

ANALISIS TINGKAT ABSORPSI BERKAS SINAR-X PADA SINTESIS KOMPOSIT KAKTUS (*Opuntia spp.*) DAN TIMBAL (II) ASETAT ($Pb(CH_3COO)_2$) SEBAGAI MATERIAL APRON

X-RAY BEAM ABSORPTION RATE ANALYSIS IN CACTUS COMPOSITE SYNTHESIS (*Opuntia spp.*) ACETATE ($Pb(CH_3COO)_2$) AS AN APRON MATERIAL

Intan Rahmawati¹, B.Y. Eko Budi Jumpeno², June Mellawati², Ramlan^{1*}

¹Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya, Jl. Palembang-Prabumulih KM 32 Inderalaya, Ogan Ilir, 30662

²Pusat Riset Teknologi Keselamatan, Metrologi dan Mutu Nuklir, Organisasi Riset Tenaga Nuklir, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Kawasan Sains dan Teknologi B.J. Habibie, Tangerang Selatan, 15314

*E-mail korespondensi: ramlan@unsri.ac.id

Diterima 17 Mei 2023, diterima dalam bentuk perbaikan 20 Juli 2023, disetujui 15 Agustus 2023

ABSTRAK

ANALISIS TINGKAT ABSORPSI BERKAS SINAR-X PADA SINTESIS KOMPOSIT KAKTUS (*Opuntia spp.*) DAN TIMBAL (II) ASETAT ($Pb(CH_3COO)_2$) SEBAGAI MATERIAL APRON. Apron proteksi radiasi efektif dalam mengurangi paparan laju dosis radiasi sinar-X, namun, sebagai baju pelindung radiasi masih memiliki kelemahan, misalnya relatif berat (5-7 kg), sehingga akan berdampak buruk pada sistem muskuloskeletal tubuh, terutama pada posisi tulang belakang. Tujuan penelitian ini adalah untuk memperoleh sintesis komposit material apron proteksi radiasi yang dapat menyerap radiasi sinar-X secara optimal dan nyaman digunakan. Penelitian ini menggunakan bahan serat kaktus *Opuntia ficus-indica* ukuran 80 mesh, disintesis dengan timbal (II) asetat sebagai bahan pengisi, dengan variasi 20, 33, 50, 67, dan 80% sehingga diperoleh komposit dengan ketebalan sekitar 0,36 - 0,74 cm. Pengujian menggunakan rontgen radiografi umum dan alat ukur radiasi Unfors RaySafe XI dengan energi 80 kVp, arus 50 mA, serta jarak antara tabung sinar-X dengan detektor sejauh 100 cm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin banyak komposisi serat kaktus pada sampel, semakin kecil nilai koefisien atenuasi yang diperoleh. Koefisien atenuasi maksimum sebesar $3,85\text{ cm}^{-1}$ diperoleh pada variasi timbal (II) asetat 80% dengan tebal 0,41 cm dan berat RAR 84%. Pada variasi 80% tersebut diperoleh densitas paling optimal, koefisien atenuasi dan RAR paling tinggi, serta HVL paling rendah.

Kata kunci: Apron proteksi radiasi sinar-X, kaktus *Opuntia spp.*, komposit, koefisien atenuasi, HVL, RAR

ABSTRACT

X-RAY BEAM ABSORPTION RATE ANALYSIS IN CACTUS COMPOSITE SYNTHESIS (*Opuntia spp.*) ACETATE ($Pb(CH_3COO)_2$) AS AN APRON MATERIAL. Radiation protection apron is effective in reducing the rate of exposure to X-ray radiation doses, but as a radiation protective suit, it still has weaknesses, which one of them being relatively heavy (5-7 kg), so it will have a negative impact on the musculoskeletal system of the body, especially on the position of the spine. The objective of this research is to obtain a composite synthesis of radiation protection apron that can absorb X-ray radiation optimally and conveniently. This study used a fiber material of *Opuntia ficus-indica* cactus with the size of 80 mesh, synthesized with lead (II) acetate as the filling material with variations of 20, 33, 50, 67, and 80%, so that a composite thickness ranging from 0.36 to 0.74 cm was obtained. The test used a general X-ray and Unfors RaySafe XI radiation meter with an energy of 80 kVp, a current of 50 mA, and a distance between the X-rays and the detector of 100 cm. The results of this study showed that the higher the cactus fiber composition in the sample, the smaller the value of the attenuation coefficient obtained. The maximum attenuation coefficient is 3.85 cm^{-1} , obtained on an 80% lead (II) acetate variation with a thickness of 0.41 cm and a RAR weight of 84%. At the 80% variation, we obtained the most optimal density, highest attenuation and RAR coefficient, as well as the lowest HVL.

Keywords: X-ray radiation protection apron, *Opuntia spp.* cactus, composite, attenuation coefficient, HVL, RAR.

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi 4.0 mendorong banyak pemanfaatan radiasi yang diterapkan untuk memenuhi kebutuhan fundamental makhluk hidup, contohnya pada bidang medis radiologi diagnostik [1-5]. Namun, dengan banyaknya pemanfaatan tersebut, banyak pula dampak negatif yang ditimbulkan dari penggunaan radiasi [6-8]. Ketika mengenai tubuh, radiasi tersebut dapat menyebabkan sel-sel tubuh mengalami perubahan struktur yang tidak hanya dapat menimbulkan bahaya kerusakan DNA pada individu yang terpapar, namun juga dapat menimbulkan efek genetik pada keturunannya [2,9,10]. Bahaya tersebut dapat dihindari dengan menerapkan As Low As Reasonably Achievable (ALARA), yakni pendekatan optimasi yang bertujuan untuk mengurangi jumlah paparan radiasi pekerja di medan radiasi dengan cara mengurangi waktu paparan, menjaga jarak sejauh mungkin dari sumber radiasi, dan menggunakan alat proteksi diri yang salah satunya adalah apron proteksi radiasi [2,11,12].

