

Penentuan Koefisien Atenuasi Radiasi Gamma pada Bahan Cobalt-60 dengan Menggunakan Material Alternatif Non-Logam Sebagai Shielding.

Maritza Arisatya Wijaya¹ & Sovian Aritonang²

^{1,2)}. Fisika Militer/Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Universitas Pertahanan Republik Indonesia

*Email: 14444risatya2@gmail.com

ABSTRACT

Gamma radiation emitted by the Cobalt-60 (^{60}Co) isotope is a high-energy ionizing radiation source widely employed in various applications. The gamma photons produced, with energies ranging from 1.17 MeV to 1.33 MeV, possess a high penetrating capability; consequently, the selection of an appropriate shielding material is critical to ensuring radiation safety and protection. Previous experimental studies have largely focused on lead (Pb) as the primary shielding material, which is nevertheless limited by its toxicity and the relatively high cost of its handling and disposal, thereby motivating the search for safer and more economical alternatives. However, systematic comparisons of the shielding effectiveness of several candidate materials against ^{60}Co gamma radiation under controlled thickness and testing conditions remain limited. This study therefore aims to determine and compare the Linear Attenuation Coefficient (LAC) of several selected materials and to evaluate their effectiveness as gamma radiation shields. The method employed involves experimental measurement of radiation intensity using a calibrated detector after transmission through samples of varying material composition; the resulting data are subsequently analyzed using the Beer–Lambert law to calculate the attenuation coefficient of each material.

Keywords: Cobalt-60; attenuation coefficient; shielding; gamma radiation; Beer–Lambert law.

PENDAHULUAN

Radiasi gamma merupakan radiasi pengion elektromagnetik berenergi tinggi dengan panjang gelombang sangat pendek yaitu 10^{-12} - 10^{-10} m dan memiliki daya tembus tinggi, sehingga memerlukan material shielding dengan densitas tinggi dan nomor atom besar untuk mereduksi intensitas radiasi [1]. Radiasi gamma salah satu bentuk radiasi yang memiliki kemampuan penetrasi jauh lebih besar dibandingkan radiasi alfa atau beta. Sumber radiasi yang umum digunakan dalam bidang medis, nuklir, industri, pertanian, dan penelitian material adalah Cobalt-60 (^{60}Co) yang memancarkan dua energi foton karakteristik sebesar 1,173 MeV hingga 1,333 MeV [2]. Radiasi gamma dari Cobalt-60 digunakan dalam radioterapi, iradiasi bahan pangan, dan radiografi industri [3]. Tingginya efek radiasi gamma Cobalt-60 menyebabkan resiko biologis yang signifikan terhadap pekerja radiasi ataupun masyarakat sekitar, paparan radiasi dalam jangka panjang dapat menyebabkan kerusakan sel dengan efek deterministik ataupun stokastik, dan peningkatan resiko kanker serta mutasi genetik. Hal ini perlu adanya sistem proteksi radiasi yang memadai [4]. Oleh karena itu, pengendalian sistem radiasi melalui sistem pelindung berupa shielding menjadi hal penting yang merujuk pada prinsip ALARA (As Low As Reasonably Achievable). [5]

Material pelindung radiasi yang sering digunakan adalah timbal (Pb), baja, ataupun beton karena memiliki densitas yang tinggi dan mampu menyerap foton gamma. Namun, timbal memiliki kelemahan dalam toksisitas lingkungan yang disebabkan karena sulit dalam pengelolaan limbah, memiliki berat yang tinggi, dan tingginya biaya penanganan, [6]. Selain itu, beton yang murah dan mudah diaplikasikan cenderung memiliki koefisien atenuasi yang lemah dan rapuh dalam jangka panjang jika terpapar radiasi tinggi terus menerus [7]. Bersamaan dengan peningkatan kebutuhan material pelindung yang ramah lingkungan dan ekonomis, penelitian telah dilakukan yang berfokus dengan material alternatif non-timbal dengan efektivitas shielding yang tinggi namun aman dan ekonomis [8]. Jenis material yang diteliti berupa:

1. Paduan logam berat W-Cu-Ni yang memiliki densitas tinggi dan stabilitas struktural pada radiasi energi tinggi

2. Bata Komposit tanah liat merah-kaca timbal yang ramah lingkungan dan ekonomis
3. Kaca berat berbasis B_2O_3 - ZnO - Na_2O - Fe_2O_3 yang memiliki transparansi tinggi dan stabilitas kimia.

