Analisis Nilai *Entrance Skin Exposure* dan Dosis *Area* Rongga Dada Menggunakan *Digital Radiography* Pada *Phantom* ANSI Buatan

Analysis of Entrance Skin Exposure Values and Chest Area Dose Using Digital Radiography on a Custom ANSI Phantom

Aandri[1], Sri Dewi Astuty[1*], St. Hartina Anwar[2], Ikbal[3], Syamsir Dewang[1], Ajeng Anggreny Ibrahim[1]

[1]Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin, Makassar, Sulawesi Selatan, Indonesia 90245
[2]Instalasi Radiologi, RS dr. Tadjuddin Chalid, Makassar, Sulawesi Selatan, Indonesia 90242

[3]Balai Pengamanan Alat dan Fasilitas Kesehatan, Makassar, Sulawesi Selatan, Indonesia 90245

Email: [1]aan.drhii@gmail.com; [1]*dewiastuti@fmipa.unhas.ac.id; [2]nhynamuin@gmail.com; [3]ikbalbpfk@gmail.com; [1]dewang1163@gmail.com; [1]ajengibrahim@unhas.ac.id

Received: 27th April 2026; Revised: 19th June 2026; Accepted: 25nd September 2026

Abstrak – *Pemeriksaan radiografi toraks merupakan salah satu prosedur pencitraan medis yang paling sering dilakukan dalam praktik radiologi karena mampu memberikan informasi diagnostik mengenai kondisi paru-paru dan organ di rongga dada. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis nilai Entrance Skin Exposure (ESE) dan distribusi dosis radiasi pada area rongga dada menggunakan sistem Digital Radiography (DR) pada phantom toraks ANSI buatan. Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental yang dilaksanakan di Ruang Radiologi Rumah Sakit Dr. Tadjuddin Chalid Makassar dengan menggunakan phantom toraks berbahan akrilik dan aluminium yang dimodifikasi dengan variasi air gap sebesar 5, 6 dan 7 cm. Data yang diperoleh meliputi nilai ESE pada permukaan phantom dan dosis radiasi pada rongga toraks yang kemudian dianalisis untuk menghitung Entrance Skin Dose (ESD) dan koefisien atenuasi linier. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai ESE dan ESD meningkat seiring dengan kenaikan tegangan tabung dan ketebalan phantom, namun menurun dengan meningkatnya FFD. Selain itu, keberadaan gap udara pada rongga toraks mempengaruhi proses atenuasi radiasi sehingga dosis yang terukur pada rongga dada lebih rendah dibandingkan dengan material berdensitas tinggi. Temuan ini menunjukkan bahwa variasi parameter eksposi dan struktur rongga toraks berpengaruh bahwa variasi parameter eksposi dan struktur rongga toraks berpengaruh terhadap distribusi dan besaran dosis radiasi pada pemeriksaan radiografi toraks.*

Kata kunci: *Atenuasi radiasi; digital radiography; Entrance Skin Dose (ESD); Entrance Skin Exposure (ESE); phantom ANSI toraks*

Abstract – *Chest radiography is one of the most frequently performed medical imaging procedures in radiology practice due to its ability to provide diagnostic information about the lungs and thoracic organs. This study aims to analyze the Entrance Skin Exposure (ESE) and radiation dose distribution in the thoracic cavity using Digital Radiography (DR) with a fabricated ANSI chest phantom. This experimental study was conducted in the Radiology Department of Dr. Tadjuddin Chalid Hospital, Makassar. The phantom was constructed using acrylic and aluminum materials with variations of air gaps of 5, 6, and 7 cm to simulate the thoracic cavity. The collected data included ESE values on the phantom surface and radiation doses within the thoracic cavity, which were further analyzed to determine the Entrance Skin Dose (ESD) and linear attenuation coefficient. The results show that ESE and ESD values increase with higher tube voltage and phantom thickness, but decrease as the FFD increases. Furthermore, the presence of air gaps within the thoracic cavity affects the attenuation process, resulting in lower radiation doses*

compared to denser materials. These findings indicate that exposure parameters and thoracic cavity structure significantly influence radiation dose distribution in chest radiography examinations.

Keywords: *Radiation attenuation; digital radiography; Entrance Skin Exposure (ESE); Entrance Skin Dose (ESD); ANSI Chest phantom.*

1. Pendahuluan

Salah satu tonggak penting dalam perkembangan pencitraan medis adalah penemuan sinar-X oleh Wilhelm Conrad Rontgen pada tahun 1895 di Würzburg, Jerman. Sejak saat itu, pencitraan medis berkembang menjadi bagian yang sangat penting dalam pelayanan kesehatan *modern* karena membantu tenaga medis dalam mendeteksi, mendiagnosis, serta memantau perkembangan berbagai penyakit. Teknologi pencitraan memungkinkan visualisasi struktur internal tubuh manusia secara non-invasif sehingga dapat mengurangi kebutuhan tindakan pembedahan atau prosedur invasif lainnya. Dengan kemampuan tersebut, pencitraan medis memberikan kontribusi besar dalam meningkatkan akurasi diagnosis serta efektivitas penanganan pasien [1].

Sinar-X memiliki kemampuan untuk menembus berbagai jenis material dengan densitas yang berbeda, mulai dari jaringan lunak hingga tulang yang memiliki densitas lebih tinggi [2]. Radiasi sinar-X dihasilkan dari tabung sinar-X dengan berbagai tingkat energi yang membentuk spektrum radiasi. Spektrum tersebut kemudian difilter menggunakan pelat logam seperti aluminium dan tembaga untuk menyaring energi rendah yang tidak efektif dalam proses pencitraan. Proses filtrasi ini bertujuan untuk meningkatkan kualitas berkas sinar-X sehingga energi yang dihasilkan lebih optimal dalam menembus tubuh manusia dan menghasilkan citra diagnostik yang lebih baik. Ketika berkas sinar-X mengenai tubuh, sebagian energi akan diserap oleh jaringan, sementara sebagian lainnya diteruskan menuju detektor atau film. Intensitas radiasi yang mencapai detektor akan membentuk gambaran anatomi berdasarkan perbedaan tingkat atenuasi jaringan yang dilewati oleh sinar-X tersebut [2].

