

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Penemuan sinar-X (1895) oleh Wilhelm Conrad Röntgen, penemuan sifat radioaktivitas pada atom (1896) oleh Henri Becquerel, serta penemuan radium (1898) oleh Madam Curie merupakan peristiwa penting yang melatarbelakangi penggunaan radioterapi sebagai salah satu modalitas pengobatan dengan menggunakan radiasi pengion. Sejak ditemukannya sinar-X, para ilmuwan diseluruh dunia mulai melakukan penelitian terkait kegunaan sinar-X dalam bidang kesehatan. Berdasarkan penelitian-penelitian tersebut, diketahui bahwa selain dapat digunakan dalam radiodiagnostik, sinar-X dapat digunakan juga dalam radioterapi khususnya radioterapi eksternal (Akhadi, 2020). Sedangkan penemuan radium oleh Madam Curie menjadi pelopor lahirnya pengobatan kanker dengan teknik brakiterapi (Mould, 1995).

Radioterapi atau dikenal juga sebagai terapi radiasi merupakan salah satu bentuk aplikasi teknik nuklir dalam bidang kesehatan. Definisi dari radioterapi sendiri yakni suatu modalitas pengobatan dengan menggunakan zat radioaktif yang terbungkus secara permanen dalam kapsul dan/atau pembangkit radiasi pengion seperti pesawat sinar-X dan akselerator berkas radiasi (BAPETEN, 2013). Berdasarkan letak sumber radiasinya, radioterapi terbagi menjadi dua teknik yakni radioterapi eksternal atau disebut juga teleterapi dan radioterapi internal atau disebut juga brakiterapi (Alatas, 2016). Pada dasarnya, radioterapi memanfaatkan energi radiasi pengion baik yang berasal dari radionuklida maupun dari pesawat radioterapi untuk pengobatan kanker, dengan menghambat pertumbuhan dan membunuh sel kanker itu sendiri (Gianfaldoni, dkk., 2017).

Penggunaan radiasi untuk pengobatan kanker pertama kali dilaporkan telah sukses dilakukan oleh dua dokter yakni Tage Sjögren and Tor Stenbeck pada tahun 1899 di Stockholm, Swedia (Mould, 1995). Berdasarkan hasil studi kebutuhan *treatment* radioterapi di beberapa negara maju, sekitar 50 - 60% penderita kanker memerlukan radioterapi dalam bentuk apapun (radiasi internal atau eksternal) baik sebagai modalitas tunggal maupun dikombinasikan dengan modalitas pengobatan lain seperti pembedahan atau kemoterapi (Begg, dkk., 2011; Tyldesley dkk., 2001).

Dari hasil studi yang dilakukan oleh beberapa peneliti di bidang fisika medis, diketahui bahwa radioterapi hadir di Indonesia sejak tahun 1927 (32 tahun sejak sinar-X ditemukan) (Firmansyah dkk., 2017; Fitriatuzzakiyyah dkk., 2017). Hal ini ditandai dengan adanya penggunaan pesawat sinar-X *orthovoltage* untuk penatalaksanaan radioterapi di Rumah Sakit Pusat Nasional Dr. Cipto Mangunkusumo pada tahun 1927 (Firmansyah dkk., 2017). Di Indonesia sendiri, modalitas pengobatan kanker yang umum dilakukan adalah kemoterapi dan proses pembedahan. Penggunaan radioterapi untuk pengobatan kanker, belum banyak digunakan dan masih terbatas. Namun, radioterapi menjadi salah satu modalitas penting dalam pengobatan kanker di Indonesia. Karena kedepannya, radioterapi dan ketersediaan fasilitasnya akan terus mengalami perkembangan (Fitriatuzzakiyyah, dkk., 2017).

Radiasi pengion dimanfaatkan dalam pengobatan kanker karena interaksi radiasi pengion dengan sel yang dapat merusak bahkan mematikan sel tersebut baik secara langsung maupun tidak langsung (Podgorsak, 2005). Dimana sebagian sel kanker memiliki sensitivitas terhadap radiasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan sel sehat (Anam, 2011). Dengan demikian, radiasi pengion dapat membunuh sel kanker dengan mempertahankan sel sehat sebanyak mungkin (Anam, dkk., 2020).

