

## Studi Kelayakan Apron Timbal sebagai Alat Proteksi Radiasi Menggunakan Metode Radiografi Digital

Intan Mulia Sari<sup>(1,a)\*</sup>, Rahmatun Ridhani<sup>(1,b)</sup>, Evi Yufita<sup>(1,c)</sup> dan Elin Yusibani<sup>(1,d)</sup>

<sup>(1)</sup>Departemen Fisika, FMIPA Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh, Indonesia 23111  
Email : <sup>(a\*)</sup>ms.intan@usk.ac.id, <sup>(b)</sup>rahmatunridhani68@gmail.com, <sup>(c)</sup>evi.yufita@usk.ac.id,  
<sup>(d)</sup>e\_yusibani@usk.ac.id

Disubmisi: 23 November 2025, Direvisi: 12 Mei 2026, Diterima: 11 Juli 2026

### **Abstract.**

**Background:** Lead aprons are essential personal protective equipment for reducing radiation exposure among healthcare workers in radiology facilities.

**Aims:** This study aimed to evaluate the suitability of lead aprons using a non-destructive digital radiography method.

**Methods:** Three lead aprons were examined, consisting of two aprons used in a hospital and one new apron used as a control. Radiographic images were analyzed using Radiant DICOM Viewer, and the measured defect areas were compared with the acceptance limits established by BAPETEN.

**Results:** The results showed that apron A had a crack in the sensitive area measuring 47.3 mm<sup>2</sup> and was classified as unsuitable for use. Apron B showed microcracks that remained below the acceptance limits, whereas apron C showed no internal cracks.

**Conclusion:** These findings indicate that digital radiography is effective for detecting internal defects in lead aprons and can be applied as a routine inspection method to support radiation protection in radiology facilities.

**Keywords:** lead apron, radiation protection, digital radiography, BAPETEN, X-rays.

### **Abstrak.**

**Latar Belakang:** Apron timbal merupakan alat pelindung diri yang penting untuk mengurangi paparan radiasi pada tenaga medis di instalasi radiologi.

**Tujuan:** Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kelayakan apron timbal menggunakan metode radiografi digital non-destruktif.

**Metode:** Tiga apron diuji, terdiri atas dua apron yang digunakan di rumah sakit dan satu apron baru sebagai kontrol. Citra radiografi dianalisis menggunakan Radiant DICOM Viewer, kemudian luas cacat yang terukur dibandingkan dengan ambang batas kelayakan BAPETEN.

**Hasil:** Hasil menunjukkan bahwa apron A memiliki retakan pada area sensitif seluas 47,3 mm<sup>2</sup> sehingga dinyatakan tidak layak pakai. Apron B menunjukkan retakan mikro yang masih berada di bawah ambang batas, sedangkan Apron C tidak menunjukkan retakan internal.

**Kesimpulan:** Dengan demikian, radiografi digital dinilai efektif untuk mendeteksi kerusakan internal apron timbal dan dapat diterapkan sebagai metode inspeksi rutin untuk mendukung proteksi radiasi di fasilitas radiologi.

**Kata kunci:** apron timbal, proteksi radiasi, radiografi digital, BAPETEN, sinar-X.

---

## PENDAHULUAN

Pemanfaatan sinar-X dalam radiologi diagnostik berperan penting dalam menunjang diagnosis dan tata laksana berbagai penyakit [1]. Namun, penggunaan radiasi pengion juga berpotensi menimbulkan risiko paparan bagi pasien dan tenaga medis, khususnya pekerja yang terlibat secara rutin dalam prosedur radiologi [2]. Oleh karena itu, penerapan proteksi radiasi menjadi aspek penting dalam keselamatan kerja. Salah satu prinsip utama yang digunakan adalah *As Low As Reasonably Achievable* (ALARA), yaitu upaya menjaga dosis radiasi serendah mungkin tanpa mengurangi kualitas diagnostik [3], [4].

Di Indonesia, pemanfaatan fasilitas radiologi terus meningkat seiring bertambahnya kebutuhan layanan kesehatan [5]. Kondisi ini menuntut pengawasan keselamatan radiasi yang lebih ketat, termasuk evaluasi kelayakan apron timbal sebagai salah satu alat pelindung diri utama bagi tenaga medis [6], [7]. Apron timbal berfungsi mengatenuasi radiasi hambur sebelum mencapai organ sensitif. Efektivitas proteksinya dipengaruhi oleh ketebalan setara timbal (*lead equivalence*), homogenitas material pelindung, usia pemakaian, serta kondisi penyimpanan dan penggunaan [8], [9], [10].

