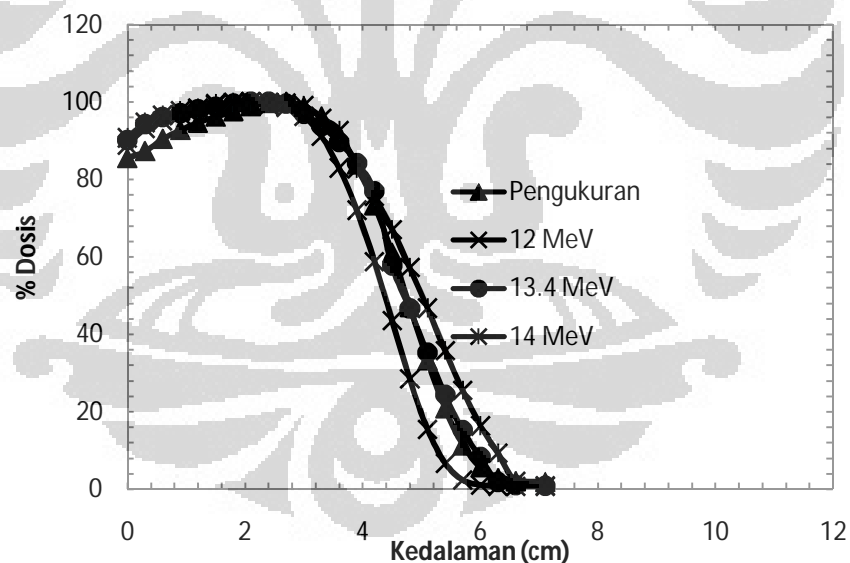


Gambar 4.1 PDD dengan variasi energi ketetik awal pada energi 6 MeV dengan lapangan aplikator $14 \times 14 \text{ cm}^2$

Untuk energi berkas 10 MeV dan 12 MeV, simulasi dilakukan berturut-turut 10 MeV, 11 MeV, 11.5 MeV dan 12 MeV, 13.4 MeV, 14 MeV seperti yang terlihat pada Gambar 4.2 dan Gambar 4.3



Gambar 4.2 PDD dengan variasi energi kinetik awal pada energi 10 MeV dengan lapangan aplikator $14 \times 14 \text{ cm}^2$



Gambar 4.3 PDD dengan variasi energi kinetik awal pada energi 12 MeV dengan lapangan aplikator $14 \times 14 \text{ cm}^2$

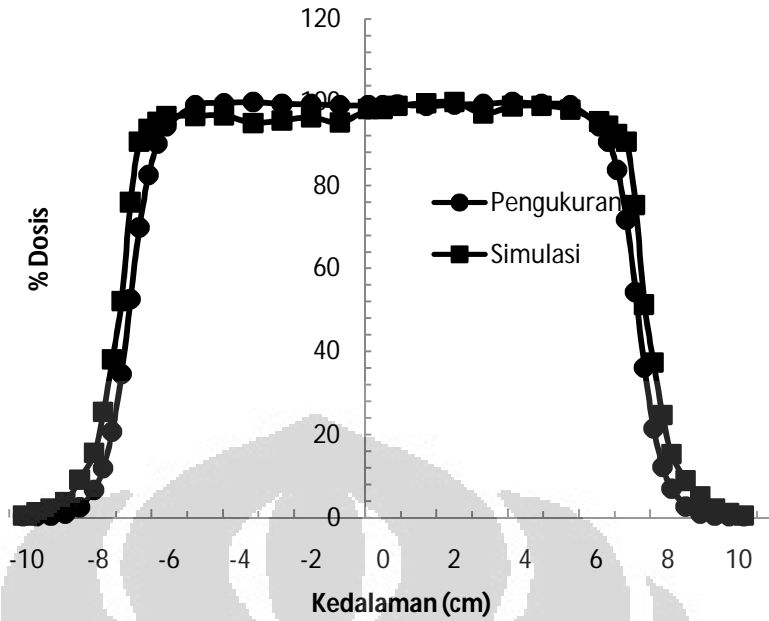
Pada simulasi Monte Carlo disekitar energi berkas nominal 6 MeV yang diperoleh kemudian ditentukan nilai R_{50} yang paling dekat dengan R_{50} hasil pengukuran untuk mencocokkan hasil simulasi dengan pengukuran di water phantom. Untuk lebih jelasnya nilai R_{50} hasil pengukuran dan simulasi

disekitar berkas energi nominal 6 MeV, 10 MeV dan 12 MeV dapat dilihat pada Tabel 4.1

Tabel 4.1 Nilai R_{50} hasil pengukuran dan simulasi Monte Carlo berkas elektron dalam medium air dengan energi nominal 6 MeV, 10 MeV dan 12 MeV dengan menggunakan aplikator 14 x 14 cm²

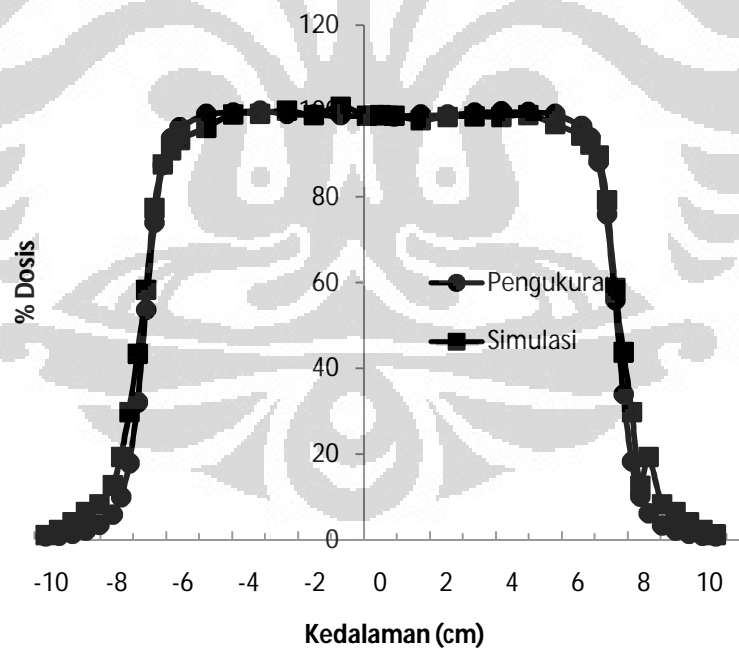
Nilai R_{50} disekitar Energi Nominal (MeV)	Energi (MeV)	R_{50} (cm)
6	Pengukuran (6)	2.5
	6	1.7
	7.9	2.5
	8	2.7
10	Pengukuran (10)	3.8
	10	2.8
	11	3.6
	11.5	3.8
12	Pengukuran (12)	4.6
	12	4.3
	13.4	4.6
	14	4.9

Dari hasil penentuan R_{50} yang paling dekat dengan hasil pengukuran, kemudian hasil simulasi yang energinya memiliki nilai R_{50} yang dekat dengan hasil pengukuran digunakan untuk membuat profile dose. Profile dose berkas elektron baik untuk simulasi dan pengukuran pada kedalaman maksimum (d_{max}) untuk energi 6 MeV dengan lapangan aplikator 14 x 14 cm² dapat dilihat pada Gambar 4.4

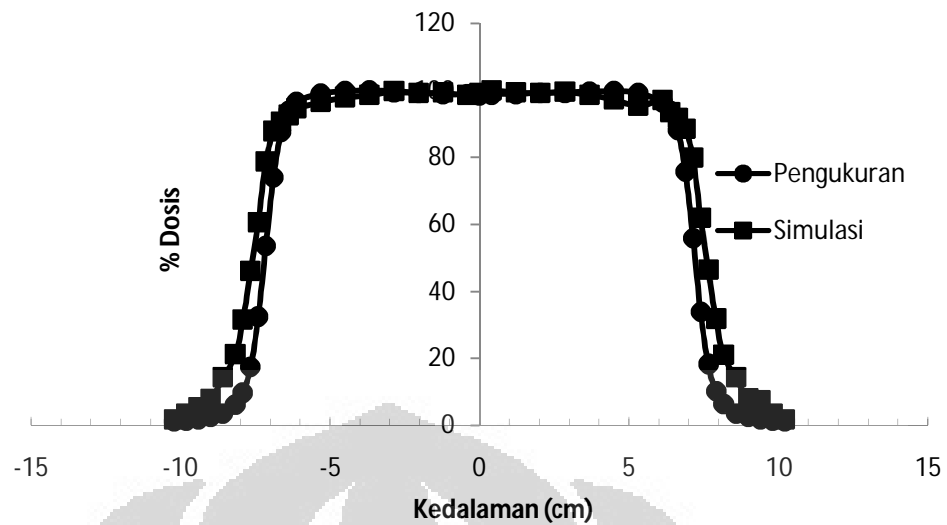


Gambar 4.4 Profil dosis untuk energi 6 MeV dengan lapangan aplikator $14 \times 14 \text{ cm}^2$

Sedangkan untuk profil dosis simulasi Monte Carlo dan pengukuran di fantom air pada berkas energi nominal 10 MeV dan 12 MeV berturut-turut dapat dilihat pada Gambar 4.5 dan Gambar 4.6

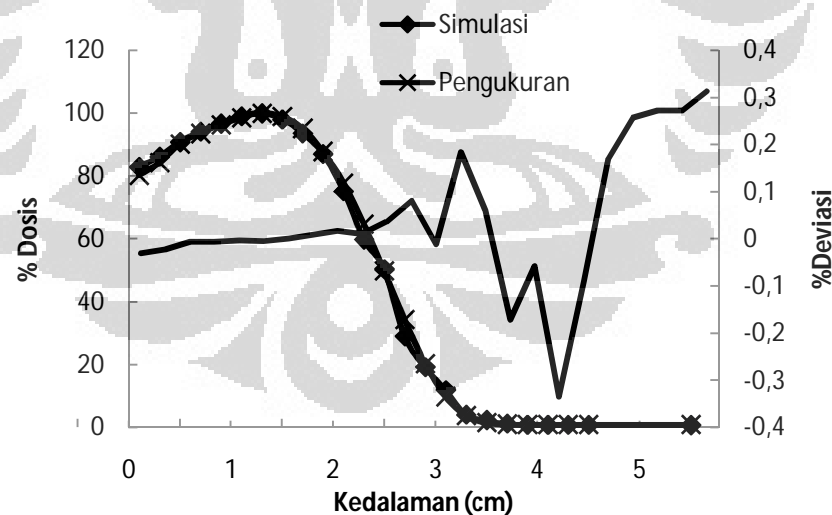


Gambar 4.5 Profile Dose untuk Energi 10 MeV dengan lapangan aplikator $14 \times 14 \text{ cm}^2$



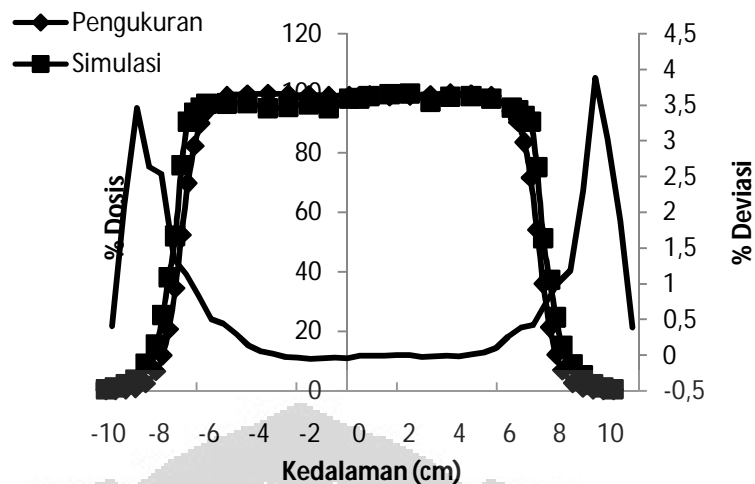
Gambar 4.6 Profil Dosis untuk Energi 12 MeV dengan lapangan aplikator $14 \times 14 \text{ cm}^2$

Deviasi nilai antara hasil pengukuran dan simulasi diperlukan untuk mengukur kecocokan (error) data yang diperoleh. Deviasi antara hasil pengukuran PDD di fantom air dengan simulasi Monte Carlo untuk berkas energi nominal 6 MeV dapat dilihat pada Gambar 4.7. Sedangkan untuk berkas energi 10 MeV dan 12 MeV dapat dilihat pada lampiran B.



Gambar 4.7 Deviasi PDD pengukuran dan simulasi untuk energi 6 MeV dengan lapangan aplikator $14 \times 14 \text{ cm}^2$

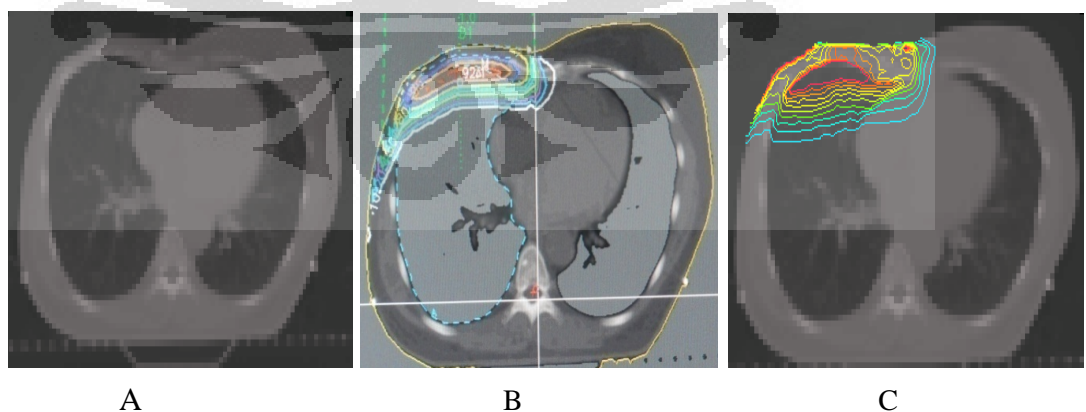
Untuk deviasi profile dose antara pengukuran dan simulasi pada berkas energi nominal 6 MeV dengan lapangan aplikator $14 \times 14 \text{ cm}^2$ dapat dilihat pada Gambar 4.8



Gambar 4.8 Deviasi profil dosis pengukuran dan simulasi untuk energi 6 MeV dengan lapangan aplikator $14 \times 14 \text{ cm}^2$

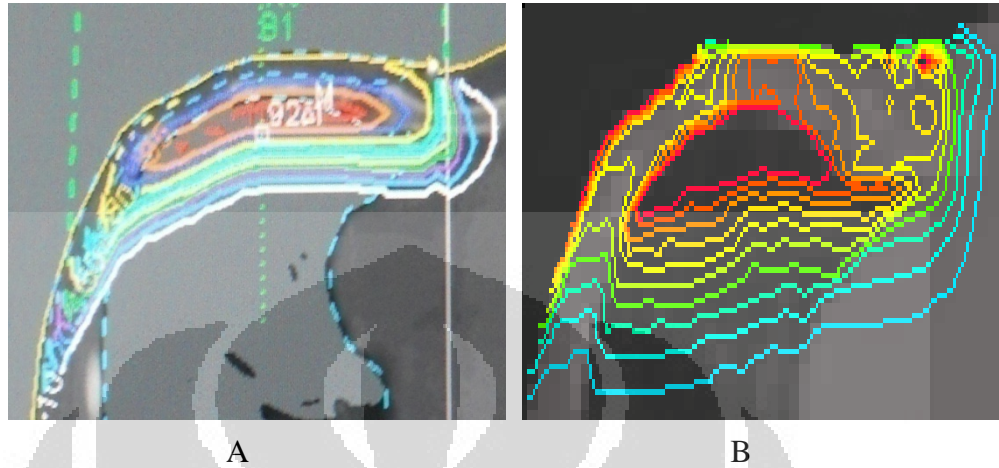
Hasil *commissioning* melalui proses simulasi Monte Carlo yang telah diperoleh diatas baik untuk energi 6 MeV, 10 MeV dan 12 MeV kemudian akan digunakan untuk perbandingan dengan TPS (*Treatment Planning System*) mengenai distribusi dosis berkas elektron di paru atau jantung untuk pasien *breast cancer* yang telah di-*mastectomy*.

Gambar 4.9 memperlihatkan citra CT thorax pasien kanker payudara kanan pasca-operasi, distribusi berkas elektron hasil kalkulasi TPS pada citra CT pasien kanker payudara kanan pasca operasi dan distribusi dosis berkas elektron hasil kalkulasi simulasi Monte Carlo untuk berkas energi elektron nominal 6 MeV.



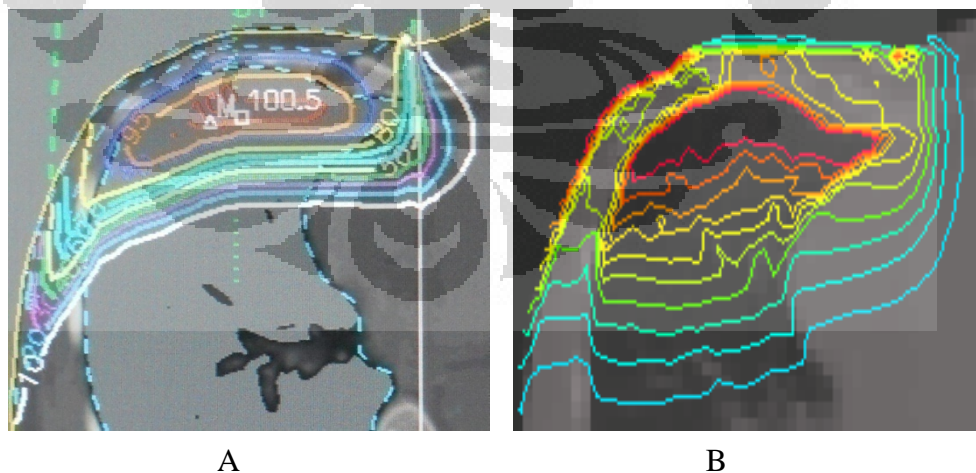
Gambar 4.9 Citra CT thorax pasien kanker payudara kanan pasca mastectomy (A), distribusi dosis elektron hasil kalkulasi TPS (B) dan hasil kalkulasi simulasi Monte Carlo (C) untuk energi 6 MeV.

Tampak perbedaan distribusi dosis hasil TPS dengan hasil kalkulasi Monte Carlo. Untuk keperluan evaluasi, gambar-gambar daerah distribusi dosis dalam Gambar 4.9 diperbesar seperti pada Gambar 4.10.

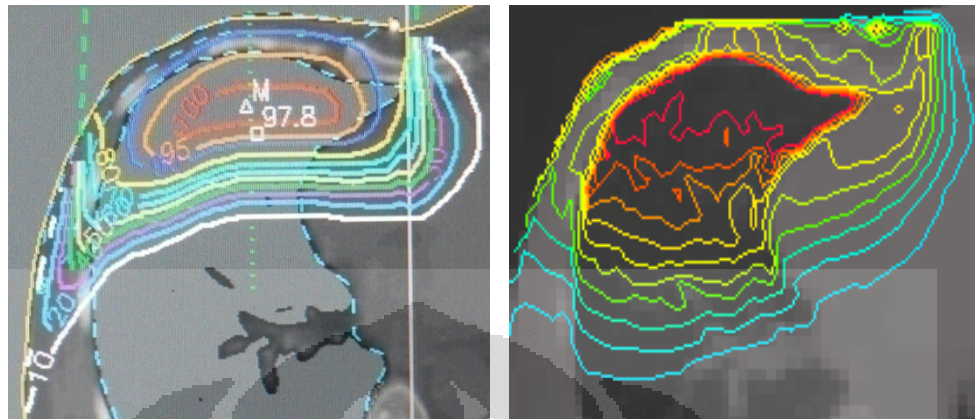


Gambar 4.10 Perbesaran daerah dengan distribusi dosis elektron di paru kanan hasil kalulasi TPS (A) dan simulasi Monte Carlo (B) untuk energi 6 MeV dari Gambar 4.9 B dan Gambar 4.9 C.

Tampak bahwa kurva isodosis hasil kalkulasi TPS mengikuti kontur tubuh sedangkan untuk kalkulasi Monte Carlo tidak mengikuti kontur tubuh. Perbesaran kurva isodosis hasil kalkulasi TPS dan Monte Carlo untuk energi 10 MeV dan 12 MeV berturut-turut dapat dilihat pada Gambar 4.12 dan Gambar 4.13.



Gambar 4.11 Perbesaran daerah dengan distribusi dosis elektron di paru kanan hasil kalulasi TPS (A) dan Monte Carlo (B) untuk energi 10 MeV.



Gambar 4.12 Perbesaran daerah dengan distribusi dosis elektron di paru kanan hasil kalkulasi TPS (A) dan Monte Carlo (B) untuk energi 12 MeV.

Tampak bahwa daya penetrasi yang lebih hasil kalkulasi simulasi Monte Carlo dibandingkan hasil kalkulasi TPS ISIS pada energi berkas elektron 6 MeV, 10 MeV dan 12 MeV. Nilai perbedaan kedalaman dan deviasi hasil kalkulasi TPS, pengukuran dalam air dan hasil simulasi Monte Carlo untuk energi elektron 6 MeV ditunjukkan dalam Tabel 4.2

Tabel 4.2 Kedalaman kurva isodosis berkas elektron 6 MeV pada citra CT paru kanan hasil kalkulasi TPS, dalam fantom air dan simulasi Monte Carlo.

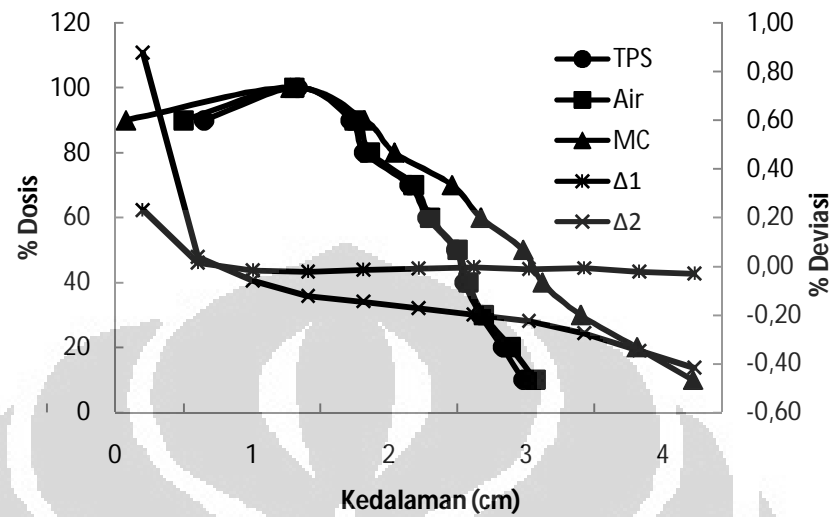
PDD (%)	Kedalaman (cm)			Deviasi (%)	
	TPS	Air	MC	$\Delta 1$	$\Delta 2$
90	0,65	0,5	0,08	0,23	0,88
100	1,33	1,31	1,29	0,02	0,04
90	1,72	1,75	1,82	-0,02	-0,06
80	1,82	1,86	2,04	-0,02	-0,12
70	2,15	2,18	2,46	-0,01	-0,14
60	2,28	2,3	2,67	-0,01	-0,17
50	2,49	2,5	2,98	0,00	-0,20
40	2,55	2,58	3,12	-0,01	-0,22
30	2,67	2,69	3,4	-0,01	-0,27
20	2,83	2,89	3,81	-0,02	-0,35
10	2,98	3,07	4,22	-0,03	-0,42

Ket:

MC = Monte Carlo; $\Delta 1$ = Deviasi kedalaman antara TPS dan medium air;

$\Delta 2$ = Deviasi kedalaman antara TPS dan Monte Carlo

Selanjutnya tabel yang sama untuk berkas energi 10 MeV dan 12 MeV dapat dilihat dalam lampiran D.



Gambar 4.13 — Deviasi kedalaman hasil pengukuran, TPS dan simulasi Monte Carlo untuk energi 6 MeV

4.2 Pembahasan

Pada umumnya, radioterapi dengan elektron pada pasien payudara merupakan booster dari radioterapi dengan sinar-X MV. Arah berkas diberikan AP untuk pasien pasca bedah *mastectomy* yang kemungkinan paru menerima dosis tinggi. Penelitian ini melakukan simulasi Monte Carlo untuk memperoleh informasi dosis dalam paru pada pasien kanker payudara dan sekaligus digunakan untuk verifikasi hasil kalkulasi TPS. Program dalam TPS seharusnya memasukkan faktor koreksi densitas elektron untuk medium heterogen agar diperoleh ketelitian tinggi dalam pemberian dosis preskripsi pada tumor.

