

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Radioterapi merupakan salah satu modalitas utama dalam penanganan keganasan, yang memanfaatkan radiasi pengion untuk menginduksi kerusakan DNA sel tumor sehingga menghambat proliferasinya. Meskipun berbagai faktor risiko seperti kebiasaan merokok, mutasi genetik, gaya hidup sedenter, serta pola makan tinggi makanan olahan telah teridentifikasi berkontribusi terhadap peningkatan kejadian kanker (Society, 2024), efektivitas terapi sangat bergantung pada ketepatan dosis radiasi yang diberikan. Radiasi yang digunakan dalam radioterapi eksternal dapat berupa foton (sinar-X atau sinar gamma), elektron, maupun partikel bermassa lainnya, yang difokuskan secara presisi ke wilayah tumor dengan prinsip memaksimalkan dosis terapeutik pada target sekaligus meminimalkan eksposur pada jaringan sehat di sekitarnya (Khan dan Gibbons, 2014).

Perkembangan teknologi radioterapi modern telah melahirkan beragam teknik canggih, seperti *3D Conformal Radiotherapy* (3D-CRT), *Intensity-Modulated Radiotherapy* (IMRT), *Image-Guided Radiotherapy* (IGRT), *Stereotactic Radiosurgery* (SRS), dan *Stereotactic Body Radiotherapy* (SBRT), yang masing-masing memiliki tingkat akurasi dan konformalitas dosis yang semakin optimal dalam penanganan onkologi (Khan dan Gibbons, 2014). Dalam praktik radioterapi, berbagai teknologi perangkat digunakan sesuai kebutuhan klinis, meliputi unit Cobalt-60 untuk teleterapi, sistem brakiterapi untuk sumber internal, teknologi modern seperti *Gamma Knife*, *Cyber Knife*, *Tomotherapy*, terapi proton, serta *Linear Accelerator* (LINAC) sebagai perangkat utama. LINAC mampu menghasilkan radiasi berenergi tinggi berupa foton (sinar-X atau sinar gamma) dan elektron untuk diarahkan secara presisi ke lokasi tumor. Keberhasilan terapi klinis sangat bergantung pada ketepatan dan kestabilan dosis radiasi yang diberikan. Oleh karena itu, diperlukan sistem penjaminan mutu (*Quality*

Assurance) yang ketat untuk memastikan kinerja LINAC tetap optimal guna menjamin efektivitas dan keamanan pengobatan (Khan dan Gibbons, 2014).

Linear Accelerator (LINAC) adalah perangkat utama yang digunakan untuk menghasilkan berkas radiasi foton energi tinggi dalam radioterapi modern. Diantaranya, varian Clinac CX adalah salah satu model LINAC yang masih banyak beroperasi di fasilitas kesehatan, khususnya di negara berkembang, karena keandalannya dalam menghasilkan berkas 6 MV dan 10 MV (Ervin B. Podgorsak, 2003). Dalam praktik radioterapi, berkas foton umumnya tersedia pada variasi energi 6 MV dan 10 MV, sementara berkas elektron mencakup spektrum energi yang lebih luas, yaitu 4, 6, 9, 12, 15, dan 18 MeV. Pemilihan jenis berkas disesuaikan dengan lokasi dan karakteristik tumor: berkas foton lebih optimal untuk menargetkan lesi malignan yang terletak di jaringan dalam, seperti kanker payudara, serviks, dan nasofaring; sedangkan berkas elektron, dengan sifat penetrasinya yang terbatas, lebih sesuai diaplikasikan untuk penanganan kanker kulit yang bersifat superfisial (Khan dan Gibbons, 2014).

