

## TUGAS AKHIR

# PERENCANAAN PENGOBATAN RADIOTERAPI DENGAN BANTUAN SIMULASI GEANT4



RIZKI BUDIMAN

NPM: 2017720003

PROGRAM STUDI FISIKA  
FAKULTAS TEKNOLOGI INFORMASI DAN SAINS  
UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN  
2020



**FINAL PROJECT**

**RADIOTHERAPY TREATMENT PLAN BY GEANT4  
SIMULATION**



**RIZKI BUDIMAN**

**NPM: 2017720003**

**DEPARTMENT OF PHYSICS  
FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY AND SCIENCES  
PARAHYANGAN CATHOLIC UNIVERSITY  
2020**



# LEMBAR PENGESAHAN

## PERENCANAAN PENGOBATAN RADIOTERAPI DENGAN BANTUAN SIMULASI GEANT4

**RIZKI BUDIMAN**

**NPM: 2017720003**

**Bandung, 27 Juli 2020**

Menyetujui,

**Pembimbing Utama**

**Pembimbing Pendamping**



**Flaviana, M.T.**



**Reinard Primulando, Ph.D.**

**Ketua Tim Penguji**

**Anggota Tim Penguji**



**Reinard Primulando, Ph.D.**



**Haryanto Siahaan, Ph.D.**

Mengetahui,

**Ketua Program Studi**



**Reinard Primulando, Ph.D.**



## PERNYATAAN

Dengan ini saya yang bertandatangan di bawah ini menyatakan bahwa tugas akhir dengan judul:

### PERENCANAAN PENGOBATAN RADIOTERAPI DENGAN BANTUAN SIMULASI GEANT4

adalah benar-benar karya saya sendiri, dan saya tidak melakukan penjiplakan atau pengutipan dengan cara-cara yang tidak sesuai dengan etika keilmuan yang berlaku dalam masyarakat keilmuan.

Atas pernyataan ini, saya siap menanggung segala risiko dan sanksi yang dijatuhkan kepada saya, apabila di kemudian hari ditemukan adanya pelanggaran terhadap etika keilmuan dalam karya saya, atau jika ada tuntutan formal atau non-formal dari pihak lain berkaitan dengan keaslian karya saya ini.

Dinyatakan di Bandung,  
Tanggal 27 Juli 2020



NPM: 2017720003



## ABSTRAK

Pada Radioterapi digunakan radiasi ionisasi untuk membunuh sel-sel kanker tanpa menimbulkan komplikasi terhadap jaringan sehat. Dibutuhkan pengaturan tertentu untuk menjamin efektivitas sesi terapi. Bentuk distribusi dosis berdampak pada persentase dosis kedalaman (PDD), *Buildup Region*, dan kontur penyebaran dosis. Jenis radiasi, besar energi radiasi, dan organ pasien yang dipapari radiasi berpengaruh terhadap dosis yang diserap. *Quality Factor* ( $W_R$ ) sumber radiasi mempengaruhi hubungan dosis terserap (D) terhadap dosis ekuivalen ( $H_T$ ). Lalu *Weighting Factor* ( $W_T$ ) akan digunakan dalam konversi besaran dosis ekuivalen ( $H_T$ ) menjadi dosis ekuivalen efektif ( $H_E$ ). Dosis terserap (D) akan dihitung melalui nilai energi kinetik yang dilepaskan per satuan massa (disebut kerma) pada simulasi interaksi radiasi ionisasi terhadap jaringan tubuh. Simulasi dilakukan menggunakan Geant4 berbasis metode Monte Carlo. Kontur distribusi dosis radiasi dapat dibentuk dari data keluaran simulasi dan dilakukan analisis pada kasus bentuk paparan dan jenis radiasi ionisasi yang berbeda. Pada penelitian ini akan ditelusuri bagaimana pengaruh segmentasi *phantom* pada simulasi, pengaruh bentuk berkas *cone beam* dan *parallel beam* pada kontur distribusi dosis di simulasi, dan contoh sederhana paparan radiasi bagian tubuh. Dosis radiasi terserap oleh *phantom* akan dihitung dan akan ditentukan hubungannya dengan jumlah berkas radiasi yang digunakan pada simulasi.