Penelitian Nzivulu et al. (2024) dengan penggunaan bata komposit dnengan tanah liat merah dan kaca limbah membuktikan peningkatan koefisien atenuasi linier (LAC) dari $0,113 \text{ cm}^{-1}$ menjadi $0,150 \text{ cm}^{-1}$ pada energi 662 keV setelah ditambahkan limbah kaca pada bata tanah liat [9]. Material tersebut memiliki keunggulan yaitu keberlanjutan karena pemanfaatan limbah kaca yang dapat diaplikasikan pada struktur bangunan fasilitas nuklir. Penelitian Elsafi et al. (2024) dengan penggunaan material gelas berat yang menguji sistem B_2O_3 - ZnO - Na_2O - Fe_2O_3 glass menunjukkan peningkatan koefisien atenuasi linier (LAC) pada kaca berat borat hingga mencapai $0,2559 \text{ cm}^{-1}$ pada energi 662 keV yang dihasilkan oleh peningkatan fraksi ZnO dan Fe_2O_3 [10]. Material ini memiliki densitas tinggi, kestabilan kimia, dan tidak toksik, sehingga cocok digunakan sebagai pelindung permanen ataupun portabel. Sedangkan, paduan logam tungsten (W-Cu-Ni) memiliki nilai koefisien atenuasi linier (LAC) yang tinggi yang menjadikan paduan logam tersebut menjadi secondary shielding [11].

Interaksi radiasi gamma dilakukan dengan tiga mekanisme yang mendominasi seperti Efek fotoelektrik melakukan dominasi pada energi rendah dalam rentang kurang dari 0,1 MeV. Terjadi saat energi foton rendah diserap sepenuhnya oleh electron kulit dalam. Probabilitas interaksi dapat berbanding lurus dengan Z^n dimana Z adalah nomor atom, sehingga tinggi pada logam berat seperti timbal atau tungsten [14]. Hamburan Compton melakukan dominasi pada energi menengah (100 keV hingga 5 MeV) termasuk energi dari Cobalt-60 dengan rentang 1,17 MeV hingga 1,33 MeV. Foton mengalami hamburan oleh elektron terikat lemah, sehingga kehilangan sebagian energinya, dan berubah arah. Proses tersebut merupakan mekanisme utama pada pengukuran koefisien atenuasi pada Cobalt-60 [15]. Produksi pasangan (Pair Production) terjadi ketika energi foton lebih dari 1,022 MeV. Foton gamma berinteraksi dengan medan inti atom, dan menghasilkan pasangan elektron positron. Menaisme ini signifikan pada energi Cobalt-60, terutama pada material dengan nomor atom tinggi seperti tungsten dalam paduan logam W-Cu-Ni [13]. Energi Cobalt-60 berada pada rentang menengah ke tinggi, mekanisme compton dan produksi pasangan menjadi mekanisme yang dominan dan membuat densitas dan atom efektif dari material shielding merupakan parameter yang menentukan. Mekanisme tersebut menjelaskan material dengan densitas tinggi dan nomor atom besar memiliki kemampuan shielding yang lebih baik pada energi Cobalt-60. Koefisien atenuasi (μ) merupakan parameter pada kemampuan material dalam meredam radiasi gamma yang dijelaskan dalam hukum eksponensial Beer-Lambert, yaitu:

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

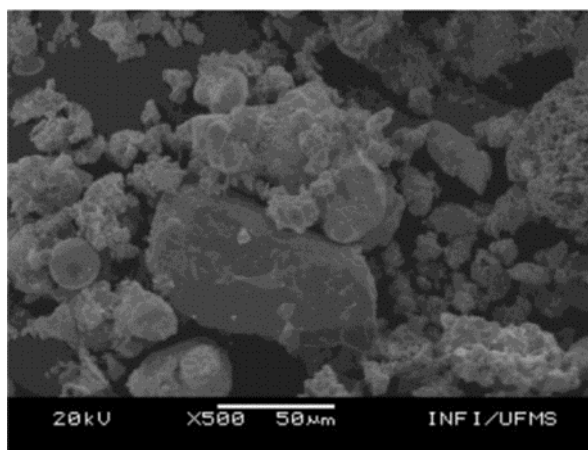
dengan I intensitas radiasi setelah pelindung, I_0 intensitas awal, μ koefisien atenuasi, dan x ketebalan pelindung. Pada perbandingan lintas material karena koefisien atenuasi bergantung pada densitas, digunakan koefisien atenuasi massa (μ/ρ) yang memberikan ukuran relatif persatuan massa, yaitu:

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{1}{\rho x} \ln \frac{I_0}{I(x)} \quad (2)$$

Nilai (μ) dan (μ/ρ) diperoleh secara teoritis dari database NIST XCOM dan dapat dibandingkan dengan hasil eksperimen [16].

Karakteristik Material Alternatif untuk shielding diantaranya Bata Komposit Tanah Liat-Kaca Limbah Bata tanah liat merupakan bahan bangunan tradisional yang tersedia luas dan memiliki biaya rendah. Penambahan limbah kaca (berupa SiO_2 dan Na_2O) yang merupakan limbah industri dalam jumlah besar meningkatkan densitas dan nomor atom efektif dari bata, sehingga meningkatkan nilai koefisien atenuasinya [9]. Material tersebut ekonomis, ramah lingkungan, berkelanjutan, dan cocok sebagai bahan bangunan pelengkap fasilitas nuklir. Selanjutnya, Kaca

Berat B_2O_3 – ZnO – Na_2O – Fe_2O_3 . Material kaca berat borat dan oksida logam merupakan inovasi modern dalam proteksi radiasi yang mempunyai transparansi tinggi, non-toksik dan stabil secara kimia. Penambahan ZnO dan Fe_2O_3 meningkatkan densitas, nomor atom efektif, dan koefisien atenuasi linier yang menunjukkan peningkatan [10]. Kaca tersebut unggul dalam transparansi optik, kimia yang stabil, dan tidak toksik, sehingga cocok untuk digunakan pada fasilitas medis dan industri yang membutuhkan pelindung terhadap radiasi gamma dalam bentuk transparan dan Paduan Logam $W_{20}Cu_3Ni$. Paduan logam tersebut menggabungkan densitas tinggi tungsten sebesar $19,3 \text{ g/cm}^3$ dan nomor atom efektif yang tinggi ($Z = 74$), sehingga koefisien atenuasi linier yang dimiliki tinggi pada energi gamma berada diatas 1 MeV. Penambahan Cu dan Ni meningkatkan sifat mekanik dan ketahanan korosi, tanpa mengurangi densitas, sehingga dapat digunakan dalam jangka panjang. Logam berat tersebut efektif pada energi Cobalt-60 untuk meredam radiasi gamma karena mendukung hamburan compton dan pair production [11].



