

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Neutron merupakan radiasi partikel tak langsung karena ionisasinya tidak membawa muatan. Meskipun tidak menyebabkan ionisasi secara langsung, neutron dapat menghasilkan partikel bermuatan saat berinteraksi dengan inti atom. Interaksi ini menjadi pemicu awal kerusakan biologis. (IARC, 2012; Syaifudin, 2023; USNRC, 2003). Neutron cepat, misalnya, dapat menghasilkan proton dan inti rekoil dari elemen karbon, nitrogen, dan oksigen pada tubuh manusia yang memberikan risiko kerusakan jaringan normal (Gordon dkk., 2022; Stricklin dkk., 2021).

Neutron lebih efektif dalam menyebabkan kerusakan biologis dibanding sinar-X dan gamma karena mampu melepaskan lebih banyak energi dalam bentuk gugusan peristiwa ionisasi. Energi ini mengakibatkan kerusakan lokal yang lebih parah, seperti lesi DNA yang terkluster dan kompleks (USNRC, 2003). Efektivitas ini diukur melalui nilai *Relative Biological Effectiveness* (RBE). Studi pada penyintas bom atom Jepang menunjukkan RBE neutron berkisar antara 25–80 dalam risiko kanker. (Cordova & Cullings, 2019) Studi lain pada hewan melaporkan RBE antara 2–100, tergantung jenis jaringan dan efek biologis yang ditimbulkan (IARC, 2000; Jones, 2020). Percobaan pada tingkat sel melaporkan nilai RBE sebesar 1–5 untuk pembunuhan sel, 2–20 untuk induksi mutasi, dan 1 untuk induksi kerusakan untai ganda DNA (Jones, 2020).

Neutron memiliki efek yang lebih besar pada jaringan yang beregenerasi lambat, seperti sistem saraf pusat dan jaringan lemak (Jones, 2020). Paparan dosis rendah neutron (18 cGy) pada tikus terbukti menurunkan eksitabilitas neuron hipokampus, mengganggu proses *Long Term Potentiation* (LTP), serta menyebabkan penurunan fungsi belajar dan memori (Acharya dkk., 2019; Klein dkk., 2021). Studi lain menunjukkan bahwa paparan internal neutron terhadap ^{56}Mn pada dosis yang kurang dari

0,15 Gy berdampak jangka panjang pada aktivitas lokomotor tikus (Otani dkk., 2022; Halg & Schneider, 2020).

Paparan neutron juga dapat menyebabkan katarak, gangguan kardiovaskular, penurunan neurogenesis, serta perubahan perilaku seperti hilangnya keengganan rasa meski tidak mempengaruhi kemampuan belajar (Stricklin dkk., 2021). Studi oleh (Hoel & Carnes, 2017) menunjukkan penurunan pemendekan fraksional ventrikel kiri dan peningkatan ketebalan dinding ventrikel kiri pada hewan yang menerima radiasi dosis tinggi (0,4 Gy). Hasil serupa ditemukan pada tikus jantan C3H setelah radiasi kronis yang menunjukkan cedera pada miokardium dan peningkatan mortalitas kardiovaskular. Studi menunjukkan insiden tumor yang tinggi, seperti pada tikus Sprague-Dawley dengan dosis 0,5–1,5 Gy mencapai 84–87%, tikus Fischer 71% pada dosis 0,5 Gy, dan tikus Wistar/Furth dengan 6,3% pada dosis 0,48 Gy (IARC, 2000; Klein dkk., 2021)

Dampak neutron juga terjadi pada manusia dalam lingkup medis. Terapi neutron pada pasien menunjukkan kasus kanker berulang dalam lokasi yang diradiasi. Diantaranya, tercatat dua pasien meninggal akibat sarkoma rekuren lokal yang tidak dapat diobati, (MacDougall dkk., 2006; Dowlatabadi dkk., 2020). Kasus lain terjadi pada pasien kanker serviks dengan risiko kanker sekunder di lokasi yang dekat dengan serviks (Anil dkk., 2007). Paparan neutron pada ibu hamil juga dapat meningkatkan risiko adenoma dan karsinoma hati pada keturunannya (IARC, 2000)