Meskipun apron timbal dirancang untuk memberikan perlindungan terhadap radiasi, kerusakan internal seperti retakan halus, lipatan, penipisan lokal, dan deformasi lapisan pelindung dapat terjadi akibat pemakaian berulang atau penyimpanan yang tidak tepat [11]. Kerusakan tersebut berpotensi menurunkan kemampuan atenuasi apron dan meningkatkan transmisi radiasi [12], [13]. Sebagian kerusakan internal tidak dapat diidentifikasi melalui inspeksi visual saja [11]. Dengan demikian, pemeriksaan visual belum cukup untuk memastikan kelayakan apron secara objektif.

Regulasi nasional terkait keselamatan radiasi, seperti ketentuan BAPETEN dan standar pelayanan radiologi klinik, mewajibkan fasilitas radiologi memastikan kelayakan alat pelindung diri secara berkala [14], [15], [16]. Namun, implementasi pengujian apron di lapangan belum optimal karena pada beberapa fasilitas masih terbatas pada pemeriksaan visual [11]. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa metode radiografi, baik *computed radiography* maupun *digital radiography*, mampu mendeteksi cacat internal pada apron timbal secara lebih akurat dibandingkan inspeksi visual [17], [18], [19], [20], [21]. Akan tetapi, kajian yang secara khusus mengevaluasi kelayakan apron timbal menggunakan radiografi digital dengan pengukuran kuantitatif luas cacat berdasarkan ambang batas BAPETEN pada fasilitas radiologi rumah sakit tipe B, khususnya di Banda Aceh, masih terbatas.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan mengevaluasi kelayakan apron timbal di Instalasi Radiologi Rumah Sakit Tipe B Banda Aceh menggunakan metode radiografi digital non-destruktif. Analisis citra dilakukan menggunakan perangkat lunak *Radiant DICOM Viewer* untuk mengukur luas area cacat sebagai dasar penentuan kelayakan apron. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan penilaian yang lebih objektif dibandingkan inspeksi visual semata, sekaligus mendukung penerapan inspeksi berkala dalam memperkuat sistem proteksi radiasi bagi tenaga medis sesuai prinsip ALARA.

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini mengevaluasi tiga apron timbal, yaitu apron A dan B dari Instalasi Radiologi Rumah Sakit Tipe B Banda Aceh, serta apron C dari Laboratorium Fisika Medis dan Aplikasi Nuklir, Departemen Fisika FMIPA Universitas Syiah Kuala.

Pelat timbal murni setebal 1,5 mm digunakan sebagai pembanding homogenitas citra.

Setiap apron dibagi menjadi empat kuadran pada sisi depan untuk mempermudah identifikasi lokasi kerusakan (**Gambar 1**). Akuisisi citra dilakukan dengan parameter tetap, yaitu tegangan tabung 75 kVp, arus-waktu 100 mAs, dan jarak fokus-film (*focus-film distance/FFD*) 100 cm. Parameter ini mengacu pada rekomendasi IAEA *Safety Reports Series* No. 47 [10] dan AAPM *Report* No. 204 [21] untuk pengujian radiografi non-destruktif material pelindung radiasi. Penggunaan parameter yang sama pada seluruh kuadran bertujuan menjaga konsistensi kualitas citra dan memungkinkan perbandingan hasil secara objektif antararea maupun antar-apron.



**Gambar 1.** Pembagian Kuadran Apron Timbal untuk Pengujian Radiografi Digital

Posisi apron diatur pada bidang datar tanpa lipatan untuk meminimalkan artefak geometrik (**Gambar 2**). Setiap kuadran diekspos satu kali, kemudian citra yang diperoleh disimpan dalam format DICOM untuk dianalisis lebih lanjut.



**Gambar 2.** Posisi Apron Timbal untuk Pengujian Radiografi Digital

Citra radiografi dianalisis menggunakan perangkat lunak *Radiant DICOM Viewer* melalui fitur *measurement tool* untuk



mengukur dimensi retakan. Area yang tampak lebih gelap dibandingkan area sekitarnya diinterpretasikan sebagai indikasi retakan atau ketidakhomogenan lapisan timbal, sedangkan pola terang bergelombang diidentifikasi sebagai lipatan atau deformasi ringan pada permukaan maupun lapisan pelindung (**Gambar 3**).

