



UNIVERSITAS INDONESIA

**DISTRIBUSI DOSIS DAN FUNGSI DOSIS RADIAL SUMBER
BRAKITERAPI LDR Ir-192 DENGAN DOSIMETER FILM
GAFCHROMIC EBT-2**

SKRIPSI

**MARGO SETIAWAN
030502056X**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
DEPARTEMEN FISIKA
PROGRAM STUDI FISIKA MEDIS DAN BIOFISIKA
DEPOK
JUNI 2010**



UNIVERSITAS INDONESIA

**DISTRIBUSI DOSIS DAN FUNGSI DOSIS RADIAL SUMBER
BRAKITERAPI LDR Ir-192 DENGAN DOSIMETER FILM
GAFCHROMIC EBT-2**

SKRIPSI

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh
gelar Sarjana Sains**

MARGO SETIAWAN

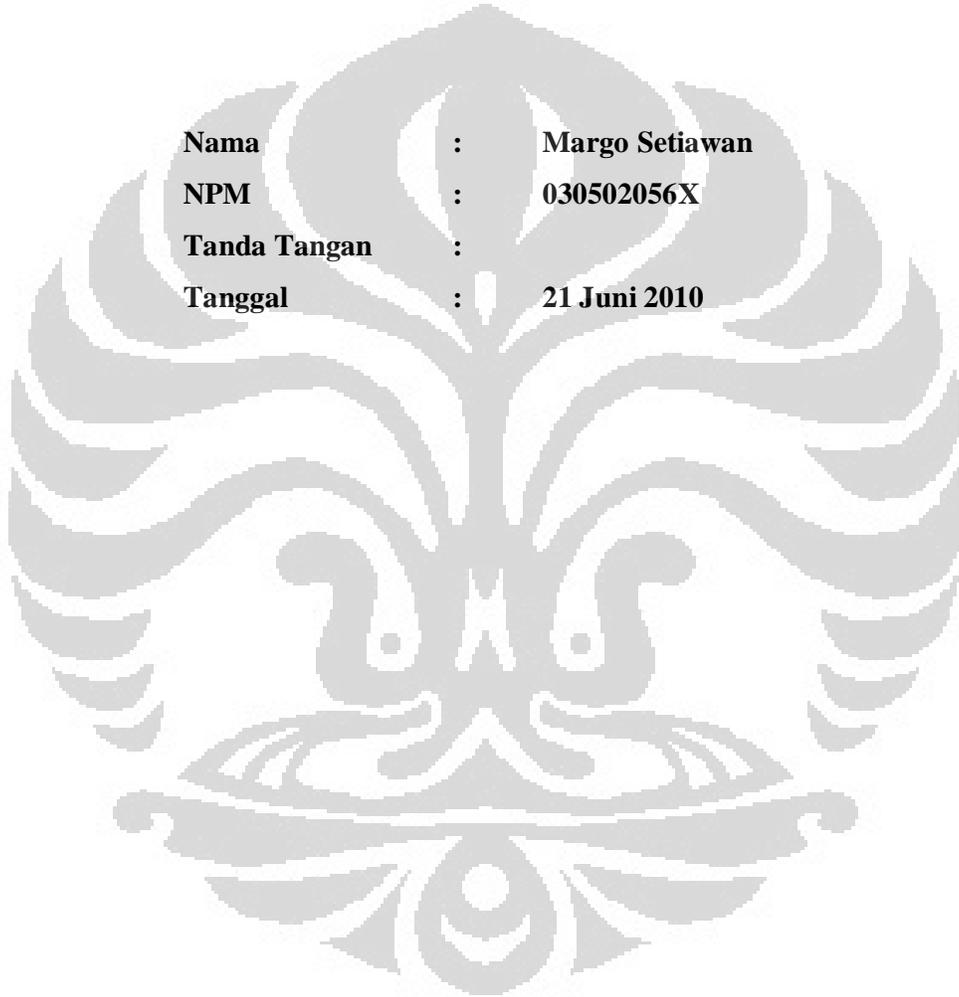
030502056X

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
DEPARTEMEN FISIKA
PROGRAM STUDI FISIKA MEDIS DAN BIOFISIKA
DEPOK
JUNI 2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Margo Setiawan
NPM : 030502056X
Tanda Tangan :
Tanggal : 21 Juni 2010



HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Margo Setiawan
NPM : 030502056X
Program Studi : Fisika
Judul Skripsi : **DISTRIBUSI DOSIS DAN FUNGSI DOSIS
RADIAL SUMBER BRAKITERAPI LDR
Ir-192 DENGAN DOSIMETER FILM
GAFCHROMIC EBT-2**

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dwi Seno Kuncoro, Msi ()
Pembimbing : Heru Prasetyo, Msi ()
Penguji : Prof. Dr. Djarwani S Soejoko ()
Penguji : Kristina Tri Wigati, Msi ()

Ditetapkan di : Depok
Tanggal : 21 Juni 2010

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, petunjuk, dan ilmu kepada penulis, sehingga akhirnya penulis bisa menyelesaikan laporan tugas akhir yang berjudul: **“DISTRIBUSI DOSIS DAN FUNGSI DOSIS RADIAL SUMBER BRAKITERAPI LDR Ir-192 DENGAN DOSIMETER FILM GAFCHROMIC EBT-2”**.

Laporan tugas akhir ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar kesarjanaan di Departemen Fisika, Universitas Indonesia. Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu penulis mengucapkan terimakasih kepada:

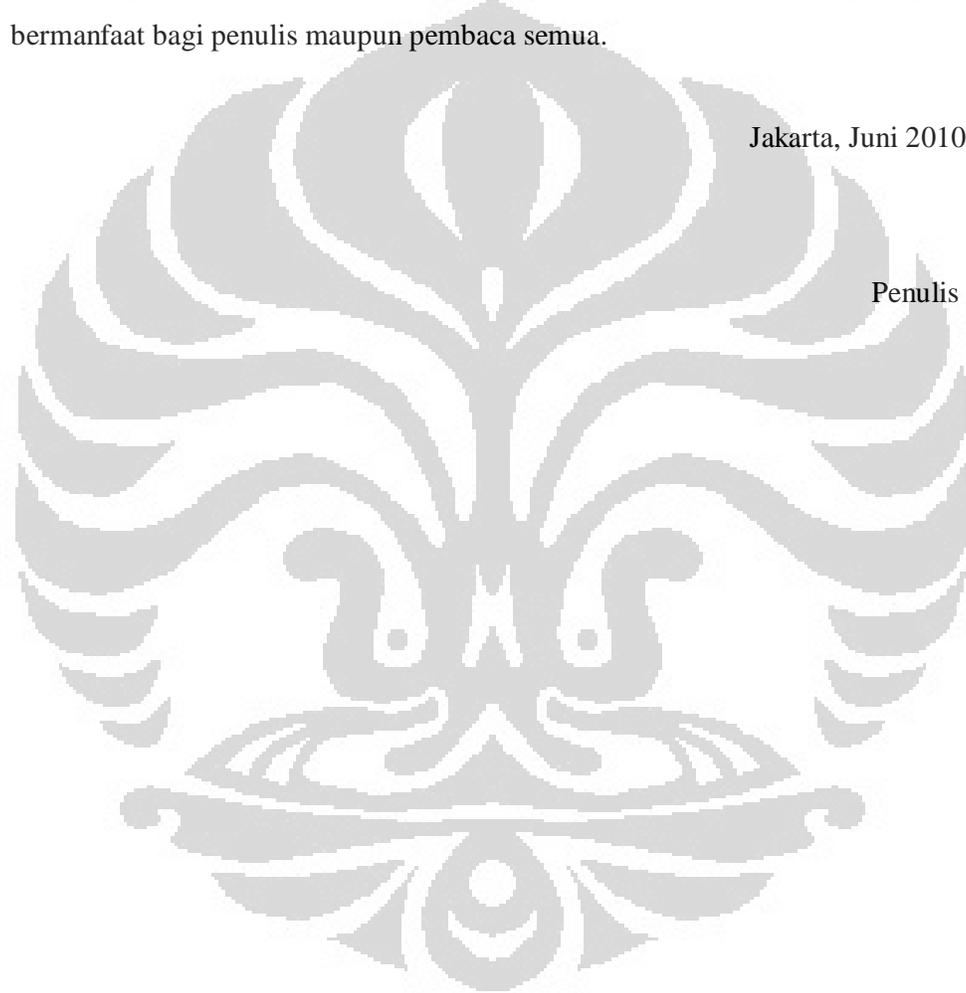
1. Bapak Dwi Seno Kuncoro, Msi dan Bapak Heru Prasetio, Msi, selaku Pembimbing Tugas Akhir yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengertian akan banyak hal.
2. Ibu Prof. Dr. Djarwani S Soejoko, selaku Penguji I dan Ketua Program Peminatan Fisika Medis dan Biofisika FMIPA UI.
3. Kristina Tri Wigati, Msi, selaku Penguji II.
4. Bapak Dr. Santoso, selaku Ketua Departemen Fisika.
5. Bapak Tri Harjanto, ST, Bapak Hambali, Bapak Drs. Muridun dan Bapak Anung Pujianto, SSi, selaku perancang, pembuat sumber Ir-192, yang tanpa beliau penelitian ini tidak bisa berjalan.
6. Kedua orang tua, adik-adiku, kakak-kakaku serta seluruh keluarga atas doa dan dukungannya selama penulis mengerjakan Tugas Akhir ini.
7. Teman-teman seperjuangan; Bondan, Fadli, Koko, Ira, Icha, Rifki, Dika, dan Ading, terimakasih atas pelajaran hidup dan arti persahabatan selama penulis menuntut ilmu di Depok.
8. Teman-teman S1 reguler 2005 yang selalu memberikan dukungan moril dan spiritual, serta banyak informasi berharga kepada penulis.

9. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu, terima kasih banyak atas dukungannya.

Akhir kata, penulis berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Penulis juga menyadari laporan ini masih jauh dari kesempurnaan, oleh karena itu saran dan kritik yang membangun sangat diperlukan demi perbaikan pada masa mendatang. Semoga laporan ini bermanfaat bagi penulis maupun pembaca semua.

Jakarta, Juni 2010

Penulis



~~HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI~~
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Margo Setiawan
NPM : 030502056X
Program Studi : Fisika Medis dan Biofisika
Departemen : Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Jenis karya : Skripsi

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

Distribusi Dosis Dan Fungsi Dosis Radial Sumber Brakiterapi Ldr Ir-192 Dengan
Dosimeter Film Gafchromic Ebt-2

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/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 : 21 Juni 2010

Yang menyatakan

(Margo Setiawan)

ABSTRAK

Nama : Margo Setiawan
Program studi : Fisika Medis Dan Biofisika
Judul skripsi : Distribusi Dosis Dan Fungsi Dosis Radial Sumber
Brakiterapi Ldr Ir-192 Dengan Dosimeter Film Gafchromic
Ebt-2

Telah dilakukan penelitian brakiterapi LDR dengan sumber Ir 192 dengan menggunakan dosimeter film Gafchromic EBT-2 dengan perlakuan di medium air dan udara, berdasarkan kalibrasi dari penelitian sebelumnya piksel value yang didapat dari pembacaan *scanner* diinterpolasi menjadi nilai dosis *absolute*. Protokol AAPM TG 43 digunakan sebagai acuan untuk menentukan persentase distribusi dosis pada setiap titik dan menjadi acuan sebagai penentu fungsi geometri sebagai faktor koreksi sumber dan fungsi dosis radial sebagai faktor koreksi atenuasi dan hamburan pada setiap titik tersebut.

Kata kunci : LDR, sumber Ir 192, Gafchromic EBT-2, AAPM TG 43, distribusi dosis, fungsi geometri, fungsi dosis radial

ABSTRACT

Name : Margo Setiawan
Study Program : Medical Physics And Biophysics
Title : The Dose Distribution And Radial Dose Function Of LDR Ir-192
Brachytherapy Source With EBT-2 Gafchromic Film Dosimeter

Study of brachytherapy used LDR Ir-192 with EBT-2 gafchromic film dosimeter within two experiments, air procedure and water procedure, have been done. Based on previously calibrated data experiments the pixel value that obtain from scanning film have interpolated to absolute dose value. AAPM TG-43 protocol have been reference to obtain percentage of distribution dose at any point of interest and to determined geometri function as source correction then determined radial dose function as correction factor of attenuation and scattered at that point of interest

Key words: LDR, Ir 192 source, Gafchromic EBT-2, AAPM TG 43, dose distribution, geometry function, radial dose function

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
KATA PENGANTAR	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xii

BAB I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian	3
1.3. Batasan Masalah Penelitian	3
1.4. Metode Penelitian	3
1.5. Sistematika Penulisan	4

BAB II. TEORI DASAR

2.1. Peluruhan Gamma	6
2.2. Absorpsi Sinar Gamma	7
2.3. Interaksi Foton Dengan Materi	8
2.4. Kerma	11
2.5. Brakiterapi	12
2.6. Spesifikasi Sumber Ir-192	14
2.7. Film Gafchromic EBT-2	15
2.5. Metode AAPM TG-43	16

BAB III. METODE PENELITIAN

3.1. Perlakuan Di Udara	
3.1.1 Pemberian Tanda Pada Film Gafchromic EBT-2	19
3.1.2 Radiasi Film Dengan Sumber Ir-192	20
3.2. Perlakuan Di Air	

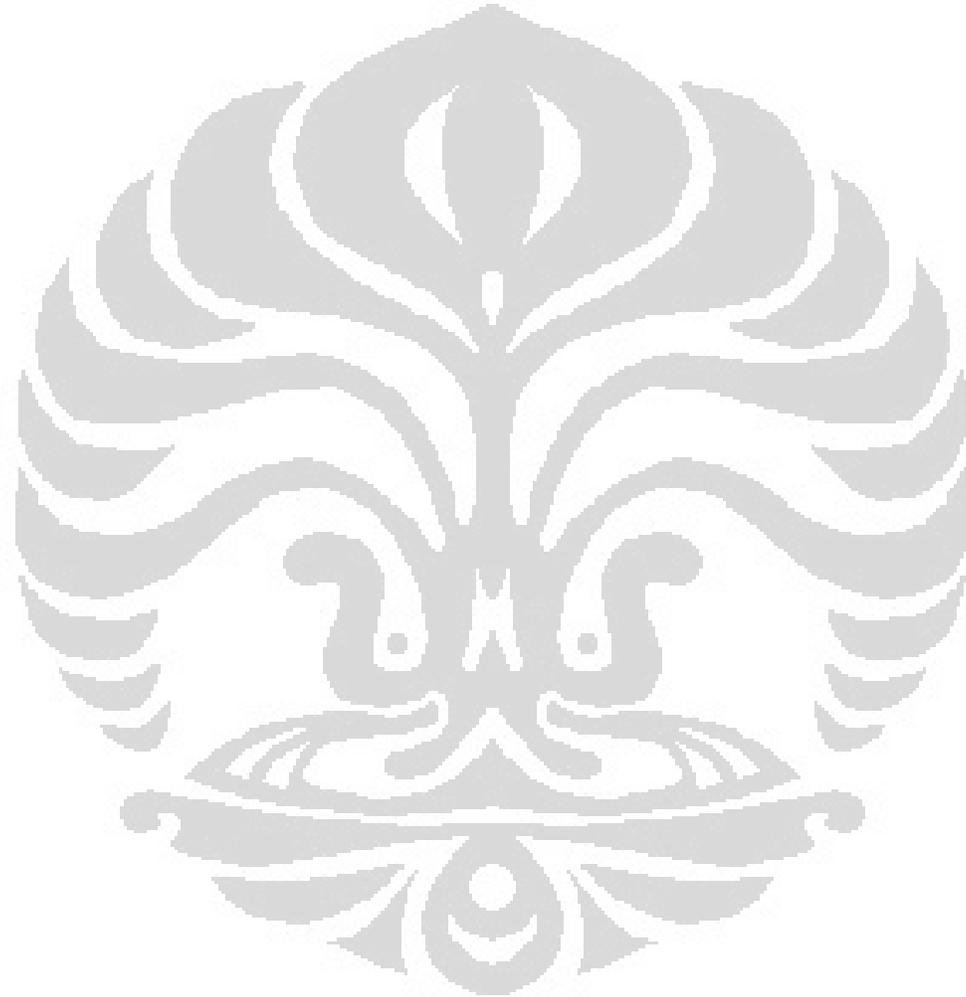
3.2.1 Pemberian Tanda Pada Film Gafchromic EBT-2	21
3.2.2 Membuat Vakum Film Dengan Media Plastik	21
3.2.3 Radiasi Film Dengan Sumber Ir-192	22
3.3. Proses Pembacaan Film	22
3.4. Mempresentasikan Secara Visual Persentase Distribusi Dosis dan Penentuan Point of Interest	23
3.5. Penentuan Fungsi geometri dan Fungsi Dosis Radial Dengan AAPM TG-43	
3.5.1. Fungsi Geometri	24
3.5.2. Fungsi Dosis Radial	25
 BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1 Distribusi Dosis	26
4.2 Fungsi Geometri dan Fungsi Dosis Radial	
4.2.1. Fungsi Geometri	34
4.2.2. Fungsi Dosis Radial	37
 BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1. Kesimpulan	39
5.2. Saran	39
 DAFTAR REFERENSI	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Diagram Tingkat Energi Dari Keadaan Eksitasi Inti	7
Gambar 2.2.	Proses Efek Fotolistrik	9
Gambar 2.3.	Proses Efek Compton.....	10
Gambar 2.4.	Bentuk Sumber Ir-192 Yang Digunakan	14
Gambar 2.5.	Lapisan-Lapisan Penyusun Film Gafchromic	16
Gambar 2.6.	Model AAPM TG-43	17
Gambar 3.1.	Skema Penyinaran pada Perlakuan Udara.....	19
Gambar 3.2.	Pemotongan Film Gafchromic EBT-2 dan Pemberian Tanda..	20
Gambar 3.3.	Penyinaran Dengan Sumber Ir-192.....	20
Gambar 3.4.	Skema Penyinaran Pada Perlakuan Di Dalam Air	21
Gambar 3.5.	Film Gafchromic Setelah Diradiasi	22
Gambar 3.6.	Film Gafchromic Stelah Dibuat Red Chanel	23
Gambar 3.7.	Sistem koodinat Yang Digunakan Dalam Perhitungan Fungsi Geometri Jika Sumber Berbentuk garis.....	24
Gambar 4.1.	Persentasi Distribubis Dosis Perlakuan Didalam Air.....	26
Gambar 4.2.	Persentasi Distribubis Dosis Perlakuan Di Udara.....	27
Gambar 4.3.	Persentasi Distribubis Dosis Perlakuan Di Udara Dan Perlakuan Di Air.....	29
Gambar 4.4.	Persentase Distribusi Dosis Pada Sumbu Horizontal.....	30
Gambar 4.5.	Persentase Distribusi Dosis Pada Sumbu Vertikal	31
Gambar 4.6.	Perbandingan Persentase Distribusi Dosis Di Air Dan Udara pada radius 5 mm	32
Gambar 4.7.	Perbandingan Persentase Distribusi Dosis Di Air Dan Udara pada radius 15 mm	33
Gambar 4.8.	Perbandingan Persentase Distribusi Dosis Di Air Dan Udara pada radius 25 mm	33
Gambar 4.9.	Perbandingan Persentase Distribusi Dosis Di Air Dan Udara pada radius 35 mm	33
Gambar 4.10.	Fungsi geometri pada sumbu vertikal	35
Gambar 4.11.	Fungsi geometri pada radius 5 mm dengan variasi sudut $0-180^0$	36
Gambar 4.12.	Fungsi geometri pada radius 20 mm dengan variasi sudut $0-180^0$	37
Gambar 4.13.	Perbandingan Fungsi Dosis Radial Di Air Dan Udara	38

