e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Komposit Polimer Ringan Bebas Timbal Untuk Perisai Radiasi Portabel Di Lingkungan Operasi Lapangan: Tinjauan Kritis, Perbandingan Kinerja, Dan Peluang Riset

Lead-Free Lightweight Polymer Composites For Portable Radiation Shields In Field Operation Environments: Critical Review, Performance Comparison, And Research Opportunities

Yemima Melati Lumban Tobing*, Sovian Aritonang, Hotma Renta Siringoringo
*Program Studi Fisika Militer, Universitas Pertahanan Republik Indonesia

yemimamtobing25@gmail.com* , sovian.aritonang@idu.ac.id, hotmarentasiringoringo@gmail.com

Abstract

Lead-based radiation shielding is heavy and toxic, which makes it unsuitable for personnel who must move quickly in field operations. Lightweight lead-free polymer composites loaded with high-atomic-number fillers, such as W, Bi_2O_3, Gd_2O_3, and B_4C, have been widely proposed as replacements, yet their performance is reported under varied test conditions. This study aims to critically review and compare the performance of these composites as portable radiation shields. A literature review was conducted on 15 publications from 2021–2026 retrieved from ScienceDirect, PubMed Central, and DOAJ, using the inclusion criteria of peer-reviewed English-language articles, polymer matrices with lead-free fillers, and reported attenuation parameters. The comparison covers matrix and filler type, evaluation method (experiment and XCOM/Geant4 simulation), radiation type and energy, and mechanical and thermal properties. The results show that many studies focus on diagnostic medical X-rays, and that W–Bi combinations exploit complementary K-edge effects across different energy ranges. The discussion reveals that Gd/B/polyethylene neutron-gamma shields require substantial thickness for high-energy gamma rays, so weight and portability advantages are not guaranteed in mixed radiation fields. Studies on thermal resistance, long-term mechanical durability, and field validation also remain limited. It is concluded that lead-free composites are promising as X-ray shields but have not been adequately tested for field conditions. Future research opportunities include developing multi-filler composites for mixed radiation fields, engineering filler–polymer interfaces, and establishing standardized test protocols.

Keywords: *Polymer Composite, Lead-Free, Portable Radiation Shielding, Critical Review, Field Operations*

Abstrak

Perisai radiasi berbasis timbal bersifat berat dan toksik sehingga kurang sesuai bagi personel yang harus bergerak cepat di lingkungan operasi lapangan. Komposit polimer ringan bebas timbal dengan filler berbilangan atom tinggi, seperti W, Bi_2O_3, Gd_2O_3, dan B_4C, banyak diusulkan sebagai pengganti, tetapi kinerjanya dilaporkan pada kondisi uji yang beragam. Penelitian ini bertujuan meninjau secara kritis dan membandingkan kinerja komposit tersebut sebagai perisai radiasi portabel. Metode yang digunakan adalah tinjauan literatur terhadap 15 publikasi tahun 2021–2026 dari ScienceDirect, PubMed Central, dan DOAJ dengan kriteria inklusi artikel peer-reviewed berbahasa Inggris, matriks polimer berfiller bebas timbal, dan pelaporan parameter atenuasi. Perbandingan mencakup jenis matriks dan filler, metode evaluasi (eksperimen dan simulasi XCOM/Geant4), jenis dan energi radiasi, serta sifat mekanik dan termal. Hasil menunjukkan bahwa banyak studi berfokus pada sinar-X diagnostik medis, dan kombinasi W–Bi memanfaatkan efek K-edge yang saling melengkapi pada rentang energi berbeda. Pembahasan mengungkap bahwa perisai neutron-gamma berbasis Gd/B/polietilen memerlukan ketebalan besar untuk gamma energi tinggi, sehingga keunggulan berat dan keportabelan belum terjamin pada medan radiasi campuran. Kajian tentang ketahanan termal, daya tahan mekanik jangka panjang, dan validasi lapangan juga masih terbatas. Disimpulkan bahwa komposit bebas timbal menjanjikan sebagai perisai sinar-X, tetapi belum

Author@ This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

teruji secara memadai untuk kondisi lapangan. Peluang riset ke depan meliputi pengembangan komposit multi-filler untuk medan radiasi campuran, rekayasa antarmuka filler–polimer, dan penyusunan protokol uji terstandar.

