

Research article

Analisis Pengaruh Heel Effect Terhadap Distribusi Dosis Radiasi Pada Organ Payudara Dan Tiroid Dalam Pemeriksaan Radiografi Lumbal

Analysis of the effect of heel effect on radiation dose distribution in breast and thyroid organs in lumbar radiographic examination

Suherman Hadi Saputro^{1*}, Olivia Ganna¹

¹Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Radiologi Pencitraan, Politeknik Sandi Karsa, Sulawesi Selatan, Indonesia



Article Info	Abstract
Article History: Received 2022-07-02 Accepted 2022-10-10 Published 2022-12-01 Keywords: heel effect; distribusi dosis; proteksi radiasi; radiografi lumbal. <i>quite effect; dose distribution; radiation protection; lumbar radiography.</i>	Pemeriksaan radiografi lumbal merupakan prosedur yang umum dilakukan namun menimbulkan risiko paparan radiasi pada organ sensitif seperti payudara dan tiroid. Penelitian ini menganalisis pengaruh Heel Effect terhadap distribusi dosis radiasi pada organ tersebut menggunakan metode eksperimental dengan phantom akrilik dan pen-dosimeter ALOKA. Pengukuran dilakukan pada proyeksi anteroposterior (AP) dan lateral (LAT) dengan variasi orientasi anoda-katoda. Hasil menunjukkan bahwa orientasi katoda menghasilkan dosis radiasi lebih tinggi dibandingkan anoda, dengan dosis tertinggi pada tiroid saat proyeksi lateral orientasi katoda ($18,8 \pm 1,30 \mu\text{Sv}$) dan terendah pada proyeksi AP orientasi anoda ($5,2 \pm 0,83 \mu\text{Sv}$). Penelitian menyimpulkan bahwa pemahaman tentang Heel Effect dapat dimanfaatkan untuk mengoptimalkan distribusi dosis sesuai prinsip ALARA dalam praktik radiologi diagnostik. <i>Lumbar radiography is a common procedure but poses a risk of radiation exposure to sensitive organs such as the breast and thyroid. This study analyzed the effect of the Heel Effect on the distribution of radiation doses in these organs using an experimental method with an acrylic phantom and an ALOKA pen-dosimeter. Measurements were made on anteroposterior (AP) and lateral (LAT) projections with variations in the orientation of the anode-cathode. The results showed that the cathode orientation produced a higher radiation dose than the anode, with the highest dose in the thyroid at the lateral projection of the cathode orientation ($18.8 \pm 1.30 \mu\text{Sv}$) and the lowest at the anode orientation AP projection ($5.2 \pm 0.83 \mu\text{Sv}$). The study concluded that the understanding of the Heel Effect can be used to optimize dose distribution according to ALARA principles in diagnostic radiology practice.</i>
Corresponding author Email	: Suherman Hadi Saputro : suhermanhadi58@gmail.com

Pendahuluan

Pemeriksaan radiografi lumbal merupakan salah satu prosedur diagnostik yang sering dilakukan untuk mengevaluasi kelainan tulang belakang, khususnya pada daerah lumbal. Prosedur ini melibatkan penggunaan sinar-X yang memiliki energi tinggi untuk menghasilkan gambaran anatomi tulang belakang secara detail (Fung & Gilboy, 2000). Namun, pemeriksaan ini juga memiliki risiko terkait paparan dosis radiasi yang cukup signifikan, terutama pada organ-organ yang berdekatan dengan area pemeriksaan. Payudara dan tiroid menjadi dua organ yang rentan terpapar radiasi karena lokasinya yang relatif dekat dengan medan radiasi sekunder selama pemeriksaan lumbal (Claridge Mackonis et al., 2018). Risiko ini semakin menekankan pentingnya optimisasi teknik pencitraan guna meminimalkan paparan radiasi pada organ sensitif tersebut. Salah satu aspek teknis dalam radiografi yang memengaruhi distribusi dosis radiasi adalah efek Heel (*Heel Effect*) (Mankinen et al., 2022). Heel Effect terjadi karena sifat penyebaran radiasi yang tidak merata akibat perbedaan intensitas sinar-X pada sisi anoda dan katoda dalam tabung sinar-X. Intensitas sinar-X cenderung lebih tinggi di sisi katoda dibandingkan dengan sisi anoda (Zulkiflee & Abdullah, 2021). Fenomena ini memiliki implikasi signifikan terhadap dosis radiasi yang diterima oleh jaringan atau organ yang berada dalam jalur sinar. Dalam konteks pemeriksaan radiografi lumbal, pengaturan posisi organ sensitif seperti payudara dan tiroid terhadap sisi anoda atau katoda dapat mempengaruhi dosis radiasi yang diterima secara langsung maupun tidak langsung (Chen et al., 2024).