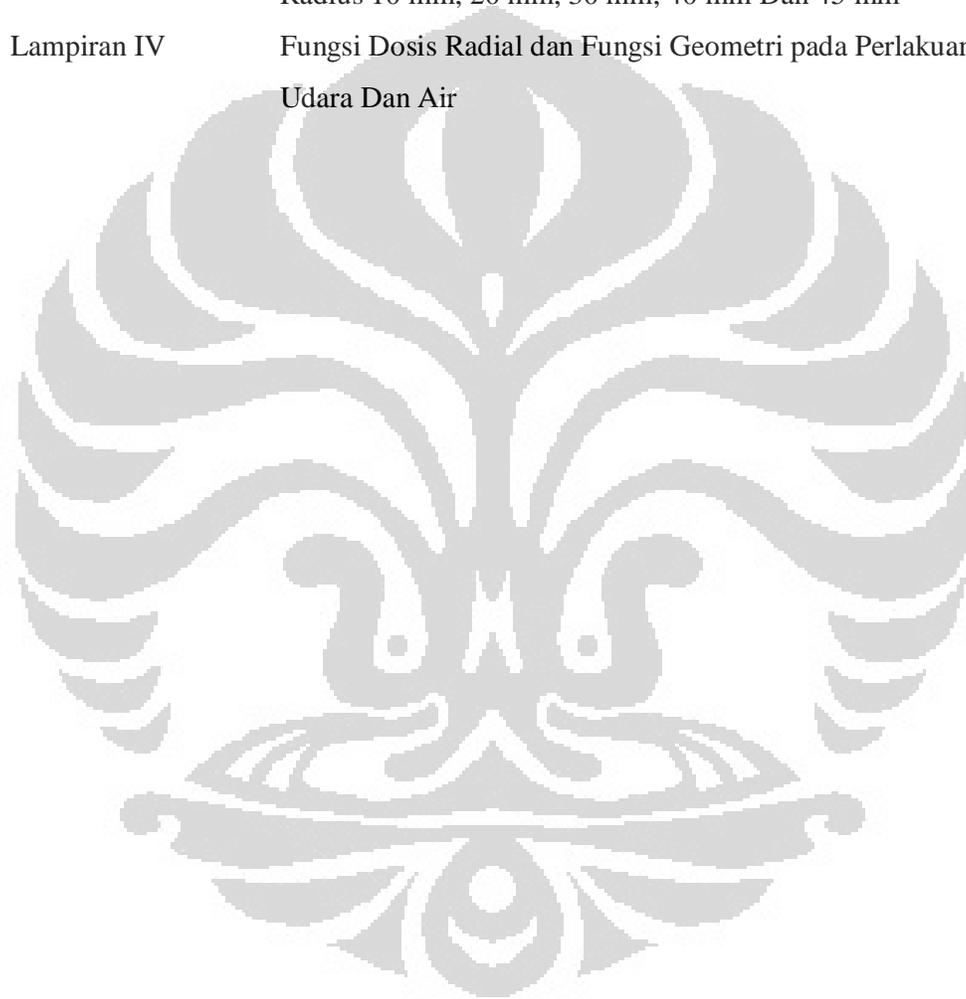
DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Sumber-Sumber Radioaktif Tertutup Dalam Brakhiterapi	15
Tabel 4.2. Fungsi geometri berdasarkan radius dan sudut	36



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran I	Persentase Distribusi Dosis Pada Udara
Lampiran II	Persentase Distribusi Dosis Pada Air
Lampiran III	Persentase Distribusi Dosis Perlakuan Air dan Udara Pada Radius 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm Dan 45 mm
Lampiran IV	Fungsi Dosis Radial dan Fungsi Geometri pada Perlakuan Udara Dan Air



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Abad 20 ditandai dengan perkembangan yang menakjubkan di bidang ilmu dan teknologi, termasuk disiplin ilmu dan teknologi kedokteran serta kesehatan. Terobosan penting dalam bidang ilmu dan teknologi ini memberikan sumbangan yang sangat berharga dalam diagnosis dan terapi berbagai penyakit sebagai konsekuensi logis dari pembangunan di segala bidang yang telah meningkatkan kondisi masyarakat.

Radioterapi adalah suatu teknik pengobatan menggunakan radiasi pengion atau radionuklida yang biasanya digunakan untuk terapi kanker. Sinar pengion dapat berupa isotop sinar gamma yang diperoleh dari unsur radium, kobalt, sesium, iridium atau sinar yang dibangkitkan seperti sinar X, elektron, atau berupa partikel proton, neutron. Tidak lama setelah sinar X diketahui dapat merusak jaringan manusia, mendorong dilakukan pengobatan kanker dengan sinar X pada saat itu, tanpa dasar pengetahuan patologi onkologi serta radiobiology (portalradiografi.web.id). Pada sebagian besar pasien terjadi kematian jaringan kanker, namun jaringan sehat juga terkena dampak yang sama. Keadaan ini telah mendorong para ilmuwan untuk melakukan penelitian dalam radioterapi, agar bisa digunakan sebagai salah satu teknik pengobatan dalam terapi kanker.

Metode dalam radioterapi terus mengalami perkembangan, pemakaiannya digunakan sesuai dengan tujuan pengobatan yang ingin dicapai. Brakiterapi adalah salah satu metode pengobatan terapi dengan radiasi tertutup pada jarak dekat. Dalam brakiterapi sumber radioaktif dimasukkan ke dalam tubuh yang mengadakan kontak langsung dengan jaringan kanker, sehingga dosis radiasi sangat tinggi dapat dihantarkan ke tempat yang dibutuhkan (digilib.unsri.co.id)

Pada mulanya brakiterapi disebut dengan Radium Terapi, hal ini karena menggunakan sumber radionuklida Radium (Ra). Namun dengan berkembangnya ilmu fisika kedokteran, maka saat ini banyak digunakan sumber radionuklida buatan seperti Cs-137, Au-182, I-125, Co-60 dan Ir-192. Sedangkan di Perancis, brakiterapi lebih populer dengan sebutan Terapi Curie, ini tentu berkaitan dengan

orang yang bernama Curie yang berasal dari Perancis yang telah banyak bekerja dengan radionuklida seratus tahun yang lalu.

Perkembangan brakiterapi dalam menangani pasienpun banyak menggunakan teknik-teknik sesuai dengan kebutuhannya, misalnya Terapi Superfisial, Terapi Interstisial, dan Terapi Intrakaviter. Untuk jenis-jenis kanker kulit, kepala, leher atau kaki yang ada di permukaan bisa digunakan Terapi Supertisial, yaitu dengan cara sumber-sumber radionuklida disusun di luar permukaan. Terapi Interstisial dilakukan jika sumber radionuklidanya dicangkokkan (*implanted*) secara langsung pada suatu volume rongga tubuh yang diobati seperti pada kanker payudara ataupun kanker leher. Sedangkan Terapi Intrakavitari ialah metode brakiterapi dengan memasukkan sumber radionuklida tertutup pada suatu jaringan/rongga yang ada kankernya seperti kanker uterus, cervix, ataupun rectum (kalbe.co.id).

Perlu adanya suatu perencanaan yang mantap dalam melakukan brakiterapi, agar memberikan hasil yang diharapkan. Protokol AAPM TG-43 telah dibuat untuk memperhitungkan hal tersebut yang salah satu komponen harus diperhatikan adalah penentuan distribusi dosis dari sumber yang digunakan serta faktor koreksi pendukung diantaranya distribusi radial dan laju dosis konstan.

Penentuan persebaran dosis pada penelitian ini menggunakan dosimeter film gafchromic tipe EBT 2. Film Radiochromic memiliki nomor atom efektif 6,98 yang hampir sama nilainya dengan air, dapat digunakan pada daerah gradien dosis yang tinggi untuk dosimetri, bersifat *self develop*, selain itu respon dari film gafchromic tidak dipengaruhi oleh energy (gafchromic ebt technical brief. Pdf). Proses pembacaan film dilakukan dengan menggunakan software image-J yang dibantu matlab dan excels.

1.2 TUJUAN PENELITIAN

- Membandingkan distribusi dosis Ir-192 LDR Brakiterapi dengan menggunakan Film Gafchromic Tipe EBT 2 pada medium air dan udara.
- Menentukan distribusi dosis dan fungsi dosis radial pada medium air dan udara.

1.3 BATASAN MASALAH PENELITIAN

Penelitian ini dibatasi pada perbandingan persentase distribusi dosis dari LDR Ir-192 brakiterapi dengan menggunakan film gafchromic tipe EBT 2 dan fungsi dosis radial pada medium air dan udara.

1.4 METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang akan dilakukan terdiri dari beberapa tahap antara lain:

1. Studi Literatur

Metode studi literatur ini digunakan untuk memperoleh teori-teori dasar sebagai sumber dan acuan dalam penulisan skripsi. Informasi dan pustaka yang berkaitan dengan masalah ini diperoleh dari literatur, penjelasan yang diberikan dosen pembimbing, rekan-rekan mahasiswa, internet, dan buku-buku yang berhubungan dengan tugas akhir penulis.

2. Eksperimen

Meradiasi film gafchromic EBT-2 dengan sumber Ir-192. Dua perlakuan dalam eksperimen ini, yaitu meradiasi didalam medium air dan meradiasi di udara masing-masing selama 4 hari.

3. Penggunaan Metode Interpolasi

Setelah *scanning* film dan nilai piksel didapat, digunakan interpolasi dari kalibrasi film gafchromic EBT-2 yang telah dilakukan sebelumnya untuk mengetahui dosis absolut. Interpolasi juga dipakai untuk mengetahui distribusi

dosis pada titik yang diinginkan (Point of Interest) yang pada akhirnya fungsi geometri dan fungsi dosis radial dapat ditentukan.

4. Metode Analisis

Metode ini merupakan pengamatan terhadap data yang telah diperoleh dari pengambilan data. Setelah itu dilakukan analisis dari dua perlakuan yaitu perlakuan di udara dan perlakuan di medium air sehingga dapat ditarik kesimpulan dan saran – saran untuk pengembangan lebih lanjut.

1.5 SISTEMATIKA PENULISAN

Sistematika penulisan skripsi ini terdiri dari bab-bab yang memuat beberapa sub-bab. Untuk memudahkan pembacaan dan pemahaman maka penulisan skripsi ini terdiri atas 6 bab dan secara garis besar dapat diuraikan sebagai berikut:

➤ BAB I PENDAHULUAN

Pendahuluan berisi latar belakang, permasalahan, batasan masalah, tujuan penulisan, metode penulisan dan sistematika penulisan dari skripsi ini.

➤ BAB II LANDASAN TEORI

Bab ini menjelaskan tentang prinsip dasar interaksi foton dengan materi, brakiterapi, karakteristik sumber Ir-192, Kerma, film gafchromic EBT-2 serta metode AAPM TG 43.

➤ BAB III METODOLOGI PENELITIAN

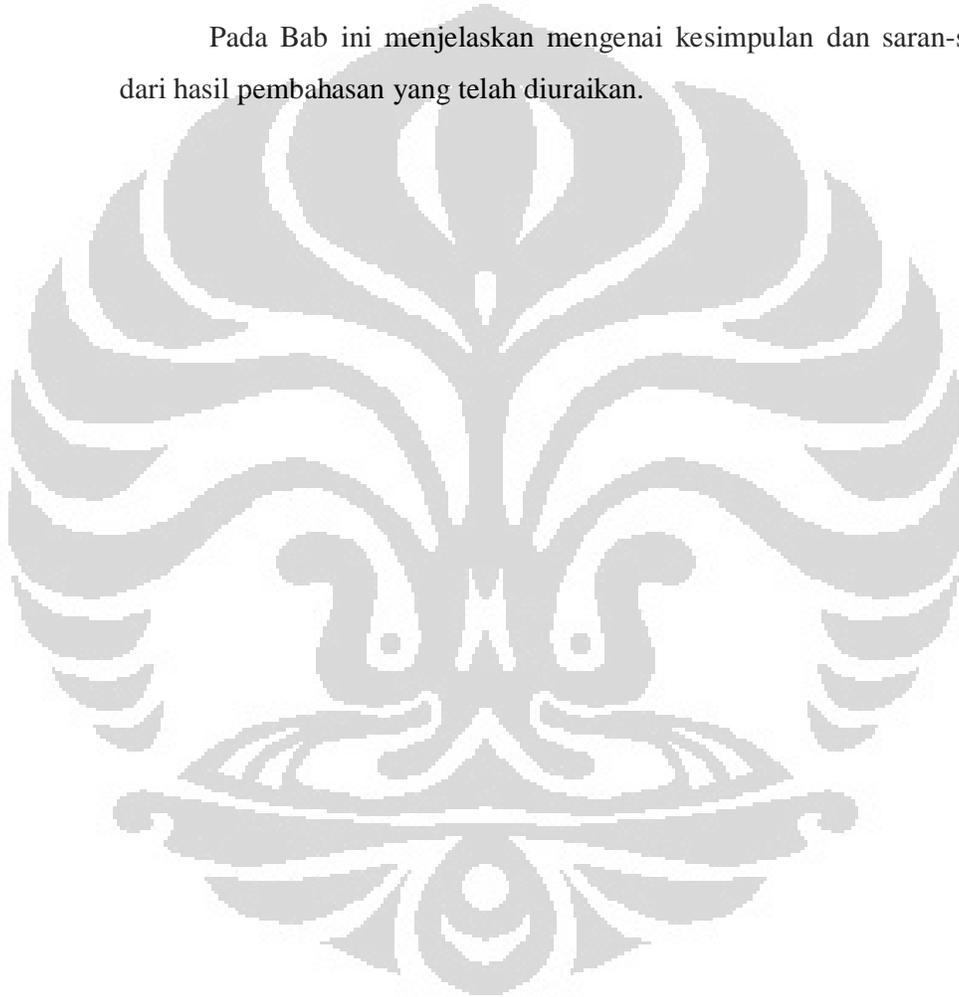
Pada Bab ini menjelaskan tentang langkah-langkah dari penelitian serta prosedur dalam penelitian ini.

➤ BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menjelaskan tentang hasil pengukuran data, pengolahan dari data tersebut, serta pembahasan mengenai hasil data dan pengolahan data tersebut.

➤ BAB V SARAN DAN KESIMPULAN

Pada Bab ini menjelaskan mengenai kesimpulan dan saran-saran dari hasil pembahasan yang telah diuraikan.



BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Peluruhan Gamma

Setelah peluruhan alfa dan beta, inti biasanya dalam keadaan tereksitasi. Seperti halnya atom, inti akan mencapai keadaan dasar (stabil) dengan memancarkan foton (gelombang elektromagnetik) yang dikenal dengan sinar gamma (γ).

Dalam proses pemancaran ini, baik nomor atom atau nomor massa inti tidak berubah.



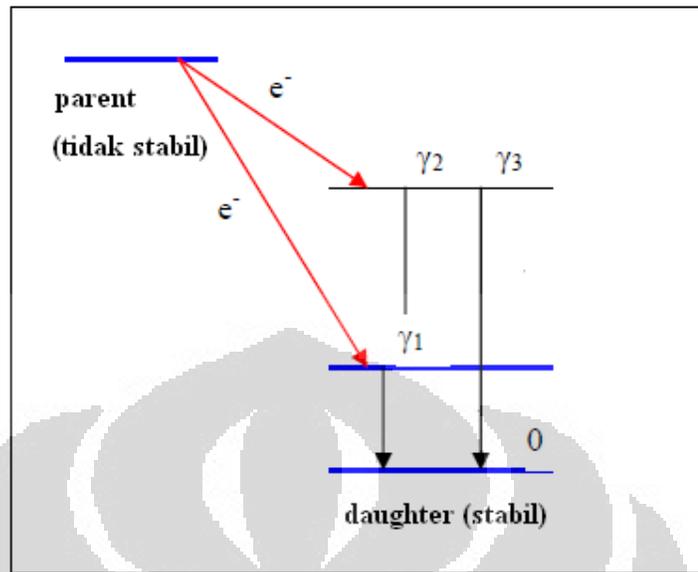
Energi gelombang ini ditentukan oleh panjang gelombang (λ) atau oleh frekuensinya (f) sesuai persamaan

$$E = hf = hc/\lambda \quad (2.2)$$

dengan h adalah tetapan plank yang besarnya $6,63 \cdot 10^{-34}$ Js.

