

Analisis Efektivitas Apron 0.35 mmPb dalam Melindungi Pekerja Radiasi pada Pemeriksaan Radiografi

Analysis of The Effectiveness of 0.35 mmPb Apron for Radiation Protection in Radiography Examination

Muhammad Irsal^{1,2} ✉, Shinta Gunawati Sutoro¹, Mahfud Edy Widiamoko¹,
Asumise Tarigan¹, Guntur Winarno¹, dan Legia Prananto¹

¹Politeknik Kesehatan Kemenkes Jakarta II, Indonesia

²PUI-P2KAL Politeknik Kesehatan Kemenkes Jakarta II, Indonesia

ABSTRAK

Latar Belakang: *Quality Control (QC)* pada apron wajib dilakukan satu tahun sekali. Hal ini bertujuan untuk memastikan keamanan pada pekerja radiasi sebelum melakukan prosedur pemeriksaan radiologi sehingga penerimaan dosis radiasi tidak melebihi 20 mSv/ tahun.

Tujuan: Menganalisis efektivitas penggunaan apron 0.35 mmPb untuk melindungi pekerja radiasi pada pemeriksaan radiografi.

Metode: Penelitian ini dilakukan di laboratorium Jurusan Teknik Radiodiagnostik dan Radioterapi, Poltekkes Kemenkes Jakarta II. Prosedur yang dilakukan pada penelitian adalah dengan simulasi apabila pekerja menerima paparan radiasi primer dan sekunder pada jarak 100 cm dengan rentang faktor eksposi 45-100kVp. Apron yang digunakan berbahan timbal (Pb) dengan ketebalan 0.35 mmPb dan, untuk pekerja radiasi, diganti dengan menggunakan pantom *anthorophomorphic*. Penggunaan luas lapangan sesuai kondisi klinis yaitu 18 cm x 24 cm, 43 cm x 35 cm, dan kemudian dilakukan analisis efektivitas apron Pb terhadap perubahan faktor eksposi.

Hasil: Hasil penelitian menunjukkan bahwa efektivitas penggunaan apron 0.35 mmPb pada rentang tegangan tabung 45-100kVp untuk kedua penggunaan luas lapangan memiliki nilai persentasi yang sama 99.9-93%.

Kesimpulan: Peningkatan tegangan tabung menyebabkan terjadinya penurunan atenuasi apron Pb.

Kata Kunci: Apron 0.35 mmPb; Proteksi Radiasi; Pemeriksaan Radiografi; Paparan Primer; Paparan Sekunder

ABSTRACT

Background: *Quality Control (QC)* on aprons is mandatory once a year. The aim is that workers need to ensure safety before carrying out radiological examination procedures so that the radiation dose received does not exceed 20 mSv/year.

Objective: To analyze the effectiveness of 0.35mmPb apron for radiation protection in radiography examination.

Methods: This research was conducted in the laboratory Department of Technique Radiodiagnostic and Radiotherapy, Poltekkes Kemenkes Jakarta II. The procedure carried out in this research was a simulation when workers received primary and secondary radiation exposure at a distance of 100 cm with an exposure factor range of 45-100kVp. The apron used was made of lead (Pb) with a thickness of 0.35 mm Pb and, for radiation workers, it was replaced with an anthropomorphic phantom. The use of field area according to clinical conditions was 18 cm x 24 cm, 43 cm x 35 cm, and then an analysis of the effectiveness of the Pb apron was carried out on changes in exposure factors.

Results: The results of the study found that the effectiveness of using an apron of 0.35 mmPb in the tube voltage range of 45-100kVp for both field areas used the same percentage value of 99.9-93%.

Conclusion: Increase in tube voltage causes a decrease in Pb apron attenuation.

Keywords: Apron 0.35 mmPb; Radiation Protection; Radiography Examination; Primary Exposure; Secondary Exposure

✉Corresponding author: muhammad.irsal@poltekkesjkt2.ac.id

Diajukan 22 Desember 2022 Diperbaiki 25 Juli 2023 Diterima 25 Juli 2023

<https://jurnal.ugm.ac.id/jkesvo> Published online August 31, 2023

PENDAHULUAN

Paparan radiasi mampu meningkatkan risiko kanker sebagai akibat peningkatan jumlah paparan pada pemeriksaan radiografi. Oleh karena itu, upaya proteksi radiasi *As Low As Reasonably Achievable* (ALARA) dibutuhkan dengan tujuan meminimalkan paparan radiasi yang diterima oleh pekerja. ALARA memiliki tiga komponen dasar, yaitu waktu paparan, jarak yang harus diperhatikan terhadap sumber radiasi, dan penggunaan pelindung. Salah satu cara dalam mengurangi paparan kepada pekerja adalah dengan menggunakan apron timbal (Pb). Hal ini didasarkan bahwa penggunaan Pb dikarenakan tingkat kepadatannya yang sangat tinggi (Elshami *et al.*, 2020).