Paparan radiasi yang tinggi pada organ payudara dan tiroid menjadi perhatian utama, mengingat sensitivitas kedua organ tersebut terhadap efek biologis radiasi (Kusk et al., 2021). Tiroid, misalnya, memiliki risiko tinggi terkena kerusakan DNA dan mutasi genetik yang dapat meningkatkan kemungkinan terjadinya kanker tiroid pada individu yang terpapar dosis radiasi berlebih. Sementara itu, payudara, sebagai organ yang juga terdiri dari jaringan radiosensitif, berpotensi mengalami peningkatan risiko kanker payudara akibat paparan radiasi kumulatif (Moonkum et al., 2023). Oleh karena itu, penting untuk memahami faktor-faktor yang mempengaruhi distribusi dosis radiasi selama pemeriksaan radiografi lumbal, termasuk pengaruh Heel Effect. Optimisasi teknik radiografi merupakan langkah kritis dalam mengurangi risiko paparan radiasi pada organ sensitif. Salah satu strategi yang dapat diterapkan adalah dengan memperhatikan arah orientasi anoda dan katoda dalam tabung sinar-X selama pemeriksaan (De Roo et al., 2022). Pengaturan posisi pasien yang tepat dengan memanfaatkan Heel Effect dapat membantu meminimalkan dosis radiasi yang diterima oleh organ payudara dan tiroid tanpa mengurangi kualitas diagnostik dari gambar radiografi (Kato, 2020). Upaya ini sejalan dengan prinsip ALARA (*As Low as Reasonably Achievable*), yang menjadi pedoman utama dalam proteksi radiasi medis. Selain faktor teknis, faktor fisiologis pasien seperti usia, jenis kelamin, dan indeks massa tubuh juga dapat memengaruhi distribusi dosis radiasi. Anak-anak dan wanita dewasa, misalnya, cenderung memiliki sensitivitas yang lebih tinggi terhadap radiasi dibandingkan kelompok populasi lainnya. Hal ini menjadikan optimisasi teknik pencitraan dan perlindungan radiasi sebagai aspek yang sangat penting untuk diperhatikan oleh radiografer dalam praktik klinis sehari-hari (Chang & Chou, 2022).

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh Heel Effect terhadap distribusi dosis radiasi pada organ payudara dan tiroid selama pemeriksaan radiografi lumbal. Fokus utama penelitian ini adalah mengevaluasi bagaimana pengaturan posisi anoda dan katoda dapat mempengaruhi paparan radiasi pada organ-organ tersebut. Dengan demikian, hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi yang signifikan dalam upaya peningkatan keselamatan pasien, khususnya dalam konteks radiologi diagnostik. Melalui pemahaman yang lebih mendalam tentang pengaruh Heel Effect, diharapkan dapat dikembangkan panduan teknis yang lebih efektif untuk mengurangi paparan radiasi pada organ sensitif. Langkah ini tidak hanya mendukung keselamatan pasien, tetapi juga memperkuat penerapan standar profesional dalam praktik radiologi, sehingga mampu memberikan hasil diagnostik yang optimal dengan risiko minimal.

Metode

Penelitian ini dilakukan menggunakan metode eksperimen untuk mengukur dosis radiasi yang diterima oleh organ payudara dan tiroid. Eksperimen dilakukan dengan menggunakan phantom akrilik berukuran 35 x 43 cm dan ketebalan 7 cm, yang ditempatkan di atas meja pemeriksaan radiologi. Area kolimasi diatur sebesar 24 x 30 cm dari batas bawah phantom. Dua pen-dosimeter merk ALOKA diletakkan pada posisi yang merepresentasikan organ payudara dan tiroid. Pengaturan posisi dilakukan dengan menentukan arah katoda ke payudara dan anoda ke tiroid, kemudian posisi ini dibalik sehingga katoda diarahkan ke tiroid dan anoda ke payudara. Masing-masing konfigurasi ini diulang sebanyak lima kali pada proyeksi anteroposterior (AP) dan lateral (LAT). Pengaturan parameter eksposi sinar-X pada proyeksi AP adalah tegangan tabung sebesar 70 kV, 16 mAs, dan jarak fokus ke detektor (FFD) sebesar 100 cm. Untuk proyeksi lateral, parameter eksposi diatur pada tegangan tabung 80 kV, 20 mAs, dan FFD yang sama sebesar 100 cm. Pengukuran dilakukan dengan hati-hati untuk memastikan konsistensi parameter eksposi, posisi phantom, dan alat ukur. Setelah setiap eksposi, nilai dosis yang terukur oleh pen-dosimeter dicatat secara sistematis untuk setiap posisi dan konfigurasi.