Energi tiap foton adalah beda energi antara keadaan awal dan keadaan akhir inti, dikurangi dengan sejumlah koreksi kecil untuk energi pental inti. Energi ini berada pada kisaran 100 KeV hingga beberapa MeV. Inti dapat pula dieksitasi dari keadaan dasar ke keadaan eksitasi dengan menyerap foton dengan energi yang tepat.

Gambar 2.1 memperlihatkan suatu diagram tingkat energi yang khas dari keadaan eksitasi inti dan beberapa transisi sinar gamma yang dipancarkan. Ada beberapa yang memiliki waktu paruh lama (beberapa jam bahkan beberapa hari). Inti-inti yang tereksitasi seperti ini dinamakan *isomer* dan keadaan tereksitasinya dikenal sebagai keadaan *isomerik*.



Gambar 2.1 Diagram tingkat energi dari keadaan eksitasi inti

Dalam menghitung energi partikel alfa dan beta yang dipancarkan dalam peluruhan radioaktif di depan dianggap tidak ada sinar gamma yang dipancarkan. Jika ada sinar gamma yang dipancarkan, maka energi yang ada (Q) harus dibagi bersama antara partikel dengan sinar gamma.

2.2 Absorpsi Sinar Gamma

Sinar gamma merupakan gelombang elektromagnetik yang membawa energi dalam bentuk paket-paket yang disebut foton. Jika sinar gamma masuk ke dalam suatu bahan, juga menghasilkan ionisasi, hanya saja ionisasi yang dihasilkan sebagian besar melalui proses ionisasi sekunder. Jadi, sinar gamma berinteraksi dengan materi hanya beberapa pasang ion primer saja yang terbentuk. Ion-ion primer itu selanjutnya melakukan proses ionisasi sekunder sehingga diperoleh pasangan ion yang lebih banyak dibandingkan yang terbentuk pada proses ionisasi primer.

Apabila sinar gamma (gelombang elektromagnetik) memasuki perisai, maka intensitas radiasi saja yang akan berkurang, sedangkan energi tetap tidak berubah.

$$I = I_0 e^{-\mu t} \quad (2.3)$$

Dengan I_0 adalah intensitas mula-mula, I Intensitas yang diteruskan, d adalah ketebalan bahan perisai dan μ adalah koefisien serapan linier bahan perisai. Karena μd tidak memiliki satuan, maka satuan μ dan d menyesuaikan. Jika d dalam cm, maka μ dalam 1/cm.

Nilai μ untuk setiap bahan sangat bergantung pada nomor atom bahan dan juga pada radiasi gamma. Untuk beberapa tujuan tertentu, seringkali tabel bahan perisai tidak dinyatakan dalam tebal linier dengan satuan panjang, tetapi dinyatakan dalam tebal kerapatan (gr/cm^2). Jika besaran itu yang dipakai maka koefisien serapan bahan dinyatakan dalam koefisien serapan massa μ_m dengan satuan cm^2/gr .

Hubungan keduanya dinyatakan dalam:

$$\mu = \mu_m \times \rho \quad (2.4)$$

Selain kedua koefisien serapan tersebut, juga digunakan koefisien serapan atomik (μ_a), yaitu fraksi berkas radiasi gamma yang diserap oleh atom. Koefisien serapan atomik dirumuskan

$$\mu_a = \frac{\mu}{N} \quad (2.5)$$

Dengan N adalah jumlah atom penyerap per cm^3 . Koefisien serapan atomik ini selalu menunjukkanampang lintang (cross section) dengan satuan barn ($1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$).

Dilihat dari daya tembusnya, radiasi gamma memiliki daya tembus paling kuat dibandingkan dengan radiasi partikel yang dipancarkan inti radioaktif lainnya. Sebaliknya, daya ionisasinya paling lemah. Karena sinar gamma termasuk gelombang elektromagnetik, maka kecepatannya sama dengan kecepatan cahaya.

2.3 Interaksi Foton Dengan Materi

Ada tiga proses utama yang dapat terjadi apabila radiasi gamma melewati bahan, yaitu efek fotolistrik, hamburan Compton dan produksi pasangan. Ketiga proses tersebut melepaskan elektron yang selanjutnya dapat mengionisasi atom-atom lain dalam bahan. Peluang terjadinya interaksi antara radiasi gamma dengan bahan ditentukan oleh koefisien absorpsi linier (μ). Karena penyerapan intensitas gelombang elektromagnetik melalui tiga proses utama, maka nilai μ juga ditentukan oleh peluang

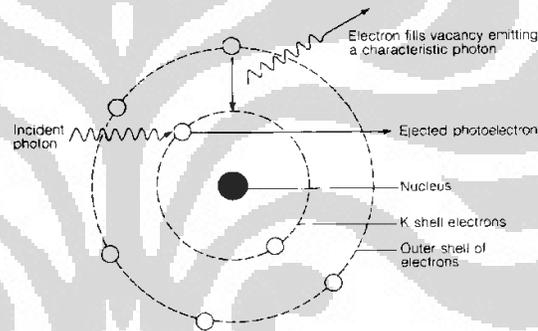
terjadinya ketiga proses tersebut, yaitu μ_f untuk foto listrik, μ_C untuk hamburan Compton dan μ_{pp} untuk produksi pasangan.

Koefisien absorpsi total (μ_t) dari ketiga koefisien tersebut :

$$\mu_t = \mu_f + \mu_C + \mu_{pp} \quad (2.6)$$

Efek fotolistrik

Interaksi terjadi antara foton dengan elektron terikat erat dalam orbit elektron atom medium. Seluruh energi foton diberikan pada elektron, sebagian energi digunakan untuk membebaskan elektron dari ikatan atom dan sisanya untuk tenaga kinetik fotoelektron yang keluar dari atom.



Gambar 2.2 Proses Efek fotolistrik

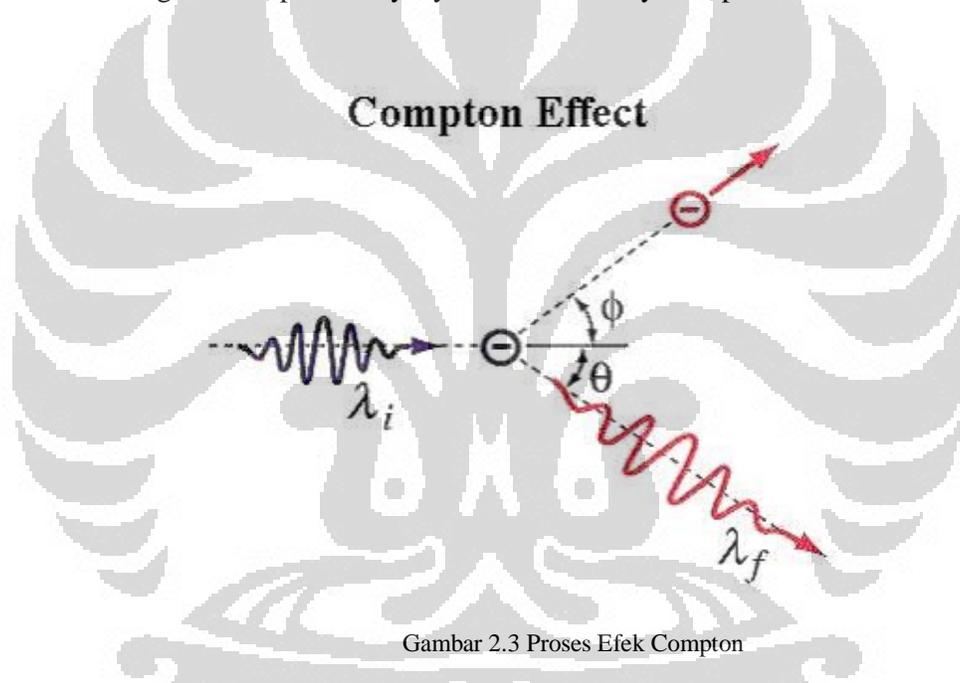
pada saat pengisian kekosongan elektron dari kulit yang lebih luar ataupun dari luar atom, akan disertai pancaran foton karakteristik.

Hamburan elastis terjadi pada foton energi rendah dengan elektron orbital yang terikat. Dalam hamburan elastis, foton tidak kehilangan energi dan dihamburkan dengan sudut hambur kecil. Koefisien absorpsi akan sebanding energi radiasi dan nomer atom medium yang berarti menurun cepat dengan kenaikan energi foton, dan meningkat cepat dengan kenaikan nomer atom medium.

Efek Compton

Pada efek fotolistrik, cahaya dapat dipandang sebagai kuantum energi dengan energi yang diskrit. Kuantum energi tidak dapat digambarkan sebagai gelombang tetapi lebih mendekati bentuk partikel. Partikel cahaya dalam bentuk kuantum dikenal dengan sebutan foton. Pandangan cahaya sebagai foton diperkuat lagi melalui gejala yang dikenal sebagai efek Compton.

Jika seberkas sinar-X ditembakkan ke sebuah elektron bebas yang diam, sinar-X akan mengalami perubahan panjang gelombang dimana panjang gelombang sinar-X menjadi lebih besar. Gejala ini dikenal sebagai efek Compton, sesuai dengan nama penemunya, yaitu Arthur Holly Compton.



Gambar 2.3 Proses Efek Compton

Sinar-X digambarkan sebagai foton yang bertumbukan dengan elektron (seperti halnya dua bola bilyar yang bertumbukan). Interaksi foton dengan elektron kulit atom yang dianggap bebas (tenaga ikat elektron lebih kecil dari energi foton datang), elektron bebas yang diam menyerap sebagian energi foton sehingga bergerak ke arah membentuk sudut terhadap arah foton mula-mula. Foton yang menumbuk elektron pun terhambur dengan sudut θ terhadap arah semula dan panjang gelombangnya menjadi lebih besar. Energi foton hambur sama dengan energi foton datang dikurangi energi kinetik elektron Compton dan perubahan panjang gelombang foton setelah terhambur dinyatakan sebagai

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta) \quad (2.7)$$

Dimana m adalah massa diam elektron, c adalah kecepatan cahaya, dan h adalah konstanta Planck.

Produksi Pasangan

Produksi pasangan terjadi karena interaksi antara foton dengan medan listrik dalam inti atom berat. Jika interaksi itu terjadi, maka foton akan lenyap dan sebagai gantinya akan timbul sepasang elektron-positron. Karena massa diam elektron ekuivalen dengan energi 0,51 MeV, maka produksi pasangan hanya dapat terjadi pada energi foton $\geq 1,02$ MeV ($2m_e c^2$).

Energi kinetik total pasangan elektron-positron sesuai dengan persamaan:

$$hf = K_e + K_p + m_e c^2 + m_p c^2 \quad (2.8)$$

Kedua partikel ini akan kehilangan energinya melalui proses ionisasi atom bahan. Positron yang terbentuk juga bisa bergabung dengan elektron melalui suatu proses yang dinamakan anihilasi.

2.4 Kerma

Kerma adalah singkatan untuk energi kinetik yang dilepaskan per satuan massa. merupakan besaran nonstochastic, transfer energi dari foton ke medium berlangsung dalam dua tahap

- berkaitan dengan interaksi radiasi dengan atom, mengakibatkan elektron bergerak dan mempunyai energi kinetik
- berkaitan dengan transfer energi elektron kepada medium melalui ionisasi dan eksitasi.

dalam kerma jumlah rata-rata energi ditransfer dari radiasi pengion tidak langsung menjadi radiasi pengion langsung tanpa memperhatikan menjadi apa energi setelah transfer ini. kerma didefinisikan sebagai energi ditransfer dE_{tr} dari Radiasi pengion langsung ke partikel bermuatan (elektron) dalam medium dm massa per unit:

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm} \quad (2.9)$$

Satuan kerma adalah joule per kilogram (J / kg). Nama untuk unit kerma adalah Gray (Gy), di mana $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J / kg}$.

2.5 Brakiterapi

Brakiterapi merupakan sumber radiasi tertutup dekat dengan volume tumor, dosis tinggi pada tumor dengan dosis rendah pada jaringan normal sekelilingnya. *Treatment* dengan jenis ini diberikan dengan meletakkan sumber secara langsung ke dalam atau dekat dengan jaringan yang dituju. Dosis yang akan diberikan secara terus menerus, dengan periode jangka pendek (temporary implant) atau dengan jangka panjang hingga seluruhnya meluruh (permanent implant). Hampir seluruhnya sumber brakhiterapi mengemisikan foton tetapi adakalanya untuk situasi tertentu emisi β atau neutron dipakai.

Jenis brakhiterapi:

- *interstitial*
- *intracavitary*
- *intraluminal*
- *surface*

Interstitial, sumber diselipkan ke dalam jaringan, diameter sumber kecil dapat menembus ke dalam jaringan. Paling sering terapi interstitial dilakukan pada tumor lidah, payudara, *vulva*, dan anus.

Terapi *intracavitari* paling sering digunakan untuk tumor ginekologi (cervix dan vagina). Terapi *intraluminal* digunakan untuk terapi tumor oesophagus dan bronchus. Sumber berada dalam aplikator yang dimasukkan ke dalam rongga atau saluran dekat tumor.

Aplikator permukaan (*surface*), sesuai untuk terapi superficial tumor yang terletak di atas organ/jaringan normal sensitif, seperti ocular tumor. Sumber radiasi pemancar beta, dosis tinggi pada permukaan dan turun cepat dengan kedalaman. Penggunaan aplikator permukaan menurun dengan adanya linac yang memungkinkan terapi eksternal dengan elektron.

Brakhiterapi konvensional, perlakuan diberikan sekitar 2 - 10 hari, dengan laju dosis pada titik atau kurva isodosis tertentu sebagai berikut

- interstitial therapy, 7 - 20 Gy/hari (30 - 90 cGy/jam)
- terapi intracavitari, 13 - 17 Gy/hari (50 - 70 cGy/jam), dikenal dengan LDR (low dose rate)

Penggunaan remote after loading therapy memungkinkan pemberian laju dosis tinggi pada volume target

- 30 - 40 Gy/hari (1.2 - 1.8 Gy/jam), MDR (medium dose rate)
- 1 - 5 Gy/min (60 - 300 Gy/jam), HDR (high dose rate)

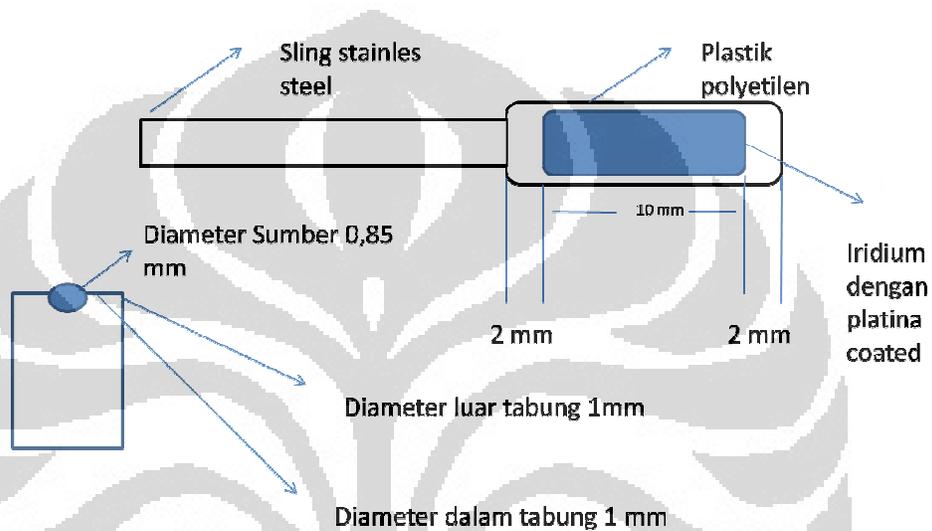
Beberapa terapi tumor khusus dilakukan secara implantasi menggunakan sumber dengan umur paroh pendek, karena tidak diinginkan operasi kedua untuk mengangkat sumber.

Kelebihan dari brakiterapi dengan radioterapi konvensional adalah dosis yang dihantarkan pada suatu volum dan terlokalisasi. Kelemahan dari brakiterapi adalah hanya bisa pada volume jaringan tumor yang relative kecil. Hanya sekitar 10-20% dari perawatan radioterapi yang menggunakan brakiterapi disuatu departemen radioterapi.

Beberapa aspek harus dipertimbangkan ketika memberikan treatment brakhiterapi. Salah satu yang penting adalah posisi relatif dari sumber terhadap volume tumor yang dituju, dan beberapa model yang berbeda telah dikembangkan selama beberapa dekade terakhir untuk tujuan ini. Kelebihan dari penggunaan model yang telah dikembangkan dengan baik dari asosiasi yang telah lama berpengalaman dapat memberikan keuntungan pada hasil yang didapat. Penggunaan model dan metode yang seragam pada brakiterapi merupakan perbandingan hasil dari *treatment*. Untuk treatment yang menggunakan teknik pemberian dosis secara teroptimisasi, lama waktu treatment bergantung pada posisi sumber relative terhadap perhitungan dosis disuatu titik dan kepada kuat sumber.

2.6 Spesifikasi Sumber Ir 192

Ir-192 merupakan pemancar beta dan sinar gamma dengan waktu paruh 74 hari, dengan energi radiasi gamma utama 370 keV. Pada penelitian kali ini sumber dalam bentuk kawat, inti kawat iridium -platinum alloy diselubungi oleh platina untuk menyerap partikel beta. panjang sumber aktif pada penelitian ini adalah 1 cm dengan diameter 0.6 cm.



Gambar 2.4 Bentuk Sumber Ir-192 yang digunakan

Besaran yang disarankan untuk spesifikasi sumber-sumber gamma adalah laju kerma udara acuan, yang didefinisikan oleh ICRU sebagai laju kerma terhadap udara (AKR= Air Kerma Rate), di udara, pada jarak acuan 1 m, dikoreksi terhadap atenuasi dan hamburan. Untuk sumber radiasi berbentuk jarum, tube dan sumber padatan yang mirip, arah dari pusat sumber ke titik acuan harus pada sudut lurus ke sumbu panjang sumber. Satuan SI (Sistem Internasional), laju kerma udara acuan adalah $\text{Gy}\cdot\text{s}^{-1}$ tetapi pada prakteknya dapat digunakan $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ dan $\text{mGy}\cdot\text{h}^{-1}$ untuk aplikasi HDR.

