

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penggunaan radiasi pengion melalui pencitraan sinar-X telah menjadi bagian integral dalam pelayanan kesehatan di Indonesia untuk keperluan diagnostik maupun perencanaan terapi (Najjar, 2023). Seiring ekspansi fasilitas kesehatan di berbagai daerah, penggunaan modalitas juga kian bertambah (Martin, 2015). Namun demikian, radiasi pengion tetap membawa risiko kerusakan *Deoxyribonucleic Acid* (DNA) yang dapat memicu efek deterministik maupun stokastik (Dauer, 2014; Solc *et al.*, 2025). Oleh karena itu, keselamatan radiasi menjadi aspek fundamental yang harus diperhatikan dalam setiap implementasi teknologi berbasis radiasi (Yadav *et al.*, 2021; Xie *et al.*, 2025)

Salah satu kerangka dasar perlindungan radiasi adalah prinsip optimasi *As Low As Reasonably Achievable* (ALARA) yang menekankan bahwa paparan harus dijaga serendah mungkin secara wajar (Archer *et al.*, 2004; NCRP 147). Secara operasional, ALARA dicapai melalui tiga pendekatan yakni meminimalkan waktu paparan, memaksimalkan jarak dari sumber, dan menggunakan material *shielding* yang efektif (Bari *et al.*, 2015; Najjar, 2023). Dalam perancangan *shielding* struktural, parameter kritis yang dipertimbangkan mencakup tegangan tabung (kVp), arus-waktu (mAs), serta sifat material seperti densitas dan nomor atom (Najjar *et al.*, 2023; Golikov *et al.*, 2023; Onaizi *et al.*, 2024).

Di Indonesia, regulasi menetapkan dinding standar ruang radiografi berupa beton 20 cm atau bata merah 25 cm yang dianggap setara dengan timbal 2 mm. Material ini merupakan *shielding* konvensional yang umum digunakan. Namun, kondisi nyata di fasilitas kesehatan sering tidak ideal berkaitan dengan dinamika *layout* interior, alur pergerakan pasien, dan integrasi meja kontrol. Hal ini kerap memaksa posisi tabung sinar-X ditempatkan lebih dekat ke salah satu sisi dinding (Xie *et al.*, 2025; Tekin *et al.*, 2016). Pada kondisi spasial terbatas ini, jarak antara sumber radiasi dan dinding menjadi parameter desain kritis yang secara langsung

mempengaruhi intensitas paparan yang diterima material *shielding* dan dosis yang diterima masyarakat di luar ruangan.

Salah satu inovasi untuk mengantisipasi keterbatasan ruang adalah konfigurasi *shielding* kombinasi berupa penggunaan dua lapisan material berbeda secara berurutan. Kombinasi lapisan material bernomor atom tinggi seperti timbal dengan material masif seperti beton terbukti meningkatkan kapasitas atenuasi secara lebih efisien dibandingkan hanya menambah ketebalan material tunggal (Almuqrin *et al.*, 2024; Al-Saleh *et al.*, 2023; Yani *et al.*, 2026). Sinergi ini terjadi karena setiap lapisan memanfaatkan kombinasi mekanisme interaksi yang berbeda. Timbal menyerap foton secara efektif melalui efek fotolistrik, sementara beton mereduksi komponen energi menengah melalui hamburan *compton* sepanjang ketebalannya.

Meski demikian, kajian yang spesifik mengevaluasi efektivitas komparatif antara *shielding* selapis dan kombinasi dalam menahan radiasi hamburan sekunder dari pasien khususnya pada variasi jarak fantom-dinding ekstrem masih sangat terbatas. Studi terdahulu oleh Abdul Aziz *et al.* (2020) yang menggunakan PHITS untuk simulasi *shielding* ruang sinar-X berfokus pada tata letak klinis standar tanpa mengevaluasi jarak di bawah 1 m. Wilson *et al.* (2021) menunjukkan bahwa reduksi dosis hamburan terhadap jarak sering menyimpang dari prediksi hukum kuadrat terbalik, namun studi tersebut tidak menyertakan dinding *shielding* struktural. Sementara itu, Al-Saleh *et al.* (2023) dan Osman *et al.* (2022) masing-masing berfokus pada material alternatif dan analisis efek hamburan balik, tanpa menghubungkan keduanya dengan pemetaan jarak optimum berdasarkan regulasi dosis. Sejauh ini belum banyak studi yang secara sistematis mengevaluasi bagaimana variasi jarak ekstrem fantom-dinding memengaruhi efektivitas *shielding* selapis maupun kombinasi beton-timbal dalam memenuhi batas dosis masyarakat.

