

PENGARUH VARIASI TEGANGAN TERHADAP LAJU DOSIS DAN DAERAH OPERASI PESAWAT SINAR-X INDUSTRI

Effect of Voltage Variation on Dose Rate and Operating Range of Industrial X-ray Equipment

Arman Raditya Pramana¹

¹Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Jl. Babarsari Kotak Pos 6101
YKBB, Sleman, Yogyakarta 55281

*E-mail korespondensi: armanpramana5@gmail.com

ABSTRAK

PENGARUH VARIASI TEGANGAN TERHADAP LAJU DOSIS DAN DAERAH OPERASI PESAWAT SINAR-X INDUSTRI. Pesawat sinar-X industri banyak dimanfaatkan dalam pengujian tak merusak (*non-destructive testing/NDT*) untuk memeriksa cacat pada material logam seperti sambungan las, pipa, dan konstruksi baja. Pengoperasian pesawat ini menghasilkan radiasi pengion yang berpotensi membahayakan pekerja radiasi maupun masyarakat di sekitar fasilitas, sehingga penentuan daerah kerja (daerah pengendalian, daerah supervisi, dan daerah masyarakat) berdasarkan laju dosis radiasi menjadi hal yang penting dalam program proteksi dan keselamatan radiasi. Penelitian ini bertujuan mengetahui pengaruh tegangan operasi pesawat sinar-X industri terhadap laju dosis radiasi dan luas daerah operasi di sekitar fasilitas. Pengukuran laju dosis dilakukan pada tiga variasi tegangan operasi (110 kV, 135 kV, dan 150 kV) di empat titik pengukuran (A, C, D, dan E) menggunakan surveymeter terkalibrasi, dengan mencatat jarak dari sumber terhadap titik di mana laju dosis mencapai nilai batas daerah pengendalian (3 $\mu\text{Sv/jam}$) dan batas daerah masyarakat (0,5 $\mu\text{Sv/jam}$). Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan tegangan operasi secara umum diikuti oleh bertambahnya jarak yang diperlukan untuk mencapai kedua nilai batas tersebut. Peningkatan paling signifikan terjadi pada Titik A, dengan kenaikan jarak batas daerah pengendalian dan daerah masyarakat berturut-turut sebesar 96,7% dan 97,0% ketika tegangan dinaikkan dari 110 kV menjadi 150 kV, sedangkan pada Titik E kenaikan bersifat lebih moderat, yaitu sekitar 39,6% dan 39,1%, yang diduga berkaitan dengan pengaruh perisai (*shielding*) di sekitar titik tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi tegangan operasi, semakin luas daerah pengendalian dan daerah supervisi yang harus diberlakukan di sekitar pesawat sinar-X. Dengan demikian, penentuan tegangan operasi pada kegiatan radiografi industri perlu mempertimbangkan luas area kerja yang tersedia agar penerapan proteksi radiasi tetap sesuai dengan prinsip ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*).

Kata kunci: pesawat sinar-X industri, tegangan operasi, laju dosis, daerah pengendalian, proteksi radiasi

ABSTRACT

Effect of Voltage Variation on Dose Rate and Operating Range of Industrial X-ray Equipment. Industrial X-ray equipment is widely used in non-destructive testing (NDT) to inspect defects in metal materials such as weld joints, pipes, and steel structures. Operation of this equipment produces ionizing radiation that may endanger radiation workers and the public around the facility, making the determination of work zones (controlled area, supervised area, and public area) based on the radiation dose rate an important part of the radiation

protection and safety program. This study aims to determine the effect of the operating voltage of industrial X-ray equipment on the radiation dose rate and the extent of the operating zones around the facility. Dose rate measurements were carried out at three operating voltage variations (110 kV, 135 kV, and 150 kV) at four measurement points (A, C, D, and E) using a calibrated surveymeter, recording the distance from the source to the point where the dose rate reached the controlled-area boundary value ($3 \mu\text{Sv/h}$) and the public-area boundary value ($0.5 \mu\text{Sv/h}$). The results show that an increase in operating voltage is generally followed by an increase in the distance required to reach both boundary values. The most significant increase occurred at Point A, where the controlled-area and public-area boundary distances increased by 96.7% and 97.0%, respectively, when the voltage was raised from 110 kV to 150 kV, while Point E showed a more moderate increase of about 39.6% and 39.1%, likely related to shielding effects around that point. This indicates that the higher the operating voltage, the wider the controlled and supervised areas that must be established around the X-ray equipment. Therefore, the selection of operating voltage in industrial radiography activities needs to consider the available working area so that radiation protection remains consistent with the ALARA (As Low As Reasonably Achievable) principle.

Keywords: *industrial X-ray equipment, operating voltage, dose rate, controlled area, radiation protection*

PENDAHULUAN

Pesawat sinar-X industri merupakan salah satu sumber radiasi pengion yang banyak dimanfaatkan dalam kegiatan radiografi industri, khususnya untuk pengujian tak merusak (non-destructive testing/NDT) pada material logam seperti sambungan las, pipa bertekanan, dan konstruksi baja. Selain pesawat sinar-X, fasilitas radiografi industri juga sering dilengkapi dengan sumber radiasi energi tinggi lain seperti betatron untuk pemeriksaan material dengan ketebalan besar. Pemanfaatan sumber radiasi tersebut memberikan manfaat besar dalam menjamin mutu dan keandalan konstruksi industri, namun di sisi lain juga menimbulkan risiko paparan radiasi bagi pekerja radiasi maupun masyarakat di sekitar fasilitas apabila tidak dikelola dengan baik.