Gambar 1. Paduan Logam $W_{20}Cu_3$

Penelitian yang dilakukan sebagian besar dilakukan pada bahan Sesium-137 ($Cs-137$), sedangkan pada energi Co-60 masih terbatas [12]. Hal inilah yang membuat adanya research gap dalam efektivitas shielding dengan beberapa jenis material terhadap radiasi gamma berenergi tinggi, dan diperlukan pengujian pada beberapa material alternatif terhadap radiasi gamma Co-60 dalam satu eksperimen terpusat. Perbandingan langsung antar material dalam satu sistem eksperimen dengan geometri dan sumber yang sama belum ada. Sehingga, faktor keberlanjutan, ekonomi, dan aplikatif struktural belum banyak digabungkan dalam satu kerangka kajian. Validasi data eksperimen dengan data teoritis NIST XCOM pada Cobalt-60 juga jarang dilakukan.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menentukan dan membandingkan koefisien atenuasi linier Linear Attenuation Coefficient (LAC) material shielding alternatif, berupa paduan logam berat W-Cu-Ni, bata komposit tanah liat merah-kaca timbal, dan kaca berat borat, terhadap radiasi gamma dari sumber Co-60, membandingkan hasil eksperimen dengan data teoritis NIST XCOM, menganalisis hubungan komposisi kimia dan densitas material terhadap efektivitas shielding, dan memberikan rekomendasi dalam pemilihan material pelindung alternatif yang lebih efisien, aman dan berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Jurnal ini disusun dengan mengkaji jurnal - jurnal yang dipilih untuk mencari kandidat material yang berpotensi untuk material alternatif untuk mengurangi potensi radiasi yang efisien, efektif, ekonomis, dan berjangka panjang. Berbagai topik jurnal yang dipelajari dimulai dengan topik yang berkaitan dengan radioaktif, hingga research gap yang dijabarkan berupa kurangnya penelitian yang dilakukan terhadap energi Cobalt-60. Sehingga topik mengenai atenuasi dari berbagai material menjadi jawaban dalam permasalahan yang dijabarkan. Dari permasalahan tersebut kemungkinan dari tiga material yaitu Bata Komposit Tanah Liat-Kaca Limbah, Kaca Berat B_2O_3 – ZnO – Na_2O – Fe_2O_3 , dan Paduan Logam $W_{20}Cu_3Ni$.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Variasi Komposisi Kimia dari Material

Tabel 1. Komposisi Kimia dari Sampel yang Dibuat pada Eksperimen Kaca berat B_2O_3 – ZnO – Na_2O – Fe_2O_3

Nama Kaca	Komposisi (% mol)				Densitas (g/cm^3)
	B_2O_3	Na_2O	ZnO	Fe_2O_3	
BNZF-1	75	10	10	5	2,7677
BNZF-2	65	10	20	5	2,9632
BNZF-3	55	10	30	5	3,1809
BNZF-4	45	10	40	5	3,4251

Tabel 2. Komposisi Sampel yang Dipakai pada Eksperimen Bata Komposit Tanah Liat Merah dan Kaca Limbah.

Material	Komposisi (Komposit Tanah Liat Merah : Kaca Limbah)	Densitas (g/cm^3)
CNT	0 % Kaca (Kontrol)	1,52
RCG11	50% Kaca	1,9
RCG21	33,33% Kaca	1,71
RCG31	25% Kaca	1,64
RCG41	20% Kaca	1,61

Hasil Pengukuran Eksperimen Intensitas Radiasi

Pengukuran dengan sistem spektrometri HPGe dengan geometri berkas sempit. Pengukuran dilakukan untuk masing masing material dengan variasi campuran pada sampel, kemudian dihitung nilai persentase deviasi yang membandingkan nilai eksperimen dan data teorinya.

Tabel 3. Koefisien Atenuasi Linear secara Eksperimen pada Bata Komposit Tanah Liat Merah dan Kaca Limbah.

Sampel	Densitas (g/cm^3)	Eksperimen μ (cm^{-1})	NIST-XCOM μ (cm^{-1}) $\pm 0,009$	% Deviasi (%)
CNT	1,52	$0,113 \pm 0,011$	0,114	0,88
RCG11	1,9	$0,150 \pm 0,018$	0,144	4,17
RCG21	1,71	$0,130 \pm 0,013$	0,129	0,78
RCG31	1,64	$0,125 \pm 0,010$	0,124	0,81
RCG41	1,61	$0,121 \pm 0,018$	0,121	0,00