**Kata-kata kunci:** Geant4, persentase dosis kedalaman(PDD), dan Radiasi ionisasi



## ABSTRACT

In Radiotherapy ionizing radiation is directed to kill cancer cells without harming healthy cells. It takes some certain configurations to ensure the therapy effectiveness. Distribution of the radiation dose affects percentage dose depth (PDD), Buildup region, and the spread contour of the dose. Radiation type, energy of the radiation, and patient's organs affects the absorbed dose. Quality Factor of radiation affects the correlation between absorbed dose ( $D$ ) and dose equivalent( $H_T$ ). And then the weighting factor ( $W_T$ ) affects the correlation between dose equivalent( $H_T$ ) and dose equivalent effective ( $H_E$ ). The absorbed dose ( $D$ ) will be calculated on released kinetic energy per mass (kerma) inside the simulation of ionizing radiation through body tissue. Simulation is done on Geant4 which is based on the Monte Carlo method. The dose distribution contour of the dose can be created based on the simulation's output, and carried out analysis on the exposure by various radiation sources. This experiment will observe the phantom's segmentation effects, the effects of cone beam exposure and parallel beam exposure on the dose distribution contour, and a simple case of radiotherapy simulation on body tissue. The absorbed dose on phantom will be calculated and the relation of the radiation quantity is also to be determined.

**Keywords:** Geant4, percentage dose depth (PDD), and Ionizing Radiation



*Teruntuk penyintas di 'hutan'*



## KATA PENGANTAR

Tugas akhir ini ditulis sebagai pemenuh syarat kelulusan saya sebagai mahasiswa Fisika di UNPAR untuk mendapatkan gelar Sarjana Sains. Penulis berharap topik tugas akhir ini dapat menjadi *trend* yang berkelanjutan untuk mahasiswa fisika lainnya. Selama proses pengerjaan tugas akhir ini penulis mendapatkan dukungan secara langsung maupun tidak langsung dari orang-orang disekitar penulis. Maka dari itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua dan saudara saya yang telah membiayai perkuliahan saya.
2. Bu Fla sebagai dosen pembimbing utama yang mengarahkan pembelajaran saya pada topik tugas akhir ini.
3. Pa Rei sebagai dosen pembimbing pendamping yang mengajari saya trik dan tips eksplorasi simulasi pada tugas akhir ini.
4. Pa Haryanto sebagai dosen penguji yang mulai tertarik pada topik medis.
5. Pa Philips sebagai dosen wali saya yang telah repot mengurus perihal akademik saya.
6. Dosen dan staf UNPAR yang menggerakkan perkulihan.
7. Rekan spesial Cindyawati yang telah memberikan dukungan dan motivasi harian.
8. Mas/mba *delivery* Grabfood yang telah mengantarkan makanan dan minuman promo setiap hari.
9. Rekan-rekan dan alumni sejurusan Fisika UNPAR.
10. Pihak lainnya yang tidak bisa dicantumkan satu per satu.