Untuk pelaksanaan simulasi, persiapan penelitian dilakukan dengan penentuan energi elektron yang mempunyai PDD dan profil dosis sesuai dengan hasil pengukuran pada *linac elekta 1350*. Nilai R_{50} merupakan kedalaman pada saat dosis mencapai 50% dari dosis maksimum, yang selanjutnya digunakan sebagai salah satu faktor pemilihan berkas yang sesuai. Nilai R_{50} berkas elektron 6 MeV, 10 MeV dan 12 MeV adalah 2.5 cm, 3.8 cm dan 4.6 cm. Kedalaman ketiga R_{50} ini sesuai dengan hasil simulasi Monte Carlo bila menggunakan energi elektron optimal 7.9 MeV, 11.5 MeV dan 13.4 MeV. Simulasi untuk memperoleh energi optimal untuk energi elektron nominal 10 MeV dan 12 MeV produksi linac elekta juga telah diselidiki oleh Setiawan Eko [35]. Hasil energi optimal elektron berturut-turut 11.3 MeV dan 13.3 MeV yang tidak jauh berbeda dengan hasil penelitian ini. Diamati pula perbedaan PDD hasil simulasi dengan hasil pengukuran untuk energi elektron 6 MeV, perbedaan antara kedua PDD sepanjang kedalaman 6 cm berkisar 0% - 0.3%. Adapun untuk energi elektron 10 MeV dan 12 MeV yang diamati dengan perbedaan PDD juga rendah, diperoleh berturut-turut 0% - 1% sepanjang kedalaman 7.5 cm dan 0% - 0.6% sepanjang kedalaman 9.6 cm.

Selain dengan PDD, hasil simulasi profil dosis pada kedalaman maksimum (d_{max}) juga dicocokkan dengan hasil pengukuran. Dipilih lapangan 6 x 6 cm² dan 10 x 10 cm² yang digunakan untuk mendukung pencocokan hasil simulasi dengan hasil pengukuran. Hasilnya, profil dosis untuk kedua

lapangan tersebut pada kedalaman d_{max} tidak berbeda secara signifikan terutama di daerah lapangan radiasi. Lapangan $14 \times 14 \text{ cm}^2$ dipilih karena sesuai dengan lapangan yang akan digunakan pada perlakuan radioterapi pasien. Sedangkan untuk perhitungan deviasi profil dosis pada daerah lapangan radiasi $14 \times 14 \text{ cm}^2$ antara hasil pengukuran dan simulasi Monte Carlo diperoleh bahwa untuk energi 6 MeV berkisar 0% - 3.8%. Sedangkan untuk energi 10 MeV dan 12 MeV berturut-turut berada dalam kisaran 0% - 0.22% dan 0% - 2.2%. Nilai deviasi profile dosis tersebut sesuai dengan hasil disertasi Haryanto (2003) yang memperoleh nilai lebih kecil 10%.

Keberhasilan radioterapi dipengaruhi oleh distribusi dosis dalam target tumor maupun jaringan disekitarnya. Telah dibuktikan oleh beberapa riset bahwa, dosis kurang 5% akan menurunkan *tumor probability control* sampai 15% atau lebih, sementara kelebihan dosis 5% dari dosis preskripsi, akan menyebabkan kenaikan dosis pada jaringan sehat sehingga memungkinkan dapat melebihi dosis toleransi organ (Khan dan Gerbi, 2012).

Interaksi elektron dengan paru berbeda dengan interaksi elektron dalam air. Dalam air berkas elektron akan menyebar dengan kenaikan kedalaman karena interaksi elektron relatif lebih tinggi dibandingkan dengan udara, sedangkan dalam paru yang densitasnya lebih rendah, interaksi menyebabkan rentang lintas elektron lebih panjang. Dalam penelitian ini, disimulasikan berkas elektron 6 MeV, 10 MeV dan 12 MeV dengan arah berkas yang jatuh pada citra CT pasien kanker payudara. Dalam praktek, booster elektron pada pasien kanker payudara Rumah Sakit Gatot Subroto umumnya menggunakan berkas energi 6 MeV. Simulasi dengan energi 10 MeV dan 12 MeV dilakukan untuk memperoleh informasi perilaku berkas elektron dalam melewati jaringan paru.

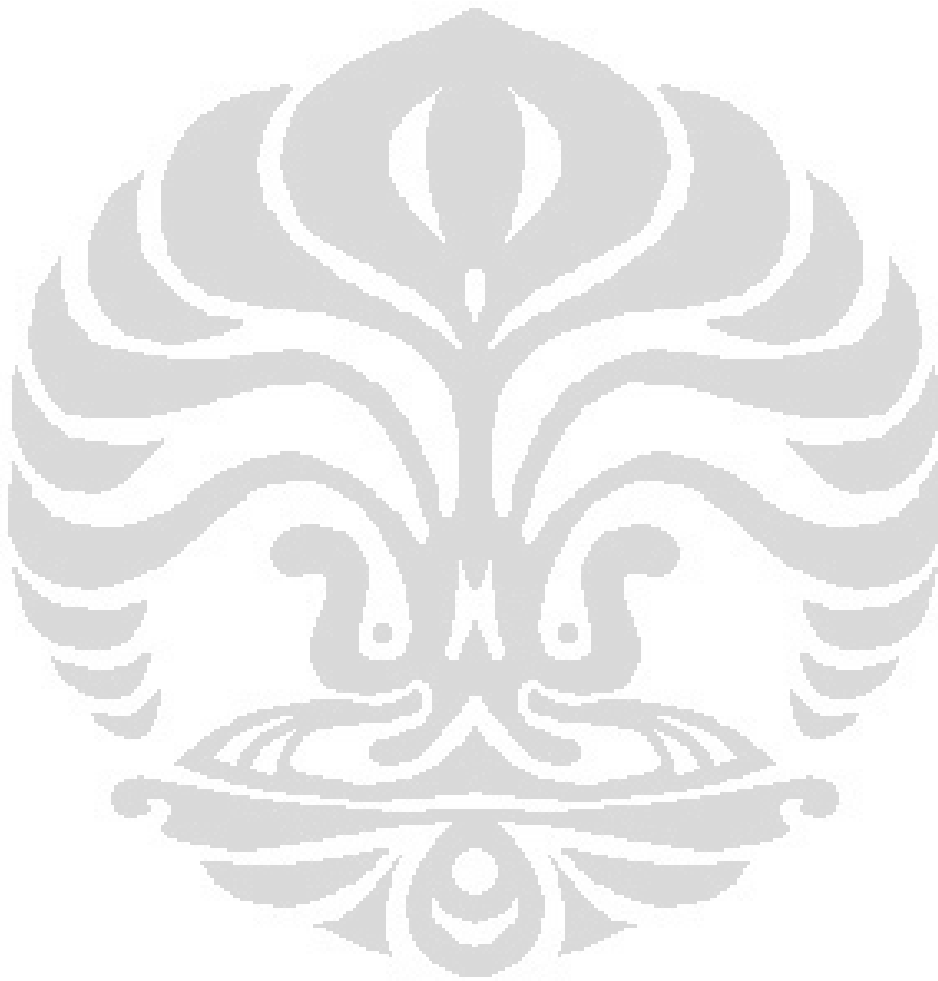
Perbandingan distribusi dosis antara hasil TPS dan simulasi dapat dijelaskan sebagai berikut; pertama kali untuk berkas elektron 6 MeV. Pada hasil simulasi menunjukkan dosis tinggi pada beberapa daerah permukaan sebagai akibat hamburan balik dari tulang rusuk (*rib bone*), hal ini disebabkan

oleh efek radiasi hambur dari tulang rusuk tersebut (Khan dan Gerbi, 2012) dan fenomena tidak terjadi pada hasil kalkulasi TPS. Daerah dosis maksimum terjadi pada kedalaman lebih dalam pada hasil simulasi. Dosis maksimum hasil kalkulasi TPS ISIS terlihat mengenai paru. Kondisi demikian terjadi karena perlakuan tidak menggunakan bolus. Oleh karena itu, terapi booster memungkinkan paru ataupun jantung memperoleh dosis tinggi. Kecenderungan yang sama terjadi pada penggunaan berkas elektron 10 MeV dan 12 MeV. Dari hasil perhitungan deviasi antara hasil kalkulasi TPS dengan pengukuran dalam fantom air ($\Delta 1$) dan antara kalkulasi TPS dengan simulasi Monte Carlo ($\Delta 2$) dapat disimpulkan bahwa TPS ISIS tidak memasukkan koreksi inhomogenitas paru.

Oleh karena itu, terapi booster memungkinkan paru memperoleh dosis tinggi. Sehingga perlu diperhatikan toleransi dosis paru dan jantung. Menurut informasi dari RSPAD Gatot Subroto, dosis pasien radioterapi booster 100 cGy/fraksi diberikan 5 kali, sehingga dosis prescribe tumor sebesar 500cGy. Dalam hal ini, dosis yang diterima oleh paru masih dalam toleransi dosis aman, biasanya terapi dengan elektron ini diberikan sebagai booster sehingga kalkulasi dosis di paru dan jantung harus memperhitungkan besar dosis yang diterima pasien oleh radiasi sinar-x MV. Dosis toleransi yang diterima paru agar tidak mengalami pneumonitis yaitu organnya menerima dosis tidak lebih dari 1500cGy dengan fraksinasi 5 kali sedangkan untuk dosis toleransi yang diterima jantung berada pada range 1800 cGy – 2000 cGy agar tidak mengalami *pericarditis* (Marie, 2009).

Dalam perbedaan kedalaman dosis yang diterima oleh medium paru tersebut diatas, dipengaruhi oleh heterogenis dari medium paru itu sendiri. Kedalaman kurva isodosis 10% hasil kalkulasi TPS ISIS terjadi di 2.98 cm sedangkan pada kalkulasi simulasi Monte Carlo, kedalaman dosis 10% terjadi di 4.22 cm. Sedangkan untuk energi yang lebih tinggi yaitu 10 MeV dan 12 MeV, kedalaman dosis 10% hasil kalkulasi TPS ISIS dan simulasi Monte Carlo menjadi semakin jauh ke dalam paru, yang berturut-turut 4.69 cm, 5.72 cm dan 5.79 cm dan 6.95 cm.

Jadi, hasil kalkulasi metode Monte Carlo dibandingkan dengan kalkulasi TPS adalah lebih akurat dalam menentukan besar distribusi dosis pada paru. Tetapi, karena waktu (*history*) simulasi yang lebih lama menyebabkan penggunaan metode Monte Carlo untuk treatment planning masih jarang digunakan.



BAB V

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian ini diperoleh beberapa kesimpulan antara lain:

1. Berdasarkan penyesuaian nilai PDD dan profil dosis dengan lapangan $6 \times 6 \text{ cm}^2$ dan $10 \times 10 \text{ cm}^2$, telah ditentukan energi elektron optimal yang digunakan untuk simulasi Monte Carlo berkas energi 6 MeV, 10 MeV dan 12 MeV adalah 7.9 MeV, 11.5 MeV dan 13.4 MeV.
2. Telah dilakukan simulasi perlakuan radioterapi booster elektron pada pasien kanker payudara kanan pasca-mastectomy dengan berkas elektron 6 MeV, 10 MeV dan 12 MeV dengan lapangan $14 \times 14 \text{ cm}^2$, hasil menunjukkan TPS ISIS belum memasukan faktor koreksi medium inhomogenitas paru.
3. Deviasi antara simulasi Monte Carlo dan pengukuran dalam medium air untuk aplikator $14 \times 14 \text{ cm}^2$ untuk energi 6 MeV perbedaan antara kedua PDD sepanjang kedalaman 6 cm berkisar 0% - 0.3%, untuk 10 MeV dan 12 MeV berturut-turut 0% - 1% sepanjang kedalaman 7.5 cm dan 0% - 0.6% sepanjang kedalaman 9.6 cm.
4. Deviasi profil dosis antara hasil simulasi Monte Carlo dan pengukuran dalam air pada daerah tengah lapangan untuk energi 6 MeV berkisar 0% - 0.5%, sedangkan untuk energi 10 MeV dan 12 MeV berkisar antara 0% - 0.4% dan 0% - 0.1%.

5.2 Saran

Adapun saran dalam penelitian adalah

1. Penggunaan TPS ISIS untuk perlakuan dengan elektron sebaiknya dimasukkan faktor koreksi medium inhomogenitas paru.
2. Untuk ketelitian dosis preskripsi pada daerah tempat kedudukan tumor, penggunaan bolus disesuaikan dengan kedalaman R_{90} .

DAFTAR PUSTAKA

1. AAPM No. 32. *Clinical Electron Beam Dosimetry*. Medical Physics Vol. 18 Issue 1. 1991.
2. A. Isambert, L. Brualla, M. Benkebil, D. Lefkopoulos. *Determination of the Optimal Statistical Uncertainty to Perform Electron-Beam Monte Carlo Absorbed Dose Estimation in the Target Volume*. Science Direct: Cancer/Radiotherapie. Vol. 14. PP 89-95. 2010.
3. Angela Hu, Ye, Song Haijun, Chen Zhe, Sumin Zhou, Yin Fang-Fang. *Evaluation of an Electron Monte Carlo dose calculation algorithm for electron beam*. Journal of Applied Clinical Medical Physics. Vol. 9 No. 3. 2008.
4. Benjamin R. Archer, Sharon Glaze, Luceil B. North dan Stewart C. Bushong. *Dosimeter Placement in the Rando Phantom*. Baylor Collage of Medicine. Veterans Administration Hospital. Houston Texas. USA. Medical Physics. Vol. 4 No. 4. 1977.
5. Bruce J. Gerbi, John A. Antlok, dan Christopher Deibel. *Recommendations for clinical electron beam dosimetry: Supplement to recommendations of Task Group 25*. American Association of Physicist in Medicine (AAPM). Vol: 36. July 2009.
6. Bruce Faddegon, Judith Balogh, Robert Mackenzie dan Daryl Scora. *Clinical Considerations of Monte Carlo for Electron Radiotherapy Treatment Planning*. Radiation Physics and Chemistry. Vol. 53 (1998). 217-227.
7. Christos Chatzigiannis, Georgia Lymperopoulou, Panagiotis Sandilos, Constantinos Dardoufas, Emmanouil Yakoumakis. *Dose perturbation in the radiotherapy of breast cancer patients implanted with the Magna-Site: a Monte Carlo study*. Journal of Applied clinical Medical Physics. Vol: 12, 2. 2011.
8. Daryoush Sheikh-Bagheri, D.W.O. Rogers, Carl K. Ross and Jan P. S. *Comparison of Measured and Monte Carlo Calculated Dose Distributions from the NRC Linac*. Medical Physics. 2000.
9. Doucet R., M Olivares, F DeBlois, E B Podgorsak, I Kawrakow, and J Seuntjens. *Comparison of measured and Monte Carlo calculated dose distributions in inhomogeneous phantoms in clinical electron beams*. Institute of Physics Publishing . Phys. Med. Biol. 48 (2003) 2339–2354.

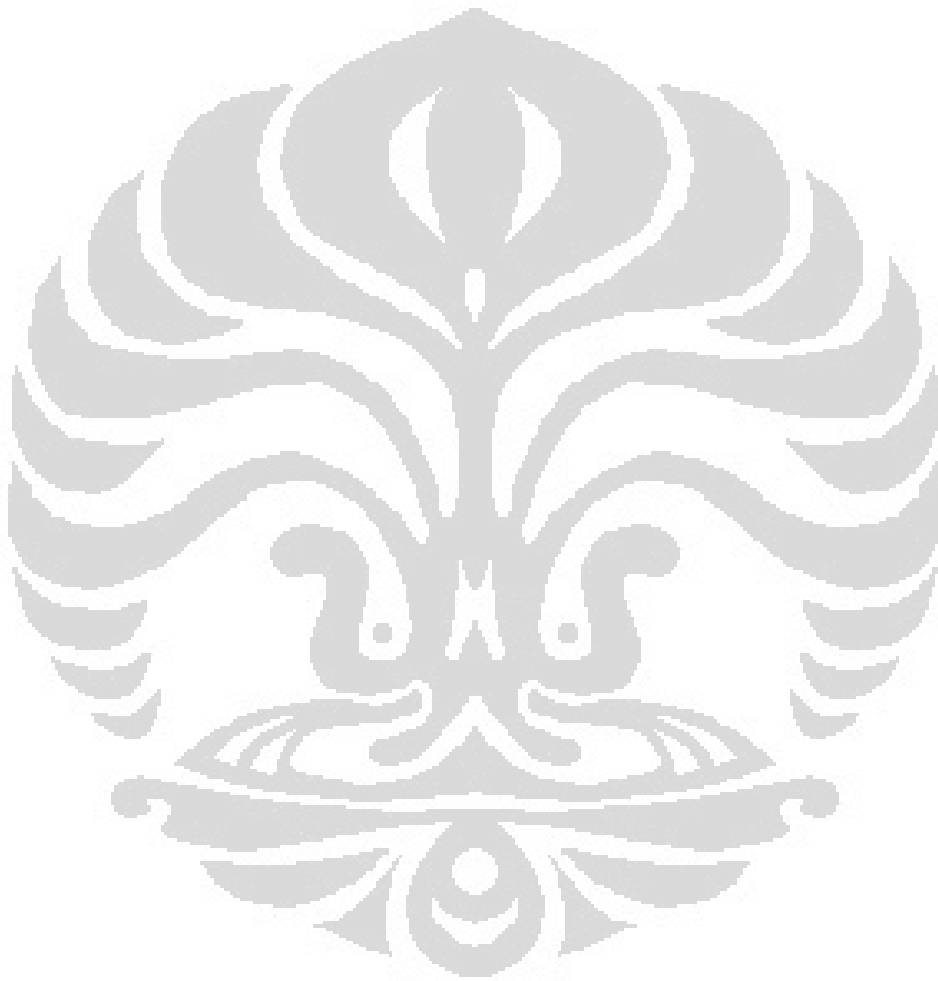
10. Ericka Wiebe dan George Rodrigues. *Radiation – Induced Lung Injury : Strategies for Reducing Therapeutic Dosage*. Protocol and Practices Perspective on Cancer Management. Parkhurst. 2006
11. Elaine N. Marieb dan Katja Hoehn. *Human Anatomy and Physiology*. Seventh Edition. 2006.
12. Haryanto, Freddy. *Monte-Carlo-Simulation des Strahlungstransports im Strahlerkopf eines Elektronenlinearbeschleunigers*. Dissertation. 2003. Eberhard-Karl-Universität zu Tübingen.
13. IAEA. *Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy*. An international code of practice for dosimetry based on standards of absorbed dose to water (TRS 398). 2001. Vienna. Austria.
14. Jean Philippe Pignal, Brian M. Keller dan Annath Ravi. *Doses to Internal Organs for Various Breast Radiation Techniques-Implications on the Risk Secondary Cancer and Cardiomyopathy*. Radiation Oncology Journal. Vol. 6 (5). PP 1-6. 2011.
15. John S. Laughlin. *High Energy Treatment Planning for Inhomogeneities*. Department of Medical Physics and Biophysics. Memorial Hospital and Sloan – Kettering. Institute Now York 21. Brit. J. Radiol., Vol. 38. 143-147. 1965.
16. Jeffrey V. Siebers. *Monte Carlo for Radiation Therapy Dose Calculation*. Monte Carlo Refresher Course. AAPM. 2002.
17. Joy Coleman, M.D. Catherine Park, M.D. J. Eduardo Villareal-Barajas, Paula Petti dan Bruce Faddegon. *A Comparison of Monte Carlo and Fermi-Eyeges-Hogstrom Estimates of Heart and Lung Dose from Breast Electron Boost Treatment*. Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys. Vol. 61. No. 2, PP 621-628. 2005.
18. Kenneth R Hogstrom, Michael D Mills and Peter R Almond. *Electron beam dose calculations*. Phys. Med. Biol., 1981, Vol. 26. No. 3, 445-459. Great Britain.
19. Khan, M. Faiz, Karen P. Doppke, Kenneth R. Hostrom, Gerald J. Kutcher, Ravinder Nath, Satish C. Prasad, James A. Purdy, Martin Rozenfeld, dan Barry L. Werner. *Clinical Electron-Beam Dosimetry*. TG No. 25. Radiation Therapy Committee. AAPM. Medical Physics. Vol.18 (1). 1991.
20. Khan, FM., dan Gerbi, J. Bruce. *Treatment Planning in Radiation Oncology*. Third edition. Lippincott Williams & Wilkin. 2012. USA

21. Khan, FM. 2003. *The Physics of Radiation Therapy*. Third Edition. Lippincott Williams & Wilkin. Philadelphia.
22. Keller H., Olivera G., dan Rock Mackie T. *Direct Monte Carlo calculation of absorbed dose in a moving and deforming object*. Annual EMBS International Conference. July 23-28. 2000. Chicago.
23. Lindsough, B. dan Hultborn A.. *Tissue Heterogeneity in the Anterior Chest Wall and its Influence on Radiation Therapy of the Internal Mammary Lymph Nodes*. Therapy Physics Bilogy. Official Organ of the Radiological Societies of Denmark, Finland, Norway and Sweden. Vol. 15, 97-116. 1976.
24. Locke C. dan Zavgorodni S. *Vega Library for Processing DICOM data required in Monte Carlo verification of radiotherapy treatment plans*. Australasian Physical & Engineering Sciences in Medicine Journal. 2008. Vol. 31(4). 290-299.
25. Ma C. M., Faddegon B.A, Rogers D.W.O, and Mackie T.R. (1997). *Accurate Characterization of Monte Carlo Calculated Electron Beams for Radiotherapy*. Medical Physics, Vol. 24, No. 3, March 1997, p. 401-416.
26. Marie-Louise Olsson. *Monte Carlo Simulations of the Elekta Sli Plus Electron Applicator System – A Base for a new Applicator Design to Reduce Radiation Leakage*. Master of Science Thesis. Department of Radiation Physics. Lund University Hospital. Swedia. 2003.
27. Marshall R. Cleland, Richard A. Galloway, Arthur H. Heiss, John R. Logar. *Comparisons of Monte Carlo calculations with absorbed dose determinations in flat materials using high-current, energetic electron beams*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 261 (2007) 90–93
28. N. Jabbari, H. Nedaie dan A. Zeinali. *Evaluation of the Electron Energy Fluence and Angular Distributions From a Clinical Accelerator: A EBAMnrc Monte Carlo Study*. Iran. J. Radiat. Res. Vol. 9(1). PP 29-36. 2011.
29. Podgorsak E.B., Metcalfe P., and Van DYK J. *Medical Accelerator. The Modern Technology in Radiation Oncology: A Compendium for Medical Physics and Radiation Oncologists*. Medical Physics Publishing, Madison (1999) 349-435.
30. Podgorsak E.B. *Radiation Oncology Physics: A Hand Book for Teachers and Students*. Teacher Edition. IAEA. 2005.
31. Prasad S. C., Bedwinek J.M., and Gerber R.I. *Lung Dose in Electron Beam Therapy of Chest Wall*. Washington University School of Medicine. Mallinckrodt Intitute of Radiology St. Louis USA. Acta Radiological Oncology. 1983.

32. Rogers D.W.O., Faddegon B.A., G.X. Ding, C.M. Ma dan J. We. Beam: a Monte Carlo code to simulate radiotherapy treatment units. National Research Council Canada. Ottawa KIA OR6 Canada. Desember 1994.
33. Rogers D.W.O., Walters B., dan I. Kawrakow. *BEAMnrc Users Manual*. Ionizing Radiation Standars National Research Council of Canada. Ottawa KIA OR6. January 2010.
34. Rubin, P., Cooper, R., Philips, T.C. *Radiation Pathology Syllabus*. Chicago, American Collage of Radiology. 1975
35. Setiawan, Eko. *Simulasi Monte Carlo Parameter Dosimetri Berkas Elektron Linac*. Tesis 2011. Universitas Indonesia, Depok.
36. Tank P.W., and G. Thomas R. *Lippincott Williams & Wilkins Atlas of Anatomy 1 st Edition*. Lippincoot Williman & Wilkins. 2009.
37. Tuathan P. O'Shea, Mark J. Foley, David Rajasekar, Patrick A. Downes, Will van der Putten, Margaret Moore, and Andrew Shearer. *Electron Beam Therapy at Extended Source-to-Surface Distance: a Monte Carlo Investigation*. Journal of Applied Clinical Medical Physics. Vol. 9. No. 4. 2008.
38. Taylor, E. Marie. Cardiac and Lung Normal Tissue Tolerance as Related to Breast Cancer Radiation Threpay. March. 2009.
39. Valerie S.C., and Tina Sander. *Essentials of Anatomy and Physiology Fifith Edition*. F.A. Davis Company. Philadelphia.2007.
40. Walters B., Kawrakow I., dan D.W.O. Rogers. *DOSXYZnrc User Manual*. Ionizing Radiation Standars National Research Council of Canada. Ottawa KIA OR6. January 2010.
41. Wardaya, Susila. *Analasis Dosimetri Berkas Elektron pada Bidang Miring Pengukuran Menggunakan Ionization Chamber Disimulasikan dengan Monte Carlo DOSXYZnrc*. Thesis 2009. Universitas Indonesia, Depok.

