

Komposit Polimer Matriks Tungsten: Tinjauan sebagai Alternatif Timbal untuk Pakaian Pelindung Radiasi Medis

Muhammad Rayhan Santosa¹, Sovian Aritonang²

^{1,2})Program Studi Fisika/Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Militer,
Universitas Pertahanan Republik Indonesia

*Email: rayhn.sntosss@gmail.com, sovian.aritonang@idu.ac.id

ABSTRACT

Exposure to ionizing radiation in medical environments particularly from X-ray equipment and radioisotopes—poses health risks to medical personnel. Lead (Pb)-based protective clothing is effective in blocking radiation but has drawbacks such as excessive weight, toxicity, and environmental impact. Therefore, recent research has focused on developing polymer composites with tungsten (W) matrices as lighter and safer alternatives. Based on a review of various studies employing tungsten fillers (W, WO₃, WC, WC-Co) within polymer matrices such as PVA, PDPE, Epoxy, PC, EVA, and PDMS, an increase in filler content has been proven to enhance shielding performance against X-rays and gamma rays. Simulation results indicate that filler concentration has a greater influence than particle size, although nano-sized particles provide advantages under certain conditions. Tungsten-based composites exhibit lightweight, non-toxic, and flexible characteristics. Innovations such as hybrid structures, nano-additives, and advanced fabrication methods (electrospinning, 3D printing) further strengthen the potential of these materials. Therefore, tungsten-based polymer composites are considered strong candidates to replace lead in medical radiation protective clothing, although optimization of filler dispersion, mechanical properties, and production efficiency is still required.

Keywords: Tungsten; Polymer composite; Radiation shielding; Lead alternative

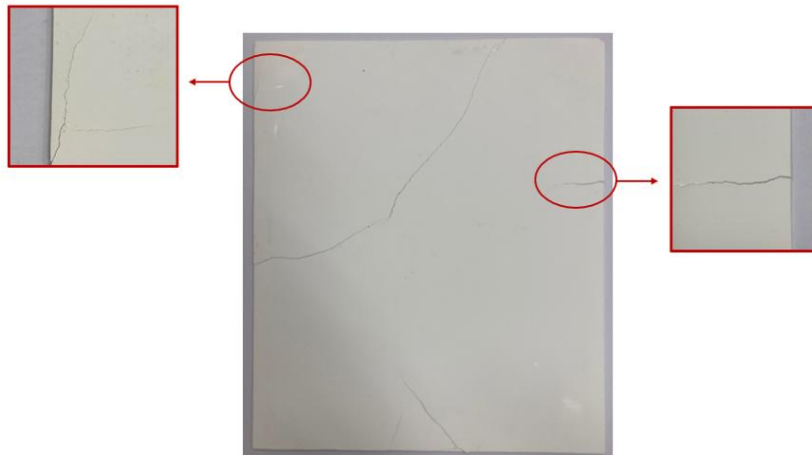
PENDAHULUAN

Utilisasi radiasi pengion dalam perawatan medis, baik untuk diagnosis dengan sinar-X ataupun terapi dan imaging dengan radioisotop (seperti F-18, Tc-99m, I-131), merupakan bagian penting dari layanan kesehatan modern. Akan tetapi, paparan radiasi ini bahkan pada dosis rendah atau dari sumber hamburan, menimbulkan resiko kesehatan kumulatif yang besar pada para tenaga medis yang secara berkala bekerja di lingkungan tersebut. Secara tradisional, timbal (Pb) telah terbukti sebagai material standar untuk pembuatan pakaian pelindung seperti apron karena densitas dan nomor atomnya yang tinggi, menawarkan atenuasi radiasi yang efektif. Namun, penggunaan timbal disetir oleh kelemahan kritis yaitu beratnya yang substansial membatasi mobilitas dan menyebabkan kelelahan fisik untuk pengguna, serta sifat toksiknya yang berbahaya bagi kesehatan manusia dan menyebabkan masalah lingkungan selama pembuangan. Urgensi dalam mengatasi masalah ini memacu penelitian intensif untuk mencari material alternatif yang lebih aman, lebih ringan, fleksibel, tetapi tetap menawarkan perlindungan radiasi yang setara bahkan lebih baik.

Komposit polimer yang diperkuat dengan material pengisi (filler) bernomor atom tinggi adalah kandidat yang paling menjanjikan pada konteks ini. Di antara berbagai filler, tungsten (W) dan senyawanya (seperti WO₃, WC, WC-Co) mendapat perhatian khusus karena memiliki nomor atom ($Z=74$) dan densitas yang tinggi (misalnya W murni $\sim 19.3 \text{ g/cm}^3$, WC $\sim 15.6 \text{ g/cm}^3$), mendekati timbal ($Z=82$, $\sim 11.3 \text{ g/cm}^3$), namun bersifat non-toksik dan ramah lingkungan. Penggabungan partikel tungsten ke dalam matriks polimer yang ringan dan fleksibel (seperti PVA, LDPE, PDMS, PU, Epoksi, PC, EVA) memiliki potensi untuk pembuatan perisai dengan bahan yang jauh lebih ringan dan nyaman digunakan sebagai pakaian pelindung.