Sinar-X dengan rentang energi rendah banyak digunakan dalam pemeriksaan radiografi dan menurunkan paparan radiasi yang diterima selama pemeriksaan dengan menggunakan apron perlu dilakukan. Dari hasil penelitian didapatkan bahwa penurunan dosis dapat disebabkan oleh penggunaan apron. Material apron pada umumnya adalah Timbal (Pb), tetapi dalam perkembangannya bismuth juga dapat digunakan (AbuAlRoos *et al.*, 2019).

Hasil uji coba pada kedua material tersebut tidak terdapat perbedaan signifikan, sehingga dapat disimpulkan kedua bahan tersebut mempunyai kemampuan yang sama dalam menyerap radiasi. Akan tetapi, bahan bismut merupakan material yang mudah teroksidasi dan bentuk logam yang tidak stabil. Dalam aplikasinya, penggunaan Pb digunakan sebagai pelapis pada tembok, lantai, langit-langit, dan apron sebagai penghalang radiasi di instalasi radiologi (Maeda *et al.*, 2022).

Menurut *National Commissioning Radiation Protection* (NCRP), penggunaan apron dengan material Pb tidak menutup kemungkinan memiliki risiko terpapar apabila dalam penggunaannya tidak

diperhatikan pemasangan dengan baik dan benar. Hal ini didukung oleh penelitian yang menunjukkan bahwa penggunaan Apron Pb tidak selalu dapat melindungi apabila penggunaannya tidak tepat (Hayre *et al.*, 2020).

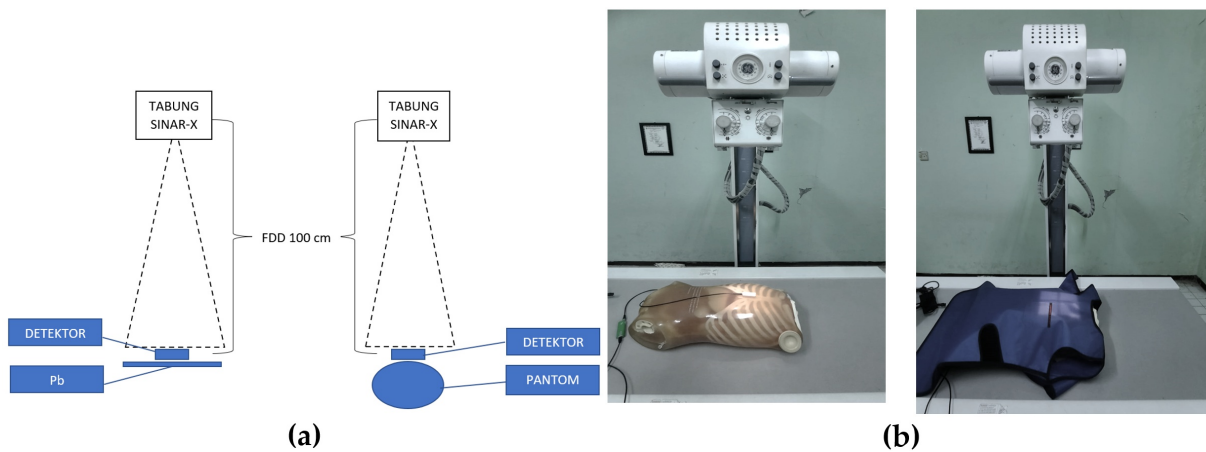
Perlu diketahui bahwa setiap organ memiliki rentang sensitivitas dosis yang bervariasi, terutama pada area di sekitar kepala dan lensa mata. Beberapa laporan penelitian menunjukkan risiko peningkatan efek radiasi setelah penerimaan dosis radiasi semakin tinggi (Mortazavi *et al.*, 2012).

Rekomendasi *International Commission on Radiation Protection* 2007 No.105 dosis bagi pekerja tidak melebihi 20 mSv per-tahun, menurut Alhassan *et al.*, (2020), hasil penelitian menunjukkan penggunaan apron Pb 1,5 mm sangat efektif pada penggunaan faktor eksposi dengan energi 52-81 kVp dengan rentang 13-160 mAs.

Pekerja radiasi perlu memperhatikan tentang bagaimana melakukan upaya proteksi terhadap radiasi dengan mengetahui bagaimana desain ruangan pemeriksaan radiologi. Standar operasional prosedur kerja yang aman yaitu dengan melindungi diri dari sumber radiasi serta menggunakan apron. Hal ini dilakukan agar pekerja dapat menurunkan dosis efektif yang lebih kecil pada daerah pengendalian (López *et al.*, 2018).