LAMPIRAN A

Data PDD Pengukuran di *Water Phantom*, PDD Hasil Simulasi Monte Carlo dan Deviasi PDD Pengukuran dan Simulasi Monte Carlo



PDD Water Phantom

E = 6 MeV , Applicator 6 x 6 cm²

PRESSURE=1013.20

TEMPERATURE=20.00

NORM_TEMPERATURE=20.00

CORRECTION_FACTOR=1.0000

CORRECTIONS=DIN6800_DEPTH_CORR;

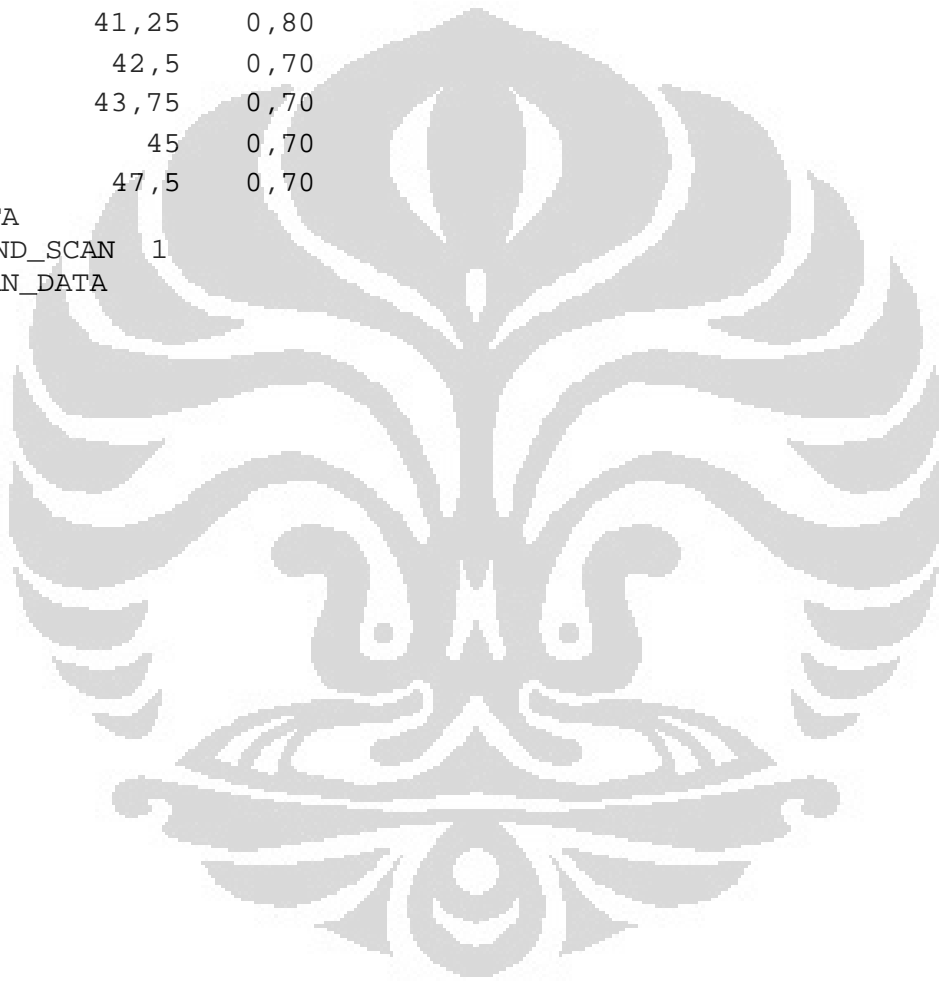
0	79,50
0,75	79,50
1,5	79,70
2,25	80,00
3	80,60
3,75	81,50
4,5	82,70
5,25	84,60
6	86,30
6,75	87,80
7,5	89,40
8,25	90,90
9	92,30
9,75	93,70
10,5	95,10
11,25	96,40
12	97,50
12,75	100,00
13,5	99,80
14,25	99,30
15	98,40
15,75	97,00
16,5	95,00
17,25	92,60
18	89,90
18,75	86,50
19,5	82,90
20,25	78,80
21	74,20
21,75	69,30
22,5	64,10
23,25	58,70
24	53,20
24,75	47,60
25,5	42,00
26,25	36,50
27	31,30
27,75	26,50
28,5	22,00
29,25	18,00
30	14,40

30,75	11,30
31,5	8,80
32,25	6,60
33	5,50
33,75	3,30
34,5	2,00
35	1,30
36,25	1,00
37,5	0,90
38,75	0,80
40	0,80
41,25	0,80
42,5	0,70
43,75	0,70
45	0,70
47,5	0,70

END_DATA

END_SCAN 1

END_SCAN_DATA

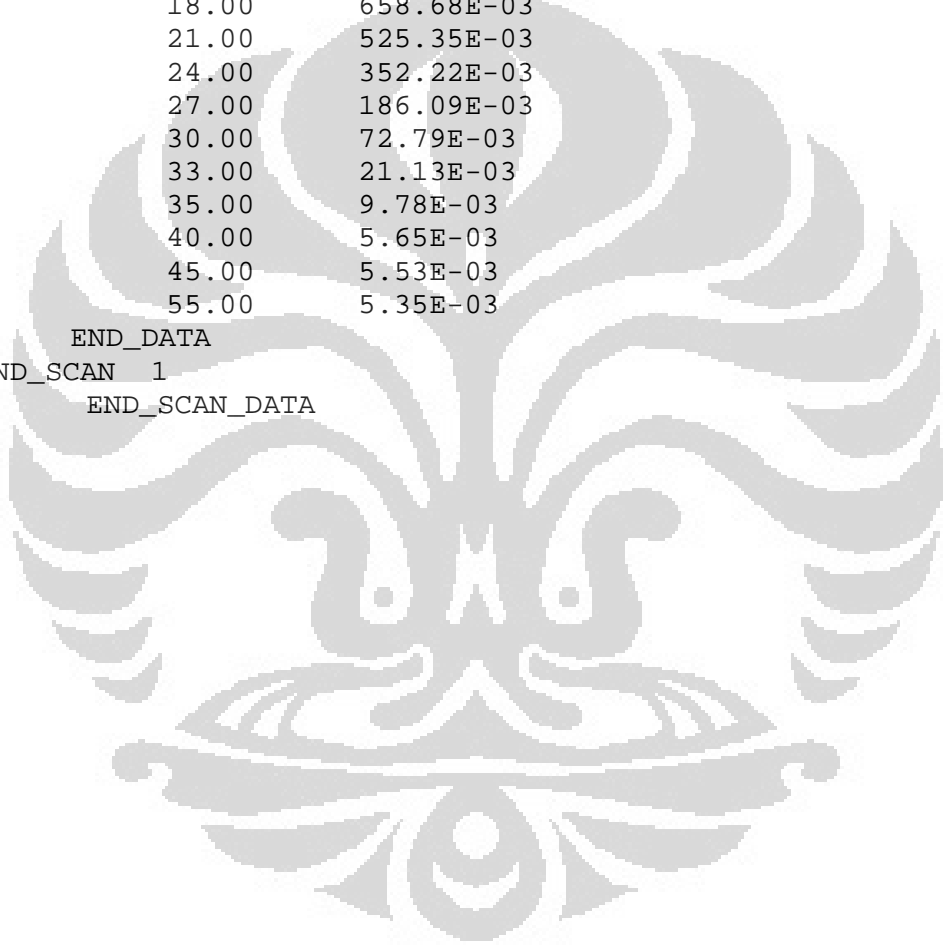


PDD Water Phantom
E = 6 MeV , Applicator 10 x 10 cm²
PRESSURE=1013.20
TEMPERATURE=20.00
NORM_TEMPERATURE=20.00
CORRECTION_FACTOR=1.0000
CORRECTIONS=DIN6800_DEPTH_CORR;

0,00	1,24E-01
1,00	1,25E-01
2,00	1,27E-01
3,00	1,31E-01
4,00	1,34E-01
5,00	1,37E-01
6,00	1,40E-01
7,00	1,42E-01
8,00	1,44E-01
9,00	1,46E-01
10,00	1,48E-01
11,00	1,50E-01
12,00	1,51E-01
13,00	1,51E-01
14,00	1,50E-01
15,00	1,48E-01
16,00	1,44E-01
17,00	1,41E-01
18,00	1,37E-01
19,00	1,32E-01
20,00	1,24E-01
21,00	1,14E-01
22,00	1,02E-01
23,00	9,07E-02
24,00	8,35E-02
25,00	7,64E-02
26,00	6,01E-02
27,00	4,39E-02
28,00	3,63E-02
29,00	2,91E-02
30,00	2,45E-02
31,00	1,79E-02
32,00	1,06E-02
33,00	6,14E-03
34,00	4,47E-03
35,00	3,58E-03
37,00	1,78E-03
39,00	1,28E-03
41,00	1,19E-03
43,00	1,19E-03
45,00	1,20E-03
50,00	1,16E-03
55,00	1,13E-03

END_DATA END_SCAN 1
END_SCAN_DATA

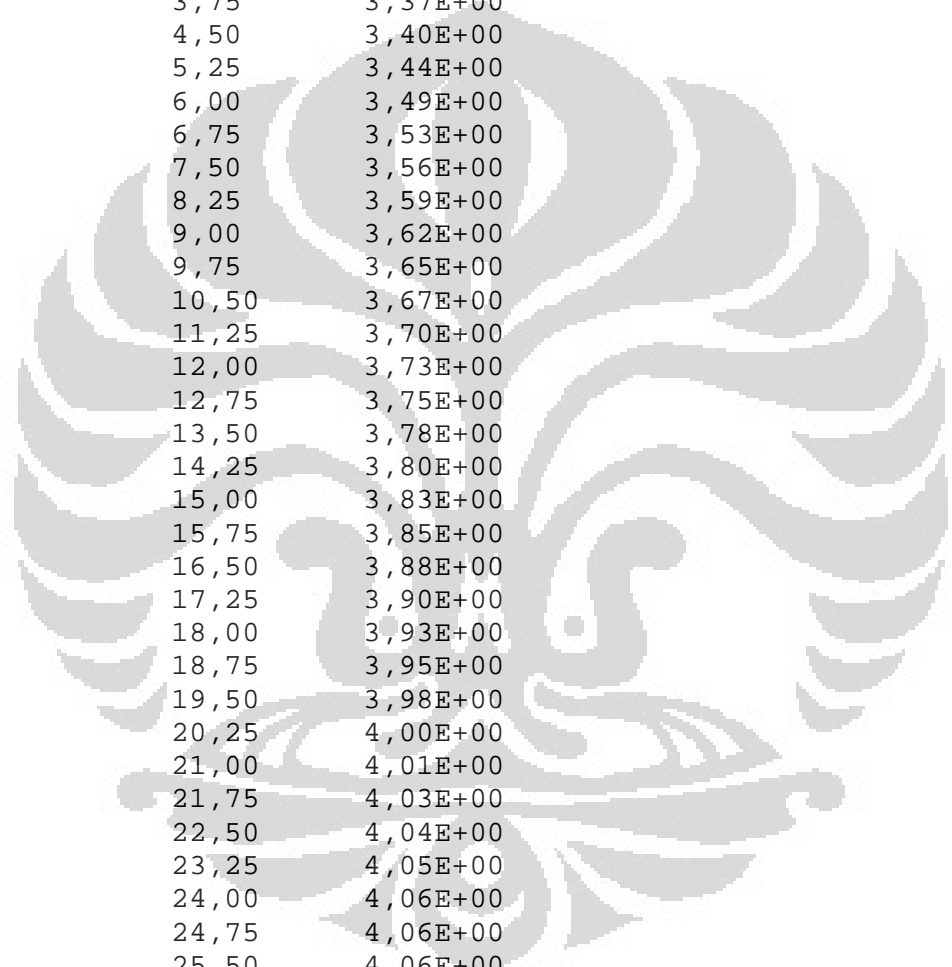
```
PDD Water Phantom
E = 6 MeV , Applicator 14 x 14 cm2
  PRESSURE=1008.00
  TEMPERATURE=21.00
  NORM_TEMPERATURE=20.00
  CORRECTION_FACTOR=1.0000
  CORRECTIONS=DIN6800_DEPTH_CORR;
  BEGIN_DATA
    0.00      590.40E-03
    3.00      619.01E-03
    6.00      671.10E-03
    9.00      719.40E-03
   12.00     748.59E-03
   15.00     734.07E-03
   18.00     658.68E-03
   21.00     525.35E-03
   24.00     352.22E-03
   27.00     186.09E-03
   30.00      72.79E-03
   33.00     21.13E-03
   35.00      9.78E-03
   40.00      5.65E-03
   45.00      5.53E-03
   55.00      5.35E-03
  END_DATA
END_SCAN 1
  END_SCAN_DATA
```



```

PDD Water Phantom
E = 10 MeV, Applicato 6 x 6 cm2
PRESSURE=1008.00
  TEMPERATURE=21.00
  NORM_TEMPERATURE=20.00
  CORRECTION_FACTOR=1.0000
  CORRECTIONS=IAEA_398;
  BEGIN_DATA
    0,00      3,33E+00
    0,75      3,32E+00
    1,50      3,33E+00
    2,25      3,34E+00
    3,00      3,36E+00
    3,75      3,37E+00
    4,50      3,40E+00
    5,25      3,44E+00
    6,00      3,49E+00
    6,75      3,53E+00
    7,50      3,56E+00
    8,25      3,59E+00
    9,00      3,62E+00
    9,75      3,65E+00
   10,50     3,67E+00
   11,25     3,70E+00
   12,00     3,73E+00
   12,75     3,75E+00
   13,50     3,78E+00
   14,25     3,80E+00
   15,00     3,83E+00
   15,75     3,85E+00
   16,50     3,88E+00
   17,25     3,90E+00
   18,00     3,93E+00
   18,75     3,95E+00
   19,50     3,98E+00
   20,25     4,00E+00
   21,00     4,01E+00
   21,75     4,03E+00
   22,50     4,04E+00
   23,25     4,05E+00
   24,00     4,06E+00
   24,75     4,06E+00
   25,50     4,06E+00
   26,25     4,05E+00
   27,00     4,03E+00
   27,75     4,01E+00
   28,50     3,98E+00
   29,25     3,94E+00
   30,00     3,90E+00
   30,75     3,85E+00
   31,50     3,79E+00
   32,25     3,72E+00
   33,00     3,64E+00
   33,75     3,55E+00
   34,50     3,46E+00
   35,00     3,39E+00

```

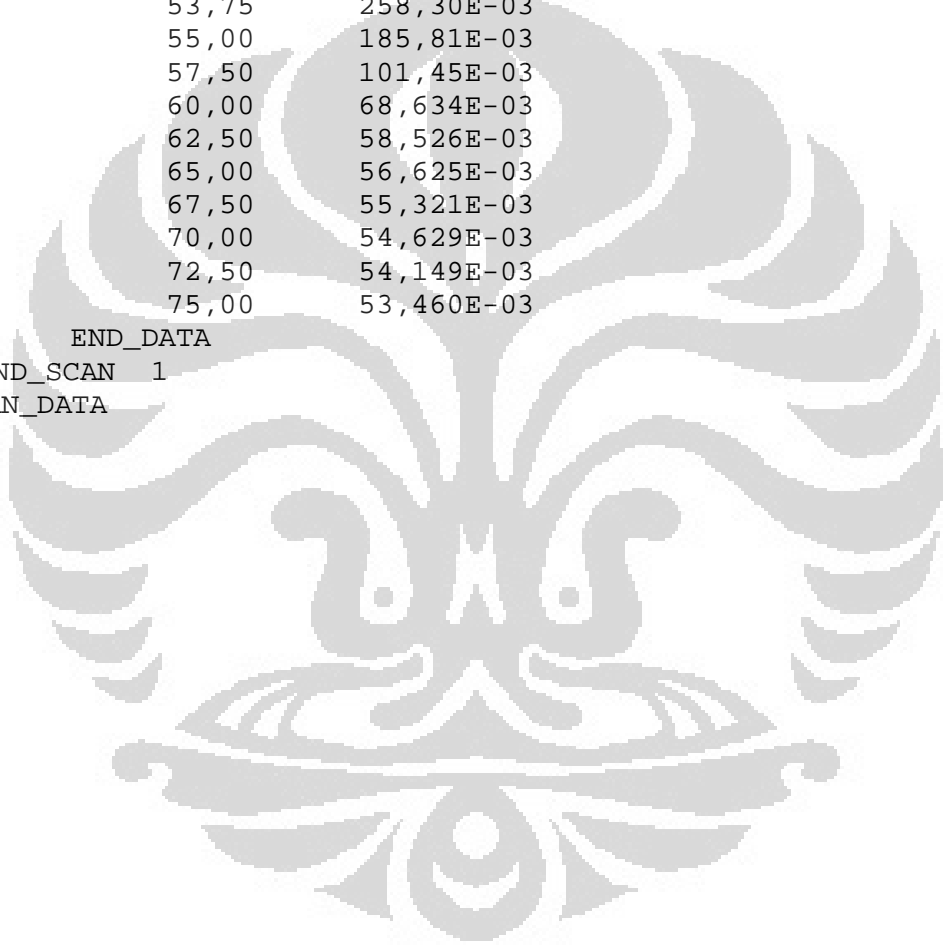


36,25	3,20E+00
37,50	2,99E+00
38,75	2,76E+00
40,00	2,51E+00
41,25	2,25E+00
42,50	1,99E+00
43,75	1,72E+00
45,00	1,47E+00
46,25	1,22E+00
47,50	993,72E-03
48,75	791,27E-03
50,00	614,64E-03
51,25	470,94E-03
52,50	351,94E-03
53,75	258,30E-03
55,00	185,81E-03
57,50	101,45E-03
60,00	68,634E-03
62,50	58,526E-03
65,00	56,625E-03
67,50	55,321E-03
70,00	54,629E-03
72,50	54,149E-03
75,00	53,460E-03

END_DATA

END_SCAN 1

END_SCAN_DATA



```

PDD Water Phantom
E = 10 MeV, Applicator 10 x 10 cm2
PRESSURE=1013.20
  TEMPERATURE=20.00
  NORM_TEMPERATURE=20.00
  CORRECTION_FACTOR=1.0000
  CORRECTIONS=DIN6800_DEPTH_CORR;
  BEGIN_DATA
    0,00      124,12E-03
    1,00      124,83E-03
    2,00      125,82E-03
    3,00      127,37E-03
    4,00      128,89E-03
    5,00      130,60E-03
    6,00      131,79E-03
    7,00      132,80E-03
    8,00      133,56E-03
    9,00      134,90E-03
   10,00     135,80E-03
   11,00     136,94E-03
   12,00     137,82E-03
   13,00     138,66E-03
   14,00     139,90E-03
   15,00     140,85E-03
   16,00     141,73E-03
   17,00     142,35E-03
   18,00     143,07E-03
   19,00     143,67E-03
   20,00     144,18E-03
   21,00     144,46E-03
   22,00     144,48E-03
   23,00     144,10E-03
   24,00     143,62E-03
   25,00     143,01E-03
   26,00     141,55E-03
   27,00     139,59E-03
   28,00     136,46E-03
   29,00     134,46E-03
   30,00     131,94E-03
   31,00     128,35E-03
   32,00     122,93E-03
   33,00     117,19E-03
   34,00     112,10E-03
   35,00     106,02E-03
   36,00     101,67E-03
   37,00     94,93E-03
   38,00     87,05E-03
   39,00     77,96E-03
   40,00     71,01E-03
   41,00     64,01E-03
   42,00     58,64E-03
   43,00     48,02E-03
   44,00     41,43E-03
   45,00     35,86E-03
   46,00     29,16E-03
   47,00     22,26E-03

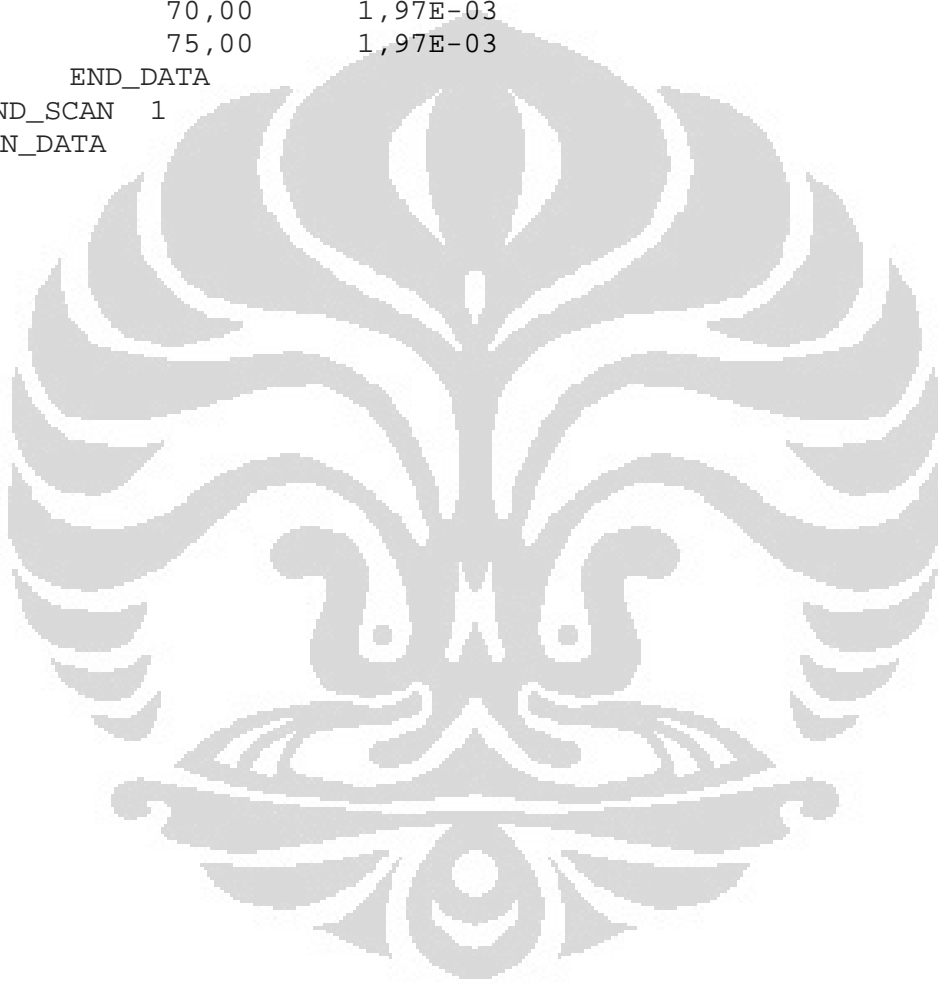
```

48,00	18,48E-03
49,00	14,70E-03
50,00	11,77E-03
51,00	8,63E-03
52,00	6,86E-03
53,00	5,39E-03
54,00	4,43E-03
55,00	3,50E-03
57,00	2,55E-03
59,00	2,25E-03
61,00	2,14E-03
63,00	2,09E-03
65,00	2,05E-03
70,00	1,97E-03
75,00	1,97E-03

END_DATA

END_SCAN 1

END_SCAN_DATA




```
PDD Water Phantom
E = 10 MeV, applicator 14 x 14 cm2
PRESSURE=1008.00
  TEMPERATURE=21.00
  NORM_TEMPERATURE=20.00
  CORRECTION_FACTOR=1.0000
  CORRECTIONS=DIN6800_DEPTH_CORR;
  BEGIN_DATA
    0,00      582,72E-03
    3,00      597,14E-03
    6,00      622,85E-03
    9,00      643,47E-03
   12,00      662,90E-03
   15,00      679,50E-03
   18,00      693,39E-03
   21,00      701,70E-03
   24,00      696,54E-03
   27,00      672,94E-03
   30,00      622,86E-03
   33,00      549,49E-03
   35,00      484,10E-03
   40,00      302,88E-03
   45,00      136,06E-03
   50,00      41,045E-03
   55,00      12,62E-03
   65,00       8,81E-03
   75,00       8,49E-03
  END_DATA
  END_SCAN 1
  END_SCAN_DATA
```



PDD Water Phantom
 E = 12 MeV, applicator 6 x 6 cm²
 PRESSURE=1008.00
 TEMPERATURE=21.00
 NORM_TEMPERATURE=20.00
 CORRECTION_FACTOR=1.0000
 CORRECTIONS=IAEA_398;
 BEGIN_DATA

