

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Kanker prostat merupakan salah satu jenis kanker yang berkembang pada kelenjar prostat dan hingga saat ini masih menjadi permasalahan kesehatan yang penting pada populasi laki-laki. Secara global, kanker prostat menempati urutan kedua sebagai kanker yang paling sering menyerang pria, dengan sebagian besar kasus terdiagnosis pada kelompok usia di atas 50 tahun (Droz et al., 2010; Ferlay et al., 2024). Dari aspek klinis, penderita kanker prostat umumnya menunjukkan gejala berupa nyeri pada bagian belakang pinggang serta gangguan berkemih, seperti kesulitan saat buang air kecil (Weaver dan Stevermer, 2020). Di Indonesia, beban penyakit ini juga tergolong signifikan. Data Global Cancer Observatory dari World Health Organization (WHO) menunjukkan bahwa pada tahun 2022 terdapat 13.130 kasus kanker prostat dengan angka kematian mencapai 4.860 kasus (Ferlay et al., 2024). Data tersebut menegaskan bahwa kanker prostat memerlukan penanganan terapeutik yang efektif sekaligus aman bagi jaringan sehat di sekitarnya.

Salah satu modalitas terapi yang terus berkembang dalam penatalaksanaan kanker prostat adalah radioterapi proton. Metode ini memanfaatkan radiasi berenergi tinggi untuk menghancurkan sel kanker dengan tingkat presisi yang lebih tinggi dibandingkan radioterapi konvensional. Keunggulan utama terapi proton terletak pada fenomena Bragg peak, yaitu sifat proton yang melepaskan sebagian besar energinya pada titik tertentu sebelum berhenti, sehingga dosis radiasi dapat dipusatkan pada target tumor dengan paparan minimal terhadap jaringan sehat di sekitarnya. Karakteristik ini menjadikan terapi proton berpotensi menurunkan risiko komplikasi, meningkatkan kontrol tumor, serta dapat digunakan baik sebagai terapi utama maupun sebagai terapi neoadjuvan dan adjuvan (Wu dan Fan, 2021).

Meskipun memiliki keunggulan dosimetrik dan biologis yang besar,

keberhasilan terapi proton sangat bergantung pada kualitas perencanaan terapi. Distribusi dosis harus dioptimalkan agar cakupan target tetap tinggi, sementara paparan dosis pada organ at risk (OAR) dapat ditekan serendah mungkin. Dalam konteks ini, salah satu parameter yang sangat menentukan adalah konfigurasi sudut berkas, karena arah datangnya proton akan memengaruhi lintasan partikel, penyebaran lateral, serta distribusi dosis pada tumor dan jaringan sehat di sekitarnya. Pada kasus kanker prostat, aspek ini menjadi sangat penting mengingat letak prostat yang berdekatan dengan organ radiosensitif, seperti rektum dan kandung kemih, sehingga perubahan kecil pada orientasi berkas dapat menghasilkan perbedaan dosimetrik yang bermakna.

Berbagai penelitian terdahulu telah menunjukkan bahwa optimasi sudut berkas berperan penting dalam meningkatkan kualitas terapi proton pada kanker prostat. Trofimov et al. (2007) melaporkan bahwa penggunaan beberapa sudut berkas dapat menurunkan dosis pada rektum hingga 50% dibandingkan konfigurasi konvensional dengan satu berkas posterior-anterior. Selanjutnya, Knopf et al. (2011) merekomendasikan penggunaan sudut lateral  $90^\circ$  dan  $270^\circ$  karena lintasan proton pada arah tersebut melewati jaringan pelvis yang relatif homogen, sehingga lebih stabil terhadap variasi densitas. Cao et al. (2015) juga menunjukkan bahwa konfigurasi  $100^\circ/260^\circ$  memberikan hasil yang paling konsisten, dengan penurunan dosis rektum sebesar 8,3% dibandingkan sudut lateral standar. Selain itu, konfigurasi  $45^\circ/315^\circ$  dinilai lebih efektif pada pasien dengan volume prostat besar karena mampu menurunkan dosis ke kandung kemih sebesar 12,7%, sedangkan konfigurasi  $80^\circ/280^\circ$  dianggap lebih optimal untuk prostat berukuran kecil karena memberikan keseimbangan proteksi yang lebih baik antara rektum dan kandung kemih.