Sebelum menggunakan apron Pb perlu dilakukan pengukuran dan verifikasi untuk mengetahui efektivitas apron dalam melindungi dari paparan radiasi primer ataupun sekunder. Pekerja radiasi pada praktiknya tidak menerima radiasi primer saja, akan tetapi lebih sering menerima radiasi sekunder (Johansen *et al.*, 2018).

Kendala yang terjadi saat ini, banyak spesifikasi apron Pb yang tidak sesuai. Baru-baru ini penelitian tentang apron mengenai pengukuran atenuasi kesetaraan Pb dan rasio transmisi



Gambar 1. Pengukuran paparan: (a). primer dan sekunder, (b). non-apron dan apron

ditemukan bahwa ada kesalahan pengukuran pada ketebalan apron dengan nilai dikoreksi ± 0.005 pada saat pembelian, sedangkan kesalahan transmisi 10% dari hasil pengukuran dosimetry (Lin *et al.*, 2020).

Beberapa penelitian melaporkan alasan pengujian apron tidak dilakukan, karena prosedur pengujian menggunakan peralatan standar seperti *flouroscopy*. Selain itu, pekerja radiasi akan melakukan penilaian secara subjektif dengan mempertimbangkan berat dan kenyamanan saat menggunakannya (Lichliter *et al.*, 2017). Berat apron yang digunakan di rumah sakit memiliki rentang 2.9-3.5 Kg. Hal ini membuat pekerja radiasi sulit dalam beraktivitas. Selain itu, material Pb yang memiliki sifat material kaku serta mudah mengalami retakan yang disebabkan oleh penggunaan dan penyimpanan (Kim, 2021).

Hasil penelitian terbaru menemukan bahwa sebuah rumah sakit mengalami kerusakan apron di beberapa negara bervariasi, diantaranya Irlandia 12%, Norwegia 19%, Turki 68%, Nigeria 70% (Bjørkås *et al.*, 2020). Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis efektivitas apron 0.35 mmPb dalam melindungi pekerja radiasi pada pemeriksaan radiografi.

METODE

Penelitian ini bersifat deskriptif

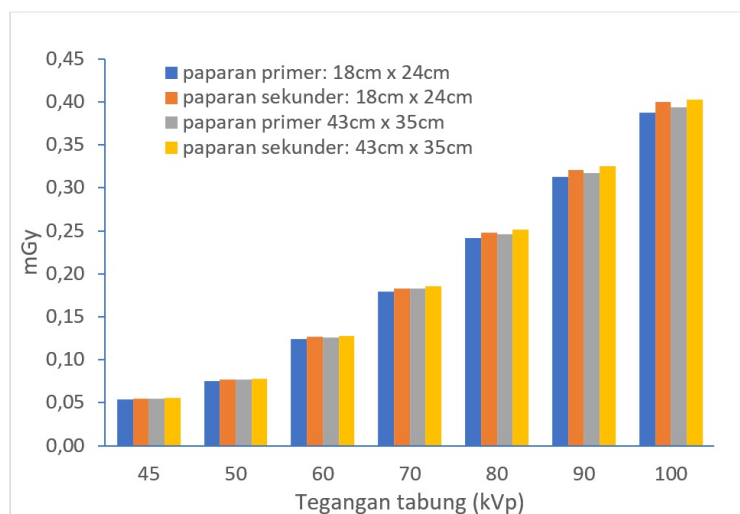
kuantitatif tentang efektivitas penggunaan apron sebagai upaya proteksi bagi pekerja pada pemeriksaan radiografi di laboratorium Jurusan Teknik Radiodiagnostik dan Radioterapi, Poltekkes Kemenkes Jakarta II. Penelitian ini dilakukan pada Bulan Mei sampai dengan November 2022. Dalam penelitian ini prosedur yang dilakukan yaitu dengan simulasi apabila pekerja menerima paparan radiasi secara langsung pada jarak 100 cm dengan variasi tegangan tabung mulai 45-100 kVp 5 mAs.

Apron yang digunakan berbahan timbal (Pb) dengan ketebalan 0.35 mmPb dan pekerja diganti menggunakan pantom *anthorophomorp* dengan alasan material pantom sesuai dengan tubuh manusia. Kemudian melakukan paparan radiasi primer dan sekunder terhadap perubahan luas lapangan penyinaran sesuai kondisi klinis yang sering digunakan pada prosedur klinis, yaitu 18 cm x 24 cm, 43 cm x 35 cm.

Selanjutnya dilakukan analisis pengaruh tegangan tabung terhadap dosis radiasi primer dan sekunder. Kemudian luas lapangan terhadap paparan radiasi dan pengaruh penggunaan apron dan non-apron terhadap luas lapangan penyinaran.