Untuk mengendalikan risiko tersebut, setiap fasilitas radiasi diwajibkan menetapkan pembagian daerah kerja yang terdiri atas daerah pengendalian (controlled area), daerah supervisi (supervised area), dan daerah masyarakat (public area) berdasarkan laju dosis radiasi yang terukur di sekitar sumber [3], [10], [11]. Daerah pengendalian umumnya dibatasi pada

nilai laju dosis sekitar 3 $\mu\text{Sv}/\text{jam}$, sedangkan batas luar daerah supervisi terhadap daerah masyarakat ditetapkan pada nilai sekitar 0,5 $\mu\text{Sv}/\text{jam}$. Penentuan batas-batas daerah ini sangat bergantung pada besarnya laju dosis radiasi yang dihasilkan oleh pesawat sinar-X, yang pada gilirannya dipengaruhi oleh parameter operasi seperti tegangan tabung (kV), arus tabung (mA), dan jarak terhadap sumber.

Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa kenaikan tegangan operasi pesawat sinar-X berbanding lurus dengan peningkatan energi foton dan keluaran dosis radiasi yang dihasilkan. Olgar dkk. [6] melaporkan bahwa peningkatan tegangan tabung sinar-X diagnostik disertai perubahan dosis pada permukaan masuk pasien, sementara Narayan dan Mahabaleshwara [7] menunjukkan bahwa variasi tegangan tabung merupakan salah satu parameter perangkat keras utama yang menentukan besarnya dosis radiasi pada pencitraan sinar-X. Hal serupa juga dilaporkan oleh Ashary dkk. [4] pada pemeriksaan foto thorax pasien pediatrik, serta Sari dkk. [5] pada pengukuran entrance surface air kerma di pesawat sinar-X radiografi. Di sisi lain, distribusi laju dosis terhadap jarak dari sumber pada dasarnya mengikuti hukum kuadrat terbalik (*inverse square law*), sebagaimana ditunjukkan oleh Putra, Adrial, dan S. [2] melalui analisis kontur isodosis radiasi pesawat sinar-X, serta Rahmawati dkk. [1] dalam evaluasi penerapan proteksi radiasi pada daerah pengendalian dan daerah supervisi di instalasi radiologi.

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian tersebut dilakukan pada pesawat sinar-X untuk keperluan diagnostik medis, pada skala jarak yang relatif dekat dengan sumber (orde sentimeter hingga puluhan sentimeter). Kajian mengenai pengaruh tegangan operasi terhadap laju dosis dan luas daerah operasi pada pesawat sinar-X industri, khususnya pada skala jarak yang jauh lebih besar (orde meter hingga belasan meter) dan dikaitkan langsung dengan tata letak fasilitas radiografi industri serta kegiatan NDT [8], masih sangat terbatas. Sejauh penelusuran literatur oleh penulis, belum banyak ditemukan penelitian yang secara khusus menyajikan data kuantitatif primer mengenai hubungan antara tegangan operasi dan luas daerah pengendalian maupun daerah masyarakat pada geometri fasilitas riil, terutama pada fasilitas yang juga memiliki sumber radiasi energi tinggi lain seperti betatron dalam satu area kerja. Padahal informasi ini sangat diperlukan dalam penyusunan program proteksi dan keselamatan radiasi serta perizinan pemanfaatan pesawat sinar-X industri, karena luas daerah pengendalian dan daerah supervisi yang harus disediakan akan berubah mengikuti tegangan operasi maksimum yang direncanakan digunakan. Kekosongan inilah yang menjadi kebaruan (*novelty*) sekaligus motivasi utama penelitian ini.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh tegangan operasi pesawat sinar-X industri (110 kV, 135 kV, dan 150 kV) terhadap laju dosis radiasi serta luas daerah operasi (daerah pengendalian dan daerah masyarakat) pada beberapa titik di sekitar fasilitas, sehingga dapat menjadi dasar pertimbangan dalam penetapan tata letak dan sistem proteksi radiasi pada instalasi sinar-X industri.

