

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Kanker merupakan salah satu penyakit tidak menular dengan angka kejadian dan kematian tertinggi di dunia. Berdasarkan laporan resmi dari *World Health Organization* (WHO), penyakit kanker menempati posisi sebagai penyebab kematian kedua terbesar di dunia setelah penyakit kardiovaskular (World Health Organization, 2026). Menurut data statistik terbaru dari *International Agency for Research on Cancer* (IARC) melalui platform GLOBOCAN atau *Global Cancer Statistics* 2026 melaporkan bahwa secara global terdapat hampir 20 juta kasus baru kanker dan hampir 10 juta kematian akibat kanker dan angka ini diperkirakan akan terus meningkat (International Agency for Research on Cancer, 2026). Di Indonesia, situasinya tidak jauh berbeda. Kementerian Kesehatan Republik Indonesia melaporkan bahwa penyakit kanker menempati posisi sebagai penyebab kematian tertinggi ketiga secara nasional dengan estimasi beban tahunan mencapai 408.661 kasus baru dan 242.988 angka kematian (Kementerian Kesehatan RI, 2026). Tingginya angka kejadian ini menjadikan kanker sebagai salah satu prioritas utama dalam penanganan kesehatan di Indonesia.

Penanganan kanker dapat dilakukan melalui berbagai metode, salah satunya yang paling umum digunakan adalah radioterapi. Radioterapi atau terapi radiasi merupakan metode pengobatan kanker dengan menggunakan radiasi pengion untuk menghancurkan sel-sel kanker dengan cara merusak DNA sel target sehingga kehilangan kemampuan untuk berkembang dan membelah (International Atomic Energy Agency, 2023). Tujuan utama radioterapi adalah memberikan dosis radiasi yang optimal pada *volume* target tumor dengan tetap meminimalkan dosis pada jaringan sehat di sekitarnya.

Salah satu alat utama dalam radioterapi eksternal adalah pesawat *Linear Accelerator* (LINAC). LINAC bekerja dengan cara mempercepat partikel

bermuatan (elektron) melalui tabung pemercepat, kemudian menumbukkannya ke target untuk menghasilkan foton atau langsung digunakan sebagai berkas elektron (Manik et al., 2025). Pada mode foton, elektron ditumbukkan ke target berbahan logam berat seperti tungsten hingga menghasilkan sinar-X dan nantinya disesuaikan juga ukurannya melalui sistem kolimasi untuk mendapatkan berkas radiasi yang sesuai untuk terapi (Khan & Gibbons, 2019). Dalam penggunaannya, berkas radiasi dari LINAC dibentuk oleh sistem kolimasi yang terdiri dari *jaws* (rahang kolimator) dan *Multileaf Collimator* (MLC). *Jaws* berfungsi sebagai kolimator primer yang membentuk batas kasar area radiasi, sedangkan MLC berperan penting dalam membentuk lapangan radiasi sesuai dengan kontur target tumor secara lebih akurat. MLC terdiri dari puluhan pasang daun (*leaf*) berbahan logam berat atau tungsten yang dapat digerakkan secara mandiri satu persatu untuk membentuk bukaan sesuai dengan bentuk target dari arah pandang berkas (*beam's eye view*). Kemampuan MLC dalam membentuk lapangan radiasi secara akurat ini memungkinkan perlindungan organ-organ sehat di sekitarnya dari paparan radiasi yang tidak diperlukan. Akurasi MLC dalam membentuk lapangan radiasi ini sangat krusial untuk melindungi organ sehat di sekitar tumor dari paparan radiasi yang tidak diperlukan. Karena bentuk, ukuran, dan posisi tumor selalu berbeda pada setiap pasien, pengaturan pola dan bentuk dari bukaan MLC ini akan sangat bervariasi. Sehingga perlu dipahami bagaimana karakteristik penyebaran (distribusi) dosis radiasi yang dihasilkan dari setiap perubahan pola dan bentuk MLC tersebut (Iijima et al., 2024).

Perkembangan teknologi komputasi kini memungkinkan para peneliti menyimulasikan interaksi radiasi dengan materi menggunakan metode Monte Carlo. Metode Monte Carlo adalah metode numerik yang bekerja dengan memanfaatkan bilangan acak untuk memodelkan proses stokastik (berbasis peluang), salah satu contohnya adalah pergerakan partikel radiasi di dalam suatu medium (Andreo, 2018; Park et al., 2022). Metode ini dianggap sebagai standar emas dalam fisika medis karena akurasinya yang tinggi dalam memprediksi sebaran distribusi dosis radiasi (Park et al., 2022). Keunggulan utamanya terletak pada kemampuan untuk memodelkan pergerakan partikel pada bentuk geometri

yang rumit dan memperhitungkan efek hamburan serta pembentukan partikel sekunder, sehingga karakteristik inilah yang membuatnya sangat ideal untuk diaplikasikan dalam radioterapi.