Apron proteksi radiasi merupakan perisai radiasi primer yang dapat melindungi pekerja radiasi dari paparan radiasi yang secara langsung mengarah ke tubuh [13,14]. Fungsi apron proteksi radiasi sangat penting bagi pekerja radiasi, sehingga karakteristik apron proteksi radiasi harus efektif menyerap paparan radiasi, kuat, aman dan nyaman saat digunakan. Berdasarkan persyaratan tersebut, apron proteksi radiasi biasanya berbahan utama serat yang dikombinasi dengan bahan pengisi Pb (timbal) yang memiliki densitas sangat besar sehingga efektif menyerap radiasi [15].

Namun, terdapat kekurangan dari apron proteksi radiasi berbahan utama timbal, yaitu memiliki berat rata-rata 5 – 7 kg. Hal tersebut membuat pekerja radiasi cepat merasa lelah [16,17]. Sebanyak 67% staff medis yang terlibat dalam prosedur intervensi dalam jangka waktu lama akan mengalami nyeri pada sistem *musculoskeletal* akibat beratnya baju apron proteksi radiasi yang dikenakannya. Apron proteksi radiasi juga dapat mengalami kerusakan jika disimpan dengan cara yang kurang tepat [17,18]. Kekurangan dari apron proteksi radiasi tersebut menarik para peneliti di dunia untuk berinovasi melakukan penelitian lebih lanjut. Salah satu cara yang sedang dikembangkan ialah dengan menyintesis apron proteksi radiasi berbahan utama timbal dengan bahan lain, misalnya serat alam.

Peneliti sebelumnya [19] telah mengembangkan apron dari sintesis serat rami dan resin *epoxy*, peneliti lainnya [20] membuat apron polimer dengan pati singkong dan timbal nitrat. Di samping kedua jenis bahan alam tersebut, dari penelitian Zourgui [21] diketahui bahwa terdapat pula tanaman kaktus yang mampu menyerap radiasi UV karena sifat antioksidannya yang tinggi. Antioksidan tersebut diperoleh dari kandungan senyawa flavonoid yang tinggi [22]. Dalam penelitian Erensayin [23], bahan serat kaktus juga mampu menyerap medan magnet di sekitar barang elektronik walaupun hasilnya tergolong sangat rendah. Kemudian, penelitian Leon [24] membuktikan bahwa lendir kaktus, khususnya kaktus *Opuntia ficus-indica*, juga dapat mengurangi kadar yodium radioaktif dan polutan cesium dalam larutan. Berdasarkan hal tersebut, diduga bahwa tanaman kaktus, khususnya *Opuntia ficus-indica*, memiliki kemungkinan menjadi bahan sintesis komposit apron proteksi radiasi untuk dapat menyerap radiasi sinar-X pada saat penyinaran radiologi diagnostik.

Sampel komposit bahan apron proteksi radiasi kaktus *Opuntia ficus-indica* dan timbal (II) asetat disintesis menggunakan metode *blending* dengan variasi 80%, 67%, 50%, 33% dan 20%. Lalu sampel dicetak dan dikeringkan dengan suhu ruang yang kemudian diukur dimensinya untuk mendapatkan densitas sampel. Tingkat absorpsi radiasi sinar-X diuji menggunakan rontgen *radiography* umum dan alat ukur radiasi *Unfors Raysafe XI* untuk mendapatkan laju dosis dan koefisien atenuasi dari setiap sampel. Berdasarkan bahan dan metode tersebut, penelitian ini diharapkan memperoleh sampel komposit bahan apron proteksi radiasi yang optimal mengabsorpsi radiasi sinar-X, sesuai standar apron proteksi radiasi sinar-X radiologi diagnostik dengan tebal 0,25 mm apron timbal murni, menurut ketentuan Perka BAPETEN Nomor 8 Tahun 2011, yang lebih ringan jika digunakan dan lebih terjangkau.

METODOLOGI

Metode kuantitatif analitik digunakan dalam penelitian ini untuk menghitung koefisien atenuasi, koefisien atenuasi massa dan *Radiation Attenuation Ratio* (RAR). Pada penelitian ini, sampel komposit apron proteksi radiasi sinar-X disintesis menggunakan metode *blending*. Timbal (II) asetat ($\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2$) digunakan sebagai *filler* untuk menahan radiasi sinar-X yang dicampurkan ke serat kaktus *Opuntia ficus-indica* sebagai fiber. Selanjutnya sebagai matriks, ditambahkan resin dan katalis untuk pelarut guna mendapat sampel dengan variasi persentase Pb (II) asetat (0, 20, 33, 50, 67, dan 80) %. Sampel 0% timbal (II) asetat (kontrol) digunakan sebagai pembuktian sejauh mana serat kaktus *Opuntia ficus-indica* dapat menyerap radiasi sinar-X. Setelah dilakukan *blending*, sampel dimasukkan ke cetakan silikon dan dikeringkan pada suhu ruangan. Variasi yang digunakan yakni 0%, 20%, 33%, 50%, 67% dan 80% dengan komposisi diterangkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi serat kaktus *Opuntia* dan timbal (II) asetat

| No. | Persentase rasio komposisi sampel (%) | Komposisi serat kaktus (g) | Komposisi timbal (II) asetat (g) |
|-----|---------------------------------------|----------------------------|----------------------------------|
| 1. | 0% | 20 | 0 |
| 2. | 20% | 20 | 5 |
| 3. | 33% | 10 | 5 |
| 4. | 50% | 5 | 5 |
| 5. | 67% | 5 | 10 |
| 6. | 80% | 5 | 20 |