Alat yang digunakan pesawat sinar-X GE *multipurpose* 500 mA, pantom *anthorophomorp*, *multidetector* radiasi. Uji statistik menggunakan SPSS-26 IBM dengan melakukan uji *t-test paired*.

$$\text{Efektivitas (\%)} = \left(1 - \frac{\text{paparan non - apron (mGy)}}{\text{paparan apron (mGy)}}\right) \times 100$$



Gambar 2. Pengukuran paparan primer dan sekunder

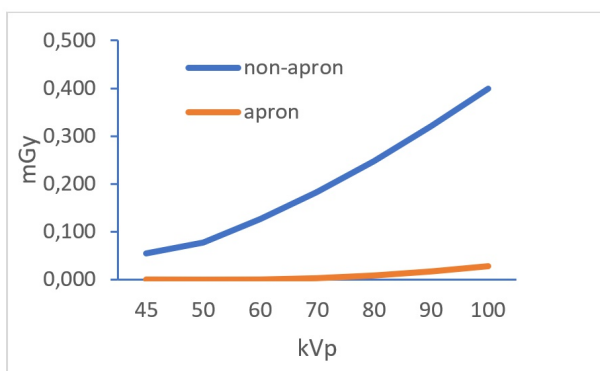
Perhitungan efektivitas apron menggunakan persamaan berikut:

HASIL DAN PEMBAHASAN

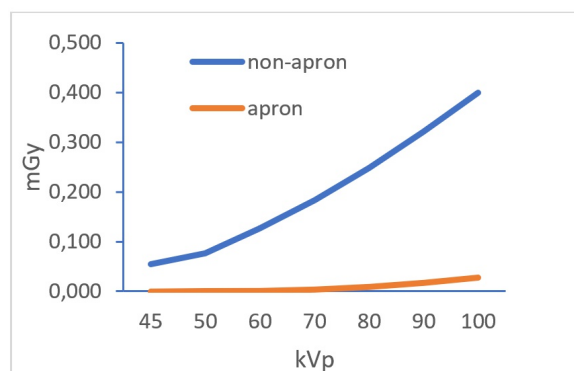
Prosedur pengukuran paparan primer di tunjukan pada Gambar 1 (a) dengan menempatkan detektor di atas material Pb yang berguna untuk menyerap radiasi hambur. Selanjutnya, untuk paparan sekunder di tunjukan pada gambar 1 (a) dengan menempatkan detektor pada permukaan pantom. Kemudian pengukuran paparan dengan menggunakan apron disebut apron, sedangkan tanpa menggunakan apron disebut non-apron ditunjukan pada

Gambar 1 (b).

Hasil pengukuran paparan primer dan sekunder terhadap perubahan ukuran luas lapangan 18 cm x 24 cm dan 43 cm x 35 cm ditunjukan pada Gambar 2. Dari hasil pengukuran primer menggunakan tegangan tabung 40-100kVp dengan luas lapangan 18cm x 24cm nilai dosis radiasi bervariasi untuk paparan primer 0.054-0.388mGy, sedangkan untuk paparan sekunder 0.055-0.400mGy. Selanjutnya hasil pengukuran primer menggunakan tegangan tabung 40-100kVp dengan luas lapangan 43cm x 35cm nilai dosis bervariasi 0.055-0.394mGy, sedangkan paparan sekunder 0.056-0.403mGy.

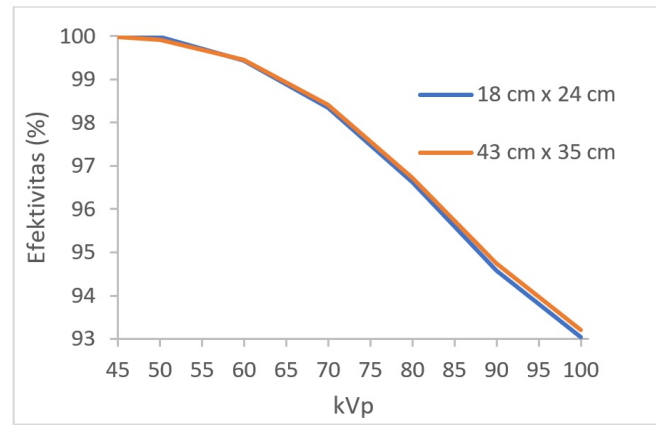


(a)



(b)

Gambar 3. Pengukuran apron dan non-apron: (a). Lapangan 18cm x 24cm, (b). Lapangan 43cm x 35cm



Gambar 4. Tegangan tabung terhadap efektivitas apron 0.35 mmPb

Hasil ini juga menunjukkan bahwa paparan sekunder lebih besar dibandingkan paparan primer. Hasil uji statistik *t-test paired* terdapat perbedaan yang signifikan pada ukuran luas lapangan 18cm x 24cm terhadap paparan primer dan sekunder dengan nilai *p value* <0.019. Selanjutnya terjadi perbedaan yang signifikan pada ukuran luas lapangan 43cm x 35cm terhadap paparan primer dan sekunder dengan nilai *p value* <0.003.