Salah satu perangkat lunak berbasis Monte Carlo yang banyak digunakan adalah FLUKA (*Fluktuierende Kaskade*) yang dikembangkan oleh CERN atau *European Council for Nuclear Research*. FLUKA mampu mensimulasikan pergerakan berbagai jenis partikel (foton, elektron, neutron, proton, dan partikel lainnya) dalam rentang energi yang luas. Pemanfaatannya mencakup di bidang fisika medis, proteksi radiasi, dan fisika partikel (FLUKA Collaboration, n.d.). Keunggulan FLUKA terletak pada kemampuannya memodelkan geometri kompleks, ketepatan dalam perhitungan dosis, serta kelengkapan model fisika untuk berbagai jenis interaksi partikel (Battistoni et al., 2020). Untuk memudahkan penggunaan FLUKA, dikembangkan antarmuka grafis bernama FLAIR yang memungkinkan pengguna membuat geometri secara visual, mengatur parameter simulasi, dan menganalisis hasil data yang dikeluarkan.

Validasi model LINAC sebelum digunakan untuk simulasi pasien merupakan langkah penting yang disebut komisioning (*commissioning*). Pada tahap ini, hasil simulasi Monte Carlo dibandingkan dengan data pengukuran di rumah sakit, seperti *Percentage Depth Dose* (PDD) dan profil dosis. *Percentage Depth Dose* (PDD) adalah kurva yang menggambarkan variasi dosis serap yang berubah seiring bertambahnya kedalaman medium pada sumbu berkas dan hal ini mencerminkan daya tembus dari berkas radiasi tersebut dalam medium (Lu & Deng, 2022). Sedangkan profil dosis menggambarkan sebaran dosis pada bidang yang tegak lurus dengan sumbu berkas di kedalaman tertentu untuk melihat kesamaan (homogenitas) dan keseimbangan (simetri) dari lapangan radiasinya (Lu & Deng, 2022). Jika hasil simulasi menunjukkan deviasi di bawah 3% terhadap data pengukuran, maka model LINAC dinyatakan valid dan dapat digunakan untuk simulasi lebih lanjut. Penelitian (Manik et al., 2023) menunjukkan bahwa model LINAC Varian Clinac iX yang divalidasi dengan metode Monte Carlo menghasilkan deviasi PDD dan profil dosis yang baik terhadap data eksperimen,

menegaskan bahwa simulasi Monte Carlo dapat menjadi alat yang andal untuk *comissioning* LINAC.

Berbagai kode Monte Carlo telah dikembangkan dan digunakan secara luas dalam fisika medis, antara lain adalah EGSnrc, Geant4, dan FLUKA. Masing-masing kode memiliki karakteristik dan keunggulan tersendiri. EGSnrc merupakan kode yang sangat populer untuk simulasi dosimetri dan telah banyak divalidasi untuk aplikasi radioterapi, terutama untuk simulasi *head* LINAC dan pengukuran dosimetri air (Mon et al., 2023). Geant4 juga banyak digunakan, terutama dengan antarmuka seperti GATE dan telah terbukti valid untuk simulasi LINAC Elekta Synergy (Didi et al., 2015). Sementara itu, FLUKA yang dikembangkan oleh CERN, dikenal dengan kemampuan transportasi partikelnya yang komprehensif, akurasi perhitungan dosis tinggi dan model fisika yang mutakhir (Battistoni et al., 2020). Penelitian oleh (Manik et al., 2023) memvalidasi model Varian Clinac iX dengan FLUKA dan (Almatania & Hugtenburg, 2025) juga berhasil mengevaluasi kebocoran radiasi *head* LINAC menggunakan FLUKA. Keunggulan FLUKA terletak pada kemampuannya memodelkan geometri yang sangat kompleks, dilengkapi dengan model interaksi partikel yang lengkap untuk berbagai rentang energi, serta efisiensi komputasi yang baik. Hal ini menjadikan FLUKA sebagai alat yang sangat andal untuk meniru proses fisik di dalam *head* LINAC dan medium pasien secara detail, sehingga dapat menjadi alat bantu yang efektif dalam perencanaan terapi dan validasi model sebelum aplikasi klinis (Manik et al., 2023; Park et al., 2022).

Penelitian ini menggunakan pendekatan simulasi Monte Carlo dengan perangkat lunak FLUKA-FLAIR untuk memodelkan distribusi dosis radiasi pada *phantom* silinder homogen berisi air. *Phantom* yang digunakan adalah *phantom* air berbentuk silinder yang merupakan standar dalam pengukuran dosimetri radioterapi karena memiliki sifat yang setara dengan jaringan tubuh manusia (Khan & Gibbons, 2019). Selain itu, penelitian ini juga memodelkan pengaturan *leaf-leaf* MLC berdasarkan data klinis sekunder pasien dari Rumah Sakit Hasan Sadikin (RSHS) Bandung yang diadaptasi langsung dari bentuk lapangan radiasi

BG128.

Di dalam simulasi FLUKA, orientasi sumbu koordinatnya berbeda dari sistem klinis. Sumbu X di FLUKA itu vertikal dan sumbu Z nya itu horizontal, sehingga sudut klinis  $128^\circ$  (bawah-kiri) setara dengan sudut  $52^\circ$  (atas-kiri). Karena *phantom* air yang digunakan berbentuk silinder dan simetris, perbedaan arah ini tidak mengubah cara radiasi berinteraksi di dalam *phantom*. Dengan demikian, hasil simulasi tetap bisa diandalkan meskipun ada perbedaan sudut.

