

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Radioterapi merupakan salah satu metode pengobatan kanker selain pembedahan dan kemoterapi. Tujuan utama dari terapi adalah untuk menghancurkan sel kanker dengan dosis radiasi yang tepat dan meminimalkan kerusakan pada jaringan sehat (Sianturi et al., 2025). Salah satu modalitas yang digunakan adalah *Linear Accelerator* (LINAC), yang menghasilkan berkas foton atau elektron berenergi tinggi. Namun pada terapi berkas foton, terdapat fenomena *build-up region*, yaitu daerah permukaan kulit dimana dosis radiasi belum mencapai nilai maksimumnya (d_{max}) akibat belum tercapainya keseimbangan elektron sekunder (Li, Tseng, & Wu, 2020; Sheykholeslami et al., 2023). Akibatnya, pada kasus kanker *superfisial* seperti kanker kulit atau kanker area kepala-leher, jaringan target sering menerima dosis yang kurang optimal .

Solusi untuk mengatasi hal ini, digunakan bolus, yaitu material *tissue-equivalent* yang berfungsi sebagai penambah *build-up region* agar dosis pada permukaan meningkat. Bolus bekerja dengan prinsip yang menyerupai jaringan biologis yang di tempelkan langsung pada kulit pasien. Dengan penambahan bolus ini, distribusi dosis di permukaan menjadi lebih seragam dan sesuai target klinis. Namun, bolus konvensional seperti *superflab*, *elasto-gel*, atau *paraffin wax* masih memiliki keterbatasan, terutama dalam kemampuan menempel pada kontur anatomi yang kompleks seperti wajah atau leher, sehingga sering timbul *air gap* yang menurunkan efektivitas terapi (Chatchumnan et al., 2022). Selain itu, material tersebut sering kali kaku, sulit disesuaikan dengan bentuk tubuh, dan tidak dapat digunakan ulang secara efisien (Endarko, 2021).

Seiring perkembangan teknologi material, *silicon rubber* (SR) telah menjadi kandidat alternatif untuk bolus radioterapi. Material ini bersifat elastis, fleksibel, tidak toksik, dan mudah dicetak sesuai kontur tubuh pasien. Penelitian yang dilakukan oleh Boopathi dkk (2023) dan Chen dkk (2024) menunjukkan bahwa

bolus berbasis SR memiliki *air gap* yang sangat kecil (0.07 cm) dibandingkan gel dan termoplastik (masing-masing 4.82 cm dan 2.96 cm), serta mampu mempertahankan stabilitas fisik pasca-penyinaran. Secara dosimetrik, *percentage depth dose* (PDD) dan dosis permukaan yang dihasilkan oleh bolus SR hampir identik dengan bolus komersial. Hal ini menunjukkan bahwa SR dapat digunakan secara klinis, khususnya untuk terapi foton pada area kepala-leher (Boopathi et al., 2021; Chen et al., 2024). Namun, penelitian ini belum melibatkan penambahan partikel logam berat ke dalam matriks silikon yang berpotensi meningkatkan performa radiologis serta mengoptimalkan distribusi dosis.

Tungsten Trioxide (WO_3) menjadi salah satu pilihan potensial karena memiliki densitas elektron dan nomor atom ($Z=74$) yang tinggi, sehingga mampu meningkatkan *attenuation coefficient* terhadap radiasi gamma dan foton (Iliyasu, 2023). Studi oleh Al-Ghamdi dkk (2022) menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi WO_3 pada matriks silikon dapat meningkatkan efisiensi penyerapan foton, meskipun dapat mengubah sifat mekanik material. Penelitian Hesham dkk (2025) juga mengkonfirmasi bahwa komposit (*Polymethyl methacrylate*) PMMA/ WO_3 memiliki kemampuan atenuasi radiasi yang meningkat seiring penambahan kadar WO_3 hingga 40 %, dengan nilai *half-value layer* (HVL) yang semakin kecil, menandakan kemampuan penyerapan radiasi yang lebih baik (Hesham et al., 2025).