Ketepatan dosis yang diberikan kepada pasien dalam terapi radiasi sangat dipengaruhi oleh kualitas berkas foton yang dihasilkan oleh LINAC, yang dikontrol melalui penerapan protokol standar yang disesuaikan dengan karakteristik masing-masing sistem radioterapi. Salah satu metode evaluasi kualitas berkas ini adalah melalui pengukuran *Percentage Depth Dose* (PDD), *Dose Profile* dan dosis absolut (*Absolute Dose*). PDD merupakan rasio antara dosis radiasi pada suatu kedalaman tertentu dibandingkan dengan dosis maksimum, yang kemudian dinyatakan dalam bentuk presentase. Informasi dari nilai PDD digunakan untuk menghitung jumlah dosis yang akan diserap oleh jaringan pasien selama terapi. Nilai PDD dipengaruhi oleh beberapa variabel, antara lain kedalaman jaringan target, ukuran lapangan penyinaran, jarak antara sumber radiasi dan permukaan kulit atau *Source to Surface Distance* (SSD), serta energi dari berkas radiasi (Williams dan Thwaites, 1993).

Dose Profile menggambarkan distribusi dosis radiasi pada arah lateral berkas dan digunakan untuk menilai homogenitas dosis serta menentukan batas daerah iradiasi. Parameter utama yang dianalisis meliputi *Full Width at Half*

Maximum (FWHM), karakteristik penurunan dosis pada daerah penumbra, dan penyebaran dosis di luar medan iradiasi utama. Pada berkas foton, *Dose Profile* dievaluasi dalam dua arah, yaitu *In-Plane Beam Profile* yang merepresentasikan distribusi dosis sepanjang sumbu panjang medan radiasi, dan *Cross-Plane Beam Profile* yang menunjukkan distribusi dosis sepanjang sumbu lebar medan radiasi. Pengukuran ini digunakan untuk menilai kerataan (*flatness*) dan simetri (*symmetry*) berkas radiasi, sehingga dapat memastikan keseragaman dosis sesuai dengan perencanaan terapi (Podgorsak, 2005).

Indeks gamma secara luas diterapkan sebagai alat verifikasi pada prosedur radioterapi. Metode ini memungkinkan perbandingan kuantitatif antara dua distribusi dosis radiasi, biasanya antara distribusi dosis yang direncanakan melalui sistem perencanaan radioterapi dan dosis yang diperoleh melalui pengukuran menggunakan alat QA. Indeks gamma mengintegrasikan dua parameter utama dalam evaluasi klinis yaitu perbedaan dosis (*Dose Difference*) dan jarak kesesuaian (*Distance to Agreement*), dalam satu nilai gabungan yang disebut indeks gamma (Low dkk., 1998).

Dengan menetapkan kriteria ambang AAPM Task Group 142 batas tertentu, seperti 3%/3 mm atau 2%/2 mm, yang menunjukkan toleransi perbedaan dosis dan jarak antar titik. Setiap titik dalam bidang pengukuran kemudian dianalisis, dan nilai gamma dihitung untuk menentukan apakah titik tersebut memenuhi kriteria ($\gamma \leq 1$). Hasil akhir evaluasi dinyatakan sebagai passing rate (persentase titik yang lolos), dimana AAPM TG-142 menyarankan ambang batas kelulusan minimal $\geq 95\%$ untuk memastikan akurasi dan keamanan pengobatan sebelum diterapkan pada pasien (Klein dkk., 2009).

Simulasi kinerja LINAC dalam aplikasi radioterapi banyak dilakukan menggunakan metode Monte Carlo. Metode Monte Carlo merupakan pendekatan komputasi stokastik yang memanfaatkan bilangan acak untuk memodelkan transportasi dan interaksi partikel secara individual. Dalam radioterapi, metode ini digunakan untuk menghitung distribusi dosis radiasi dengan akurasi yang tinggi, terutama pada medium yang memiliki heterogenitas jaringan seperti paru-paru atau tulang. Keunggulan utama metode Monte Carlo terletak pada kemampuannya

memperhitungkan secara lengkap berbagai mekanisme interaksi fisika partikel, antara lain hamburan Compton, efek fotolistrik, produksi pasangan, bremsstrahlung, serta hamburan elastik (M Rodriguez dkk., 2015).