METODOLOGI

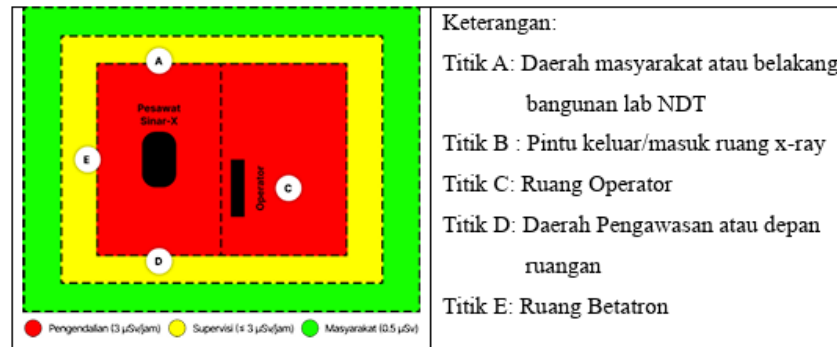
Pengujian dilakukan pada pesawat sinar-X industri stasioner di Laboratorium NDT (Non-Destructive Testing) Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia. Pesawat sinar-X yang digunakan adalah Rigaku Industrial X-Ray Apparatus model Radioflex dengan nomor seri AP0026-6, memiliki rentang tegangan operasi 110–250 kV. Surveymeter yang digunakan bermerek/bertipe Ranger dengan nomor sertifikat kalibrasi 243067-2/LT/LDSS/122025, faktor kalibrasi 1,01 $\mu\text{Sv/jam}$, dan tanggal kalibrasi ulang 1 Desember 2026 sehingga alat masih dalam masa laik pakai pada saat pengukuran dilakukan. Peralatan lain yang digunakan meliputi tanda bahaya radiasi, tali kuning pembatas daerah, lampu tanda radiasi, penutup jendela rumah tabung (Pb 4 mm) untuk keperluan aging pesawat, monitor perorangan (dosimeter saku) tipe AT2503B, meteran, waterpass, dan laptop untuk pencatatan data. Sebelum pengukuran dilakukan, kondisi surveymeter diperiksa terlebih dahulu meliputi kondisi baterai, sertifikat kalibrasi, respon, dan skalanya, mengacu pada prosedur uji generator tabung sinar-X yang berlaku [9].

Jarak yang dilaporkan pada Tabel 1 merupakan jarak total dari focal spot pesawat sinar-X hingga titik pengukuran aktual, yaitu penjumlahan antara jarak focal spot menuju dinding pembatas ruang penyinaran dengan jarak tambahan yang diukur dari dinding hingga posisi surveymeter di luar ruangan. Jarak focal spot menuju dinding pembatas pada masing-masing titik adalah 1,9 m untuk arah Titik A dan Titik D, serta 1,4 m untuk arah Titik C dan Titik E. Informasi ini penting untuk keperluan replikasi penelitian, mengingat laju dosis radiasi sangat dipengaruhi oleh jarak sumber terhadap titik ukur sesuai hukum kuadrat terbalik.

Denah lokasi pengukuran ditunjukkan pada Gambar 1. Pesawat sinar-X diletakkan di tengah ruangan yang dikelilingi oleh empat titik pengukuran, yaitu Titik A (daerah masyarakat di belakang bangunan Laboratorium NDT), Titik C (ruang operator), Titik D (daerah pengawasan atau bagian depan ruangan), dan Titik E (daerah dekat ruang betatron). Daerah di sekitar pesawat sinar-X dibagi menjadi tiga kategori berdasarkan laju dosis radiasi, yaitu daerah

pengendalian (warna merah, laju dosis sekitar 3 $\mu\text{Sv}/\text{jam}$), daerah supervisi (warna kuning), dan daerah masyarakat (warna hijau, laju dosis sekitar 0,5 $\mu\text{Sv}/\text{jam}$).

Denah Lokasi



Gambar 1. Denah lokasi titik pengukuran laju dosis radiasi pesawat sinar-X industri

Pengukuran laju dosis radiasi dilakukan pada tiga variasi tegangan operasi pesawat sinar-X, yaitu 110 kV, 135 kV, dan 150 kV, mengikuti prosedur aging bertahap hingga pesawat siap dioperasikan pada tegangan 150 kV. Parameter operasi lain seperti arus tabung, waktu eksposi, dan filtrasi bawaan tabung mengikuti kondisi baku sebagaimana diatur pada instruksi kerja pengoperasian pesawat yang berlaku di Laboratorium NDT, namun nilai spesifiknya tidak tercatat secara terpisah pada lembar data praktikum sehingga tidak dapat dilaporkan secara kuantitatif pada makalah ini; hal ini turut dibahas pada subbab Keterbatasan Penelitian. Pada setiap titik (A, C, D, dan E), surveymeter digeser secara bertahap menjauhi sumber radiasi sambil dicatat laju dosis yang terbaca hingga diperoleh dua jarak acuan, yaitu jarak pada saat laju dosis mencapai nilai batas daerah pengendalian (3 $\mu\text{Sv}/\text{jam}$) dan jarak pada saat laju dosis mencapai nilai batas daerah masyarakat (0,5 $\mu\text{Sv}/\text{jam}$). Sebagai pembanding kondisi lingkungan, laju dosis radiasi latar juga diukur pada keempat titik sebelum pesawat dioperasikan (berkisar 0,08–0,18 $\mu\text{Sv}/\text{jam}$) dan setelah pesawat dimatikan (berkisar 0,13–0,14 $\mu\text{Sv}/\text{jam}$); kedua nilai ini berada jauh di bawah batas daerah masyarakat, mengindikasikan tidak adanya radiasi sisa yang signifikan setelah pengoperasian selesai.