Bandung, Juli 2020

Penulis



## DAFTAR ISI

<b>KATA PENGANTAR</b>	<b>xv</b>
<b>DAFTAR ISI</b>	<b>xvii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b>	<b>xix</b>
<b>DAFTAR TABEL</b>	<b>xxi</b>
<b>1 PENDAHULUAN</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang . . . . .	1
1.2 Rumusan Masalah . . . . .	2
1.3 Tujuan . . . . .	2
1.4 Batasan Masalah . . . . .	2
1.5 Metodologi . . . . .	3
1.6 Sistematika Pembahasan . . . . .	3
<b>2 LANDASAN TEORI</b>	<b>5</b>
2.1 Atom . . . . .	5
2.2 Radiasi . . . . .	5
2.2.1 Ionisasi langsung ( <i>Directly Ionizing</i> ) . . . . .	5
2.2.2 Ionisasi tidak langsung ( <i>Indirectly Ionizing</i> ) . . . . .	6
2.3 Interaksi Radiasi Ionisasi Foton Terhadap Bahan . . . . .	6
2.3.1 Fisis Berkas Foton . . . . .	6
2.3.2 Koefisien atenuasi . . . . .	7
2.3.3 Penyebaran Koheren ( <i>Coherent Scattering</i> ) . . . . .	8
2.3.4 Efek Fotolistrik . . . . .	8
2.3.5 Efek Compton ( <i>Compton Scattering</i> ) . . . . .	8
2.3.6 Produksi Pasangan ( <i>Pair Production</i> ) . . . . .	8
2.4 Interaksi Radiasi Ionisasi Partikel Bermuatan Terhadap Bahan . . . . .	8
2.4.1 Efek Bremsstrahlung . . . . .	8
2.4.2 Gaya Coulomb . . . . .	9
2.5 Pengukuran Dosis Serap . . . . .	9
2.5.1 Dosis Serap Radiasi . . . . .	9
2.5.2 Kerma . . . . .	10
2.5.3 <i>Exposure</i> . . . . .	11
2.5.4 Hubungan Dosis Serap dengan Kerma . . . . .	11
2.5.5 <i>Weighting Factor</i> . . . . .	12
2.5.6 Penetrasi Foton pada Pasien . . . . .	13
2.6 Dosis pada Radioterapi . . . . .	16
2.7 Perencanaan Klinis pada Radioterapi Eksternal . . . . .	16
2.8 Simulasi Paparan Radiasi pada Geant4 . . . . .	18
2.9 Nilai Penyebaran Intensitas Berkas Radiasi pada Kurva Distribusi Normal ( <i>Distribusi Gaussian</i> ) . . . . .	19

<b>3</b>	<b>METODE PENELITIAN</b>	<b>21</b>
3.1	Penentuan Geometri . . . . .	22
3.2	Penentuan Sumber energi . . . . .	23
3.3	Perhitungan Energi dan Absorbansi . . . . .	25
3.4	Visualisasi Data . . . . .	26
3.4.1	Grafik PDD pada sumbu utama sumber energi . . . . .	26
3.4.2	Kontur distribusi PDD pada penampang <i>phantom</i> . . . . .	26
3.5	Susunan Simulasi . . . . .	27
3.5.1	Simulasi distribusi dosis radiasi pada medium air yang heterogen dengan sumber berkas radiasi elektron energi tinggi . . . . .	27
3.5.2	Simulasi pengaruh bentuk berkas radiasi terhadap kontur PDD . . . . .	28
3.5.3	Simulasi distribusi dan pengukuran dosis radiasi pada contoh sederhana bagian tubuh . . . . .	29
<b>4</b>	<b>HASIL DAN PEMBAHASAN</b>	<b>31</b>
4.1	Simulasi distribusi nilai PDD sumbu berkas utama pada <i>phantom</i> air homogen . . . . .	31
4.2	Simulasi pengaruh bentuk berkas radiasi terhadap kontur PDD . . . . .	32
4.2.1	Simulasi paparan <i>parallel beam</i> . . . . .	32
4.2.2	Simulasi paparan <i>cone beam</i> . . . . .	35
4.3	Simulasi distribusi dan pengukuran dosis radiasi pada contoh sederhana bagian tubuh . . . . .	37
4.3.1	Simulasi penentuan energi proton . . . . .	38
4.3.2	Simulasi hubungan jumlah berkas proton dan dosis radiasi . . . . .	41
<b>5</b>	<b>KESIMPULAN DAN SARAN</b>	<b>49</b>
5.1	Kesimpulan . . . . .	49
5.2	Saran . . . . .	49
	<b>DAFTAR REFERENSI</b>	<b>51</b>
	<b>A KODE PROGRAM</b>	<b>53</b>
	<b>B KODE PROGRAM <i>Python</i> PADA GOOGLE COLAB</b>	<b>79</b>
	<b>C PLOT KONTUR PDD PADA SIMULASI CONTOH SEDERHANA BAGIAN TUBUH</b>	<b>85</b>
	<b>D PANDUAN INSTALASI GEANT4 PADA SISTEM OPERASI LINUX</b>	<b>89</b>