Tahapan analisis data dimulai dengan pengumpulan nilai dosis radiasi dari hasil pengukuran. Data yang diperoleh diolah menggunakan metode statistik sederhana untuk menentukan rata-rata dan variasi dosis radiasi pada setiap posisi dan proyeksi. Selanjutnya, hasil pengolahan data disajikan dalam bentuk tabel dan grafik. Penyajian ini bertujuan untuk memberikan gambaran distribusi dosis radiasi pada organ payudara dan tiroid berdasarkan perbedaan arah anoda-katoda dan jenis proyeksi. Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi dua pen-dosimeter merk ALOKA sebagai alat utama untuk mengukur dosis radiasi. Pesawat sinar-X merk SIEMENS yang tersedia di rumah sakit daerah Maros digunakan sebagai sumber radiasi. Phantom akrilik berfungsi sebagai objek simulasi tubuh manusia. Selain itu, meteran digunakan untuk mengukur area kolimasi, dan alat tulis digunakan untuk mencatat hasil pengukuran. Prosedur yang sistematis ini dirancang untuk memastikan keakuratan data yang diperoleh selama pengukuran. Dengan mengikuti metode ini, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi yang signifikan terhadap pengelolaan dosis radiasi pada prosedur radiologi, terutama dalam pengurangan paparan pada organ sensitif seperti payudara dan tiroid.

Hasil

Hasil penelitian ini menyajikan nilai dosis radiasi yang diterima oleh organ payudara dan tiroid berdasarkan konfigurasi posisi anoda-katoda serta jenis proyeksi (anteroposterior/AP dan lateral/LAT). Pengukuran dilakukan sebanyak lima kali pada setiap konfigurasi, dan nilai rata-rata dosis dari masing-masing pengukuran disajikan dalam bentuk tabel untuk mempermudah interpretasi.

Tabel. 1 Hasil pengukuran Payudara pada *heel effect* pada pemeriksaan *lumbosacral* AP dan Lateral.

Proyeksi		AP					Lat					Rata-Rata + SD	
		I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	AP	Lat
		μSv	μSv	μSv	μSv	μSv	μSv	μSv	μSv	μSv	μSv		
Anoda	Payudara	10	8	11	7	8	34	36	33	35	37	8.8	35.0
												+	+
												1.64	1.58
Katoda	Payudara	18	10	11	9	12	39	41	38	40	42	12.0	40.0
												+	+
												3.53	1.58

Tabel. 2 Hasil pengukuran *Thiroid* pada *heel effect* pada pemeriksaan *lumbosacral* AP dan Lateral.

Proyeksi		AP					Lat					Rata-Rata + SD	
		I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	AP	Lat
		μSv	μSv	μSv	μSv	μSv	μSv	μSv	μSv	μSv	μSv		
Anoda	<i>Thiroid</i>	4	6	6	5	5	17	15	18	16	17	5.2 + 0.83	16.6 + 1.14
Katoda	<i>Thiroid</i>	7	8	8	9	10	19	20	17	18	20	8.4 + 1.14	18.8 + 1.30