Pengujian sampel komposit bahan apron proteksi radiasi sinar-X dilakukan dengan menggunakan alat rontgen *radiography* umum dan alat ukur radiasi *Unfors RaySafe XI*. Penggunaan tegangan tabung radiasi pada alat rontgen *radiography* umum adalah sebesar 80 kVp, dengan besaran arus 50 mA, dan waktu penyinaran sampel 0,1 detik. Jarak yang antara tabung sinar-X dengan alat ukur radiasi *Unfors RaySafe XI* yakni sejauh 100 cm. Sebagai penyanggah sampel untuk meminimalisir adanya radiasi hamburan, digunakan kardus setinggi 45 cm. Kemudian, *sample holder* dengan luas 900 cm² diletakkan sebagai tempat alat ukur radiasi *Unfors RaySafe XI* dan sampel yang akan diuji, agar lebih akurat terhadap pancaran radiasi sinar-X. Alat ukur radiasi *Unfors RaySafe XI* diletakkan tepat di tengah *sample holder*. Selanjutnya, pengukuran laju dosis pada sampel komposit bahan apron proteksi radiasi dan tanpa sampel dilakukan pada posisi tepat di atas alat ukur radiasi sinar X *Unfors RaySafe XI*, pada setiap variasi sampel yang diuji. Pengaturan perangkat rontgen *radiography* umum dan alat ukur radiasi *Unfors RaySafe XI*, serta sampel komposit bahan apron proteksi radiasi sinar-X ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Uji absorpsi radiasi sinar-X pada sampel komposit apron proteksi radiasi sinar-X

Beberapa hal penting yang harus diketahui guna mengetahui tingkat efektifitas sampel komposit bahan apron proteksi radiasi sinar-X, diantaranya adalah *Half Value Layer* (HVL), koefisien atenuasi, koefisien atenuasi massa, dan *Radiation Attenuation Ratio* (RAR). Koefisien atenuasi adalah penurunan intensitas berkas radiasi saat melewati suatu material. Penurunan intensitas merupakan hasil interaksi pancaran radiasi yang diserap maupun yang dihamburkan terhadap material yang dilewati [25]. Nilai koefisien atenuasi berbanding lurus dengan nomor atom pada material yang digunakan [26]. Redaman sinar-X oleh suatu bahan ditentukan oleh nomor atom, densitas dan ketebalan, dan dinyatakan dengan rumus berikut [20], [27]:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$

Dan juga dapat diperoleh dengan membalik persamaan sebagai berikut:

$$\mu = -\frac{\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)}{x} \quad (2)$$

Keterangan:

I = Intensitas radiasi/ laju dosis yang ditransmisikan ($\mu\text{Gy}/\text{min}$)

I_0 = Intensitas radiasi/laju dosis tanpa penyerap ($\mu\text{Gy}/\text{min}$)

μ = Koefisien atenuasi linier radiasi (cm^{-1})

x = Tebal perisai (cm)

HVL adalah tebal material yang dapat mengurangi intensitas menjadi setengah nilai awal, dan dinyatakan dengan rumus berikut [28]:

$$HVL = \frac{0,693}{\mu} \quad (3)$$

Koefisien atenuasi massa juga dikenal sebagai koefisien penyerapan massa, didefinisikan sebagai koefisien penyerapan pada ketebalan 1 g bahan dengan luas permukaan 1 cm^2 . Satuan dari koefisien atenuasi massa yaitu g/cm^2 [29]. Koefisien atenuasi massa dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad (4)$$

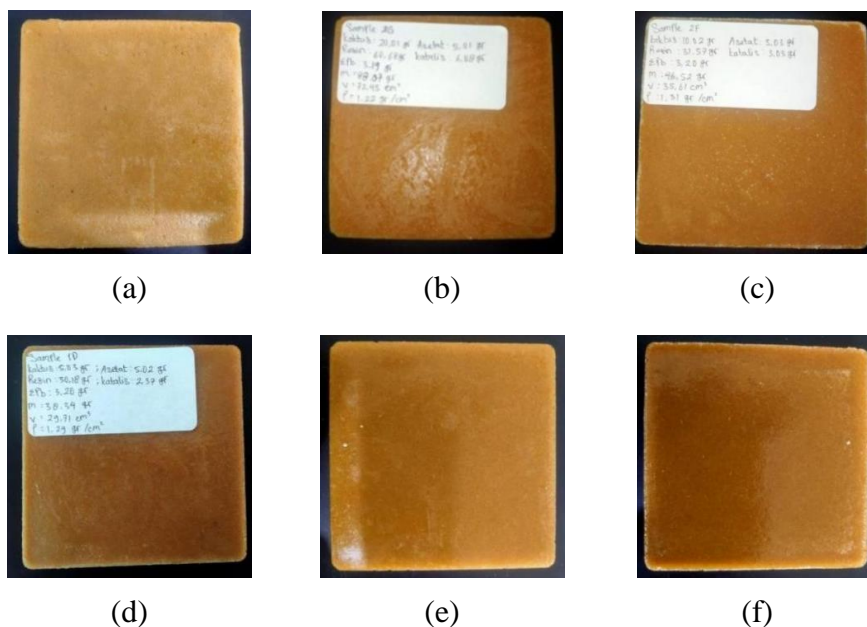
Dalam penelitian ini, *Radiation Attenuation Ratio* (RAR) untuk setiap sampel dihitung dengan persamaan [27]:

$$RAR(\%) = \frac{(I_0 - I)}{I_0} \times 100 \quad (5)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Sampel