Pada penelitian ini digunakan perangkat lunak PRIMO, yaitu program simulasi berbasis Monte Carlo yang independen dan otomatis untuk perhitungan distribusi dosis dan pemodelan LINAC, dengan antarmuka grafis yang mudah digunakan. PRIMO memanfaatkan sistem PENELOPE untuk mensimulasikan berbagai jenis LINAC, termasuk Varian dan Elekta, serta menghitung distribusi dosis pada fantom air. Keunggulan PRIMO terletak pada kemampuannya mengimpor dan mensimulasikan berkas ruang fase eksternal berformat standar IAEA, sehingga dapat digunakan bersama perangkat lunak Monte Carlo lainnya. Perangkat ini telah dilengkapi modul simulasi khusus untuk berbagai tipe LINAC dan menerapkan model fisika PENELOPE yang akurat, didukung teknik pengurangan varian untuk mempercepat komputasi dan mempermudah analisis. Selain itu, PRIMO menyederhanakan simulasi transportasi partikel foton dan elektron melalui dukungan alat bantu seperti PENASY, DPM, dan GLASS (M Rodriguez dkk., 2015).

Efendi dkk.,(2017) melakukan penelitian simulasi Monte Carlo terhadap berkas foton 6 MV tanpa *flattening filter free* (FFF) dari LINAC TrueBeam STx menggunakan fantom air yang memodelkan dalam *software* PRIMO. Hasil penelitian menunjukkan bahwa profil kedalaman dosis dan profil melintang alur sesuai secara akurat dengan data eksperimen. Pada medan $(10 \times 10) \text{ cm}^2$, profil kedalaman dosis memenuhi kredibilitas 98,53%, sedangkan profil melintang berkas pada kedalaman 10 cm dalam fantom air memenuhi kredibilitas 88,96%.

Sarin dkk.,(2020) melakukan penelitian simulasi Monte Carlo terhadap berkas foton 6 MV dari LINAC menggunakan varian CLINAC iX dengan mengevaluasi PRIMO sebagai alat verifikasi dosis dan QA yang berbasis Monte Carlo. Hasil analisis indeks gamma menunjukkan presentase kredibilitas sebesar 99% untuk kurva dosis PDD dan 95,4% untuk profil dosis. Indeks kualitas berkas, faktor keluaran, dan dosis titik absolut menunjukkan kesesuaian yang baik.

Altuwayrish dkk.,(2022) melakukan penelitian simulasi Monte Carlo dengan PRIMO menggunakan LINAC varian CLINAC 600C. Penelitian ini memanfaatkan energi 6 MV dengan parameter pembanding berupa PDD, *Dose Profile* dan indeks gamma. Hasil simulasi menggunakan PRIMO menunjukkan keberhasilan dalam memodelkan PDD dan *Dose Profile* dengan nilai indeks gamma sebesar 98% pada sebagian besar ukuran lapangan. Selain itu, hasil simulasi PRIMO dibandingkan dengan Eclipse TPS (*Treatment Planning System*) menunjukkan rata-rata kesesuaian gamma sebesar 98,7%, baik pada wilayah *Planning Target Volume* (PTV) dan *Organ at Risk* (OAR).

Berdasarkan penelitian sebelumnya, metode simulasi Monte Carlo menggunakan perangkat lunak PRIMO telah banyak digunakan untuk memodelkan karakteristik berkas foton pada berbagai jenis *Linear Accelerator* (LINAC) serta mengevaluasi distribusi dosis radiasi dalam radioterapi. Penelitian sebelumnya juga menunjukkan bahwa simulasi Monte Carlo mampu menghasilkan distribusi dosis yang memiliki tingkat kesesuaian tinggi dengan data eksperimen, khususnya pada parameter *Percentage Depth Dose* (PDD), profil dosis, dan indeks gamma (Altuwayrish dkk., 2022; Efendi dkk., 2017; Sarin dkk., 2020). Hasil tersebut menunjukkan bahwa PRIMO berpotensi menjadi alat verifikasi independen yang andal dalam proses *Quality Assurance* (QA) radioterapi. Namun, sebagian besar penelitian tersebut masih berfokus pada jenis LINAC tertentu seperti TrueBeam STx, Clinac iX, dan Clinac 600C, sehingga performa simulasi PRIMO pada tipe LINAC lainnya masih memerlukan kajian lebih lanjut.