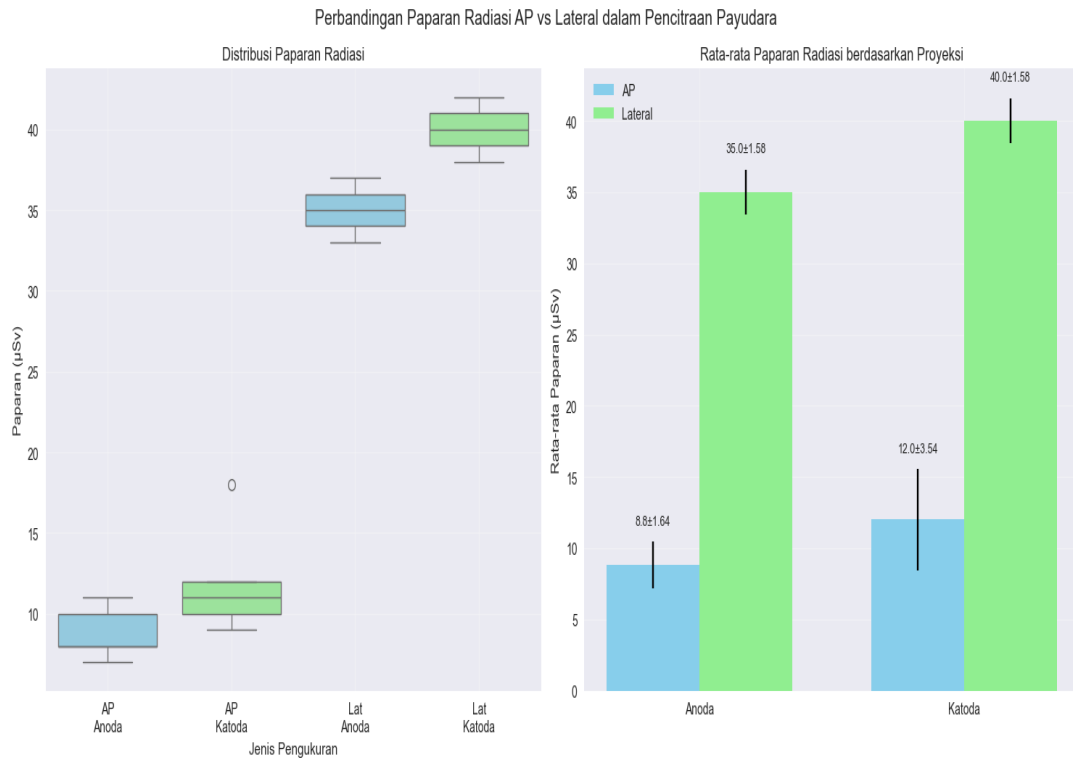
Tabel. 1 menyajikan hasil pengukuran dosis radiasi yang diterima oleh organ payudara pada efek tumit sinar-X (*heel effect*) selama pemeriksaan *lumbosacral* dengan proyeksi AP dan LAT. Pengukuran ini menunjukkan bahwa konfigurasi posisi katoda ke payudara menghasilkan dosis radiasi yang lebih tinggi pada organ tersebut dibandingkan konfigurasi sebaliknya, baik pada proyeksi AP maupun LAT. Hal ini disebabkan oleh intensitas radiasi yang lebih tinggi pada sisi katoda.

Tabel. 2 menyajikan hasil pengukuran dosis radiasi yang diterima oleh organ tiroid pada efek tumit sinar-X selama pemeriksaan *lumbosacral* dengan proyeksi AP dan LAT. Data menunjukkan bahwa konfigurasi posisi katoda ke tiroid menghasilkan dosis yang lebih tinggi pada organ tersebut dibandingkan konfigurasi anoda ke tiroid. Selain itu, proyeksi LAT cenderung menghasilkan dosis radiasi yang lebih tinggi dibandingkan proyeksi AP untuk kedua organ, yang disebabkan oleh perbedaan sudut proyeksi dan ketebalan lintasan radiasi melalui *phantom*.

Penyajian data dalam bentuk tabel juga mencakup parameter eksposi seperti tegangan tabung (kV), arus-mAs, dan jarak fokus ke detektor (FFD), untuk memberikan konteks terhadap hasil pengukuran dosis. Data ini memberikan informasi deskriptif mengenai distribusi dosis radiasi pada organ payudara dan tiroid dalam berbagai kondisi eksposi yang memanfaatkan *heel effect*. Melalui hasil ini, penelitian mampu menunjukkan variasi penerimaan dosis radiasi pada kedua organ sensitif tersebut, yang dipengaruhi oleh posisi anoda-katoda dan jenis proyeksi yang digunakan. Data ini menjadi dasar untuk evaluasi lebih lanjut dalam menentukan strategi pengurangan dosis pada prosedur radiologi yang melibatkan organ payudara dan tiroid.

Pembahasan

Pada bab ini, hasil penelitian yang telah disajikan pada bab sebelumnya akan dianalisis dan diinterpretasikan lebih mendalam. Pembahasan difokuskan pada evaluasi efek tumit sinar-X (*heel effect*) terhadap distribusi dosis radiasi pada organ payudara dan tiroid selama pemeriksaan *lumbosacral* dengan proyeksi *anteroposterior* (AP) dan lateral (LAT). Analisis melibatkan pengaruh posisi anoda dan katoda, parameter eksposi, serta perbedaan sudut proyeksi terhadap variasi dosis radiasi.