Kata Kunci: Komposit Polimer, Bebas Timbal, Perisai Radiasi Portabel, Tinjauan Kritis, Operasi Lapangan

Penulis Korespondensi : Yemima Melati Lumban Tobing

I. PENDAHULUAN

Radiasi pengion dimanfaatkan secara luas, mulai dari pengujian tak merusak, diagnosis dan radioterapi medis, eksplorasi geologi, hingga sistem keamanan (Li *et al*., 2021). Di institusi medis, sinar-X diagnostik berenergi relatif rendah, sekitar 40–150 kVp, dan banyak dipakai pada pencitraan umum. Sinar gamma 140, 364, dan 511 keV digunakan pada pencitraan kedokteran nuklir (Kim, 2022). Personel yang bekerja di sekitar sumber seperti ini, termasuk personel medis dan operasional di lingkungan operasi lapangan, perlu perlindungan yang andal tanpa kehilangan kelincahan bergerak.

Paparan di atas batas yang diizinkan (20 mSv/tahun) dapat menimbulkan kanker, penyakit jantung, katarak, dan kerusakan sistem saraf pusat (Bijanu *et al*., 2021). Sinar-X bahkan telah diklasifikasikan sebagai karsinogen oleh Badan Internasional untuk Penelitian Kanker (IARC) (Li *et al*., 2021). Efek genetiknya dapat memicu mutasi sel (Li *et al*., 2021). Upaya pencegahan paparan itu sangat penting.

Gamma berenergi tinggi sulit diperisai karena daya tembusnya besar dan emisinya tidak terarah, sehingga pekerja berisiko tinggi terpapar (Kim, 2022). Pada prinsipnya, perisai bekerja dengan menyerap radiasi melalui atom-atom dengan jumlah nomor atom tinggi dan berdensitas tinggi (Kim, 2022). Secara fisis, atenuasi foton oleh perisai terutama ditentukan oleh efek fotolistrik dan hamburan Compton (Li *et al*., 2021). Intensitas yang diteruskan mengikuti hukum Beer–Lambert, $I = I_0 \cdot e^{(-\mu x)}$, dengan μ sebagai koefisien atenuasi linear dan x sebagai ketebalan perisai (Kim, 2022). Perbandingan antarbahan lazim memakai koefisien atenuasi massa (μ/ρ) dan tebal paruh ($HVL = \ln 2/\mu$). Efek K-edge unsur seperti W, Bi, dan Gd saling melengkapi pada rentang energi yang berbeda (Wang *et al*., 2025). Pada neutron, perisai bekerja lewat moderasi neutron cepat dan penyerapan neutron termal (Arslonova, Laurikaitiene and Adliene, 2026), yang dalam komposit polimer dijalankan oleh hidrogen pada matriks serta B dan Gd sebagai penyerap (Huo *et al*., 2021).

Timbal masih menjadi bahan perisai yang paling umum. Timbal efektif karena nomor atom dan densitasnya tinggi serta murah, tetapi toksik, berat, kurang fleksibel, dan stabilitas kimianya rendah. Timbal juga memiliki zona serap buta pada 70–90 keV (Li *et al*., 2021). Apron timbal 15 pon dilaporkan memberi tekanan hingga 300 psi pada diskus vertebra (Safari *et al*., 2024). Beban semacam ini sulit diterima pada tugas lapangan yang panjang.

Komposit polimer berfiller berbilangan atom tinggi menjadi alternatif utama karena matriks polimer fleksibel, stabil secara kimia, ringan, mudah diolah, dan murah (Safari *et al*., 2024; More *et al*., 2021; Wu, Zhang and Yang, 2024). Kombinasi filler dapat menutup kelemahan satu sama lain. Efek gabungan filler menutup zona serap buta timbal pada 70–90 keV (Li *et al*., 2021) dan komposit W/Bi dengan lapisan berbasis Gd mencapai efisiensi perisai 82,98% pada rentang 50–90 keV (Wang *et al*., 2025). Perisai hibrida berbasis tungsten (Kim, 2022) melampaui lembaran pembanding 0,55 mmPb sekitar 17% dengan kekuatan tarik 53% lebih tinggi. Cakupan energi perisai juga dapat diperluas, misalnya, PMMA–Bi_2O_3 dilaporkan efektif pada rentang energi kurang dari 59 keV hingga 1332 keV (Alsaab and Zeghib, 2023).

Meski demikian, hasil-hasil itu belum dapat langsung dipakai untuk kebutuhan lapangan. Pertama, konteks ujinya beragam dan banyak berorientasi medis. Review yang ada cenderung menyoroti konteks medis atau sinar-X diagnostik (Jayakumar, Saravanan and Philip, 2023; Safari *et al*., 2024). Studi simulasi diarahkan pada radioterapi dan rentang energi kedokteran (Alipoor and Eshghi, 2025; Alipoor, Eshghi and Razavi, 2026). Tekstil W dan $BaSO_4$ hanya setara dengan 0,018–0,03 mmPb (Kim and Son, 2021). Kedua, di medan campuran neutron-