Di antara berbagai modalitas pencitraan medis yang tersedia, radiografi berbasis sinar-X merupakan salah satu metode yang paling banyak digunakan dalam praktik klinis. Hal ini disebabkan karena sinar-X mampu menampilkan perbedaan densitas jaringan dengan baik, seperti pada tulang, paru-paru, serta organ-organ yang berada di rongga dada. Anatomi dada yang berongga mengandung lebih banyak udara yang secara tidak langsung mempengaruhi atenuasi radiasi yang menembus, sehingga eksperimen mengasumsikan jika dilakukan penambahan tebal lapisan udara apakah signifikan perngukuran dosis yang terjadi. Salah satu pemeriksaan yang paling sering dilakukan adalah radiografi toraks. Pemeriksaan ini memiliki peran penting dalam diagnosis berbagai penyakit, terutama yang berkaitan dengan sistem pernapasan dan kardiovaskular. Di Amerika Serikat, diperkirakan sekitar 68 juta pemeriksaan radiografi toraks dilakukan setiap tahun, menunjukkan tingginya frekuensi penggunaan metode ini dalam pelayanan kesehatan [3, 4]. Di Indonesia, radiografi toraks juga merupakan salah satu pemeriksaan radiologi konvensional yang paling sering dilakukan. Sebagai contoh, data dari salah satu rumah sakit di Makassar menunjukkan bahwa dari 13.704 pemeriksaan radiologi yang dilakukan dalam satu tahun, pemeriksaan toraks merupakan prosedur yang paling dominan [5]. Meskipun memberikan manfaat besar dalam diagnosis medis, penggunaan sinar-X sebagai radiasi pengion tetap memiliki potensi risiko biologis akibat paparan radiasi terhadap pasien maupun tenaga medis [6].

Prinsip dalam praktik radiologi, penerapan prinsip keselamatan radiasi menjadi aspek yang sangat penting untuk meminimalkan dampak biologis dari radiasi pengion. Salah satu prinsip dasar yang digunakan adalah konsep *As Low As Reasonably Achievable* (ALARA), yaitu upaya untuk menjaga paparan radiasi serendah mungkin tanpa mengurangi kualitas citra diagnostik yang diperlukan untuk menegakkan diagnosis. Prinsip ini bertujuan untuk melindungi pasien, petugas radiologi, serta masyarakat dari paparan radiasi yang tidak perlu [7]. Dosis radiasi sendiri didefinisikan sebagai jumlah energi radiasi yang diserap oleh suatu material atau jaringan ketika radiasi tersebut melewati objek tertentu [8]. Namun, pengukuran dosis radiasi yang diterima pasien sering menghadapi berbagai kendala teknis. Indeks yang umumnya digunakan pada perangkat radiologi, seperti CTDIvol, DLP, atau DAP, lebih merepresentasikan keluaran tabung radiasi daripada dosis yang benar-benar diserap oleh organ pasien. Selain itu, variasi ukuran tubuh pasien, posisi saat pemeriksaan, serta perbedaan protokol antar perangkat radiologi juga dapat memengaruhi estimasi dosis yang diterima pasien [9, 10].

Salah satu metode yang umum digunakan untuk mengevaluasi paparan radiasi pada pasien adalah pengukuran *Entrance Skin Exposure* (ESE). Menurut AAPM Report No. 31, Nilai ESE merupakan parameter yang digunakan untuk menilai jumlah radiasi yang diterima pada permukaan kulit pasien selama pemeriksaan radiografi. Nilai ESE dipengaruhi oleh berbagai faktor teknis, seperti tegangan tabung (kV), arus dan waktu eksposi (mAs), jarak sumber ke detektor, ketebalan tubuh pasien, serta kualitas berkas sinar-X yang dinyatakan melalui *Half Value Layer* (HVL) [11, 12].

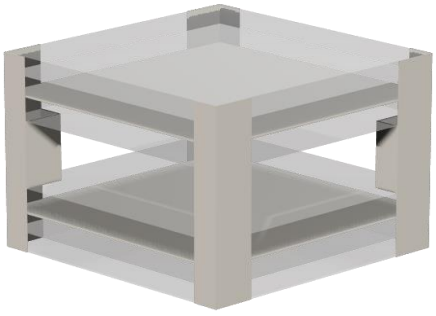
Informasi mengenai dosis radiasi dan kualitas citra tanpa melibatkan pasien secara langsung, penelitian radiologi sering menggunakan *phantom* sebagai pengganti objek manusia. *Phantom* biasanya dibuat dari bahan yang memiliki sifat atenuasi mendekati jaringan tubuh manusia sehingga mampu merepresentasikan karakteristik anatomi dan fisik tubuh secara realistis [13]. *Phantom* toraks ANSI merupakan salah satu jenis *phantom* yang banyak digunakan dalam penelitian radiografi dada karena mampu mensimulasikan proses atenuasi dan hamburan radiasi pada pemeriksaan toraks [1].

Penelitian sebelumnya telah mengembangkan *phantom* dada pediatrik berbahan tissue-equivalent materials untuk mengoptimalkan teknik paparan sinar-X dengan menggunakan dosimeter OSLD yang ditempatkan pada organ simulasi. Namun, *phantom* tersebut dirancang untuk merepresentasikan pasien anak usia 1–2 tahun sehingga hasilnya tidak dapat langsung diterapkan pada pasien dewasa. Selain itu, penggunaan bahan setara jaringan yang kompleks membuat proses pembuatan *phantom* menjadi lebih sulit dan mahal dibandingkan dengan penggunaan bahan sederhana seperti akrilik dan aluminium [13]. Penelitian lain menggunakan data pasien toraks untuk menganalisis pengaruh variasi *Focus Film Distance* (FFD) terhadap dosis serap pasien, yang menunjukkan bahwa peningkatan FFD dapat menurunkan dosis radiasi yang diterima pasien dan seluruh hasil masih berada di bawah batas yang ditetapkan oleh BAPETEN [14].

Berdasarkan penelitian-penelitian tersebut, evaluasi dosis radiasi pada objek toraks masih memiliki keterbatasan, terutama dalam mempertimbangkan pengaruh struktur anatomi dada yang memiliki rongga udara. Keberadaan rongga udara dalam toraks berpotensi memengaruhi proses atenuasi dan hamburan sinar-X ketika radiasi melewati jaringan kulit, tulang rusuk, serta organ dalam dada. Oleh karena itu, penelitian ini mengembangkan evaluasi tambahan dengan memasukkan variasi volume rongga udara atau *air gap* pada *phantom* toraks. Pengukuran nilai ESE pada permukaan *phantom* serta radiasi yang menyebar di dalam rongga udara toraks menjadi aspek penting untuk memahami proses atenuasi dan hamburan radiasi sinar-X. Penelitian ini menggunakan *phantom* toraks standar ANSI yang disusun dari bahan akrilik dan aluminium dengan variasi ketebalan *air gap*, yang kemudian diuji melalui sistem *Digital Radiography* untuk memperoleh gambaran yang lebih komprehensif mengenai distribusi paparan radiasi pada pemeriksaan radiografi toraks.