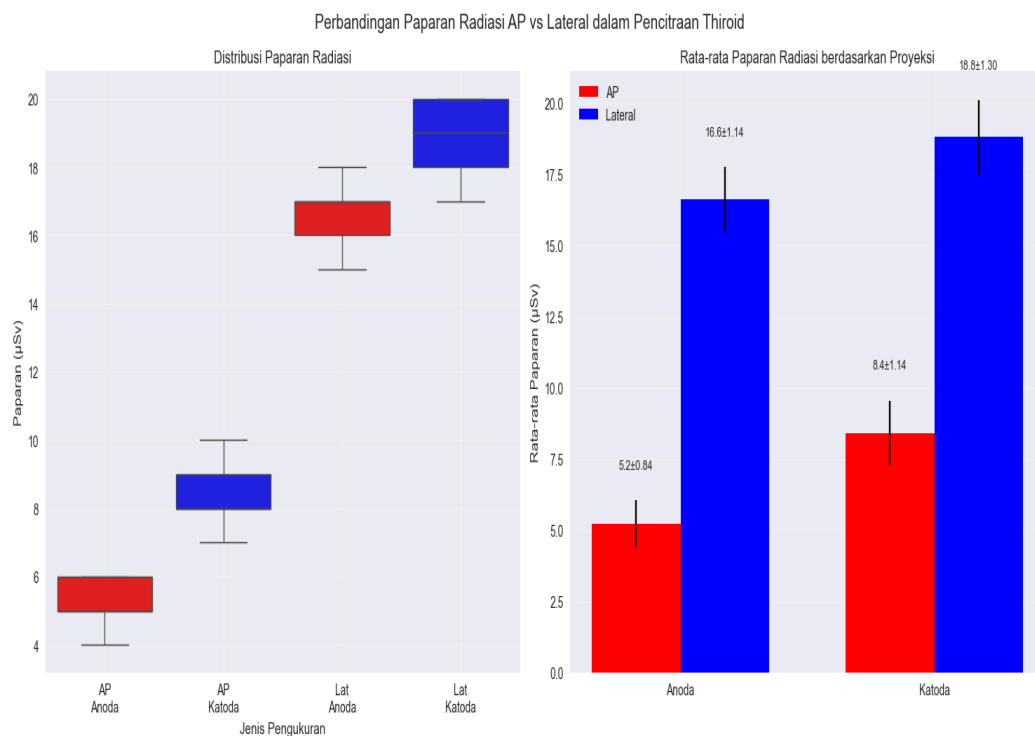
Gambar 1. Pengukuran Payudara Pada Heel Effect Pada Pemeriksaan Lumbosacral AP Dan Lateral.

Pada Gambar.1 terdapat dua visualisasi yang menunjukkan distribusi dan rata-rata paparan radiasi pada proyeksi AP (antero-posterior) dan Lateral dalam pencitraan payudara. Grafik sebelah kiri memperlihatkan distribusi data paparan radiasi dalam bentuk *boxplot* yang mengelompokkan pengukuran berdasarkan jenis proyeksi dan lokasi (Anoda atau Katoda). Hasilnya menunjukkan bahwa paparan radiasi untuk proyeksi Lateral lebih tinggi dibandingkan proyeksi AP pada kedua lokasi pengukuran. Selain itu, nilai paparan pada proyeksi AP di anoda cenderung lebih rendah dibandingkan dengan katoda, ditandai dengan rentang interkuartil yang lebih kecil. Grafik sebelah kanan menggambarkan rata-rata dan simpangan baku (*standard deviation*, SD) paparan radiasi untuk masing-masing proyeksi. Nilai rata-rata paparan radiasi tertinggi tercatat pada proyeksi Lateral di katoda dengan rata-rata $40,0 \pm 1,58 \mu\text{Sv}$, diikuti oleh proyeksi Lateral di anoda sebesar $35,0 \pm 1,58 \mu\text{Sv}$. Sebaliknya, rata-rata paparan terendah terjadi pada proyeksi AP di anoda, yakni sebesar $8,8 \pm 1,64 \mu\text{Sv}$. Proyeksi AP di katoda memiliki rata-rata lebih tinggi dibandingkan anoda, dengan nilai $12,0 \pm 3,53 \mu\text{Sv}$, menunjukkan bahwa lokasi katoda cenderung menerima paparan lebih tinggi dibandingkan anoda.

Analisis data ini menunjukkan adanya perbedaan signifikan antara proyeksi AP dan Lateral dalam pencitraan payudara, di mana proyeksi Lateral memberikan paparan radiasi yang lebih besar. Faktor lokasi pengukuran juga memengaruhi hasil, dengan katoda cenderung menunjukkan paparan radiasi lebih tinggi dibandingkan anoda pada kedua jenis proyeksi. Distribusi data yang lebih seragam pada proyeksi Lateral menunjukkan tingkat konsistensi paparan yang lebih tinggi dibandingkan dengan proyeksi AP, terutama pada lokasi katoda. Sinar-X melewati jaringan payudara dari arah depan ke belakang (antero-posterior) (Tonetti et al., 2020). Jalur radiasi ini cenderung lebih pendek dan melalui jaringan yang lebih tipis dibandingkan dengan proyeksi lateral, sehingga membutuhkan dosis radiasi yang lebih rendah. Sinar-X melintasi jaringan payudara dari samping. Jalur radiasi yang lebih panjang menyebabkan

peningkatan hambatan dan penyerapan radiasi oleh jaringan, sehingga memerlukan dosis yang lebih tinggi untuk menghasilkan citra berkualitas baik (Hsieh et al., 2022).