State of the art dalam penelitian ini menunjukkan bahwa efektivitas komposit polimer-tungsten sebagai perisai terhadap sinar-X dan gamma umumnya meningkat dengan peningkatan konsentrasi (persentase berat) filler. Beberapa studi juga mengeksplorasi pengaruh ukuran partikel filler, membandingkan skala mikro dan nano. Meskipun partikel nano dapat menawarkan keuntungan dalam hal dispersi yang lebih homogen dan rasio luas permukaan terhadap volume yang lebih

tinggi, studi simulasi dan beberapa hasil eksperimental menunjukkan bahwa konsentrasi filler seringkali menjadi faktor yang lebih dominan dalam menentukan kemampuan atenuasi dibandingkan ukuran partikel itu sendiri, terutama pada konsentrasi tinggi. Selain itu, beberapa metode fabrikasi telah dikembangkan, mulai dari solution casting, compounding dan hot pressing, electrospinning untuk pembuatan nanofiber, pencetakan 3D (FDM), hingga pengembangan struktur hibrida yang menggabungkan kain tenun dan lembaran komposit. Kendala utama yang biasanya dihadapi adalah memelihara dispersi filler yang homogen pada tingkat konsentrasi tinggi dan mempertahankan sifat mekanik yang cukup baik (fleksibilitas, kekuatan tarik, durabilitas), karena penambahan filler dalam kuantitas besar dapat menyebabkan material menjadi rapuh atau keras.



Gambar 1. Retakan pada lembaran pelindung menurunkan kinerja pelindung.

Meskipun terdapat banyak penelitian individual yang telah melaporkan sukses dalam pembuatan dan pengujian berbagai jenis komposit polimer-tungsten, terdapat kesenjangan (research gap) dalam literatur berupa kekurangan tinjauan holistik yang secara spesifik mensintesis dan membandingkan berbagai pendekatan ini (jenis filler, ukuran partikel, matriks polimer, proses fabrikasi) dalam konteks persyaratan spesifik untuk pakaian pelindung radiasi medis. Persyaratan ini tidak hanya mencakup efektivitas perisai yang sebanding dengan standar timbal pada rentang energi medis yang sesuai, tetapi juga berat minimal, fleksibilitas tinggi untuk kenyamanan dan mobilitas, serta ketahanan yang cukup untuk aplikasi sehari-hari.

Dengan demikian, tujuan penelitian ini ialah untuk melakukan tinjauan literatur integratif atas penelitian-penelitian terkini tentang komposit polimer matriks tungsten (termasuk skala nano dan mikro) untuk menilai secara kritis potensinya sebagai alternatif timbal yang pantas untuk aplikasi pakaian pelindung radiasi medis. Tinjauan ini akan menitikberatkan analisis perbandingan efektivitas perisai radiasi, sifat fisik (densitas, berat), sifat mekanik (fleksibilitas, kekuatan tarik, kekerasan), serta metode fabrikasi yang dilakukan dalam literatur yang relevan.

Untuk mencapai tujuan tersebut, metode yang diterapkan adalah Integrative Literature Review (ILR). Penelitian ini akan mengidentifikasi, menyeleksi, dan menganalisis secara tematik artikel-artikel penelitian primer (eksperimental, simulasi, karakterisasi) yang relevan dari basis data ilmiah. Sintesis dari temuan-temuan kunci akan dipergunakan untuk memetakan kondisi terkini, mengidentifikasi keunggulan dan keterbatasan dari masing-masing pendekatan, serta merumuskan kesimpulan mengenai kelayakan dan arah pengembangan masa depan komposit polimer-tungsten sebagai material pakaian pelindung radiasi medis pengganti timbal.

METODE PENELITIAN

Jenis Penelitian ini menggunakan metode Integrative Literature Review (ILR) atau Kajian Literatur Integratif. Metode ILR digunakan karena bertujuan untuk merangkum, mengkritisi, dan mensintesis secara komprehensif literatur empiris dan teoretis dari sejumlah studi independen pada suatu topik tertentu, dalam hal ini adalah pengembangan dan karakterisasi komposit polimer

berbasis tungsten sebagai alternatif timbal untuk pakaian pelindung radiasi medis. Pendekatan ini memungkinkan untuk identifikasi tren, kesenjangan, konsistensi, dan inkonsistensi pada hasil penelitian yang ada, untuk membangun pemahaman yang lebih holistik dan mendalam.

Sumber Data dan Teknik Pengumpulan Sumber data utama untuk kajian ini adalah literatur ilmiah primer yang relevan, yang dipublikasikan dalam bentuk artikel jurnal *peer-reviewed*. Proses identifikasi literatur dilakukan melalui penelusuran sistematis pada basis data akademik utama, termasuk Scopus, Web of Science, PubMed, ScienceDirect, dan Google Scholar. Kata kunci utama yang digunakan dalam pencarian meliputi kombinasi dari: "*radiation shielding*", "*polymer composite*", "*tungsten*", "*tungsten oxide*", "*tungsten carbide*", "*lead alternative*", "*medical radiation*", "*protective clothing*", "*apron*", "*nanocomposite*", "*nanoparticle*", "*microparticle*", "*lightweight*", dan "*flexible*".

