

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Radiografi merupakan teknik pencitraan medis yang memanfaatkan interaksi radiasi pengion, khususnya sinar-X atau sinar gama, dengan materi untuk memvisualisasikan struktur internal tubuh secara non-destruktif. Proses ini didasarkan pada prinsip atenuasi foton yang berbeda-beda saat melewati berbagai kerapatan jaringan, sehingga menghasilkan pola distribusi intensitas yang ditangkap sebagai radiograf. Hasil gambaran tersebut sangat krusial karena digunakan untuk diagnosis, pemantauan penyakit, serta perencanaan intervensi terapi. Sebagai salah satu modalitas yang paling banyak digunakan, radiografi terus dikembangkan untuk meningkatkan kualitas citra sekaligus menekan dosis radiasi (Ardila et al., 2024). Transisi dari sistem konvensional berbasis *film-screen* menuju teknologi digital menjadi tonggak penting dalam efisiensi radiologi modern.

Sistem radiografi digital saat ini semakin banyak diadopsi karena kemampuannya dalam menghasilkan kualitas citra yang jauh lebih unggul dibandingkan metode konvensional (Ardila et al., 2024). Keunggulan utama sistem ini terletak pada aspek fisis detektor yang memiliki rentang dinamis luas, sehingga memungkinkan manipulasi, peningkatan, serta penyimpanan citra secara efisien untuk mendukung akurasi diagnosis (Sinsuebphon et al., 2020). Selain itu, integrasi dengan *Radiology Information System* (RIS) dan *Picture Archiving and Communication System* (PACS) mempercepat distribusi citra secara elektronik guna mendukung kolaborasi klinis yang efektif (ASRT, 2025). Namun, fleksibilitas dalam pasca-pemrosesan citra digital ini membawa tantangan baru bagi fisikawan medis terkait manajemen dosis radiasi. Karakteristik sistem digital yang mampu memperbaiki citra *overexposed* sering kali memicu kecenderungan penggunaan dosis yang lebih tinggi dari yang diperlukan.

Kekhawatiran utama dalam penggunaan radiasi pengion adalah dampak biologi yang ditimbulkan, sehingga paparan pada pasien harus dikendalikan seminimal mungkin. Salah satu permasalahan fisis yang sering muncul pada sistem

digital adalah *dose creep*, yaitu peningkatan dosis radiasi secara tidak disadari akibat ambisi untuk menghasilkan citra yang bebas dari *noise*. Masalah ini dipengaruhi oleh berbagai faktor, terutama kurangnya optimasi antara kualitas citra dan pengendalian dosis pada berbagai sistem prodektor yang memiliki karakteristik berbeda (Chusin et al., 2024). Dalam fisis pencitraan, citra yang kurang terpapar (*underexposed*) akan didominasi oleh *quantum mottle* atau *noise* tinggi yang menurunkan nilai diagnostik. Sebaliknya, citra yang terpapar berlebihan (*overexposed*) cenderung masih dapat diperbaiki melalui pasca-pemrosesan, yang secara tidak langsung melegitimasi penggunaan dosis berlebih (Chusin et al., 2024).

Untuk mengatasi fenomena *dose creep* dan menjaga prinsip keselamatan pasien, diperlukan parameter kuantitatif sebagai alat pemantau eksposi yang objektif. *International Electrotechnical Commission* (IEC) dan *American Association of Physicists in Medicine* (AAPM) telah memperkenalkan penggunaan *Exposure Index* (EI) dan *Deviation Index* (DI) untuk menilai keseimbangan antara kualitas citra dan keamanan radiasi (Chusin et al., 2024; Siebert & Morin, 2011). Parameter EI memberikan gambaran tentang jumlah fluks foton yang mencapai detektor, sementara DI menunjukkan penyimpangan dari target eksposi yang diharapkan. Dengan memantau kedua indikator ini, radiografer dapat melakukan evaluasi terhadap teknik eksposi yang digunakan, terutama saat menghadapi objek yang tebal. Evaluasi ini menjadi sangat penting mengingat setiap perubahan tegangan tabung akan menggeser spektrum energi foton dan mengubah rasio interaksi fotoelektrik terhadap hamburan Compton.

Urgensi pemilihan teknik eksposi menjadi sangat krusial ketika radiografer dihadapkan pada pemeriksaan anatomi yang memiliki atenuasi tinggi atau ketebalan objek di atas rata-rata. Pada kondisi ini, sekadar meningkatkan arus-waktu (mAs) akan menyebabkan peningkatan dosis permukaan kulit pasien secara drastis tanpa menjamin keterbacaan struktur internal. Oleh karena itu, manipulasi tegangan tabung (kVp) menjadi strategi fisis untuk meningkatkan daya tembus (*penetrability*) foton sehingga lebih banyak radiasi primer yang mencapai detektor. Kualitas citra secara objektif dalam kondisi ini dianalisis melalui parameter *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) dan *Contrast-to-Noise Ratio* (CNR). SNR menggambarkan

perbandingan kekuatan sinyal informasi terhadap fluktuasi statistik *noise*, sedangkan CNR menunjukkan perbedaan kontras antara dua struktur relatif terhadap gangguan *noise* (Bushong, 2021).