## DAFTAR GAMBAR

2.1	Hubungan dosis terserap ( $D$ ), kerma collision ( $K^{col}$ ) dan kedalaman medium [1]	12
2.2	Penyebaran berkas foton yang melewati tubuh manusia.[2]	14
2.3	Ilustrasi persentase dosis pada kedalaman [1]	14
2.4	Nilai PDD pada <i>phantom</i> air untuk berkas foton yang berbeda energi [1]	15
2.5	nilai PDD pada <i>phantom</i> air oleh jenis sumber radiasi yang berbeda [3]	15
2.6	Hubungan TCP dan NTCP terhadap dosis ekuivalen [3]	16
2.7	Skema Ilustrasi Pengukuran Dosis dan Volume oleh ICRU [1]	17
2.8	Kurva Target Volume terhadap dosis) [1]	18
2.9	Perbandingan nilai FWHM dan $\sigma$ pada kurva distribusi normal[4]	19
3.1	Bagan Alur Penelitian	22
3.2	Kode pembangunan sebuah geometri pada file RE02Detectorconstruction.cc	22
3.3	Kode penentuan jumlah segmen dan ukuran <i>phantom</i> pada file RE02.cc	22
3.4	Ilustrasi indeks posisi segmen <i>phantom</i> dan posisi sumbu utama berkas	23
3.5	RE02PrimaryGeneratorAction.hh untuk fungsi sumber energi G4ParticleGun	24
3.6	RE02PrimaryGeneratorAction.cc untuk fungsi sumber energi G4ParticleGun	24
3.7	RE02PrimaryGeneratorAction.hh untuk fungsi sumber energi GPS	24
3.8	RE02PrimaryGeneratorAction.cc untuk fungsi sumber energi GPS	24
3.9	Kode makro untuk fungsi G4ParticleGun	25
3.10	Kode makro untuk fungsi GPS	25
3.11	Kode <i>scorer</i> pada file RE02Detectorconstruction.cc	25
3.12	Kode akumulasi file keluaran simulasi pada file RE02RunAction.cc	26
3.13	Data keluaran simulasi pada file *.txt	26
3.14	Ilustrasi penempatan lembaran dosimetrik pada <i>phantom</i> untuk eksperimen nyata [3]	27
3.15	Nilai PDD pada sumbu berkas utama <i>phantom</i> air yang didapatkan dari eksperimen nyata dan simulasi oleh fakultas CALIFES[5]	27
3.16	Ilustrasi dimensi dan susunan geometri simulasi 3.5.1	28
3.17	Ilustrasi susunan geometri, segmentasi, bentuk berkas simulasi pemaparan <i>cone beam</i>	28
3.18	Ilustrasi susunan geometri, segmentasi, bentuk berkas simulasi pemaparan <i>parallel beam</i>	29
3.19	Ilustrasi susunan geometri, segmentasi dan dimensi simulasi 3.5.3	29
4.1	Perbandingan nilai PDD sumbu utama berkas pada simulasi dan eksperimen nyata	32
4.2	Kode makro pada simulasi paparan <i>parallel beam</i>	32
4.3	kontur PDD dengan radius sumber berkas 5 mm	33
4.4	kontur PDD dengan radius sumber berkas 10 mm	34
4.5	kontur PDD dengan radius sumber berkas 15 mm	34
4.6	Kode makro pada simulasi paparan <i>cone beam</i>	35
4.7	kontur PDD dengan nilai sebaran sudut berkas 0,5 derajat	36
4.8	kontur PDD dengan nilai sebaran sudut berkas 1 derajat	36
4.9	kontur PDD dengan nilai sebaran sudut berkas 1,5 derajat	37
4.10	Kode makro pada simulasi penentuan energi proton	38
4.11	kontur PDD dari berkas proton 15 MeV	38