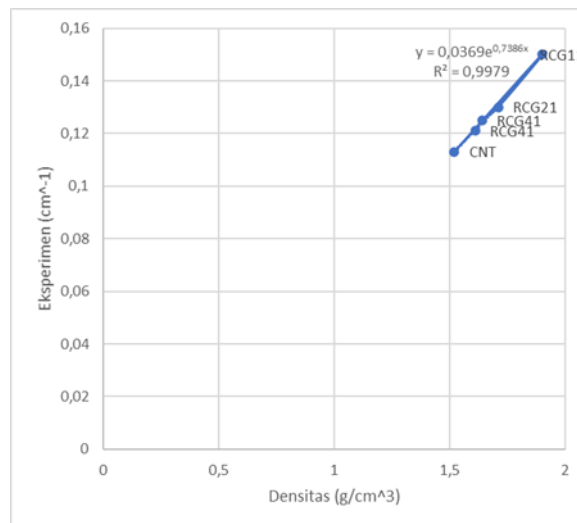
Tabel 4. Koefisien Atenuasi Linear secara Eksperimen Kaca berat B_2O_3 – ZnO – Na_2O – Fe_2O_3 pada energy 0,060 MeV.

Sampel	Densitas (g/cm^3)	Eksperimen μ (cm^{-1})	NIST-XCOM μ (cm^{-1})	% Deviasi (%)
BNZF-1	2,7677	1,0923	1,1195	2,49
BNZF-2	2,9632	1,5831	1,6013	1,14
BNZF-3	3,1809	2,0383	2,1379	4,89
BNZF-4	3,4251	2,6052	2,7394	5,15

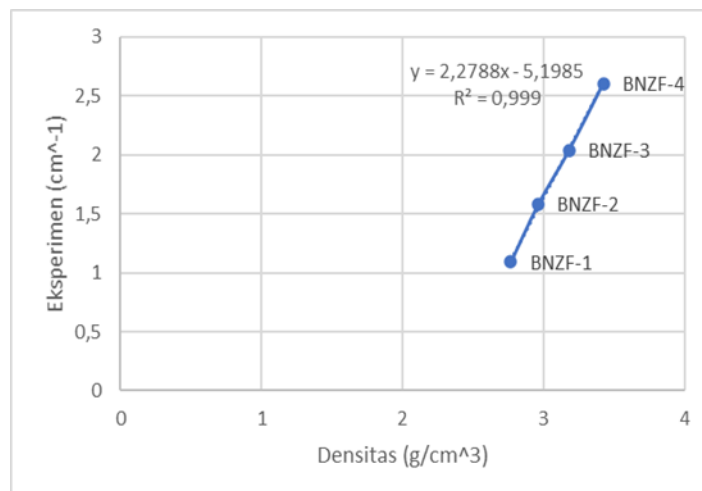
Tabel 5. Koefisien Atenuasi Linear secara Eksperimen secara Eksperimen Paduan logam W20Cu3Ni pada Energi Foton Utama Cobalt-60 1,173 MeV.

Sampel	Densitas (g/cm^3)	Suhu Sintering ($^{\circ}\text{C}$)	Eksperimen μ (cm^{-1})	μ (cm^{-1})	% Atenuasi dibandingkan Tungsten Murni
W20Cu3Ni	1,52	1250	0,891	1,044	14,57
		1300	0,956		8,37
		1350	0,969		7,18
		1400	0,891		14,63