Proyeksi lateral memberikan paparan radiasi yang lebih besar dibandingkan proyeksi AP dalam pencitraan payudara, terutama karena jalur radiasi yang lebih panjang, peningkatan parameter teknik, dan distribusi radiasi yang lebih luas (Zangeneh et al., 2020). Meskipun demikian, proyeksi lateral tetap diperlukan untuk mendapatkan visualisasi yang lengkap dan akurat, khususnya dalam mendeteksi patologi yang mungkin tidak terlihat pada proyeksi AP saja. Oleh karena itu, penting untuk menyeimbangkan kebutuhan diagnostik dengan upaya meminimalkan paparan radiasi pada pasien. Perbedaan signifikan dalam paparan radiasi antara proyeksi AP dan lateral disebabkan oleh perbedaan ketebalan jaringan yang dilalui, pengaturan teknik radiografi, dan distribusi intensitas radiasi akibat fenomena heel effect (Merter et al., 2020). Proyeksi lateral memberikan paparan radiasi yang lebih besar, namun tetap diperlukan untuk kebutuhan diagnostik tertentu. Optimalisasi teknik radiografi dan penerapan prinsip ALARA menjadi sangat penting untuk melindungi pasien dari paparan radiasi yang tidak perlu (Gatt et al., 2022).



Gambar 2. Pengukuran Thiroid Pada Heel Effect Pada Pemeriksaan Lumbosacral AP Dan Lateral.

Gambar 2. menunjukkan perbandingan paparan radiasi pada proyeksi AP (antero-posterior) dan Lateral dalam pencitraan tiroid, dengan dua visualisasi: *boxplot* di sisi kiri dan diagram batang di sisi kanan. *Boxplot* mengilustrasikan distribusi data berdasarkan lokasi pengukuran (Anoda dan Katoda). Hasil pengukuran menunjukkan bahwa paparan radiasi pada proyeksi Lateral lebih tinggi dibandingkan dengan proyeksi AP, baik pada anoda maupun katoda. Distribusi nilai pada proyeksi Lateral juga menunjukkan konsistensi lebih tinggi, terlihat dari rentang interkuartil yang lebih kecil dibandingkan dengan proyeksi AP. Diagram batang di sisi kanan memperlihatkan rata-rata paparan radiasi bersama simpangan bakunya (SD). Nilai rata-rata tertinggi tercatat pada proyeksi Lateral di katoda sebesar $18,8 \pm 1,30 \mu\text{Sv}$, diikuti oleh proyeksi Lateral di anoda dengan rata-rata $16,6 \pm 1,14 \mu\text{Sv}$. Sebaliknya, paparan radiasi pada proyeksi AP

di anoda memiliki rata-rata terendah, yaitu $5,2 \pm 0,83 \mu\text{Sv}$, sementara proyeksi AP di katoda memiliki rata-rata yang lebih tinggi sebesar $8,4 \pm 1,14 \mu\text{Sv}$. Perbedaan ini menunjukkan bahwa paparan radiasi pada katoda lebih tinggi dibandingkan anoda untuk kedua jenis proyeksi.

Data ini memberikan gambaran bahwa proyeksi Lateral memberikan paparan radiasi yang lebih besar dibandingkan proyeksi AP dalam pencitraan tiroid. Selain itu, perbedaan signifikan antara lokasi anoda dan katoda menunjukkan pengaruh posisi pengukuran terhadap nilai paparan radiasi. Analisis ini penting untuk optimasi teknik pencitraan, dengan mempertimbangkan paparan radiasi yang lebih rendah pada proyeksi AP untuk mengurangi risiko radiasi tanpa mengorbankan kualitas diagnostik (Hadid-Beurrier et al., 2021). Proyeksi lateral memberikan paparan radiasi yang lebih besar dibandingkan dengan proyeksi anteroposterior (AP) dalam pencitraan tiroid. Hal ini disebabkan oleh beberapa faktor utama, termasuk perbedaan ketebalan jaringan yang dilalui oleh berkas sinar-X dan kebutuhan pengaturan teknis yang lebih tinggi, seperti peningkatan kVp dan mAs, pada proyeksi lateral (Foster et al., 2022). Selain itu, fenomena heel effect berkontribusi pada distribusi dosis yang tidak merata, di mana sisi katoda menerima intensitas radiasi lebih besar dibandingkan anoda. Pada proyeksi AP, berkas sinar melewati struktur yang relatif lebih tipis, sehingga membutuhkan parameter eksposur yang lebih rendah (Osman Hamid, 2020). Sebaliknya, proyeksi lateral memerlukan energi lebih besar untuk menembus ketebalan jaringan tiroid dan sekitarnya, yang mengakibatkan peningkatan dosis radiasi. Meskipun paparan radiasi lebih tinggi pada proyeksi lateral, proyeksi ini tetap penting untuk memperoleh gambaran yang lebih detail dan diagnostik dari struktur tiroid (Alukic & Mekis, 2021). Oleh karena itu, penerapan prinsip ALARA (As Low as Reasonably Achievable) menjadi esensial untuk meminimalkan paparan radiasi, seperti dengan optimalisasi teknik radiografi dan penggunaan pelindung radiasi pada organ di sekitar tiroid (Haro et al., 2022).