Gambar 3 menunjukkan pengukuran paparan radiasi saat menggunakan apron dan non-apron pada tegangan tabung 45-100kVp terhadap perubahan luas lapangan. Hasil pengukuran didapatkan non-apron pada ukuran luas lapangan 18cm x 24cm bervariasi 7x10⁻⁶-0.02mGy, sedangkan dengan apron 0.05-0.40mGy. Hasil pengukuran non-apron pada ukuran luas lapangan 43cm x 53cm bervariasi 7x10⁻⁶-0.02mGy, sedangkan dengan menggunakan apron didapatkan hasil 0.05-0.40mGy.

Hasil uji statistik *t-test paired* terdapat perbedaan yang signifikan pada paparan non-apron terhadap lapangan 18cm x 24cm dan 43cm x 35cm dengan nilai *p value* <0.003. Selanjutnya tidak terdapat perbedaan yang signifikan pada paparan menggunakan apron terhadap lapangan 18cm x 24cm dan 43cm x 35cm dengan nilai *p value* >0.09.

Gambar 4 grafik efektivitas penggunaan apron pada rentang tegangan tabung 45-100kVp pada luas lapangan

18cm x 24cm dan 43cm x 35cm ditemukan nilai persentasi yang sama antara keduanya pada rentang 100-93%. Selain itu dengan peningkatan tegangan tabung menyebabkan terjadinya penurunan atenuasi penyerapan material Pb.

Berdasarkan hasil survey proteksi radiasi pada prosedur radiologi intervensional dari 104 responden terdapat 4% menderita katarak dan 10,3% menerima paparan radiasi selama 10 tahun. Selain itu, ditemukan pada penelitian lainnya dari 25 pekerja radiasi hanya 3 orang (11%) yang melakukan uji apron berkala serta pengetahuan tentang jumlah paparan yang diterima selama bekerja tidak diketahui secara pasti. Hal ini menunjukkan bahwa sebagian responden memiliki tingkat pemahaman yang rendah terhadap efek radiasi (Behr-Meenen, C., von Boetticher, H., Kersten, J.F., Nienhaus, 2021).

Sosialisasi pemahaman proteksi radiasi sebaiknya dijadikan sebuah kegiatan wajib di instalasi radiologi. Selain itu, penggunaan apron dan TLD menjadi hal wajib dalam setiap melaksanakan prosedur pemeriksaan. Hal ini akan membantu dalam melakukan analisa penerimaan dosis radiasi saat bekerja (Park et al., 2012).

Apron Pb digunakan sebagai peralatan proteksi radiasi. Dari hasil penelitian ditemukan bahwa terjadi peningkatan dosis pada paparan sekunder dibandingkan paparan primer seperti

yang ditunjukkan pada gambar 1. Hal ini disebabkan karena pada energi yang penggunaannya berada pada rentang rendah 45-100kVp dapat menimbulkan efek fotolistrik dan efek hamburan (Alqahtani *et al.*, 2021).

Ukuran ketebalan apron menjadi faktor penting agar memastikan bahwa sinar-X diserap secara keseluruhan. Akan tetapi, kondisi yang terjadi pekerja radiasi dan vendor tidak mengetahui daya tembus radiasi yang melewati apron setelah melakukan pembelian dan bagaimana melakukan evaluasi (Li, Z., 2021; Lichliter, A., 2017). Dengan demikian perlu mengetahui daya tembus apron dengan menentukan ketebalan ekuivalen Pb yang didasarkan pada pengukuran radiasi primer bukan pada radiasi sekunder (Çetin, H., 2017).

Pada hasil penelitian yang ditunjukkan pada Gambar 3 terdapat perbedaan antara paparan radiasi non-apron dan menggunakan apron pada ukuran luas lapangan 18cm x 24cm dan 43cm x 35cm. Seiring peningkatan energi sinar-X, terjadi peningkatan dosis radiasi dan daya tembus sinar-X yang melewati apron. Hasil uji juga menunjukkan adanya perbedaan dosis non-apron saat terjadi peningkatan ukuran luas lapangan.

Hal tersebut juga sesuai dengan penelitian sebelumnya yang melakukan pengukuran *dose area product* yang menunjukkan bahwa terjadi peningkatan dosis radiasi yang disebabkan oleh peningkatan ukuran luas lapangan dengan nilai *coefficien correlation* $R^2=0.9643$. Adapun keterbatasan pada penelitian ini menggunakan *detector solid-state* sebagai alat untuk mengukur dosis radiasi pada luas lapangan penyinaran (Lança, L., Silva, 2013).

Selain itu, paparan yang melewati apron tidak terdapat perbedaan yang signifikan walaupun terjadi peningkatan ukuran luas lapangan, ini membuktikan bahwa apron efektif dalam penurunan paparan radiasi. Berdasarkan penelitian

menggunakan metode meta-analisis bahwa apron dengan ketebalan 0.35 mm pada tegangan tabung 60-120 kVp dapat menurunkan dosis sebesar 65-46% (Mehnati, P., 2020).