Hasil sintesis sampel apron proteksi radiasi serat kaktus dan timbal (II) asetat ($\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2$) ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 2. Sampel komposit apron proteksi radiasi sinar-X dengan variasi komposisi serat Kaktus dan timbal (II) asetat

Gambar 2 memperlihatkan bahwa sampel komposit bahan apron proteksi radiasi memiliki warna coklat yang didapat dari serat kaktus *Opuntia ficus-indica*. Makin banyak komposisi serat kaktus dan timbal (II) asetat, akan makin pekat warna coklat sampel yang diperoleh. Selanjutnya pada sampel (a), (b) dan (c) terlihat permukaan sampel lebih kasar dan berpori dibandingkan sampel (d), (e) dan (f). Hal ini disebabkan oleh adanya kandungan serat kaktus *Opuntia* pada campuran sintesis sampel komposit bahan apron proteksi radiasi sinar-X tersebut.

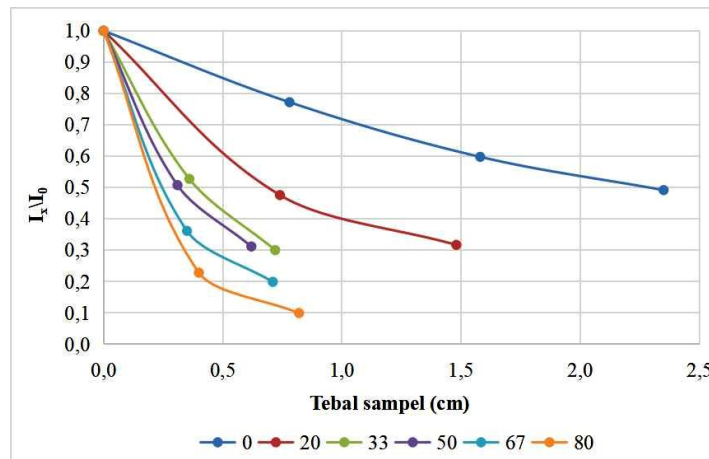
Makin banyak komposisi serat kaktus yang digunakan, maka permukaan sampel akan makin berpori dan kasar. Hasil ukur dimensi sampel komposit bahan apron proteksi radiasi sinar-X ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil ukur dimensi dan densitas sampel komposit bahan apron proteksi radiasi

| No | Sample (Persentase filler $Pb(Asetat)_2$) (%) | Tebal (cm) | Massa (g) | Volume (cm^3) | ρ (g/cm^3) |
|----|--|------------|-----------|-------------------|---------------------|
| 1 | 0 | 2,35 | 87,09 | 80,79 | 1,13 |
| 2 | 20 | 0,74 | 87,73 | 72,53 | 1,21 |
| 3 | 33 | 0,38 | 45,21 | 35,64 | 1,27 |
| 4 | 50 | 0,36 | 38,49 | 29,68 | 1,30 |
| 5 | 67 | 0,36 | 44,80 | 34,38 | 1,33 |
| 6 | 80 | 0,41 | 55,93 | 39,35 | 1,43 |

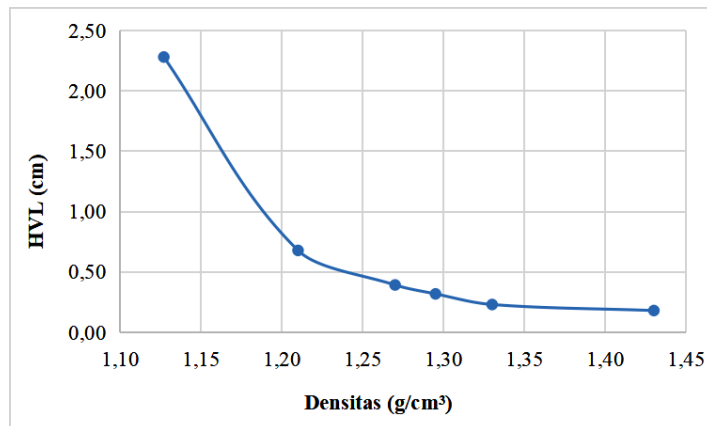
Hubungan Komposisi Filler Terhadap Intensitas, Koefisien Atenuasi, HVL, dan RAR

Uji absorpsi radiasi sinar-X dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui tingkat radiasi sinar-X yang terserap oleh sampel komposit bahan apron proteksi radiasi. Data hasil uji radiasi sinar-X dimuat pada Gambar 3.