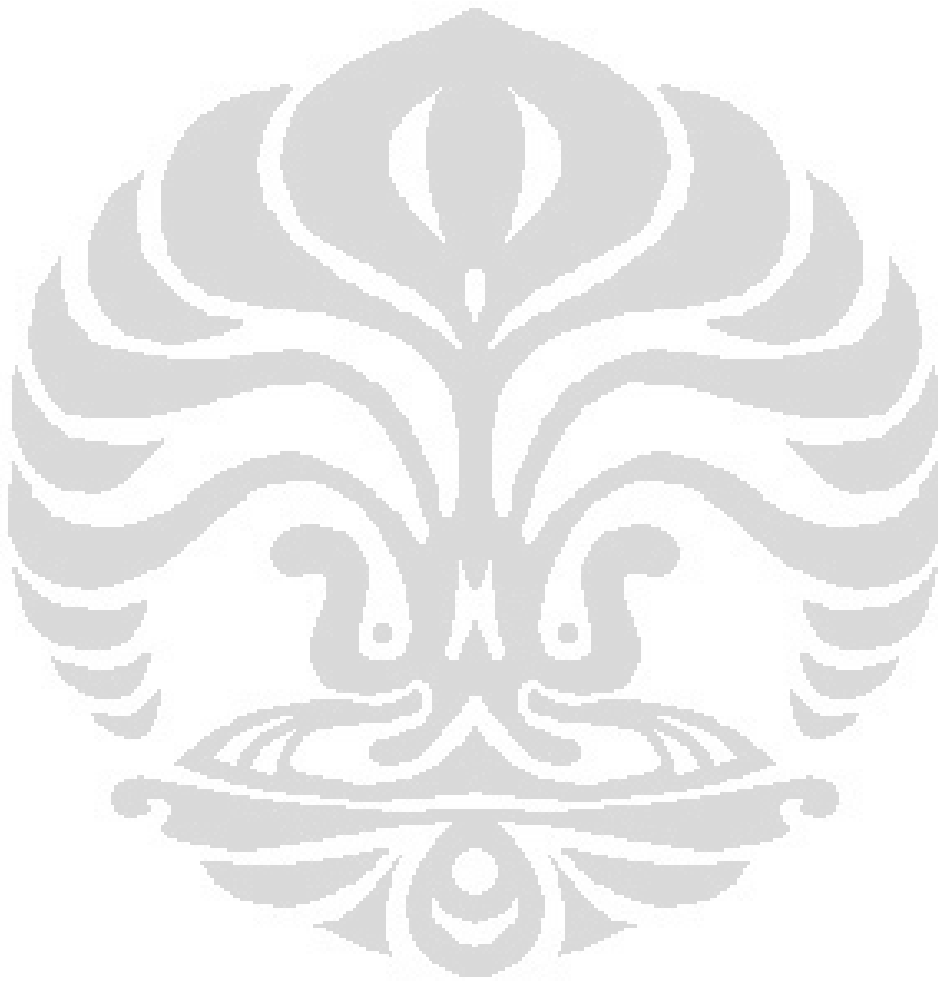
0,00	3,48E+00
1,50	3,48E+00
3,00	3,50E+00
4,50	3,54E+00
6,00	3,62E+00
7,50	3,68E+00
9,00	3,73E+00
10,50	3,77E+00
12,00	3,81E+00
13,50	3,84E+00
15,00	3,88E+00
16,50	3,91E+00
18,00	3,94E+00
19,50	3,97E+00
21,00	3,99E+00
22,50	4,02E+00
24,00	4,04E+00
25,50	4,06E+00
27,00	4,07E+00
28,50	4,07E+00
30,00	4,07E+00
31,50	4,05E+00
33,00	4,01E+00
34,50	3,96E+00
36,00	3,88E+00
37,50	3,78E+00
39,00	3,66E+00
40,50	3,52E+00
42,00	3,34E+00
43,50	3,14E+00
45,00	2,93E+00
46,50	2,68E+00
48,00	2,43E+00
49,50	2,15E+00
51,00	1,86E+00
52,50	1,58E+00
54,00	1,31E+00
55,50	1,06E+00
57,00	814,49E-03
58,50	614,38E-03
60,00	448,24E-03
61,50	316,51E-03
63,00	222,78E-03
64,50	160,60E-03
66,00	120,42E-03
68,50	91,98E-03
71,00	84,64E-03
73,50	82,29E-03

76,00	81,78E-03
81,00	79,73E-03
86,00	77,89E-03
91,00	76,71E-03
96,00	75,11E-03

END_DATA

END_SCAN 1

END_SCAN_DATA



PDD Water Phantom
E = 12 MeV, Applicator 10 x 10 cm²
PRESSURE=1013.20
TEMPERATURE=20.00
NORM_TEMPERATURE=20.00
CORRECTION_FACTOR=1.0000
CORRECTIONS=DIN6800_DEPTH_CORR;
BEGIN_DATA

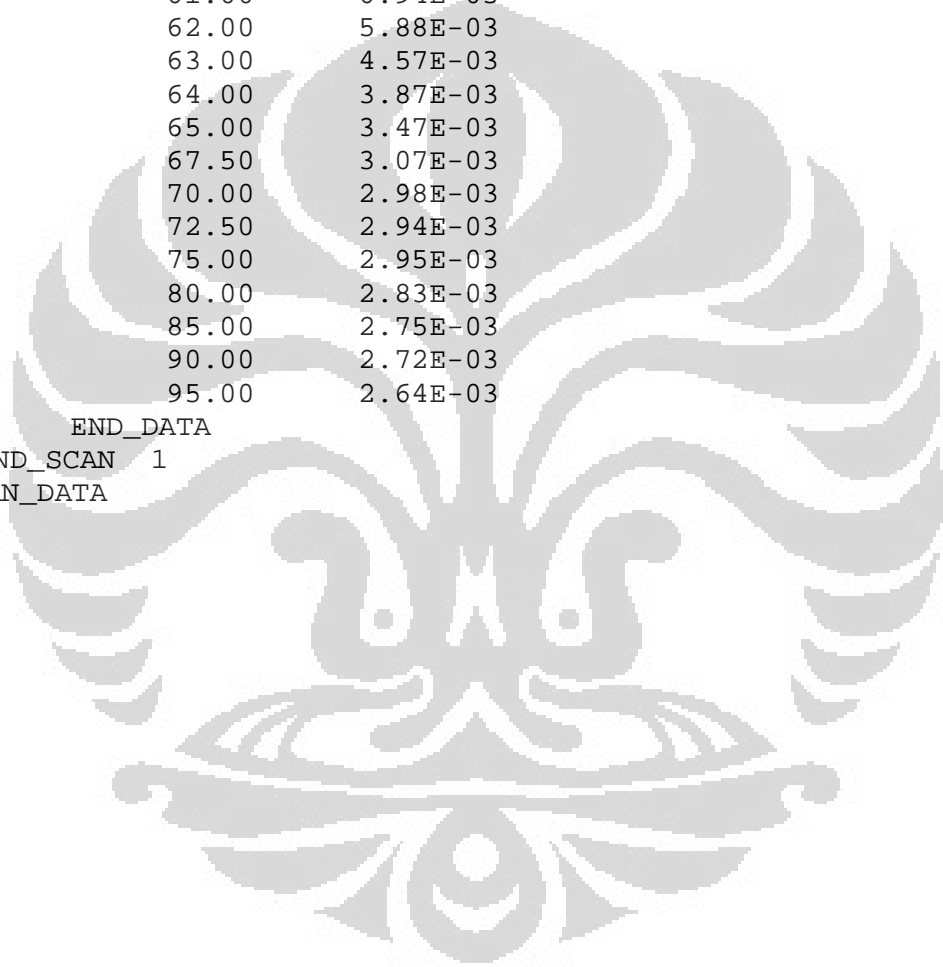
0.00	124.39E-03
1.00	124.90E-03
2.00	125.65E-03
3.00	127.03E-03
4.00	128.57E-03
5.00	129.85E-03
6.00	130.62E-03
7.00	131.75E-03
8.00	132.54E-03
9.00	133.57E-03
10.00	133.96E-03
11.00	134.66E-03
12.00	135.34E-03
13.00	135.81E-03
14.00	136.49E-03
15.00	137.03E-03
16.00	137.56E-03
17.00	138.22E-03
18.00	138.91E-03
19.00	139.35E-03
20.00	139.94E-03
21.00	140.12E-03
22.00	140.46E-03
23.00	140.91E-03
24.00	140.98E-03
25.00	141.22E-03
26.00	141.21E-03
27.00	141.05E-03
28.00	140.85E-03
29.00	140.18E-03
30.00	139.54E-03
31.00	138.36E-03
32.00	136.91E-03
33.00	135.13E-03
34.00	133.79E-03
35.00	131.39E-03
36.00	128.06E-03
37.00	124.49E-03
38.00	121.62E-03
39.00	118.55E-03
40.00	114.31E-03
41.00	109.13E-03
42.00	103.19E-03
43.00	97.62E-03
44.00	91.64E-03
45.00	85.57E-03
46.00	81.33E-03
47.00	74.17E-03

48.00	66.51E-03
49.00	59.33E-03
50.00	53.63E-03
51.00	48.96E-03
52.00	42.54E-03
53.00	35.73E-03
54.00	30.37E-03
55.00	24.36E-03
56.00	21.00E-03
57.00	17.26E-03
58.00	13.46E-03
59.00	10.80E-03
60.00	8.40E-03
61.00	6.94E-03
62.00	5.88E-03
63.00	4.57E-03
64.00	3.87E-03
65.00	3.47E-03
67.50	3.07E-03
70.00	2.98E-03
72.50	2.94E-03
75.00	2.95E-03
80.00	2.83E-03
85.00	2.75E-03
90.00	2.72E-03
95.00	2.64E-03

END_DATA

END_SCAN 1

END_SCAN_DATA



PDD Water Phantom
E = 12 MeV , Applicator 14 x 14 cm²
PRESSURE=1008.00
TEMPERATURE=21.00
NORM_TEMPERATURE=20.00
CORRECTION_FACTOR=1.0000
CORRECTIONS=DIN6800_DEPTH_CORR;
BEGIN_DATA

0,00	581,45E-03
3,00	593,14E-03
6,00	614,70E-03
9,00	630,21E-03
12,00	643,28E-03
15,00	653,81E-03
18,00	663,13E-03
21,00	672,74E-03
24,00	678,29E-03
27,00	679,96E-03
30,00	672,35E-03
33,00	653,69E-03
36,00	618,81E-03
39,00	569,76E-03
42,00	498,65E-03
45,00	415,11E-03
48,00	319,69E-03
51,00	226,59E-03
54,00	142,13E-03
57,00	77,28E-03
60,00	38,56E-03
63,00	19,81E-03
66,00	14,33E-03
71,00	12,93E-03
76,00	12,59E-03
86,00	12,17E-03
96,00	11,75E-03

END_DATA
END_SCAN 1
END_SCAN_DATA

Profile Dose Water Phantom
E = 6 MeV, Applicator 14 x 14 cm²
PRESSURE=1013.20

TEMPERATURE=20.00
NORM_TEMPERATURE=20.00
CORRECTION_FACTOR=1.0000
BEGIN_DATA

-101,37	615,57E-06	5,8482E+00
-97,31	609,57E-06	5,9058E+00
-93,26	772,08E-06	5,8284E+00
-89,20	1,55E-03	5,9832E+00
-85,15	3,96E-03	5,6016E+00
-81,09	10,18E-03	5,9220E+00
-78,56	18,21E-03	6,0102E+00
-76,03	31,59E-03	5,9346E+00
-73,49	52,51E-03	5,8896E+00
-70,96	79,92E-03	5,9832E+00
-68,42	106,27E-03	5,9706E+00
-65,89	125,40E-03	5,8806E+00
-63,36	136,92E-03	5,9904E+00
-60,82	143,26E-03	5,9076E+00
-52,71	150,84E-03	5,7798E+00
-44,60	151,74E-03	5,9274E+00
-36,49	152,06E-03	5,9346E+00
-28,38	151,50E-03	5,8158E+00
-20,27	151,33E-03	6,1236E+00
-12,16	150,94E-03	5,7798E+00
-4,05	150,88E-03	5,9670E+00
0,00	150,87E-03	5,9634E+00
4,05	151,14E-03	5,8338E+00
12,16	150,67E-03	5,8698E+00
20,27	151,11E-03	5,8806E+00
28,38	151,41E-03	5,9778E+00
36,49	152,11E-03	5,9148E+00
44,60	151,51E-03	5,8392E+00
52,71	150,84E-03	5,9724E+00
60,82	143,15E-03	5,9310E+00
63,36	137,52E-03	5,9598E+00
65,89	127,27E-03	5,8032E+00
68,42	109,08E-03	6,2460E+00
70,96	82,54E-03	5,9310E+00
73,49	54,88E-03	5,9526E+00
76,03	32,69E-03	5,9652E+00
78,56	18,67E-03	6,1038E+00
81,09	10,61E-03	5,8482E+00
85,15	4,109E-03	5,9130E+00
89,20	1,61E-03	5,9292E+00
93,26	820,26E-06	5,8518E+00
97,31	613,69E-06	5,8662E+00
101,37	622,28E-06	5,7852E+00

Profile Dose Water Phantom
E = 10 MeV, Applicator 14 x 14 cm²
PRESSURE=1013.20

TEMPERATURE=20.00
NORM_TEMPERATURE=20.00
CORRECTION_FACTOR=1.0000

BEGIN_DATA

-1,0174E+02	1,21E-03	5,92E+00
-9,767E+01	1,48E-03	5,87E+00
-9,360E+01	2,07E-03	5,93E+00
-8,953E+01	3,03E-03	5,93E+00
-8,546E+01	4,98E-03	5,95E+00
-8,139E+01	8,49E-03	5,97E+00
-7,885E+01	1,42E-02	5,91E+00
-7,630E+01	2,54E-02	5,94E+00
-7,376E+01	4,56E-02	5,96E+00
-7,122E+01	7,62E-02	5,89E+00
-6,867E+01	1,05E-01	5,89E+00
-6,613E+01	1,24E-01	5,91E+00
-6,359E+01	1,33E-01	5,94E+00
-6,104E+01	1,36E-01	5,92E+00
-5,290E+01	1,41E-01	5,94E+00
-4,476E+01	1,41E-01	5,95E+00
-3,663E+01	1,42E-01	5,92E+00
-2,849E+01	1,41E-01	5,96E+00
-2,035E+01	1,41E-01	5,93E+00
-1,221E+01	1,40E-01	5,92E+00
-4,07	1,40E-01	5,94E+00
0,00	1,40E-01	5,92E+00
4,07	1,40E-01	5,95E+00
1,221 E+01	1,40E-01	5,94E+00
2,035 E+01	1,40E-01	5,94E+00
2,849 E+01	1,41E-01	5,92E+00
3,663 E+01	1,41E-01	5,90E+00
4,476 E+01	1,41E-01	5,92E+00
5,290E+01	1,41E-01	5,95E+00
6,104 E+01	1,37E-01	5,91E+00
6,359 E+01	1,33E-01	5,85E+00
6,613 E+01	1,25E-01	5,89E+00
6,867 E+01	1,07E-01	5,94E+00
7,122 E+01	7,94E-02	5,87E+00
7,376 E+01	4,83E-02	5,92E+00
7,630 E+01	2,60E-02	5,93E+00
7,885 E+01	1,43E-02	5,94E+00
8,139 E+01	8,80E-03	5,92E+00
8,546 E+01	4,86E-03	5,92E+00
8,953 E+01	3,05E-03	5,88E+00
9,360 E+01	2,02E-03	5,91E+00
9,767 E+01	1,53E-03	5,87E+00
1,0174E+02	1,21E-03	5,90E+00

Profile Dose

E = 12 MeV, Applicator 14 x 14 cm²

PRESSURE=1013.20

TEMPERATURE=20.00

NORM_TEMPERATURE=20.00

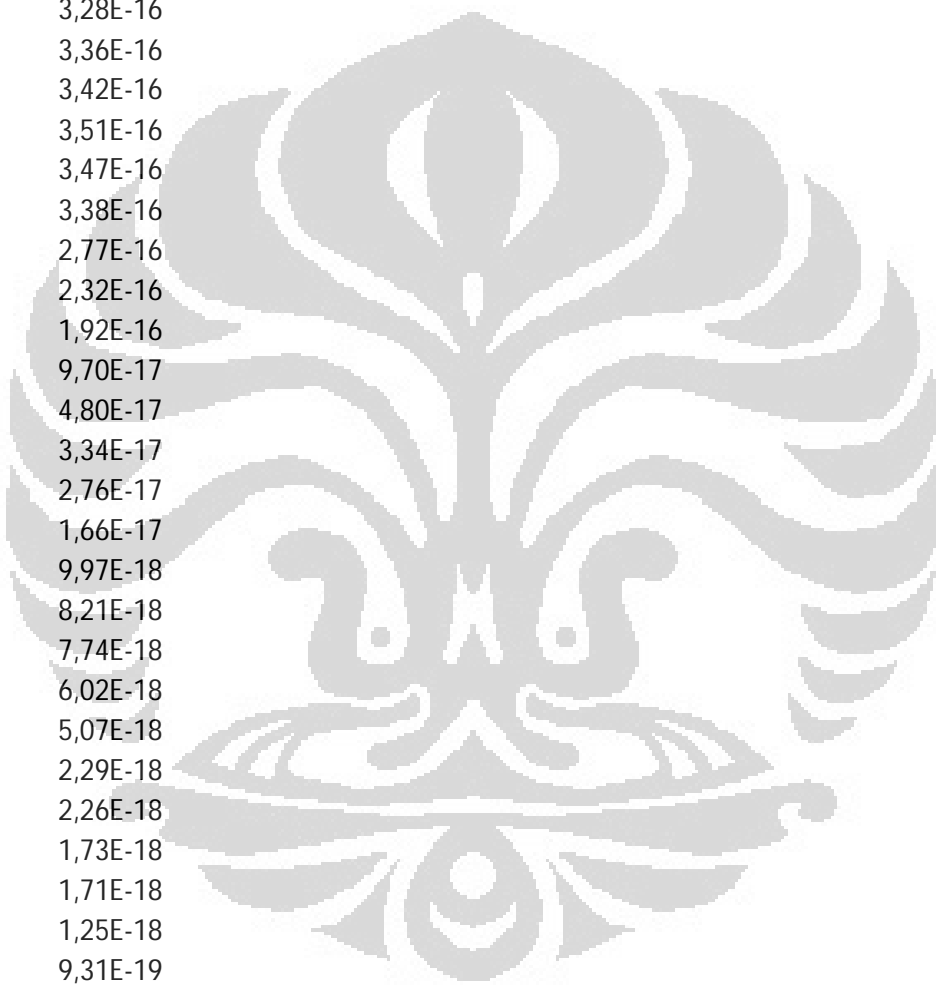
CORRECTION_FACTOR=1.0000

BEGIN_DATA

-102,05	1,59E-03	6,19E+00
-97,97	1,98E-03	6,20E+00
-93,89	2,46E-03	6,20E+00
-89,81	3,37E-03	6,21E+00
-85,72	4,72E-03	6,21E+00
-81,64	8,54E-03	6,21E+00
-79,09	13,31E-03	6,22E+00
-76,54	24,28E-03	6,21E+00
-73,99	45,03E-03	6,21E+00
-71,44	74,44E-03	6,22E+00
-68,89	102,94E-03	6,21E+00
-66,33	121,80E-03	6,21E+00
-63,78	130,50E-03	6,22E+00
-61,23	134,29E-03	6,22E+00
-53,07	137,66E-03	6,22E+00
-44,90	138,62E-03	6,22E+00
-36,74	139,00E-03	6,21E+00
-28,57	138,26E-03	6,22E+00
-20,41	137,91E-03	6,20E+00
-12,25	137,34E-03	6,21E+00
-4,08	137,34E-03	6,21E+00
0,00	137,04E-03	6,21E+00
4,08	137,31E-03	6,22E+00
12,25	137,47E-03	6,21E+00
20,41	137,91E-03	6,21E+00
28,57	137,93E-03	6,23E+00
36,74	138,47E-03	6,23E+00
44,90	138,61E-03	6,23E+00
53,07	137,89E-03	6,23E+00
61,23	134,09E-03	6,22E+00
63,78	130,55E-03	6,22E+00
66,33	122,48E-03	6,21E+00
68,89	105,16E-03	6,21E+00
71,44	77,65E-03	6,20E+00
73,99	46,96E-03	6,22E+00
76,54	25,37E-03	6,21E+00
79,09	14,08E-03	6,22E+00
81,64	8,68E-03	6,21E+00
85,72	4,83E-03	6,20E+00
89,81	3,32E-03	6,21E+00
93,89	2,50E-03	6,23E+00
97,97	1,97E-03	6,21E+00
102,05	1,69E-03	6,20E+00

```
title "dose7.9MeV 6x6cm2"  
yaxis label "DOSE (Gy/particle)"
```

0,05	2,52E-16
0,15	2,54E-16
0,25	2,65E-16
0,35	2,79E-16
0,45	2,82E-16
0,55	2,85E-16
0,65	3,00E-16
0,75	3,21E-16
0,85	3,24E-16
0,95	3,28E-16
1,05	3,36E-16
1,15	3,42E-16
1,25	3,51E-16
1,35	3,47E-16
1,45	3,38E-16
1,55	2,77E-16
1,65	2,32E-16
1,75	1,92E-16
1,85	9,70E-17
1,95	4,80E-17
2,05	3,34E-17
2,15	2,76E-17
2,25	1,66E-17
2,35	9,97E-18
2,75	8,21E-18
2,85	7,74E-18
2,95	6,02E-18
3,05	5,07E-18
3,15	2,29E-18
3,25	2,26E-18
3,35	1,73E-18
3,45	1,71E-18
3,6	1,25E-18
3,8	9,31E-19
4	8,40E-19
4,2	8,15E-19
4,4	6,76E-19
4,75	5,89E-19
5,25	3,36E-19



```

title "dose11.5 MeV, 6x6cm2"
yaxis label "DOSE (Gy/particle)"
s0 errorbar length 0.000000
s0 symbol color 1
  7.5000E-02      3.91-14      3.37E-16
  2.2500E-01      4.08-14      3.59E-16
  3.7500E-01      4.18-14      3.71E-16
  5.2500E-01      4.25-14      3.77E-16
  6.7500E-01      4.29E-14      3.86E-16
  8.2500E-01      4.37E-14      3.90E-16
  9.7500E-01      4.43E-14      4.03E-16
  1.1250E+00      4.47E-14      4.08E-16
  1.2750E+00      4.53E-14      4.12E-16
  1.4250E+00      4.56E-14      4.17E-16
  1.5750E+00      4.59E-14      4.22E-16
  1.7250E+00      4.61E-14      4.24E-16
  1.8750E+00      4.64E-14      4.32E-16
  2.0250E+00      4.70E-14      4.41E-16
  2.1750E+00      4.68E-14      4.41E-16
  2.3250E+00      4.59E-14      4.33E-16
  2.4750E+00      4.59E-14      4.41E-16
  2.6250E+00      4.58E-14      4.45E-16
  2.7750E+00      4.44E-14      4.39E-16
  2.9250E+00      4.28E-14      4.30E-16
  3.0750E+00      4.11E-14      4.26E-16
  3.2250E+00      3.85E-14      4.06E-16
  3.3750E+00      3.62E-14      3.92E-16
  3.5250E+00      3.35E-14      3.77E-16
  3.6750E+00      2.99E-14      3.51E-16
  3.8250E+00      2.66E-14      3.29E-16
  3.9750E+00      2.27E-14      3.00E-16
  4.1250E+00      1.93E-14      2.73E-16
  4.2750E+00      1.59E-14      2.46E-16
  4.4250E+00      1.21E-14      2.08E-16
  4.5750E+00      8.95E-15      1.75E-16
  4.7250E+00      6.07E-15      1.41E-16
  4.8750E+00      3.91E-15      1.09E-16
  5.0250E+00      2.22E-15      8.01E-17
  5.1750E+00      1.21E-15      5.75E-17
  5.3250E+00      5.97E-16      3.79E-17
  5.4750E+00      3.09E-16      2.57E-17
  5.6250E+00      2.24E-16      2.15E-17
  5.7750E+00      1.99E-16      1.96E-17
  5.9250E+00      2.04E-16      2.11E-17
  6.1000E+00      1.52E-16      1.78E-17
  6.3000E+00      1.41E-16      1.50E-17
  6.5000E+00      1.36E-16      1.61E-17
  6.7000E+00      1.15E-16      1.26E-17
  6.9000E+00      1.27E-16      1.58E-17
  7.1000E+00      1.45E-16      1.73E-17
  7.3000E+00      1.19E-16      1.37E-17
  7.5000E+00      1.26E-16      1.61E-17
  7.7000E+00      1.24E-16      1.41E-17
  7.9000E+00      1.19E-16      1.42E-17
  8.2500E+00      1.13E-16      1.16E-17
  8.7500E+00      1.20E-16      1.21E-17
  9.2500E+00      9.88E-17      1.00E-17
  9.7500E+00      9.01E-17      9.24E-18