Saat ini adalah era dimana radioterapi umumnya menggunakan *megavoltage beams*. Namun bukan berarti pesawat radioterapi *kilovoltage* tidak digunakan sepenuhnya (Khan & Gibbons., 2014). *Linear Accelerator* (linac) medik merupakan salah satu pesawat radioterapi *megavoltage beams* yang sebagian besar

digunakan untuk radioterapi di masa kini (Podgorsak, 2005). Pesawat radioterapi ini merupakan pesawat teleterapi yang menggunakan medan radio frekuensi (RF) gelombang mikro berdaya tinggi untuk mempercepat partikel elektron mulai dari 4 hingga 25 MeV melalui suatu tabung linier, dimana pesawat radioterapi ini dapat bekerja dengan dua mode yakni mode elektron dan foton (Khan & Gibbons., 2014; Podgorsak, 2005).

Perencanaan penggunaan radiasi pengion dalam radioterapi dilakukan dengan hati – hati pada arah, energi, *field size*, dan intensitas tertentu untuk mencapai dosis maksimum dan *homogen* pada target (*phantom* atau pasien), sementara jaringan sehat disekitar menerima dosis seminimal mungkin (Anam dkk., 2020). Oleh karena itu, sebelum dilakukannya radioterapi pada pasien, terlebih dahulu dilakukan suatu proses simulasi dengan menggunakan program tertentu yang dinamakan *Treatment Planning System* (TPS). Pada linac medik dalam mode foton, partikel radiasi yang dilepaskan tidak murni hanya foton primer dan foton sekunder saja, terdapat pula partikel kontaminan seperti elektron dan positron. Partikel kontaminan ini dihasilkan dari interaksi foton primer dengan komponen *head* linac serta udara yang terdapat diantara *head* linac dan permukaan *phantom* (Allahverdi dkk., 2011).

Secara teori, ketika energi radiasi pengion yang digunakan dalam radioterapi meningkat, maka daya tembus dari partikel radiasi tersebut akan semakin besar. Hal ini mengarah pada titik dosis maksimum yang lebih dalam. Kontaminasi partikel bermuatan (elektron dan positron) pada berkas foton yang dihasilkan oleh linac medik dapat mempengaruhi distribusi dosis pada target (Sitti Yani dkk., 2016). Kontaminasi partikel ini, menggeser kedalaman yang dapat dijangkau oleh berkas foton menuju kedalaman yang lebih dangkal, sehingga meningkatkan dosis di permukaan (Allahverdi dkk., 2011). F. Seif dan M. R. Bayatiani pada tahun 2015 telah melakukan studi Monte Carlo menggunakan MCNPX terkait elektron kontaminan pada berkas 6 MV linac Varian (2100 C/D). Dari studi tersebut menunjukkan bahwa elektron kontaminan berkontribusi terhadap dosis pada permukaan (*build up region*) berkisar 6 – 27 % untuk *field size*  $5 \times 5$  sampai  $40 \times$

40 cm<sup>2</sup>. Selain itu, grafik PDD (*Percentage Depth Dose*) total menunjukkan bahwa dosis maksimum bergeser ke kedalaman yang lebih rendah dibandingkan dengan grafik PDD tanpa elektron kontaminan (Seif & Bayatiani, 2015). Berbagai penelitian terkait elektron kontaminan yang dihasilkan oleh linac medik dalam mode foton telah banyak dilakukan, dengan tujuan untuk mengetahui upaya apa yang dapat dilakukan dalam mengurangi partikel kontaminan tersebut. Agar dosis maksimum tepat di target serta meminimalkan dosis permukaan.