Penelitian ini menunjukkan bahwa efek Heel Effect memiliki pengaruh signifikan terhadap distribusi dosis radiasi pada organ sensitif seperti payudara dan tiroid selama pemeriksaan radiografi lumbal. Berdasarkan fenomena ini, intensitas radiasi di sisi katoda lebih tinggi dibandingkan sisi anoda, yang berdampak pada peningkatan paparan radiasi pada organ yang berada di jalur sisi katoda. Data pada Gambar 1 dan 2 menunjukkan bahwa proyeksi Lateral memberikan dosis radiasi yang lebih tinggi dibandingkan proyeksi AP, terutama pada katoda. Hal ini menekankan pentingnya pengaturan posisi pasien dan orientasi anoda-katoda dalam meminimalkan risiko radiasi. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa organ tiroid menerima paparan radiasi tertinggi pada proyeksi Lateral dengan katoda, yaitu rata-rata $18,8 \pm 1,30 \mu\text{Sv}$. Sebaliknya, paparan terendah tercatat pada proyeksi AP dengan anoda, yaitu rata-rata $5,2 \pm 0,83 \mu\text{Sv}$. Temuan ini mengindikasikan bahwa optimisasi teknik pencitraan, seperti memposisikan organ sensitif pada sisi anoda, dapat secara signifikan mengurangi dosis radiasi yang diterima. Selain itu, hasil ini memperkuat pentingnya perlindungan organ sensitif selama prosedur radiografi, terutama pada individu dengan sensitivitas tinggi terhadap radiasi.

Kesimpulan dan Saran

Di simpulkan bahwa pemanfaatan efek *Heel Effect* dapat menjadi salah satu strategi dalam optimisasi teknik radiografi untuk mengurangi paparan radiasi pada organ sensitif. Prinsip ALARA dapat diterapkan dengan mengatur orientasi anoda dan katoda serta posisi pasien untuk mencapai distribusi dosis yang lebih aman tanpa mengorbankan kualitas diagnostik. Dengan demikian, hasil penelitian ini tidak hanya mendukung keselamatan pasien dalam radiologi diagnostik, tetapi juga memberikan panduan teknis yang bermanfaat bagi radiografer dalam praktik klinis. Upaya ini diharapkan mampu meningkatkan standar keselamatan dan efektivitas dalam prosedur pencitraan medis.