4.12	kontur PDD dari berkas proton 40 MeV . . . . .	39
4.13	kontur PDD dari berkas proton 80 MeV . . . . .	39
4.14	kontur PDD dari berkas proton 100 MeV . . . . .	40
4.15	Hubungan energi maksimum segmen terhadap jumlah berkas . . . . .	41
4.16	Ilustrasi susunan geometri, segmentasi dan dimensi simulasi 4.3.2 . . . . .	41
4.17	Kode <i>python</i> konversi dosis terserap pada pada Google Colab . . . . .	42
4.18	Grafik hubungan dosis terserap terhadap kedalaman pada paparan $10^5$ berkas proton	43
4.19	Kode <i>python</i> konversi dosis ekivalen pada pada Google Colab . . . . .	43
4.20	Grafik hubungan dosis ekivalen terhadap kedalaman pada paparan $10^5$ berkas proton	44
4.21	Kode <i>python</i> konversi dosis ekivalen efektif pada pada Google Colab . . . . .	44
4.22	Grafik hubungan dosis ekivalen efektif terhadap kedalaman pada paparan $10^5$ berkas proton . . . . .	45
4.23	Grafik hubungan jumlah berkas terhadap dosis ekivalen . . . . .	46
4.24	Grafik hubungan jumlah berkas terhadap total dosis ekivalen efektif . . . . .	46
C.1	Plot kontur PDD pada contoh sederhana bagian tubuh lapisan x=20mm . . . . .	85
C.2	Plot kontur PDD pada contoh sederhana bagian tubuh lapisan x=22mm . . . . .	86
C.3	Plot kontur PDD pada contoh sederhana bagian tubuh lapisan x=24mm . . . . .	86
C.4	Plot kontur PDD pada contoh sederhana bagian tubuh lapisan x=26mm . . . . .	87
C.5	Plot kontur PDD pada contoh sederhana bagian tubuh lapisan x=28mm . . . . .	87
C.6	Plot kontur PDD pada contoh sederhana bagian tubuh lapisan x=30mm . . . . .	88

## DAFTAR TABEL

2.1	<i>Weighting Factor</i> radiasi ( $W_R$ ) . . . . .	12
2.2	<i>Tissue Weighting Factors</i> ( $W_T$ )[6] . . . . .	13
3.1	Data base material NIST yang digunakan pada simulasi . . . . .	29
4.1	Data-data total dosis yang diperoleh untuk paparan . . . . .	45
4.2	Persamaan linier hubungan jumlah berkas terhadap dosis radiasi . . . . .	47



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Radioterapi dan pembedahan adalah modal utama yang digunakan pada penanggulangan penyakit kanker. Radioterapi menggunakan radiasi sinar gamma yang mengionisasi untuk menangani sel kanker. Teknik ini bergantung pada kecanggihan teknologi peralatan yang digunakan serta diperlukan kolaborasi tim yang terdiri dari beberapa profesi yang berbeda untuk menghasilkan hasil penanganan yang baik. Bentuk kolaborasi ini berbeda dari bidang spesialis medis lainnya yang bergantung pada pengetahuan dan pengalaman klinis.

Pada sebuah tim Radioterapi terdapat ahli onkologi radiasi, fisikawan medis, dan teknisi dosimetri radiasi. Masing-masing tenaga ahli tersebut mempunyai latar pendidikan yang berbeda namun dengan pengetahuan yang sama mengenai fisika radiasi, dan bentuk interaksi yang diakibatkan oleh radiasi ionisasi (radiasi yang dapat mengionisasi) pada tubuh. Pengetahuan tentang fisika nuklir yang dimiliki seorang fisikawan medis sangat diperlukan oleh ahli-ahli lain untuk melakukan pertukaran ide. Inovasi kemajuan di bidang onkologi radiasi dilandasi oleh kemajuan teknologi alat-alat pencitraan, dan bentuk pelaksanaan prosedur Radioterapinya.