Selain produksi partikel kontaminan bermuatan, produksi neutron kontaminan yang dihasilkan oleh linac pada mode foton menjadi isu penting dalam proteksi radiasi. Seiring berjalannya waktu, teknik radioterapi semakin berkembang untuk meningkatkan efektivitas dari radioterapi itu sendiri. Teknik radioterapi modern seperti *Intensity Modulated Radiation Therapy* (IMRT) dan *Volumetric Modulated Arc Therapy* (VMAT) dengan linac berenergi tinggi bertujuan agar berkas yang dihasilkan dapat menjangkau tumor atau kanker yang letaknya lebih dalam (Takam, dkk., 2011). Namun, linac yang dioperasikan di atas 8 MV baik dalam mode elektron maupun foton dapat menimbulkan interaksi fotoneutron ( $\gamma, n$ ) (Sitti Yani dkk., 2020) yang sangat dihindari dalam fisika medis. Neutron sebagai partikel kontaminan yang tidak diharapkan dapat dihasilkan dari interaksi tersebut. Dalam mode foton, neutron ini merupakan hasil dari interaksi foton energi tinggi dengan material pada *head* linac seperti W, Cu, Fe, dan Pb (tungsten, tembaga, besi, dan timbal) (Alem-Bezoubiri dkk., 2014).

*National Council on Radiation Protection and Measurements* (NCRP) report 116 mengenai *Limitation of exposure to ionizing radiation*, merekomendasikan bahwa faktor kualitas (*quality factor*) dari energi fotoneutron 0.1 – 2 MeV yang dihasilkan radioterapi dengan menggunakan berkas foton adalah 20. Neutron ini merupakan partikel yang memiliki penetrasi tinggi dengan *Radiobiological Effectiveness* (RBE) tinggi. Dosis neutron yang kecil saja, memiliki efek yang berbahaya. Kontribusi partikel ini terhadap dosis serap *out of field* atau dosis diluar lapangan lebih kecil dibandingkan foton hambur. Namun mengingat faktor kualitasnya, neutron memberikan kontribusi yang signifikan dalam dosis efektif

pasien dan dapat meningkatkan kemungkinan terjadinya kanker sekunder dikemudian hari setelah *treatment* radioterapi dilakukan (Naseri & Mesbahi, 2010). Neutron kontaminan tersebut, dapat menjadi sumber utama kerusakan terhadap jaringan atau bahkan *Organs At Risk* (OARs) yang berada jauh dari *treatment field* (Banaee, dkk., 2021). Efek dari neutron ini, tidak hanya berbahaya bagi pasien saja melainkan bagi staff medis yang berada disekitar ruang *treatment* radioterapi (S. Yani dkk., 2016). Oleh karena itu, kontaminasi neutron ini harus menjadi pertimbangan saat proses *Treatment Planning System* (TPS).

Berdasarkan review yang dilakukan oleh Naseri dan Mesbahi terhadap beberapa penelitian terdahulu, eksperimen mengenai dosimetri neutron yang dihasilkan oleh linac dengan berbagai jenis dosimeter telah banyak dilakukan. Namun metode eksperimen, belum dapat menganalisis dari mana neutron tersebut berasal. Monte Carlo merupakan suatu metode yang dapat mengatasi masalah tersebut. Monte Carlo dapat merekam suatu partikel mulai dari partikel itu lahir hingga partikel tersebut mati. Semua informasi mengenai interaksi partikel, jumlah partikel yang dihasilkan, serta energi yang didepositkan pada suatu material dapat disimulasikan dan dihitung, dimana hasilnya akan didapatkan di akhir simulasi (Naseri & Mesbahi, 2010). Sama halnya seperti neutron, elektron dan positron kontaminan pada berkas foton linac juga dapat dilacak oleh metode Monte Carlo untuk mengetahui dari mana asal partikel tersebut.

Terdapat beberapa program simulasi berbasis Monte Carlo yang umumnya digunakan dalam penelitian di bidang radioterapi seperti FLUKA, EGSnrc, MCNP, dan PHITS. FLUKA merupakan salah satu *tool* atau alat simulasi yang dapat digunakan dalam perhitungan *transport* partikel dan interaksinya dengan materi, yang salah satu aplikasinya pada radioterapi. Dengan akurasi yang tinggi, sekitar 60 partikel yang berbeda dan dengan berbagai energi, dapat disimulasikan menggunakan FLUKA baik interaksi maupun propagasinya dalam materi (Ferrari dkk., 2005). Dibandingkan dengan program simulasi berbasis Monte Carlo lainnya, FLUKA memiliki kelebihan yakni dapat diakses secara bebas. Sedangkan

kelebihan FLUKA dibandingkan EGSnrc yang memiliki kesamaan dapat diakses secara bebas adalah dapat mensimulasikan produksi partikel neutron.