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

gamma, keunggulan berat menipis. Komposit Gd_2O_3/B_4C/HDPE terbaik menahan 90% neutron pada 9,1 cm dan 70% gamma Cs-137 pada 13,7 cm (Huo *et al*., 2021). Pada komposit ABS cetak 3D, sampel tunggal hanya meredam sekitar 8–16% neutron Pu–Be, dan konfigurasi berlapis sekitar 40% (Arslonova, Laurikaitiene and Adliene, 2026). Ketiga, kinerja perisai sering ditukar dengan sifat mekanik dan termal. Menambah filler menurunkan kekuatan tarik serta memengaruhi bobot dan kenyamanan (Kim, 2022). Filler juga menurunkan keuletan ABS (Arslonova, Laurikaitiene and Adliene, 2026). Kompatibilitas antarmuka yang rendah membuat dispersi partikel tidak merata (Wu, Zhang and Yang, 2024), dan aplikasi modern menuntut stabilitas termal di atas 200 °C (Yu *et al*., 2025).

Berdasarkan situasi tersebut, rumusan masalah artikel ini adalah: (1) bagaimana kinerja atenuasi komposit polimer bebas timbal berbeda menurut matriks, filler, dan jenis maupun energi radiasi; (2) bagaimana kinerja itu berimbang dengan sifat mekanik dan termal yang dibutuhkan di lapangan; dan (3) celah apa yang masih terbuka untuk perisai portabel di lingkungan operasi lapangan. Solusi yang ditawarkan adalah tinjauan kritis dan perbandingan terstruktur terhadap 15 publikasi menggunakan matriks parameter yang seragam. Dengan demikian, penelitian ini bertujuan menyajikan dasar pemilihan bahan yang terukur bagi personel di lingkungan operasi lapangan serta merumuskan peluang riset ke depan.

II. METODE

Penelitian ini berbentuk tinjauan literatur kritis-komparatif tanpa eksperimen laboratorium. Alur seleksi dan pelaporannya diadaptasi dari PRISMA 2020 (Page *et al.*, 2021). PRISMA 2020 dirancang terutama untuk tinjauan sistematis intervensi kesehatan, sehingga di sini hanya digunakan sebagai kerangka transparansi pelaporan seleksi, bukan sebagai tinjauan sistematis penuh. Pelaksanaannya terdiri atas enam tahap yang dirangkum pada Gambar 1.

Tahap 1: perumusan dan penelusuran. Pertanyaan tinjauan diturunkan dari tiga rumusan masalah pada Pendahuluan. Penelusuran dilakukan pada jurnal ScienceDirect, PubMed Central, dan DOAJ untuk terbitan 2021–2026. String pencarian yang dipakai adalah (“lead-free” OR “non-lead”) AND (“polymer composite” OR “polymer nanocomposite”) AND (“radiation shielding” OR “X-ray shielding” OR “gamma shielding” OR “neutron shielding”).

Tahap 2: penyaringan. Rekaman ganda dihapus, kemudian judul dan abstrak disaring terhadap topik dan jenis publikasi. Dari rekaman yang teridentifikasi, dikeluarkan pada tahap ini.

Tahap 3: kelayakan dan inklusi. Teks lengkap ditelaah terhadap kriteria inklusi, yaitu (i) artikel peer-reviewed berbahasa Inggris tahun 2021–2026, (ii) matriks polimer dengan filler bebas timbal, dan (iii) pelaporan parameter atenuasi (koefisien atenuasi massa, tebal paruh, persentase atenuasi, atau ekuivalen Pb). Kriteria eksklusinya adalah (i) perisai non-polimer seperti kaca, beton, atau keramik, (ii) bahan yang masih mengandung timbal, dan (iii) preprint, materi komersial, serta siaran pers. Tahap ini menghasilkan 15 publikasi, yaitu 5 artikel review dan 10 artikel penelitian.