Radiasi dan partikel radioaktif yang mempunyai cukup energi untuk mengionisasi sel tubuh manusia dapat terbentuk sendirinya di alam tanpa campur tangan manusia, namun risiko dari paparan radiasi dari bahan-bahan tersebut dapat dibatasi. Sumber radiasi ionisasi pada bidang medis digunakan sebagai bagian dari peralatan medis, alat diagnostik, dan terapi kanker. Pemakaian radiasi ini menunjukkan bahwa keberadaan risiko efek radiasi dapat ditoleransi supaya keuntungan pemakaian radiasi tersebut dapat dicapai. Seluruh orang yang terlibat pada pemakaian radiasi ini harus dilindungi dan prosedur pemakaian yang dilakukan harus memenuhi standar keselamatan radiasi.

Bentuk dosis radiasi berbahaya yang diterima oleh tubuh adalah jumlah energi ionisasi yang melebihi batas aman. Energi ionisasi tersebut menyebabkan atom atau molekul pada sel tubuh mengalami kerusakan DNA. Bentuk kerusakan yang terjadi pada DNA disebabkan oleh terputusnya rantai ikatan diantara atom-atom DNA sehingga kode unik DNA tidak utuh semestinya. Ikatan atom-atom tersebut putus karena besar energi ionisasi yang sampai jauh lebih besar dari energi ikatan elektron atom sel. Energi kesetimbangan elektron atom akan bergeser pada keadaan bebas yang berbeda sehingga elektron tidak lagi berikatan dengan elektron atom lainnya. Kode unik DNA merupakan "*blue-print*" DNA sebagai kontrol proses dan reproduksi sel. Jika mengalami kerusakan akan terjadi kelainan mutasi.

Tidak semua radiasi yang mempunyai energi tinggi akan memberikan kerusakan pada sel tubuh. Faktor kerusakan sel tubuh oleh radiasi bergantung pada besar energi radiasi, dan bentuk interaksi dari jenis radiasi terhadap bagian tubuh yang terpaparkan. Namun hal yang dapat terjadi pada sel tubuh saat terpaparkan oleh radiasi ionisasi adalah:

1. Radiasi dapat menembus sel tubuh tanpa menyebabkan kerusakan.
2. Radiasi menyebabkan kerusakan sel tubuh yang dapat diperbaiki.
3. Radiasi mempengaruhi kemampuan sel tubuh untuk memperbanyak diri, menyebabkan mutasi.

#### 4. Radiasi membunuh sel tubuh.

Pada kemungkinan 1 dan 2 tidak terdapat kerugian yang signifikan. Tidak terjadi kerusakan yang berkelanjutan. Namun untuk kemungkinan 3 akan muncul resiko kanker. Mutasi yang terjadi dapat mengubah sel tersebut menjadi sel kanker, dan tidak dapat dimatikan oleh tubuh. Pertumbuhan sel ini pada jumlah yang signifikan akan menjadi tumor di dalam tubuh.

Pada kemungkinan 4 tidak terdapat kerugian yang signifikan jika jumlah sel yang mati tidak mempengaruhi sistem tubuh. Namun kematian sel dalam jumlah yang dapat mengganggu sistem tubuh tergolong merugikan. Sifat radiasi ionisasi yang dapat membunuh sel digunakan pada terapi radiasi. Sel-sel kanker pada jaringan tubuh akan dibunuh oleh radiasi ionisasi. Tentu dibutuhkan kuantitas dan jenis radiasi yang tepat untuk mendapatkan hasil terapi radiasi yang dibutuhkan.

Pengukuran kuantitas radiasi dan pengetahuan tentang efek yang ditimbulkan radiasi pada tubuh memerlukan teknik tertentu. Dosimetri radiasi merupakan metode yang digunakan untuk menentukan jumlah energi yang terserap pada medium saat dipapari radiasi ionisasi. Pada metode ini terdapat besaran-besaran kuantitatif yang mempengaruhi kuantitas/dosis radiasi yang terserap. Beberapa besaran kuantitatif tersebut adalah energi sinar radiasi, *stopping power* radiasi, dan *weighting factor* radiasi.