**Gambar 3.** Proses Pengukuran Retakan dengan *Radiant DICOM Viewer*

Luas cacat dihitung menggunakan pendekatan geometrik dua dimensi berdasarkan hasil pengukuran panjang dan lebar area kerusakan. Data dianalisis secara deskriptif-kuantitatif melalui tahapan berikut: identifikasi lokasi cacat pada setiap kuadran, pengukuran dimensi cacat pada citra DICOM, perhitungan luas area cacat, pengelompokan lokasi cacat ke dalam area sensitif dan non-sensitif, serta perbandingan hasil pengukuran dengan ambang batas kelayakan BAPETEN. Apron dinyatakan layak pakai apabila luas cacat tidak melebihi 15 mm<sup>2</sup> pada area sensitif (*critical region*) dan 670 mm<sup>2</sup> pada area non-sensitif (*non-critical region*) [22], [23]. Apron dikategorikan tidak layak pakai apabila luas cacat melebihi salah satu ambang batas tersebut.

Penilaian kelayakan dilakukan melalui inspeksi visual dan inspeksi radiografi digital. Inspeksi visual digunakan untuk menilai kondisi fisik luar apron, seperti lipatan, perubahan warna, keausan permukaan, dan kerusakan jahitan. Inspeksi radiografi digital digunakan untuk mendeteksi kerusakan internal yang tidak tampak secara kasat mata melalui evaluasi

homogenitas densitas citra dan pengukuran luas retakan. Kombinasi kedua metode ini digunakan untuk memperoleh penilaian kelayakan apron yang lebih objektif dan dapat direplikasi.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Inspeksi visual dilakukan sebagai penilaian awal terhadap kondisi fisik ketiga apron timbal yang diuji. Seluruh apron memiliki ketebalan 0,5 mmPb, sesuai standar minimum proteksi terhadap radiasi hambur sinar-X diagnostik [24]. Hasil inspeksi menunjukkan adanya perbedaan kondisi fisik antar-apron, terutama pada aspek lipatan, perubahan warna, dan kondisi jahitan (**Tabel 1 dan Gambar 4**).

**Tabel 1.** Spesifikasi dan kondisi fisik apron timbal

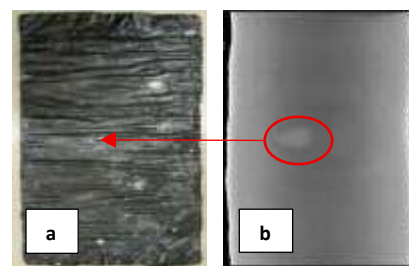
| Kode | Merek, Tahun Beli            | Kondisi Visual                                     | Status                   |
|------|------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------|
| A    | Picker 2007                  | lipatan signifikan, warna memudar di beberapa area | perlu uji internal       |
| B    | Kiran 2009                   | lipatan ringan, terdapat bekas jahitan ringan      | layak dengan uji berkala |
| C    | Shielding International 2019 | permukaan halus, warna cerah, jahitan kuat         | layak pakai              |



**Gambar 4.** Kondisi visual apron timbal (a) Picker, (b) Kiran, (c) Shielding International

## Hasil Citra Pelat Timbal (Pb)

Timbal ( $Z = 82$ ) memiliki koefisien atenuasi tinggi terhadap sinar-X pada rentang energi diagnostik 50–120 keV, sehingga efektif menyerap foton, terutama melalui efek fotoelektrik [9], [11]. Citra radiografi pelat timbal 1,5 mm menunjukkan distribusi densitas yang relatif homogen. Hal ini menunjukkan bahwa sistem radiografi yang digunakan mampu mendeteksi variasi densitas pada material pelindung. **Gambar 5(a)** menunjukkan pelat timbal sebelum diekspos, sedangkan **Gambar 5(b)** menunjukkan citra radiografi pelat timbal. Pada citra tersebut tampak perbedaan intensitas pada area tertentu (ditandai lingkaran merah), yang mengindikasikan variasi ketebalan pelat timbal. Bagian ujung pelat tampak lebih terang, sehingga dapat diinterpretasikan sebagai area dengan ketebalan yang lebih rendah.