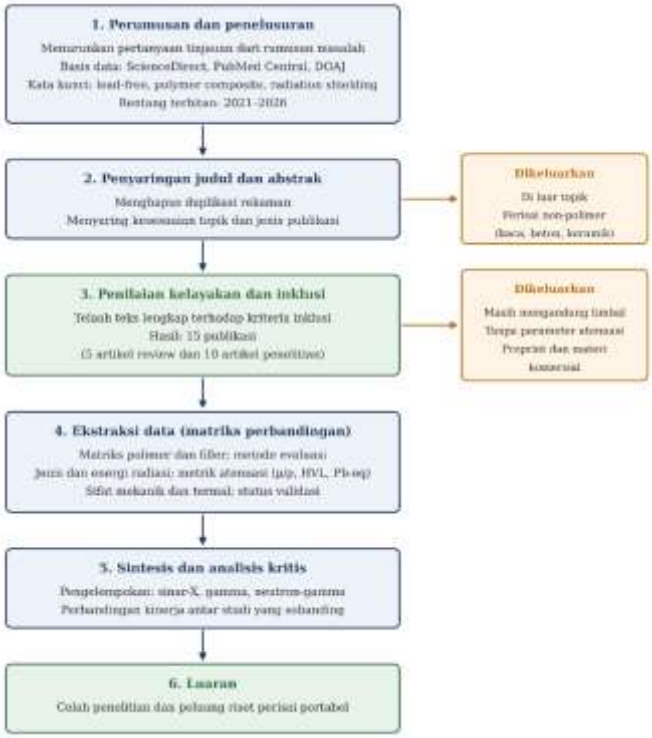
Tahap 4: ekstraksi data. Data dari setiap publikasi dimasukkan ke matriks perbandingan dengan variabel berikut, jenis publikasi, matriks polimer dan filler beserta fraksi massanya, metode evaluasi (eksperimen atau simulasi XCOM, Geant4, MCNP), jenis dan energi radiasi, metrik kinerja (μ/ρ, HVL, persentase atenuasi, ekuivalen Pb, ketebalan atau bobot), sifat mekanik dan termal, status validasi (laboratorium atau lapangan).

Nilai dicatat sebagaimana dilaporkan penulis aslinya dan tidak dihitung ulang. Tahap 5: sintesis dan analisis kritis. Publikasi dikelompokkan menurut jenis radiasi, yaitu sinar-X, gamma, dan neutron-gamma. Perbandingan kinerja hanya dilakukan antarstudi dengan kondisi uji yang sebanding (energi, ketebalan, dan pembanding timbal). Setiap studi juga dinilai kelengkapan pelaporan kondisi ujinya, ketersediaan pembanding timbal, dan pelaporan sifat mekanik atau termal. Hasilnya disintesis secara naratif dan tabular.

Tahap 6: luaran. Perbedaan antarkelompok dan keterbatasan yang berulang diterjemahkan menjadi celah penelitian dan peluang riset perisai portabel untuk lingkungan operasi lapangan.

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan



Gambar 1. Diagram alur metode tinjauan literatur. Kotak biru adalah tahap proses, kotak hijau adalah hasil utama tahap, dan kotak oranye adalah rekaman yang dikeluarkan beserta alasannya.

Diagram dibaca dari atas ke bawah. Tahap 1 menetapkan fokus dan sumber data, tahap 2 dan 3 menyaring rekaman hingga tersisa 15 publikasi yang layak, tahap 4 mengubahnya menjadi data terstruktur, dan tahap 5 membandingkannya untuk menghasilkan luaran pada tahap 6. Panah oranye di sisi kanan menunjukkan rekaman yang gugur beserta alasannya.

.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Hasil

Penelusuran dan penyaringan (Gambar 1) menghasilkan 15 publikasi, yaitu 5 artikel review dan 10 artikel penelitian. Tabel 1 merangkum cakupan dan isu kunci kelima review. Tabel 2 membandingkan material, radiasi, metode, dan kinerja kesepuluh artikel penelitian. Gambar 2 merangkum seberapa luas cakupan kesepuluh artikel penelitian tersebut. Maksud ketiganya adalah memperlihatkan pola bukti dan bagian yang belum tercakup.

Tabel 1. Karakteristik Artikel Review Yang Ditelaah

No	Publikasi	Cakupan	Isu kunci
1	Wu, Zhang and Yang (2024)	Komposit polimer bebas timbal yang fleksibel dan dapat dikenakan; matriks sintetis dan alami	Kompatibilitas antarmuka rendah menyebabkan dispersi partikel tidak homogen
2	Safari *et al.* (2024)	Bahan bebas timbal untuk perlindungan personal di lingkungan medis	Kekurangan timbal; multilapis dan nanokomposit; filler Bi, Ba, Gd, W

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

3	Jayakumar, Saravanan and Philip (2023)	Nanokomposit polimer untuk sinar-X diagnostik; juga gamma dan neutron	Degradasi akibat radiasi, toksisitas, pembuangan, daur ulang
4	More *et al.* (2021)	Komposit polimer untuk perisai radiasi; peran nanofiller; neutron cepat	Daur ulang polimer menjadi komposit
5	Bijanu *et al.* (2021)	Komposit logam–polimer dengan senyawa logam Z tinggi	Ringan, fleksibel, non-toksik dibanding bahan konvensional yang toksik, berat, atau korosif

Pola utamanya yaitu bahwa kelima review lebih menekankan konteks medis dan sinar-X diagnostik (Safari *et al.*, 2024; Jayakumar, Saravanan and Philip, 2023). Hanya sebagian yang menyinggung neutron dan degradasi akibat radiasi.