```

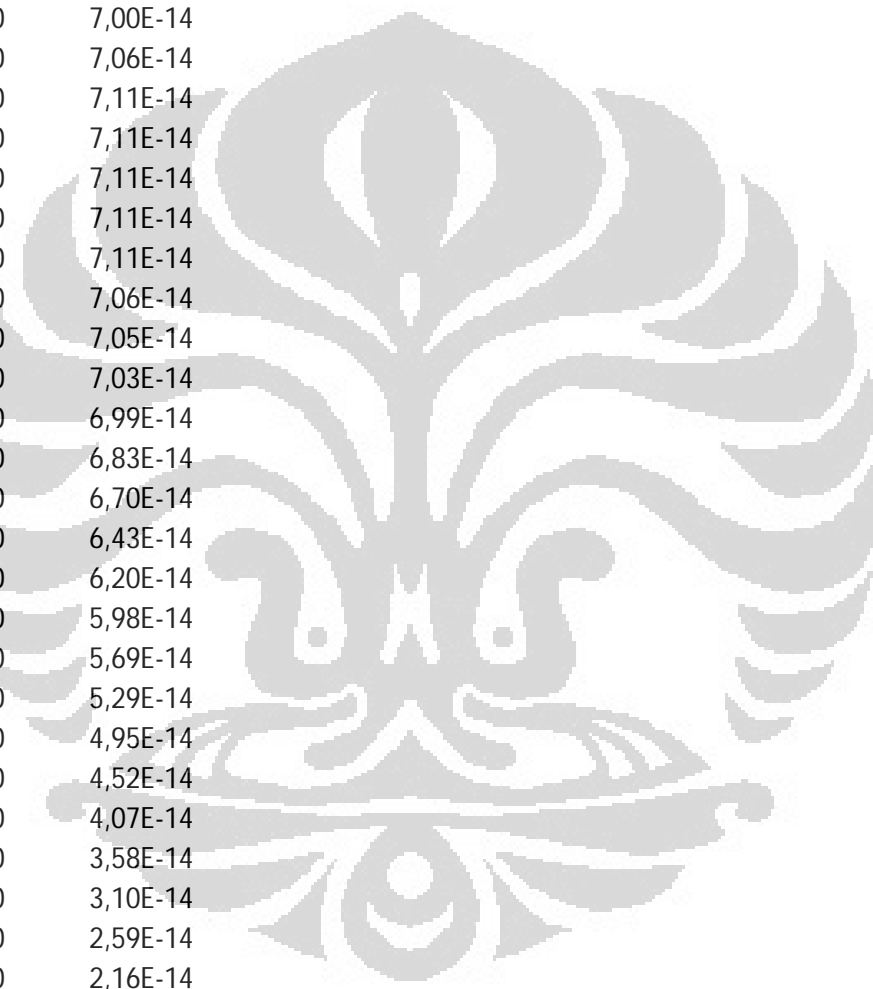
```

title "dose13.4MeV 6x6cm2"

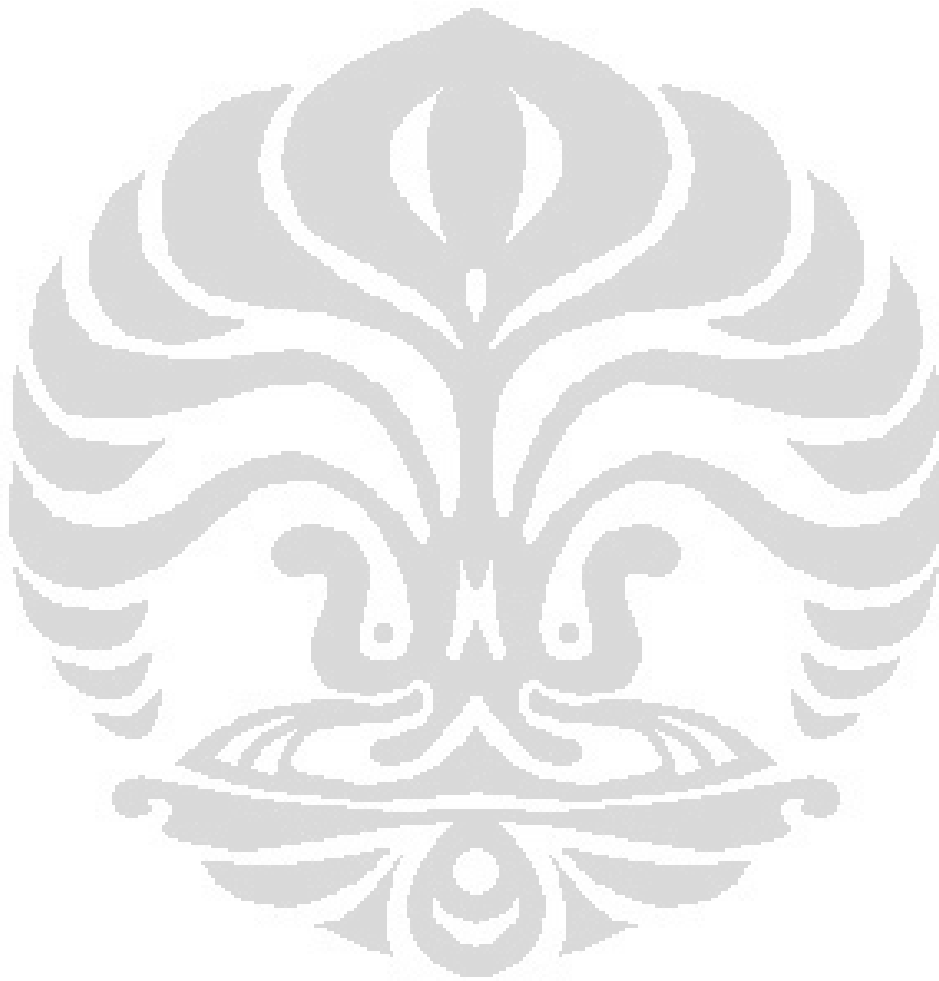
```

yaxis label "DOSE (Gy/particle)"

1,00E-11	6,11E-14
1,50E-01	6,41E-14
3,00E-01	6,55E-14
4,50E-01	6,64E-14
6,00E-01	6,73E-14
7,50E-01	6,79E-14
9,00E-01	6,83E-14
1,05E+00	6,91E-14
1,20E+00	6,92E-14
1,35E+00	6,99E-14
1,50E+00	7,00E-14
1,65E+00	7,06E-14
1,80E+00	7,11E-14
1,95E+00	7,11E-14
2,10E+00	7,11E-14
2,25E+00	7,11E-14
2,40E+00	7,11E-14
2,55E+00	7,06E-14
2,70E+00	7,05E-14
2,85E+00	7,03E-14
3,00E+00	6,99E-14
3,15E+00	6,83E-14
3,30E+00	6,70E-14
3,45E+00	6,43E-14
3,60E+00	6,20E-14
3,75E+00	5,98E-14
3,90E+00	5,69E-14
4,05E+00	5,29E-14
4,20E+00	4,95E-14
4,35E+00	4,52E-14
4,50E+00	4,07E-14
4,65E+00	3,58E-14
4,80E+00	3,10E-14
4,95E+00	2,59E-14
5,10E+00	2,16E-14
5,25E+00	1,70E-14
5,40E+00	1,32E-14
5,55E+00	9,70E-15
5,70E+00	6,80E-15
5,85E+00	4,31E-15
6,00E+00	2,62E-15
6,15E+00	1,56E-15
6,30E+00	8,81E-16
6,45E+00	5,06E-16
6,60E+00	3,33E-16
6,75E+00	3,58E-16



6,90E+00	3,09E-16
7,11E+00	3,39E-16
7,39E+00	3,28E-16
7,66E+00	3,20E-16
7,94E+00	2,78E-16
8,21E+00	2,76E-16
8,63E+00	2,31E-16
9,18E+00	2,36E-16
9,73E+00	2,13E-16



```

title "E=7.9MeV 10x10cm2"
yaxis label "DOSE (Gy/particle)"
1.0000E-11      3.22E-14      2.11E-16
1.0000E-01      3.42E-14      2.30E-16
2.0000E-01      3.52E-14      2.40E-16
3.0000E-01      3.60E-14      2.46E-16
4.0000E-01      3.67E-14      2.54E-16
5.0000E-01      3.74E-14      2.61E-16
6.0000E-01      3.79E-14      2.66E-16
7.0000E-01      3.87E-14      2.75E-16
8.0000E-01      3.92E-14      2.80E-16
9.0000E-01      3.97E-14      2.88E-16
1.0000E+00      4.02E-14      2.95E-16
1.1000E+00      4.05E-14      3.01E-16
1.2000E+00      4.04E-14      3.03E-16
1.3000E+00      4.05E-14      3.08E-16
1.4000E+00      4.01E-14      3.08E-16
1.5000E+00      3.97E-14      3.10E-16
1.6000E+00      3.85E-14      3.04E-16
1.7000E+00      3.71E-14      2.97E-16
1.8000E+00      3.55E-14      2.92E-16
1.9000E+00      3.36E-14      2.83E-16
2.0000E+00      3.20E-14      2.78E-16
2.1000E+00      2.95E-14      2.66E-16
2.2000E+00      2.70E-14      2.52E-16
2.3000E+00      2.38E-14      2.33E-16
2.4000E+00      2.07E-14      2.14E-16
2.5000E+00      1.75E-14      1.94E-16
2.6000E+00      1.49E-14      1.77E-16
2.7000E+00      1.18E-14      1.53E-16
2.8000E+00      9.13E-15      1.32E-16
2.9000E+00      6.84E-15      1.14E-16
3.0000E+00      4.61E-15      8.99E-17
3.1000E+00      3.13E-15      7.38E-17
3.2000E+00      1.97E-15      5.73E-17
3.3000E+00      1.18E-15      4.43E-17
3.4000E+00      7.64E-16      3.54E-17
3.6000E+00      5.51E-16      2.80E-17
3.9000E+00      4.96E-16      2.76E-17
4.2000E+00      5.23E-16      2.92E-17
4.5000E+00      4.66E-16      2.61E-17
4.8000E+00      4.10E-16      2.35E-17
5.1000E+00      3.06E-16      2.00E-17
5.4000E+00      3.34E-16      2.19E-17
5.7000E+00      3.11E-16      2.07E-17
6.0000E+00      2.53E-16      1.79E-17
6.3000E+00      2.32E-16      1.59E-17
6.7000E+00      2.25E-16      1.52E-17
7.2000E+00      2.71E-16      1.74E-17
7.7000E+00      2.80E-16      1.93E-17
8.2000E+00      2.28E-16      1.77E-17
8.7000E+00      2.00E-16      1.54E-17
9.1500E+00      1.45E-16      1.31E-17
9.5500E+00      1.12E-16      1.13E-17
9.9500E+00      8.62E-17      1.04E-17
1.0350E+01      4.02E-17      6.42E-18
1.0750E+01      3.14E-17      4.00E-18
1.0975E+01      5.46E-17      9.36E-18
title "dose11.5MeV 10x10cm2"

```

```

yaxis label "DOSE (Gy/particle)"
1.0000E-11      8.41E-14      5.59E-16
1.0000E-01      8.80E-14      5.97E-16
2.0000E-01      8.91E-14      6.07E-16
3.0000E-01      9.01E-14      6.21E-16
4.0000E-01      9.15E-14      6.36E-16
5.0000E-01      9.25E-14      6.45E-16
6.0000E-01      9.32E-14      6.54E-16
7.0000E-01      9.40E-14      6.65E-16
8.0000E-01      9.46E-14      6.69E-16
9.0000E-01      9.42E-14      6.68E-16
1.0000E+00      9.51E-14      6.80E-16
1.1000E+00      9.50E-14      6.83E-16
1.2000E+00      9.50E-14      6.83E-16
1.3000E+00      9.53E-14      6.91E-16
1.4000E+00      9.61E-14      7.04E-16
1.5000E+00      9.62E-14      7.06E-16
1.6000E+00      9.66E-14      7.12E-16
1.7000E+00      9.67E-14      7.22E-16
1.8000E+00      9.64E-14      7.22E-16
1.9000E+00      9.65E-14      7.30E-16
2.0000E+00      9.67E-14      7.39E-16
2.1000E+00      9.69E-14      7.47E-16
2.2000E+00      9.54E-14      7.39E-16
2.3000E+00      9.46E-14      7.42E-16
2.4000E+00      9.40E-14      7.45E-16
2.5000E+00      9.27E-14      7.40E-16
2.6000E+00      9.13E-14      7.35E-16
2.7000E+00      8.99E-14      7.33E-16
2.8000E+00      8.80E-14      7.29E-16
2.9000E+00      8.58E-14      7.24E-16
3.0000E+00      8.29E-14      7.10E-16
3.1000E+00      8.07E-14      7.01E-16
3.2000E+00      7.80E-14      6.94E-16
3.3000E+00      7.44E-14      6.73E-16
3.4000E+00      7.15E-14      6.68E-16
3.6000E+00      6.22E-14      5.46E-16
3.9000E+00      4.84E-14      4.67E-16
4.2000E+00      3.39E-14      3.72E-16
4.5000E+00      2.07E-14      2.77E-16
4.8000E+00      1.00E-14      1.81E-16
5.1000E+00      3.91E-15      1.09E-16
5.4000E+00      1.69E-15      7.63E-17
5.7000E+00      1.09E-15      6.24E-17
6.0000E+00      1.01E-15      5.86E-17
6.3000E+00      1.01E-15      6.07E-17
6.7000E+00      1.01E-15      6.00E-17
7.2000E+00      9.71E-16      5.79E-17
7.7000E+00      9.34E-16      5.64E-17
8.2000E+00      8.19E-16      5.21E-17
8.7000E+00      7.60E-16      5.02E-17
9.1500E+00      7.72E-16      4.88E-17
9.5500E+00      7.18E-16      4.76E-17
9.9500E+00      6.79E-16      4.86E-17
1.0350E+01      6.01E-16      4.38E-17
1.0750E+01      5.99E-16      4.26E-17
1.0975E+01      6.19E-16      6.18E-17

```

```

title "dose13.4 10x10cm2"
yaxis label "DOSE (Gy/particle)"
1.0000E-11      1.19E-13      8.06E-16
1.0000E-01      1.23E-13      8.51E-16
2.0000E-01      1.26E-13      8.79E-16
3.0000E-01      1.27E-13      8.93E-16
4.0000E-01      1.28E-13      9.08E-16
5.0000E-01      1.29E-13      9.20E-16
6.0000E-01      1.30E-13      9.31E-16
7.0000E-01      1.30E-13      9.34E-16
8.0000E-01      1.30E-13      9.34E-16
9.0000E-01      1.30E-13      9.41E-16
1.0000E+00      1.30E-13      9.56E-16
1.1000E+00      1.30E-13      9.59E-16
1.2000E+00      1.31E-13      9.53E-16
1.3000E+00      1.31E-13      9.64E-16
1.4000E+00      1.32E-13      9.77E-16
1.5000E+00      1.32E-13      9.75E-16
1.6000E+00      1.32E-13      9.74E-16
1.7000E+00      1.32E-13      9.84E-16
1.8000E+00      1.32E-13      9.79E-16
1.9000E+00      1.32E-13      9.84E-16
2.0000E+00      1.31E-13      9.87E-16
2.1000E+00      1.32E-13      1.00E-15
2.2000E+00      1.32E-13      1.01E-15
2.3000E+00      1.31E-13      1.00E-15
2.4000E+00      1.30E-13      1.01E-15
2.5000E+00      1.31E-13      1.02E-15
2.6000E+00      1.32E-13      1.02E-15
2.7000E+00      1.33E-13      1.03E-15
2.8000E+00      1.27E-13      1.01E-15
2.9000E+00      1.26E-13      1.01E-15
3.0000E+00      1.25E-13      1.01E-15
3.1000E+00      1.24E-13      1.01E-15
3.2000E+00      1.22E-13      1.01E-15
3.3000E+00      1.21E-13      1.01E-15
3.4000E+00      1.19E-13      1.02E-15
3.6000E+00      1.14E-13      9.13E-16
3.9000E+00      1.02E-13      8.61E-16
4.2000E+00      9.03E-14      7.94E-16
4.5000E+00      7.49E-14      7.08E-16
4.8000E+00      5.85E-14      6.09E-16
5.1000E+00      4.14E-14      4.92E-16
5.4000E+00      2.67E-14      3.83E-16
5.7000E+00      1.45E-14      2.72E-16
6.0000E+00      6.70E-15      1.79E-16
6.3000E+00      2.83E-15      1.14E-16
6.7000E+00      1.49E-15      7.95E-17
7.2000E+00      1.28E-15      7.13E-17
7.7000E+00      1.20E-15      6.90E-17
8.2000E+00      1.35E-15      7.78E-17
8.7000E+00      1.15E-15      7.11E-17
9.1500E+00      1.22E-15      7.47E-17
9.5500E+00      1.19E-15      7.52E-17
9.9500E+00      1.16E-15      7.49E-17
1.0350E+01      1.08E-15      7.31E-17
1.0750E+01      9.81E-16      6.96E-17
1.0975E+01      7.69E-16      6.57E-17
title "pdd E=6MeV, 14x14 cm2"

```



```

yaxis label "DOSE (Gy/particle)"
5.0000E-02      1.45E-14      1.49E-16
1.5000E-01      1.55E-14      1.61E-16
2.5000E-01      1.64E-14      1.69E-16
3.5000E-01      1.71E-14      1.75E-16
4.5000E-01      1.79E-14      1.82E-16
5.5000E-01      1.86E-14      1.87E-16
6.5000E-01      1.89E-14      1.89E-16
7.5000E-01      1.94E-14      1.93E-16
8.5000E-01      1.95E-14      1.94E-16
9.5000E-01      1.95E-14      1.96E-16
1.0500E+00      1.90E-14      1.93E-16
1.1500E+00      1.83E-14      1.89E-16
1.2500E+00      1.73E-14      1.83E-16
1.3500E+00      1.61E-14      1.77E-16
1.4500E+00      1.45E-14      1.67E-16
1.5500E+00      1.27E-14      1.57E-16
1.6500E+00      1.04E-14      1.39E-16
1.7500E+00      8.41E-15      1.24E-16
1.8500E+00      6.57E-15      1.09E-16
1.9500E+00      4.76E-15      9.19E-17
2.0500E+00      3.18E-15      7.60E-17
2.1500E+00      1.78E-15      5.41E-17
2.2500E+00      9.67E-16      4.01E-17
2.3500E+00      4.20E-16      2.55E-17
2.4500E+00      1.28E-16      1.33E-17
2.5500E+00      3.86E-17      6.67E-18
2.6500E+00      2.18E-17      4.91E-18
2.7500E+00      1.70E-17      4.13E-18
2.8500E+00      1.46E-17      3.49E-18
2.9500E+00      1.28E-17      2.31E-18
3.0500E+00      1.17E-17      2.98E-18
3.1500E+00      1.66E-17      3.69E-18
3.2500E+00      1.41E-17      3.45E-18
3.3500E+00      1.04E-17      2.33E-18
3.4500E+00      1.16E-17      3.59E-18
3.5500E+00      1.15E-17      2.69E-18
3.6500E+00      1.60E-17      4.46E-18
3.7500E+00      1.00E-17      2.59E-18
3.8500E+00      1.32E-17      2.87E-18
3.9500E+00      1.29E-17      2.06E-18
4.0500E+00      1.25E-17      3.26E-18
4.1500E+00      1.24E-17      2.31E-18
4.2500E+00      1.23E-17      3.44E-18
4.3500E+00      1.28E-17      3.18E-18
4.4500E+00      5.95E-18      1.74E-18
4.6000E+00      9.18E-18      2.72E-18
4.8000E+00      8.04E-18      1.58E-18
5.0000E+00      9.13E-18      2.22E-18
5.2000E+00      9.79E-18      2.30E-18
5.4000E+00      8.30E-18      2.79E-18
5.7500E+00      7.83E-18      1.49E-18
6.2500E+00      4.96E-18      1.10E-18
6.7500E+00      5.56E-18      1.09E-18

```

```

title "PDD E=7.9MeV 14x14 cm2 "
yaxis label "DOSE (Gy/particel)"
5.0000E-02      2.98E-14      6.87E-17
1.5000E-01      3.13E-14      7.39E-17
2.5000E-01      3.22E-14      7.66E-17
3.5000E-01      3.29E-14      7.93E-17
4.5000E-01      3.35E-14      8.16E-17
5.5000E-01      3.42E-14      8.38E-17
6.5000E-01      3.48E-14      8.61E-17
7.5000E-01      3.53E-14      8.82E-17
8.5000E-01      3.58E-14      9.02E-17
9.5000E-01      3.63E-14      9.23E-17
1.0500E+00      3.66E-14      9.41E-17
1.1500E+00      3.70E-14      9.60E-17
1.2500E+00      3.72E-14      9.77E-17
1.3500E+00      3.71E-14      9.88E-17
1.4500E+00      3.68E-14      9.91E-17
1.5500E+00      3.62E-14      9.90E-17
1.6500E+00      3.54E-14      9.83E-17
1.7500E+00      3.41E-14      9.67E-17
1.8500E+00      3.26E-14      9.45E-17
1.9500E+00      3.09E-14      9.16E-17
2.0500E+00      2.89E-14      8.84E-17
2.1500E+00      2.66E-14      8.40E-17
2.2500E+00      2.40E-14      7.91E-17
2.3500E+00      2.14E-14      7.41E-17
2.4500E+00      1.85E-14      6.79E-17
2.5500E+00      1.56E-14      6.12E-17
2.6500E+00      1.27E-14      5.45E-17
2.7500E+00      1.00E-14      4.70E-17
2.8500E+00      7.57E-15      4.03E-17
2.9500E+00      5.40E-15      3.33E-17
3.0500E+00      3.65E-15      2.69E-17
3.1500E+00      2.31E-15      2.10E-17
3.2500E+00      1.42E-15      1.63E-17
3.3500E+00      8.73E-16      1.29E-17
3.4500E+00      5.84E-16      1.07E-17
3.5500E+00      4.48E-16      9.55E-18
3.6500E+00      3.97E-16      9.11E-18
3.7500E+00      3.78E-16      8.70E-18
3.8500E+00      3.68E-16      8.69E-18
3.9500E+00      3.64E-16      8.56E-18
4.1000E+00      3.68E-16      8.08E-18
4.3000E+00      3.73E-16      8.12E-18
4.5000E+00      3.76E-16      8.08E-18
4.7000E+00      3.73E-16      8.25E-18
4.9000E+00      3.71E-16      7.99E-18
5.2500E+00      3.64E-16      7.26E-18
5.7500E+00      3.50E-16      7.31E-18
6.2500E+00      3.44E-16      7.27E-18
6.7500E+00      3.39E-16      7.15E-18
7.2500E+00      3.23E-16      6.95E-18
7.7500E+00      3.29E-16      7.25E-18
8.2500E+00      2.97E-16      6.75E-18
8.7500E+00      2.75E-16      6.45E-18
9.2500E+00      2.66E-16      6.33E-18
9.7500E+00      2.58E-16      6.03E-18

```

```

title "PDD E=8MeV 14x14 m2"
yaxis label "DOSE (Gy/prticle)"
5.0000E-02      3.19E-14      7.32E-17
1.5000E-01      3.35E-14      7.87E-17
2.5000E-01      3.44E-14      8.18E-17
3.5000E-01      3.51E-14      8.43E-17
4.5000E-01      3.58E-14      8.69E-17
5.5000E-01      3.63E-14      8.88E-17
6.5000E-01      3.69E-14      9.11E-17
7.5000E-01      3.76E-14      9.35E-17
8.5000E-01      3.81E-14      9.56E-17
9.5000E-01      3.86E-14      9.79E-17
1.0500E+00      3.90E-14      1.00E-16
1.1500E+00      3.93E-14      1.01E-16
1.2500E+00      3.96E-14      1.03E-16
1.3500E+00      3.95E-14      1.04E-16
1.4500E+00      3.93E-14      1.05E-16
1.5500E+00      3.89E-14      1.05E-16
1.6500E+00      3.80E-14      1.04E-16
1.7500E+00      3.70E-14      1.03E-16
1.8500E+00      3.58E-14      1.02E-16
1.9500E+00      3.43E-14      1.00E-16
2.0500E+00      3.23E-14      9.68E-17
2.1500E+00      3.00E-14      9.26E-17
2.2500E+00      2.76E-14      8.83E-17
2.3500E+00      2.49E-14      8.30E-17
2.4500E+00      2.20E-14      7.72E-17
2.5500E+00      1.92E-14      7.11E-17
2.6500E+00      1.61E-14      6.43E-17
2.7500E+00      1.32E-14      5.71E-17
2.8500E+00      1.03E-14      4.96E-17
2.9500E+00      7.88E-15      4.26E-17
3.0500E+00      5.62E-15      3.51E-17
3.1500E+00      3.83E-15      2.85E-17
3.2500E+00      2.48E-15      2.27E-17
3.3500E+00      1.50E-15      1.73E-17
3.4500E+00      9.17E-16      1.35E-17
3.5500E+00      6.00E-16      1.11E-17
3.6500E+00      4.67E-16      1.00E-17
3.7500E+00      4.25E-16      9.79E-18
3.8500E+00      3.88E-16      9.14E-18
3.9500E+00      3.89E-16      9.62E-18
4.1000E+00      3.95E-16      8.75E-18
4.3000E+00      3.91E-16      8.64E-18
4.5000E+00      3.88E-16      8.48E-18
4.7000E+00      3.84E-16      8.43E-18
4.9000E+00      3.78E-16      8.57E-18
5.2500E+00      3.64E-16      7.59E-18
5.7500E+00      3.67E-16      7.67E-18
6.2500E+00      3.48E-16      7.40E-18
6.7500E+00      3.33E-16      7.30E-18
7.2500E+00      3.33E-16      7.38E-18
7.7500E+00      3.28E-16      7.36E-18
8.2500E+00      3.26E-16      7.32E-18
8.7500E+00      3.19E-16      7.11E-18
9.2500E+00      3.19E-16      7.06E-18
9.7500E+00      3.06E-16      6.88E-18