Tabel 2.1 Sumber-sumber radioaktif tertutup dalam brakhiterapi

Sumber	Energi Foton (MeV)		Waktu Paruh	atenuasi dalam pb (cm)		konstanta laju paparan R ($\text{h}^{-1} \text{mCi}^{-1} \text{cm}^2$)	kostanta AKR ($\text{Gy h}^{-1} \text{GBq}^{-1} \text{m}^2$)
	rata-rata	Maksimum		HVL	TVL		
Co 60	1.25	1.33	5.27 tahun	12	45	13.1	309
Cs 137	0.662	0.662	30 tahun	6.5	22	3.3	78
Ir 192	0.37	0.61	74 hari	4.5	15	4.8	113
I 125	0.028	0.035	60 hari	0.03	0.1	1.4	33
Au 198	0.42	0.68	2.7 hari	3	11	2.35	55.5
Ra 226		2.4	1600 tahun	16	45	8.25	195

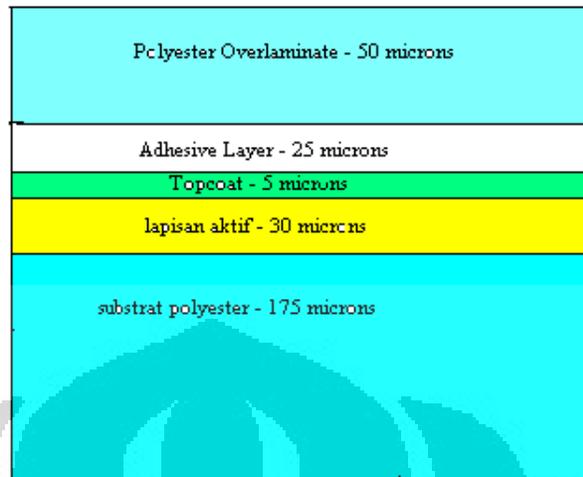
2.7 Film Gafchromic EBT-2

Film Gafchromic EBT-2 telah dikembangkan secara khusus untuk menangani kebutuhan fisikawan medis dan dosimetrist yang bekerja di lingkungan radioterapi. Merupakan film dengan kemampuan *self-develop* yang mempunyai kelebihan diantara film gafchromic lainnya.

Diantaranya ialah:

- Diformulasikan independen terhadap energi dari 50 Kev sampai jangkauan Mev
- Lebih toleran terhadap pencahayaan
- Lebih resisten dari kerusakan apabila dipotong
- Mempunyai lapisan anti air

Film Gafchromic EBT-2 dibuat dengan menggabungkan polyester over-laminate dengan bahan aktif film yang telah dilapisi. Substrat aktif film adalah polyester dengan ketebalan 175 mikron. Substrat ini dilapisi dengan lapisan aktif dari film dengan ketebalan 30 mikron. Yang di atasnya dilapisi dengan lapisan atas dengan ketebalan 5 mikron. Polyester over-laminate dilapisi dengan lapisan adesif. kesemuanya itu dirangkum pada gambar 2.5



gambar 2.5 Lapisan-lapisan penyusun film gafchromic

Polyester over-lamine berfungsi untuk melindungi lapisan aktif dalam hal ini lapisan aktif atas (topcoat) dari kerusakan yang diakibatkan mekanis dan juga dari air dan cairan lainnya, film gafchromic EBT-2 resisten jika dicelupkan kedalam air selama beberapa jam, air akan masuk pada pinggir film karena pada pinggir film tidak terlapis polyester ini.

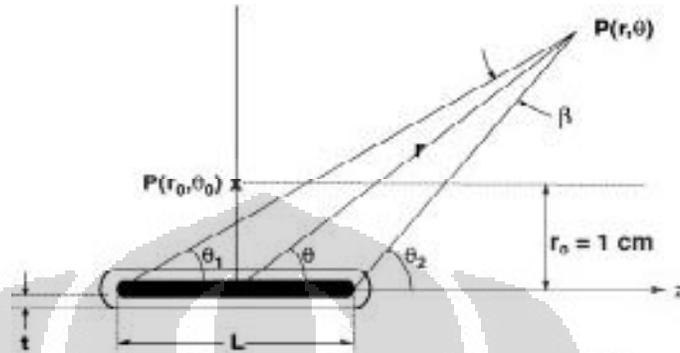
Lapisan aktif mengandung komponen radiasi-sensitif yang sama digunakan dalam versi EBT sebelumnya. Namun, pengikat pada lapisan aktif dan lapisan atas (topcoat) telah berubah dari polimer alam, gelatin, ke polimer sintetis. Perubahan ini bermanfaat dalam beberapa cara. Misalnya, penggunaan polimer sintetis memberikan jaminan tingkat tinggi pada komposisi atom lapisan aktif.

Film sensitivitas tinggi radiochromic ini telah dirancang untuk pengukuran dosis serap foton berenergi tinggi yang digunakan dalam IMRT. Film ini telah dirancang untuk digunakan dengan dosis sampai sekitar 50 Gy.

2.8 Metode AAPM TG-43

AAPM TG 43 diperkenalkan untuk perhitungan dosis 2-D sekitar sumber. Untuk berbagai bentuk sumber, distribusi dosis dapat dideskripsikan pada system koordinat polar dengan titik pusat sumbunya berada di tengah sumber, dimana r adalah jarak dari titik pusat ke titik yang diinginkan (point of interest) P dan θ

adalah sudut yang terbentuk dengan panjang aksis, titik $P(r, \theta)$ adalah titik referensi yang terletak pada garis-melintang sumber pada jarak 1 cm dari sumbu pusat (yaitu di $r_0 = 1 \text{ cm}$ (10 mm) dan $\theta_0 = \pi/2$), tergambar pada gambar 2.6



gambar 2.6 Model AAPM TG 43

Laju dosis $\dot{D}(r, \theta)$ pada titik yang diinginkan $P(r, \theta)$ pada air ditulis sebagai:

$$\dot{D}(r, \theta) = S_k \Lambda \frac{G(r, \theta)}{G(r_0, \theta_0)} g(r) F(r, \theta) \quad (2.10)$$

Dimana:

- r merupakan jarak dari sumbu utama ke titik yang diinginkan;
- θ sudut antara radius vector r dan aksis panjang sumber;
- θ_0 sudut $\pi/2$ radian antara radius vector r dan aksis panjang sumber;
- S_k kuat kerma udara sumber ($\text{mGy} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$);
- Λ laju dosis konstan air;
- $G(r, \theta)$ fungsi geometri;
- $g(r)$ fungsi dosis radial;
- $F(r, \theta)$ fungsi anisotropy.

Laju dosis Λ konstan didefinisikan sebagai laju dosis untuk air pada jarak 1 cm pada sumbu transversal per unit kuat kerma udara sumber dalam air:

$$\Lambda = \frac{D(r_0, \theta_0)}{S_k} \quad (2.11)$$

Fungsi geometri menunjukkan variasi dari dosis relative karena distribusi spasial sumber. Fungsi geometri bernilai $1/r^2$ untuk pendekatan sumber berbentuk titik dan bernilai $\beta/(L r \sin \theta)$ untuk pendekatan sumber berbentuk batang.

Fungsi dosis radial $g(r)$ menunjukkan efek atenuasi dan hamburan dalam air pada sumbu vertical sumber (sudut $\pi/2$), tidak termasuk radiasi jatuh, yang termasuk dari fungsi geometri $G(r, \theta)$. Dan kemungkinan juga disebabkan oleh filtrasi dari foton.

Fungsi anisotropi $F(r, \theta)$ menunjukkan anisotropi dari distribusi dosis di sekitar sumber, termasuk efek absorpsi dan hamburan dalam air. $F(r, \theta)$ didefinisikan sebagai satuan pada bidang transversal, bagaimanapun juga nilai dari ini menurun sebagaimana r menurun dan θ mendekati 0 atau 180 ketebalan enkapsulasi sumber meningkat dan energi foton berkurang.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan dua perlakuan yang berbeda yaitu perlakuan di udara dan perlakuan di dalam air, walaupun dengan dua perlakuan yang berbeda tetapi dalam pembacaan dan pengolahan data dilakukan dengan metode yang sama

3.1 Perlakuan Di Udara

Pengambilan data pada perlakuan udara adalah dengan meletakkan sumber Ir-192 diatas film gafchromic kemudian direkatkan antara keduanya seperti gambar 3.1



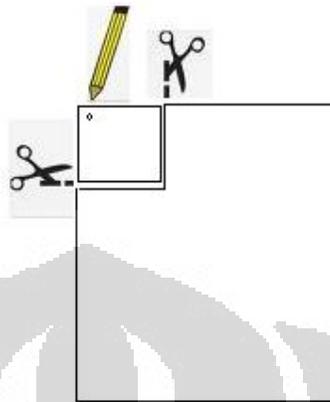
Gambar 3.1 Skema penyinaran pada perlakuan udara

Sebelum pengambilan data dilaksanakan, ada beberapa hal yang harus dipersiapkan sebelumnya dan bagaimana posisi sumber terhadap film gafchromic juga harus ditentukan agar mendapat hasil yang maksimal.

3.1.1 Pemberian Tanda Pada Film Gafchromic EBT-2

Film Gafchromic dipotong dengan ukuran 10 x 10 cm. Pemotongan dengan ukuran ini bertujuan untuk memperoleh jangkauan dosis lebar. Pembuatan tanda dilakukan dengan cara (gambar 3.1.1) film diberi tanda pada bagian kiri atas. Dilakukan pemberian tanda pada film karena film tersebut berbahan aktif polymer

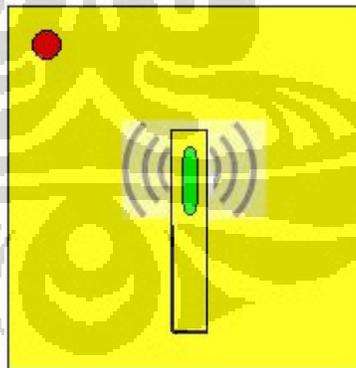
yaitu polyester yang mempunyai struktur permukaan berbeda antara posisi horizontal dan posisi vertikal jika di radiasi.



Gambar 3.2 Pemotongan film gafchromic EBT-2 dan pemberian tanda

3.1.2 Radiasi Film Dengan Sumber Ir-192

Film yang telah dibuat tanda diradiasi dengan sumber Ir-192 LDR pada bagian sentral film. Sumber Ir-192 dengan panjang 1 cm dan diameter 0,6 cm (gambar 2.4) diletakkan di posisi tengah film, lamanya waktu perlakuan pada perlakuan ini adalah 96 jam, film gafchromic akan berubah warna setelah diradiasi. Yang hasilnya terlihat seperti gambar 3.5

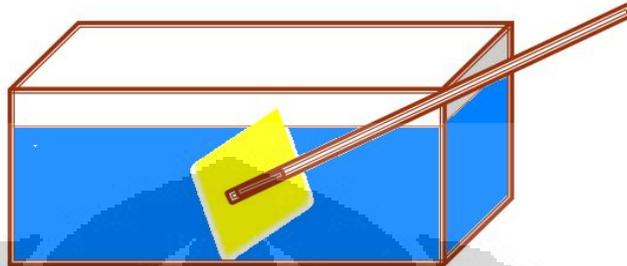


Gambar 3.3 Penyinaran dengan sumber Ir-192

3.2 Perlakuan Di Air

Pengambilan data pada perlakuan di air dilakukan didalam fantom berisi air yang terbuat dari acrylic, sama seperti pada perlakuan udara sumber Ir-192

diletakkan diatas film gafchromic kemudian direkatkan antara keduanya kemudian di masukkan ke dalam air seperti pada gambar



Gambar 3.4 Skema penyinaran pada perlakuan di dalam air

Beberapa hal yang harus dipersiapkan sebelumnya dan bagaimana posisi sumber terhadap film gafchromic juga harus ditentukan agar mendapat hasil yang maksimal sebelum pengambilan data dilaksanakan.

3.2.1 Pemberian Tanda Pada Film Gafchromic

Seperti perlakuan di udara, Film Gafchromic dipotong dengan ukuran 10 x 10 cm. Pemotongan dengan ukuran ini bertujuan untuk memperoleh jangkauan dosis lebar. Pembuatan tanda dilakukan dengan cara (gambar 3.2) film diberi tanda pada bagian kiri atas. Dilakukan pemberian tanda pada film karena film tersebut berbahan aktif polymer yaitu polyester yang mempunyai struktur permukaan berbeda antara posisi horizontal dan posisi vertikal jika di radiasi.

3.2.2 Membuat Vakum Film Dengan Media Plastik

Sifat bahan film gafchromic yang tidak resisten jika dimasukan kedalam air terlalu lama, Sebelum film diradiasi dengan sumber Ir-192 di dalam air, terlebih dahulu memvakumkan film dengan media plastik transparan. dengan menggunakan motor penghisap untuk memvakumkan dan Alat perekat panas yang bertujuan untuk mengunci plastik yang sudah divakum.

3.2.3 Radiasi Film Dengan Sumber Ir-192

Sama seperti pada perlakuan udara. Film yang telah di buat vakum dengan media plastik dan diberi tanda diradiasi dengan sumber Ir-192 LDR (gambar 3.3) yang dilakukan di dalam fantom berisi air . Sumber Ir-192 dengan panjang 1 cm dan diameter 0,6 cm di letakkan pada bagian sentral film, lamanya waktu perlakuan pada perlakuan ini adalah 96 jam. Yang hasilnya terlihat seperti gambar 3.5



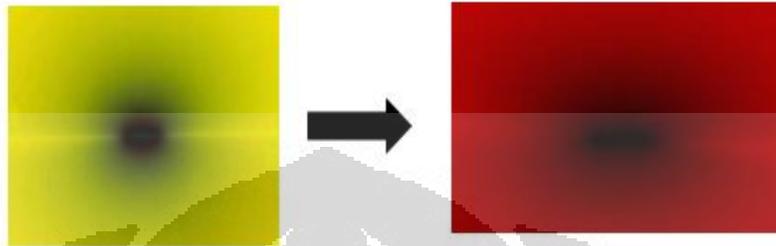
Gambar 3.5 Film gafchromic setelah diradiasi

3.3 Proses Pembacaan Film

Setelah film dipapar radiasi baik perlakuan udara dan perakuan air, film di scan dengan format resolusi 75 dpi / ppi dan format warna Red, Green, Blue. Peresentasi format warna tersebut adalah Red 100% Green 0% dan Blue 0%, yang hasil akhirnya berupa gambar berwarna merah. warna merah yang ditampilkan karena film gafchromic ini mempunyai respon terhadap chanel merah lebih tinggi dibandingkan dua warna biru dan hijau selain itu warna dasar juga mempunyai tingkat kontras hingga 256 level, dibandingkan dengan warna lainnya. Selain itu format resolusi 75 dpi digunakan karena pada penelitian sebelumnya telah digunakan resolusi yang lebih dari 75 dpi dan hasilnya tidak berbeda jauh seperti format resolusi 75 dpi.

Dengan menggunakan software Image-j gambar dikonversi menjadi nilai piksel (pixel value). Dari kalibrasi yang dilakukan sebelumnya, nilai piksel hasil konversi diubah menjadi nilai dosis menggunakan metode interpolasi. pengubahan nilai piksel menjadi nilai dosis dilakukan di software Excel. Setelah

dosis absolut didapat persentase distribusi dosis dapat ditentukan pula, membandingkan nilai setiap dosis sesuai dengan protocol AAPM TG-43 dosis referensi adalah pada titik 10 mm dari pusat sudut 90° .



Gambar 3.6 film gafchromic setelah dibuat red channel

3.4 Mempresentasikan Secara Visual Persentase Distribusi Dosis Dan Penentuan *Point Of Interest*

Ukuran film yang digunakan berukuran 10 cm x 10 cm, resolusi yang dipakai adalah 75 dpi yang berarti 75 titik dalam setiap inchinya sehingga jika 10 cm dikonversi menjadi inchi, maka jarak setiap titik 0.33867 mm. Kemudian setelah itu men-*zoom out* pada software excels untuk menentukan titik tengah sumber, menentukan titik tengah sumber sebagai titik (0,0) dan dibuat sistem koordinat kartesian. Dengan bantuan software matlab menggunakan aplikasi, kontur yang ada persentase distribusi dosis dapat diubah ke tampilan visual.

Penentuan point of interest dilakukan karena jarak untuk setiap titik bukan merupakan bilangan bulat, untuk memudahkan penerapan hasil ini maka harus menentukan dosis radius jarak adalah bilangan bulat. Kali ini software matlab digunakan untuk menentukan hal ini, sekali lagi dengan metode interpolasi penentuan titik radius bilangan bulat dapat ditentukan dari radius 1 mm – 50 mm untuk setiap sudut 0° - 180° dengan perubahan sudut 10° .

3.5 Penentuan Fungsi geometri dan Fungsi Dosis Radial Dengan AAPM TG-43

Menurut AAPM TG-43 dosimetri sumber brakiterapi meliputi air kerma strength, konstanta laju dosis, fungsi geometri, fungsi dosis radial dan fungsi anisotropi. Pada penelitian ini hanya membahas tentang factor geometri dan fungsi dosis radial.

3.5.1 Fungsi Geometri

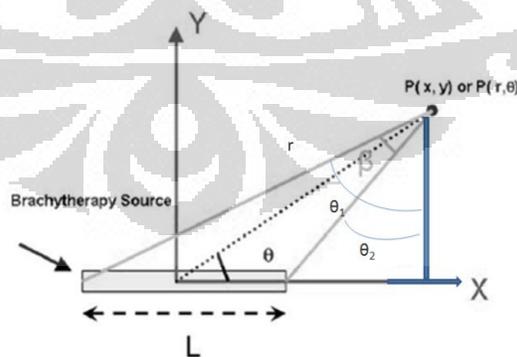
Fungsi geometri $G(r, \theta)$ menunjukkan variasi dari dosis relative karena distribusi spasial sumber hal ini menunjukkan bahwa nilai fungsi geometri yang didapat merupakan faktor koreksi sumber. Fungsi Geometri dapat ditulis :

$$G(r, \theta) = r^{-2} \quad (\text{untuk sumber titik}) \quad (3.1)$$

$$G(r, \theta) = \frac{\beta}{Lr \sin \theta} \quad (\text{untuk sumber garis}) \quad (3.2)$$

Dimana L adalah panjang sumber radiasi dalam cm, β sudut yang dijadikan acuan untuk menentukan sumber sebagai objek 1D atau 2D. Untuk setiap nilai θ , β berbanding terbalik dengan nilai r , β bernilai maksimum pada $\theta = \pi/2$.