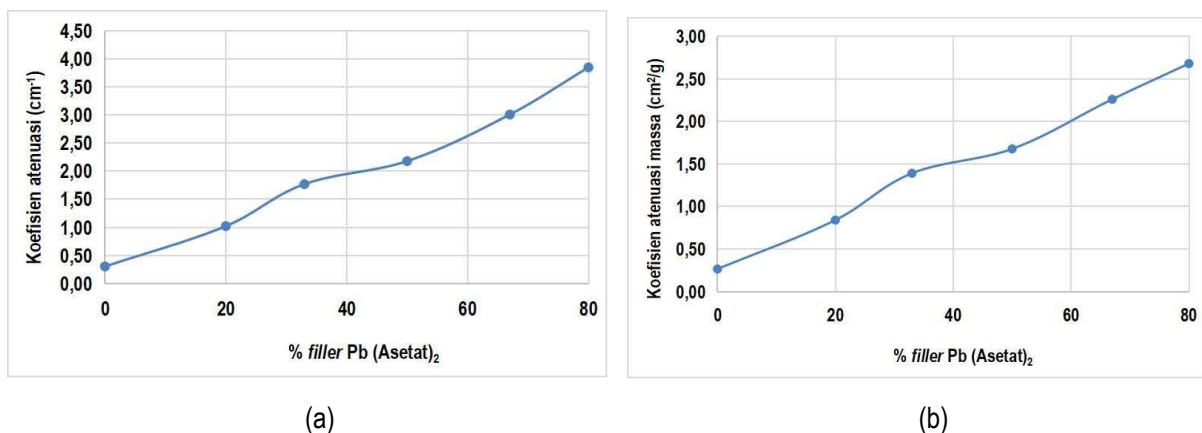
Gambar 3. Grafik hubungan tebal sampel terhadap rasio intens

Berdasarkan hasil uji radiasi sinar-X, didapatkan laju dosis tanpa sampel dan laju dosis setelah diberi sampel sebagaimana tampak pada Gambar 3. Pengaruh komposisi serat kaktus dan filler timbal (II) asetat secara eksponensial cenderung berbanding terbalik terhadap laju dosis. Seiring bertambahnya konsentrasi timbal (II) asetat pada sintesis sampel komposit bahan apron proteksi radiasi, terjadi penurunan laju dosis radiasi yang melalui sampel komposit bahan apron proteksi radiasi dan penurunan laju dosis yang mengenai detektor juga akan semakin cepat [30]. Bentuk grafik pada Gambar 3 adalah eksponensial, melengkung, dan tidak memotong sumbu x, hal ini sesuai dengan teori pada persamaan (1), yaitu eksponensial, sehingga dapat diketahui bahwa timbal (II) asetat dengan densitas lebih akan mampu menahan laju dosis radiasi dengan lebih kuat.



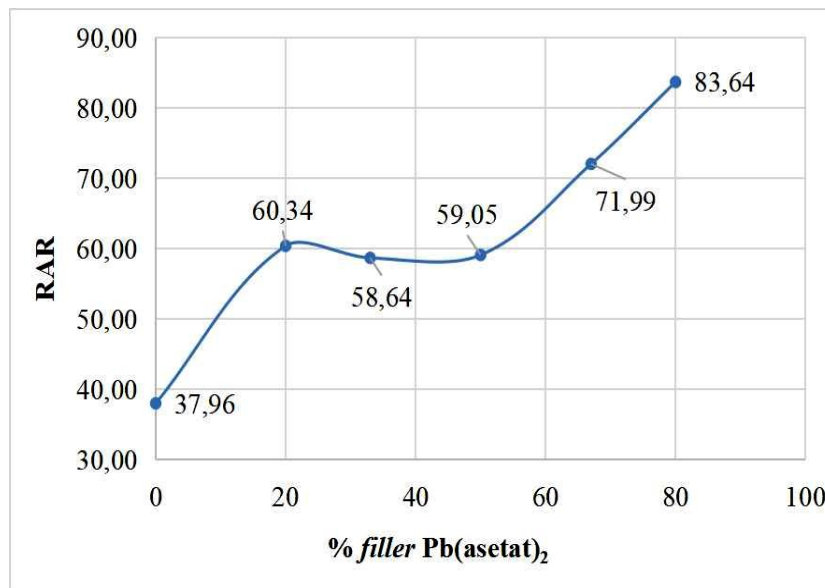
Gambar 4. Grafik hubungan HVL terhadap densitas sampel

Gambar 4 menunjukkan kecenderungan hubungan antara HVL terhadap densitas sampel. *Half Value Layer* (HVL) merupakan suatu nilai ketebalan bahan yang dibutuhkan untuk mengurangi laju dosis radiasi sinar-X menjadi setengah dari laju dosis tanpa sampel. Pada penelitian ini didapatkan nilai HVL yang cenderung menurun seiring bertambahnya densitas dari sampel komposit apron proteksi radiasi. Hal ini didasari oleh semakin baiknya kerapatan antar bahan yang disintesis, maka semakin optimal pula peredaman berkas radiasi sinar-X yang melalui sampel tersebut. Besarnya laju dosis yang teredam setelah melalui sampel komposit bahan apron proteksi radiasi disebut sebagai koefisien atenuasi. Faktor *build up* diabaikan karena penelitian ini menggunakan permukaan lapangan X-ray seluas 10 cm x 10 cm, sama dengan ukuran sampel material apron. Di samping itu, detektor dipasang menempel tepat di permukaan bawah sampel, sehingga tidak ada koreksi faktor *build up* karena berkas X-ray yang menyebar dapat diabaikan. Dengan demikian, koefisien atenuasi dapat diperoleh menggunakan rumus persamaan (5). Hubungan antara persentase rasio *filler* timbal (II) asetat dan serat kaktus terhadap koefisien atenuasi dan koefisien atenuasi massa ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik hubungan persentase rasio *filler* timbal (II) asetat terhadap koefisien atenuasi