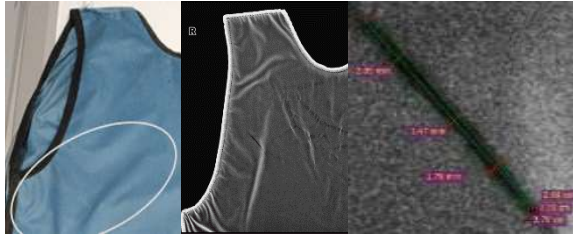


**Gambar 5.** (a) Pelat Timbal 1,5 mm sebagai Sampel Kontrol; (b) Citra Radiografi Pelat Timbal

## Hasil Citra Apron A (Picker, 2007)

Citra radiografi apron A menunjukkan ketidakhomogenan densitas pada beberapa

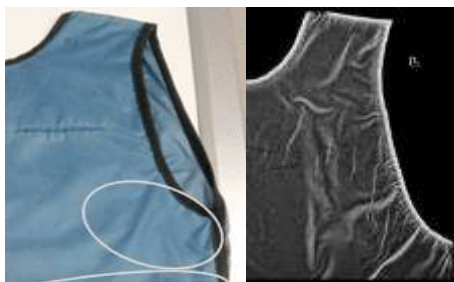
kuandran, dengan kerusakan paling signifikan teridentifikasi pada kuadaran I atau area dada kanan (**Gambar 6**).



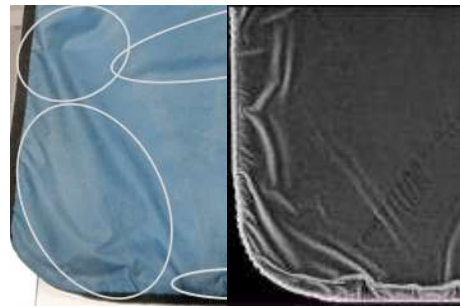
**Gambar 6.** Citra Radiografi Apron A (Kuadran I)

Pengukuran dengan *Radiant DICOM Viewer* menunjukkan adanya retakan internal dengan panjang 2,7 cm dan lebar 1,5–2,00 mm, sehingga luas cacat diperkirakan sekitar 47,3 mm<sup>2</sup>. Nilai ini melebihi ambang batas BAPETEN untuk area sensitif, yaitu 15 mm<sup>2</sup>. Oleh karena itu, apron A dikategorikan tidak layak pakai untuk proteksi radiasi diagnostik.

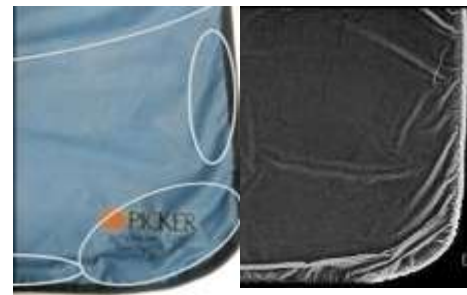
Pada kuadran II hingga IV, citra menunjukkan pola densitas tidak homogen berupa area terang akibat lipatan atau penumpukan lapisan, serta area gelap samar yang mengidentifikasi awal penipisan lokal dan deformasi mekanik (**Gambar 7-9**). Meskipun tidak secara langsung menunjukkan hilangnya fungsi proteksi, lipatan berulang mempercepat degradasi material akibat gaya lentur mekanik (*mechanical fatigue*) selama penyimpanan dan penggunaan [23].



**Gambar 7.** Citra Radiografi Apron A (Kuadran II)



**Gambar 8.** Citra Radiografi Apron A (Kuadran III)



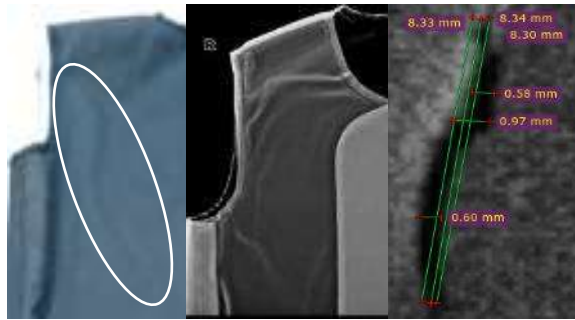
**Gambar 9.** Citra Radiografi Apron A (Kuadran IV)

Secara keseluruhan, apron A mengalami degradasi berat yang ditandai oleh retakan nyata pada area sensitif dan ketidakhomogenan densitas pada kuadran lainnya. Retakan pada area vital berpotensi menurunkan efektivitas atenuasi apron karena dapat meningkatkan transmisi radiasi ke organ sensitif. Temuan ini mendukung hasil penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa pemeriksaan visual saja tidak cukup untuk menilai kelayakan apron, karena kerusakan internal sering kali baru teridentifikasi melalui pemeriksaan radiografi [18], [20]. Oleh karena itu, apron A sebaiknya tidak lagi digunakan dan perlu diganti untuk menjamin keselamatan tenaga medis.