Tabel 2. Perbandingan Kesepuluh Artikel Penelitian

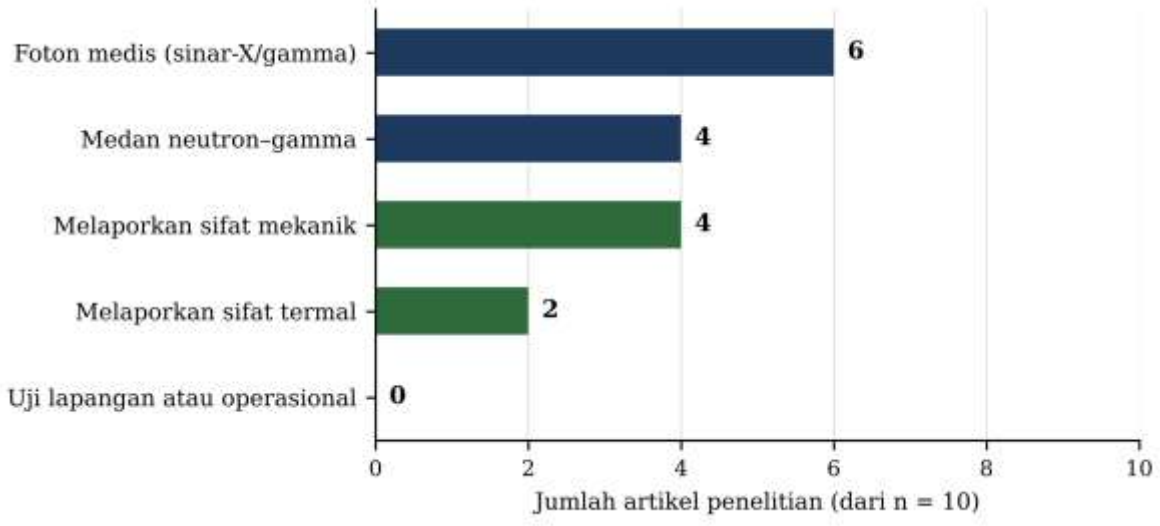
No	Studi	Material	Radiasi dan energi	Metode	Kinerja atenuasi	Sifat mekanik dan termal
1	Kim (2022)	PDMS + serbuk W + kain kawat W (hibrida ganda)	Radiasi radioisotop medis	Eksperimen	±17% di atas lembaran 0,55 mmPb; tebal 1,35 mm setara timbal	Kekuatan tarik +53%
2	Li *et al.* (2021)	(W/EOC)/(Bi/EOC) berlapis	Sinar-X, tabung 150 kV	Eksperimen	6 lapis, rasio 3:7 terbaik; menutup zona buta 70–90 keV	Tidak teridentifikasi
3	Alsaab and Zeghib (2023)	Nanokomposit PMMA–Bi_2O_3	Sinar-X dan gamma, <59–1332 keV	Eksperimen	Efektif pada rentang energi lebar	Tidak teridentifikasi
4	Wang *et al.* (2025)	W/Bi berlapis Gd, fleksibel	Sinar-X 50–90 keV	XCOM + eksperimen	Efisiensi 82,98%; μ/ρ 5,86 cm^2/g; HVL 0,08 cm	Tidak teridentifikasi
5	Kim and Son (2021)	Benang W + kain PET/$BaSO_4$	Radiasi hambur dosis rendah	Eksperimen	0,018 mmPb (W); 0,03 mmPb (PET/$BaSO_4$)	Tidak membatasi gerak (kualitatif)
6	Huo *et al.* (2021)	HDPE + 10 wt% nano-Gd_2O_3 + 20 wt% B_4C (permukaan dimodifikasi)	Neutron (Cf-252), gamma (Cs-137)	Eksperimen + Monte Carlo	Neutron 90% pada 9,1 cm; gamma 70% pada 13,7 cm	T5% 463,5 °C; kekuatan tarik 19,6 MPa
7	Yu *et al.* (2025)	PMP + W + B_4C (+ silan)	Neutron dan gamma	MCNP + algoritma genetika + eksperimen	Komposisi optimum 50/48,65/1,35 wt%; densitas 1,585 g/cm^3	Leleh >230 °C; HDT naik 18,5–19,1% dengan silan
8	Arslonova, Laurikaitiene	ABS cetak 3D + W, Bi_2O_3, Gd_2O_3, BN	Foton 120 kVp;	Eksperimen	Bi_2O_3 30 wt% ≈ ⅔ μ/ρ timbal; tumpukan	Keuletan ABS turun; BN menjaga