Gambar 5 menunjukkan pengaruh persentase rasio *filler* timbal (II) asetat terhadap kecenderungan koefisien atenuasi dan koefisien atenuasi massa. Semakin tinggi komposisi timbal (II) asetat pada sampel, semakin tinggi pula nilai koefisien atenuasi yang didapatkan. Nilai koefisien atenuasi cenderung lebih tinggi dibandingkan nilai koefisien atenuasi massa. Hal tersebut dikarenakan nilai koefisien atenuasi massa yang dihasilkan adalah representasi dari laju dosis yang terserap di dalam medium bahan, sedangkan koefisien atenuasi merupakan laju dosis yang dilemahkan tanpa dipengaruhi massa jenis bahan yang dilewati. Berdasarkan data pada Gambar 5, didapatkan pula nilai koefisien atenuasi linier dan koefisien atenuasi massa paling tinggi, yaitu pada sampel komposit bahan apron proteksi radiasi 80% timbal (II) asetat, dan yang terendah diperoleh pada sampel 0% timbal (II) asetat.



Gambar 6. Grafik hubungan persentase rasio filler timbal (II) asetat terhadap RAR

Radiation Attenuation Ratios (RAR) atau daya serap, merupakan tingkat absorpsi radiasi dari sampel komposit bahan apron proteksi radiasi yang telah dibuat. Gambar 6 menunjukkan grafik hubungan dari jumlah timbal (II) asetat yang ditambahkan terhadap nilai RAR. Nilai RAR akan meningkat seiring dengan bertambahnya komposisi timbal (II) asetat. Ketidaksesuaian grafik pada Gambar 6 dengan teori tersebut, di mana RAR 33% dan RAR 50% tampak lebih rendah dibandingkan dengan RAR 20% disebabkan oleh proses *blending* sampel yang kurang sempurna. Pada proses penelitian ini, setelah proses pengeringan terlihat ada bahan yang menggumpal di beberapa bagian dan ketebalan sampel tidak merata. Selain dari proses *blending* yang kurang sempurna, ketidaksesuaian RAR juga disebabkan oleh cetakan silikon yang mengendur mengikuti berat hasil sintesis sampel. Dengan demikian, saat pengujian sampel 20% timbal (II) asetat, sinar-X yang jatuh tepat di tengah sampel akan mengenai lapisan sampel dengan komposisi timbal (II) asetat yang lebih banyak. Adapun, berdasarkan data yang dihasilkan, sampel 80% dengan komposisi filler timbal (II) asetat menunjukkan kemampuan proteksi radiasi yang lebih tinggi sebagai sampel komposit bahan apron proteksi radiasi dibandingkan dengan variasi sampel lainnya

KESIMPULAN

Sampel komposit bahan apron proteksi radiasi dengan komposisi timbal (II) asetat 0% tidak dapat menggantikan secara penuh apron proteksi radiasi berbahan utama timbal murni. Namun, serat kaktus *Opuntia spp.* dapat disintesis dengan timbal (II) asetat yang memiliki densitas besar dan larut dengan katalis resin. Semakin banyak komposisi timbal (II) asetat, semakin baik pula tingkat absorpsi radiasi sinar-X. Berdasarkan penelitian ini, diperoleh tingkat absorpsi paling tinggi pada komposisi 80% timbal (II) asetat dengan nilai HVL mencapai 0,18 cm, koefisien atenuasi $3,85\text{ cm}^{-1}$, dan RAR mencapai 84%.