Nilai batas 3 $\mu\text{Sv}/\text{jam}$ dan 0,5 $\mu\text{Sv}/\text{jam}$ yang digunakan untuk menentukan daerah supervisi dan daerah masyarakat diturunkan dari Nilai Batas Dosis (NBD) yang ditetapkan Badan Pengawas Tenaga Nuklir, yaitu 1 mSv/tahun untuk masyarakat dan 20 mSv/tahun (rata-rata 5 tahun) untuk pekerja radiasi [12], [13], dengan asumsi waktu kerja/keberadaan selama 2000 jam per tahun. Batas daerah masyarakat diperoleh dari 1 mSv/tahun dibagi 2000 jam/tahun, yaitu 0,5 $\mu\text{Sv}/\text{jam}$, sedangkan batas daerah supervisi menggunakan alokasi dosis sebesar 6 mSv/tahun dibagi 2000 jam/tahun, yaitu 3 $\mu\text{Sv}/\text{jam}$.

Pengukuran pada setiap kombinasi titik dan tegangan operasi dilakukan sebanyak satu kali eksposi ($n = 1$), mengingat keterbatasan rating duty cycle tabung sinar-X yang membatasi jumlah eksposi berurutan dalam rentang waktu singkat, sebagaimana disyaratkan pada prosedur uji generator tabung sinar-X yang berlaku [9]. Konsekuensi dari jumlah pengulangan ini terhadap ketidakpastian hasil pengukuran dibahas lebih lanjut pada subbab Keterbatasan Penelitian.

Data laju dosis dan jarak batas daerah yang diperoleh kemudian disusun dalam bentuk tabel dan dianalisis secara deskriptif, meliputi perhitungan persentase kenaikan jarak batas daerah pada setiap titik, untuk melihat kecenderungan pengaruh kenaikan tegangan operasi terhadap laju dosis radiasi dan luas daerah pengendalian maupun daerah masyarakat pada setiap titik pengukuran.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data hasil pengukuran laju dosis radiasi pada saat pesawat sinar-X industri beroperasi pada tiga variasi tegangan operasi (110 kV, 135 kV, dan 150 kV) di empat titik pengukuran disajikan pada Tabel 1. Nilai laju dosis 3 $\mu\text{Sv/jam}$ merepresentasikan batas luar daerah pengendalian, sedangkan nilai 0,5 $\mu\text{Sv/jam}$ merepresentasikan batas luar daerah masyarakat, sebagaimana ditunjukkan pada denah lokasi (Gambar 1). Jarak yang dicantumkan merupakan jarak dari sumber sinar-X ke titik di mana laju dosis tersebut terukur. Kolom laju dosis dan jarak untuk kedua batas daerah disajikan secara terpisah agar tidak menimbulkan kerancuan interpretasi.

Tabel 1. Data laju dosis dan jarak batas daerah pengendalian serta daerah masyarakat pada berbagai tegangan operasi

Titik	Tegangan Operasi (kV)	Laju Dosis pada Batas Daerah Pengendalian ($\mu\text{Sv/jam}$)	Laju Dosis pada Batas Daerah Masyarakat ($\mu\text{Sv/jam}$)	Jarak Batas Daerah Pengendalian (m)	Jarak Batas Daerah Masyarakat (m)
A	110	3	0,50	2,70	6,60
A	135	3	0,52	2,90	7,10
A	150	3	0,51	5,31	13,00
C	110	3,11	0,51	3,30	4,40
C	135	3,03	0,57	3,40	7,00
C	150	3,04	—	5,62	—
D	110	—	0,50	—	2,10
D	135	—	0,53	—	3,10
D	150	3	0,53	3,90	9,60
E	110	3	0,50	2,60	6,40

Titik	Tegangan Operasi (kV)	Laju Dosis pada Batas Daerah Pengendalian ($\mu\text{Sv/jam}$)	Laju Dosis pada Batas Daerah Masyarakat ($\mu\text{Sv/jam}$)	Jarak Batas Daerah Pengendalian (m)	Jarak Batas Daerah Masyarakat (m)
E	135	3	0,51	3,50	8,60
E	150	3	0,51	3,63	8,90

Pada Titik A, yang merupakan bagian daerah masyarakat di belakang bangunan Laboratorium NDT, jarak batas daerah pengendalian relatif stabil pada tegangan 110 kV dan 135 kV (2,7–2,9 m), namun meningkat tajam pada tegangan 150 kV menjadi 5,31 m, yaitu kenaikan sebesar 96,7% dibandingkan pada 110 kV. Pola yang sama juga terlihat pada jarak batas daerah masyarakat, yang meningkat dari 6,6 m pada 110 kV menjadi 13 m pada 150 kV, atau meningkat sebesar 97,0%. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada tegangan operasi tinggi, radiasi hambur maupun radiasi langsung ke arah Titik A menjadi cukup signifikan sehingga daerah pengendalian dan daerah masyarakat perlu diperluas secara nyata.

Pada Titik C (ruang operator), jarak batas kedua daerah juga menunjukkan kecenderungan meningkat seiring naiknya tegangan operasi, dari 3,3 m dan 4,4 m pada 110 kV menjadi 3,4 m dan 7 m pada 135 kV, atau kenaikan sebesar 3,0% dan 59,1%. Pada tegangan 150 kV, hanya diperoleh satu nilai jarak (5,62 m, kenaikan 70,3% dari 110 kV) yang mengindikasikan bahwa pada radius pengukuran yang tersedia, laju dosis di Titik C masih berada di atas $0,5 \mu\text{Sv/jam}$, sehingga batas daerah masyarakat pada tegangan tersebut kemungkinan berada pada jarak yang lebih jauh dari radius pengukuran. Temuan ini konsisten dengan hasil penelitian Putra, Adrial, dan S. [2] yang menunjukkan bahwa sebaran dosis radiasi di sekitar pesawat sinar-X mengikuti pola isodosis yang melebar seiring meningkatnya keluaran radiasi sumber.