Kriteria inklusi untuk seleksi artikel meliputi:

1. Fokus pada pengembangan atau karakterisasi material komposit berbasis polimer dengan pengisi utama tungsten atau senyawanya (W, WO₃, WC, WC-Co).
2. Mengkaji sifat perisai radiasi (sinar-X atau gamma) dari material tersebut.
3. Menyediakan data kuantitatif atau kualitatif mengenai sifat fisik (misal, densitas), mekanik (contohnya, fleksibilitas, kekuatan tarik, kekerasan), atau mikrostruktur.
4. Secara eksplisit atau implisit membahas potensi material sebagai alternatif pengganti timbal, terutama untuk aplikasi pelindung personal dalam bidang medis.
5. Dipublikasikan dalam jurnal ilmiah *peer-reviewed* dalam bahasa Inggris atau Indonesia.

Tidak ada batasan ketat pada tahun publikasi untuk menangkap evolusi penelitian, namun prioritas diberikan pada studi-studi yang lebih baru (dalam 5-10 tahun terakhir) untuk merefleksikan *state of the art*. Beberapa artikel inti menjadi fokus utama analisis dalam tinjauan ini, yang dipilih karena representasi mereka terhadap berbagai jenis *filler* tungsten (W, WO₃, WC, WC-Co), matriks polimer (PVA, PDMS, LDPE, PU, Epoksi, PC, EVA), skala partikel (nano dan mikro), metode fabrikasi, dan aspek karakterisasi yang relevan dengan tujuan kajian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tinjauan mendalam terhadap studi ini mengungkapkan lanskap penelitian yang kaya mengenai pengembangan komposit polimer matriks tungsten sebagai alternatif fungsional untuk perisai timbal dalam aplikasi pakaian pelindung radiasi medis. Sintesis temuan dari studi-studi ini menyoroti kemajuan signifikan dalam mencapai efektivitas atenuasi radiasi dengan material yang lebih ringan dan aman, namun juga mengidentifikasi tantangan yang masih perlu diatasi. Pembahasan ini akan mengelaborasi temuan-temuan tersebut melalui tiga tema utama: efektivitas perisai radiasi dan faktor-faktor yang mempengaruhinya, karakteristik fisik dan mekanik yang krusial untuk aplikasi pakaian, dan aspek fabrikasi dan mikrostruktur yang mempengaruhi kinerja akhir material.

Efektivitas Perisai Radiasi: Konsentrasi, Ukuran Partikel, dan Energi

Faktor paling fundamental yang menentukan kemampuan perisai suatu material adalah kemampuannya untuk mengatenuasi radiasi pengion. Secara konsisten, seluruh studi yang telah diulas menunjukkan bahwa inkorporasi filler berbasis tungsten baik dalam bentuk unsur murni (W), oksida (WO₃), karbida (WC), ataupun karbida-kobalt (WC-Co) ke dalam beberapa matriks polimer secara signifikan meningkatkan kemampuan atenuasi radiasi (sinar-X dan gamma) dibandingkan dengan matriks polimer murni. Peningkatan ini secara langsung berkorelasi positif dengan konsentrasi (persentase berat atau wt%) filler yang ditambahkan. Fenomena ini dapat dijelaskan oleh prinsip dasar interaksi radiasi-materi: semakin tinggi konsentrasi atom bernomor atom (*Z*) tinggi (seperti W, *Z*=74) per satuan volume, semakin besar probabilitas foton (sinar-X atau gamma) berinteraksi melalui proses dominan seperti efek fotolistrik (sangat bergantung pada *Z*⁴⁻⁵ pada energi rendah), hamburan Compton (bergantung pada *Z* pada energi menengah), dan produksi pasangan (bergantung pada *Z*² pada energi sangat tinggi >1.02 MeV). Dalam studi oleh Mourad et al. (2021) secara kuantitatif menunjukkan tren ini, dimana koefisien atenuasi linier komposit PVA-WO₃ meningkat hampir sepuluh kali lipat (dari 0.051 cm⁻¹ menjadi 0.513 cm⁻¹) ketika konsentrasi nano WO₃ ditingkatkan dari 0% menjadi 80% untuk radiasi gamma 364 keV (I-

131). Demikian pula, Abualroos et al. (2024), yang mencapai konsentrasi *filler* sangat tinggi hingga 90% (WC atau WC-Co dalam epoksi), melaporkan nilai koefisien atenuasi massa tertinggi pada konsentrasi tersebut di seluruh rentang energi gamma yang diuji (60-1332.5 keV), menegaskan bahwa memaksimalkan kandungan *filler* adalah strategi kunci untuk meningkatkan daya henti radiasi.