Sampel komposit bahan apron proteksi radiasi menggunakan kaktus *opuntia ficus-indica* dan timbal (II) asetat memiliki potensi untuk dikembangkan menjadi apron proteksi radiasi yang lebih ringan, ekonomis dan optimal dalam mengabsorpsi radiasi sinar-X, agar dapat setara dengan 0,25 mm apron timbal murni, sesuai dengan standar apron proteksi radiasi sinar-X radiologi diagnostik, menurut ketentuan perka bapeten nomor 8 tahun 2011, dengan tetap diperlukan penelitian lebih lanjut. Saran untuk penelitian selanjutnya yakni diperlukan penelitian mengenai variasi energi tabung, dan disarankan pula untuk menggunakan mesin *pressing* komposit agar tebal sampel lebih akurat dan konsisten.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis sangat berterimakasih kepada Bapak Dr. Heru Prasetyo selaku Kepala Pusat Riset Teknologi Keselamatan, Metrologi dan Mutu Nuklir, Badan Riset dan Inovasi Nasional (PRTKMMN-BRIN) yang telah memberikan izin untuk melaksanakan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Fergusge dan A. Berutu, "Faktor yang Mempengaruhi Tindakan Keselamatan Radiasi Sinar-X di Unit Radiologi Rumah Sakit Putri Hijau Medan," *J. Borneo Holist. Heal.*, vol. 1, no. 2, hal. 264–270, 2018. [Diakses pada Bulan Desember Tanggal 30, Tahun 2022].
- [2] B. Yunus dan K. Bandu, "The effect of x-ray radiation on children," *Makassar Dent J*, vol. 8, no. 2, hal. 97–104, 2019. [Diakses pada Bulan Desember Tanggal 30, Tahun 2022].
- [3] N. D. Widayanti, R. Marini, dan I. N. Indah, "Analisis Uji Paparan Radiasi di Ruang Isolasi Covid-19 RSUD Karawang," *Jurnal Pengawasan Tenaga Nuklir*, vol. 1, no. 1, hal. 31–35, 2021, doi: 10.53862/jupeten.v1i1.007. [Diakses pada Bulan Desember Tanggal 30, Tahun 2022].
- [4] H. K. Ginting dan N. Supriana, "Angiofibroma Nasofaring Juvenil," *Radioterapi & Onkologi Indonesia*, vol. 9, no. 1, hal. 29–33, 2018, doi: 10.32532/jori.v9i1.73. [Diakses pada Bulan Desember Tanggal 30, Tahun 2022].
- [5] M. N. P. Lubis dan F. U. A. Rahman, "Adaptasi era kenormalan baru di bidang radiologi kedokteran gigi: apa yang perlu kita ketahui," *Jurnal Radiologi Dentomaksilofasial Indonesia*, vol. 4, no. 2, hal. 55, 2020, doi: 10.32793/jrdi.v4i2.556. [Diakses pada Bulan Desember Tanggal 30, Tahun 2022].
- [6] P. Bandunggawa, I. Sandi, dan I. Merta, "Bahaya Radiasi dan Cara Proteksinya," *Medicina (B. Aires)*, vol. 40, hal. 47–51, 2009. [Diakses pada Bulan Desember Tanggal 30, Tahun 2022].
- [7] M. Syaifudin, "Mamuju sebagai Area Prospektif untuk Studi Epidemiologi Dampak Paparan Radiasi Alam Tinggi," *Buletin Alara*, vol. 19, no. 1, hal. 17–25, 2017. [Diakses pada Bulan Oktober Tanggal 09, Tahun 2022].
- [8] T. R. P. Tarigan, U. A. Gani, dan M. Rajagukguk, "Studi Tingkat Radiasi Gelombang Elektromagnetik yang Ditimbulkan oleh Telepon Seluler," *Jurnal Teknosains*, vol. 1, no. 2, hal. 1–7, 2014. [Diakses pada Bulan Desember Tanggal 21, Tahun 2022].
- [9] L. Indahdewi dan D. Rizki, "Efek Paparan Radiasi dari Mesin X-Ray dan Metal Detector terhadap Kesehatan Petugas Pengamanan Lembaga Pemasarakatan," *Journal of Correctional Issues*, vol. 3, no. 1, hal. 16–26, 2020. [Diakses pada Bulan Oktober Tanggal 09, Tahun 2022].
- [10] G. Maslebu, J. Muninggar, S. A. Hapsara, Jurusan Fisika, Fakultas Sains dan Matematika, dan Universitas Kristen Satya Wacana, "Estimasi Resiko Radiasi Janin pada Pemeriksaan Radiografi Pelvis," 2017. [Daring]. Tersedia pada: <http://ppjp.unlam.ac.id/journal/index.php/f/>. [Diakses pada Bulan Juli Tanggal 25, Tahun 2022].
- [11] Aryawijayanti, Susilo, dan Sutikno, "Analisis Dampak Radiasi Sinar-X pada Mencit melalui Pemetaan Dosis Radiasi di Laboratorium Fisika Medik," *Jurnal MIPA*, vol. 38, no. 1, hal. 25–30, 2015. [Diakses pada Bulan Oktober Tanggal 09, Tahun 2022].
- [12] M. S. K. Ayu, "Proteksi Radiasi pada Pasien, Pekerja, dan Lingkungan di dalam Instalasi Radiologi," *Anat. Klin. Dasar*, hal. 236–39, 2018. [Diakses pada Bulan Desember Tanggal 30, Tahun 2022].
- [13] Nazaroh, S. Muhammad, dan G. Wurdianto, "Penerapan Proteksi dan Keselamatan Radiasi di Fasilitas Radioterapi-Linac," *Pros. Semin. Keselam. Nukl.*, hal. 1–9, 2016. [Diakses pada Bulan Oktober Tanggal 09, Tahun 2022].
- [14] S. Ramadhani, D. Milvita, H. Prasetio, dan Mursiyatun, "Estimasi Laju Dosis Radiasi yang Lolos Melalui Dinding Primer dan Sekunder Berdasarkan Beban Kerja Pesawat Teleterapi Co-60 di Instalasi Radioterapi RSUP. Dr. M. Djamil Padang (Studi Kasus Januari - Juni 2019)," *J. Fis. Unand*, vol. 9, no. 3, hal. 284–291, 2020, doi: 10.25077/jfu.9.3.284-291.2020. [Diakses pada Bulan Januari Tanggal 04, Tahun 2023].
- [15] A. Nikmawati dan S. Masrochah, "Evaluasi Performance Lead Apron," *JRI (Jurnal Radiogr. Indones.)*, vol. 1, no. 2, hal. 104–109, 2018, doi: 10.55451/jri.v1i2.19. [Diakses pada Bulan Oktober Tanggal 09, Tahun 2022].
- [16] Y. Kartikasari, S. Masrochah, dan A. S. Wibowo, "Effective Performance of Lead Apron as One Protective Equipment in Radiation," *J. Ris. Kesehat.*, vol. 1, no. 2, hal. 140–150, 2012, doi: <https://doi.org/10.31983/jrk.v1i2.381>. [Diakses pada Bulan Oktober Tanggal 09, Tahun 2022].