### Hasil Citra Apron B (Kiran, 2009)

Apron B menunjukkan kondisi radiografis yang lebih baik dibandingkan apron A, dengan pola densitas yang relatif homogen pada sebagian kuadran. Namun, masih ditemukan retakan mikro dan deformasi ringan yang mengindikasikan awal degradasi lapisan pelindung. Pada

kuadran I, teridentifikasi retakan mikro diagonal sepanjang 8,3 mm dan lebar 0,6-0,97 mm, dengan luas cacat sekitar 6,5 mm<sup>2</sup> (**Gambar 10**). Nilai ini masih berada di bawah ambang batas BAPETEN untuk area sensitif, sehingga apron B belum dikategorikan tidak layak pakai.

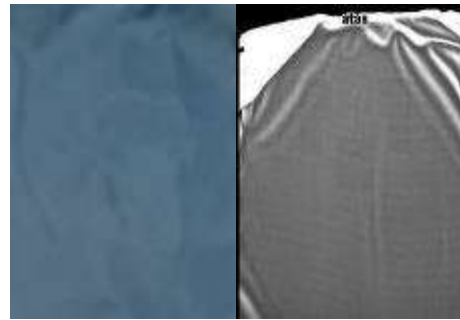


**Gambar 10.** Citra Radiografi Apron B (Kuadran I)

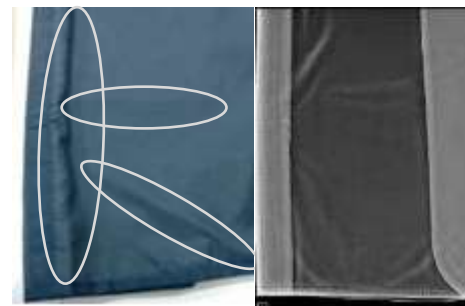
Pada kuadran II dan III, citra menunjukkan densitas yang umumnya homogen. Area terang yang tampak pada kuadran II terutama berkaitan dengan lipatan, penebalan lapisan kain, dan perekat di sekitar jahitan, sedangkan pemeriksaan tambahan pada bagian dalam apron tetap menunjukkan lapisan pelindung yang utuh (**Gambar 11-13**). Temuan ini menunjukkan bahwa perubahan intensitas pada area tersebut lebih merepresentasikan artefak permukaan atau deformasi ringan, bukan kehilangan material timbal.



**Gambar 11.** Citra Radiografi Apron B (Kuadran II)

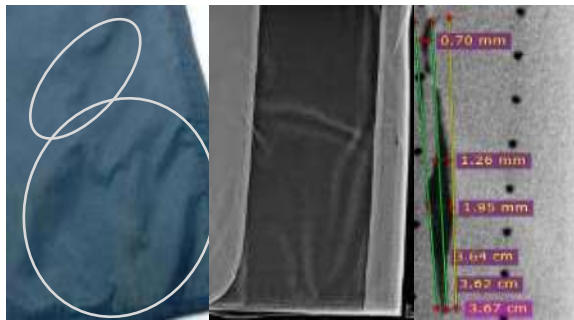


**Gambar 12.** Citra Bagian Dalam Atas Apron B (Kuadran II)

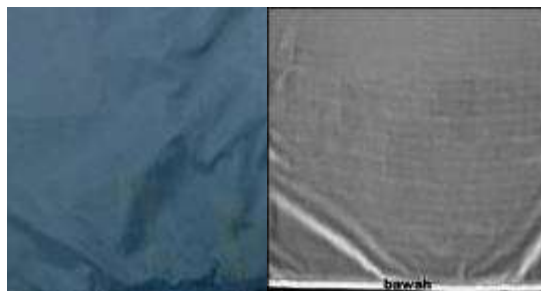


**Gambar 13.** Citra Radiografi Apron B (Kuadran III)

Retakan mikro lain ditemukan pada kuadran IV dengan panjang sekitar 3,6 mm dan lebar 0,7-1,9 mm, sehingga luas cacat sebesar 4,68 mm<sup>2</sup> (**Gambar 14**). Pemeriksaan bagian dalam bawah apron menunjukkan densitas yang masih homogen, meskipun terdapat pola terang yang diinterpretasikan sebagai lekukan ringan akibat tekanan penyimpanan yang tidak merata (**Gambar 15**). Dengan demikian, retakan dan deformasi pada apron B masih bersifat lokal dan belum melewati batas kelayakan.