Mengenai pengaruh ukuran partikel (nano vs mikro), bukti dari literatur yang ditinjau memberikan gambaran yang lebih bernuansa. Studi simulasi MCNP oleh Alavian & Tavakoli-Anbaran (2019) secara sistematis membandingkan partikel W dari 100 nm hingga 100 μ m dalam matriks LDPE. Mereka menemukan bahwa meskipun partikel nano (100 nm) secara konsisten menunjukkan faktor transmisi yang sedikit lebih rendah (atenuasi sedikit lebih baik) dibandingkan partikel mikro, terutama pada konsentrasi *filler* yang lebih rendah (<10 wt%), perbedaan ini menjadi kurang signifikan pada konsentrasi yang lebih tinggi. Kesimpulan mereka adalah bahwa proporsi *filler* secara keseluruhan memainkan peran yang lebih dominan daripada ukuran partikel dalam atenuasi gamma. Di sisi lain, temuan eksperimental dari Abualroos et al. (2024), yang membandingkan WC mikro (1-2 μ m) dengan WC-Co nano (60-100 nm) dalam epoksi, menunjukkan bahwa pada konsentrasi yang sama (misalnya 90%), komposit nano (WCoE) memberikan efisiensi perisai yang sedikit lebih baik *hanya* pada energi gamma yang lebih tinggi (>223 keV). Keunggulan partikel nano ini seringkali diatribusikan pada rasio luas permukaan terhadap volume yang jauh lebih besar, yang secara teoritis meningkatkan jumlah 'pusat interaksi' potensial per satuan massa, serta potensi dispersi yang lebih homogen dalam matriks polimer jika aglomerasi dapat dicegah. Namun, perlu dicatat bahwa studi Shemelya et al. (2015) juga menunjukkan bahwa penggunaan partikel *mikro* W (12 μ m) saja, bahkan pada konsentrasi volume sangat rendah (<0.4%), sudah cukup untuk memberikan peningkatan atenuasi sinar-X yang signifikan (~10%) dibandingkan polikarbonat murni, menyoroti efektivitas tungsten bahkan dalam bentuk mikro pada konsentrasi rendah untuk energi yang lebih rendah.

Ketergantungan efektivitas perisai terhadap energi radiasi merupakan faktor kritis lainnya yang diamati secara konsisten. Atenuasi paling efektif terjadi pada energi foton rendah (puluhan hingga beberapa ratus keV), di mana efek fotolistrik sangat dominan. Seiring dengan meningkatnya energi foton ke rentang MeV menengah, hamburan Compton menjadi mekanisme interaksi utama, menghasilkan penurunan koefisien atenuasi. Pada energi yang lebih tinggi lagi (>1.02 MeV), produksi pasangan mulai berkontribusi dan dapat menyebabkan sedikit peningkatan kembali atau stabilisasi koefisien atenuasi.

Profil ketergantungan energi ini penting dalam konteks medis, di mana energi radiasi bervariasi (misalnya, sinar-X diagnostik ~40-120 kVp, Tc-99m ~140 keV, I-131 ~364 keV, F-18 ~511 keV). Hal menarik adalah potensi anomali di sekitar tepi serapan K (K-edge) dari filler atau timbal. Tepi serapan K timbal berada di sekitar 88 keV, sementara tungsten sekitar 69.5 keV. Soylu et al. (2015) mengamati bahwa komposit WC-EVA mereka kurang efektif dibandingkan Pb pada 60 keV (Am-241), yang mereka atribusikan pada kemungkinan hamburan sekunder yang lebih tinggi dari tungsten pada energi rendah tersebut. Namun, Abualroos et al. (2024) melaporkan bahwa komposit WC/WC-Co-Epoksi justru mendekati atau bahkan melampaui Pb pada 60 keV. Perbedaan ini menggaris bawahi kompleksitas interaksi pada energi rendah dan mungkin dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti komposisi matriks, densitas akhir komposit, dan metodologi eksperimental yang presisi.

Dalam perbandingan langsung kinerjanya dengan timbal (Pb) sebagai standar emas, studi-studi ini secara kolektif memberikan bukti kuat bahwa komposit polimer-tungsten memiliki potensi untuk mencapai tingkat perlindungan yang setara atau bahkan melampaui timbal pada kondisi spesifik. Kim (2022) mendemonstrasikan pembuatan komposit hibrida W-PDMS/Kain-W yang setara dengan 0.55 mmPb, standar yang umum digunakan untuk proteksi dari radioisotop, sambil menawarkan keunggulan mekanik. Kim et al. (2024) juga mencapai kesetaraan Pb yang sangat mirip (misalnya, film 0.3 mm $\approx$ 0.279 mmPb pada 100 kVp) untuk film nanofiber ultra-tipis mereka dalam rentang energi sinar-X diagnostik. Soylu et al. (2015) melaporkan bahwa komposit WC-EVA mereka sebanding atau sedikit lebih unggul dari Pb pada energi gamma 364 keV (I-131) dan 662 keV (Cs-137) untuk ketebalan yang sama. Abualroos et al. (2024) juga menunjukkan kinerja yang sangat kompetitif, terutama pada konsentrasi filler tertinggi (90%), di mana nilai

koefisien atenuasi massa komposit tungsten mendekati nilai timbal di sebagian besar rentang energi yang di uji. Ringkasan berbagai studi yang membandingkan efektivitas komposit polimer bermatriks tungsten terhadap timbal (Pb) pada berbagai kondisi eksperimental ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Ringkasan Penelitian Komposit Polimer Bermatriks Tungsten