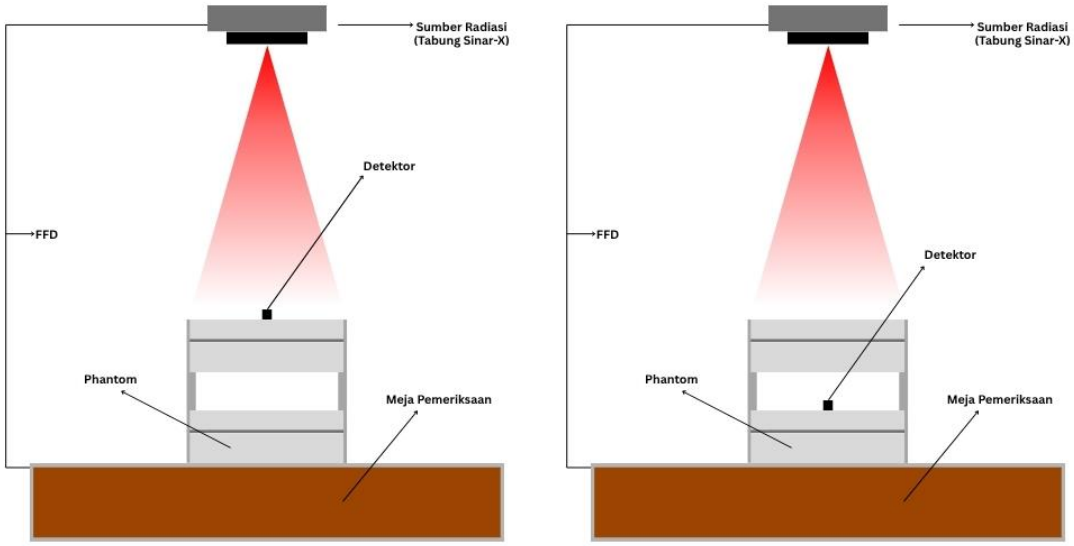
2. Material Dan Metode

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental yang bertujuan untuk mengevaluasi paparan radiasi pada *phantom* toraks menggunakan sistem *Digital Radiography*. Penelitian dilaksanakan pada tanggal 30 Mei hingga 13 Juni 2025 di Ruang Radiologi Rumah Sakit Dr. Tadjuddin Chalid Makassar. Alat yang digunakan meliputi pesawat sinar-X *Digital Radiography* tipe *DD Philips Diagnostic* Konvensional model CSM Tubemount alpha-beta drive sebagai sumber radiasi, detektor R/F *Raysafe Geiger Muller* untuk menangkap radiasi, multimeter R-Sev untuk mengukur keluaran radiasi, serta monitor table control untuk mengatur parameter eksposi.



Gambar 1. Desain *phantom* ANSI buatan.

Objek penelitian berupa *phantom* toraks ANSI yang dimodifikasi berdasarkan standar AAPM *Report* No. 31 dengan bahan akrilik (jenis PMMA) sebagai simulasi jaringan lunak, aluminium sebagai representasi tulang, dan variasi jarak antar lapisan akrilik dan aluminium sebagai simulasi keberadaan *air gap* rongga toraks. *Phantom* disusun dari beberapa lapisan akrilik dan aluminium dengan variasi ketebalan total 18,30, 19,30, dan 20,30 cm serta variasi gap udara sebesar 5, 6 , dan 7 cm.



a) b)

Gambar 2. Posisi detektor saat penyinaran sinar-X: a) permukaan *phantom* dan b) tengah *phantom*.

Pengujian dilakukan dengan menempatkan *phantom* pada meja pemeriksaan dalam posisi tegak lurus terhadap berkas sinar-X, kemudian dilakukan penyinaran menggunakan variasi parameter eksposi berupa FFD sebesar 80, 100, dan 120 cm, tegangan tabung 60, 70, 80, dan 125 kVp, arus tabung 12,5 mAs, serta luas lapangan penyinaran 25 × 25 cm. Data yang dikumpulkan meliputi nilai ESE pada permukaan *phantom* dan dosis radiasi pada rongga udara di bagian tengah *phantom* yang diukur menggunakan detektor digital. Data paparan radiasi kemudian dikonversi ke satuan Sistem Internasional dan dianalisis untuk menghitung ESD dengan mempertimbangkan *Back Scatter Factor* (BSF) sebesar 1,35. Selain itu, analisis pelemahan radiasi dilakukan menggunakan pendekatan koefisien atenuasi linier berdasarkan persamaan Lambert–Beer untuk mengetahui perubahan intensitas radiasi setelah melewati material penyusun *phantom* toraks.

Menurut IAEA *Technical Report Series* No. 457 Tahun 2007 dalam jurnal Al-Hayek et al., 2024, nilai BSF untuk radiografi berada pada rentang 1,24–1,67 dengan nilai yang umum digunakan secara internasional adalah 1,35. Perhitungan ESD dalam penelitian ini menggunakan Persamaan (1) [19].

$$\mathrm{ESD} = \mathrm{Ki} \times \mathrm{BSF} \tag{1}$$

Dimana ESD = *Entrance Skin Dose* (mGy), Ki = *Kerma incident* (*Kinetic Energy Released in Matter*) (mGy), dan BSF = *Back Scatter Factor*, menggunakan nilai 1,35.

Analisis penurunan intensitas radiasi dilakukan berdasarkan konsep koefisien atenuasi linier dimana intensitas berkas sinar-X akan berkurang secara eksponensial setelah melewati suatu material dengan ketebalan tertentu. Hubungan antara intensitas awal dan intensitas setelah melewati suatu material diadopsi dari penurunan persamaan Lambert-Beer, untuk mengukur nilai koefisien atenuasi linier menggunakan Persamaan (2) [20].

$$\mu = \frac{\ln(I_0) - \ln(I)}{x} \tag{2}$$

Dimana I = intensitas radiasi setelah menembus bahan setebal x, I_0 = intensitas radiasi yang jatuh pada permukaan material, μ = koefisien atenuasi linier, dan x = ketebalan obyek (cm).

3. Hasil Dan Pembahasan

3.1. Hasil pengukuran *entrance skin exposure (ESE)*

Pada saat penyinaran sinar-X terhadap tubuh manusia, bagian kulit merupakan organ pertama yang menerima paparan radiasi sehingga nilai paparan maksimum berada pada permukaan tubuh yang dikenal sebagai *Entrance Skin Exposure* (ESE). Pada penelitian ini, pengukuran ESE dilakukan menggunakan metode *free-in-air* tanpa mempertimbangkan faktor hamburan balik. Nilai yang diperoleh merupakan paparan murni yang diterima permukaan depan *phantom* akibat berkas utama sinar-X. Tabel 1, 2, dan 3 menampilkan hasil pengukuran ESE dengan beberapa variasi.