```

```

title "PDD E=10MeV 14x14 cm2"
yaxis label "DOSE (Gy/particle)"
5.0000E-02      5.78E-14      1.45E-16
1.5000E-01      6.03E-14      1.54E-16
2.5000E-01      6.15E-14      1.59E-16
3.5000E-01      6.24E-14      1.62E-16
4.5000E-01      6.32E-14      1.65E-16
5.5000E-01      6.38E-14      1.68E-16
6.5000E-01      6.44E-14      1.70E-16
7.5000E-01      6.48E-14      1.72E-16
8.5000E-01      6.53E-14      1.75E-16
9.5000E-01      6.57E-14      1.77E-16
1.0500E+00      6.60E-14      1.78E-16
1.1500E+00      6.63E-14      1.80E-16
1.2500E+00      6.68E-14      1.83E-16
1.3500E+00      6.71E-14      1.85E-16
1.4500E+00      6.72E-14      1.87E-16
1.5500E+00      6.75E-14      1.89E-16
1.6500E+00      6.75E-14      1.91E-16
1.7500E+00      6.77E-14      1.92E-16
1.8500E+00      6.78E-14      1.93E-16
1.9500E+00      6.78E-14      1.94E-16
2.0500E+00      6.83E-14      1.96E-16
2.1500E+00      6.86E-14      1.95E-16
2.2500E+00      6.62E-14      1.94E-16
2.3500E+00      6.29E-14      1.92E-16
2.4500E+00      6.13E-14      1.91E-16
2.5500E+00      5.93E-14      1.88E-16
2.6500E+00      5.69E-14      1.83E-16
2.7500E+00      5.46E-14      1.80E-16
2.8500E+00      5.18E-14      1.75E-16
2.9500E+00      4.87E-14      1.70E-16
3.0500E+00      4.52E-14      1.62E-16
3.1500E+00      4.17E-14      1.55E-16
3.2500E+00      3.77E-14      1.46E-16
3.3500E+00      3.38E-14      1.37E-16
3.4500E+00      3.00E-14      1.29E-16
3.5500E+00      2.60E-14      1.18E-16
3.6500E+00      2.20E-14      1.08E-16
3.7500E+00      1.82E-14      9.71E-17
3.8500E+00      1.47E-14      8.62E-17
3.9500E+00      1.15E-14      7.52E-17
4.1000E+00      7.58E-15      5.29E-17
4.3000E+00      3.72E-15      3.60E-17
4.5000E+00      1.65E-15      2.41E-17
4.7000E+00      8.86E-16      1.82E-17
4.9000E+00      7.06E-16      1.70E-17
5.1000E+00      6.95E-16      1.72E-17
5.3000E+00      6.79E-16      1.69E-17
5.5000E+00      6.80E-16      1.65E-17
5.7000E+00      6.49E-16      1.62E-17
5.9000E+00      6.59E-16      1.67E-17
6.2500E+00      6.57E-16      1.52E-17
6.7500E+00      6.32E-16      1.49E-17
7.2500E+00      5.97E-16      1.43E-17
7.7500E+00      5.64E-16      1.40E-17
8.2500E+00      5.26E-16      1.35E-17
8.7500E+00      5.06E-16      1.30E-17

```

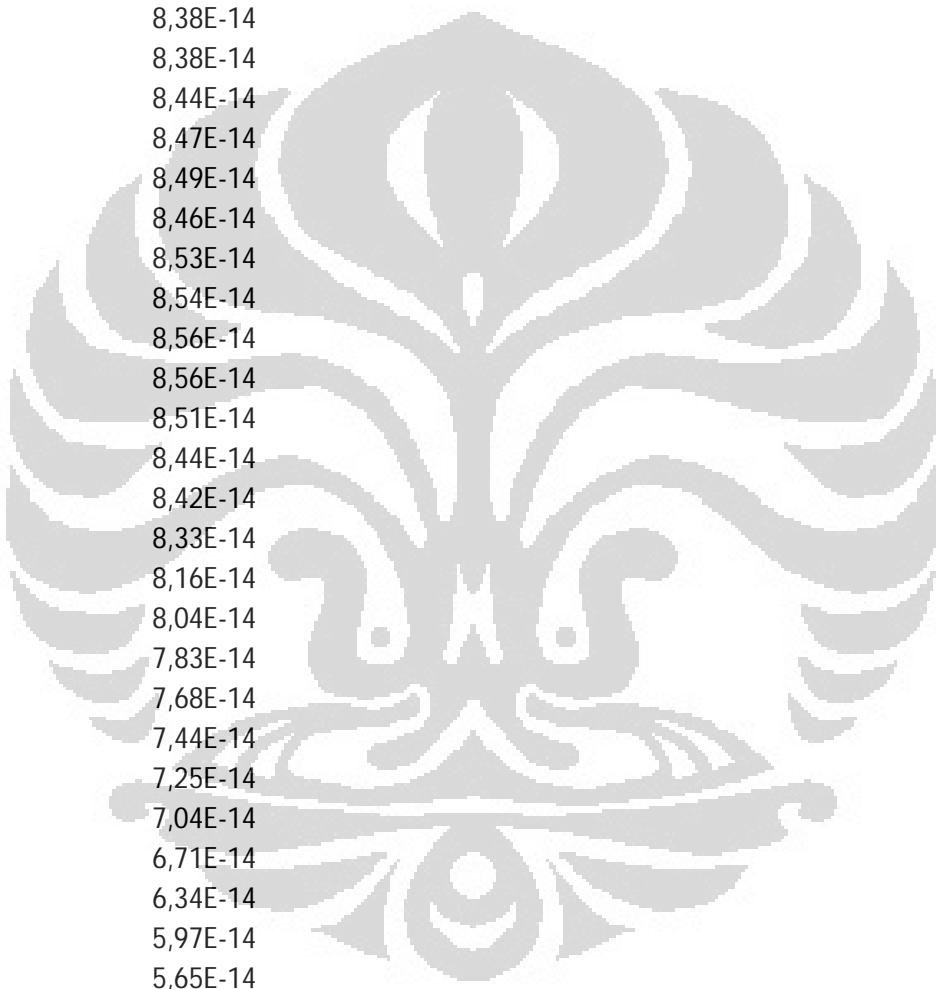
```

title "PDD E=11 MeV 14x14 cm2"

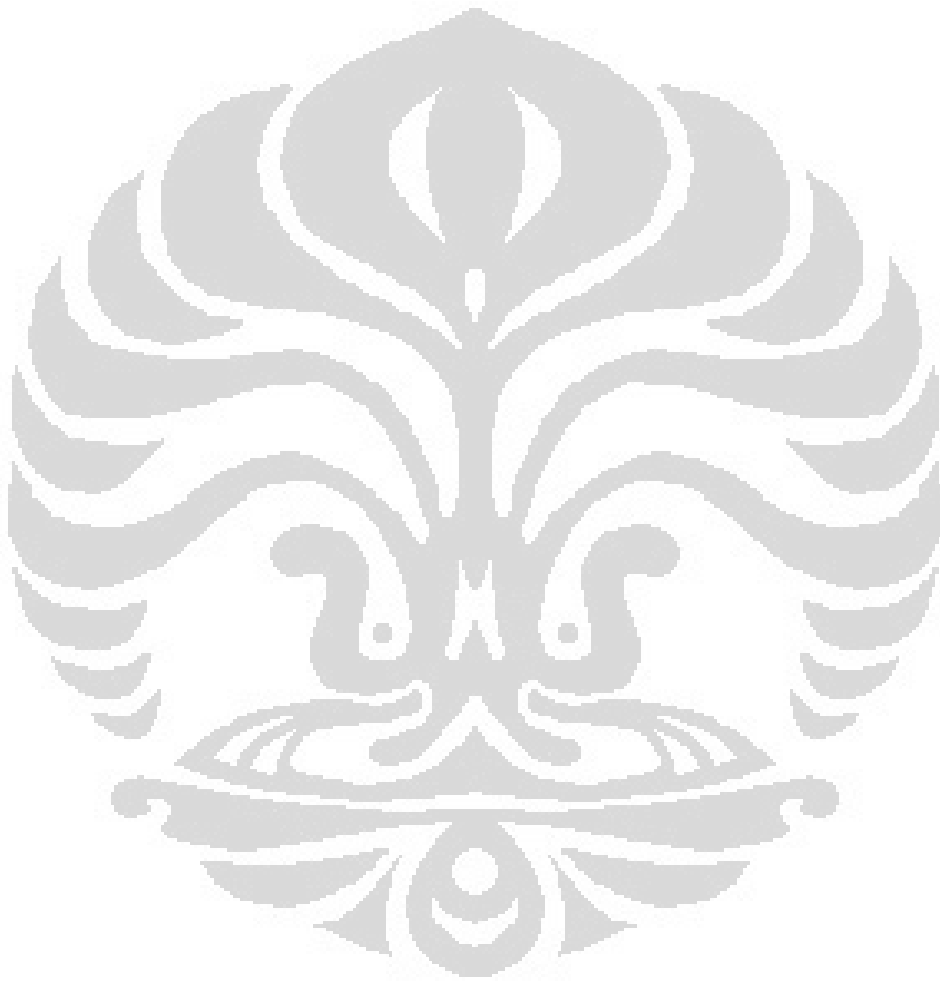
```

yaxis label "DOSE (Gy/particle)"

1,00E-11	7,37E-14
1,00E-01	7,70E-14
2,00E-01	7,87E-14
3,00E-01	8,04E-14
4,00E-01	8,11E-14
5,00E-01	8,21E-14
6,00E-01	8,25E-14
7,00E-01	8,24E-14
8,00E-01	8,30E-14
9,00E-01	8,39E-14
1,00E+00	8,38E-14
1,10E+00	8,38E-14
1,20E+00	8,44E-14
1,30E+00	8,47E-14
1,40E+00	8,49E-14
1,50E+00	8,46E-14
1,60E+00	8,53E-14
1,70E+00	8,54E-14
1,80E+00	8,56E-14
1,90E+00	8,56E-14
2,00E+00	8,51E-14
2,10E+00	8,44E-14
2,20E+00	8,42E-14
2,30E+00	8,33E-14
2,40E+00	8,16E-14
2,50E+00	8,04E-14
2,60E+00	7,83E-14
2,70E+00	7,68E-14
2,80E+00	7,44E-14
2,90E+00	7,25E-14
3,00E+00	7,04E-14
3,10E+00	6,71E-14
3,20E+00	6,34E-14
3,30E+00	5,97E-14
3,40E+00	5,65E-14
3,60E+00	4,80E-14
3,90E+00	3,46E-14
4,20E+00	2,12E-14
4,50E+00	1,04E-14
4,80E+00	4,02E-15
5,10E+00	1,55E-15
5,40E+00	1,02E-15
5,70E+00	9,01E-16
6,00E+00	8,56E-16
6,30E+00	8,75E-16
6,70E+00	8,30E-16



7,20E+00	8,06E-16
7,70E+00	7,77E-16
8,20E+00	6,71E-16
8,70E+00	5,98E-16
9,15E+00	5,52E-16
9,55E+00	5,12E-16



```

title "PDD E=12MeV 14x14 cm2"
yaxis label "DOSE (Gy/particle)"
5.0000E-02      8.93E-14      2.23E-16
1.5000E-01      9.27E-14      2.36E-16
2.5000E-01      9.42E-14      2.42E-16
3.5000E-01      9.53E-14      2.47E-16
4.5000E-01      9.60E-14      2.50E-16
5.5000E-01      9.67E-14      2.53E-16
6.5000E-01      9.73E-14      2.56E-16
7.5000E-01      9.77E-14      2.58E-16
8.5000E-01      9.81E-14      2.60E-16
9.5000E-01      9.85E-14      2.62E-16
1.0500E+00      9.88E-14      2.64E-16
1.1500E+00      9.89E-14      2.65E-16
1.2500E+00      9.92E-14      2.68E-16
1.3500E+00      9.95E-14      2.69E-16
1.4500E+00      9.96E-14      2.71E-16
1.5500E+00      9.99E-14      2.73E-16
1.6500E+00      9.96E-14      2.74E-16
1.7500E+00      9.97E-14      2.76E-16
1.8500E+00      9.94E-14      2.76E-16
1.9500E+00      9.91E-14      2.77E-16
2.0500E+00      9.88E-14      2.78E-16
2.1500E+00      9.87E-14      2.80E-16
2.2500E+00      9.83E-14      2.80E-16
2.3500E+00      9.78E-14      2.82E-16
2.4500E+00      9.70E-14      2.82E-16
2.5500E+00      9.62E-14      2.82E-16
2.6500E+00      9.53E-14      2.83E-16
2.7500E+00      9.43E-14      2.82E-16
2.8500E+00      9.32E-14      2.83E-16
2.9500E+00      9.13E-14      2.80E-16
3.0500E+00      8.93E-14      2.78E-16
3.1500E+00      8.70E-14      2.75E-16
3.2500E+00      8.46E-14      2.71E-16
3.3500E+00      8.20E-14      2.68E-16
3.4500E+00      7.90E-14      2.63E-16
3.5500E+00      7.55E-14      2.56E-16
3.6500E+00      7.18E-14      2.50E-16
3.7500E+00      6.80E-14      2.43E-16
3.8500E+00      6.37E-14      2.34E-16
3.9500E+00      5.97E-14      2.26E-16
4.1000E+00      5.32E-14      1.97E-16
4.3000E+00      4.33E-14      1.73E-16
4.5000E+00      3.36E-14      1.50E-16
4.7000E+00      2.46E-14      1.25E-16
4.9000E+00      1.67E-14      1.00E-16
5.1000E+00      1.01E-14      7.60E-17
5.3000E+00      5.59E-15      5.46E-17
5.5000E+00      2.94E-15      3.94E-17
5.7000E+00      1.64E-15      2.99E-17
5.9000E+00      1.22E-15      2.74E-17
6.2500E+00      1.06E-15      2.31E-17
6.7500E+00      1.01E-15      2.24E-17
7.2500E+00      9.78E-16      2.17E-17
7.7500E+00      9.48E-16      2.16E-17
8.2500E+00      9.36E-16      2.15E-17
8.7500E+00      8.89E-16      2.08E-17
title "PDD E=14MeV 14x14 cm2"

```

```

yaxis label "DOSE (Gy/particle)"
1.2500E-01      1.22E-13      1.55E-16
3.7500E-01      1.28E-13      1.65E-16
6.2500E-01      1.30E-13      1.70E-16
8.7500E-01      1.32E-13      1.74E-16
1.1250E+00      1.33E-13      1.77E-16
1.3750E+00      1.34E-13      1.80E-16
1.6250E+00      1.34E-13      1.82E-16
1.8750E+00      1.35E-13      1.84E-16
2.1250E+00      1.35E-13      1.87E-16
2.3750E+00      1.35E-13      1.89E-16
2.6250E+00      1.35E-13      1.91E-16
2.8750E+00      1.34E-13      1.92E-16
3.1250E+00      1.32E-13      1.93E-16
3.3750E+00      1.29E-13      1.93E-16
3.6250E+00      1.25E-13      1.90E-16
3.8750E+00      1.19E-13      1.86E-16
4.1250E+00      1.12E-13      1.80E-16
4.3750E+00      1.02E-13      1.70E-16
4.6250E+00      9.07E-14      1.58E-16
4.8750E+00      7.75E-14      1.44E-16
5.1250E+00      6.33E-14      1.27E-16
5.3750E+00      4.84E-14      1.08E-16
5.6250E+00      3.45E-14      8.82E-17
5.8750E+00      2.21E-14      6.79E-17
6.1250E+00      1.25E-14      4.91E-17
6.3750E+00      6.19E-15      3.30E-17
6.6250E+00      2.83E-15      2.16E-17
6.8750E+00      1.53E-15      1.60E-17
7.1250E+00      1.20E-15      1.43E-17
7.3750E+00      1.12E-15      1.41E-17
7.6250E+00      1.10E-15      1.40E-17
7.8750E+00      1.09E-15      1.40E-17
8.1250E+00      1.08E-15      1.41E-17
8.3750E+00      1.05E-15      1.38E-17
8.6250E+00      1.03E-15      1.35E-17
8.8750E+00      1.01E-15      1.36E-17
9.1250E+00      9.96E-16      1.36E-17
9.3750E+00      9.88E-16      1.35E-17
9.6250E+00      9.53E-16      1.33E-17
9.8750E+00      9.28E-16      1.27E-17
1.0200E+01      9.20E-16      1.22E-17
1.0600E+01      8.94E-16      1.21E-17
1.1000E+01      8.91E-16      1.23E-17
1.1400E+01      8.56E-16      1.19E-17
1.1800E+01      8.33E-16      1.20E-17
1.2200E+01      8.30E-16      1.20E-17
1.2600E+01      7.93E-16      1.16E-17
1.3000E+01      7.68E-16      1.13E-17
1.3400E+01      7.45E-16      1.13E-17
1.3800E+01      7.27E-16      1.12E-17
1.4250E+01      7.01E-16      1.05E-17
1.4750E+01      6.79E-16      1.05E-17
1.5250E+01      6.62E-16      1.05E-17
1.5750E+01      6.39E-16      1.03E-17
1.6250E+01      6.29E-16      1.02E-17
1.6750E+01      5.95E-16      9.83E-18
title "profile dose E=7.9 MeV 14 x 14 cm2"
yaxis label "DOSE (Gy/particle)"

```


-1.05E+01	2.41E-18	2.06E-20
-9.97E+00	3.62E-18	4.57E-20
-9.92E+00	4.00E-18	5.06E-20
-9.87E+00	4.41E-18	5.29E-20
-9.82E+00	4.42E-18	5.03E-20
-9.77E+00	4.93E-18	5.58E-20
-9.72E+00	5.22E-18	5.62E-20
-9.67E+00	5.53E-18	5.50E-20
-9.62E+00	6.07E-18	5.74E-20
-9.57E+00	6.52E-18	6.17E-20
-9.52E+00	7.25E-18	6.81E-20
-9.47E+00	7.51E-18	6.52E-20
-9.42E+00	8.32E-18	6.98E-20
-9.37E+00	9.10E-18	7.63E-20
-9.32E+00	9.57E-18	7.49E-20
-9.27E+00	1.00E-17	7.38E-20
-9.22E+00	1.10E-17	7.83E-20
-9.17E+00	1.22E-17	8.30E-20
-9.12E+00	1.33E-17	8.70E-20
-9.07E+00	1.45E-17	9.03E-20
-9.02E+00	1.56E-17	9.09E-20
-8.85E+00	2.26E-17	8.86E-20
-8.55E+00	3.89E-17	1.21E-19
-8.25E+00	6.62E-17	1.69E-19
-7.95E+00	1.07E-16	2.32E-19
-7.65E+00	1.61E-16	2.99E-19
-7.35E+00	2.20E-16	3.59E-19
-7.05E+00	3.20E-16	4.73E-19
-6.75E+00	3.82E-16	5.25E-19
-6.45E+00	3.95E-16	5.29E-19
-6.15E+00	4.02E-16	5.32E-19
-5.85E+00	4.07E-16	5.36E-19
-5.55E+00	4.02E-16	5.32E-19
-5.25E+00	4.08E-16	5.37E-19
-4.95E+00	4.04E-16	5.32E-19
-4.65E+00	4.11E-16	5.39E-19
-4.35E+00	4.08E-16	5.36E-19
-4.05E+00	4.04E-16	5.33E-19
-3.75E+00	4.01E-16	5.31E-19
-3.45E+00	3.99E-16	5.31E-19
-3.15E+00	4.00E-16	5.30E-19
-2.85E+00	4.03E-16	5.33E-19
-2.55E+00	4.00E-16	5.30E-19
-2.25E+00	4.01E-16	5.32E-19
-1.95E+00	4.06E-16	5.37E-19
-1.65E+00	4.07E-16	5.38E-19
-1.35E+00	4.01E-16	5.27E-19
-1.05E+00	4.13E-16	5.41E-19
-7.49E-01	4.10E-16	5.36E-19
-4.49E-01	4.15E-16	5.41E-19
-1.49E-01	4.24E-16	5.52E-19
1.50E-01	4.15E-16	5.40E-19
4.50E-01	4.18E-16	5.44E-19
7.50E-01	4.19E-16	5.45E-19
1.05E+00	4.24E-16	5.51E-19
1.35E+00	4.21E-16	5.48E-19
1.65E+00	4.19E-16	5.44E-19
1.95E+00	4.22E-16	5.48E-19
2.25E+00	4.16E-16	5.41E-19