Pada penelitian ini karena bentuk sumber yang digunakan berbentuk garis maka yang digunakan dalam perhitungan adalah persamaan untuk sumber garis, dengan nilai L adalah 1 cm karena panjang sumber aktif adalah 1 cm.



Gambar 3.7 Sistem koordinat Yang Digunakan Dalam Perhitungan Fungsi Geometri Jika Sumber Berbentuk garis

Berdasarkan skema pada gambar 3.7, maka persamaan (3.2) menjadi:

$$G(r, \theta) = \frac{\operatorname{atan}\left(\frac{x+L/2}{y}\right) - \operatorname{atan}\left(\frac{x-L/2}{y}\right)}{Lr \sin \theta} \quad (3.3)$$

Setelah nilai β diperoleh melalui perhitungan antara θ_1 dan θ_2 yaitu dengan menggunakan aturan trigonometri ($\arctan \theta_1 - \arctan \theta_2$), selanjutnya β dimasukkan kedalam persamaan (3.2) untuk tiap jarak yang ditentukan.

3.5.2 Fungsi Dosis Radial

Fungsi dosis Radial, $g(r)$, menggambarkan atenuasi dan hamburan foton yang dipancarkan dari sumber brakiterapi. Penentuan fungsi dosis Radial tidak terlepas dari fungsi geometri yang didapat dan fungsi dosis radial didefinisikan sebagai:

$$g(r) = \frac{D\left(r, \frac{\pi}{2}\right)G\left(r_0, \frac{\pi}{2}\right)}{D\left(r_0, \frac{\pi}{2}\right)G\left(r, \frac{\pi}{2}\right)} \quad (3.4)$$

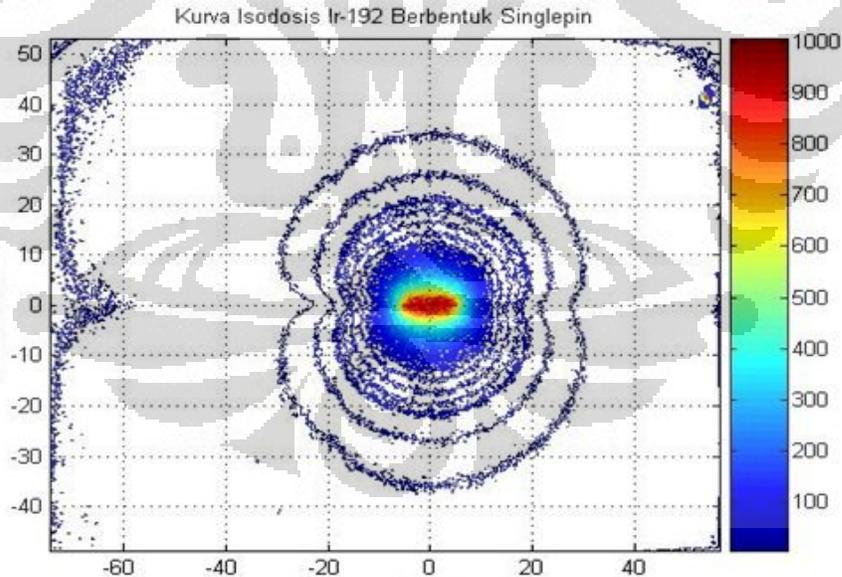
Dimana $D(r, \pi / 2)$ dan $D(r_0, \pi / 2)$ adalah dosis yang didapat dari metode interpolasi sebelumnya pada jarak r sepanjang garis bagi melintang dari sumber (sudut 90°). r_0 adalah jarak referensi dan didefinisikan sebagai 1 cm.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Distribusi Dosis

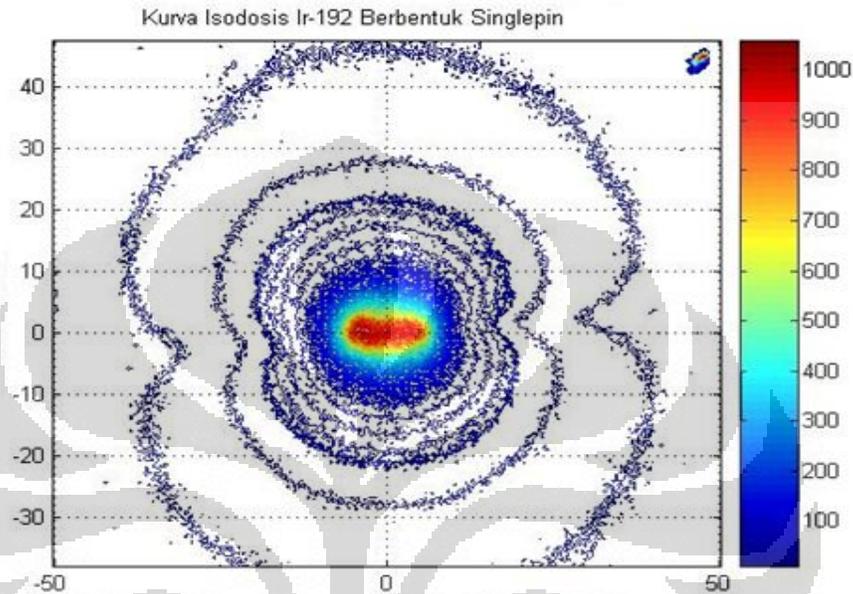
Pada penelitian ini percobaan dilakukan selama 96 jam yang merupakan waktu optimal untuk dapat mengamati perubahan warna film gafchromic dengan jangkauan area yang cukup luas. Penggunaan film gafchromic berukuran 10 cm x 10 cm bertujuan untuk menyelaraskan luas area jangkauan akibat penyinaran oleh sumber Ir-192.

Gambar 4.1 menunjukkan distribusi dosis relatif setiap titik terhadap referensi pada dosimeter film Gafchromic EBT-2 perlakuan di dalam air (data selengkapnya dapat dilihat di lampiran D). Gambar ini merupakan persentase distribusi dosis didapat dengan membandingkan dosis di setiap titik dengan dosis referensi. Dosis referensi menurut AAPM TG43 yaitu dosis pada jarak 1 cm (10 mm) sudut 90° . Pembacaan pada Gafchromic EBT-2 ini setelah ditranspose menghasilkan 388 x 302 data dengan jarak antar titik dalam satuan milimeter.



Gambar 4.1 persentasi distribuis dosis perlakuan didalam air

Sedangkan distribusi dosis dalam udara ditunjukkan pada gambar 4.2 (data selengkapnya dapat dilihat dilampiran II). Hasil pembacaan pada film gafchromic EBT-2 dengan perlakuan ini menghasilkan 294 x 254 data, jarak antara titik dalam satuan milimeter.



Gambar 4.2 persentase distribusi dosis perlakuan di udara

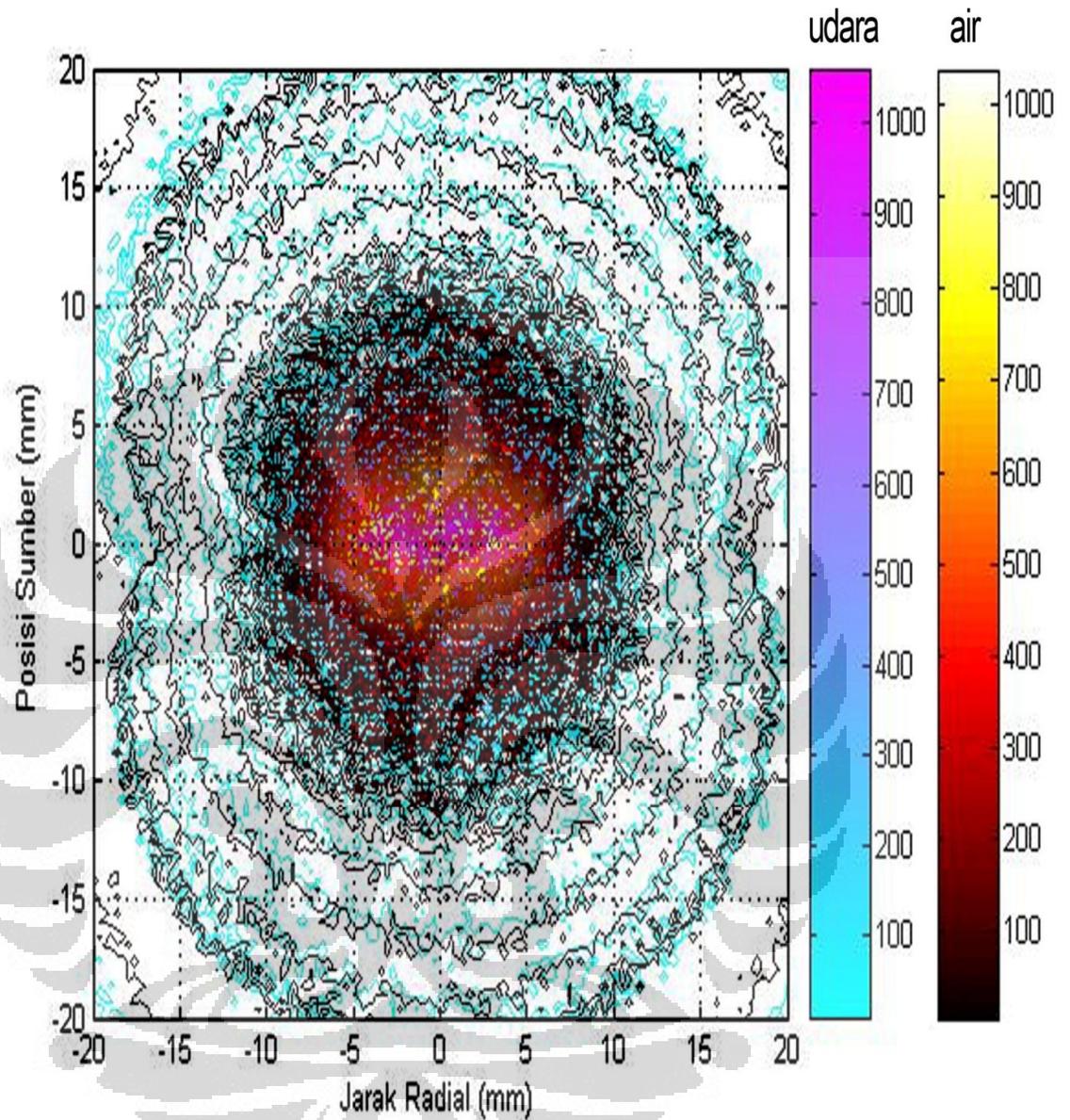
Adanya perbedaan pada plot gambar ini disebabkan karena pada perlakuan di air, foton yang teremisikan dari sumber berinteraksi dengan molekul air yang densitasnya lebih tinggi dibandingkan dengan densitas udara. Kemudian pada perlakuan ini juga, film gafchromic EBT-2 diselubungi oleh plastik sehingga emisi foton sebelum mengenai film akan berinteraksi terlebih dahulu oleh medium plastik (adanya hamburan). Dari hal tersebut diatas maka interaksi foton dengan medium air dan plastik akan menyebabkan hilangnya energi dengan cepat (atenuasi) akibat absorpsi medium. Sedangkan pada perlakuan di udara, foton yang teremisikan dari sumber akan langsung mengenai dosimeter sehingga hamburan dan atenuasi akan lebih kecil dibandingkan dengan perlakuan di dalam air.

Gambar 4.3 merupakan plot dari gambar 4.1 dan 4.2 untuk membandingkan persentase distribusi dosis udara dengan persentase dosis air. Pada persentase distribusi dosis di dalam air untuk persentase yang tertinggi diberi

warna kuning terletak di sumber dan yang terendah diberi warna hitam, sedangkan untuk persentase distribusi dosis udara yang tertinggi diberi warna merah muda dan yang terendah diberi warna biru muda.

Dengan menyamakan skala gambar terlebih dahulu, yaitu menyamakan jangkauan sumbu x dan sumbu y dari -20 mm – 20 mm pada software matlab. Selanjutnya dengan aplikasi pengolah grafik, kedua gambar yaitu perlakuan udara dan perlakuan air dapat disatukan. Pemilihan jangkauan ini dilakukan untuk melihat lebih jelas perbedaan distribusi dosis antara udara dengan air di sekitar sumber.

Tampak pada gambar, plot antara perlakuan di udara dan air saling tumpang tindih. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi dosis di udara tidak berbeda jauh dibandingkan perlakuan di dalam air. Ketidaksimetrisan antara ruas kanan dan ruas kiri pada perlakuan udara yang ditandai dengan terlihat miringnya antara kedua ruas disebabkan karena adanya pengaruh gravitasi yaitu, pada saat pengambilan data selama 96 jam, film akan bergeser sedikit ke bawah karena untuk menempelkan sumber dan dosimeter hanya menggunakan perekat yang tidak permanen dan mudah dibuka.

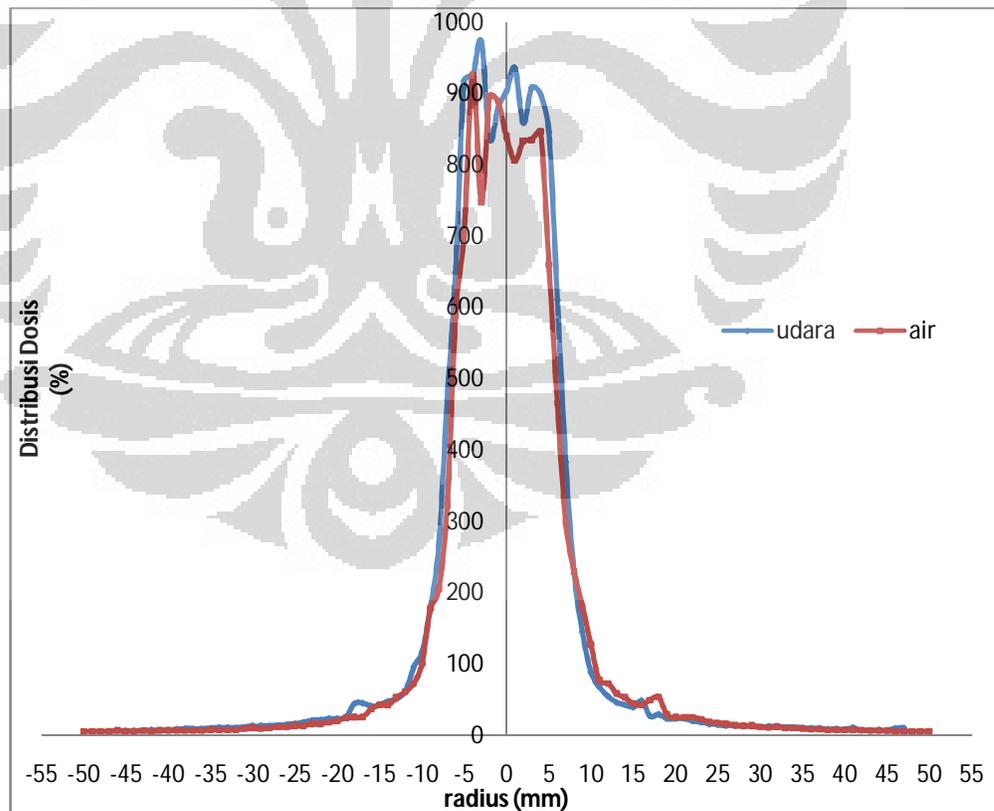


Gambar 4.3 Persentasi distribusis dosis perlakuan di udara dan perlakuan di air

Untuk selanjutnya mengevaluasi persentase dosis pada sumbu vertikal dan sumbu horizontal perlakuan air dan udara dari radius 1 mm – 50 mm, Khusus untuk persentase distribusi dosis perlakuan udara hanya dapat dievaluasi dari radius 1 mm – 47 mm karena terlihat pada gambar 4.2 tidak memungkinkan,

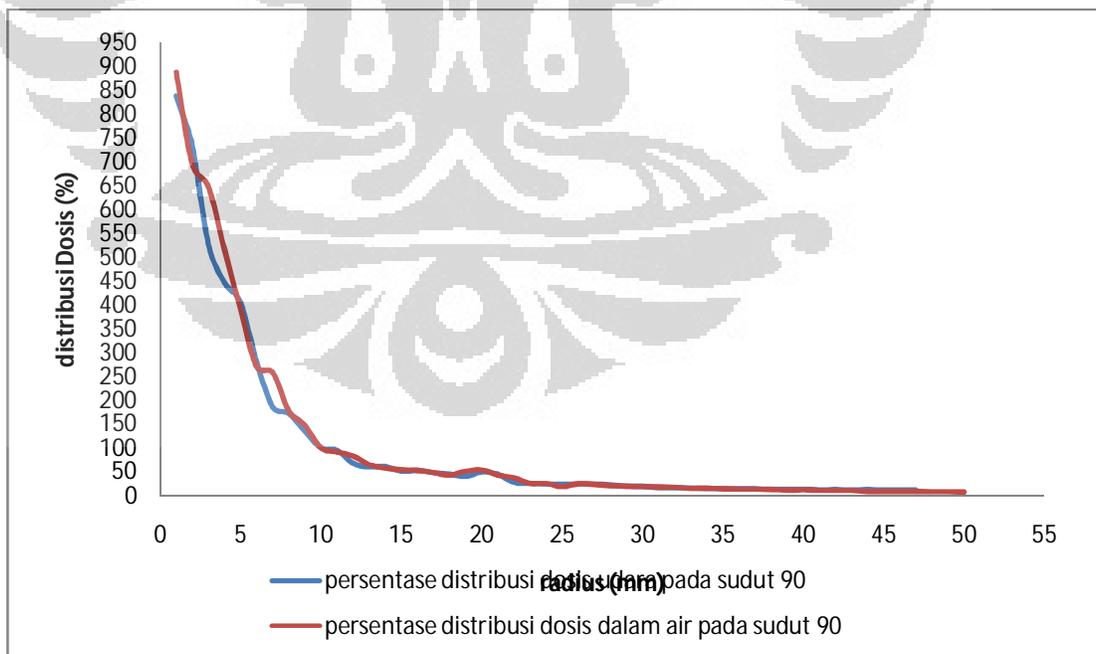
sumbu y hanya sampai kisaran 47 mm. Serta mengevaluasi perbandingan persentase dosis antara perlakuan di udara dan di dalam air pada radius 5 mm, 15 mm, 25 mm, dan 35 mm. Pemilihan radius ini karena pada radius lebih dari 10 mm plot grafik akan menunjukkan pola yang sama dengan radius 15 mm, 25 mm, dan 35 mm (untuk radius 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm dan 45 mm dapat dilihat dilampiran III). Setiap gambar terdapat 19 data yaitu mewakili sudut 0 – 180 dengan perubahan sudut 10 untuk setiap radius.