Tabel 1. Hasil pengukuran ESE pada *phantom* toraks buatan variasi *air gap* 5 cm = 18,30 cm tebal *phantom*.

Focus Film Distance (*FFD*)	Tegangan Tabung (kV)	Kuat Arus Tabung (mAs)	*Entrance Skin Exposure* (*ESE*)	
			(mGy)	(C/kg)
80	60	12,5	0,42	12,31
	70		0,66	19,29
	80		0,96	28,24
	125		2,92	85,91
100	60	12,5	0,25	7,45
	70		0,37	10,92
	80		0,54	15,99
	125		1,62	47,50
120	60	12,5	0,15	4,36
	70		0,23	6,85
	80		0,34	10,05
	125		1,03	30,21

Tabel 2. Hasil pengukuran ESE pada *phantom* toraks buatan variasi *air gap* 6 cm = 19,30 cm tebal *phantom*.

Focus Film Distance (*FFD*)	Tegangan Tabung (kV)	Kuat Arus Tabung (mAs)	*Entrance Skin Exposure* (*ESE*)	
			(mGy)	(C/kg)
80	60	12,5	0,44	12,96
	70		0,69	20,33
	80		1,01	29,79
	125		3,03	89,15
100	60	12,5	0,25	7,48
	70		0,39	11.41
	80		0,57	16,74
	125		1,68	49,38
120	60	12,5	0,16	4,58
	70		0,24	7,19
	80		0,36	10,51
	125		1,06	31,12

Nilai referensi ESE untuk pemeriksaan toraks berdasarkan AAPM Report No. 31 adalah sebesar 8,26 C/kg atau setara dengan 0,281 mGy. Sumber referensi menggunakan faktor geometri penyinaran berdasarkan spesifikasi material akrilik dengan ukuran luas penampang (30,5 x 30,5) cm^2, dan tebal aluminium campuran 3 mm type 1100, jarak air gap 5,08 cm serta nilai *Source-Image-Distance* 23 cm (untuk menghindari radiasi hamburan yang berlebih). Hasil pengukuran pada penelitian ini menunjukkan adanya variasi nilai paparan yang cukup besar dan dipengaruhi oleh kombinasi perbedaan ketebalan *phantom*, variasi tegangan, serta jarak FFD. Nilai ESE tertinggi pada seluruh variasi pengukuran diperoleh pada kondisi FFD 80 cm dengan tegangan tabung 125 kVp. Pada ketebalan 18,30 cm, nilai ESE maksimum yang terukur adalah sebesar 85,91 C/kg, meningkat menjadi 89,15 C/kg pada ketebalan 19,30 cm dan mencapai 92,38 C/kg pada ketebalan 20,30 cm. Sebaliknya, nilai ESE terendah diperoleh pada kondisi FFD 120 cm dengan tegangan tabung 60 kVp, yaitu masing-masing 4,36 C/kg, 4,58 C/kg, dan 4,66 C/kg untuk ketabalan *phantom* 18,30 cm, 19,30 cm, dan 20,30 cm.

Tabel 3. Hasil pengukuran ESE pada *phantom* toraks buatan dengan variasi *air gap* 7 cm = 20,30 cm tebal *phantom*.

Focus Film Distance (*FFD*)	Tegangan Tabung (kV)	Kuat Arus Tabung (mAs)	*Entrance Skin Exposure* (*ESE*)	
			(mGy)	(C/kg)
80	60	12,5	0,49	14,52
	70		0,77	22,71
	80		1,14	33,41
	125		3,14	92,38
100	60	12,5	0,26	7,51
	70		0,40	11,77
	80		0,59	17,23
	125		1,71	50,38
120	60	12,5	0,16	4,66
	70		0,25	7,32
	80		0,36	10,71
	125		1,07	31,50

Jika dibandingkan dengan nilai referensi AAPM sebesar 4,13 C/kg - 8,26 C/kg, maka nilai ESE maksimum yang diperoleh dalam penelitian ini berada pada kisaran sekitar 10 hingga 11 kali lebih tinggi dari batas referensi, sedangkan nilai ESE minimum berada jauh dibawah nilai referensi hingga 5 kali dari nilai acuan. Dari total 36 data pengukuran, terdapat 9 data (25%) yang berada dalam kisaran nilai referensi AAPM, sedangkan 27 data (75%) menunjukkan nilai ESE yang melebihi batas referensi. Nilai-nilai ESE yang berada dalam kisaran acuan umumnya diperoleh pada kombinasi FFD ≥ 100 cm dan tegangan tabung 60-70 kVp. Nilai ESE yang paling mendekati batas referensi AAPM diperoleh pada kondisi FFD 100 cm, 60 kVp, pada ketebalan *phantom* 20,30 cm, dengan nilai ESE yaitu 7,51 C/kg.

Tingginya paparan ini konsisten dengan teori penggunaan tegangan tinggi dan FFD yang lebih rendah menghasilkan peningkatan intensitas radiasi yang diterima permukaan kulit. Sedangkan rendahnya nilai ESE dipengaruhi oleh penggunaan jarak FFD yang besar serta tegangan yang lebih rendah, yang menyebabkan penurunan intensitas berkas sinar-X yang mencapai permukaan objek. Selain itu, AAPM Report No. 31 tidak mencantumkan informasi teknis secara rinci, seperti penggunaan AEC, penggunaan grid, nilai arus waktu, tegangan, dan FFD, sehingga perbedaan kondisi pengukuran dapat menyebabkan variasi nilai ESE yang terukur. Hasil pengukuran ESE yang dilaporkan oleh [15] untuk pemeriksaan toraks PA maupun AP berada pada kisaran 0,087-0,26 mGy sedangkan pemeriksaan toraks lateral berada pada kisaran 0,43-0,87 mGy. Berdasarkan hasil pengukuran penelitian, diperoleh lebih tepat diasumsikan merepresentasikan pemeriksa toraks PA dan AP, karena ketebalan *phantom* yang digunakan serta rentang nilai ESE yang dihasilkan lebih sesuai dengan referensi Sprawls, untuk proyeksi PA dan AP dibandingkan dengan proyeksi lateral.