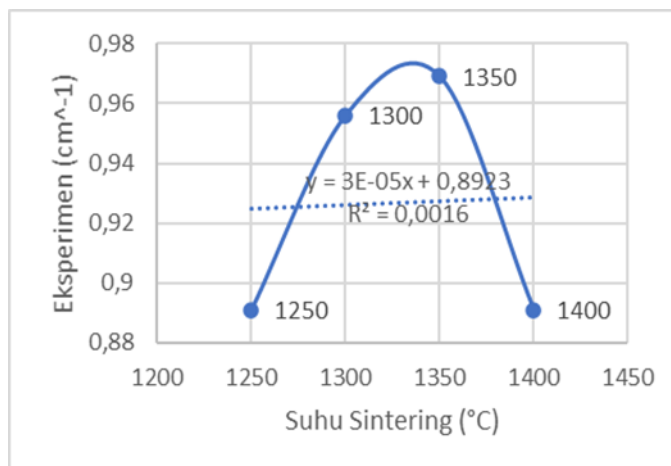
Kuva Atenuasi Radiasi Gamma



Gambar 2. Grafik Hubungan antara Data Eksperimen dan Densitas pada Bata Komposit Tanah Liat Merah dan Kaca Limbah.



Gambar 3. Grafik Hubungan antara Data Eksperimen dan Densitas pada Kaca berat B₂O₃-ZnO-Na₂O-Fe₂O₃ dengan energy 0,060 MeV.



Gambar 4. Grafik Hubungan antara Data Eksperimen dengan Suhu Sintering pada Paduan logam W20Cu3Ni dengan Energi Foton Utama Cobalt-60 1,173 MeV.

Analisis beberapa jenis material dalam menghambat radiasi gamma dari sumber cobalt-60 dengan pengukuran nilai koefisien atenuasi linier (μ) pada berbagai variasi komposisi material dengan konfigurasi berkas sempit dan dihitung dengan persamaan beer-lambert untuk memperoleh hubungan linier, dimana kemiringan pada grafik merupakan nilai μ . Berdasarkan tabel diketahui bahwa nilai μ tertinggi ada pada kaca berat $B_2O_3-ZnO-Na_2O-Fe_2O_3$ dengan nilai $2,6052 \text{ cm}^{-1}$ dengan densitas $3,4251 \text{ g/cm}^3$, diikuti oleh paduan logam W-Cu-Ni dengan nilai $0,969 \text{ cm}^{-1}$ dengan densitas $1,9 \text{ g/cm}^3$, dan bata komposit tanah liat-kaca limbah sebagai nilai terendah $0,150 \text{ cm}^{-1}$ dengan densitas $1,52 \text{ g/cm}^3$. Dibuktikan bahwa semakin tinggi densitas maka semakin besar koefisien atenuasi yang dihasilkan. Hasil ini membuktikan hubungan antara densitas dan efektivitas atenuasi dimana semakin besar nilai densitas dan Zeff maka kemungkinan absorbs pada foton akan meningkat menghasilkan nilai koefisien atenuasi yang lebih tinggi.

KESIMPULAN

Penelitian yang dilakukan bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan kemampuan atenuasi radiasi gamma Cobalt-60 dan tiga material alternatif non-timbal, yaitu paduan logam, W-Cu-Ni, bata komposit tanah liat dan kaca timbal, dan kaca berat $B_2O_3-ZnO-Na_2O-Fe_2O_3$. Pengukuran dilakukan dengan eksperimen menggunakan sumber radiasi berupa Cobalt-60 pada energi 1,17 MeV hingga 1,33 MeV dengan spektrometri gamma, kemudian dilakukan analisis dengan persamaan Beer-Lambert dan dibandingkan dengan data teoritis yang diperoleh dari NIST XCOM. Dapat diketahui bahwa hasil pengukuran ketiga material tersebut memiliki koefisien atenuasi yang berbeda, yang ditentukan oleh densitas dan nomor atom efektifnya. Penelitian pada tabel 3, menunjukkan bahwa bata komposit tanah liat dengan campuran limbah kaca memiliki koefisien atenuasi sebesar $0,150 \text{ cm}^{-1}$ dengan densitas $1,52 \text{ g/cm}^3$, efektivitas yang dimiliki relatif rendah namun menunjukkan kemampuan shielding dengan densitas dan komposisi kimia yang sederhana. Berdasarkan tabel 4, kaca berat $B_2O_3-ZnO-Na_2O-Fe_2O_3$ menunjukkan nilai koefisien atenuasi linier (μ) tertinggi sebesar $2,6052 \text{ cm}^{-1}$ dengan densitas $3,4251 \text{ g/cm}^3$. Dapat dilihat bahwa material kaca berat borat dengan pelindung transparan memiliki efektivitas shielding paling tinggi terhadap radiasi gamma berenergi tinggi dengan kemampuan atenuasi terbaik. Hasil penelitian berdasarkan tabel 5, dapat diketahui bahwa paduan logam W-Cu-Ni memiliki koefisien atenuasi linier (μ) sebesar $0,969 \text{ cm}^{-1}$ dengan densitas $1,9 \text{ g/cm}^3$. Hal tersebut membuktikan potensi sebagai material pelindung memiliki performa teknis yang cukup baik. Perbandingan hasil eksperimen dengan data teoritis NIST XCOM menunjukkan selisih dengan rentang 0% hingga 15% yang menunjukkan bahwa metode eksperimen yang dilakukan akurat dan valid. Penelitian ini menghasilkan bahwa efektivitas shielding dipengaruhi oleh densitas material dan nomor atom efektif, dimana semakin tinggi densitas dan nomor atom efektif semakin besar kemampuan materialnya dalam mengurangi intensitas radiasi gamma. Secara keseluruhan, hasil penelitian sejalan dengan literatur yang sebelumnya bahwa pemilihan material shielding harus