Jenis Filler	Matriks Polimer	Konsentrasi (wt%)	Energi Uji	Hasil Atenuasi	Keterangan
Nano WO ₃	PVA	0% – 80%	364 keV (I-131)	Koefisien atenuasi linier naik (0.051 → 0.513 cm ⁻¹). fokus pada hubungan Menunjukkan korelasi kuat konsentrasi–atenuasi. antara konsentrasi dan atenuasi.	
WC (mikro) & WC-Co (nano)	Epoksi	Hingga 90%	60 – 1332.5 keV	Atenuasi massa tertinggi pada 90%.	Kinerja atenuasi mendekati atau melampaui Pb pada 60 keV; sangat kompetitif dengan Pb di sebagian besar rentang energi.
W (nano & mikro)	LDPE	<10 wt% (simulasi)	Gamma (Simulasi MCNP)	Konsentrasi filler lebih dominan daripada partikel.	Studi simulasi (nano vs mikro).
W (mikro)	Polikarbonat (PC)	<0.4% (volume)	Sinar-X	Peningkatan atenuasi dibanding PC murni.	~10% Peningkatan dibanding PC murni
WC	EVA	Tidak disebutkan	60 keV (Am-241), 364 keV (I-131), 662 keV (Cs-137)	Pada 60 keV: kurang efektif dibanding Pb. Pada 364 & 662 keV: sebanding atau sedikit lebih unggul.	Kinerja bergantung pada energi; lebih unggul dari Pb pada energi gamma menengah, namun kurang efektif pada energi rendah.
W & Kain-W (struktur hibrida)	PDMS	Tidak disebutkan	Standar radioisotop	Efisiensi perisai mencapai kesetaraan 0.55 mmPb.	Setara dengan 0.55 mmPb; sesuai standar umum apron medis.
Tungsten (nanofiber)	Nanofiber (Electrospinning)	Tidak disebutkan	100 kVp (Sinar-X)	Film 0.3 mm ≈ 0.279 mmPb.	Efisiensi atenuasi sangat mirip dengan Pb untuk energi sinar-X diagnostik.
WO ₃	PVA	5% – 50%	Tidak disebutkan	Densitas 2.03 g/cm ³ (pada 50%).	Fokus pada efisiensi berat: hanya ~17.9% dari berat Pb

Karakteristik Fisik dan Mekanik: Menuju Pakaian Pelindung Fungsional

Di luar kemampuan atenuasi radiasi, kelayakan suatu material untuk pakaian pelindung sangat ditentukan oleh karakteristik fisik dan mekaniknya, terutama berat, fleksibilitas, dan durabilitas. Keunggulan paling signifikan dari komposit polimer-tungsten dibandingkan timbal adalah bobotnya yang jauh lebih ringan. Hal ini secara inheren berasal dari penggunaan matriks polimer yang memiliki densitas rendah (biasanya sekitar 0.9 - 1.2 g/cm³) dibandingkan timbal (~11.3 g/cm³). Meskipun penambahan *filler* tungsten (dengan densitas ~15.6 hingga ~19.3 g/cm³, tergantung senyawanya) akan meningkatkan densitas keseluruhan komposit, densitas akhir ini tetap secara substansial lebih rendah daripada timbal padat. Muthamma et al. (2020) mengilustrasikan ini dengan baik: komposit PVA yang mengandung 50% WO₃ memiliki densitas sekitar 2.03 g/cm³, yang berarti "% heaviness"-nya hanya sekitar 17.9% dibandingkan timbal (yang dinormalisasi sebagai 100%) . Bahkan pada konsentrasi *filler* sangat tinggi (90% WC dalam epoksi), densitas komposit yang dilaporkan oleh Abualroos et al. (2024) adalah sekitar 6.6 g/cm³ , masih hampir setengah dari densitas timbal. Pengurangan berat ini sangat krusial untuk mengurangi beban fisik pada tenaga medis yang harus mengenakan pakaian pelindung untuk waktu yang lama.