3.2. Nilai *entrance skin dose* (ESD)

Perhitungan nilai ESD pada penelitian ini dilakukan dengan metode perhitungan berdasarkan hasil nilai ESE yang diukur langsung oleh detektor Geiger Muller dengan menggunakan koreksi *Backscatter Factor* sebesar 1,35 sesuai dengan nilai yang umum digunakan untuk pemeriksaan toraks. Nilai ESD selengkapnya disajikan pada Tabel 4.

Secara umum, terlihat bahwa nilai ESD (Tabel 4) menunjukkan *trend* peningkatan yang sama dengan nilai ESE (Tabel 3) akibat nilai BSF yang sama. Pada Tabel 4, terlihat bahwa pada *phantom* tebal 18,30 cm, menunjukkan ESD pada FFD 80 cm meningkat dari 0,57 mGy pada tegangan 60 kV menjadi 3,94 mGy pada tegangan 125 kV, pada FFD 100 cm dari 0,34 mGy menjadi 2,18 mGy, dan pada FFD 120 cm dari 0,20 mGy menjadi 1,39 mGy. Pola serupa juga terlihat pada *phantom* tebal 19,30 cm dan tebal 20,30 cm. Peningkatan tegangan menghasilkan kenaikan ESD pada semua FFD dengan nilai tertinggi pada FFD 80 cm dan kenaikan relatif paling kecil pada FFD 120 cm. Temuan ini sejalan dengan pernyataan Haider et al. (2024) yang menjelaskan bahwa ESD meningkat seiring kenaikan tegangan ketika beban arus-waktu dipertahankan secara konstan. Studi tersebut juga melaporkan bahwa ESD meningkat dengan tegangan untuk berbagai jarak *source–surface distance* (SSD) yaitu jarak sumber ke permukaan, menggunakan *water phantom* dan *ion chamber* tipe *SFD*, yang mencatat nilai ESD hingga 5,8 mGy pada tegangan tinggi yaitu 150 kVp dan SSD yang rendah [17]. Optimasi eksposur klinis menunjukkan bahwa menaikkan

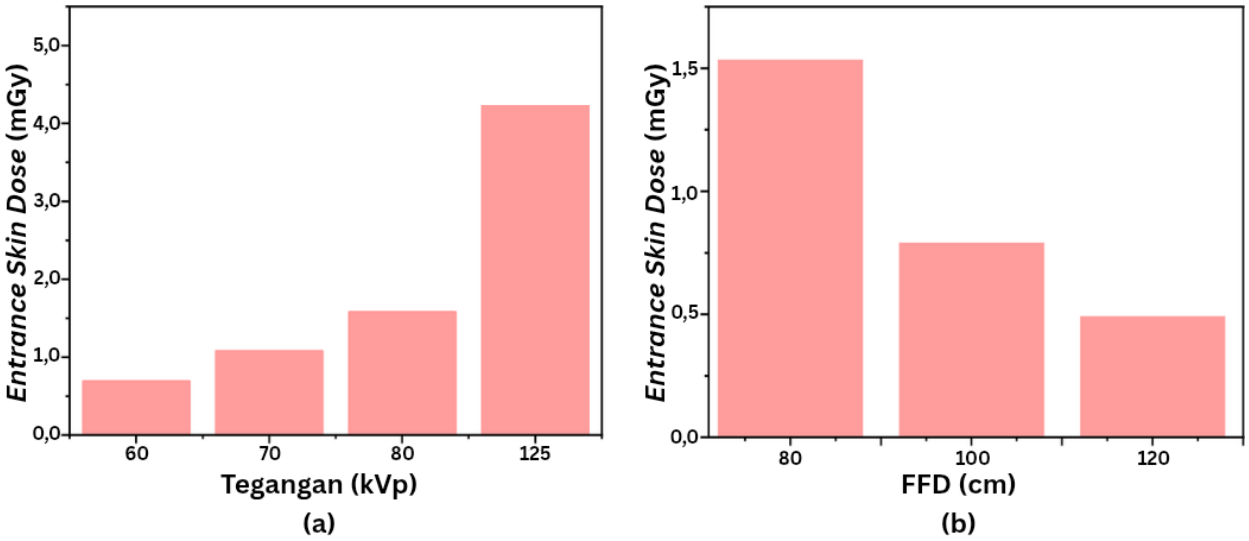
tegangan tabung tidak selalu meningkatkan dosis pasien jika disertai pengaturan ulang parameter eksposur. Peningkatan tegangan menunjukkan bahwa energi foton yang lebih tinggi secara langsung meningkatkan jumlah radiasi yang diserap oleh permukaan *phantom*. Pengaturan tegangan harus dilakukan dengan pertimbangan yang baik, karena perubahan kecil pada tegangan tabung dapat mempengaruhi nilai ESD secara signifikan.

Tabel 4. Nilai *entrance skin dose* (ESD).

Focus Film Distance (cm)	Tegangan Tabung (kVp)	*Entrance Skin Dose* (mGy)		
		18,30 cm	19,30 cm	20,30 cm
80	60	0,565	0,595	0,666
	70	0,886	0,933	1,042
	80	1,296	1,368	1,534
	125	3,943	4,092	4,240
100	60	0,342	0,343	0,345
	70	0,501	0,524	0,540
	80	0,734	0,768	0,791
	125	2,180	2,267	2,313
120	60	0,200	0,210	0,214
	70	0,314	0,330	0,336
	80	0,461	0,482	0,492
	125	1,386	1,428	1,446

Tegangan pada tabung sinar-X sangat berpengaruh terhadap kualitas daya tembus objek yang dihasilkan oleh sinar-X. Perubahan nilai tegangan, akan menimbulkan perubahan total intensitas pada berkas sinar-X [16]. Secara fisika, tegangan tabung merupakan faktor utama yang mempengaruhi energi foton sinar-X yang dihasilkan oleh pesawat radiografi. Semakin tinggi tegangan tabung, semakin besar energi kinetik elektron ketika menumbuk anoda, sehingga foton sinar-X yang dihasilkan memiliki daya tembus lebih tinggi.

Sebagaimana tujuan penelitian, yaitu menganalisis pengaruh faktor eksposi tegangan tabung dan jarak FFD terhadap nilai akhir ESD, pada Gambar 3 ditampilkan grafik histogram dengan pola FFD tetap pada tegangan yang bervariasi (Gambar 3a). Demikian juga, dengan FFD variasi digunakan satu nilai tegangan tetap, khusus untuk ketebalan phantom 20,30 cm.



Gambar 3. Histogram profil ESD terhadap: a) variasi tegangan pada kondisi penyinaran FFD 100 cm, tebal 20,30 cm dan b) FFD pada kondisi penyinaran tegangan 80 kVp, tebal 20,30 cm.