**Gambar 14.** Citra Radiografi Apron B (Kuadran IV)



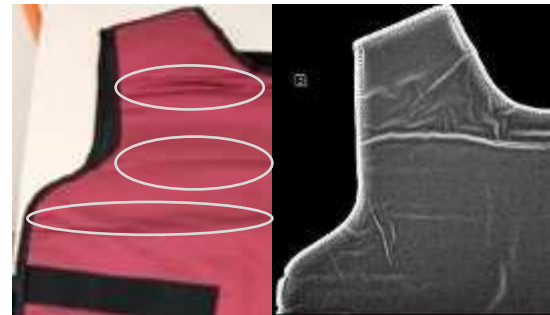
**Gambar 15.** Citra Radiografi Bagian Dalam Bawah Apron B (Kuadran IV)

Secara keseluruhan, Apron B masih dikategorikan layak pakai berdasarkan ambang batas BAPETEN. Namun, keberadaan retakan mikro pada kuadran I dan IV menunjukkan adanya awal degradasi material akibat penuaan bahan dan tekanan mekanik berulang. Kondisi ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang melaporkan bahwa lipatan, tekanan, dan penyimpanan yang tidak tepat dapat memicu *mechanical fatigue* serta menurunkan homogenitas lapisan pelindung apron [23], [25]. Oleh karena itu, apron B tetap dapat digunakan, tetapi perlu menjalani pemeriksaan radiografi berkala untuk memantau perkembangan kerusakan.

#### **Hasil Citra Apron C (*Shielding International*, 2019)**

Apron C merupakan unit dengan usia pakai paling muda dan digunakan sebagai pembanding kondisi apron yang masih baik. Citra radiografi menunjukkan distribusi densitas homogen pada seluruh kuadran,

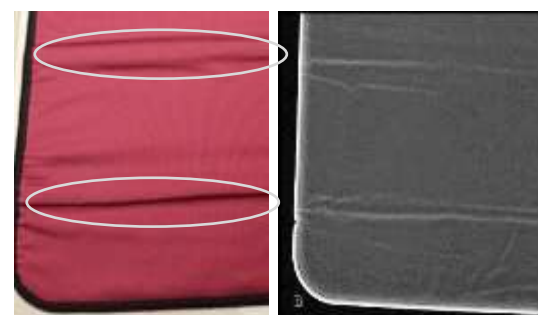
tanpa indikasi retakan, penipisan atau ketidakhomogenan lapisan pelindung (Gambar 16-19). Garis terang tipis yang tampak pada area bahu serta lekukan ringan di tepi bawah diinterpretasikan sebagai lipatan permukaan atau deformasi superfisial akibat penyimpanan, bukan sebagai kehilangan material timbal.



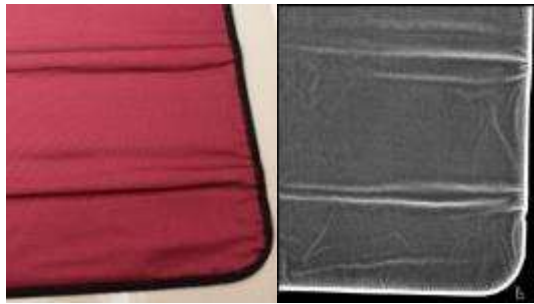
**Gambar 16.** Citra Radiografi Apron C (Kuadran I)



**Gambar 17.** Citra Radiografi Apron C (Kuadran II)



**Gambar 18.** Citra Radiografi Apron C (Kuadran III)



**Gambar 19.** Citra Radiografi Apron C (Kuadran IV)

Hasil radiografi ini konsisten dengan inspeksi visual yang menunjukkan permukaan kain masih halus, warna tidak memudar, dan jahitan tetap kuat. Dengan demikian, lapisan pelindung apron C masih dalam kondisi optimal dan apron dikategorikan layak pakai. Temuan ini mendukung laporan sebelumnya bahwa usia pakai dan kondisi penyimpanan berpengaruh terhadap homogenitas serta efektivitas proteksi apron timbal. Apron yang berusia kurang dari 10 tahun dan disimpan dengan baik cenderung mempertahankan kualitas lapisan pelindungnya [25]. Meskipun demikian, inspeksi radiografi rutin tetap diperlukan untuk memantau perubahan densitas internal seiring bertambahnya usia material.