Gambar 4.4 menunjukkan grafik persentase distribusi dosis pada sumbu horizontal, pada jarak aksis -5 mm – 5 mm terlihat persentase distribusi dosis sangat tinggi setelah itu menurun dengan tajam, ini menunjukkan bahwa jarak aksis tersebut merupakan hasil berkas dari bentuk sumber. Adanya perbedaan pada kuadran pertama dan kuadran kedua antara perlakuan air dan perlakuan udara disebabkan karena energi berkas sumber tidak seragam. Selain itu perbedaan antara perlakuan udara dan perlakuan air tidak terlihat tajam.



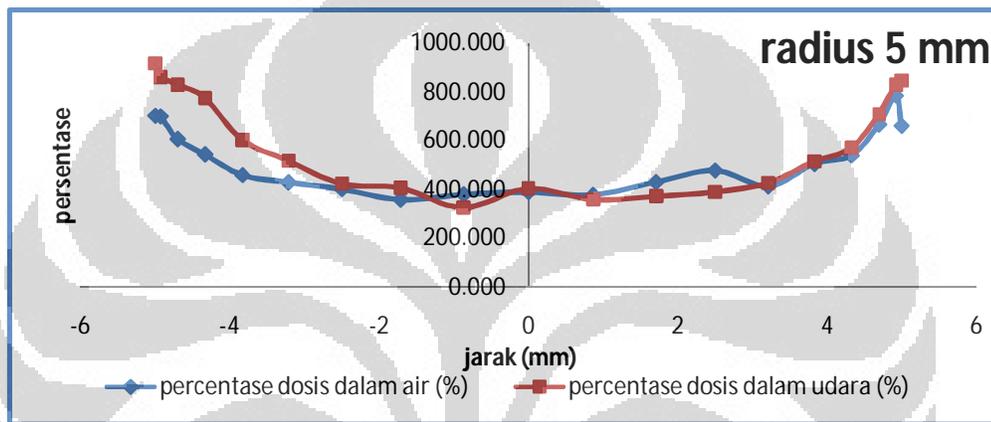
Gambar 4.4 Persentase distribusi dosis pada sumbu horizontal

Gambar 4.5 menunjukkan grafik persentase distribusi dosis pada sumbu horizontal (90°). Pada sumbu horizontal ini terlihat presentase distribusi dosis akan menurun dengan tajam secara eksponensial pada radius kurang dari 10 mm lebih dari 10 mm kurva akan turun cenderung linear. Penurunan yang signifikan ini menandakan pada radius-radius kurang dari 10 mm tersebut yang terjadi adalah interaksi langsung dengan radiasi primer (sinar gamma) sumber lebih besar pengaruhnya dibandingkan dengan interaksi radiasi sekunder (elektron). Energi yang diabsorpsi oleh film dari foton primer akan lebih besar dibandingkan absorpsi dari hamburan dikarenakan energy yang dibawa oleh foton primer lebih besar. Sedangkan untuk radius-radius yang lebih besar dari 10 mm, penurunan tidak terjadi secara signifikan, karena pada radius-radius ini interaksi lebih dominan oleh radiasi sekunder yang terjadi akibat interaksi foton dengan material-material lain selain film sebelum diabsorpsi oleh film dibandingkan dengan radiasi primer yang energinya sudah diubah sebagian besar akibat interaksi-interaksi dengan partikel-partikel selain film. Disini juga terlihat bahwa perbedaan persentase dosis pada sumbu horizontal antara perlakuan air dan perlakuan udara tidak terlalu tajam.



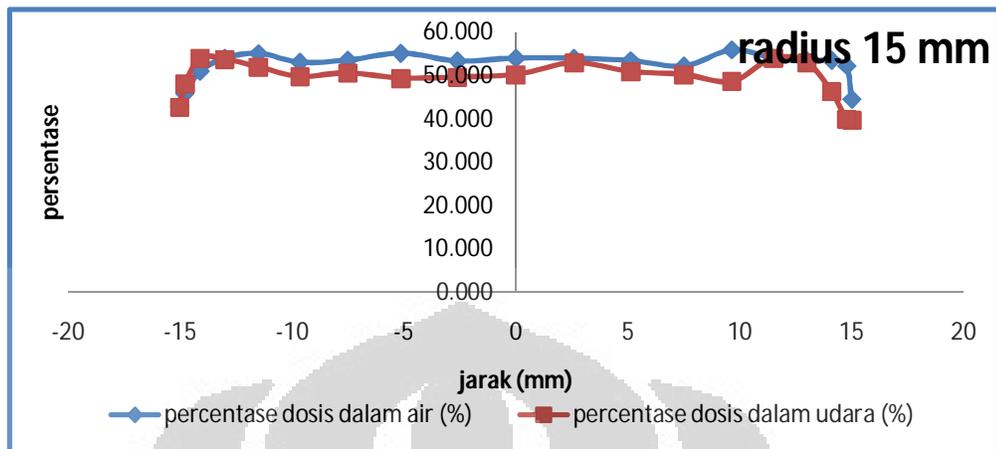
Gambar 4.5 Persentase distribusi dosis pada sumbu vertikal

Gambar 4.6 merupakan persentase distribusi dosis pada radius 5 mm dengan sudut 0° - 180° dengan perubahan 10° , terlihat persentase dosis pada pinggir kanan dan kiri (sudut 0° dan sudut 180°) grafik tinggi, hal ini karena pada radius ini masih merupakan daerah sumber, dari data yang di dapat pada radius ini jangkauan persentase pada perlakuan udara lebih lebar dibandingkan dengan jangkauan persentase dosis didalam air, yaitu diudara 326%-918% dan perlakuan di air antara 358%-785% .

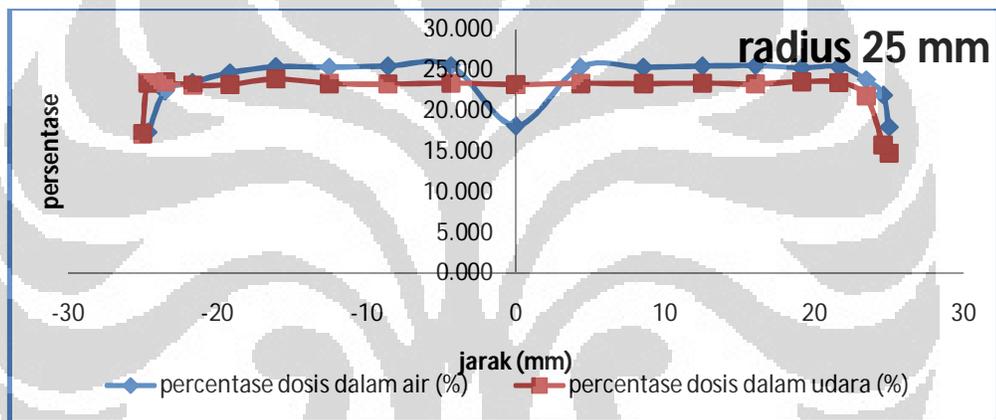


Gambar 4.6 Perbandingan persentase dosis di air dan udara pada radius 5 mm

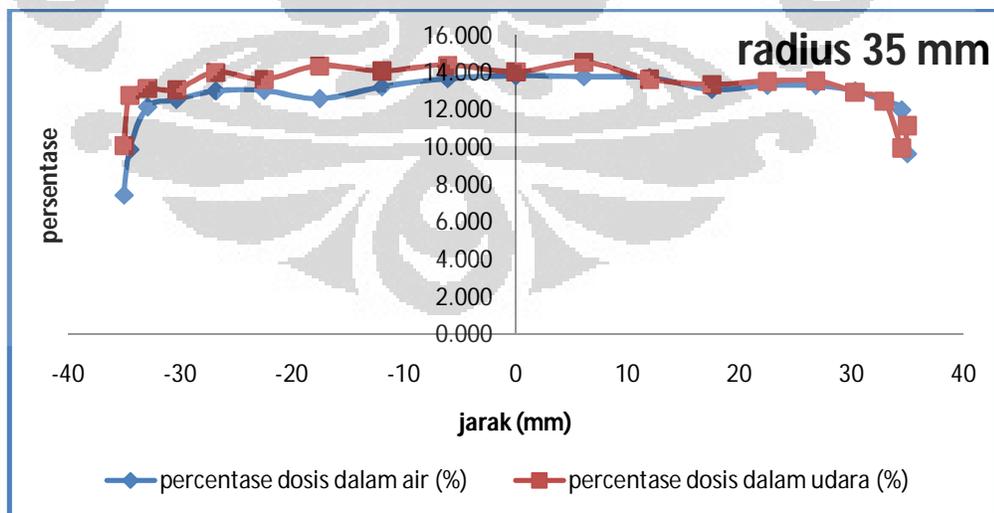
Gambar 4.7, gambar 4.8 dan gambar 4.9 merupakan perbandingan persentase distribusi dosis pada radius 15 mm, 25 mm, dan 35 mm. Pada radius-radius ini terlihat kurva grafik cenderung mendatar dan menurun pada pinggir grafik. Dari data yang didapat pada radius 15 milimeter jangkauan persentase pada perlakuan udara pada radius ini lebih besar dibandingkan dengan jangkauan persentase dosis didalam udara, yaitu diudara 39%-53% dan perlakuan di air antara 42%-53%. Pada radius 25 milimeter jangkauan persentase pada radius ini hampir sama antara perlakuan udara dan perlakuan di dalam air, yaitu di udara 14%-23% dan perlakuan di air antara 13%-25%. Radius 35 milimeter. Jangkauan persentase pada radius ini hampir sama antara perlakuan udara dan perlakuan di dalam, yaitu di udara 9%-14% dan perlakuan di air antara 7%-13%.



Gambar 4.7 Perbandingan persentase dosis di air dan udara pada radius 15 mm



Gambar 4.8 Perbandingan persentase dosis di air dan udara pada radius 25 mm



Gambar 4.9 Perbandingan persentase dosis di air dan udara pada radius 35 mm

4.2 Fungsi geometri dan Fungsi Dosis Radial

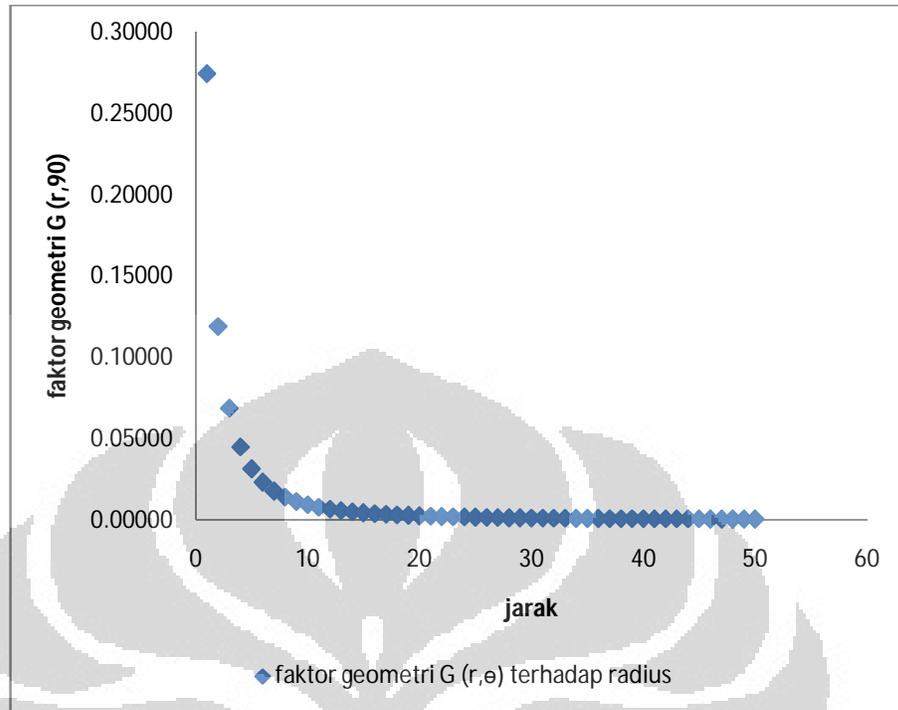
Dalam protokol AAPM TG-43 ada tiga faktor koreksi yang dibutuhkan untuk menentukan distribusi dosis yaitu fungsi geometri, fungsi dosis radial, dan fungsi anisotropi. Tiga faktor tersebut ditentukan terutama dari bentuk sumber aktif yang digunakan dalam suatu perhitungan. Pada penelitian ini hanya menentukan fungsi geometri dan fungsi dosis radial.

4.2.1 Fungsi geometri

Fungsi geometri adalah faktor koreksi sumber pada metode AAPM TG-43. Fungsi geometri yang terdapat pada perlakuan udara akan sama dengan fungsi geometri yang terdapat pada perlakuan air di setiap titik (point of interest) $P(r,\theta)$ jika radius dan sudut pada perlakuan air dan udara sama karena panjang dan jenis sumber yang digunakan pada kedua perlakuan sama. Fungsi geometri juga menunjukkan adanya distribusi spasial dari sumber yang berbentuk kawat.

Fungsi geometri yang didapat adalah dengan memperhitungkan hanya mengenai dimensi sumber dan letak dari titik yang diinginkan yaitu untuk sumber berbentuk titik adalah kuadrat terbalik dari jarak dan jika sumber berbentuk garis maka akan memperhitungkan sudut yang terbentuk dari ujung - ujung sumber terhadap titik yang diinginkan walaupun begitu dimensi satuan dari sumber berbentuk garis tetap sama seperti sumber berbentuk titik.

Gambar 4.10 menunjukkan fungsi geometri pada sumbu vertikal (sudut 90°). terlihat terjadi penurunan secara eksponensial dan mendekati nilai nol pada radius mendekati 50 mm dan menurun tajam pada radius kurang dari 10 mm. Hal ini menunjukkan bahwa di dekat sumber, setiap titik pada sumber memberikan peranan dalam menentukan dosis yang akan diterima pada setiap titik, sedangkan jika titik semakin jauh dari sumber maka peranan sumber yang berbentuk batang akan menjadi terlihat seperti satu sumber yang berbentuk titik sehingga akan dapat didekatkan bahwa sumber menyerupai titiklah yang mempunyai peranan dalam memberikan pengaruh terhadap film maka faktor koreksi dari sumber akan kecil.



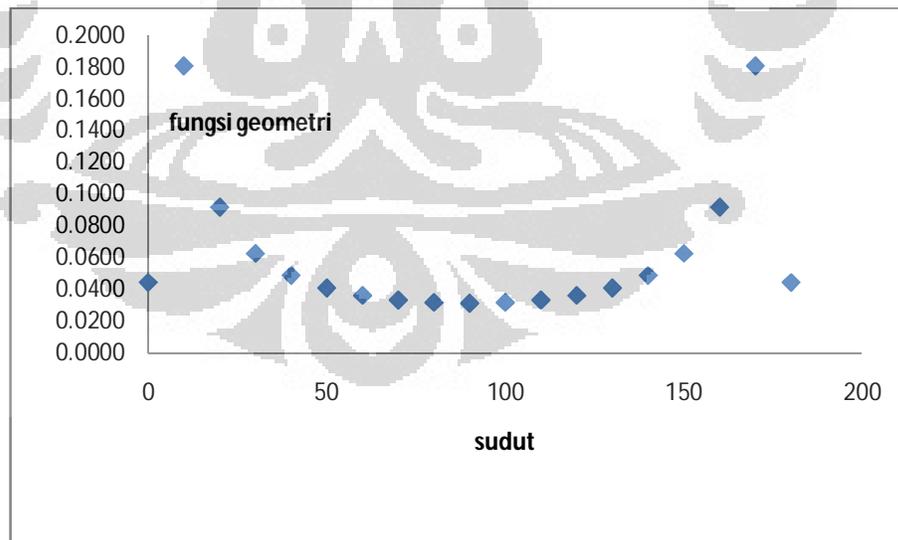
Gambar 4.10 Fungsi geometri pada sumbu vertikal

Sedangkan pada Tabel 4.1 menunjukkan nilai fungsi geometri berdasarkan radius dan sudut yang mempengaruhinya. Terlihat pada radius yang jauh dari sumber nilai fungsi geometrinya lebih mendatar di semua sudut dibandingkan dengan yang dekat dengan sumber. Hal ini menunjukkan bahwa disuatu radius dengan variasi sudut yang berbeda pada radius yang jauh dari sumber, karena suatu radius dengan variasi sudut berbeda akan mendapat pengaruh titik sepanjang sumber terlihat hampir sama. Untuk radius yang berada didekat sumber akan terlihat berbeda jauh. Perbedaan fungsi geometri yang didapat karena, pada radius ini akan mendapat pengaruh dari sumber yang berbeda tergantung dari letak titik-titik tersebut terhadap sumber sebagai contoh jika titik yang diinginkan berada pada sudut 90^0 akan tegak lurus terhadap sumber dan jika selain titik yang berada di sudut 90^0 akan berbeda pula secara geometri terhadap sumber.