dipertimbangkan keseimbangan antara efektivitas radiasi, berat jenis, biaya produksi, dan dampaknya terhadap lingkungan.

Penelitian ini telah dapat mencapai tujuannya dalam menentukan koefisien atenuasi dari parameter shielding berupa material alternatif non-timbal, dan validasi pada data teoritis yang valid, sebagai dasar dari proteksi radiasi yang lebih efektif dan efisien untuk mendatang. Sehingga, penelitian ini telah mengisi research gap terkait perbandingan material non-timbal untuk energi gamma Cobalt-60.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. B. Podgorsak, *Radiation Physics for Medical Physicists*. Springer, 2022.
- [2] International Atomic Energy Agency (IAEA), *Radiation Protection and Safety in Medical Uses of Ionizing Radiation*, IAEA Safety Standards, 2021.
- [3] International Commission on Radiological Protection (ICRP), *ICRP Publication 103: The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, 2007.
- [4] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), *UNSCEAR Report 2020: Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation*, 2020.
- [5] IAEA, *General Safety Requirements Part 3: Radiation Protection and Safety Standards*, 2021.
- [6] S. Khan et al., "Assessment of radiation exposure in environmental systems," *J. Environ. Radioact.*, 2020.
- [7] I. Hossain et al., "Evaluation of shielding materials for nuclear applications," *Prog. Nucl. Energy*, 2022.
- [8] A. M. El-Khayatt et al., "Gamma-ray attenuation coefficients of shielding composites," *Radiat. Phys. Chem.*, 2021.
- [9] D. K. Nzivulu et al., "Measurement of radiation shielding parameters using X-ray," *MethodsX*, vol. 12, p. 102744, 2024.
- [10] M. Elsafi et al., "Development of eco-friendly radiation shielding materials," *Sci. Rep.*, vol. 14, p. 19141, 2024.
- [11] Data paduan logam W–Cu–Ni," *Jurnal Internal Shielding*, 2024.
- [12] M. Dogan and F. Altinsoy, "Study of radiation attenuation in composite materials," *Radiat. Phys. Chem.*, 2019.
- [13] G. F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, 4th ed. New York: Wiley, 2019.
- [14] F. H. Attix, *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*. New York: Wiley, 2020.
- [15] S. Al-Hadeethi et al., "Investigation of shielding efficiency of novel materials," *Appl. Radiat. Isot.*, 2021.
- [16] National Institute of Standards and Technology (NIST), "XCOM: Photon Cross Sections Database," 2024. [Online]. Available: <https://physics.nist.gov/xcom>
- [17] M. M. Gouda, A. F. Osman, R. Awad, and M. S. Badawi, "Enhanced radiation shielding efficiency of polystyrene nanocomposites with tailored lead oxide nanoparticles," *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 19970, 2024.
- [18] T. Mailani, "EFEKTIVITAS MATERIAL TIMBAL BERDASARKAN KOEFISIEN ATTENUASI DALAM MENAHAN RADIASI GAMMA DARI SUMBER CO-60," *Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia*, Yogyakarta, Indonesia, 2024.
- [19] D. I. Tsiv, A. V. Taran, T. I. Zharko, E. K. Zolotov, and A. A. Borodin, "Isostatic hot-pressed W–Cu composites with nanosized grain boundaries: Microstructure, structure and radiation shielding efficiency against gamma rays," *Nanomaterials*, vol. 12, no. 10, p. 1642, May 2022.
- [20] D. K. Nzivulu, A. B. Mujinga, J. C. Nzeba, R. M. Lubaba, P. K. Kasongo, and P. S. Mwamba, "Investigation of red clay and waste glass composite bricks for ionizing radiation shielding," *MethodsX*, vol. 12, p. 102744, 2024.
- [21] M. Elsafi, M. K. Abdelrahman, and A. S. El-Badry, "Experimental study of gamma-ray attenuation capability of B₂O₃–ZnO–Na₂O–Fe₂O₃ glass system," *Scientific Reports*, vol. 14, p. 19141, 2024.