Penelitian ini juga didukung oleh penelitian Pan *et al.*, (2016) tentang upaya proteksi radiasi dengan menggunakan Pb dan tanpa Pb pada pemeriksaan radiologi intervensional yang menunjukkan terjadi penurunan dosis radiasi pada saat menggunakan Pb. Akan tetapi tidak dapat dihindari bahwa peningkatan tegangan tabung mampu menurunkan atenuasi terhadap penyerapan radiasi, namun hal ini dapat dihindari dengan selalu mempertimbangkan jarak dengan sumber radiasi (Aghaz, A., 2016)

Hasil pengukuran efektivitas ditemukan pada peningkatan tegangan tabung dapat menurunkan efektivitas apron. Dalam penelitian ini, tegangan tabung yang digunakan pada rentang 45-100kVp dengan ketebalan apron 0.35 mmPb terhadap perubahan luas lapangan 18cm x 24cm dan 43cm x 35cm, nilai efektivitas kedua luas lapangan cenderung sama yaitu 99-93%.

Hasil ini sesuai dengan penelitian terdahulu tentang efektivitas Pb pada ketebalan 0,35mm dengan variasi tegangan tabung pada rentang klinis yang mendapatkan nilai efektivitas 99-93%. Selain itu, secara klinis apron Pb dengan ketebalan 0.35 mmPb mempunyai efektivitas 98,9%. Oleh karena itu, direkomendasikan pada prosedur radiologi intervensional (Kato *et al.*, 2021; Pouloupoulos *et al.*, 2022).

Laporan NCRP memberikan rekomendasi nilai batas dosis pada fasilitas radiologi 10mSv/ tahun. Hasil penelitian beberapa tahun terakhir melaporkan bahwa tidak ada fasilitas radiologi yang melewati nilai batas dosis. Selain memiliki keuntungan dapat menurunkan dosis radiasi dalam penggunaannya, apron Pb perlu di pertimbangkan.

Semakin tebal ukuran Pb yang digunakan, maka berat apron akan mengalami peningkatan, hal ini menyebabkan risiko cedera pada tulang belakang, pinggul, lutut dan pergelangan kaki (Aghaz *et al.*, 2016; Dalah *et al.*, 2018; Endo *et al.*, 2021; Haga *et al.*, 2017; Kowatari *et al.*, 2022; Mori *et al.*, 2014; Oyar *et al.*, 2012; Pan *et al.*, 2016; Ramanathan *et al.*, 2021).

Prosedur *quality control* (QC) untuk pengujian rutin apron dilakukan saat uji penerimaan saat pembelian dengan tujuan untuk memastikan struktur dan rasio material Pb sesuai. Uji apron disarankan 1 tahun sekali (Oyar, 2012). Salah satu prosedur sederhana dalam pengujian rutin apron menggunakan *computer radiography* (CR) dengan menganalisa nilai *pixel value ratio*, karena terdapat hubungan linear antara *pixel value* terhadap paparan radiasi. Prosedur sebelum melakukan pengujian sebaiknya memastikan kehandalan peralatan CR agar tidak terjadi kesalahan dalam proses pengujian rutin (Lin *et al.*, 2020; Wargo *et al.*, 2020).

Pengujian rutin apron Pb dapat dilakukan dengan cara membagi menjadi 4 kuadran: bagian atas kanan dan kiri, bagian bawah kanan dan kiri. Selanjutnya parameter penilaian dengan observasi secara visual pada apron yang dianggap mengalami retakan ataupun kebocoran. Disarankan uji apron difokuskan pada bagian atas sebelah kanan karena diketahui paling banyak mengalami retak dan bocor. Hal ini disebabkan karena bagian kanan paling banyak melaksanakan kegiatan selama pemeriksaan radiografi (Björkås *et al.*, 2020).

Beberapa tahun terakhir penelitian difokuskan pada pengembangan material apron berbahan Pb yang memiliki fleksibilitas dan mampu melindungi dari paparan > 100kVp. Akan tetapi apron Pb memiliki kekurangan dimana dapat menimbulkan risiko gangguan cedera fisik dan karena timbal menempati urutan

kedua dari dua puluh bahan beracun menurut lembaga *Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act* (CERCLA) (Aghamiri *et al.*, 2011; Livingstone *et al.*, 2018).

PENUTUP

Nilai efektivitas penggunaan apron pada rentang tegangan tabung 45-100kVp untuk penggunaan luas lapangan 18 cm x 24 cm dan 43 cm x 35 cm memiliki nilai persentasi yang sama 99.9-93%, selain itu dengan peningkatan tegangan tabung menyebabkan terjadinya penurunan atenuasi apron Pb.