Titik D (daerah pengawasan atau bagian depan ruangan) menunjukkan pola yang menarik, yaitu pada tegangan 110 kV dan 135 kV hanya teridentifikasi satu nilai batas daerah (2,1 m dan 3,1 m), yang mengindikasikan bahwa pada jarak tersebut laju dosis sudah berada pada level daerah masyarakat sejak titik pengukuran terdekat. Namun pada tegangan 150 kV, mulai teridentifikasi dua nilai batas daerah secara jelas, yaitu 3,9 m untuk batas daerah pengendalian dan 9,6 m untuk batas daerah masyarakat (kenaikan 357,1% dibandingkan 110 kV). Hal ini menegaskan bahwa kenaikan tegangan operasi dapat memunculkan daerah pengendalian pada titik yang sebelumnya, pada tegangan lebih rendah, sudah tergolong daerah supervisi atau daerah masyarakat.

Pada Titik E (dekat ruang betatron), jarak batas daerah pengendalian meningkat dari 2,6 m pada 110 kV menjadi 3,63 m pada 150 kV (kenaikan 39,6%), sedangkan jarak batas daerah

masyarakat meningkat dari 6,4 m menjadi 8,9 m (kenaikan 39,1%). Peningkatan pada titik ini relatif lebih moderat dibandingkan Titik A, kemungkinan karena arah radiasi hambur ke Titik E lebih banyak dipengaruhi oleh perisai (shielding) ruangan di sekitar sumber, sebagaimana dibahas lebih lanjut pada bagian akhir subbab ini.

Tabel 2. Persentase kenaikan jarak batas daerah pengendalian dan daerah masyarakat pada tiap titik

Titik	Kenaikan Jarak Batas Daerah Pengendalian	Kenaikan Jarak Batas Daerah Masyarakat
A	96,7% (110→150 kV: 2,70 m → 5,31 m)	97,0% (110→150 kV: 6,60 m → 13,00 m)
C	70,3% (110→150 kV: 3,30 m → 5,62 m)*	59,1% (110→135 kV: 4,40 m → 7,00 m)**
D	Daerah pengendalian baru teridentifikasi pada 150 kV (belum ada pada 110–135 kV)	357,1% (110→150 kV: 2,10 m → 9,60 m)
E	39,6% (110→150 kV: 2,60 m → 3,63 m)	39,1% (110→150 kV: 6,40 m → 8,90 m)

Secara keseluruhan, hasil pengukuran pada keempat titik menunjukkan kecenderungan yang konsisten, yaitu semakin tinggi tegangan operasi pesawat sinar-X industri, semakin jauh jarak yang diperlukan agar laju dosis radiasi turun hingga mencapai nilai batas daerah pengendalian maupun daerah masyarakat, dengan besar kenaikan yang bervariasi antar titik (39–97%) bergantung pada geometri dan kondisi perisai di sekitar masing-masing titik. Kecenderungan tersebut dapat dijelaskan secara lebih rinci melalui dua tinjauan teoretis berikut.

Tegangan Operasi, Energi Foton, dan Keluaran Radiasi

Secara fisis, peningkatan tegangan operasi pesawat sinar-X berkaitan langsung dengan proses pembentukan radiasi sinar-X melalui mekanisme bremsstrahlung, yaitu perlambatan mendadak elektron berkecepatan tinggi saat menumbuk material target (anoda). Energi maksimum foton yang dihasilkan (dalam keV) secara pendekatan setara dengan nilai tegangan tabung yang diterapkan (dalam kV), sehingga kenaikan tegangan operasi akan menaikkan pula energi rata-rata spektrum foton yang dipancarkan. Foton berenergi lebih tinggi memiliki daya tembus (penetrasi) yang lebih besar terhadap material di sekitarnya, termasuk udara dan dinding ruangan, sehingga atenuasi radiasi terhadap jarak menjadi lebih lambat dibandingkan pada tegangan operasi rendah. Di samping itu, keluaran radiasi (output) pesawat sinar-X per satuan waktu secara empiris meningkat kurang lebih sebanding dengan pangkat tegangan tabung. Kombinasi antara peningkatan energi foton dan peningkatan keluaran radiasi inilah yang menyebabkan laju dosis pada jarak tertentu menjadi lebih tinggi seiring naiknya tegangan operasi, sebagaimana juga dilaporkan pada beberapa penelitian tegangan tabung terhadap dosis

radiasi pada pesawat sinar-X, baik untuk aplikasi medis [4], [5], [6] maupun aplikasi pencitraan sinar-X secara umum [7], dan pada akhirnya menggeser titik batas daerah pengendalian maupun daerah masyarakat menjadi lebih jauh dari sumber.