### **Implikasi terhadap Efektivitas Proteksi Radiasi**

Retakan atau ketidakhomogenan lapisan timbal dapat menurunkan kemampuan atenuasi apron terhadap sinar-X. *Health Physics Society* [16] melaporkan bahwa retakan seluas  $20 \text{ mm}^2$  pada area sensitif dapat meningkatkan transmisi radiasi hingga 12%. Berdasarkan hasil pengukuran, apron A dengan luas retakan  $47,3 \text{ mm}^2$  berpotensi menurunkan daya proteksi hingga lebih dari 15%, sedangkan retakan mikro berukuran kurang dari  $10 \text{ mm}^2$  pada apron B diperkirakan menurunkan daya proteksi kurang dari 1% [20].

Temuan ini menunjukkan bahwa degradasi internal apron berkaitan dengan

tekanan mekanik berulang, usia pemakaian, dan penyimpanan yang tidak tepat, sebagaimana dilaporkan pada penelitian sebelumnya [24], [25]. Oleh karena itu, penyimpanan apron dalam posisi tergantung, perawatan yang tepat, serta inspeksi radiografi berkala setiap 6-18 bulan perlu diterapkan untuk menjaga efektivitas proteksi radiasi jangka panjang [20], [23], [25].

### **KESIMPULAN**

Evaluasi kelayakan apron timbal menggunakan radiografi digital non-destruktif menunjukkan bahwa kerusakan internal apron bervariasi sesuai usia pakai dan kondisi penyimpanan. Apron A memiliki retakan pada area sensitif seluas  $47,3 \text{ mm}^2$ , melebihi ambang batas BAPETEN, sehingga tidak layak pakai. Apron B masih layak digunakan dengan pemantauan berkala karena retakan mikro terdeteksi, yaitu  $6,5 \text{ mm}^2$  pada area sensitif dan  $4,68 \text{ mm}^2$  area non-sensitif, masih berada di bawah ambang batas. Apron C menunjukkan densitas homogen tanpa retakan dan dinyatakan layak pakai. Kontribusi utama penelitian ini adalah menunjukkan bahwa radiografi digital dapat digunakan sebagai metode evaluasi yang objektif dan kuantitatif untuk mendeteksi kerusakan internal apron yang tidak teridentifikasi melalui inspeksi visual. Secara praktis, metode ini dapat diterapkan sebagai bagian dari inspeksi rutin di fasilitas radiologi untuk mendukung kepatuhan terhadap regulasi BAPETEN dan penerapan prinsip ALARA dalam keselamatan kerja tenaga medis.

### **UCAPAN TERIMA KASIH**

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Departemen Fisika, FMIPA Universitas Syiah Kuala, dan Instalasi Radiologi Rumah Sakit Tipe B Banda Aceh