Kementerian Kesehatan Republik Indonesia memperkirakan 1 diantara 1.000 penduduk di Indonesia adalah penyandang penyakit kanker. Jumlah kematian akibat kanker pada tahun 2030 diperkirakan mencapai 13,1 juta orang. Umumnya setiap kanker bersifat fatal dan hanya sebagian yang dapat disembuhkan pada stadium dini. Fasilitas penanggulangan kanker yang sangat terbatas baik sumber daya manusia, sistem, dan peralatan menjadi kendala dalam penanggulangan kanker. Diagnosis dan pengobatan berupa paparan radiasi menjadi cara utama untuk menanggulangi tumor. Pengetahuan mengenai teknik penyampaian, dan tingkat keakuratan paparan radiasi pada tumor akan membantu efektivitas penanggulangan kanker di Indonesia[7].

## 1.2 Rumusan Masalah

Bentuk keadaan ideal paparan pada terapi radiasi adalah radiasi hanya dipaparkan pada bagian tubuh yang ditinjau. Paparan radiasi pada bagian tubuh selain tinjauan tentu akan memberikan gangguan biologis dalam diagnosis atau terapi radiasi. Bentuk kendala ini dapat diprediksi dengan menggunakan simulasi. Pada penelitian ini masalah yang akan dibahas antara lain:

1. Bagaimana pengaruh jumlah segmentasi *phantom* pada simulasi?
2. Bagaimana pengaruh bentuk berkas *cone beam* dan *cone beam* pada kontur distribusi dosis di simulasi?
3. Bagaimana bentuk sebaran dosis radiasi pada simulasi contoh sederhana bagian tubuh

## 1.3 Tujuan

Membandingkan data eksperimen nyata dan data simulasi yang segmentasinya divariasikan. Mendapatkan kontur distribusi dosis simulasi paparan *cone beam* dan *cone beam* dengan parameter sebaran yang berbeda. Memperoleh konfigurasi simulasi yang optimal untuk paparan radiasi terhadap bagian tubuh sederhana.

## 1.4 Batasan Masalah

Simulasi dilakukan dengan temperatur ruangan yang tidak terdapat gangguan dari luar. Material yang digunakan pada simulasi dibatasi oleh *library* yang tersedia. Bentuk alur dan proses kalkulasi pada simulasi dilakukan secara *default*.

## 1.5 Metodologi

Metode dalam penelitian ini dilakukan dengan cara menentukan keakuratan simulasi dengan cara membandingkan hasil keluaran simulasi dengan data eksperimen nyata. Berikutnya ditentukan bentuk pengaruh berkas radiasi terhadap sebaran dosis, dan dilakukan *tuning* konfigurasi untuk simulasi contoh bagian tubuh sederhana. Lalu pada simulasi tersebut akan ditentukan hubungan jumlah berkas radiasi terhadap dosis kedalaman.

## 1.6 Sistematika Pembahasan

### 1. Bab 1: Pendahuluan

Bab ini membahas latar belakang masalah, rumusan masalah, tujuan penelitian, ruang lingkup pembahasan, metodologi, dan sistematika penulisan

### 2. Bab 2: Tinjauan Pustaka

Bab ini membahas mengenai dasar teori yang memuat penjelasan jenis partikel, interaksi partikel dengan bahan, pengukuran dosis serap, penyebaran pancaran berkas radiasi, perencanaan klinis pada radioterapi eksternal, dan hubungan interaksi partikel dengan absorpsi dosis.

### 3. Bab 3: Metode Penelitian

Bab ini membahas tahapan penelitian berupa instalasi dan persiapan simulasi, pembuatan *script* simulasi, proses pengolahan data hasil simulasi, dan analisis hasil simulasi untuk menghasilkan kesimpulan.

### 4. Bab 4: Hasil dan Pembahasan

Bab ini membahas data keluaran dari simulasi pada jaringan tubuh yang dilakukan. Hasil simulasi berupa distribusi dosis terhadap kedalaman medium, *percentage depth dose*, dan kontur distribusi dosis radiasi.

### 5. Bab 5: Kesimpulan dan Saran

Bab ini membahas kesimpulan dan saran yang diberikan oleh penulis untuk peneliti yang membahas topik serupa untuk mendapatkan hasil penelitian yang lebih lanjut.