Selain itu, penelitian yang secara khusus membandingkan hasil simulasi Monte Carlo menggunakan PRIMO dengan pengukuran eksperimen pada proses *Quality Assurance* berkas foton LINAC Varian Clinac CX masih terbatas. Padahal, Clinac CX merupakan salah satu tipe LINAC yang masih banyak digunakan di fasilitas radioterapi sehingga verifikasi kualitas berkas radiasi sangat penting untuk menjamin ketepatan dosis terapi. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk membandingkan hasil simulasi Monte Carlo menggunakan PRIMO dengan pengukuran eksperimen berdasarkan parameter *Percentage Depth*

Dose (PDD), *Dose Profile*, dan indeks gamma guna mengetahui tingkat kesesuaian distribusi dosis serta menilai potensi PRIMO sebagai alat verifikasi independen dalam praktik QA radioterapi.

1.2 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan hasil simulasi *software* PRIMO dengan pengukuran eksperimen pada LINAC Varian Clinac CX berdasarkan parameter PDD, *Dose Profile*, dan indeks gamma guna memastikan keakuratan simulasi tersebut. Perbandingan ini diperlukan karena setiap mesin LINAC memiliki karakteristik unik, sehingga simulasi harus terbukti sesuai dengan kondisi nyata sebelum dapat diandalkan untuk mendukung protokol *Quality Assurance* yang lebih efisien dan aman bagi pasien.

1.3 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah memberikan gambaran mengenai keterbatasan dan keandalan simulasi Monte Carlo PRIMO dalam merepresentasikan karakteristik berkas foton LINAC Varian Clinac CX energi 6 MV sebagai referensi akademis pengembangan penelitian fisika medis. Secara klinis, hasil penelitian dapat dijadikan panduan bagi fisikawan medis dalam menggunakan PRIMO sebagai alat verifikasi independen pada QA rutin untuk mengurangi frekuensi pengukuran ulang eksperimen parameter PDD. Bagi Instalasi Onkologi Radiasi Rumah sakit UNAND, penelitian ini menjadi dasar pengambilan keputusan dalam mengadopsi simulasi Monte Carlo sebagai bagian protokol QA guna mengoptimalkan sumber daya dan ketersediaan LINAC bagi pasien, sekaligus mendorong pengembangan protokol QA hybrid untuk aplikasi klinis lanjutan seperti IMRT dan VMAT.

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

Adapun ruang lingkup dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini menggunakan fantom air sebagai substitusi pasien untuk mengukur distribusi dosis dalam bentuk PDD, *Dose profile*, dan indeks gamma.

2. Energi berkas foton yang digunakan adalah 6 MV. Pemilihan energi ini didasarkan pada pertimbangan bahwa energi 6 MV merupakan moda operasional utama LINAC Varian Clinac CX yang paling sering digunakan dalam praktik klinis.
3. Ukuran lapangan penyinaran dalam klinis adalah (4×4) cm², (10×10) cm², dan (40×40) cm² digunakan dalam praktik klinis untuk menyesuaikan luas area target; mulai dari lesi kecil, ukuran standar kalibrasi, hingga penyinaran area besar sesuai kebutuhan terapi.
4. Data keluaran penelitian ini meliputi hasil pengukuran dari simulasi PRIMO serta pengukuran eksperimental secara langsung, yang kemudian dibandingkan secara kuantitatif.