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, penelitian ini akan difokuskan pada simulasi distribusi dosis radiasi pada *phantom* silinder menggunakan metode Monte Carlo FLUKA dengan menggunakan konfigurasi daun MLC yang diadaptasi dari data lapangan klinis BG128. Di dalam simulasi FLUKA, data MLC tersebut diaplikasikan pada sudut *gantry* simulasi  $52^\circ$ . Penelitian ini dilakukan dalam tiga tahap, yaitu *comissioning* model LINAC, pemodelan MLC dan perekaman fase berkas radiasi, serta simulasi distribusi dosis pada *phantom*. Melalui penelitian ini, diharapkan dapat diperoleh pemahaman yang lebih baik tentang karakteristik distribusi dosis yang dihasilkan oleh berbagai konfigurasi MLC pada *phantom* air.

## 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang akan dibahas pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana hasil validasi model LINAC foton 6 MV menggunakan metode Monte Carlo FLUKA melalui perbandingan grafik *Percent Depth Dose* (PDD) dan profil dosis terhadap data komisioning dari RSHS?
2. Bagaimana pengaruh penggunaan data konfigurasi MLC BG128 terhadap pola sebaran jumlah partikel (*fluence*) radiasi yang terekam pada detektor di bawah *jaws*?
3. Bagaimana karakteristik sebaran dosis radiasi di dalam ruang *phantom* silinder akibat pengaplikasian konfigurasi MLC BG128 pada sudut *gantry* simulasi  $52^\circ$ ?

### 1.3 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini, ruang lingkup permasalahan yang akan dibahas adalah:

1. Simulasi komisioning dilakukan pada lapangan  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  dengan jarak permukaan ke sumber (*Source to Surface Distance/SSD*) sepanjang 90 cm.
2. Lapangan radiasi yang diuji menggunakan cetakan berkas dari data sekunder klinis pasien berupa konfigurasi MLC BG128 (sudut klinis asli  $128^\circ$ ), yang diintegrasikan ke dalam software FLUKA pada sudut *gantry* simulasi  $52^\circ$ .
3. Objek penyerapan radiasi yang dimodelkan adalah *phantom* silinder homogen berisi air murni, bukan struktur anatomi tubuh pasien.
4. Parameter yang dianalisis meliputi kurva PDD, profil dosis lateral, pola *fluence* pada detektor, serta peta visual distribusi dosis 3D di dalam *phantom* air.
5. Simulasi dilakukan dengan energi foton 6 MV dari pesawat LINAC Elekta Synergy.

### 1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memvalidasi akurasi model LINAC foton 6 MV dengan mencocokkan hasil simulasi PDD dan profil dosis terhadap data kurva komisioning RSHS.
2. Menganalisis perubahan pola sebaran jumlah partikel (*fluence*) radiasi yang dipengaruhi oleh bentuk bukaan dari konfigurasi MLC BG128 pada area detektor di bawah *jaws*.
3. Memetakan karakteristik sebaran dosis radiasi di dalam ruang *phantom* silinder akibat pengaplikasian konfigurasi MLC BG128 pada sudut *gantry* simulasi  $52^\circ$ .

## 1.5 Sistematika Penulisan

Secara sistematis, pembahasan pada skripsi ini terdiri dari setiap bab sebagai berikut:

### 1. BAB I Pendahuluan

Bab ini berisikan pendahuluan yang terdiri dari latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.

### 2. BAB II Tinjauan Pustaka

Bab ini berisikan dasar teori mengenai penelitian yang akan dilakukan dan menjelaskan teori pendukung penelitian mengenai radioterapi, pesawat *Linear Accelerator* (LINAC), *Multileaf Collimator* (MLC), *phantom* dalam radioterapi, metode Monte Carlo, perangkat lunak FLUKA dan FLAIR, serta parameter dosimetri seperti *Percentage Depth Dose* (PDD) dan profil dosis.

### 3. BAB III Metodologi Penelitian

Bab ini berisi waktu dan tempat penelitian, alat dan bahan yang digunakan, tahapan penelitian, serta tahapan selama pengolahan data.

### 4. BAB IV Hasil dan Pembahasan

Bab ini berisikan tentang hasil penelitian yang telah dilakukan berikut dengan pembahasan dan analisisnya, di antaranya hasil komisioning model LINAC (PDD dan profil dosis), hasil perekaman *fluence* radiasi serta analisis pengaruh MLC terhadap pola berkas, dan hasil distribusi dosis radiasi pada *phantom* silinder.

### 5. BAB V Penutup

Berisikan kesimpulan dari hasil penelitian beserta saran untuk pengembangan selanjutnya.

### 6. Daftar Pustaka

Berisi tentang pustaka dan acuan kajian yang dirujuk dalam penelitian.

### 7. Lampiran

Berisikan tentang data-data tambahan pendukung penelitian.