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

	and Adliene (2026)		neutron Pu–Be		berlapis ≈ 95% foton; neutron 8–16% (tunggal), ≈ 40% (berlapis)	kekuatan tarik mendekati ABS murni
9	Alipoor and Eshghi (2025)	Resin polimer + Gd, W, Te	Gamma dan neutron	Simulasi Geant4	Membandingkan atenuasi pada berbagai fraksi; diusulkan komposit multilogam untuk radioterapi	Matriks dipilih karena stabilitas termal dan mekanik
10	Alipoor, Eshghi and Razavi (2026)	Epoksi + oksida Y dan Dy	Sinar-X dan gamma rentang energi kedokteran	Simulasi Geant4	Efisiensi perisai dievaluasi pada rentang energi medis	Tidak teridentifikasi

Tabel 2 menunjukkan tiga pola. *Pertama*, pada rentang sinar-X medis, kombinasi W dan Bi (khususnya berlapis) paling konsisten memberi kinerja tinggi (Li *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2025). *Kedua*, pada medan neutron-gamma, kinerja baik hanya dicapai pada ketebalan sentimeter atau melalui perancangan berlapis (Huo *et al.*, 2021; Arslonova, Laurikaitiene and Adliene, 2026). *Ketiga*, hanya sebagian studi yang melaporkan sifat mekanik atau termal, dan dua studi bersifat simulasi murni.



Gambar 2. Cakupan sepuluh artikel penelitian yang ditelaah

Gambar 2 memperlihatkan bahwa 6 dari 10 artikel berfokus pada foton medis dan 4 pada medan neutron-gamma. Empat artikel melaporkan sifat mekanik, dua melaporkan sifat termal, dan tidak satu pun melaporkan uji lapangan atau operasional.

2. Pembahasan

Pola bukti dan maknanya**.** Dominasi studi foton medis (6 dari 10) sejalan dengan arah review yang ada (Safari *et al.*, 2024; Jayakumar, Saravanan and Philip, 2023). Artinya, sebagian besar bukti kinerja berasal dari kondisi yang relevan untuk radiologi, bukan untuk operasi lapangan. Tidak adanya uji lapangan pada kesepuluh studi berarti klaim "siap pakai di lapangan" saat ini belum didukung data.

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Mengapa W–Bi berlapis unggul pada sinar-X**.** Studi Li *et al.* (2021) menunjukkan bahwa susunan berlapis W/Bi menutup zona buta timbal pada 70–90 keV. Wang *et al.* (2025) menjelaskan mekanismenya melalui efek K-edge W, Bi, dan Gd yang saling melengkapi pada rentang energi yang berbeda. Ini konsisten dengan dasar teori pada Pendahuluan, bahwa atenuasi foton ditentukan oleh efek fotolistrik dan hamburan Compton (Li *et al.*, 2021). Penambahan lapisan juga meningkatkan kinerja lewat efek antarmuka antarlapisan (Li *et al.*, 2021).

Perimbangan kinerja dan sifat mekanik**.** Kim (2022) menunjukkan bahwa kinerja dan kekuatan tarik tidak harus saling meniadakan. Kombinasi lembaran PDMS/W dengan kain kawat W meningkatkan keduanya. Namun, Arslonova, Laurikaitiene and Adliene (2026) menemukan bahwa pengisian filler menurunkan keuletan ABS dan menimbulkan masalah aliran ekstrusi, sehingga densitas cetakan sedikit di bawah nilai teoretis. Temuan Huo *et al.* (2021) menunjukkan salah satu jalan keluarnya: modifikasi permukaan filler memperbaiki kompatibilitas antarmuka, dispersi, stabilitas termal, dan kekuatan tarik. Hal ini sejalan dengan isu dispersi pada review Wu, Zhang and Yang (2024).

Penalti ketebalan di medan campuran. Pada neutron-gamma, komposit Gd/B/HDPE terbaik memerlukan 9,1 cm untuk 90% neutron dan 13,7 cm untuk 70% gamma Cs-137 (Huo *et al.*, 2021). Pada komposit ABS cetak 3D, neutron hanya teredam sekitar 8–16% pada sampel tunggal dan sekitar 40% pada konfigurasi berlapis (Arslonova, Laurikaitiene and Adliene, 2026). Secara teori, pada energi foton tinggi, efek Compton dominan, sehingga atenuasi per tebal banyak ditentukan oleh densitas bahan. Rentang densitas komposit PMP–W–B_4C (0,928–1,588 g/cm³; Yu *et al.*, 2025) jauh di bawah timbal. Ini menjelaskan mengapa keunggulan ringan menipis untuk gamma energi tinggi. Penjelasan ini merupakan interpretasi penulis berdasarkan teori, bukan hasil yang dilaporkan studi-studi tersebut.

Faktor yang memengaruhi hasil**.** Dari sepuluh studi, faktor yang berulang adalah jenis dan fraksi filler, ukuran dan dispersi partikel, ketebalan dan susunan lapisan, energi atau jenis radiasi, serta proses manufaktur. Karena kondisi uji berbeda-beda (Tabel 2), perbandingan angka antarstudi hanya bermakna untuk kelompok radiasi yang sama.