Hukum Kuadrat Terbalik (Inverse Square Law)

Pola penurunan laju dosis radiasi terhadap jarak dari sumber, pada tegangan operasi tertentu, tetap mengikuti hukum kuadrat terbalik (inverse square law), yang menyatakan bahwa laju dosis radiasi berbanding terbalik dengan kuadrat jarak dari sumber titik (point source), dengan asumsi tidak ada atenuasi maupun radiasi hambur yang signifikan. Secara matematis, hubungan tersebut dapat dinyatakan sebagai:

$$\dot{D}_1 \times d_1^2 = \dot{D}_2 \times d_2^2 \quad \dots(1)$$

dengan $\dot{D}_1$ dan $\dot{D}_2$ berturut-turut adalah laju dosis radiasi pada jarak d_1 dan d_2 dari sumber [2]. Persamaan (1) menjelaskan mengapa, pada tegangan operasi yang sama, jarak yang diperlukan untuk mencapai nilai batas laju dosis tertentu ($3 \mu\text{Sv/jam}$ maupun $0,5 \mu\text{Sv/jam}$) bertambah signifikan ketika keluaran radiasi sumber meningkat akibat kenaikan tegangan operasi: sumber dengan laju dosis awal (di jarak acuan yang sama) yang lebih tinggi memerlukan jarak yang lebih jauh agar laju dosisnya turun hingga mencapai nilai batas yang sama, sebagaimana teramati secara konsisten pada keempat titik pengukuran.

Pengaruh Shielding pada Titik E

Perbedaan pola kenaikan antara Titik E dan Titik A dapat dijelaskan melalui teori atenuasi radiasi oleh material perisai (shielding). Ketika radiasi sinar-X melewati suatu material dengan ketebalan x , intensitasnya berkurang secara eksponensial menurut persamaan:

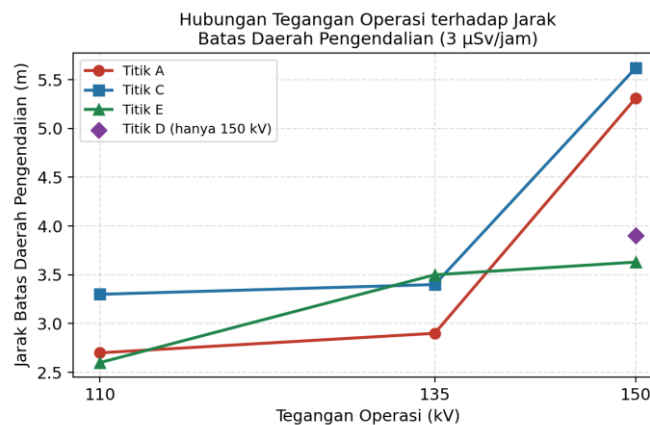
$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad \dots(2)$$

dengan I_0 adalah intensitas radiasi mula-mula, I adalah intensitas setelah melewati material, dan μ adalah koefisien atenuasi linier material tersebut. Titik E yang berada di dekat ruang betatron kemungkinan terlindungi sebagian oleh struktur dinding atau perisai ruangan pada arah tertentu, sehingga sebagian radiasi hambur yang menuju titik ini telah mengalami atenuasi tambahan dibandingkan radiasi yang menuju Titik A yang relatif lebih terbuka (line-of-sight langsung ke arah daerah masyarakat). Hal ini menjelaskan mengapa kenaikan jarak batas daerah pada Titik E (sekitar 39%) jauh lebih moderat dibandingkan Titik A (hampir 97%) meskipun keduanya mengalami kenaikan tegangan operasi yang sama. Penggunaan bahan pelindung radiasi (shielding) yang memadai, sebagaimana dibahas oleh Yoshandi, Hamdani,

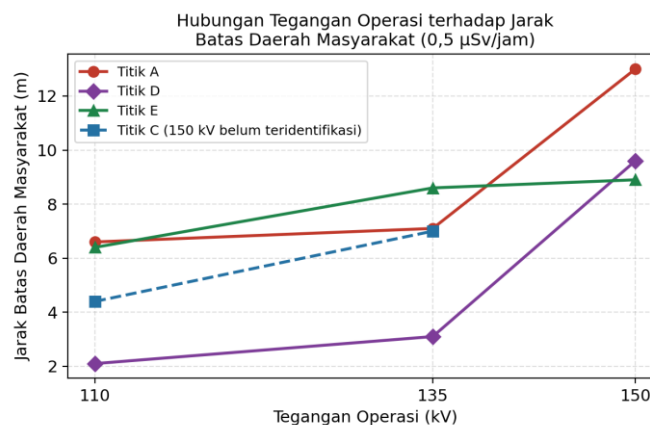
dan Annisa [8] dalam konteks radiografi NDT, dengan demikian menjadi salah satu upaya efektif untuk membatasi perluasan daerah pengendalian akibat kenaikan tegangan operasi.

Visualisasi Hubungan Tegangan Operasi terhadap Jarak Batas Daerah

Untuk memperjelas tren hasil pada Tabel 1, hubungan antara tegangan operasi dan jarak batas daerah pengendalian maupun daerah masyarakat pada tiap titik disajikan pada Gambar 2 dan Gambar 3.