atas izin penggunaan fasilitas dan dukungan teknis selama pelaksanaan penelitian ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Nikolas, "Advancements in Radiology Revolutionizing Medical Imaging," *Imaging Med*, vol. 15, no. 5, pp. 103–105, Oct. 2023.
- [2] World Health Organization (WHO), *Global Initiative on Radiation Safety in Healthcare Settings: Technical Meeting Report*, Geneva, Dec. 2008.
- [3] International Commission on Radiological Protection (ICRP), *ICRP Publication 103: The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, Oxford: Elsevier, 2007.
- [4] A. S. Akram and Y. S. Chowdhury, *Radiation Exposure Of Medical Imaging*, Florida, Treasure Island (FL): StatPearls Publishing, 2022.
- [5] Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN), *Laporan Kinerja BAPETEN 2024*, Feb. 2024.
- [6] N. Jensen and M. Janssen, "Quality Improvement: Staff Radiation Exposure Reduction While Maintaining Patient Safety," *Journal of Radiology Nursing*, Vol. 36, no. 4, pp. 242–244, Dec. 2017.
- [7] T. Kisananto, Darlina, dan T. Rahardjo, "Pengaruh Radiasi Pexion terhadap Kerusakan DNA pada Sel Limfosit Pekerja Medis dengan Menggunakan Uji Komet," *Jurnal Ilmiah Aplikasi Isotop dan Radiasi*, vol. 14, no. 2, pp. 125–132, Dec. 2018.
- [8] S. C. Bushong, *Radiologic Science for Technologists: Physics, Biology, and Protection*, 12th ed. St. Louis, Missouri: Elsevier, 2021.
- [9] A. M. König, J. Verbe Zoum, M. Fiebich, P. W. Abissi, and A. H. Mahnken, "Comparison of the radiation protection effect of different radiation protection aprons made of different materials," *Eur J Radiol*, vol. 164, Jul. 2023.
- [10] International Atomic Energy Agency (IAEA), *Safety Reports Series No 47: Radiation Protection in the Design of Radiotherapy Facilities*, Vienna, 2006.
- [11] J. P. McCaffrey, H. Shen, B. Downton, and E. Mainegra-Hing, "Radiation attenuation by lead and nonlead materials used in radiation shielding garments," *Med Phys*, vol. 34, no. 2, pp. 530–537, 2007.
- [12] Republik Indonesia, Peraturan Pemerintah Nomor 45 Tahun 2023 tentang Keselamatan Radiasi Pexion dan Keamanan Zat Radioaktif. Indonesia, 2023.
- [13] Badan Pengawas Tenaga Nuklir, Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 8 Tahun 2011 tentang Keselamatan Radiasi dalam Penggunaan Pesawat Sinar-X Radiologi Diagnostik dan Intervensional. Indonesia, 2011.
- [14] Menteri Kesehatan Republik Indonesia, Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 24 Tahun 2020 tentang Pelayanan Radiologi Klinik. Indonesia, 2020.
- [15] A. Nikmawati and S. Masrochah, "Evaluasi Performance Lead Apron," *Jurnal Radiografer Indonesia*, vol. 1, p. 104, 2018.
- [16] NCRP, *Fifty-Fourth Annual Meeting Program: Radiation Protection Responsibility in Medicine*, Bethesda, Mar. 2018.
- [17] T. Mohammad Yoshandi, H. Eka Hamdani, and Annisa, "Material Analysis of Lead Aprons Using Radiography Non-Destructive Testing (Analisa Bahan Lead Apron Menggunakan Metode Radiografi Pengujian Tanpa Musnah)," *Journal Renewable Energy & Mechanics*

- (REM), vol. 04, no. 02, pp. 56–62, 2021.
- [18] V. Taufiq, D. Milvita, H. Sofyan, and A. O. S., “Evaluasi Kelayakan dan Efektivitas lead apron sebagai Alat Pelindung Diri di Instalasi Radiologi,” *Jurnal Fisika Unand*, vol. 13, no. 1, pp. 110–116, Jan. 2024.
- [19] K. Widya Spica, M. Fa’ik, and N. A. I. Liscyaningsih, “Pengujian Lead Apron dengan Menggunakan Metode Radiografi di Instalasi Radiologi RSUD dr. Soedono Madiun,” *PREPOTIF : Jurnal Kesehatan Masyarakat*, vol. 9, no. 2, pp. 5132–5143, Aug. 2025.
- [20] P. Revathy and S. B. Kagineili, “Quality assurance of lead aprons for radiation protection,” *Radiat Prot Dosimetry*, vol. 199, no. 20, pp. 2491–2494, Dec. 2023.
- [21] International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU), *AAPM Report No. 204: Size-Specific Estimates (SSDE) in Pediatric and Adult Body CT Examinations*, College Park: American Association of Physicists in Medicine, 2011.
- [22] J. E. Aldrich, E. Duran, P. Dunlop, and J. R. Mayo, “Optimization of dose and image quality for computed radiography and digital radiography,” *J Digit Imaging*, vol. 19, no. 2, pp. 126–131, Jun. 2006.
- [23] K. Lambert and T. Mckeon, “Inspection of Lead Aprons: Criteria for Rejection,” *Health Physics Society*, vol. 80, no. 5, pp. S67–S68, 2001.
- [24] R. Marini, L. Apriliati, I. Silviana, N. Yusup, and I. Noviani Indah, “Inspeksi Alat Pelindung Diri (APD) Radiasi Menggunakan Metode Uji Visual, Palpasi, dan Sinar-X,” *Prosiding Seminar Si-INTAN*, vol. 3, no. 1, pp. 125–132, Oct. 2023.
- [25] S. M. Modlińska, J. Bosowska, and M. Cebula, “Influence of Storage Conditions and Usage Time on The Quality Of Lead Rubber,” *Med Pr*, vol. 73, no. 1, pp. 13–17, 202