Berdasarkan pada Gambar 3a terlihat konsisten bahwa nilai ESD meningkat seiring kenaikan tegangan tabung pada seluruh variasi ketebalan *phantom* dan tiap nilai FFD. Nilai ESD dari 60 kVp ke 70 kVp meningkat sebesar 56,5%, sedangkan pada tegangan 70 kVp menuju 80 kVp, prosentase kenaikan hanya sebesar 46,5%.

Diagram batang pada Gambar 3b menunjukkan pengaruh FFD terhadap nilai ESD pada tegangan tabung 80 kVp dan ketebalan *phantom* 20,30 cm. Nilai ESD mengalami penurunan seiring bertambahnya FFD. Nilai ESD tertinggi diperoleh pada FFD 80 cm sebesar 1,534 mGy, kemudian menurun menjadi 0,791 mGy pada FFD 100 cm, dan mencapai nilai terendah sebesar 0,492 mGy pada FFD 120 cm. Pola serupa muncul pada semua tingkat tegangan dan ketebalan *phantom* lainnya. Peningkatan FFD dari 80 cm menjadi 100 cm menyebabkan penurunan nilai ESD sebesar 48,4%, sedangkan peningkatan lebih lanjut dari 100 cm menjadi 120 cm menurunkan ESD sebesar 37,8%. Secara kumulatif, peningkatan FFD dari 80 cm hingga 120 cm menghasilkan penurunan ESD sebesar 67,9%. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan jarak FFD memberikan pengaruh yang signifikan terhadap penurunan dosis radiasi pada permukaan *phantom*.

Penurunan nilai ESD menunjukkan bahwa jarak FFD berperan signifikan dalam menentukan paparan permukaan kulit (ESD), semakin jauh sumber sinar-X dari permukaan *phantom*, intensitas berkas sinar-X yang mencapai permukaan berkurang, sehingga ESD menjadi lebih rendah. Fenomena ini konsisten dengan hukum kuadrat terbalik (*inverse square law*), dimana intensitas radiasi berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antar sumber dan permukan target. Pada FFD yang lebih besar, berkas sinar-X menempuh jarak yang lebih panjang sebelum mencapai permukaan *phantom*.

Temuan penelitian ini sejalan dengan hasil penelitian sebelumnya dengan variasi 110, 130, dan 150 cm disimpulkan bahwa semakin besar FFD semakin kecil dosis yang diterima pasien [14]. Dalam studi tersebut, dosis tertinggi tercatat pada FFD 110 cm (0,3867 mGy) dan menurun secara signifikan ketika FFD diperbesar hingga 150 cm (0,2079 mGy) [14]. Selain itu, dilaporkan bahwa FFD mempengaruhi dosis radiasi yang diterima pasien, dimana jarak FFD yang lebih dekat ke objek menghasilkan intensitas berkas yang lebih besar sehingga dosis radiasi yang diterima meningkat [16]. Penelitian ini juga menyebutkan bahwa peningkatan FFD merupakan salah satu strategi proteksi dosis yang efektif dalam pemeriksaan sinar-X, karena dapat menurunkan dosis radiasi tanpa mengubah parameter eksposi lainnya [19]. Berdasarkan hasil penelitian ini bahwa FFD salah satu parameter utama yang menentukan besarnya ESD yang diterima oleh objek uji maupun pasien. Konsistensi penurunan nilai ESD pada FFD yang digunakan dalam penelitian ini yaitu 80, 100, dan 120 cm pada seluruh ketebalan *phantom* dan tegangan tabung menunjukkan bahwa hubungan antara jarak sumber dan paparan radiasi mengikuti prinsip hukum kuadrat terbalik. Peningkatan FFD dapat dijadikan parameter untuk menurunkan dosis permukaan tanpa harus mengubah parameter eksposi lainnya.

3.3. Nilai dosis area rongga phantom ANSI buatan

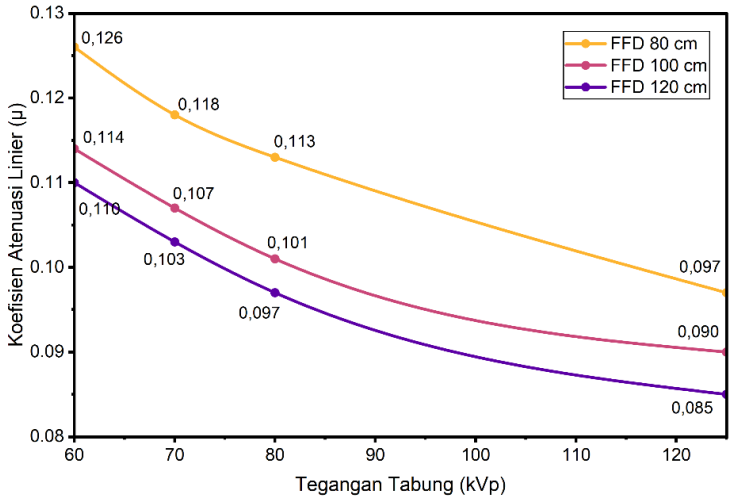
Konsep hasil pembacaan nilai ESE pada detektor yang di tempatkan tepat di atas permukaan *phantom* lapisan atas serta estimasi nilai ESD akibat faktor hamburan balik, diasumsikan sebagai nilai dosis yang masuk ke dalam badan *phantom*. Hal ini juga dapat dinyatakan bahwa ketika dilakukan eksposi pada area toraks (pada pasien) diasumsikan terjadi proses atenuasi energi sinar X dalam rongga dada, sehingga dosis yang melewati pasien menembus punggung pasien akan mengalami pengurangan.

Meskipun secara ilmiah, pengukuran berapa dosis yang diatenuasi sepanjang rongga dada yang berisi udara tidak dapat dilakukan ataupun divalidasi. Melalui struktur geometri *phantom* ANSI yang dibuat replika menggunakan material lembaran akrilik dan alumnium, penelitian ini mencoba mengukur nilai dosis setelah melewati lapisan *phantom* bagian atas dengan cara menempatkan detektor di atas permukaan *phantom* lapisan bawah. Kebutuhan secara ilmiah mengasumsikan bahwa nilai dosis yang sampai dalam rongga dada merupakan faktor atenuasi dosis setelah melewati lapisan ketebalan tertentu, juga menjadi dasar untuk menentukan koefisien atenuasi linier yang terjadi. Data hasil perhitungan nilai koefisien atenuasi linier berkas sinar X setelah melewati lapisan tertentu (sesuai desain pada Gambar 1 dan Gambar 2) selengkapnya disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil perhitungan koefisien atenuasi linier.