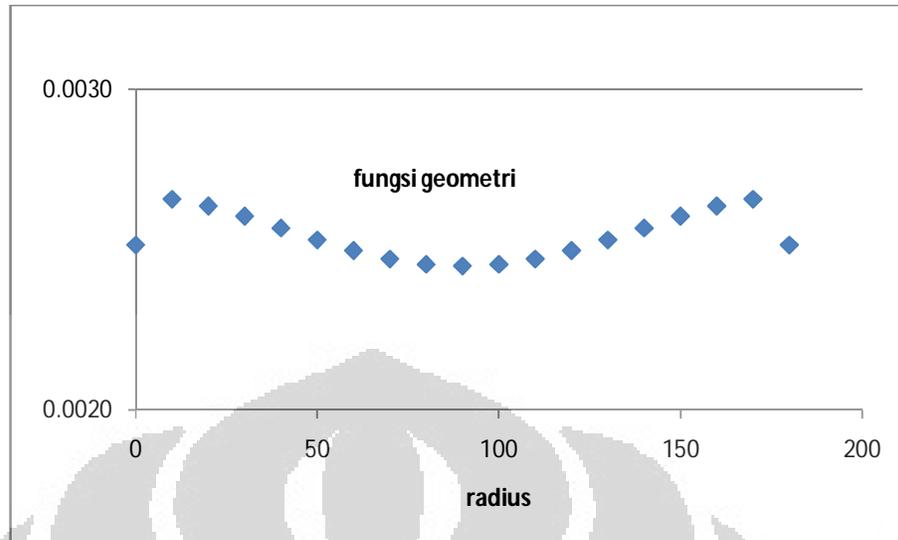
Table 4.1 Fungsi geometri berdasarkan radius dan sudut

sudut	faktor geometri berdasarkan radius (r)								
	5 mm	10 mm	15 mm	20 mm	25 mm	30 mm	35 mm	40 mm	45 mm
0	0.0444	0.0103	0.0045	0.0025	0.0016	0.0011	0.0008	0.0006	0.0005
10	0.1809	0.0131	0.0050	0.0027	0.0017	0.0011	0.0008	0.0006	0.0005
20	0.0919	0.0125	0.0049	0.0026	0.0017	0.0011	0.0008	0.0006	0.0005
30	0.0628	0.0118	0.0048	0.0026	0.0016	0.0011	0.0008	0.0006	0.0005
40	0.0489	0.0110	0.0047	0.0026	0.0016	0.0011	0.0008	0.0006	0.0005
50	0.0410	0.0104	0.0045	0.0025	0.0016	0.0011	0.0008	0.0006	0.0005
60	0.0363	0.0099	0.0044	0.0025	0.0016	0.0011	0.0008	0.0006	0.0005
70	0.0334	0.0095	0.0044	0.0025	0.0016	0.0011	0.0008	0.0006	0.0005
80	0.0319	0.0093	0.0043	0.0025	0.0016	0.0011	0.0008	0.0006	0.0005
90	0.0314	0.0093	0.0043	0.0024	0.0016	0.0011	0.0008	0.0006	0.0005
100	0.0319	0.0093	0.0043	0.0025	0.0016	0.0011	0.0008	0.0006	0.0005
110	0.0334	0.0095	0.0044	0.0025	0.0016	0.0011	0.0008	0.0006	0.0005
120	0.0363	0.0099	0.0044	0.0025	0.0016	0.0011	0.0008	0.0006	0.0005
130	0.0410	0.0104	0.0045	0.0025	0.0016	0.0011	0.0008	0.0006	0.0005
140	0.0489	0.0110	0.0047	0.0026	0.0016	0.0011	0.0008	0.0006	0.0005
150	0.0628	0.0118	0.0048	0.0026	0.0016	0.0011	0.0008	0.0006	0.0005
160	0.0919	0.0125	0.0049	0.0026	0.0017	0.0011	0.0008	0.0006	0.0005
170	0.1809	0.0131	0.0050	0.0027	0.0017	0.0011	0.0008	0.0006	0.0005
180	0.0444	0.0103	0.0045	0.0025	0.0016	0.0011	0.0008	0.0006	0.0005

Gambar 4.11 dan gambar 4.12 yang merupakan perbandingan dari nilai fungsi geometri antara radius yang terdekat sumber yaitu 5 mm dan yang jauh dari sumber yaitu pada radius 20 mm. pengambilan radius ini dikarenakan nilai fungsi geometri dengan variasi sudut yang berbeda masih terlihat adanya variasi nilai sedangkan pada radius yang lebih dari ini nilai fungsi geometri pada berbagai variasi sudutnya terlihat sama.



Gambar 4.11 fungsi geometri pada radius 5 mm dengan variasi sudut 0°-180°.

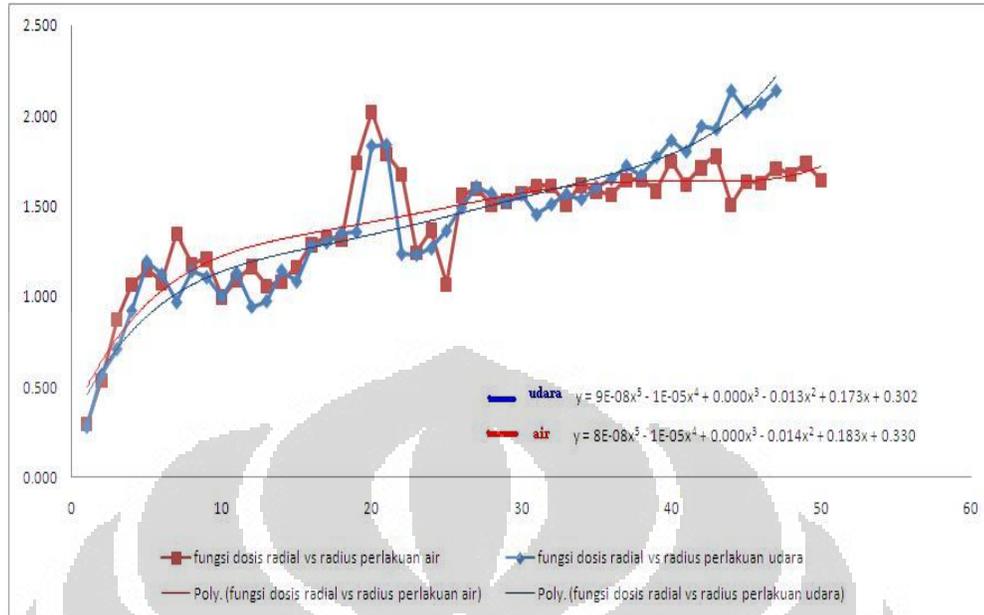


Gambar 4.12 fungsi geometri pada radius 20 mm dengan variasi sudut 0° - 180° .

4.2.2 Fungsi Dosis Radial

Fungsi dosis radial merupakan faktor koreksi yang menunjukkan efek atenuasi dan hamburan pada bidang vertikal, fungsi dosis radial juga dipengaruhi oleh fungsi geometri. Pada gambar 4.13 merupakan perbandingan antara perlakuan di air dan di udara (data dapat dilihat pada lampiran IV). Gambar tersebut merupakan fungsi geometri pada berbagai variasi radius dengan sudut $\Pi/2$ karena fungsi dosis radial hanya berlaku pada kondisi sudut $\Pi/2$. Perlakuan di air terdapat 50 data karena batas sumbu vertikal yang terdapat pada gambar 4.1 persentase distribusi dosis pada medium air memungkinkan untuk sampai pada radius 50 mm. sedangkan pada perlakuan udara hanya 47 data (gambar 4.2) karena pada radius ini tidak memungkinkan untuk mencapai radius yang sama dengan radius air.

Pada gambar 4.13 terlihat bahwa Fungsi dosis radial yang didapat antara perlakuan di air dan udara tidak berbeda secara signifikan hal itu terlihat dari persamaan garis pada gambar ini, pada gambar juga terlihat semakin kecil radius maka akan cenderung semakin besar atenuasi yang disebabkan oleh medium dan akan semakin besar juga hamburan yang akan terjadi.



Gambar 4.13 perbandingan fungsi dosis radial di air dan udara

Nilai fungsi dosis radial pada penelitian ini hingga radius 50 mm, jika dibandingkan dengan penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya fungsi dosis radial akan naik pada radius-radius awal dan jika mencapai suatu titik puncak nilainya akan turun hingga mendekati nilai nol, hal ini menunjukkan bahwa efek hamburan yang menyebabkan energi melemah (atenuasi) akan semakin besar pada radius-radius awal dan akan tiba pada suatu puncak dimana efek hamburan akan mencapai puncaknya kemudian akan turun setelah itu hal ini berarti efek dari hamburan akan melemah karena energi pada radius tersebut juga akan semakin kecil. Sedangkan pada penelitian ini pada radius 50 mm belum menunjukkan adanya penurunan fungsi dosis radial.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

- Perbandingan persentase antara perlakuan air dan udara tidak terlalu berbeda, penurunan persentase secara eksponensial yang tajam terjadi pada radius kurang dari 10 mm, setelah itu turun secara linear tetapi tidak terlalu tajam.
- Persentase pada suatu radius akan cenderung sama pada berbagai variasi sudut dan menurun pada sudut mendekati 0° dan 180° .
- Fungsi geometri yang didapat akan semakin kecil jika titik itu jauh dari sumber, yang menggambarkan bahwa titik dosis yang menjauhi sumber terlihat seperti bentuk titik
- Fungsi dosis radial pada radius lebih dari 10 mm akan cenderung bernilai lebih dari 1, hal ini menunjukkan hamburan dan atenuasi pada radius tersebut lebih besar dibandingkan dengan titik dekat sumber.

5.2 Saran

- Perlu adanya kalibrasi ulang pada data kalibrasi untuk mengubah nilai pixel value ke dalam dosis, karena range data sangat lebar.
- Memperbaiki bentuk sumber karena dimensi ukuran sumber yang digunakan tidak terlalu baik, adanya *free space* sebesar 2 mm yang terletak diujung kanan-kiri antara sumber aktif dan kapsul sumber, karena jarak ini dianggap terlalu besar dan akan terjadi absorpsi besar sehingga energi yang terdeposit ke film akan berbeda dengan sekeliling sumber lainnya

DAFTAR REFERENSI

- AAPM TG-43 Update Report. A revised AAPM protocol for brachytherapy dose calculations. 2007. Med Phys.
- Hidayanto, Eko. "Jurnal Peluruhan Gamma". 2009. Universitas Diponegoro.
- International Specialty Products group. "Gafchromic EBT2: Self-Developing Film For Radiotherapy Dosimetry". 2009. ISP.
- Johns HE and Cunningham JR, (1983). The Physics of Radiology 4th Edition. Charles C Thomas Publisher.
- J.P. Seuntjens, "Dosimetric Principles, Quantity And Units: IAEA slide for tutor chapter 2". 2003. IAEA.
- N, Suntharalingam, E.B. Podgorsak, H. Tolli. "Brachytherapy, Physical And Clinical Aspect: IAEA Slide For Tutor Chapter 13". 2003. IAEA.
- Soejoko, Djarwani S. "Brakhiterapi, Program Studi Fisika Medis Dan Biofisika UI". 2006. Depok.
- IOP Science group, Radial Dose Functions brachytherapy sources: an EGS4 Monte Carlo Study". 2000. Phys Med
- <http://aktifisika.wordpress.com/sifat-partikel-dari-cahaya-efek-compton/> diunduh tanggal 22 februari 2010.
- <http://digilib.unsri.co.id/> diunduh tanggal 22 februari 2010.
- <http://kalbe.co.id/> diunduh tanggal 25 februari 2010.
- <http://portalradiografi.web.id/> diunduh tanggal 25 februari 2010.

LAMPIRAN I
Persentase Distribusi dosis Pada Udara

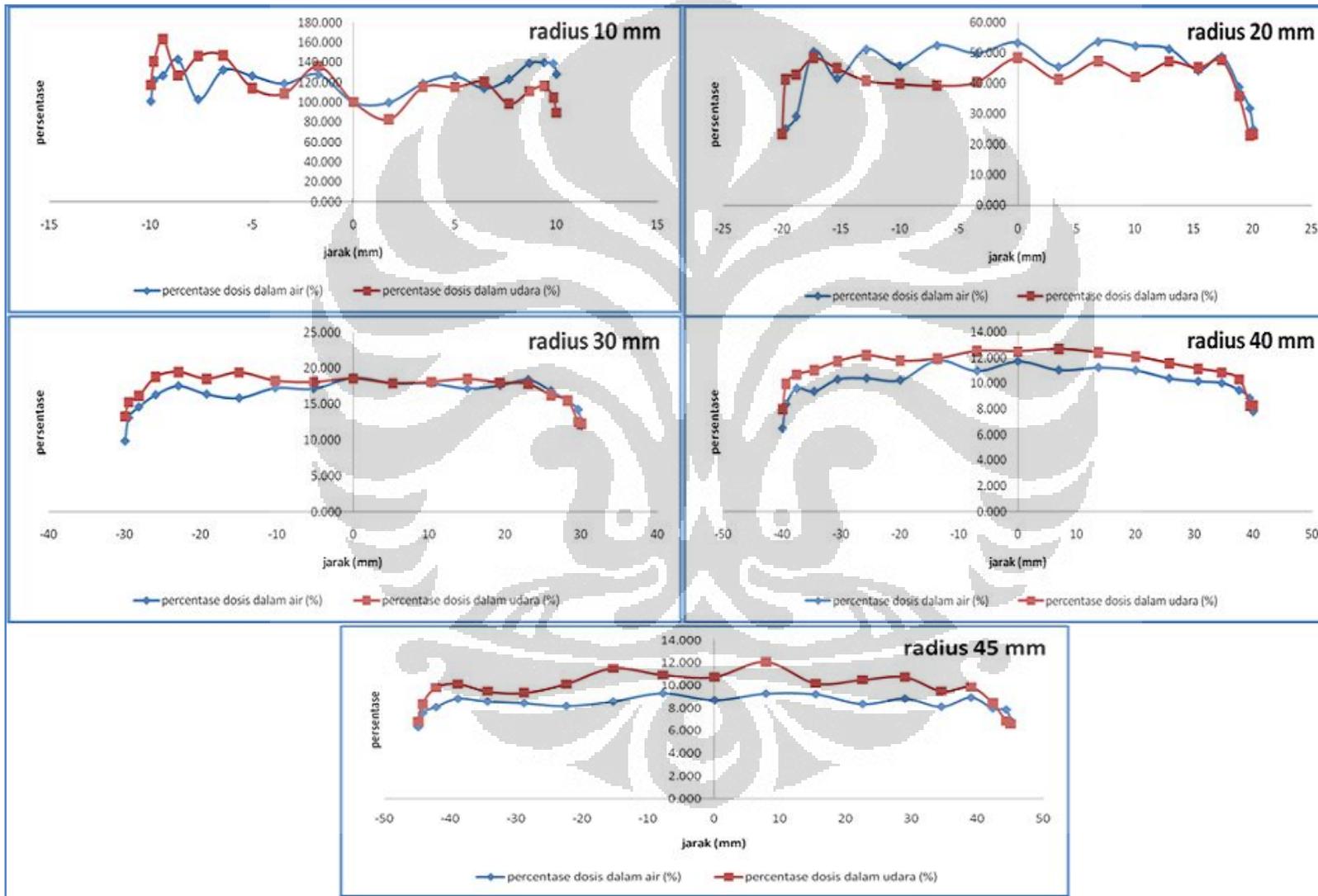
r (mm)	Sudut																		
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
1	936.63	959.06	958.28	924.10	886.30	891.03	882.08	872.93	855.21	837.50	891.37	906.55	875.03	850.69	886.61	911.02	924.58	909.09	881.78
2	859.49	911.76	905.76	837.50	795.34	820.34	757.63	700.02	859.49	732.10	744.57	790.12	696.05	888.09	838.88	918.19	889.28	859.49	837.50
3	908.97	919.23	858.95	824.74	762.97	684.14	579.37	583.22	594.33	527.04	590.59	576.07	634.22	790.83	737.69	846.50	923.65	951.59	974.01
4	899.86	888.39	868.59	672.52	597.34	521.28	469.23	555.77	465.15	446.00	429.63	462.04	533.88	565.83	704.81	890.82	899.86	957.10	927.29
5	846.29	830.50	710.27	571.07	515.20	427.77	390.89	372.58	359.79	404.34	326.58	407.09	424.05	518.22	603.98	774.84	829.98	862.16	918.19
6	611.27	624.19	527.52	449.98	376.43	314.81	313.87	287.42	270.44	280.25	280.74	306.97	345.03	402.43	423.91	558.40	634.14	630.71	649.85
7	383.95	395.49	392.27	357.81	301.49	271.55	245.44	252.55	229.90	185.41	204.37	264.00	294.53	333.10	304.63	387.57	390.81	442.91	471.33
8	227.43	249.59	253.17	220.97	194.37	228.04	199.29	161.77	181.79	171.91	162.25	175.57	205.72	215.35	280.05	278.47	306.88	277.64	266.59
9	144.94	187.01	164.41	153.79	160.67	134.43	156.31	132.89	141.58	134.61	154.35	138.91	170.41	164.01	176.10	213.65	215.35	170.86	179.89
10	89.13	104.50	116.21	111.11	98.21	120.31	115.15	115.10	82.50	100.00	136.24	108.73	114.21	146.72	146.23	126.62	163.32	140.62	117.24
11	68.47	69.64	82.68	86.82	86.41	82.14	65.40	96.85	76.24	94.67	82.14	93.71	86.69	107.65	82.94	113.21	110.64	95.86	95.99
12	55.08	54.61	63.50	73.46	64.41	71.08	64.69	68.22	71.78	66.98	74.51	69.59	77.81	72.97	79.58	75.32	84.03	75.80	62.07
13	46.59	48.78	55.83	56.82	58.41	61.99	60.85	61.44	58.44	59.42	58.21	59.11	60.92	60.93	59.12	69.65	68.97	59.40	51.43
14	43.03	43.36	49.20	54.57	55.31	54.99	53.68	55.08	53.34	60.43	56.92	57.47	57.48	57.60	56.18	57.78	49.95	51.86	47.84
15	39.64	39.85	46.21	52.94	53.97	48.58	50.18	50.84	52.89	50.18	49.62	49.33	50.57	49.73	51.91	53.75	53.98	48.06	42.70
16	48.65	44.08	40.10	42.71	43.13	48.45	48.82	49.73	49.27	52.30	49.16	52.39	48.65	48.75	48.00	43.23	47.11	40.89	40.98
17	27.09	40.83	40.19	40.98	40.03	45.13	43.11	40.79	44.69	47.17	44.15	43.59	45.65	44.13	43.47	43.95	39.94	44.25	45.18
18	29.34	31.04	46.66	40.62	39.14	39.76	39.28	38.89	39.65	43.97	41.66	39.76	42.10	43.35	39.98	39.68	39.94	43.38	44.58
19	23.21	23.33	37.38	44.39	42.80	38.79	39.28	48.84	39.82	39.64	40.88	40.75	39.08	39.11	38.79	39.29	41.76	45.13	26.47
20	23.39	22.97	35.80	47.66	45.20	47.19	42.22	47.25	41.41	48.42	40.52	39.32	39.91	40.98	45.00	48.49	42.90	41.42	23.50
21	23.73	22.80	25.04	26.36	27.49	48.66	37.46	42.03	42.60	44.16	47.45	45.06	47.36	48.25	48.42	43.05	27.68	25.99	23.32
22	20.32	22.14	23.29	25.28	25.60	32.59	26.65	28.57	35.12	27.09	41.27	44.48	46.85	40.82	41.35	26.71	24.21	23.67	21.58
23	18.66	19.78	23.51	23.20	23.28	23.42	23.72	24.42	23.32	24.71	23.72	27.31	27.09	31.62	24.13	23.49	23.98	23.12	21.05
24	15.88	18.66	22.97	23.15	23.34	23.28	23.18	24.10	23.21	23.39	23.44	23.60	25.85	24.66	23.61	23.19	23.27	23.65	18.56
25	14.81	15.78	21.79	23.50	23.59	23.28	23.41	23.33	23.38	23.23	23.42	23.28	23.39	23.93	23.22	23.13	23.54	23.46	17.19
26	13.86	14.48	19.84	21.23	23.48	22.82	22.55	22.85	23.67	23.50	23.66	23.54	23.44	23.18	23.67	23.18	23.49	22.71	15.16
27	13.87	13.95	19.28	20.52	21.68	23.39	22.28	23.25	23.16	23.50	22.49	23.03	23.72	23.51	22.72	22.69	22.10	20.24	14.41
28	13.23	12.92	17.80	19.38	21.49	19.70	19.81	21.66	19.99	21.36	21.54	21.31	21.60	23.34	23.05	20.82	18.90	18.00	13.62
29	13.19	12.51	15.72	16.75	19.03	19.70	20.53	19.55	19.43	19.32	19.32	19.78	20.42	21.84	21.32	19.13	18.71	16.20	13.19
30	12.25	12.51	15.50	16.25	17.83	18.00	18.53	18.12	17.94	18.58	18.09	18.28	19.44	18.56	19.51	18.83	16.14	15.28	13.26
31	12.52	11.41	14.53	15.53	15.93	16.57	17.56	16.13	16.16	16.17	16.86	17.17	18.38	18.00	17.73	17.52	15.67	14.66	12.01
32	12.89	11.45	13.25	15.52	15.13	15.48	16.17	16.48	15.35	15.78	15.13	15.44	16.26	16.62	16.39	15.16	14.87	14.08	11.31
33	11.96	10.95	13.98	14.36	14.99	15.78	14.84	14.83	14.09	15.39	15.19	15.31	15.16	15.51	15.80	14.98	14.39	13.00	10.72
34	11.84	10.73	13.88	13.59	13.91	13.47	13.81	13.77	14.37	14.25	13.87	14.33	14.35	13.56	16.13	14.02	14.18	12.52	10.76
35	11.18	9.98	12.48	12.95	13.55	13.55	13.36	13.64	14.56	14.04	14.41	14.09	14.38	13.64	14.03	13.10	13.15	12.81	10.12
36	10.31	9.64	11.91	13.07	13.25	13.07	13.61	13.61	13.27	13.64	13.12	13.28	13.13	13.04	13.26	13.65	12.55	11.85	9.30
37	10.03	9.13	11.56	12.33	12.14	12.53	13.05	12.79	13.39	13.48	13.21	12.86	12.95	13.12	13.27	12.81	12.39	11.27	9.35
38	8.34	9.09	11.20	11.80	12.05	12.25	12.29	12.79	12.63	12.39	13.13	12.42	12.42	12.59	12.77	12.58	12.06	11.35	9.75
39	9.11	8.06	10.70	12.07	12.10	12.21	12.68	12.61	12.29	12.48	12.70	12.39	11.82	11.82	12.31	12.47	11.73	10.90	8.27
40	8.26	8.23	10.30	10.84	11.13	11.56	12.09	12.40	12.68	12.48	12.51	11.92	11.76	12.18	11.71	11.03	10.67	9.96	7.98
41	10.72	7.43	9.16	10.29	11.00	11.58	11.80	11.69	12.14	11.50	12.34	11.61	11.41	11.36	11.09	10.86	10.79	9.59	7.94
42	7.19	7.96	9.64	10.62	10.72	10.75	11.09	11.25	11.62	11.81	11.91	11.71	11.28	10.16	10.95	10.45	10.29	8.78	7.40
43	7.25	7.44	9.00	10.19	10.32	11.12	11.45	11.11	11.09	11.18	12.15	10.84	11.23	10.95	10.17	10.58	9.81	9.08	7.04
44	7.28	7.41	8.68	9.52	10.17	10.66	10.66	10.91	11.09	11.85	11.13	10.80	10.21	9.34	9.79	10.07	9.86	9.03	7.04
45	6.57	6.85	8.44	9.84	9.48	10.72	10.48	10.16	12.06	10.72	10.90	11.49	10.10	9.33	9.46	10.12	9.79	8.34	6.79
46	10.02	6.98	8.59	9.25	9.03	10.15	10.19	10.57	11.37	10.49	11.00	10.99	10.72	9.34	8.87	8.43	9.58	8.30	6.79
47	10.58	6.89	8.15	7.97	9.33	9.46	9.59	10.22	10.67	10.39	10.83	10.63	9.53	9.78	8.23	8.51	8.66	7.52	6.23