Ketahanan termal. Aplikasi modern menuntut stabilitas termal di atas 200 °C (Yu *et al.*, 2025). Komposit PMP–W–B_4C meleleh pada suhu di atas 230 °C dan HDT-nya meningkat dengan silan (Yu *et al.*, 2025). Hanya dua studi yang melaporkan aspek termal (Gambar 2), padahal ini kebutuhan nyata di lapangan. Angka atenuasi neutron dan gamma pada studi Yu *et al.* (2025) juga tidak tersedia dalam data yang diekstraksi pada tinjauan ini, sehingga belum dibandingkan dan perlu dikonfirmasi dari teks lengkap artikel tersebut.

Batasan bukti simulasi. Dua studi Alipoor bersifat simulasi Geant4 untuk konteks radioterapi dan rentang energi kedokteran (Alipoor and Eshghi, 2025; Alipoor, Eshghi and Razavi, 2026). Hasilnya berguna untuk penapisan bahan, tetapi belum divalidasi eksperimen dan belum menjawab kebutuhan lapangan.

Tabel 3. Panduan Indikatif Pemilihan Rancangan Komposit Menurut Skenario Radiasi

Skenario	Rancangan yang paling didukung bukti	Batasan
Sinar-X 50–150 keV (perlindungan personal)	W/Bi berlapis (Li *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2025); hibrida W (Kim, 2022)	Data laboratorium; belum ada uji lapangan
Radiasi hambur dosis rendah	Tekstil W dan PET/$BaSO_4$ (Kim and Son, 2021)	Hanya 0,018–0,03 mmPb
Foton hingga 1332 keV	Nanokomposit PMMA–Bi_2O_3 (Alsaab and Zeghib, 2023)	Konteks layanan kesehatan; bobot per area perlu diverifikasi

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Medan neutron-gamma	Gd/B/HDPE (Huo *et al.*, 2021); W/B_4C/PMP (Yu *et al.*, 2025); ABS berlapis (Arslonova, Laurikaitiene and Adliene, 2026)	Tebal sentimeter atau atenuasi neutron rendah
Suhu tinggi (>200 °C)	PMP berfiller W/B_4C (Yu *et al.*, 2025)	Data atenuasi perlu dikonfirmasi

Implikasi**.** Bagi pengembangan ilmu, hasil ini menunjukkan perlunya protokol uji yang seragam (energi, ketebalan, pembanding timbal) agar studi dapat dibandingkan langsung. Bagi praktik di lapangan, personel yang menghadapi sinar-X diagnostik mengacu pada rancangan W/Bi berlapis, sedangkan medan neutron-gamma masih menuntut kompromi antara ketebalan dan keportabelan. Celah yang paling jelas untuk riset berikutnya adalah uji lapangan, ketahanan termal dan mekanik jangka panjang, serta komposit multi-filler untuk medan campuran.

Keterbatasan**.** Tinjauan ini hanya mencakup 15 publikasi berbahasa Inggris, dan data diambil sebagaimana dilaporkan tanpa dihitung ulang. Karena itu, kesimpulannya berlaku untuk kumpulan publikasi ini dan belum tentu mewakili seluruh literatur.

IV. KESIMPULAN

Tinjauan terhadap 15 publikasi (5 review dan 10 artikel penelitian) menunjukkan bahwa komposit polimer bebas timbal berbasis W dan Bi, terutama yang berlapis, paling konsisten menjanjikan untuk sinar-X medis, karena menutup zona serap buta timbal pada 70–90 keV (Li *et al.*, 2021). Di medan neutron-gamma, kinerja tinggi baru dicapai pada ketebalan sentimeter, misalnya 90% neutron pada 9,1 cm dan 70% gamma Cs-137 pada 13,7 cm (Huo *et al.*, 2021), atau hanya sekitar 40% neutron pada konfigurasi berlapis (Arslonova, Laurikaitiene and Adliene, 2026). Karena itu, keunggulan ringan dan portabel belum terjamin di sana. Pengisian filler juga dapat menurunkan sifat mekanik, meskipun modifikasi permukaan filler dan rancangan struktur hibrida dapat mengurangi dampak tersebut, sedangkan tidak satu pun dari 10 artikel penelitian melaporkan uji lapangan. Keberlanjutan penelitian ini disarankan pada tiga arah: uji prototipe pada kondisi operasi lapangan, penyusunan protokol uji yang seragam (energi, ketebalan, dan pembanding timbal) agar antarstudi dapat dibandingkan langsung, serta pengembangan komposit multi-filler dengan antarmuka filler–polimer yang terkontrol untuk medan radiasi campuran. Kesimpulan ini berlaku untuk kumpulan 15 publikasi yang ditelaah dan perlu diuji pada cakupan literatur yang lebih luas.