Focus Film Distance (cm)	Tegangan Tabung (kVp)	Dosis Radiasi (mGy)				Koefisien Atenuasi Linier (cm^{-1})	
		18,30 cm		20,30			
		Titik 1	Titik 2	Titik 1	Titik 2	18,30	20,30
80	60	0,419	0,085	0,494	0,088	0,137	0,126
	70	0,656	0,148	0,772	0,154	0,128	0,118
	80	0,960	0,234	1,136	0,242	0,121	0,113
	125	2,921	0,805	3,141	0,831	0,111	0,097
100	60	0,253	0,056	0,255	0,054	0,130	0,114
	70	0,371	0,096	0,400	0,093	0,116	0,107
	80	0,544	0,151	0,586	0,147	0,110	0,101
	125	1,615	0,530	1,713	0,504	0,096	0,090
120	60	0,148	0,037	0,159	0,035	0,120	0,110
	70	0,233	0,064	0,249	0,061	0,111	0,103
	80	0,342	0,100	0,364	0,097	0,105	0,097
	125	1,027	0,352	1,071	0,335	0,092	0,085

Data dalam Tabel 5 merupakan sajian data lengkap hasil pengukuran untuk dua tebal phantom yang berbeda. Terlihat untuk satu niai FFD, kenaikan tegangan tabung memberikan konsekuensi peningkatan nilai dosis radiasi. Istilah dosis radiasi digunakan sebagai kaitan untuk nilai yang terukur pada kedua titik pengukuran (desain Gambar 2) terhadap terjadinya atenuasi (pelemahan) pada skema yang ada. Profil penurunan nilai koefisien atenuasi linier (μ) berkas sinar X terhadap perubahan nilai tegangan tabung (kVp) untuk kondisi FFD yang berbeda tersaji pada Gambar 4 untuk data tebal *phantom* 20,30 cm.



Gambar 4. Grafik Pengaruh tegangan terhadap nilai koefisien atenuasi linier tebal *phantom* 20,30 cm.

Hasil perhitungan koefisien atenuasi linier (μ) yang disajikan pada Tabel 5 dan grafik hubungan antara tegangan tabung terhadap nilai μ pada Gambar 4, terlihat nilai μ cenderung menurun seiring dengan meningkatnya tegangan tabung pada seluruh variasi FFD dan ketebalan *phantom* yang konsisten pada FFD 80, 100, maupun 120 cm, meskipun besar penurunannya berbeda untuk setiap kondisi pengukuran.

Grafik tersebut menunjukkan bahwa nilai μ menurun seiring meningkatnya tegangan tabung pada seluruh variasi. Pada FFD 80 cm nilai μ turun dari 0,126 cm^{-1} pada tegangan 60 kVp menjadi 0,097 cm^{-1} pada tegangan 125 kVp. Pola penurunan nilai μ yang serupa juga terlihat pada FFD 100 cm dan FFD 120 cm. Peningkatan FFD juga cenderung diikuti oleh penurunan nilai μ pada kVp yang sama. Pada 80 kVp nilai μ menurun dari 0,113 cm^{-1} (FFD 80 cm) menjadi 0,101 cm^{-1} (FFD 100 cm) dan 0,097 cm^{-1} (FFD 120 cm).

Penurunan nilai μ seiring dengan meningkatnya tegangan tabung dapat dijelaskan secara fisika melalui perubahan energi efektif berkas sinar-X. Peningkatan tegangan menghasilkan foton sinar-X dengan energi

rata-rata yang lebih tinggi, sehingga probabilitas interaksi dominan seperti efek fotolistrik menurun dan interaksi Compton menjadi lebih dominan. Kondisi ini menyebabkan kemampuan bahan *phantom* dalam melemahkan intensitas berkas sinar-X menjadi lebih kecil, sehingga nilai koefisien atenuasi linier yang terukur juga menurun. Variasi FFD juga memberikan kontribusi terhadap nilai koefisien atenuasi linier yang diperoleh. Pada tegangan tabung yang sama, nilai μ cenderung lebih tinggi pada FFD yang lebih kecil dan menurun pada FFD yang lebih besar. Hal ini berkaitan dengan perbedaan intensitas radiasi yang mencapai *phantom* akibat perubahan jarak sumber ke objek. Pada FFD yang lebih pendek, intensitas berkas sinar-X yang mengenai *phantom* lebih tinggi, sehingga perbedaan intensitas sebelum dan sesudah atenuasi menjadi lebih besar dan menghasilkan nilai μ yang relatif lebih tinggi.

Pengaruh terhadap gap udara antar variasi ketebalan *phantom* juga berkontribusi terhadap nilai μ yang terukur. Pada penelitian ini, peningkatan ketebalan *phantom* sebesar 1 cm secara tidak langsung menambah jarak lintasan berkas sinar-X sebelum mencapai detektor. Udara memiliki koefisien atenuasi yang jauh lebih kecil dibandingkan material *phantom*, keberadaan *air gap* yang berbeda dapat memengaruhi intensitas berkas sinar-X yang terukur akibat efek penyebaran berkas dan perubahan komponen material. Nilai koefisien atenuasi linier lebih besar pada *phantom* dengan ketebalan yang kecil dibandingkan dengan ketebalan *phantom* yang lebih besar. Ketebalan *phantom* 18,30 cm jumlah radiasi di dalam material relatif lebih sedikit sehingga komponen radiasi hambur yang mencapai detektor lebih kecil. Pada ketebalan *phantom* 20,30 cm, peningkatan volume interaksi menyebabkan radiasi hambur yang dihasilkan semakin besar menyebabkan nilai μ yang dihitung cenderung lebih rendah, meskipun material *phantom* yang digunakan sama.

4. Kesimpulan

Peningkatan nilai FFD cenderung menyebabkan penurunan nilai ESD yang diterima pada permukaan *phantom*, sedangkan peningkatan ketebalan *phantom* serta kenaikan tegangan eksposi cenderung meningkatkan nilai ESD toraks. Selain itu, keberadaan variasi *air gap* pada rongga *phantom* toraks ANSI buatan juga memberikan pengaruh terhadap proses atenuasi radiasi sinar-X, di mana dosis yang terukur pada *area* rongga toraks menjadi lebih rendah dibandingkan pada material yang memiliki densitas lebih tinggi. Dengan demikian, variasi parameter eksposi serta keberadaan rongga udara dalam *phantom* toraks berperan penting dalam memengaruhi distribusi dan besaran dosis radiasi yang dihasilkan pada pemeriksaan radiografi toraks.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih kepada seluruh staf Rumah Sakit Tadjuddin Chalid yang telah memberikan fasilitas alat untuk penelitian ini.