- [17] M. G. L. Monaco, A. Carta, T. Tamhid, dan S. Porru, "Anti-X apron wearing and musculoskeletal problems among healthcare workers: A systematic scoping review," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 17, no. 16, hal. 1–17, 2020, doi: 10.3390/ijerph17165877. [Diakses pada Bulan Oktober Tanggal 12, Tahun 2022].
- [18] Y. Kartikasari, R. Indrati, dan M. A. N. Fathoni, "Uji Fungsi Alat Pelindung Radiasi (Lead Apron) di Instalasi Radiologi Rumah Sakit," *Semin. Nas. SDM Teknol. Nukl.*, hal. 374–384, 2018. [Diakses pada Bulan Desember Tanggal 05, Tahun 2022].
- [19] N. A. Himawan, T. D. Purwinta, dan Suparno, "Komposisi Optimal Komposit Serat Rami dan Resin Epoxy sebagai Alternatif Bahan Perisai Anti-Radiasi Sinar-X," *J. Pendidik. Fis. dan Keilmuan*, vol. 6, no. 2, hal. 85–92, 2020. [Diakses pada Bulan Oktober Tanggal 16, Tahun 2022].
- [20] E. Afrianti, D. Tahir, B. Y. E. B. Jumpeno, O. A. Firmansyah, dan J. Mellawati, "Addition of Lead (Pb)-Nitrate Filler on Polymer Composite Aprons for X-Ray Radiation Shielding," *Atom Indones.*, vol. 47, no. 2, hal. 129–133, 2021, doi: 10.17146/aij.2021.1033. [Diakses pada Bulan Oktober Tanggal 09, Tahun 2022].
- [21] L. Zourgui, E. El Golli, C. Bouaziz, H. Bacha, dan W. Hassen, "Cactus (*Opuntia ficus-indica*) cladodes prevent oxidative damage induced by the mycotoxin zearalenone in Balb/C mice," *Food Chem. Toxicol.*, vol. 46, no. 5, hal. 1817–1824, 2008, doi: 10.1016/j.fct.2008.01.023. [Diakses pada Bulan Oktober Tanggal 10, Tahun 2022].
- [22] F. Afrina, "Uji Aktivitas Tabir Surya Kombinasi Ekstrak Bunga Telang (*Clitoria ternatea*) dan Lidah Buaya (*Aloe vera*) secara Invitro Menggunakan Spektrometer UV-Vis," *Bandar Lampung*, 2022. [Diakses pada Bulan Januari Tanggal 22, Tahun 2023].
- [23] E. Erensayin, N. Topaglu, M. H. Calp, dan S. Savas, "Effect of Cactus Plants on Magnetic Fields Bruited by Computer Screens," *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg.*, vol. 9, no. 1, hal. 70–79, 2019, doi: 10.17714/gumusfenbil.393173. [Diakses pada Bulan Oktober Tanggal 09, Tahun 2022].
- [24] J. A. Leon, "Opuntia ficus-indica Mucilage Potential to Remove Nuclear Active Contaminants from Water Based on a Surrogate Approach," *University of South Florida*, 2014. [Daring]. Tersedia pada: <http://scholarcommons.usf.edu/etd/5253>. [Diakses pada Bulan Oktober Tanggal 10, Tahun 2022].
- [25] U. D. Prastiwi, G. Amperiawan, M. Manawan, dan S. Aritonang, "Simulasi Kinerja Baja Armor dalam Menahan Radiasi Gamma dan Neutron sebagai Material Kendaraan Tempur," *J. Teknol. Daya Gerak*, vol. 4, no. 1, hal. 21–32, 2021. [Diakses pada Bulan Februari Tanggal 21, Tahun 2023].
- [26] A. Ferhat, Mardiyanto, dan A. K. Rivai, "PLTN dan Riset Material Reaktor Maju", Yogyakarta: Deepublish (Grup Penerbitan CV Budi Utama), 2021. [Diakses pada Bulan Maret Tanggal 02, Tahun 2023].
- [27] N. Aral, F. B. Nergis, dan C. Candan, "The X-ray attenuation and the flexural properties of lead-free coated fabrics," *J. Ind. Text.*, vol. 47, no. 2, hal. 252–268, 2017, doi: 10.1177/1528083716644287. [Diakses pada Bulan Oktober Tanggal 09, Tahun 2022].
- [28] S. Nurhayati, S. D. Astuty, S. Dewang, Hikmawati, dan Jumriah, "Uji Nilai Half Value Layer (HVL) Menggunakan Pelat Aluminium Bekas pada Pesawat Mamografi di RSUD Syekh Yusuf Gowa," *Berk. Fis.*, vol. 25, no. 3, hal. 89–94, 2022. [Diakses pada Bulan Februari Tanggal 21, Tahun 2023].
- [29] G. A. Wiguna, A. M. Alshweikh, G. B. Suparta, A. C. Louk, dan K. Kusminarto, "Penentuan Densitas Akrilik dan Plastik Berdasarkan Citra Radiografi Digital," *J. Fis. dan Apl.*, vol. 15, no. 1, hal. 12–16, 2019, doi: 10.12962/j24604682.v15i1.4291. [Diakses pada Bulan Februari Tanggal 21, Tahun 2023].
- [30] A. Muharini dan W. Rosita., "Studi Koefisien Atenuasi Kulit Sintetis dengan Bahan Isian Pb(NO₃)₂ untuk Bahan Apron Proteksi Radiasi pada Instalasi Radiodiagnostik," *Pros. Pertem. dan Present. Ilm. Penelit. Dasar Ilmu Pengetah. dan Teknol. Nukl.*, hal. 375–382, 2018. [Diakses pada Bulan Juli Tanggal 14, Tahun 2023].