LAMPIRAN II
Persentase Distribusi dosis Pada Air

r (mm)	sudut																		
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
1	806.70	848.59	925.04	986.25	1036.17	1006.35	954.99	903.54	889.08	887.26	876.02	879.74	899.54	930.79	948.76	896.06	833.96	827.29	890.35
2	833.56	785.49	919.87	926.56	947.54	923.81	858.09	767.43	691.78	694.65	779.07	760.53	714.24	814.68	869.40	913.61	922.69	934.63	897.39
3	835.72	969.98	886.91	862.47	807.69	722.65	620.94	580.79	639.71	647.49	645.39	650.91	611.01	645.10	803.49	879.52	821.88	914.83	748.25
4	846.77	828.44	792.47	705.64	645.85	546.01	493.48	569.24	473.09	515.92	450.28	468.44	504.04	510.78	567.34	681.13	781.85	824.18	927.77
5	660.99	785.95	667.82	540.63	505.86	413.39	478.34	430.40	378.57	389.72	379.67	358.58	401.83	430.10	459.67	544.54	607.20	700.63	703.03
6	466.86	571.38	561.03	340.24	378.24	300.98	316.50	253.18	253.63	270.06	333.91	308.22	341.77	334.93	389.95	426.37	443.41	514.62	589.22
7	299.81	341.95	300.15	291.08	310.34	256.44	278.52	269.87	236.63	257.66	225.12	253.22	253.59	264.97	332.52	306.95	364.64	345.00	322.11
8	230.04	292.11	259.97	229.58	203.95	179.26	215.79	226.71	203.66	177.59	173.38	185.76	199.50	191.49	212.14	209.93	303.55	248.26	205.05
9	180.98	203.36	188.36	190.47	168.47	161.96	154.58	151.08	158.19	146.88	155.95	148.36	166.85	166.97	179.43	189.60	152.94	200.28	177.87
10	128.07	138.70	139.71	139.11	123.14	113.95	126.16	118.80	99.76	100.00	128.02	118.63	126.39	132.36	102.79	142.98	126.74	121.82	101.07
11	77.15	95.20	115.73	105.39	104.57	94.10	100.89	101.46	93.83	91.21	96.67	95.76	99.25	99.27	134.56	101.67	93.04	87.01	73.36
12	73.15	71.49	88.18	80.11	79.89	78.58	78.68	73.74	73.61	82.88	81.05	76.41	83.18	74.65	85.64	83.31	88.66	64.20	61.48
13	58.61	63.53	70.13	68.66	64.80	72.40	62.67	64.99	65.52	64.74	61.39	67.73	65.45	71.86	68.44	68.82	66.36	58.15	52.81
14	52.60	57.12	55.53	64.94	60.71	61.29	58.45	61.15	62.58	57.33	59.29	61.55	64.48	62.59	59.16	60.64	57.19	52.35	42.72
15	44.44	52.20	53.48	53.33	53.96	55.92	52.18	53.45	53.94	53.98	53.33	55.13	53.53	53.06	55.07	53.96	50.99	45.80	42.89
16	43.31	45.98	46.10	49.40	52.04	49.42	50.93	49.31	52.25	52.65	53.47	51.37	51.13	47.06	52.81	53.68	51.67	45.44	37.18
17	49.63	43.50	44.77	43.48	43.96	45.79	42.99	44.67	44.44	48.01	44.35	45.50	43.57	45.48	43.90	46.21	43.35	49.96	26.12
18	53.71	50.32	42.92	42.61	42.48	43.25	42.63	43.62	45.33	42.82	42.62	42.20	44.16	42.74	43.38	44.13	49.81	43.45	25.16
19	29.60	48.05	47.97	46.31	43.95	51.04	42.29	44.66	44.27	50.92	47.20	44.33	48.04	47.63	42.37	43.45	35.47	25.89	24.13
20	25.03	31.90	38.85	48.82	44.30	51.36	52.38	53.79	45.51	53.40	49.83	52.53	45.86	51.29	41.76	50.55	29.26	25.13	20.59
21	25.66	25.44	29.96	38.85	42.98	31.08	42.57	46.23	43.89	42.93	48.45	43.24	42.48	47.91	37.96	27.29	25.10	25.60	18.91
22	25.32	25.27	25.97	35.24	30.33	26.33	26.97	31.25	29.04	36.73	34.87	27.89	27.97	30.45	26.12	25.64	25.14	24.97	16.32
23	23.20	25.64	25.56	25.17	25.35	25.16	26.11	27.87	29.50	25.03	25.15	25.70	25.10	25.85	25.51	24.62	24.99	19.89	15.80
24	18.19	23.57	25.52	25.39	25.47	25.29	25.40	25.43	25.98	25.25	25.32	25.48	25.41	25.30	25.36	24.72	24.18	19.08	13.53
25	18.03	21.96	23.85	25.46	25.30	25.58	25.53	25.38	25.40	18.17	25.57	25.53	25.40	25.44	24.71	23.53	22.42	17.40	13.28
26	16.39	19.48	21.43	24.04	23.22	25.24	23.57	25.24	23.90	24.59	24.31	25.35	24.63	22.03	24.87	22.50	21.34	15.54	11.99
27	14.47	17.75	20.24	21.53	23.06	22.91	21.13	24.02	23.42	23.40	23.77	23.44	22.67	19.21	19.73	20.16	18.23	14.95	11.81
28	13.90	15.59	17.50	19.38	20.29	19.94	19.94	23.55	21.11	20.54	20.75	20.88	20.77	18.42	17.86	17.60	17.08	14.42	10.40
29	13.19	15.46	16.65	18.39	18.66	18.65	19.20	19.41	20.58	19.41	19.56	18.70	20.94	17.24	17.48	15.50	14.97	13.40	9.72
30	12.03	14.24	15.43	16.86	18.42	17.62	17.18	17.90	17.94	18.70	17.16	17.27	15.84	16.39	17.55	16.30	14.62	13.13	9.89
31	11.28	14.09	15.44	15.07	17.08	16.88	16.00	16.85	16.00	17.94	17.65	16.29	15.37	14.72	14.61	14.18	14.45	12.78	9.45
32	11.55	13.33	13.63	14.64	14.97	15.99	14.58	16.99	15.20	16.84	15.61	14.64	14.30	14.73	14.68	13.56	13.98	11.93	7.91
33	10.27	12.38	13.65	13.85	14.73	14.30	14.76	14.63	14.47	14.82	15.29	14.70	14.30	14.07	14.23	13.72	13.09	11.28	7.91
34	10.36	11.66	13.22	13.42	13.79	14.12	14.09	14.40	14.55	14.98	14.67	14.27	13.56	13.37	13.48	12.51	12.47	11.04	7.55
35	9.66	11.99	12.47	13.01	13.30	13.32	13.09	13.73	13.77	13.83	13.67	13.23	12.60	13.04	13.02	12.55	12.16	9.89	7.45
36	8.62	10.41	10.94	12.10	12.89	13.07	13.14	12.96	13.36	12.95	13.26	13.20	11.80	12.56	12.52	12.05	10.99	9.37	7.17
37	8.42	10.15	11.10	11.71	11.66	12.38	11.94	12.77	12.59	12.87	12.92	12.53	11.15	11.60	12.35	12.00	10.89	9.44	6.78
38	8.01	9.96	10.74	10.29	11.42	10.80	12.74	11.73	12.27	12.20	12.34	11.90	10.52	11.54	12.24	10.73	10.35	8.73	6.72
39	7.79	8.68	9.88	10.33	10.91	10.97	10.90	11.68	11.54	11.18	11.31	11.21	10.67	10.79	10.35	10.70	9.75	8.10	6.52
40	7.81	8.83	9.46	10.03	10.16	10.38	11.02	11.24	11.04	11.73	10.96	11.82	10.25	10.40	10.31	9.37	9.62	8.37	6.50
41	7.43	8.41	8.65	9.59	9.63	10.07	10.12	10.38	10.79	10.34	10.87	10.06	9.99	9.72	10.34	9.54	9.13	8.16	6.63
42	7.81	7.87	8.81	9.62	9.22	9.24	9.59	10.15	9.51	10.43	10.22	10.36	9.62	9.02	9.42	9.48	9.31	8.47	6.25
43	6.76	7.84	8.75	9.20	8.50	8.81	10.12	9.78	9.70	10.32	9.71	9.05	8.92	8.76	8.79	8.50	8.91	8.20	6.94
44	6.73	7.84	8.23	7.70	8.38	8.99	8.85	9.18	9.77	8.36	9.08	8.94	8.27	8.72	8.77	8.94	8.09	7.54	6.31
45	6.91	7.86	7.97	8.92	8.12	8.82	8.35	9.20	9.26	8.69	9.29	8.57	8.18	8.44	8.58	8.82	8.08	7.58	6.33
46	6.39	7.58	7.79	7.60	7.83	8.13	8.33	8.18	8.57	8.28	8.63	8.27	7.83	7.78	8.32	8.06	7.80	7.12	6.51
47	6.32	6.85	7.47	7.68	7.91	7.60	8.24	8.02	8.62	8.30	8.33	7.65	7.54	7.82	7.82	8.06	7.88	7.51	6.05
48	6.28	7.04	7.18	7.66	7.59	7.66	8.17	7.98	8.13	7.82	7.89	7.36	7.29	7.77	7.63	7.42	7.65	6.90	5.95
49	6.10	6.72	7.21	7.04	7.11	7.38	7.45	7.95	8.10	7.77	7.60	7.09	7.52	7.34	7.39	8.11	7.45	6.91	5.86
50	5.87	6.57	6.70	7.32	7.12	7.13	7.14	7.51	7.52	7.08	7.34	7.22	7.23	7.20	7.30	7.46	7.37	6.61	5.92

LAMPIRAN III

Persentase Distribusi Dosis Perlakuan Air dan Udara Pada Radius 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm dan 45 mm



LAMPIRAN IV
Fungsi Dosis Radial dan Fungsi Geometri Pada perlakuan Udara dan Perlakuan Air

radius	Faktor geometri (G(r,e))	dosis radial air (g(r,e))	dosis radial udara (g(r,e))
1	0.27468	0.300	0.283
2	0.11903	0.541	0.570
3	0.06869	0.874	0.711
4	0.04480	1.068	0.923
5	0.03142	1.150	1.193
6	0.02316	1.081	1.122
7	0.01772	1.348	0.970
8	0.01396	1.179	1.141
9	0.01127	1.209	1.108
10	0.00927	1.000	1.000
11	0.00776	1.090	1.132
12	0.00658	1.168	0.944
13	0.00565	1.063	0.975
14	0.00490	1.085	1.144
15	0.00429	1.167	1.085
16	0.00379	1.289	1.281
17	0.00337	1.323	1.300
18	0.00301	1.319	1.354
19	0.00271	1.743	1.357
20	0.00245	2.021	1.833
21	0.00223	1.788	1.839
22	0.00203	1.676	1.237
23	0.00186	1.247	1.231
24	0.00171	1.368	1.267
25	0.00158	1.067	1.364
26	0.00146	1.560	1.491
27	0.00136	1.600	1.607
28	0.00126	1.509	1.569
29	0.00118	1.528	1.521
30	0.00110	1.575	1.565
31	0.00103	1.612	1.453
32	0.00097	1.612	1.510
33	0.00091	1.508	1.566
34	0.00086	1.617	1.539
35	0.00081	1.582	1.606
36	0.00077	1.566	1.650
37	0.00073	1.644	1.722
38	0.00069	1.643	1.668
39	0.00065	1.585	1.770
40	0.00062	1.749	1.862
41	0.00059	1.620	1.801
42	0.00056	1.713	1.941
43	0.00054	1.778	1.926
44	0.00051	1.508	2.137
45	0.00049	1.638	2.021
46	0.00047	1.632	2.066
47	0.00045	1.708	2.137
48	0.00043	1.678	
49	0.00042	1.737	
50	0.00040	1.646	