Risiko ini tidak hanya mengancam pasien, tetapi juga pekerja medis yang terpapar secara tidak langsung. Salah satu sumber utama kontaminasi neutron dalam dunia medis berasal dari Linac berenergi tinggi, terutama pada energi ≥ 10 MV yang menghasilkan neutron melalui reaksi fotonuklir (γ, n) (Savitri dkk., 2021). Kepala Linac dengan target berbahan tungsten merupakan sumber utama dan memberikan kontribusi paling besar terhadap kontaminasi neutron (Ashrafinia dkk., 2020a; Elmtalab dkk., 2022; Awikunprasert dkk., 2021; Banaee dkk., 2021; Dowlatabadi dkk., 2020;

Ramdani dkk., 2023; Uddin dkk., 2024). Hal ini dikarenakan material tungsten memiliki ambang energi produksi fotoneutron yang rendah (6,74 MeV), dan penampang lintang yang tinggi untuk reaksi fotonuklir (γ, n). (Dowlatabadi dkk., 2020; Uddin dkk., 2024; Banaee dkk., 2021).

Ganjaroodi & Fathalizade (2024) menambahkan neutron yang dihasilkan dari target tungsten pada Linac bersifat cepat dan berenergi tinggi, lebih berbahaya daripada neutron termal. Selain bahaya pada pasien atau pekerja, beberapa komponen kepala Linac, sofa pasien, udara ruangan perawatan, bahan bangunan, dan pasien radioterapi itu sendiri dapat menjadi radioaktif (Uddin dkk., 2024). Pada mekanisme ini, energi foton memisahkan muatan dalam inti hingga neutron dilepaskan. Reaksi nuklir antara berkas foton dan material sekitarnya atau tubuh pasien inilah yang berpotensi menghasilkan neutron juga (menjadi radioaktif) (Banaee dkk., 2021).

Berdasarkan data diatas, bagian yang berperan penting dalam kontaminasi neutron pada Linac adalah target yang pada umumnya terbuat dari tungsten. Oleh karena itu, penelitian seputar manipulasi/pergantian target dapat dikembangkan untuk mengurangi hasil produksi neutron dari Linac. Penelitian (Rojas-Arias dkk., 2020) mengusulkan tiga material target baru dengan komposisi $Ti_XV_{0,035}Cu_{X-1,035}$ ($X = 2, 4$ and 6%) untuk mengurangi produksi neutron. Hasilnya menunjukkan bahwa produksi neutron cepat dari target baru ini 7 kali lebih rendah dari target tungsten. Komposisi $Ti_2V_{0,07}Cu_{97,93}$ menunjukkan hasil produksi neutron yang paling rendah untuk neutron termal dan cepat. Penelitian lanjutan oleh (Cheraghian dkk., 2022) menunjukkan bahwa penerapan komposisi target $Ti_2V_{0,7}Cu_{97,93}$ pada Linac dapat menurunkan produksi fotoneutron hingga 38%.

Komposisi $Ti_2V_{0,7}Cu_{97,93}$ yang diajukan berisi unsur utama (Cu) dengan nomor atom dan kepadatan lebih rendah daripada tungsten, sehingga produksi fotoneutron akan lebih sedikit dari tungsten (Cheraghian dkk., 2022; Dalumpines dkk., 2024) . Hal itu didukung dengan fakta bahwa ambang produksi fotoneutron dari tembaga (Cu) yang lebih besar daripada tungsten

(Dowlatabadi dkk., 2020; Uddin dkk., 2024). Selain itu, tembaga memberikan konduktivitas termal yang lebih tinggi ($401 \text{ W/m}^\circ\text{C}$) dibandingkan tungsten ($174 \text{ W/m}^\circ\text{C}$) untuk meningkatkan efisiensi termal (Rojas-Arias dkk., 2020).

Pada penelitian ini, simulasi dengan metode Monte Carlo digunakan untuk mengetahui pengaruh dari pergantian target pada kepala Linac terhadap produksi neutron yang dihasilkan. Monte Carlo dapat menghitung distribusi radiasi neutron yang dihasilkan dari berbagai interaksi yang terjadi dan mengukur sebarannya. Pendekatan ini memungkinkan pemeriksaan langsung tentang bagaimana radiasi berinteraksi dengan material (Dalumpines dkk., 2024). Selain itu, metode ini bersifat fleksibel, berbiaya yang rendah, dan dapat menghindari risiko terkait penanganan bahan radioaktif (Aviv & Elia, 2020).