Pada 2016 telah dilakukan penelitian untuk mengetahui kontaminasi neutron berkas foton Linac Varian Clinac iX 10 MV dengan simulasi Monte Carlo MCNPX dan PHITS. Hasil penelitian menunjukkan bahwa neutron kontaminan yang berasal dari interaksi fotoneutron dihasilkan di target, *primary collimator*, *jaws Y*, MLC (*Multileaf Collimator*), dan pada *scoring plane* berjarak 100 cm dari target. Hasil penelitian ini juga menunjukkan bahwa jumlah dan energi neutron menurun secara bertahap dari pusat medannya. Selain itu, sebagian besar neutron kontaminan ini menyebar di ruang *treatment* (S. Yani dkk., 2016).

Pada 2020, Mohammad Ashrafinia, dkk telah melakukan simulasi Monte Carlo dengan menggunakan FLUKA untuk menginvestigasi produksi neutron pada linac 18 MV. Dari simulasi tersebut didapatkan kesimpulan bahwa target menjadi kontributor terbesar dalam produksi neutron. Adapun seiring bertambahnya jarak dari target, *fluence* neutron mengalami pengurangan (Ashrafinia, dkk., 2020).

Kemudian pada tahun 2020 telah dilakukan penelitian untuk mengetahui elektron kontaminan dari berkas foton linac Elekta SL 6 MV berbasis simulasi Monte Carlo EGSnrc. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kontaminasi elektron meningkat seiring bertambahnya *field size*. Kontaminasi elektron menurun seiring peningkatan kedalaman pada *phantom*. Adapun partikel tersebut dihasilkan di kolom udara antara *head* linac dengan *phantom* (3.65%), *mirror* (0.99%), dan *flattening filter* (0.59%) untuk kedalaman 1.0 mm dengan *field size*  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  (Anam dkk., 2020).

Berbagai penelitian berbasis simulasi Monte Carlo terkait partikel kontaminan yang dihasilkan pada berkas radiasi linac medik telah banyak dilakukan, beberapa contoh penelitian tersebut sebagaimana yang telah dipaparkan di atas. Umumnya, penelitian – penelitian yang telah dilakukan, menggunakan *tools* simulasi EGSnrc untuk mensimulasikan *transport* foton dan elektron, serta MCNP untuk mensimulasikan *transport* foton, elektron bahkan neutron kontaminan. Pada

penelitian ini, *tools* simulasi yang digunakan adalah FLUKA. Pemilihan FLUKA sebagai *tools* untuk melakukan simulasi karena lisensi untuk penggunaannya tidak sulit. Selain itu FLUKA juga *user friendly*, sehingga proses desain model cukup mudah untuk dilakukan oleh pemula dengan adanya *flair*.

Penelitian ini dilakukan dengan menyimulasikan komponen *head* linac sampai *phantom*. Tujuan penelitian yakni untuk mengetahui kontribusi komponen target, *primary collimator*, *flattening filter*, dan *jaws* dalam produksi foton, elektron, positron dan neutron kontaminan. Perhitungan *fluence* foton dimaksudkan untuk menjadi pembanding terhadap partikel kontaminan yang diproduksi. Adapun perhitungan *fluence* partikel menggunakan estimator USRBIN sehingga dapat diketahui *fluence* partikel foton sebagai berkas radiasi primer serta *fluence* elektron, positron, dan neutron sebagai partikel kontaminan pada komponen linac serta *phantom* yang disimulasikan. Dari hasil simulasi, akan diketahui bahwa partikel kontaminan pada berkas radiasi linac medik dengan mode foton berasal dari mana.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, penulis merumuskan beberapa rumusan masalah diantaranya:

1. Bagaimana *fluence* partikel foton, elektron, positron, dan neutron pada target, *primary collimator*, *flattening filter*, *ion chamber*, *jaws*, serta *phantom*?
2. Bagaimana *fluence* neutron dalam *phantom*, apakah ada neutron kontaminan yang masuk ke dalam *phantom*?
3. Bagaimana kontribusi target, *primary collimator*, *flattening filter*, *ion chamber*, serta *jaws* terhadap produksi partikel elektron, positron, dan neutron?