Berdasarkan data WHO (2023), penggunaan radiografi diagnostik meningkat sekitar 4–5% per tahun secara global, yang memperkuat perlunya standarisasi teknik eksposi. Dalam praktik klinis, terdapat tiga pendekatan utama untuk mengatur tegangan dalam upaya mengontrol dosis, yaitu teknik standar, aturan 15% (*15% rule*), dan aturan 10 kVp (*10 kVp rule*). Teknik standar merujuk pada pedoman pabrikan, sedangkan aturan 15% menyarankan peningkatan tegangan sebesar 15% dengan pengurangan arus-waktu (mAs) sebesar 50% untuk menjaga densitas tetap konstan. Sementara itu, aturan 10 kVp menetapkan penambahan tegangan sebesar 10 kVp dengan penyesuaian arus-waktu sesuai kebutuhan spesifik pemeriksaan (Ching & Robinson, 2014; Ching & Robinson, 2015). Ketiga metode ini menawarkan pendekatan berbeda dalam memanipulasi spektrum radiasi untuk mencapai optimasi citra.

Beberapa penelitian terdahulu telah mengevaluasi efektivitas kedua pendekatan ini dalam kondisi klinis yang spesifik, menunjukkan bahwa masing-masing aturan memiliki keunggulan fungsional yang berbeda tergantung pada tujuan pemeriksaan. Studi oleh Irsal et al. (2023) pada radiografi thoraks proyeksi AP *supine* menemukan bahwa aturan 15% sangat efektif digunakan saat prioritas utama adalah reduksi dosis radiasi tanpa mengorbankan kualitas citra, terutama pada pasien yang memerlukan pemeriksaan rutin. Secara fisis, kenaikan tegangan 15% yang diikuti pemotongan *mAs* hingga 50% akan menggeser spektrum energi foton ke arah yang lebih tinggi, sehingga mengurangi jumlah foton energi rendah yang hanya terserap di kulit pasien tanpa berkontribusi pada pembentukan citra. Di sisi lain, Rusyadi et al. (2021) melaporkan bahwa penggunaan aturan 10 kVp pada proyeksi thoraks PA sangat bermanfaat ketika radiografer membutuhkan peningkatan daya tembus (*penetrability*) secara bertahap untuk mengatasi atenuasi pada jaringan yang lebih tebal atau padat. Teknik ini terbukti mampu meningkatkan nilai SNR dan CNR tanpa memicu lonjakan dosis yang berarti, menjadikannya

solusi saat menghadapi variasi ketebalan tubuh pasien yang tidak dapat ditembus dengan teknik standar.

Urgensi penggunaan kedua teknik ini muncul ketika radiografer harus membuat keputusan cepat di lapangan untuk menyeimbangkan antara kejernihan citra dan keselamatan pasien pada kondisi anatomi yang kompleks. Aturan 15% menjadi pilihan krusial dalam skenario optimasi dosis (ALARA) untuk meminimalkan risiko stokastik, sedangkan aturan 10 kVp lebih ditekankan pada skenario yang kualitas informasi diagnostik terancam oleh fenomena *under-penetration*. Meskipun masing-masing teknik memiliki landasan fisis yang kuat, efektivitasnya dalam menjaga stabilitas parameter SNR, CNR, EI, dan DI pada sistem digital perlu diuji secara lebih mendalam dan terkontrol. Namun, sejauh ini belum terdapat kajian yang secara spesifik mengevaluasi karakteristik fisis kedua aturan tersebut menggunakan *phantom* PMMA sebagai simulator jaringan tubuh yang konsisten.

Penelitian ini difokuskan pada evaluasi mendalam mengenai karakteristik fisis dari penerapan aturan 15% dan 10 kVp terhadap kualitas citra yang direpresentasikan oleh *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) dan *Contrast-to-Noise Ratio* (CNR), serta hubungannya dengan estimasi dosis radiasi berdasarkan nilai *Exposure Index* (EI) dan *Deviation Index* (DI) pada sistem radiografi digital. Penggunaan *phantom* PMMA dalam eksperimen ini sangat penting karena memungkinkan dilakukannya analisis kuantitatif secara presisi untuk mensimulasikan berbagai tingkat atenuasi jaringan tanpa melibatkan risiko paparan pada subjek manusia. Melalui pendekatan ini, diharapkan dapat teridentifikasi kondisi fisis paling ideal bagi masing-masing teknik dalam mengoptimalkan daya tembus sinar-X sesuai karakteristik objek. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan landasan ilmiah bagi praktisi untuk memilih teknik eksposi yang paling tepat berdasarkan kebutuhan klinis, baik untuk tujuan reduksi dosis maupun untuk peningkatan kualitas informasi citra pada objek yang sulit ditembus.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini yaitu:

1. Menganalisis pengaruh peningkatan tegangan melalui aturan 15% dan 10 kVp terhadap kualitas citra yang direpresentasikan oleh *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) dan *Contrast-to-Noise Ratio* (CNR), serta hubungannya dengan estimasi dosis radiasi berdasarkan nilai *Exposure Index* (EI) dan *Deviation Index* (DI) pada sistem radiografi digital menggunakan *phantom* PMMA.
2. Mengevaluasi karakteristik fisis aturan 15% dan aturan 10 kVp dalam mengoptimalkan kualitas citra (SNR dan CNR) serta pengendalian estimasi dosis (EI dan DI) untuk menentukan efektivitas masing-masing teknik pada kondisi klinis yang berbeda, guna mendukung implementasi prinsip proteksi radiasi ALARA secara tepat.

1.3 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian ini, yaitu:

1. Memberikan kontribusi dalam pengembangan ilmu radiografi diagnostik, khususnya optimasi teknik eksposi berbasis aturan 15% dan 10 kVp melalui evaluasi EI, DI, SNR, dan CNR.
2. Menjadi dasar ilmiah bagi radiografer dan institusi kesehatan dalam menyusun protokol atau SOP radiografi digital yang seimbang antara kualitas citra dan keselamatan pasien.
3. Mendorong penerapan teknik hemat dosis (*dose-saving*) sesuai prinsip proteksi radiasi ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*).