Saran sebelum apron digunakan untuk prosedur pemeriksaan radiografi sebaiknya dilakukan uji penerimaan (*acceptance test*) serta dilanjutkan dengan pengujian rutin secara berkala untuk mengetahui efektifitas dan kondisi apron saat digunakan.

DAFTAR PUSTAKA

- AbuAlRoos, N.J., Baharul Amin, N.A., Zainon, R. (2019) 'Conventional and new lead-free radiation shielding materials for radiation protection in nuclear medicine: A review.', *Radiation Physics and Chemistry* [Preprint].
- Aghamiri, M.R., Mortazavi, S.M.J., Tayebi, M., Mosleh-Shirazi, M.A., Baharvand, H., Tavakkoli-Golpayegani, A., Zeinali-Rafsanjani, B. (2011) 'A Novel Design for Production of Efficient Flexible Lead-Free Shields against X-ray Photons in Diagnostic Energy Range.', *J Biomed Phys Eng 1*. [Preprint].
- Aghaz, A., Faghihi, R., Mortazavi, S.M.J., Haghparast, A., Mehdizadeh, S., Sina, S. (2016) 'Radiation attenuation properties of shields containing micro and Nano WO₃ in diagnostic X-ray energy range.', *International Journal of Radiation Research*, 14, pp. 127–131.
- Alhassan, M., Khan, B., Baraya, J.T. (2020) 'Evaluation of 1.5mm Lead Shield for

- Radiological Protection and Comparison of Calculated and Measured Results of Equivalent Dose.', *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*. [Preprint].
- Alqahtani, A.M., Alqahtani, M.S., Hussein, K.I., Alkulib, A.J., Alqahtani, F.F., Yousef, E. (2021) 'Radiation protection assessment of gamma photons in 64TeO 2-10WO 3-10Nb 2 O 5-15KF-1La 2 O 3 glasses doped with Tm 2 O 3 using photon-shielding and dosimetry software.', *Chalcogenide Letters*, 18(513-523).
- Behr-Meenen, C., von Boetticher, H., Kersten, J.F., Nienhaus, A. (2021) 'Radiation Protection in Interventional Radiology/Cardiology-Is State-of-the-Art Equipment Used?', *Int J Environ Res Public Health*, 18.
- Bjørkås, L.W., Blø, S., Rekdal, M.K., Rusandu, A. (2020) 'Quality of radiation protection aprons and quality control routines at different diagnostic imaging modalities', *Radiography Open*, 6, pp. 64-74.
- Çetin, H., Yurt, A., Yüksel, S.H. (2017) 'The Absorption Properties of Lead-Free Garments for Use In Radiation Protection', *Radiat Prot Dosimetry*, 173, pp. 345-350.
- Dalah, E.Z., Mahdi, O., Elshami, W., Abuzaid, M.M., David, L.R., Mira, O.A., Obaideen, A., Elmahdi, H.M., Bradley, D.A. (2018) 'Occupational doses to cardiologists performing fluoroscopically-guided procedures.', *Radiation Physics and Chemistry*, 153, pp. 21-26.
- Elshami, W., Abuzaid, M.M., Tekin, H.O. (2020) 'Effectiveness of breast and eye shielding during cervical spine radiography: An experimental study.', *Risk Manag Healthc Policy*. [Preprint].
- Endo, M., Haga, Y., Sota, M., Tanaka, A., Otomo, K., Murabayashi, Y., Abe, M., Kaga, Y., Inaba, Y., Suzuki, M., Meguro, T., Chida, K. (2021) 'Evaluation of novel X-ray protective eyewear in reducing the eye dose to interventional radiology physicians.', *J Radiat Res*, 62, pp. 414-419.
- Haga, Y., Chida, K., Kaga, Y., Sota, M., Meguro, T., Zuguchi, M. (2017) 'Occupational eye dose in interventional cardiology procedures', *Scientific Reports*, pp. 1-7.
- Hayre, C.M., Bungay, H., Jeffery, C. (2020) 'How effective are lead-rubber aprons in protecting radiosensitive organs from secondary ionizing radiation?', *Radiography* [Preprint].
- Johansen, S., Hauge, I.H.R., Hogg, P., England, A., Lança, L., Gunn, C., Sanderud, A. (2018) 'Are Antimony-Bismuth Aprons as Efficient as Lead Rubber Aprons in Providing Shielding against Scattered Radiation?', *J Med Imaging Radiat Sci* [Preprint].
- Kato, M., Chida, K., Munehisa, M., Sato, T., Inaba, Y., Suzuki, M., Zuguchi, M. (2021) 'Non-Lead Protective Aprons for the Protection of Interventional Radiology Physicians from Radiation Exposure in Clinical Settings: An Initial Study', *Diagnostics* (Basel), 11.
- Kim, S.C. (2021) 'Construction of a Medical Radiation-Shielding Environment by Analyzing the Weaving Characteristics and Shielding Performance of Shielding Fibers Using X-ray-Impermeable Materials.', *Applied Sciences*, 11, p. 1705.
- Kowatari, M., Nagamoto, K., Nakagami, K., Tanimura, Y., Moritake, T., Kunugita, N. (2022) 'Experimental Evaluation of Scattered X-Ray Spectra due to X-Ray Therapeutic and Diagnosis Equipment for Eye Lens Dosimetry of Medical Staff', *Journal of Radiation Protection and Research*, 47, pp. 39-49.
- Lança, L., Silva, A. (2013) *Digital imaging systems for plain radiography*.
- Li, Z., Zhou, W., Zhang, X., Gao, Y., Guo,