Daftar Rujukan

- Alukic, E., & Mekis, N. (2021). How does a non-optimal tube potential influence radiation dose to the patient in lumbar spine radiography? *Radiography*, 27(4), 1105–1109. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.radi.2021.04.014>
- Chang, C.-T., & Chou, M.-C. (2022). Comparison of Non-Uniform Image Quality Caused by Anode Heel Effect between Two Digital Radiographic Systems Using a Circular Step-Wedge Phantom and Mutual Information. *Entropy*, 24(12), 1781. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.3390/e24121781>
- Chen, G., Yin, Y., Sun, L., Tang, Z., & Chen, J. (2024). Monte Carlo simulation study of the effect of thyroid shielding on radiation dose in dental cone beam CT in an adult male phantom. *Radiation Protection Dosimetry*, 200(20), 1971–1980. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.1093/rpd/nae206>
- Claridge Mackonis, E., Hammond, L., Esteves, A. I. S., & Suchowerska, N. (2018). Radiation dosimetry in cell biology: comparison of calculated and measured absorbed dose for a range of culture vessels and clinical beam qualities. *International Journal of Radiation Biology*, 94(2), 150–156. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.1080/09553002.2018.1419304>
- De Roo, B., Bacher, K., & Verstraete, K. (2022). Cervical and lumbar spine imaging after traffic and occupational accidents: Evaluation of the use of imaging techniques, cumulative radiation dose and associated lifetime cancer risk. *European Journal of Radiology*, 151, 110293. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2022.110293>
- Foster, N., Shaffrey, C., Buchholz, A., Turner, R., Yang, L. Z., Niedzwiecki, D., & Goode, A. (2022). Image Quality and Dose Comparison of 3 Mobile Intraoperative Three-Dimensional Imaging Systems in Spine Surgery. *World Neurosurgery*, 160, e142–e151. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wneu.2021.12.103>
- Fung, K. K., & Gilboy, W. B. (2000). “Anode heel effect” on patient dose in lumbar spine radiography. *The British Journal of Radiology*, 73(869), 531–536. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.1259/bjr.73.869.10884750>
- Gatt, S., Portelli, J. L., & Zarb, F. (2022). Optimisation of the AP abdomen projection for larger patient body thicknesses. *Radiography*, 28(1), 107–114. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.radi.2021.08.009>
- Hadid-Beurrier, L., Dabli, D., Royer, B., Demonchy, M., & Le Roy, J. (2021). Diagnostic reference levels during fluoroscopically guided interventions using mobile C-arms in operating rooms: A national multicentric survey. *Physica Medica*, 86, 91–97. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2021.05.013>
- Haro, H., Ebata, S., Inoue, G., Kaito, T., Komori, H., Ohba, T., Sakai, D., Sakai, T., Seki, S., Shiga, Y., Suzuki, H., Toyota, H., Watanabe, K., & Yamato, Y. (2022). Japanese Orthopaedic Association (JOA) clinical practice guidelines on the management of lumbar disc herniation, third edition - secondary publication. *Journal of Orthopaedic Science*, 27(1), 31–78. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jos.2021.07.028>
- Hsieh, T.-Y., Chen, S.-L., Chang, Y.-R., Tyan, Y.-S., & Chen, T.-R. (2022). Effective dose for kidney-ureter-bladder plain radiography, intravenous urography, and abdominal computed tomography scan: A phantom study. *Applied Radiation and Isotopes*, 187, 110339. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2022.110339>
- Kato, S. (2020). Complications of thoracic spine surgery – Their avoidance and management. *Journal of Clinical Neuroscience*, 81, 12–17. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jocn.2020.09.012>
- Kusk, M. W., Jensen, J. M., Gram, E. H., Nielsen, J., & Precht, H. (2021). Anode heel effect: Does it impact image quality in digital radiography? A systematic literature review. *Radiography*, 27(3), 976–981.

- <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.1016/j.radi.2021.02.014>
- Mankinen, M., Virén, T., Seppälä, J., Hakkarainen, H., & Koivumäki, T. (2022). Dosimetric effect of respiratory motion on planned dose in whole-breast volumetric modulated arc therapy using moderate and ultra-hypofractionation. *Radiation Oncology*, 17(1), 46. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.1186/s13014-022-02014-5>
- Merter, A., Karaeminogullari, O., & Shibayama, M. (2020). Comparison of Radiation Exposure Among 3 Different Endoscopic Discectomy Techniques for Lumbar Disk Herniation. *World Neurosurgery*, 139, e572–e579. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wneu.2020.04.079>
- Moonkum, N., Jitchom, S., Sukaram, S., Nimtrakool, N., Boonrat, P., & Tochaikul, G. (2023). Determination of scattered radiation dose for radiological staff during portable chest examinations of COVID-19 patients. *Radiological Physics and Technology*, 16(1), 85–93. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.1007/s12194-023-00698-2>
- Osman Hamid, H. (2020). Evaluation of patient radiation dose in routine radiographic examinations in Saudi Arabia. *Radiation Physics and Chemistry*, 173, 108883. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.108883>
- Tonetti, J., Boudissa, M., Kerschbaumer, G., & Seurat, O. (2020). Role of 3D intraoperative imaging in orthopedic and trauma surgery. *Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research*, 106(1, Supplement), S19–S25. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.otsr.2019.05.021>
- Zangeneh, M., Deevband, M. R., & Mohsenzadeh, B. (2020). Lifetime attributable risk of cancer incidence and mortality in routine digital radiology procedures. *Clinical Imaging*, 67, 226–236. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clinimag.2020.08.006>
- Zulkiflee, N. D. I., & Abdullah, K. A. (2021). An Investigation of Exposure to the Eyes and Thyroid of Personnel Near to Patient in Abdominal Radiography: A Phantom Study. *Asian Journal of Medicine and Biomedicine*, 5(S1), 29–33. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.37231/ajmb.2021.5.s1.447>