Fleksibilitas adalah properti kunci lainnya untuk pakaian pelindung agar tidak menghambat gerakan. Matriks polimer seperti Ethylene Vinyl Acetate (EVA) , Polyvinyl Alcohol (PVA) , Polydimethyl Siloxane (PDMS) , dan Polyurethane (PU) dikenal memiliki fleksibilitas inheren yang baik. Studi oleh Soylu et al. (2015) dan Mourad et al. (2021) secara khusus mencatat sifat elastis dan lembut dari komposit berbasis EVA dan PVA mereka. Kim (2022) secara eksplisit menargetkan peningkatan fleksibilitas dan mengatasi masalah keretakan pada lembaran perisai konvensional dengan mengadopsi struktur hibrida yang menggabungkan fleksibilitas kain tenun dengan kemampuan perisai lembaran komposit . Kim et al. (2024) juga mencapai fleksibilitas tinggi dengan memproduksi material dalam bentuk film nanofiber ultra-tipis melalui electrospinning . Namun, perlu disadari adanya trade-off: peningkatan konsentrasi filler partikulat

anorganik untuk memaksimalkan atenuasi radiasi cenderung membuat material menjadi lebih kaku dan kurang fleksibel. Menemukan keseimbangan optimal antara kandungan filler dan fleksibilitas matriks polimer menjadi tantangan desain yang penting.

Aspek kekuatan mekanik dan durabilitas juga sangat relevan untuk apron yang akan sering dipakai, dilipat, dan mungkin dibersihkan. Penambahan partikel filler ke dalam matriks polimer dapat memiliki efek yang bervariasi pada sifat mekanik. Kim (2022) mengamati bahwa metode pembuatan lembaran tradisional dengan kandungan filler tinggi cenderung menurunkan kekuatan tarik karena partikel mengganggu kontinuitas matriks polimer dan melemahkan ikatan antarmolekul. Solusi inovatifnya adalah menggunakan struktur hibrida, di mana lapisan kain tenun (dibuat dari kawat tungsten yang dilapisi benang polimer) berfungsi sebagai 'tulang punggung' mekanis, yang terbukti meningkatkan kekuatan tarik komposit akhir hingga 53% dibandingkan lembaran tanpa penguat kain. Sebaliknya, studi oleh Shemelya et al. (2015), yang menggunakan konsentrasi filler W sangat rendah (~0.3% volume) dalam polikarbonat (PC) yang relatif kuat untuk aplikasi 3D printing, menemukan bahwa penambahan filler ini tidak menyebabkan penurunan signifikan secara statistik pada kekuatan tarik (UTS) maupun ketahanan impak.

Analisis fraktografi (patahan) oleh Shemelya et al. (2015) memberikan wawasan penting: pada konsentrasi rendah, partikel tungsten tampaknya tidak bertindak sebagai titik inisiasi retakan utama; sebaliknya, retakan lebih mungkin dimulai dari antarmuka antar lapisan hasil cetak 3D (raster). Ini menunjukkan bahwa pada pembebanan rendah, partikel W hanya bertindak sebagai 'cacat' pasif daripada 'konsentrator tegangan' aktif. Di sisi lain, Abualroos et al. (2024) menemukan bahwa penambahan filler WC dan terutama WC-Co (yang dikenal lebih keras) justru meningkatkan kekerasan permukaan komposit epoksi secara signifikan. Peningkatan kekerasan ini dapat berkontribusi pada ketahanan aus atau abrasi yang lebih baik, suatu sifat yang diinginkan untuk apron. Temuan-temuan ini secara kolektif menyoroti bahwa dampak penambahan filler pada sifat mekanik sangat bergantung pada jenis filler, konsentrasinya, jenis matriks polimer, kualitas antarmuka polimer-filler, dan metode fabrikasi yang digunakan. Untuk aplikasi apron, keseimbangan antara fleksibilitas, kekuatan tarik (untuk menahan tarikan dan lipatan), dan kekerasan permukaan (untuk ketahanan aus) perlu dicapai.

Interpretasi dan Implikasi untuk Pakaian Pelindung Medis

Sintesis dari literatur yang ditinjau secara meyakinkan menegaskan bahwa komposit polimer matriks tungsten, baik yang menggunakan filler nano maupun mikro, menawarkan alternatif yang sangat menjanjikan dan layak dibandingkan timbal untuk aplikasi pakaian pelindung radiasi medis. Keunggulan fundamental terletak pada profil keamanannya (non-toksik) dan bobotnya yang jauh lebih ringan, yang secara langsung berpotensi meningkatkan kenyamanan, mengurangi kelelahan, dan meningkatkan mobilitas tenaga medis secara signifikan. Studi-studi tersebut menunjukkan bahwa efektivitas perisai yang setara dengan standar timbal yang umum digunakan dalam praktik klinis (misalnya, 0.25 mmPb atau 0.5 mmPb) dapat dicapai melalui pemilihan jenis filler (W, WO₃, WC, WC-Co), konsentrasi filler, dan ketebalan material yang tepat, terutama untuk rentang energi sinar-X diagnostik dan energi gamma rendah hingga menengah yang relevan.