2.55E+00	4.13E-16	5.41E-19
2.85E+00	4.10E-16	5.38E-19
3.15E+00	4.10E-16	5.39E-19
3.45E+00	4.13E-16	5.40E-19
3.75E+00	4.18E-16	5.44E-19
4.05E+00	4.18E-16	5.43E-19
4.35E+00	4.18E-16	5.46E-19
4.65E+00	4.13E-16	5.39E-19
4.95E+00	4.17E-16	5.44E-19
5.25E+00	4.14E-16	5.41E-19
5.55E+00	4.08E-16	5.36E-19
5.85E+00	4.02E-16	5.30E-19
6.15E+00	3.98E-16	5.29E-19
6.45E+00	3.90E-16	5.25E-19
6.75E+00	3.82E-16	5.27E-19
7.05E+00	3.17E-16	4.70E-19
7.35E+00	2.16E-16	3.56E-19
7.65E+00	1.57E-16	2.96E-19
7.95E+00	1.04E-16	2.27E-19
8.25E+00	6.45E-17	1.66E-19
8.55E+00	3.77E-17	1.18E-19
8.85E+00	2.19E-17	8.68E-20
9.02E+00	1.55E-17	9.20E-20
9.07E+00	1.41E-17	8.63E-20
9.12E+00	1.28E-17	8.22E-20
9.17E+00	1.19E-17	7.99E-20
9.22E+00	1.09E-17	7.50E-20
9.27E+00	9.96E-18	7.23E-20
9.32E+00	9.18E-18	7.05E-20
9.37E+00	8.45E-18	6.69E-20
9.42E+00	7.90E-18	6.63E-20
9.47E+00	7.14E-18	6.26E-20
9.52E+00	6.69E-18	6.20E-20
9.57E+00	6.27E-18	6.22E-20
9.62E+00	5.59E-18	5.68E-20
9.67E+00	5.02E-18	5.63E-20
9.72E+00	4.91E-18	5.61E-20
9.77E+00	4.69E-18	5.45E-20
9.82E+00	4.11E-18	4.87E-20
9.87E+00	3.78E-18	4.59E-20
9.92E+00	3.62E-18	4.46E-20
9.97E+00	3.43E-18	4.51E-20
1.05E+01	2.40E-18	2.06E-20

```

title "profile dose E=11.5 MeV 14 x 14 cm2"
yaxis label "DOSE (Gy/particle)"
-1.05E+01    1.21E-17    7.05E-20
-9.97E+00    1.96E-17    1.45E-19
-9.92E+00    2.05E-17    1.45E-19
-9.87E+00    2.17E-17    1.49E-19
-9.82E+00    2.32E-17    1.54E-19
-9.77E+00    2.44E-17    1.57E-19
-9.72E+00    2.61E-17    1.62E-19
-9.67E+00    2.79E-17    1.71E-19
-9.62E+00    2.92E-17    1.71E-19
-9.57E+00    3.13E-17    1.78E-19
-9.52E+00    3.39E-17    1.88E-19
-9.47E+00    3.60E-17    1.91E-19
-9.42E+00    3.84E-17    1.99E-19
-9.37E+00    4.15E-17    2.09E-19
-9.32E+00    4.38E-17    2.11E-19
-9.27E+00    4.63E-17    2.12E-19
-9.22E+00    4.98E-17    2.22E-19
-9.17E+00    5.40E-17    2.34E-19
-9.12E+00    5.72E-17    2.38E-19
-9.07E+00    6.16E-17    2.51E-19
-9.02E+00    6.57E-17    2.60E-19
-8.85E+00    8.38E-17    2.39E-19
-8.55E+00    1.27E-16    3.05E-19
-8.25E+00    1.94E-16    4.01E-19
-7.95E+00    2.98E-16    5.51E-19
-7.65E+00    4.34E-16    7.19E-19
-7.35E+00    5.82E-16    8.76E-19
-7.05E+00    7.73E-16    1.08E-18
-6.75E+00    8.75E-16    1.15E-18
-6.45E+00    9.09E-16    1.17E-18
-6.15E+00    9.31E-16    1.18E-18
-5.85E+00    9.49E-16    1.19E-18
-5.55E+00    9.58E-16    1.19E-18
-5.25E+00    9.60E-16    1.19E-18
-4.95E+00    9.78E-16    1.20E-18
-4.65E+00    9.92E-16    1.22E-18
-4.35E+00    9.92E-16    1.21E-18
-4.05E+00    9.86E-16    1.21E-18
-3.75E+00    9.93E-16    1.22E-18
-3.45E+00    9.90E-16    1.21E-18
-3.15E+00    9.94E-16    1.22E-18
-2.85E+00    1.00E-15    1.22E-18
-2.55E+00    9.99E-16    1.22E-18
-2.25E+00    9.87E-16    1.21E-18
-1.95E+00    9.90E-16    1.21E-18
-1.65E+00    1.00E-15    1.22E-18
-1.35E+00    1.00E-15    1.23E-18
-1.05E+00    1.00E-15    1.23E-18
-7.49E-01    9.97E-16    1.22E-18
-4.49E-01    9.88E-16    1.21E-18
-1.49E-01    9.98E-16    1.22E-18
1.50E-01    9.90E-16    1.22E-18
4.50E-01    9.88E-16    1.21E-18
7.50E-01    9.97E-16    1.22E-18
1.05E+00    9.89E-16    1.21E-18
1.35E+00    9.78E-16    1.20E-18
1.65E+00    9.83E-16    1.21E-18

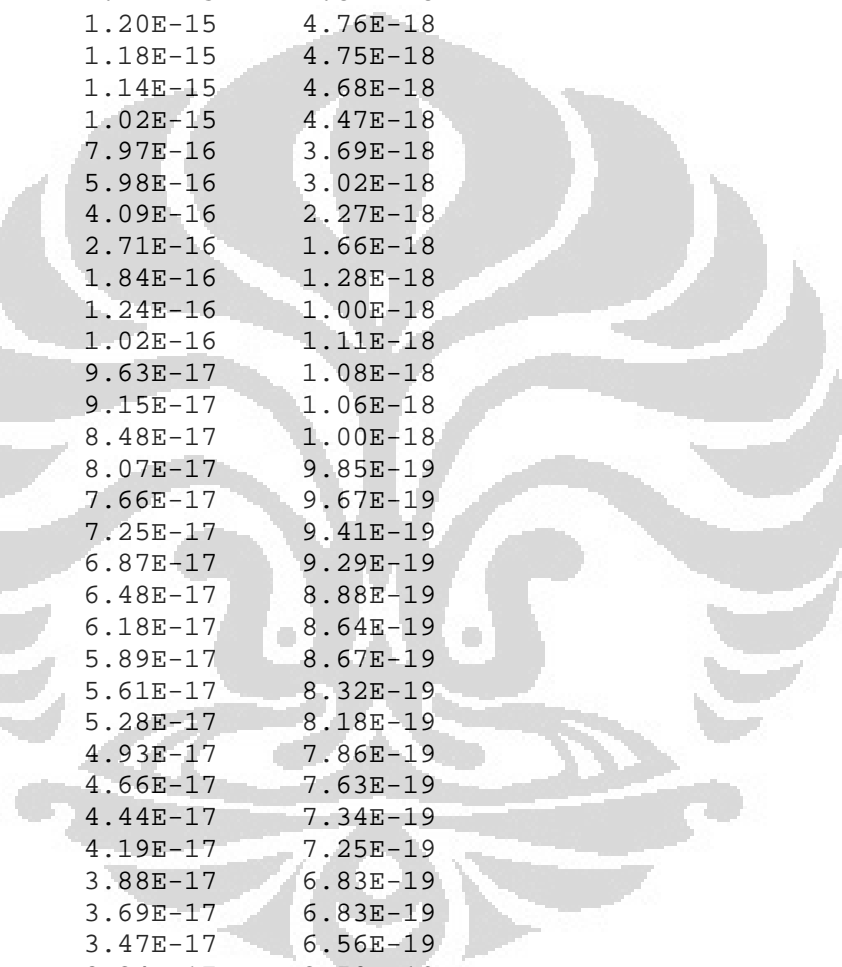
```

1.95E+00	9.86E-16	1.21E-18
2.25E+00	9.90E-16	1.22E-18
2.55E+00	9.94E-16	1.22E-18
2.85E+00	9.87E-16	1.21E-18
3.15E+00	9.79E-16	1.20E-18
3.45E+00	9.77E-16	1.20E-18
3.75E+00	9.85E-16	1.21E-18
4.05E+00	9.89E-16	1.21E-18
4.35E+00	9.89E-16	1.21E-18
4.65E+00	9.82E-16	1.21E-18
4.95E+00	9.68E-16	1.19E-18
5.25E+00	9.68E-16	1.20E-18
5.55E+00	9.59E-16	1.19E-18
5.85E+00	9.54E-16	1.19E-18
6.15E+00	9.42E-16	1.18E-18
6.45E+00	9.21E-16	1.17E-18
6.75E+00	8.96E-16	1.17E-18
7.05E+00	7.91E-16	1.10E-18
7.35E+00	5.88E-16	8.79E-19
7.65E+00	4.37E-16	7.21E-19
7.95E+00	2.98E-16	5.48E-19
8.25E+00	1.94E-16	4.04E-19
8.55E+00	1.26E-16	3.01E-19
8.85E+00	8.30E-17	2.35E-19
9.02E+00	6.49E-17	2.54E-19
9.07E+00	6.10E-17	2.47E-19
9.12E+00	5.75E-17	2.45E-19
9.17E+00	5.40E-17	2.37E-19
9.22E+00	5.06E-17	2.33E-19
9.27E+00	4.74E-17	2.22E-19
9.32E+00	4.42E-17	2.11E-19
9.37E+00	4.13E-17	2.04E-19
9.42E+00	3.80E-17	1.92E-19
9.47E+00	3.60E-17	1.90E-19
9.52E+00	3.40E-17	1.86E-19
9.57E+00	3.14E-17	1.77E-19
9.62E+00	2.93E-17	1.71E-19
9.67E+00	2.75E-17	1.63E-19
9.72E+00	2.61E-17	1.61E-19
9.77E+00	2.44E-17	1.57E-19
9.82E+00	2.28E-17	1.49E-19
9.87E+00	2.14E-17	1.45E-19
9.92E+00	2.05E-17	1.44E-19
9.97E+00	1.95E-17	1.42E-19
1.05E+01	1.27E-17	6.98E-20

```

title "profile dose E=11.5 MeV 14 x 14 cm2"
yaxis label "DOSE (Gy/particle)"
-1.05E+01      2.26E-17      3.40E-19
-9.97E+00      3.53E-17      6.66E-19
-9.92E+00      3.65E-17      6.66E-19
-9.87E+00      3.87E-17      6.93E-19
-9.82E+00      4.13E-17      7.11E-19
-9.77E+00      4.39E-17      7.59E-19
-9.72E+00      4.61E-17      7.73E-19
-9.67E+00      4.83E-17      7.65E-19
-9.62E+00      5.04E-17      7.71E-19
-9.57E+00      5.26E-17      7.80E-19
-9.52E+00      5.60E-17      8.33E-19
-9.47E+00      5.94E-17      8.58E-19
-9.42E+00      6.27E-17      8.67E-19
-9.37E+00      6.79E-17      9.21E-19
-9.32E+00      7.23E-17      9.38E-19
-9.27E+00      7.61E-17      9.59E-19
-9.22E+00      7.96E-17      9.71E-19
-9.17E+00      8.49E-17      1.01E-18
-9.12E+00      8.96E-17      1.04E-18
-9.07E+00      9.42E-17      1.05E-18
-9.02E+00      1.00E-16      1.10E-18
-8.85E+00      1.25E-16      1.01E-18
-8.55E+00      1.85E-16      1.29E-18
-8.25E+00      2.72E-16      1.68E-18
-7.95E+00      4.07E-16      2.26E-18
-7.65E+00      5.92E-16      3.00E-18
-7.35E+00      7.80E-16      3.63E-18
-7.05E+00      1.01E-15      4.42E-18
-6.75E+00      1.13E-15      4.67E-18
-6.45E+00      1.16E-15      4.73E-18
-6.15E+00      1.19E-15      4.75E-18
-5.85E+00      1.21E-15      4.80E-18
-5.55E+00      1.22E-15      4.82E-18
-5.25E+00      1.24E-15      4.83E-18
-4.95E+00      1.25E-15      4.87E-18
-4.65E+00      1.25E-15      4.88E-18
-4.35E+00      1.26E-15      4.87E-18
-4.05E+00      1.27E-15      4.90E-18
-3.75E+00      1.26E-15      4.89E-18
-3.45E+00      1.26E-15      4.90E-18
-3.15E+00      1.27E-15      4.89E-18
-2.85E+00      1.28E-15      4.93E-18
-2.55E+00      1.28E-15      4.94E-18
-2.25E+00      1.27E-15      4.90E-18
-1.95E+00      1.27E-15      4.90E-18
-1.65E+00      1.28E-15      4.95E-18
-1.35E+00      1.27E-15      4.90E-18
-1.05E+00      1.28E-15      4.93E-18
-7.49E-01      1.28E-15      4.94E-18
-4.49E-01      1.26E-15      4.88E-18
-1.49E-01      1.28E-15      4.94E-18
1.50E-01      1.27E-15      4.93E-18
4.50E-01      1.28E-15      4.95E-18
7.50E-01      1.28E-15      4.93E-18
1.05E+00      1.28E-15      4.93E-18
1.35E+00      1.27E-15      4.92E-18
1.65E+00      1.27E-15      4.916E-18

```



1.95E+00	1.27E-15	4.92E-18
2.25E+00	1.27E-15	4.94E-18
2.55E+00	1.27E-15	4.90E-18
2.85E+00	1.28E-15	4.94E-18
3.15E+00	1.29E-15	4.96E-18
3.45E+00	1.27E-15	4.91E-18
3.75E+00	1.27E-15	4.89E-18
4.05E+00	1.26E-15	4.89E-18
4.35E+00	1.25E-15	4.84E-18
4.65E+00	1.26E-15	4.88E-18
4.95E+00	1.25E-15	4.86E-18
5.25E+00	1.24E-15	4.83E-18
5.55E+00	1.24E-15	4.84E-18
5.85E+00	1.22E-15	4.81E-18
6.15E+00	1.20E-15	4.76E-18
6.45E+00	1.18E-15	4.75E-18
6.75E+00	1.14E-15	4.68E-18
7.05E+00	1.02E-15	4.47E-18
7.35E+00	7.97E-16	3.69E-18
7.65E+00	5.98E-16	3.02E-18
7.95E+00	4.09E-16	2.27E-18
8.25E+00	2.71E-16	1.66E-18
8.55E+00	1.84E-16	1.28E-18
8.85E+00	1.24E-16	1.00E-18
9.02E+00	1.02E-16	1.11E-18
9.07E+00	9.63E-17	1.08E-18
9.12E+00	9.15E-17	1.06E-18
9.17E+00	8.48E-17	1.00E-18
9.22E+00	8.07E-17	9.85E-19
9.27E+00	7.66E-17	9.67E-19
9.32E+00	7.25E-17	9.41E-19
9.37E+00	6.87E-17	9.29E-19
9.42E+00	6.48E-17	8.88E-19
9.47E+00	6.18E-17	8.64E-19
9.52E+00	5.89E-17	8.67E-19
9.57E+00	5.61E-17	8.32E-19
9.62E+00	5.28E-17	8.18E-19
9.67E+00	4.93E-17	7.86E-19
9.72E+00	4.66E-17	7.63E-19
9.77E+00	4.44E-17	7.34E-19
9.82E+00	4.19E-17	7.25E-19
9.87E+00	3.88E-17	6.83E-19
9.92E+00	3.69E-17	6.83E-19
9.97E+00	3.47E-17	6.56E-19
1.05E+01	2.34E-17	3.50E-19

Tabel A.1 Percentage Depth Dose (PDD) dan Deviasi antara Pengukuran dan Simulasi Monte Carlo pada Medium Air untuk Energi 6 MeV

Depth (cm)	Pengukuran (6 MeV)		Simulasi (7.9 MeV)		Δ (%)
	D (Gray)	D (%)	D (Gray/Particle)	D (%)	
0,1	1,26E-01	82,89	2,99E-14	80,34	-0,03
0,3	1,31E-01	86,22	3,14E-14	84,31	-0,02
0,5	1,38E-01	90,83	3,36E-14	90,29	-0,01
0,7	1,43E-01	94,16	3,48E-14	93,59	-0,01
0,9	1,47E-01	96,73	3,59E-14	96,37	0,00
1,1	1,50E-01	99,04	3,67E-14	98,63	0,00
1,3	1,52E-01	100,00	3,72E-14	100,00	0,00
1,5	1,49E-01	98,01	3,68E-14	98,92	0,01
1,7	1,42E-01	93,63	3,54E-14	95,23	0,02
1,9	1,32E-01	87,06	3,27E-14	87,88	0,01
2,1	1,14E-01	75,19	2,90E-14	77,88	0,04
2,3	9,08E-02	59,87	2,41E-14	64,68	0,08
2,5	7,64E-02	50,38	1,85E-14	49,82	-0,01
2,7	4,40E-02	29,00	1,28E-14	34,33	0,18
2,9	2,91E-02	19,22	7,58E-15	20,36	0,06
3,1	1,80E-02	11,86	3,65E-15	9,82	-0,17
3,3	6,15E-03	4,05	1,42E-15	3,82	-0,06
3,5	3,58E-03	2,36	5,84E-16	1,57	-0,33
3,7	1,78E-03	1,18	3,98E-16	1,07	-0,09
3,9	1,28E-03	0,85	3,68E-16	0,99	0,17
5,5	1,13E-03	0,75	3,65E-16	0,98	0,31

Tabel A.2 Percentage Depth Dose (PDD) dan Deviasi antara Pengukuran dan Simulasi Monte Carlo pada Medium Air untuk Energi 10 MeV

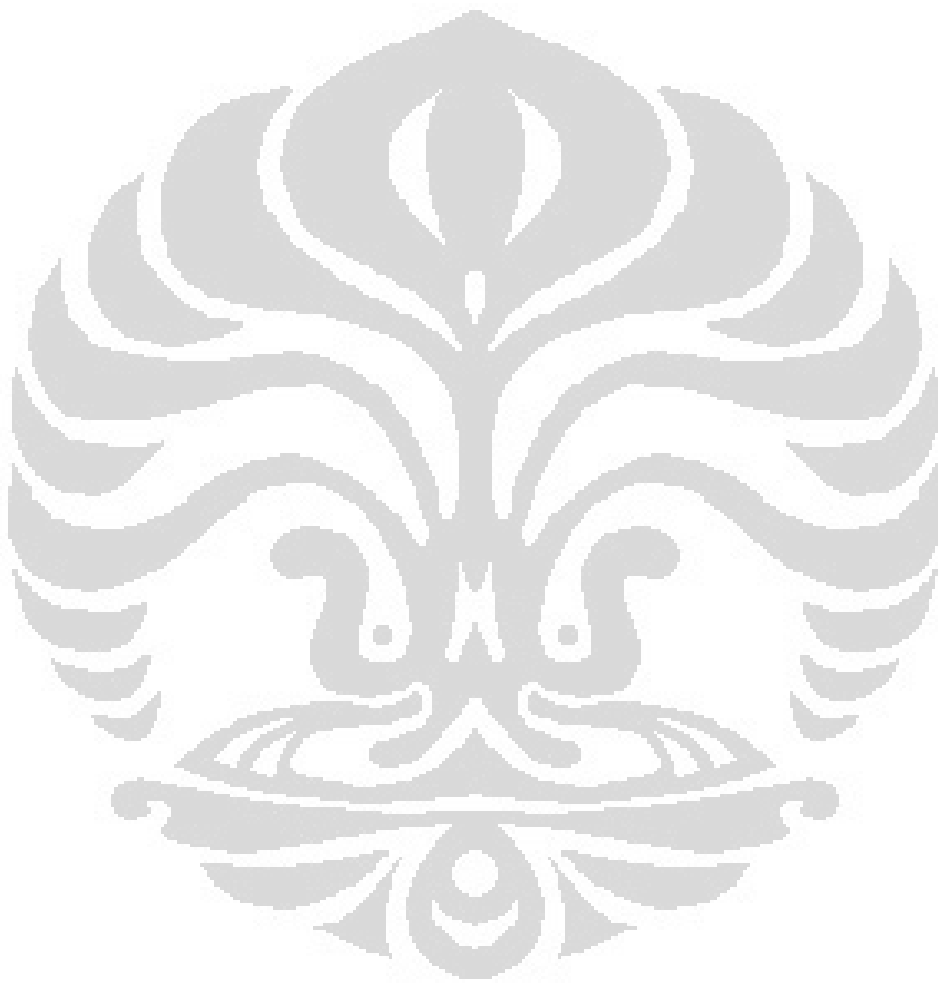
Depth (cm)	Pengukuran (10 MeV)		Simulasi (11.5 MeV)		Δ (%)
	D (Gray)	D (%)	D (Gray/Particle)	D (%)	
0	5,83E-01	83,04	7,68E-14	87,18	0,05
0,3	5,97E-01	85,10	8,05E-14	91,44	0,07
0,6	6,23E-01	88,76	8,24E-14	93,60	0,05
0,9	6,43E-01	91,70	8,39E-14	95,26	0,04
1,2	6,63E-01	94,47	8,50E-14	96,56	0,02
1,5	6,80E-01	96,84	8,70E-14	98,83	0,02
1,8	6,93E-01	98,82	8,77E-14	99,56	0,01
2,1	7,02E-01	100,00	8,80E-14	100,00	0,00
2,4	6,97E-01	99,26	8,74E-14	99,27	0,00
2,7	6,73E-01	95,90	8,56E-14	97,24	0,01
3	6,23E-01	88,76	7,71E-14	87,61	-0,01
3,3	5,49E-01	78,31	6,99E-14	79,40	0,01
3,5	4,84E-01	68,99	6,08E-14	69,01	0,00
4	3,03E-01	43,16	3,85E-14	43,74	0,01
4,5	1,36E-01	19,39	1,66E-14	18,81	-0,03
5	4,10E-02	5,85	3,67E-15	4,16	-0,40
5,5	1,26E-02	1,80	7,70E-16	0,87	-1,06
6,5	8,82E-03	1,26	6,09E-16	0,69	-0,82
7,5	8,50E-03	1,21	5,92E-16	0,67	-0,80

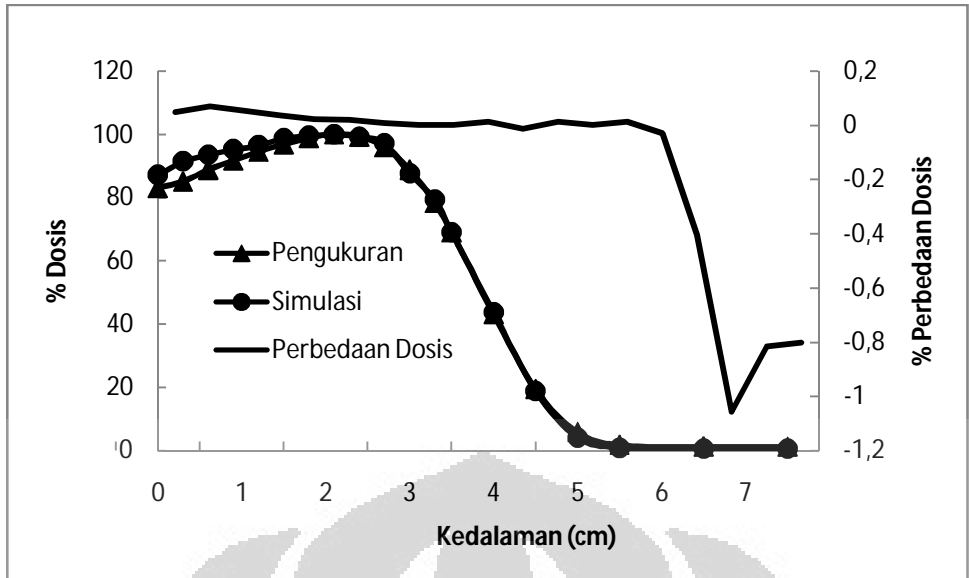
Tabel A.3 Percentage Depth Dose (PDD) dan Deviasi antara Pengukuran dan Simulasi Monte Carlo pada Medium Air untuk Energi 12 MeV

Depth (cm)	Pengukuran (12 MeV)		Simulasi (13.4 MeV)		Δ (%)
	D (Gray)	D (%)	D (Gray/Particle)	D (%)	
0	5,81E-01	85,51	1,11E-13	90,10	0,05
0,3	5,93E-01	87,23	1,17E-13	94,16	0,08
0,6	6,15E-01	90,40	1,19E-13	95,98	0,06
0,9	6,30E-01	92,68	1,20E-13	97,09	0,05
1,2	6,43E-01	94,61	1,21E-13	97,96	0,04
1,5	6,54E-01	96,15	1,22E-13	98,64	0,03
1,8	6,63E-01	97,52	1,23E-13	99,56	0,02
2,1	6,73E-01	98,94	1,24E-13	99,94	0,01
2,4	6,78E-01	99,75	1,24E-13	100,00	0,00
2,7	6,80E-01	100,00	1,23E-13	99,57	0,00
3	6,72E-01	98,88	1,20E-13	96,94	-0,02
3,3	6,54E-01	96,14	1,16E-13	93,72	-0,03
3,6	6,19E-01	91,01	1,11E-13	89,56	-0,02
3,9	5,70E-01	83,79	1,04E-13	84,16	0,00
4,2	4,99E-01	73,34	9,52E-14	76,91	0,05
4,5	4,15E-01	61,05	7,13E-14	57,67	-0,06
4,8	3,20E-01	47,02	5,76E-14	46,55	-0,01
5,1	2,27E-01	33,32	4,35E-14	35,15	0,05
5,4	1,42E-01	20,90	3,00E-14	24,24	0,16
5,7	7,73E-02	11,37	1,88E-14	15,16	0,33
6	3,86E-02	5,67	1,01E-14	8,18	0,44
6,3	1,98E-02	2,91	2,18E-15	1,76	-0,40
6,6	1,43E-02	2,11	1,23E-15	1,00	-0,53
7,1	1,29E-02	1,90	1,00E-15	0,81	-0,57
7,6	1,26E-02	1,85	9,49E-16	0,77	-0,59
8,6	1,22E-02	1,79	8,95E-16	0,72	-0,60
9,6	1,18E-02	1,73	8,47E-16	0,68	-0,60

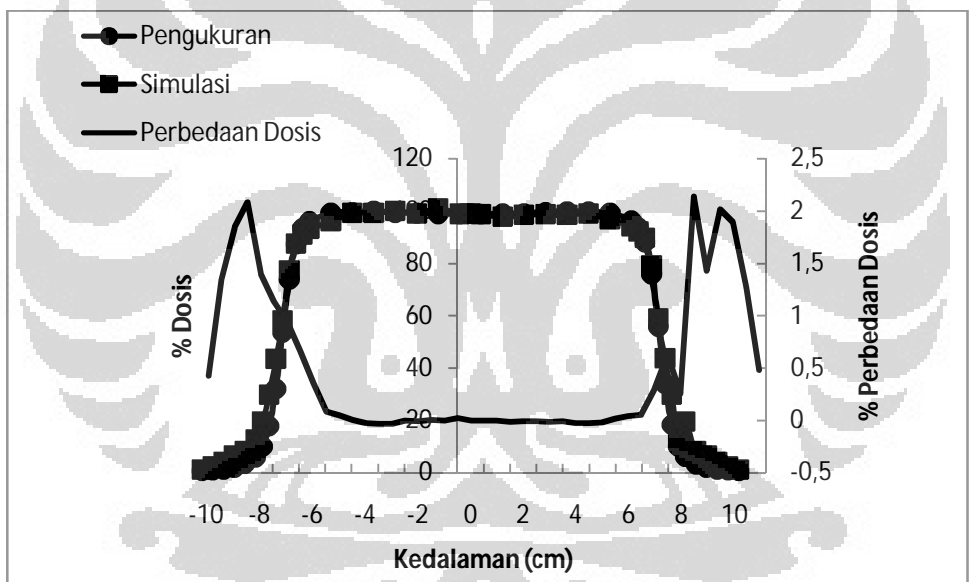
LAMPIRAN B

Kurva Deviasi PDD dan Profil Dosis Simulasi Monte Carlo dan Pengukuran di Water Phantom