- S. (2021) 'High-efficiency, flexibility and lead-free X-ray shielding multilayered polymer composites: layered structure design and shielding mechanism', *Sci Rep*, 11.
- Lichliter, A., Weir, V., Heithaus, R.E., Gipson, S., Syed, A., West, J., Rees, C. (2017) 'Clinical Evaluation of Protective Garments with Respect to Garment Characteristics and Manufacturer Label Information.', *J Vasc Interv Radiol*, 28, pp. 148–155.
- Lin, P.J.P., Aljabal, A.F., Wargo, R.R. (2020) 'Characterization and verification of lead thickness of commercially available lead foil tape for the measurements of lead equivalency of radio-protective shields', *J Appl Clin Med Phys*, 21, pp. 216–220.
- Livingstone, R.S., Varghese, A. (2018) 'A simple quality control tool for assessing integrity of lead equivalent aprons', *Indian J Radiol Imaging*, 28, pp. 258–262.
- López, P.O., Dauer, L.T., Loose, R., Martin, C.J., Miller, D.L., Vañó, E., Doruff, M., Padovani, R., Massera, G., Yoder, C. (2018) 'Occupational Radiological Protection in Interventional Procedures', *ICRP Publication*, 139, pp. 1–118.
- Maeda, T., Hayashi, H., Lee, C., Ando, M., Takegami, K., Kimoto, N., Konishi, T., Murakami, S., Maki, M., Yamashita, K., Higashino, K. (2022) 'Experimental study of X-ray dose reduction factor when using various size bismuth and lead particles', *Radiation Physics and Chemistry*, 195, p. 110049.
- Mehnati, P., Malekzadeh, R., Sooteh, M.Y. (2020) 'Application of personal non-lead nano-composite shields for radiation protection in diagnostic radiology: a systematic review and meta-analysis', *Nanomed J*, 7, pp. 170–182.
- Mori, H., Koshida, K., Ishigamori, O., Matsubara, K. (2014) 'Evaluation of the effectiveness of X-ray protective aprons in experimental and practical fields', *Radiol Phys Technol*, 7, pp. 158–166.
- Mortazavi, S.M.J., Omidifar, N., Faghihi, R., Mehdizadeh, S., Masoumi, S., Hashemi, S.M., Haghani, M., Nowrouz-Alizadeh, F., Movahhedi, M.M. (2012) 'Are Radiation Exposure Levels Used in Cardiology Dangerous?', *J Biomed Phys Eng*, 2.
- Oyar, O., Kışlalio lu, A. (2012) 'How protective are the lead aprons we use against ionizing radiation?', *Diagn Interv Radiol*, 18, pp. 147–152.
- Pan, L.F. a., Kittipayak, S., Yen, S.L. in, Pan, L.K. wang, Lin, C.H. sun (2016) 'Evaluation of the occupational X-rays dose of the medical staff in a cardiac catheterization laboratory using an acrylic phantom and semiconductor dosimeter', *Hell J Nucl Med*, 19, pp. 140–146.
- Park, P.E., Park, J.M., Kang, J.E., Cho, J.H., Cho, S.J., Kim, J.H., Sim, W.S., Kim, Y.C. (2012) 'Radiation safety and education in the applicants of the final test for the expert of pain medicine', *Korean J Pain*, 25, pp. 16–21.
- Poulopoulos, P., Brezesinski, T., Kim, S.-C. (2022) 'Preparation and Performance Evaluation of X-ray-Shielding Barium Sulfate Film for Medical Diagnosis Using PET Recycling and Multi-Carrier Principles', *Coatings*, 12, p. 973.
- Ramanathan, V., Almeida, S., Fernando, K. (2021) 'Occupational dose measurement for radiographers during cardiac catheterization procedures', *International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP)*, 11, pp. 476–481.
- Wargo, R.R., Aljabal, A.F., Lin, P.J.P. (2020) 'Evaluation and verification of a simplified lead equivalency measurement method', *J Appl Clin Med Phys*, 21, pp. 152–156.