Gambar 2. Hubungan tegangan operasi terhadap jarak batas daerah pengendalian ($3 \mu\text{Sv/jam}$) pada tiap titik pengukuran



Gambar 3. Hubungan tegangan operasi terhadap jarak batas daerah masyarakat ($0,5 \mu\text{Sv/jam}$) pada tiap titik pengukuran

Gambar 2 dan Gambar 3 menegaskan secara visual bahwa Titik A memiliki kemiringan (slope) kenaikan jarak terhadap tegangan yang paling tajam di antara keempat titik, sedangkan Titik E menunjukkan kemiringan paling landai, sejalan dengan penjelasan pengaruh shielding pada bagian sebelumnya. Titik C dan Titik D masing-masing menunjukkan pola khas berupa data yang tidak lengkap pada satu ujung rentang tegangan, yang mengindikasikan bahwa pada

radius pengukuran yang tersedia, laju dosis di titik tersebut belum atau sudah melewati nilai batas terkait sejak awal pengukuran.

Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu

Trend peningkatan laju dosis dan luas daerah kerja seiring naiknya tegangan operasi yang diperoleh pada penelitian ini konsisten dengan temuan Olgar dkk. [6] dan Narayan dan Mahabaleshwara [7] pada pesawat sinar-X diagnostik, yang juga melaporkan bahwa tegangan tabung merupakan parameter operasi paling dominan dalam menentukan besarnya keluaran dosis radiasi dibandingkan parameter operasi lain seperti arus tabung maupun waktu eksposi. Meskipun demikian, penelitian-penelitian tersebut umumnya berfokus pada dosis yang diterima pasien pada jarak dekat (skala sentimeter hingga puluhan sentimeter) dalam konteks pencitraan medis, sedangkan penelitian ini menyoroti dampaknya pada skala jarak yang jauh lebih besar (meter hingga belasan meter) dalam konteks penentuan daerah kerja radiasi pada radiografi industri. Perbedaan skala jarak dan konteks aplikasi (medis dibandingkan industri) inilah yang menjadi salah satu unsur kebaruan penelitian ini, sekaligus menegaskan bahwa prinsip fisis peningkatan dosis akibat kenaikan tegangan bersifat umum dan berlaku baik pada aplikasi medis maupun industri. Dari sisi pola sebaran dosis terhadap jarak, hasil penelitian ini juga sejalan dengan Putra, Adrial, dan S. [2] yang menunjukkan pola isodosis melebar seiring meningkatnya keluaran radiasi sumber, serta menguatkan rekomendasi Rahmawati dkk. [1] bahwa evaluasi kelengkapan daerah kerja perlu dilakukan secara berkala mengikuti kondisi operasional aktual, termasuk variasi tegangan operasi yang digunakan.

Dari sisi keselamatan radiasi, pergeseran batas daerah pengendalian dan daerah masyarakat ini memiliki konsekuensi praktis yang penting. Pada fasilitas radiografi industri yang menggunakan berbagai variasi tegangan operasi, termasuk fasilitas yang juga memiliki sumber radiasi energi tinggi seperti betatron [8], hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa penetapan tata letak fasilitas serta tanda dan pembatas daerah pengendalian tidak dapat hanya didasarkan pada satu kondisi operasi tunggal, melainkan harus mempertimbangkan tegangan operasi maksimum yang direncanakan akan digunakan, sejalan dengan rekomendasi umum IAEA mengenai desain dan penetapan daerah kerja pada fasilitas radiografi industri [10], [11].

Keterbatasan Penelitian

Beberapa keterbatasan perlu diperhatikan dalam menginterpretasikan hasil penelitian ini:

- Pengukuran pada setiap kombinasi titik dan tegangan operasi hanya dilakukan sebanyak satu kali eksposi ($n = 1$) karena keterbatasan rating duty cycle tabung sinar-X, sehingga belum diperoleh estimasi ketidakpastian statistik (misalnya standar deviasi) dari hasil pengukuran.
- Rentang tegangan operasi yang diuji terbatas pada tiga nilai (110, 135, dan 150 kV), sehingga hubungan kuantitatif yang lebih presisi, misalnya melalui model regresi, antara tegangan operasi dan jarak batas daerah belum dapat ditentukan secara pasti.
- Pengukuran hanya dilakukan pada empat titik tetap sesuai konfigurasi ruangan Laboratorium NDT, sehingga hasil tidak dapat digeneralisasi secara langsung ke tata letak fasilitas lain dengan geometri ruangan dan material dinding yang berbeda.
- Radiasi hambur dari dinding, lantai, dan objek di sekitar ruangan turut memengaruhi laju dosis yang terukur, namun kontribusi masing-masing sumber radiasi hambur tersebut tidak dipisahkan secara kuantitatif pada penelitian ini.
- Parameter operasi tetap (arus tabung, waktu eksposi, dan filtrasi) mengikuti instruksi kerja baku pengoperasian pesawat, namun nilai spesifiknya tidak tercatat terpisah pada lembar data praktikum, sehingga tidak dapat dilaporkan secara kuantitatif dan pengaruhnya terhadap laju dosis belum dapat dipisahkan sepenuhnya dari pengaruh tegangan operasi.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis data, tegangan operasi pesawat sinar-X industri berpengaruh terhadap laju dosis radiasi dan luas daerah operasi di sekitar fasilitas. Peningkatan tegangan operasi dari 110 kV menuju 150 kV secara umum diikuti oleh bertambahnya jarak yang diperlukan agar laju dosis radiasi turun hingga mencapai nilai batas daerah pengendalian ($3 \mu\text{Sv/jam}$) maupun batas daerah masyarakat ($0,5 \mu\text{Sv/jam}$), dengan peningkatan paling signifikan terjadi pada Titik A, dari jarak 6,6 m pada 110 kV menjadi 13 m pada 150 kV (kenaikan 97,0%). Pola serupa, meskipun dengan besaran yang lebih moderat (39–70%), juga teramati pada Titik C, D, dan E, dengan Titik E menunjukkan kenaikan paling landai akibat pengaruh shielding di sekitarnya. Dengan demikian, semakin tinggi tegangan operasi yang digunakan, semakin luas daerah pengendalian dan daerah supervisi yang harus diberlakukan di sekitar pesawat sinar-X industri.