Di sisi lain, uji empiris memvariasikan jarak alat secara ekstrem di fasilitas klinis aktif sulit dilakukan akibat kendala operasional dan risiko paparan pada pasien maupun petugas. Metode simulasi *monte carlo* menjadi pendekatan prediktif untuk memodelkan transportasi partikel secara presisi dalam geometri dan material yang kompleks tanpa risiko paparan nyata (Haghighat, 2016). *Particle and Heavy*

Ion Transport code System (PHITS) versi 3.35 sebagai *perangkat lunak* dipilih karena tervalidasi untuk simulasi foton pada rentang energi diagnostik (Sato *et al.*, 2015; Abdul Aziz *et al.*, 2020). Sumber spektrum sinar-X pada tegangan puncak 150 kVp digunakan sebagai representasi kondisi *worst-case* (batas atas daya tembus foton dalam rentang diagnostik) untuk memastikan hasil evaluasi mencakup kondisi paparan paling kritis yang mungkin terjadi secara klinis. Pendekatan ini sangat penting karena 150 kVp mewakili tingkat paparan energi tinggi sebagai margin keselamatan dosis yang diterima masyarakat umum dan staf.

Evaluasi performa *shielding* radiasi dilakukan dengan memodelkan transportasi radiasi dengan kode simulasi PHITS. PHITS digunakan untuk simulasi transportasi partikel termasuk foton, neutron, dan elektron dalam berbagai material (Sato *et al.*, 2015). Kinerja *shielding* dievaluasi dengan membandingkan spektrum dosis, koefisien atenuasi massa, koefisien atenuasi linier, *Half Value Layer* (HVL) dan *Tenth Value Layer* (TVL) menggunakan hasil dosis perasional *Ambient Dose Equivalent* $H^*(10)$. Dosis $H^*(10)$ merepresentasikan fantom representasi tubuh yang ditetapkan oleh *International Commission on Radiation Units and Measurements* (ICRU). Hasil evaluasi berbasis simulasi ini diharapkan dapat memetakan ambang batas jarak optimum penempatan alat sebagai landasan ilmiah proteksi radiasi bagi masyarakat.

1.2 Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk membandingkan efektivitas *shielding* beton 20 cm dan timbal 2 mm, serta *shielding* kombinasi beton-timbal dalam melemahkan radiasi pada variasi jarak fantom-dinding secara ekstrem dengan tegangan puncak 150 kVp, berdasarkan karakteristik spektrum dosis, faktor transmisi, koefisien atenuasi massa, koefisien atenuasi linier, HVL dan TVL. Berdasarkan hasil dosis akan diperoleh estimasi awal (*preliminary*) jarak fantom-dinding dari ketiga konfigurasi *shielding* yang berpotensi memenuhi dosis dalam batas aman bagi masyarakat (<1 mSv/tahun) dari kondisi radiasi hamburan dari spektrum dengan energi puncak 150 kVp.

1.3 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian evaluasi performa konfigurasi *shielding* radiasi ini adalah:

1. Memberikan informasi perubahan profil kualitas berkas dan estimasi dosis dalam penggunaan *shielding* selapis beton atau timbal dan kombinasi beton-timbal pada ketebalan standar regulasi Indonesia (beton 20 cm, timbal 2 mm) terhadap batas dosis masyarakat pada kondisi *worst-case* 150 kVp di seluruh rentang jarak fantom-dinding 0,25–2,0 m,
2. Memberikan informasi awal kemampuan atenuasi pada konfigurasi kombinasi beton-timbal dibandingkan *shielding* selapis untuk menjadi dasar yang kuat untuk penelitian lanjutan dengan teknik *variance reduction* guna memperoleh karakterisasi kuantitatif yang presisi.