Penelitian terdahulu oleh Okuhata dkk (2021) dan Sakai dkk (2023) memperkuat dasar ilmiah penggunaan tungsten dalam material bolus. Mereka mengkaji karakteristik dosimetrik dari *Shape Tunable Rubber* (STR), yaitu karet fleksibel yang mengandung tungsten, pada radioterapi foton 6 MV. Hasilnya menunjukkan bahwa dosis relatif pada kedalaman 1 mm meningkatkan signifikan dari 47.6% (tanpa bolus) menjadi 89.4% pada STR ketebalan 3 mm. Selain itu, terjadi pergeseran kedalaman dosis maksimum (d_{max}) dari 15 mm (tanpa bolus) menjadi 10-13 mm tergantung ketebalan bolus. STR 1 mm menghasilkan d_{max} sekitar 4.4 mm, menjadikan nya sebagai bolus kustom untuk terapi foton tanpa mengubah profil lateral secara signifikan. Namun, penelitian ini belum

mengevaluasi karakteristik seperti *absorbed dose absolut*, nilai RED atau aplikasinya pada ketebalan yang lebih besar dan energi foton 10 MV (Okuhata et al., 2021; Sakai et al., 2023).

Penelitian di Indonesia juga telah mengembangkan bolus berbasis *silicon rubber* komposit dengan tambahan logam seperti tembaga (Cu), bismuth (Bi), dan Aluminium (Al). Hasil penelitian oleh Endarko dkk (2021) serta Fathin dkk (2021) menunjukkan bahwa material SR komposit tersebut mampu meningkatkan densitas, nilai RED, serta surface dose secara signifikan dan membuktikan bahwa kombinasi SR dengan logam berat efektif meningkatkan performa dosimetrik (Endarko et al., 2021; Fathin et al., 2021). Namun, sebagian besar penelitian tersebut masih difokuskan pada energi elektron, belum pada energi foton megavolt (MV) yang umum digunakan dalam radioterapi klinis.

Berdasarkan penelitian terdahulu, maka pengembangan bolus berbasis *silicon rubber-tungsten trioxide* (SR-WO₃) menjadi langkah yang sangat relevan dalam upaya peningkatan kualitas terapi radiasi modern. Kombinasi kedua material ini diharapkan menghasilkan bolus dengan karakteristik fisik dan radiologis yang optimal, dan mampu meningkatkan karakteristik dosis, menggeser kedalaman dosis maksimum (d_{max}), serta tetap menjaga fleksibilitas dan kenyamanan saat diaplikasikan pada pasien. Penelitian optimasi bolus SR-WO₃ ini merupakan upaya penting untuk meningkatkan efektivitas terapi radiasi berkas foton menggunakan LINAC. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata terhadap peningkatan keberhasilan terapi kanker, khususnya pada kasus dengan kontur anatomi yang kompleks dan kanker pascaoperasi.

1.2 Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan tujuannya adalah sebagai berikut:

1. Mendapatkan bolus berbasis *Silicon Rubber* yang dikombinasikan dengan *tungsten trioxide* (WO₃) wt 6% dengan ketebalan 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm dan 10 mm untuk menghasilkan bolus yang sesuai untuk terapi radiasi eksternal.

2. Mengevaluasi karakteristik dosimetri bolus SR-WO₃, yaitu dosis serap (*absorbed dose*) dan nilai *Relative Elektron Density* (RED) berdasarkan nilai CT *number* pada variasi ketebalan bolus menggunakan LINAC.
3. Menganalisis pengaruh variasi ketebalan bolus SR-WO₃ terhadap *Percentage Depth Dose* (PDD) di daerah *build-up region* dalam radioterapi berkas foton menggunakan LINAC 6 MV dan 10 MV.

1.3 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat di peroleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut;

1. Memberikan data ilmiah baru mengenai karakteristik fisik dan dosimetri bolus SR-WO₃ pada energi 6 dan 10 MV.
2. Meningkatkan efektivitas terapi radiasi pada lesi superfisial.
3. Menghasilkan material bolus yang fleksibel, adaptif, dan ekonomis, sehingga dapat mengurangi air gap serta menjadi alternatif yang lebih terjangkau di bandingkan produk komersial.
4. Mendukung peningkatan kualitas kesehatan radioterapi menggunakan LINAC dan berpotensi meningkatkan outcome pengobatan kanker di fasilitas kesehatan.