Pustaka

[1] Setiawan A N, Suryono, Hadisaputro S, Santoso A G, Santoso B, Sugiyanto, dan Wibowo G M 2017 Exposure Index and Entrance Surface Dose of ANSI Chest Phantom with Computed Radiography *International Journal of Allied Medical Sciences and Clinical Research (IJAMSCR)*, *5*(4), p. 947–953.

[2] Berger M, Yang Q dan Maier A 2018 X-ray Imaging (Chapter 7) *Springer*.

[3] Kamel R J, Naeem S A, Musa M M, dan Karim S N 2024, Advancements in Medical Imaging Technologies: Ultrasound, X-ray, and MRI. *European Journal of Theoretical and Applied Sciences*, *2*(5), p. 149–156. https://doi.org/10.59324/ejtas.2024.2(5).15

[4] Thongkum V, Sermsuk P, Teerakeerayut A, dan Jumpee C 2024 Estimation of organ-absorbed doses in patients undergoing chest and abdominal X-ray examinations using Monte Carlo-based software. *Journal of Associated Medical Sciences*, *57*(3). https://doi.org/10.12982/JAMS.2024.054

[5] Fadhillah, Irsandy F, Hidayati P H, Rahmawati, dan Arsal M Y 2024 Identify the Diversity of Diagnostic Equipment, Case Variations, and Number of Human Resources in the Radiology Polyclinic at Ibnu Sina Teaching Hospital Makassar in the January-December 2022 Period. *Eduhealt Sean Institute*, *15*(1), 412–421.

[6] Putri N P V S A, dan Jeniyanthi N P R 2025 Estimasi Dosis Radiasi yang Diterima Pasien pada Pemeriksaan Thorax PA di Instalasi Radiologi Rumah Sakit Balimed Karangsem. *Jurnal Surya Medika*, *11*(2), 145–149. https://doi.org/10.33084/jsm.v11i2.7711

[7] Badan Pengawas Tenaga Nuklir 2020 Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 4 Tahun 2020 tentang Keselamatan Radiasi pada Penggunaan Pesawat Sinar-X dalam Radiologi Diagnostik dan Intervensional. Jakarta: Badan Pengawas Tenaga Nuklir.

[8] Martem D R, Milvita D, Yuliati H, dan Kusumawati D D 2015 Pengukuran Dosis Radiasi Ruangan Radiologi II Rumah Sakit Gigi dan Mulut (RSGM) Baiturrahmah Padang Menggunakan Surveymeter Unfors-XI. *Jurnal Fisika Unand*, *4*(4), 414–418.

[9] Sabiniewicz-Ziajka D, Szarmach A, Grzywińska M, Gać P, dan Piskunowicz M 2024 Redefining Radiation Metrics: Evaluating Actual Doses in Computed Tomography Scans. *Biomedicines*, *12*(3), 600. https://doi.org/10.3390/biomedicines12030600

[10] Al-Hayek Y, Spuur K, Davidson R, Hayre C, Currie G, dan Zheng X 2024 The effect of inappropriate patient centring on CT numbers and radiation dose: A survey of current practices and knowledge. *Radiography*, *30*(1), 100–106. https://doi.org/10.1016/j.radi.2023.10.009

[11] Chu Y L R, Fisher J, Archer B R, Conway B J, Goodsitt M M, Glaze S, Gray J E, dan Strauss K J. (1990). *AAPM Report No. 31*. American Institute of Physics.

[12] Hamd Z Y, Alrebdi H I, Osman E G, Awwad A, Alnawwaf L, Nashri N, Alfnekh, R., & Khandaker, M. U. (2023). Optimization of chest X-ray exposure factors using machine learning algorithm. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, *16*(1), 100518. https://doi.org/10.1016/j.jrras.2022.100518

[13] Pengpan T, Rattanarungruangchai N, Dechjaithat J, Panthim P, Siricharuwong P, dan Prapan A 2022 Optimization of Image Quality and Organ Absorbed Dose for Pediatric Chest X-Ray Examination: In-House Developed Chest Phantom Study. *Radiology Research and Practice*, *2022*, 1–10. https://doi.org/10.1155/2022/3482458

[14] Yosua I N, Sutapa G N, Putra I K, Suryatika I B, Suyanto H, dan Paramarta I B A 2024 The Effect of Focus Film Distance Variation on Patient Absorbed Dose in Thorax Examination with Roentgen Machine in Radiology Installation of Sanjiwani Hospital Gianyar. *Kappa Journal*, *8*(3), 446–450. https://doi.org/10.29408/kpj.v8i3.28113

[15] Perry Sprawls. (1995) Physical Principles of Medical Imaging, Second Edition, Medical Physics Publishing, Madison, Wisconsin.

[16] Mayasari R, Nurhasanah, dan Hasanuddin 2025 Dosis Paparan Radiasi Foto Thorax Pada Pasien Dewasa Laki-Laki dan Perempuan. *PRISMA FISIKA*, *13*(1), 22–27.

[17] Haider U H, Hussain B, Shaheen W, dan Rehman S U 2024 Comparison of directly and indirectly estimated entrance skin dose (ESD) for diagnostic radiation qualities (RQR, RQA and RQT) using water phantom and shadowfree diagnostic chamber (SFD) *Egyptian Journal of Radiology and Nuclear Medicine*, *55*(1), 164. https://doi.org/10.1186/s43055-024-01337-5

[18] Alfionita V, Utami A P, dan Nugroho A 2021 Studi Literatur Analisis Pengukuran Entrance Surface Dose (ESD) Pada Pemeriksaan Radiografi Thorax, *Skripsi pada Program Studi Jenjang Diploma 3 Radiologi Fakultas Ilmu Kesehatan Universitas'aisyiyah Yogyakarta*.

[19] Asmayati, Astuty S D, Prastowo, A T A, Dewang S, Ibrahim A A, dan Pratiwi A H 2025 Analisis Nilai Entrance Skin Dose (ESD) dan Dosis Hamburan pada Area Tiroid dan Area Gonad pada Phantom PMMA Planar Menggunakan Pesawat Fluoroskopi C-Arm. *JFT: Jurnal Fisika Dan Terapannya*, *12*(1), p. 75–86. https://doi.org/10.24252/jft.v12i1.55995.

[20] Dance D R, Christofides S, Maidment A D A, McLean I D, dan Ng K H 2014 Diagnostic Radiology Physics *International Atomic Energy Agency (IAEA)*.