- ◆—————→
- [22] N. D. Kasyoka, "Characterization of red-clay and glass composite for gamma ray shielding," M.S. thesis, Dept. Phys., Kenyatta Univ., Nairobi, Kenya, 2025. [23] S. Akkurt, H. Basyigit, and S. Kilincarslan, "Radiation shielding of concretes containing different aggregates," *Cement and Concrete Composites*, vol. 32, no. 8, pp. 625–632, 2010.
- [24] I. G. Alhindawy, M. I. Sayyed, A. H. Almugrin, and K. A. Mahmoud, "Optimizing gamma radiation shielding with cobalt-titania hybrid nanomaterials," *Sci. Rep.*, vol. 13, no. 1, p. 8936, Jun. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-33864-y.
- [25] Manjunatha et al., "Eco-optimized $\text{PbO}_2\text{--CaO--B}_2\text{O}_3$ glasses for chargeless radiation shielding: An integrated experimental and theoretical investigation on the role of BaO and Sm_2O_3 doping," *Chem. Phys. Impact*, vol. 11, p. 100936, 2025
- [26] N. N. Garba, A. S. Aliyu, N. Rabi, U. M. Kankara, A. M. Vatsa, A. Ismaila, J. Musa, and E. Onuh, "Investigation of natural radionuclides and radiation shielding potential of some commonly used building materials in Northwestern Nigeria," *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 9696, 2024.
- [27] A. M. Ali and A. M. Osman, "Evaluation of Radiation Shielding Effectiveness of Some Metallic Alloys Used in the Nuclear Facilities," *J. Nucl. Eng. Radiat. Sci.*, vol. 11, no. 3, Jul. 2025.
- [28] A. S. Mollah, "Evaluation of gamma radiation attenuation characteristics of different type shielding materials used in nuclear medicine services," *Bangladesh Journal of Nuclear Medicine*, vol. 21, no. 2, pp. 108–114, 2019.
- [29] I. A. Hossain, M. I. Sayyed, A. Tekin, and K. Al-Ajmi, "Comparative study on the gamma-ray shielding parameters of high-density concretes using experimental and MCNPX approaches," *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 171, p. 108730, 2020.
- [30] A. Tekin, M. I. Sayyed, and K. Al-Buriahi, "Gamma-ray attenuation properties of different steel and stainless-steel materials," *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 167, p. 108355, 2020.
- [31] H. Uosif, S. El-Kameesy, and A. El-Feky, "Experimental and theoretical investigation of photon interaction parameters of some marble types," *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 177, p. 109940, 2021.