DAFTAR PUSTAKA

Alipoor, M. R. and Eshghi, M. (2025) 'Heavy element-enhanced polymer composites for gamma and neutron radiation shielding: a simulation study', *Journal of Metallurgical and Materials Engineering*, 36(3), pp. 65–84. doi: 10.22067/jmme.2025.89902.1161.

Alipoor, M. R., Eshghi, M. and Razavi, R. (2026) 'Monte Carlo simulation-based investigation of epoxy/dysprosium composites for X-ray and gamma-ray shielding across medicine energy ranges', *Journal of Advanced Materials in Engineering*, 45(1), pp. 93–107. doi: 10.47176/jame.45.1.1142.

Alsaab, A. H. and Zeghib, S. (2023) 'Study of prepared lead-free polymer nanocomposites for X- and gamma-ray shielding in healthcare applications', *Polymers*, 15(9), p. 2142. doi: 10.3390/polym15092142.

Arslonova, S., Laurikaitiene, J. and Adliene, D. (2026) 'Development of 3D-printable lead-free composite materials for mixed photon and neutron attenuation', *Polymers*, 18(2), p. 176. doi: 10.3390/polym18020176.

Bijanu, A., Arya, R., Agrawal, V., Tomar, A. S., Gowri, V. S., Sanghi, S. K., Mishra, D. and Salammal, S. T. (2021) 'Metal-polymer composites for radiation protection: a review', *Journal of Polymer Research*, 28(10), p. 392.

Huo, Z., Zhao, S., Zhong, G., Zhang, H. and Hu, L. (2021) 'Surface modified-gadolinium/boron/polyethylene composite with high shielding performance for neutron and gamma-ray', *Nuclear Materials and Energy*, 29, p. 101095. doi: 10.1016/j.nme.2021.101095.

Jayakumar, S., Saravanan, T. and Philip, J. (2023) 'A review on polymer nanocomposites as lead-free materials for diagnostic X-ray shielding: recent advances, challenges and future perspectives', *Hybrid Advances*, 4, p. 100100.

Kim, S.-C. (2022) 'Tungsten-based hybrid composite shield for medical radioisotope defense', *Materials*, 15(4), p. 1338. doi:

10.3390/ma15041338.

Kim, S.-C. and Son, J. S. (2021) 'Double-layered fiber for lightweight flexible clothing providing shielding from low-dose natural radiation', *Scientific Reports*, 11(1), p. 3676. doi: 10.1038/s41598-021-83272-3.

Li, Z., Zhou, W., Zhang, X., Gao, Y. and Guo, S. (2021) 'High-efficiency, flexibility and lead-free X-ray shielding multilayered polymer composites: layered structure design and shielding mechanism', *Scientific Reports*, 11(1), pp. 1–13. doi: 10.1038/s41598-021-83031-4.

More, C. V., Alsayed, Z., Badawi, M. S., Thabet, A. A. and Pawar, P. P. (2021) 'Polymeric composite materials for radiation shielding: a review', *Environmental Chemistry Letters*, 19(3), pp. 2057–2090. doi: 10.1007/s10311-021-01189-9.

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., McGuinness, L. A., Stewart, L. A., Thomas, J., Tricco, A. C., Welch, V. A., Whiting, P. and Moher, D. (2021) 'The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews', *BMJ*, 372, p. n71. doi: 10.1136/bmj.n71.

Safari, A., Rafie, P., Taeb, S., Najafi, M. and Mortazavi, S. M. J. (2024) 'Development of lead-free materials for radiation shielding in medical settings: a review', *Journal of Biomedical Physics and Engineering*, 14(3), pp. 229–244. doi: 10.31661/jbpe.v0i0.2404-1742.

Wang, B., Zhang, D., Lu, D., Zhu, W., Wei, H., Wang, Y., Qiu, T., Wang, Q. and Liu, Y. (2025) 'Shielding mechanism of medical X-ray and the shielding characteristics of flexible protective materials', *Nuclear Techniques*, 48(6), p. 060202. doi: 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.240260.

Wu, S., Zhang, W. and Yang, Y. (2024) 'Progress in flexible and wearable lead-free polymer composites for radiation protection', *Polymers*, 16(23), p. 3274. doi: 10.3390/polym16233274.

Yu, M., Luo, F., Li, X., Chen, X. and Guo, Z. (2025) 'Design and fabrication of high-temperature-resistant poly(4-methyl-1-pentene) loaded with tungsten and boron carbide particles against neutron and gamma rays', *Polymers*, 17(17), p. 2306. doi: 10.3390/polym17172306.