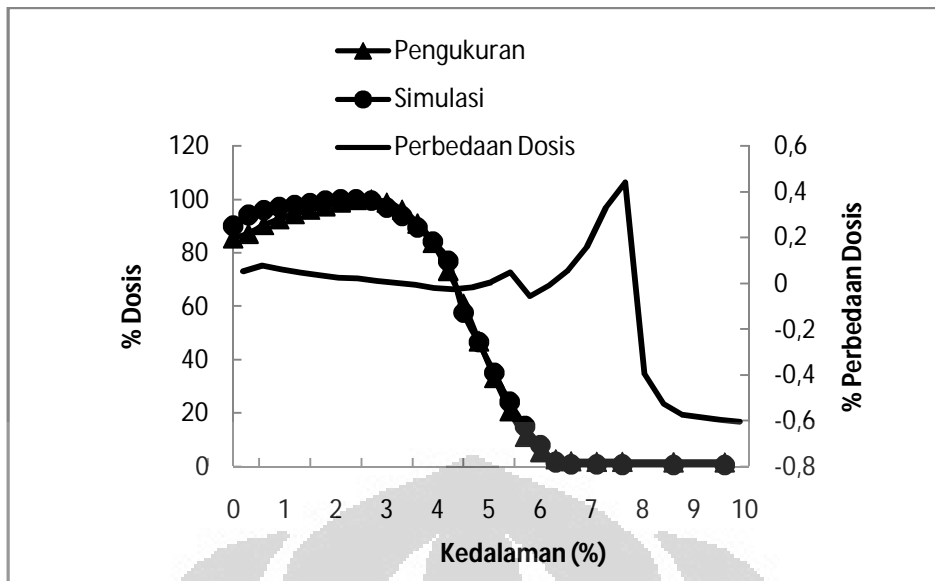




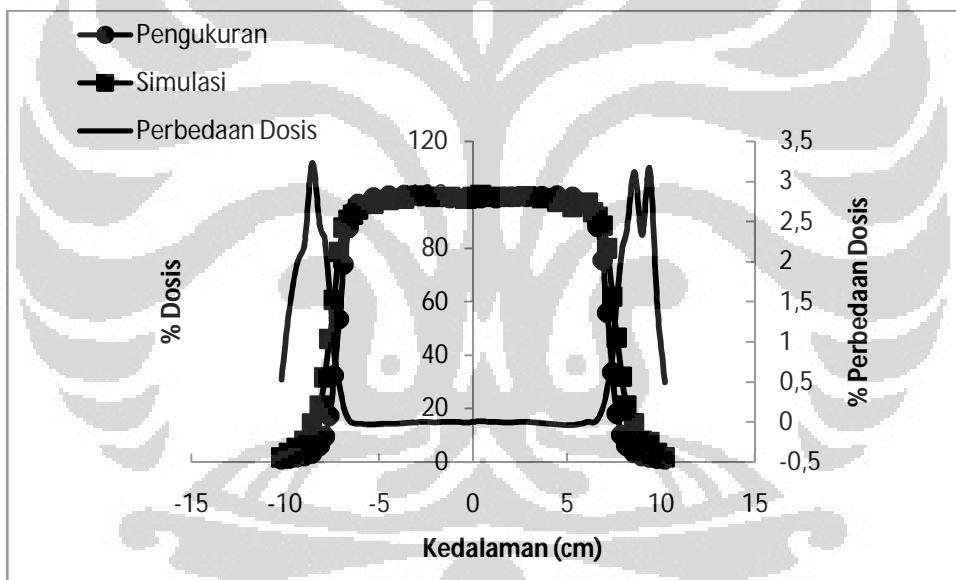
Gambar B.1 Verifikasi PDD pengukuran dan simulasi untuk energi 10 MeV dengan luas lapangan 14 x 14 cm²



Gambar B.2 Perbedaan dose pengukuran dan simulasi untuk energi 10 MeV dengan luas lapangan 14 x 14 cm²



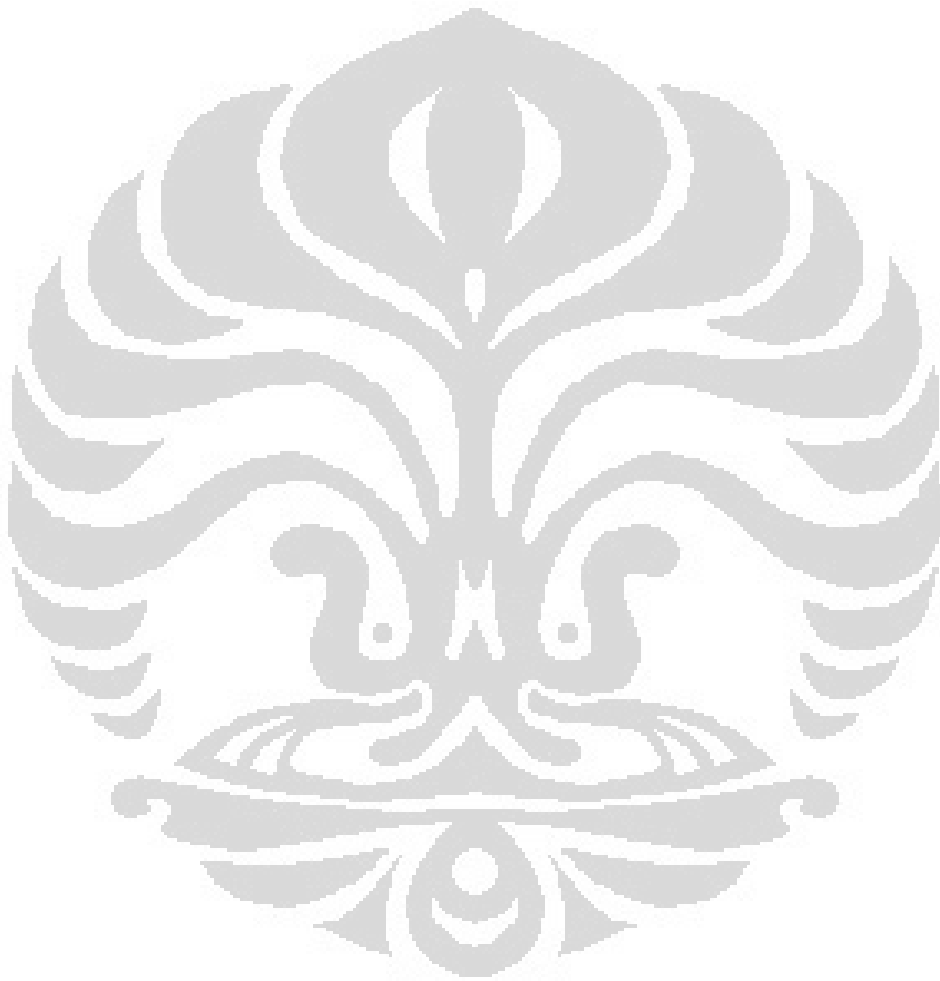
Gambar B.3 Perbedaan Dosis PDD Pengukuran dan Simulasi untuk Energi 12 MeV dengan Luas Lapangan 14 x 14 cm²

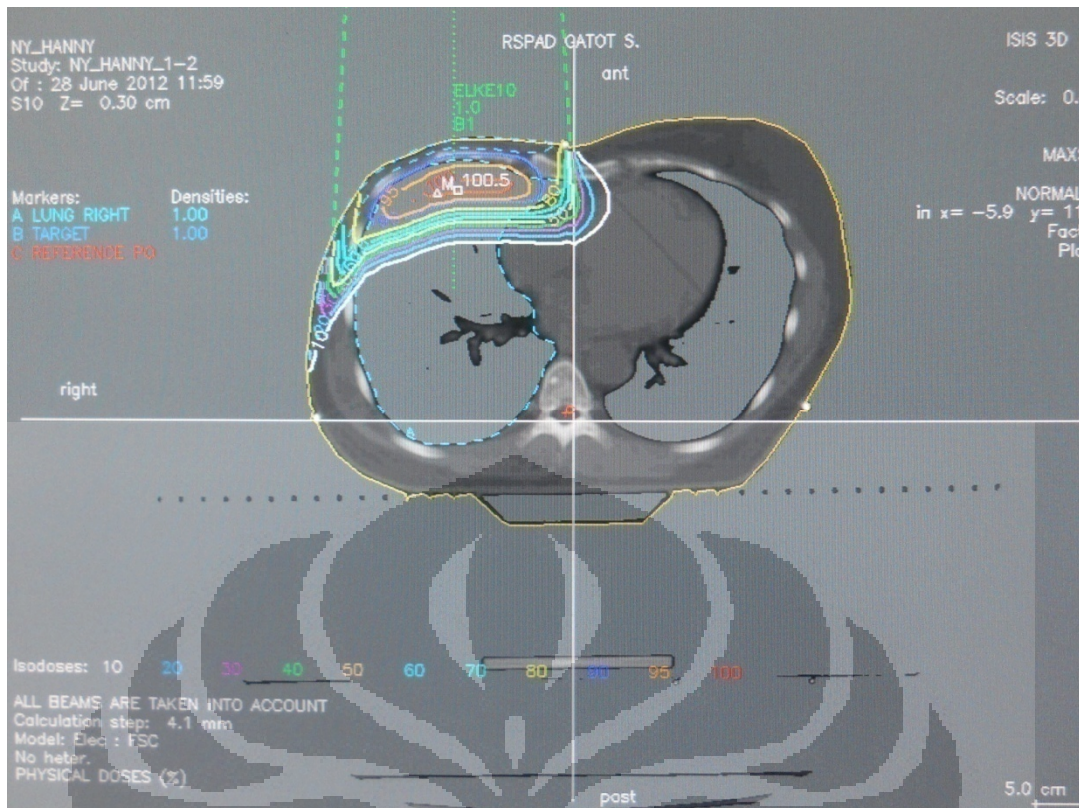


Gambar B.4 Verifikasi Profile Dose Pengukuran dan Simulasi untuk Energi 12 MeV dengan Luas Lapangan 14 x 14 cm²

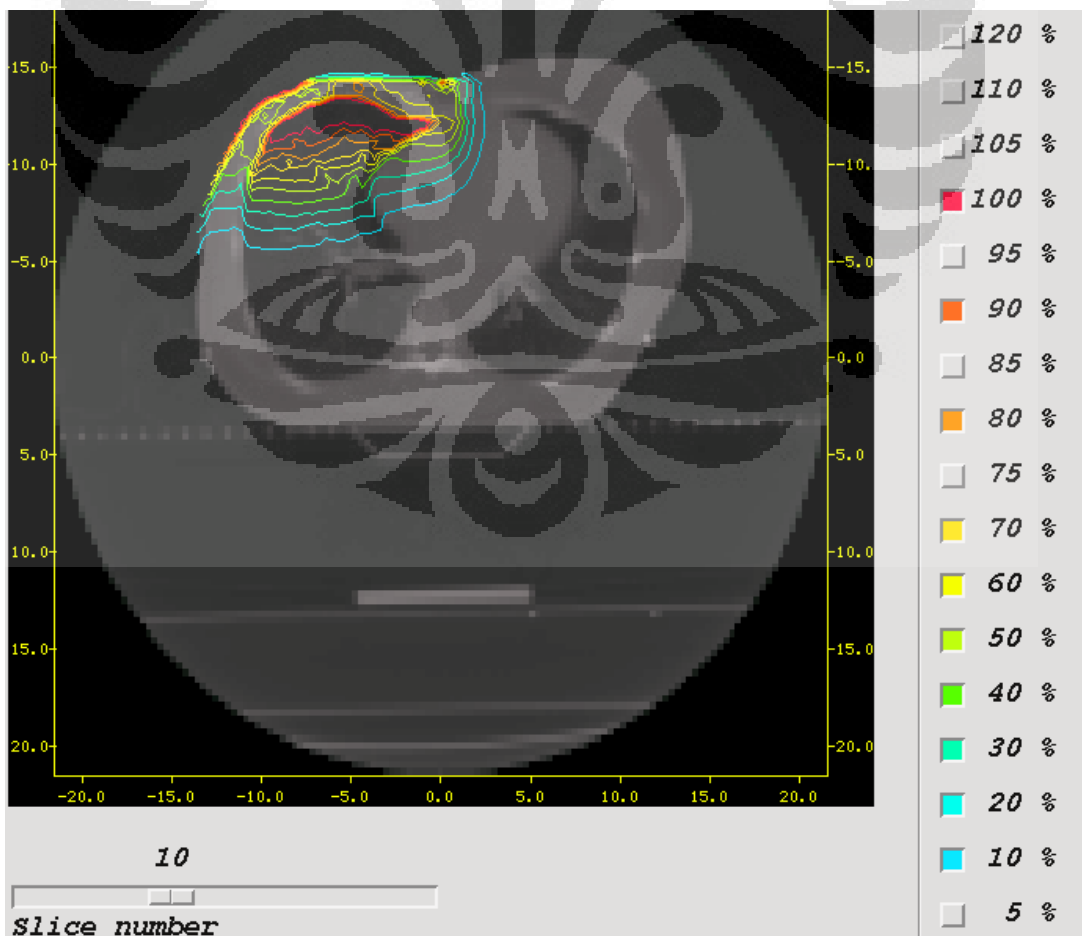
LAMPIRAN C

Perbandingan Distribusi Dosis Paru pada TPS dan Monte Carlo

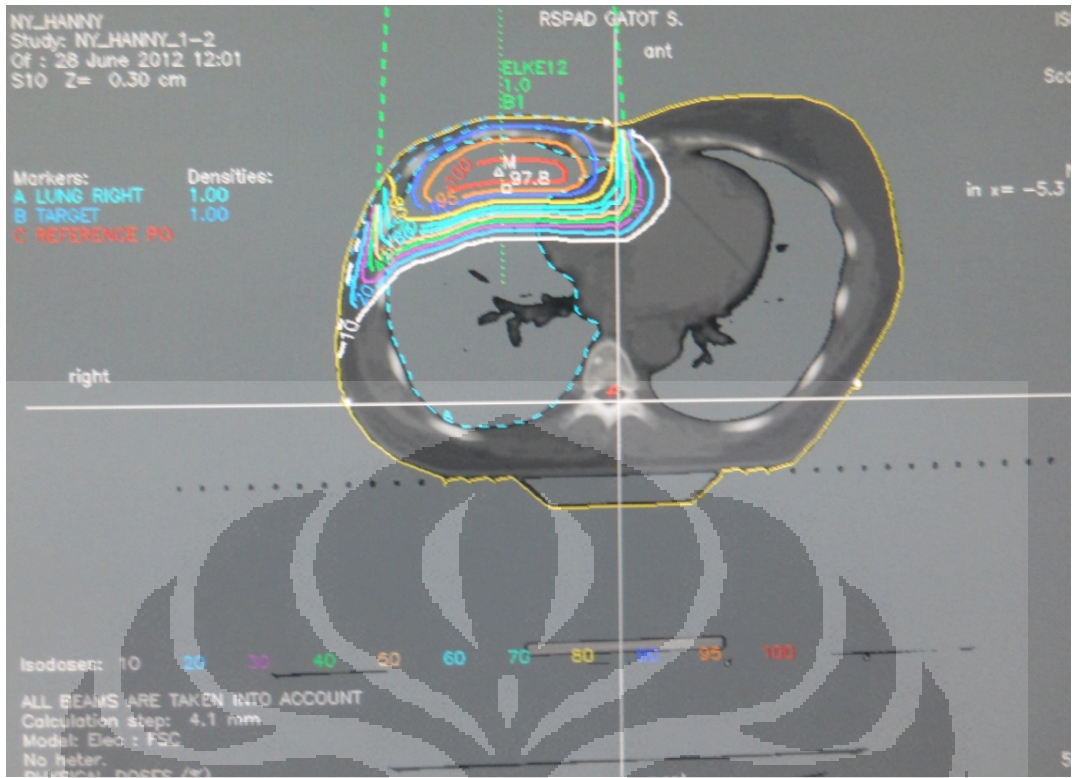




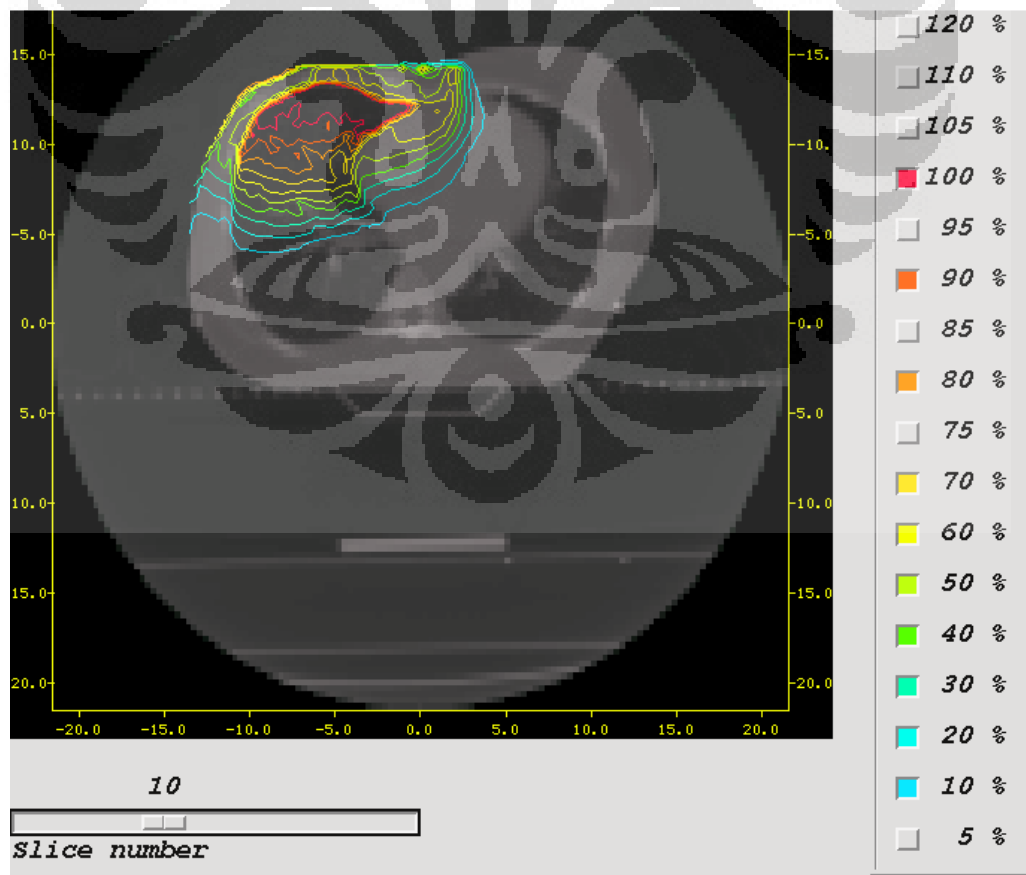
Gambar C.1 Hasil TPS distribusi dosis elektron untuk energi 10 MeV



Gambar C.2 Hasil simulasi distribusi dosis berkas elektron untuk energi 10 MeV



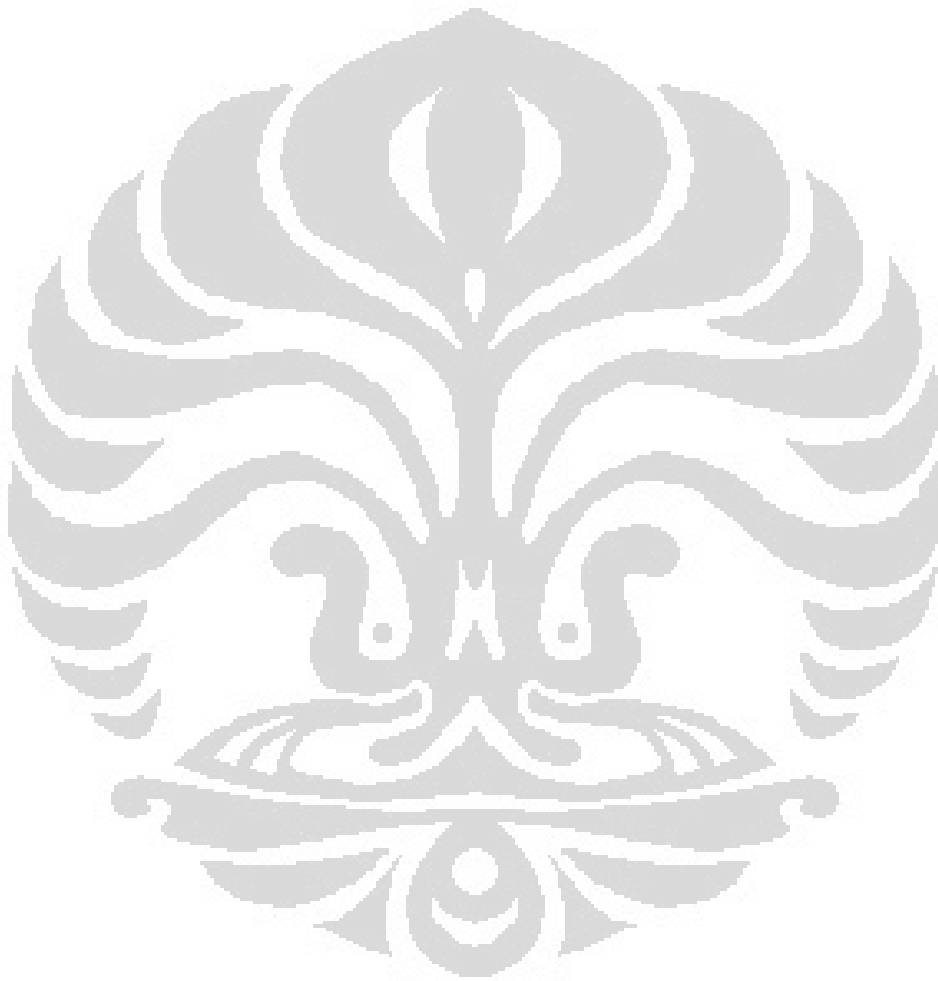
Gambar C.3 Hasil TPS distribusi dosis berkas elektron di paru kanan untuk energi 12 MeV



Gambar C.4 Hasil simulasi distribusi dosis berkas elektron di paru kanan untuk energi 12 MeV

LAMPIRAN D

Deviasi kedalaman distribusi dosis berkas elektron di paru kiri antara TPS dan Monte Carlo untuk energi 6 MeV, 10 MeV dan 12 MeV



Tabel D.1 Deviasi kedalaman distribusi dosis berkas elektron di paru kanan antara TPS dan monte carlo untuk energi 6 MeV, 10 MeV dan 12 MeV

PDD (%)	E = 6 MeV					E = 10 MeV					E = 12 MeV				
	Kedalaman (cm)			Deviasi (%)		Kedalaman (cm)			Deviasi (%)		Kedalaman (cm)			Deviasi (%)	
	TPS	Air	MC	$\Delta 1$	$\Delta 2$	TPS	Air	MC	$\Delta 1$	$\Delta 2$	TPS	Air	MC	$\Delta 1$	$\Delta 2$
90	0,65	0,5	0,08	0,23	0,88	0,51	0,7	1,3	-0,37	-1,55	0,42	0,6	1,3	-0,43	-2,10
100	1,33	1,31	1,28	0,02	0,04	2,1	2,1	2,13	0,00	-0,01	2,69	2,7	2,71	0,00	-0,01
90	1,72	1,75	1,82	-0,02	-0,06	2,87	2,9	3,12	-0,01	-0,09	3,59	3,5	3,82	0,03	-0,06
80	1,82	1,86	2,04	-0,02	-0,12	3,3	3,27	3,41	0,01	-0,03	3,99	4,03	4,28	-0,01	-0,07
70	2,15	2,18	2,46	-0,01	-0,14	3,41	3,45	3,66	-0,01	-0,07	4,19	4,25	4,61	-0,01	-0,10
60	2,28	2,3	2,69	-0,01	-0,18	3,55	3,6	3,85	-0,01	-0,08	4,39	4,5	5,06	-0,03	-0,15
50	2,49	2,5	2,98	0,00	-0,20	3,76	3,8	4,11	-0,01	-0,09	4,59	4,6	5,22	0,00	-0,14
40	2,55	2,58	3,12	-0,01	-0,22	4,05	3,95	4,32	0,02	-0,07	4,89	4,9	5,5	0,00	-0,12
30	2,67	2,69	3,4	-0,01	-0,27	4,12	4,24	4,56	-0,03	-0,11	5,19	5,2	6,01	0,00	-0,16
20	2,83	2,89	3,81	-0,02	-0,35	4,43	4,5	5,11	-0,02	-0,15	5,39	5,4	6,48	0,00	-0,20
10	2,98	3,07	4,22	-0,03	-0,42	4,69	4,8	5,72	-0,02	-0,22	5,79	5,7	6,95	0,02	-0,20

Ket:

MC = Monte Carlo

$\Delta 1$ = Deviasi kedalaman antara TPS dan medium air

$\Delta 2$ = Deviasi kedalaman antara TPS dan monte carlo