Namun, tinjauan ini juga menyoroti adanya trade-off yang kompleks dan perlu dipertimbangkan secara cermat dalam proses desain dan pemilihan material untuk apron atau pakaian pelindung:

- Perisai vs. Berat/Fleksibilitas: Meningkatkan konsentrasi filler adalah cara paling efektif untuk meningkatkan atenuasi radiasi, terutama untuk menahan gamma berenergi lebih tinggi (misalnya dari F-18). Namun, hal ini secara inheren akan meningkatkan densitas (meskipun tetap lebih ringan dari Pb) dan berisiko signifikan mengurangi fleksibilitas material, yang sangat penting untuk kenyamanan pakai. Pemilihan matriks polimer yang sangat fleksibel seperti EVA atau PU, atau adopsi struktur inovatif seperti hibrida kain-lembaran atau film nanofiber, menjadi strategi penting untuk menyeimbangkan kebutuhan ini.
- Nano vs. Mikro: Partikel nano mungkin menawarkan sedikit keunggulan atenuasi per satuan massa pada kondisi tertentu dan berpotensi menghasilkan dispersi yang lebih baik jika diproses dengan benar. Namun, tantangan aglomerasi pada konsentrasi tinggi bisa lebih parah untuk nano, dan biayanya mungkin lebih tinggi. Partikel mikro, meskipun mungkin sedikit kurang efisien per massa, bisa lebih mudah diproses dalam jumlah besar dan terbukti efektif, terutama

pada konsentrasi sedang hingga tinggi. Pilihan antara nano dan mikro mungkin bergantung pada target energi spesifik, metode fabrikasi yang tersedia, dan pertimbangan biaya.

- Sifat Mekanik vs. Kandungan Filler: Seperti dibahas, penambahan *filler* dapat mempengaruhi kekuatan tarik, ketahanan impak, dan kekerasan. Konsentrasi *filler* yang sangat tinggi dapat membuat material rapuh, sementara konsentrasi sangat rendah mungkin tidak memberikan cukup perisai untuk semua aplikasi. Desain material harus mempertimbangkan durabilitas jangka panjang terhadap keausan, lipatan berulang, dan prosedur pembersihan yang umum di lingkungan rumah sakit.

KESIMPULAN

Tinjauan ini secara komprehensif mengkaji potensi komposit polimer matriks tungsten, baik yang menggunakan *filler* berskala nano maupun mikro, sebagai solusi alternatif pengganti timbal (Pb) dalam aplikasi krusial pakaian pelindung radiasi medis. Urgensi pencarian alternatif ini didorong oleh keterbatasan fundamental timbal, yaitu beratnya yang berlebihan yang mengganggu mobilitas dan menyebabkan kelelahan, serta toksisitasnya yang membahayakan kesehatan pengguna dan lingkungan. Tujuan utama dari pengembangan material baru ini adalah menciptakan pakaian pelindung yang tidak hanya efektif menahan radiasi tetapi juga ringan, aman (tidak beracun), fleksibel, dan tahan lama untuk penggunaan klinis sehari-hari.

Sintesis dari literatur yang dikaji menegaskan bahwa komposit polimer yang diperkuat dengan *filler* berbasis tungsten (W, WO₃, WC, WC-Co) menunjukkan kemampuan atenuasi radiasi (sinar-X dan gamma) yang signifikan, dengan efektivitas yang dapat disesuaikan melalui peningkatan konsentrasi *filler* hingga mencapai tingkat perlindungan yang setara dengan standar timbal (misalnya, 0.25 atau 0.5 mmPb). Keunggulan paling menonjol dari komposit ini untuk aplikasi pakaian pelindung adalah bobotnya yang jauh lebih ringan dibandingkan timbal, profil non-toksik, dan fleksibilitas yang dapat diatur melalui pemilihan matriks polimer (seperti EVA, PU, PDMS) dan metode fabrikasi. Meskipun konsentrasi *filler* adalah faktor dominan untuk atenuasi, penggunaan partikel nano dapat memberikan sedikit keunggulan pada kondisi tertentu.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. M. V, B. S. Gudennavar, and S. B. Gudennavar, "Attenuation parameters of polyvinyl alcohol-tungsten oxide composites at the photon energies 5.895, 6.490, 59.54 and 662 keV," *Polish Journal of Medical Physics and Engineering*, vol. 26, no. 2, pp. 77–85, Jun. 2020. doi: 10.2478/pjmpe-2020-0009.
- [2] S.-C. Kim, "Evaluation of Shielding Performance of Gamma Ray Shielding Tungsten Polymer Composite with LBL-Type Layered Structure," *Coatings*, vol. 14, no. 1, p. 36, Jan. 2024. doi: 10.3390/coatings14010036.
- [3] M. Asgari, H. Afarideh, H. Ghafoorifard, and E. A. Amirabadi, "Comparison of nano/micro lead, bismuth and tungsten on the gamma shielding properties of the flexible composites against photon in wide energy range (40 keV-662 keV)," *Nuclear Engineering and Technology*, 2021. doi: 10.1016/j.net.2021.06.022.
- [4] M. M. Mourad, Y. Abdou, M. R. Berber, and F. Elhussiny, "Using Nano Tungsten Oxide Polymer Composite As A Gamma Radiation Shielding," *Delta Journal of Science*, vol. 43, no. 1, pp. 126–132, 2021.
- [5] S.-C. Kim, "Performance Evaluation According to Polymer Encapsulation Characteristics of Eco-Friendly Plastic Gamma-Ray Shield," *Coatings*, vol. 12, no. 11, p. 1621, Oct. 2022. doi: 10.3390/coatings12111621.
- [6] Y. Kim, S. Park, and Y. Seo, "Enhanced X-ray Shielding Ability of Polymer-Nonleaded Metal Composites by Multilayer Structuring," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, May 2015. doi: 10.1021/acs.iecr.5b00425.
- [7] H. Kim, J. Lim, J. Kim, J. Lee, and Y. Seo, "Multilayer Structuring of Nonleaded Metal (BiSn)/Polymer/Tungsten Composites for Enhanced γ -Ray Shielding," *Advanced Engineering Materials*, vol. 22, p. 1901448, Feb. 2020. doi: 10.1002/adem.201901448.
- [8] Y. Liu, B. Liu, Y. Gu, S. Wang, and M. Li, "Gamma radiation shielding property of