Secara praktis, temuan ini menegaskan pentingnya mempertimbangkan tegangan operasi maksimum yang direncanakan digunakan, bukan hanya kondisi operasi rerata, dalam penyusunan tata letak fasilitas, penentuan luas daerah kerja, penempatan tanda dan pembatas daerah pengendalian, serta penerapan perisai radiasi tambahan pada instalasi sinar-X industri, khususnya pada area seperti Titik A yang paling sensitif terhadap kenaikan tegangan. Hasil ini juga dapat menjadi salah satu bahan pertimbangan bagi radiographer dan petugas proteksi radiasi dalam menyusun program pemantauan daerah kerja secara berkala pada fasilitas dengan variasi tegangan operasi, serta dalam proses pengajuan izin pemanfaatan pesawat sinar-X industri kepada instansi yang berwenang, agar keselamatan pekerja radiasi dan masyarakat tetap terjamin sesuai prinsip ALARA.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada dosen pengampu mata kuliah serta laboran Laboratorium NDT Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia atas bimbingan, arahan, dan fasilitas pengujian generator tabung sinar-X yang diberikan selama pelaksanaan penelitian ini.

Daftar Pustaka

- [1] Rahmawati, dkk., "Evaluasi Penerapan Proteksi Radiasi pada Ruangan dan Pekerja Radiasi di Instalasi Radiologi," *Jurnal Fisika Unand (JFU)*, vol. 14, no. 4, hal. 394–400, 2025.
- [2] M. I. H. Putra, R. Adrial, dan A. O. S., "Analisis Kontur Isodosis Radiasi pada Pesawat Sinar-X di Instalasi Radiologi Rumah Sakit Universitas Andalas," *Jurnal Fisika Unand*, vol. 12, no. 2, hal. 328–334, 2023, doi: 10.25077/jfu.12.2.328-333.2023.
- [3] Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN), "Klasifikasi Daerah Kerja Radiasi (Daerah Pengendalian dan Daerah Supervisi) pada Fasilitas Radiasi," dalam *Pedoman Penyusunan Program Proteksi dan Keselamatan Radiasi Radiografi Industri*, Direktorat Perizinan Fasilitas Radiasi dan Zat Radioaktif, BAPETEN, Jakarta, 2022.
- [4] A. Ashary, dkk., "Analisis Pengukuran Dosis Serap Radiasi pada Pemeriksaan Foto Thorax Pasien Pediatric di RSUD Djafar Harun Kolaka Utara," *Jurnal Sains Fisika (SAINFIS)*, vol. 3, no. 2, hal. 1–9, 2023.
- [5] I. M. Sari, Irhamni, R. Safitri, E. Yufita, dan A. S. Dewi, "Entrance Surface Air Kerma (ESAK) in Adult Posteroanterior (PA) Chest Radiography: An Exploratory Analysis," *Journal of Technomaterial Physics*, vol. 8, no. 1, hal. 20–29, 2026, doi: 10.32734/jotp.v8i1.24603.

- [6] T. Olgar, dkk., "Effect of Varying X-Ray Tube Voltage and Additional Filtration on Image Quality and Patient Dose in Digital Radiography System," *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 199, art. 110893, 2023, doi: 10.1016/j.apradiso.2023.110893.
- [7] S. B. Narayan dan S. H. Mahabaleshwara, "An Approach for Radiation Dose Reduction in Computerized Tomography," *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 13, no. 1, hal. 1169–1179, 2023, doi: 10.11591/ijece.v13i1.pp1169-1179.
- [8] T. M. Yoshandi, H. E. Hamdani, dan Annisa, "Material Analysis of Lead Aprons Using Radiography Non-Destructive Testing," *Journal of Renewable Energy and Mechanics*, vol. 4, no. 02, hal. 56–62, 2021.
- [9] Kelompok Praktikum Uji Generator Tabung Sinar-X, "Laporan Praktikum Uji Generator Tabung Sinar-X," Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Yogyakarta, 2025.
- [10] International Atomic Energy Agency (IAEA), *Radiation Protection and Safety in Industrial Radiography*, Safety Reports Series No. 13, IAEA, Vienna, 1999.
- [11] International Atomic Energy Agency (IAEA), *Radiation Safety in Industrial Radiography*, IAEA Safety Standards Series No. SSG-11, IAEA, Vienna, 2011.
- [12] Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN), *Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 7 Tahun 2009 tentang Keselamatan Radiasi dalam Penggunaan Pesawat Sinar-X Radiologi Diagnostik dan Intervensional*, BAPETEN, Jakarta, 2009.
- [13] Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN), *Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013 tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir*, BAPETEN, Jakarta, 2013.