Perangkat lunak Fluka digunakan untuk simulasi monte carlo karena menunjukkan kesesuaian yang lebih baik secara umum dengan data, memberikan gambaran yang lebih akurat tentang kontribusi neutron berenergi tinggi, dan lisensi untuk penggunaannya tidak sulit dibandingkan MCNP, PHITS, dan Geant4. (Blideanu dkk., 2024; Kulesza dkk., 2022). Selain itu, Fluka menggunakan pendekatan kelompok energi (*energy group*) yang menyederhanakan perhitungan dan mengurangi kebutuhan komputasi (Frosio dkk., 2021). Kombinasi perangkat lunak Fluka dengan antarmuka Flair memiliki keunggulan dalam hal kegunaan dan kesederhanaan dibandingkan perangkat lunak Monte Carlo lain (Aviv & Elia, 2020). Fluka juga sering digunakan dalam aplikasi dosimetri untuk terapi radiasi eksternal dan penelitian medis lainnya (Park dkk., 2021; Zaman dkk., 2022). Pada penelitian (Karaman dkk., 2020), hasil perhitungan yang diperoleh dengan metode Monte Carlo Fluka sangat sesuai dengan data eksperimen yang diukur dengan detektor *Neutron Thermo Scientific RadEye*. Selain itu, hasil penelitian (Ramdani dkk., 2023) menyebutkan bahwa rata-rata ketidakpastian statistik hasil simulasi pada komponen material target oleh metode Monte

Carlo FLUKA hanya 0,58%, nilai yang cukup kecil hingga menunjukkan keakuratan metode ini untuk simulasi transpor partikel.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang akan dibahas pada laporan ini adalah:

1. Unsur mana yang paling berpengaruh dalam komposisi target baru TiVCu terhadap penurunan produksi neutron?
2. Berapa persentase masing-masing unsur pada komposisi TiVCu yang menghasilkan produksi neutron paling kecil?

1.3 Batasan Masalah

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

1. Penelitian ini hanya akan fokus pada simulasi menggunakan perangkat lunak Fluka untuk Linac energi 18 MeV.
2. Pengujian material dilakukan dalam skala simulasi, tidak termasuk uji klinis langsung pada pasien.
3. Parameter yang dianalisis adalah banyaknya *fluence* neutron yang dihasilkan dari Linac dengan target TiVCu.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh dari setiap unsur pada komposisi TiVCu terhadap produksi neutron.
2. Mengoptimasi persentase setiap unsur pada komposisi TiVCu yang menghasilkan produksi neutron paling kecil.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan alternatif material target yang dapat mengurangi paparan neutron pada pasien dan staf rumah sakit dalam proses radioterapi.
2. Menyediakan data perbandingan yang dapat membantu dalam optimasi penggunaan Linac di rumah sakit.

3. Mendorong inovasi lebih lanjut dalam pengembangan teknologi radioterapi yang lebih aman dan efektif.

1.6 Sistematika Penulisan

Secara sistematis, pembahasan penulisan proposal ini terdiri dari setiap bab sebagai berikut:

1. BAB I Pendahuluan

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

2. BAB II Dasar Teori

Bab ini berisikan dasar teori mengenai penelitian yang akan dilakukan dan menjelaskan teori pendukung penelitian mengenai simulasi optimasi pengurangan fotoneutron pada Linac dengan material target baru menggunakan metode *monte carlo*.

3. BAB III Metodologi Penelitian

Bab ini berisi waktu dan tempat penelitian, alat dan bahan yang digunakan, dan tahapan penelitian dari pemodelan ruangan hingga tahapan pengolahan data.

4. BAB IV Hasil dan Pembahasan

Bab ini berisikan tentang hasil dari penelitian yang telah dilakukan berikut dengan pembahasan dan analisisnya diantaranya hasil optimasi material target Linac TiVCu.

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.