- continuous fiber reinforced epoxy matrix composite containing functional filler using Monte Carlo simulation," *Nuclear Materials and Energy*, vol. 33, p. 101246, Sep. 2022. doi: 10.1016/j.nme.2022.101246.
- [9] H. Alavian and H. Tavakoli-Anbaran, "Study on gamma shielding polymer composites reinforced with different sizes and proportions of tungsten particles using MCNP code," *Progress in Nuclear Energy*, vol. 115, pp. 91–98, 2019. doi: 10.1016/j.pnucene.2019.03.033.
- [10] S.-C. Kim, "Effect of Polymer Shell Structure of a Gamma-ray Shielding Film Prepared Using Composite Material on Shielding Performance," *Coatings*, vol. 12, no. 12, p. 1846, Nov. 2022. doi: 10.3390/coatings12121846.
- [11] S.-C. Kim and J.-S. Song, "Manufacturing and performance evaluation of medical radiation shielding fiber with plasma thermal spray coating technology," *Scientific Reports*, vol. 11, no. 1, p. 22418, 2021. doi: 10.1038/s41598-021-01897-w.
- [12] S.-C. Kim and H. Byun, "Development of ultra-thin radiation-shielding paper through nanofiber modeling of morpho butterfly wing structure," *Scientific Reports*, vol. 12, no. 1, p. 22532, 2022. doi: 10.1038/s41598-022-27174-y.
- [13] S.-C. Kim, "Medical-Radiation-Shielding Film Fabricated by Imitating the Layered Structure Pattern of Abalone Shell and Verification of Its Shielding Effect," *Materials*, vol. 16, no. 24, p. 7700, Dec. 2023. doi: 10.3390/ma16247700.
- [14] E. Mansouri, A. Mesbahi, R. Malekzadeh, and A. Mansouri, "Shielding characteristics of nanocomposites for protection against X- and gamma rays in medical applications: effect of particle size, photon energy and nano-particle concentration," *Radiation and Environmental Biophysics*, Aug. 2020. doi: 10.1007/s00411-020-00865-8.
- [15] S.-C. Kim, "Comparison of Shielding Material Dispersion Characteristics and Shielding Efficiency for Manufacturing Medical X-ray Shielding Barriers," *Materials*, vol. 15, no. 17, p. 6075, Sep. 2022. doi: 10.3390/ma15176075.
- [16] S.-C. Kim, J. Hou, W.-G. Jang, and H.-S. Byun, "The Development of a Composite Thin Film Barrier of Tungsten Fe₃O₄-rGO (FerGO) for the Radiation Shielding of Medical Personnel," *Polymers*, vol. 16, no. 2, p. 215, Jan. 2024. doi: 10.3390/polym16020215.
- [17] N. J. Abualroos, M. I. Idris, H. Ibrahim, M. I. Kamaruzaman, and R. Zainon, "Physical, mechanical, and microstructural characterisation of tungsten carbide-based polymeric composites for radiation shielding application," *Scientific Reports*, vol. 14, no. 1, p. 1375, 2024. doi: 10.1038/s41598-023-49842-3.
- [18] L. Gilys, E. Griškonis, P. Griškevičius, and D. Adlienė, "Lead Free Multilayered Polymer Composites for Radiation Shielding," *Polymers*, vol. 14, no. 9, p. 1696, Apr. 2022. doi: 10.3390/polym14091696.
- [19] S.-C. Kim, "Tungsten-Based Hybrid Composite Shield for Medical Radioisotope Defense," *Materials*, vol. 15, no. 4, p. 1338, Feb. 2022. doi: 10.3390/ma15041338.
- [20] C. M. Shemelya et al., "Mechanical, Electromagnetic, and X-ray Shielding Characterization of a 3D Printable Tungsten-Polycarbonate Polymer Matrix Composite for Space-Based Applications," *Journal of Electronic Materials*, Mar. 2015. doi: 10.1007/s11664-015-3687-7.
- [21] H. M. Soylu, F. Yurt Lambrecht, and O. A. Ersöz, "Gamma radiation shielding efficiency of a new lead-free composite material," *J Radioanal Nucl Chem*, 2015. doi: 10.1007/s10967-015-4051-3.