### 1.3 Tujuan Penelitian

Berikut ini merupakan tujuan dari penelitian yang dilakukan:

1. Menginvestigasi kontribusi target, *primary collimator*, *flattening filter*, *ion chamber*, *jaws X*, serta *jaws Y* terhadap produksi elektron, positron, dan neutron kontaminan pada berkas foton yang dihasilkan oleh linac.
2. Mengetahui ada atau tidaknya keberadaan neutron kontaminan yang sangat dihindari dalam fisika medis di dalam *phantom*.

### 1.4 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini dapat memberikan manfaat, antara lain:

1. Secara teoritis, diharapkan dapat menambah wawasan dan keilmuan mengenai partikel apa saja yang mungkin di *transport* oleh pesawat linac medik saat beroperasi, serta mengenai neutron kontaminan yang dihasilkan dari interaksi foton neutron pada linac berenergi tinggi yang dioperasikan dalam mode foton.
2. Secara praktis
  - Bagi penulis : penelitian ini diharapkan dapat menjadi sarana bagi penulis untuk mengimplementasikan pengetahuan dalam bidang radioterapi khususnya terkait berkas yang dihasilkan oleh pesawat linac dan juga partikel kontaminan yang mungkin dihasilkan pada pesawat linac medik.
  - Bagi peneliti selanjutnya : diharapkan dapat memberikan motivasi dan menjadi opsi untuk melakukan penelitian di bidang radioterapi dengan menggunakan *software FLUKA* yang bersifat *open source*.

## 1.5 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini, masalah – masalah ditinjau dengan beberapa batasan, antara lain:

1. Simulasi dilakukan dengan menggunakan *software* FLUKA. Sedangkan proses desain *head* linac dan *phantom* menggunakan *flair* yang merupakan *software* untuk membuat input bagi FLUKA.
2. Data parameter *head* linac yang digunakan, terdapat pada *software* EGSnrc.
3. Pesawat linac yang dimodelkan merupakan pesawat linac pada mode foton.
4. Energi elektron yang digunakan pada simulasi adalah 10 MeV.
5. Komponen *head* linac yang dimodelkan yakni target, *primary collimator*, *flattening filter*, *ion chamber*, *jaws X*, dan *jaws Y*.
6. *Phantom* yang dimodelkan adalah *water phantom* berukuran 40x40x40 cm<sup>3</sup>.
7. Skoring *fluence* partikel dilakukan dengan menggunakan USRBIN.

## 1.6 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika dari penelitian ini, diuraikan sebagai berikut:

### BAB I Pendahuluan

Bab ini berisi latar belakang mengenai permasalahan - permasalahan yang menjadi alasan dilakukannya penelitian dan studi pustaka mengenai penelitian terdahulu. Selain itu berisi juga rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

### BAB II Tinjauan Pustaka

Bab ini berisi teori – teori ilmiah serta konsep - konsep yang berkaitan dengan penelitian tugas akhir yang dilakukan.

### **BAB III Metodologi Penelitian**

Bab ini berisi waktu dan tempat penelitian, alat dan bahan yang digunakan, tahapan penelitian mulai dari pendesainan *head* Linac dan *phantom* hingga tahapan pengolahan data.

### **BAB IV Hasil Penelitian dan Pembahasan**

Bab ini berisi hasil penelitian dari simulasi yang dilakukan serta analisis terhadap data – data yang didapatkan.

### **BAB V Penutup**

Bab ini berisi simpulan dari penelitian yang dilakukan serta saran berdasarkan hasil analisa penulis untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