Temuan tersebut diperkuat oleh penelitian lain yang menekankan pentingnya pendekatan individual dalam pemilihan sudut berkas. Moteabbed et al. (2017) menunjukkan bahwa konfigurasi anterior-oblique beams pada sudut  $45^\circ$  dan  $315^\circ$  memiliki tingkat robustness yang lebih baik terhadap variasi posisi pasien dan perubahan anatomi, khususnya akibat perubahan pengisian rektum, dibandingkan opposed lateral beams standar  $90^\circ/270^\circ$ . Kim et al. (2021) kemudian

menggunakan simulasi Monte Carlo berbasis Geant4 pada fantom pelvis pria dewasa dan menemukan bahwa oblique beams mampu menurunkan dosis rata-rata ke kandung kemih sebesar 12% dan ke rektum sebesar 8% tanpa mengurangi homogenitas dosis pada target prostat. Dalam konteks ini, simulasi Monte Carlo menjadi pendekatan yang sangat penting untuk mendukung optimasi terapi proton, terlebih dengan penggunaan Geant4 sebagai toolkit simulasi berbasis C++ dan fantom komputasi Mesh-Type Reference Computational Phantoms (MRCPs) dari ICRP yang memungkinkan representasi anatomi manusia secara lebih realistis.

Meskipun demikian, penelitian-penelitian sebelumnya masih memiliki sejumlah keterbatasan metodologis. Syahir et al. (2020), misalnya, telah melakukan simulasi kanker prostat menggunakan Geant4, tetapi masih menggunakan fantom MIRD yang sederhana dan belum mampu merepresentasikan kompleksitas anatomi pelvis manusia secara memadai. Budiman (2025) juga telah meneliti pengaruh orientasi arah berkas proton terhadap dosis OAR menggunakan fantom ICRP 145, tetapi kajiannya masih terbatas pada tiga arah berkas, yaitu anterior, lateral, dan posterior, serta mengasumsikan bahwa jaringan yang dilalui berkas bersifat homogen. Secara umum, penelitian terdahulu masih mengeksplorasi variasi sudut dalam cakupan yang terbatas, sehingga belum dapat memastikan konfigurasi optimum secara menyeluruh. Oleh karena itu, penelitian ini diarahkan untuk mengevaluasi secara lebih komprehensif 255 kombinasi sudut berkas potensial dari 1 sampai 8 berkas dengan delapan arah dasar, yaitu  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $225^\circ$ ,  $270^\circ$ , dan  $315^\circ$ , serta membandingkan pengaruh heterogenitas jaringan menggunakan phantom homogen dan fantom heterogen ICRP 145. Melalui pendekatan tersebut, penelitian ini diharapkan dapat mengidentifikasi pola geometri sudut berkas yang paling optimal dalam meminimalkan dosis pada OAR di sekitar prostat serta memperkuat dasar ilmiah bagi perencanaan terapi proton yang lebih efektif, presisi, dan aman.

## 1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini antara lain:

1. Melakukan validasi pengukuran dosis simulasi dengan acuan data *integral depth dose*.
2. Mendapatkan delapan konfigurasi arah berkas proton untuk memberikan dosis radiasi optimal pada prostat fantom MRCPs.
3. Mensimulasikan dosis *Organ at Risk* fantom MRCPs dari 255 kombinasi arah sudut berkas proton menuju prostat pada fantom homogen dan heterogen.

## 1.3 Manfaat Penelitian

1. Sebaran dosis organ dari bermacam orientasi arah berkas proton yang disimulasikan digunakan untuk menilai risiko dan efektivitas paparan.
2. Arah berkas yang optimal dapat digunakan untuk referensi berkas terapi proton secara klinis.