

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kemajuan pesat dalam pemanfaatan teknologi nuklir dan radiasi pengion, seperti sinar-X dan sinar gamma, telah memberikan kontribusi signifikan di berbagai bidang termasuk sains, kedokteran diagnostik, pertanian, hingga industri nuklir. Namun, paparan yang tidak terkendali terhadap radiasi pengion yang memiliki daya tembus tinggi dapat memicu bahaya kesehatan yang serius, termasuk penyakit radiasi, mutasi seluler, hingga efek stokastik seperti kanker. Oleh karena itu, material perisai radiasi memainkan peran yang sangat krusial dalam melindungi manusia dan lingkungan dari risiko paparan berlebih. (Karim dkk., 2025).

Timbal (Pb) dan material berbasis timbal telah menjadi bahan perisai yang paling umum digunakan karena nomor atomnya yang tinggi ($Z = 82$) dan densitasnya yang juga tinggi. Properti ini memungkinkan timbal untuk secara efektif menyerap dan melemahkan radiasi (Khorami & Salehi, 2025). Namun, timbul kekhawatiran yang meningkat tentang bahaya timbal, yang merupakan bahan karsinogenik, beracun, dan berbahaya. Paparan timbal dapat menyebabkan kerusakan otak, sistem saraf, ginjal, dan tekanan darah tinggi. Debu timbal, yang dapat terbentuk pada permukaan material, dapat terhirup atau tertelan, dan bahkan dapat dibawa pulang oleh pekerja ke keluarganya, menimbulkan risiko serius terutama bagi anak-anak. Selain itu, berat timbal yang berlebihan dapat menyebabkan masalah ortopedi dan nyeri punggung bagi personel yang mengenakan pakaian pelindung seperti celemek timbal. Karena masalah ini, ada kebutuhan mendesak untuk mengembangkan alternatif material perisai yang bebas timbal, tidak beracun, dan ramah lingkungan (AbuAlRoos dkk., 2019). Radiasi pengion sinar-X telah digunakan di berbagai bidang, termasuk pembangkit listrik tenaga nuklir, kedokteran nuklir, pencitraan radiologi, pusat penelitian, dan industri modern (Dong dkk., 2017). Fasilitas pencitraan medis sering menggunakan apron berbahan timbal-karet untuk meminimalkan paparan radiasi pengion bagi staf, pasien, dan pengasuh (Hayre dkk., 2020). Apron berbahan dasar timbal ini memang

efektif dalam melindungi tubuh dari radiasi, tetapi penggunaannya semakin dibatasi karena bobotnya yang berat, toksisitas (racun) yang tinggi, kurangnya fleksibilitas, dan tidak ramah lingkungan. Oleh karena itu, kebutuhan akan alternatif bebas timbal yang dapat memberikan perlindungan serupa atau lebih baik sambil mengatasi masalah-masalah ini menjadi sangat jelas (Kaçal dkk., 2021). Penelitian terbaru mengenai perisai sinar-X untuk aplikasi medis telah berfokus pada pengembangan kain pelindung radiasi yang lebih ringan dan efektif (Tekin dkk., 2019). Selain itu, penelitian telah menunjukkan bahwa material pelindung radiasi bebas timbal (Pb) dengan nomor atom tinggi, seperti bismut (Bi), tungsten (W), dan barium (Ba), dapat digunakan sebagai pengisi material pelindung untuk membentuk komposit yang terdiri dari berbagai jenis polimer (Chang dkk., 2015). Polimer dipilih sebagai matriks karena memberikan perlindungan yang sangat baik, ringan, mudah disiapkan, dan mudah didesain (Alavian & Tavakoli-Anbaran, 2019).

Sebagai solusi, pengembangan komposit polimer yang didoping dengan partikel oksida logam berat (Heavy Metal Oxides/HMOs) dengan nomor atom tinggi telah menjadi fokus utama. Polimer dipilih sebagai matriks pelindung karena bobotnya yang ringan, fleksibel, mudah difabrikasi, serta kemampuannya untuk mendispersikan partikel pengisi. Dalam studi ini, Polyvinyl Alcohol (PVA) dipilih sebagai matriks inang karena sifat biokompatibilitasnya yang tinggi, stabilitas mekanik yang unggul, dan kemampuannya mendispersikan filler secara homogen. Namun, karena polimer memiliki densitas dan nomor atom yang rendah, kemampuannya menahan foton berenergi tinggi sangat terbatas, sehingga membutuhkan penambahan material pengisi seperti Bismuth Oksida (Bi_2O_3) dan Tungsten Oksida (WO_3). Pemilihan kedua unsur ini didasari oleh nomor atomnya yang tinggi; Bismuth sangat efektif meningkatkan penyerapan radiasi, sementara Tungsten memiliki stabilitas densitas yang sangat baik untuk atenuasi gamma.

Berbagai penelitian telah mengeksplorasi potensi komposit polimer bebas timbal. Penelitian oleh Almutery dkk. (2025) membuktikan bahwa penambahan nanopartikel Bi_2O_3 pada polimer PMMA sukses meningkatkan koefisien atenuasi dan menurunkan laju transmisi foton secara signifikan. Meskipun efisien, masih terdapat celah penelitian (*research gap*) yang krusial pada studi-studi terdahulu.

Sebagian besar pengembangan material perisai masih mengandalkan penggunaan *filler* tunggal. Pada praktiknya, pembebanan *filler* logam tunggal secara ekstrem untuk mengejar nilai atenuasi radiasi tertinggi justru memicu aglomerasi partikel yang merusak jaringan ikatan pada rantai polimer. Hal ini mengakibatkan degradasi mekanik yang parah, di mana komposit menjadi sangat rapuh dan kehilangan elastisitasnya. Material yang rapuh tentu tidak layak diaplikasikan sebagai apron pelindung yang menuntut fleksibilitas tinggi. Beranjak dari celah tersebut, penelitian ini menggagas pendekatan baru melalui inkorporasi sistem pengisi ganda (*hybrid filler*) berupa paduan Bi_2O_3 dan WO_3 ke dalam matriks PVA. Tujuan utama dari pencampuran ini bukanlah sekadar mengejar nilai atenuasi absolut tertinggi, melainkan untuk menemukan titik keseimbangan optimum (*trade-off*) antara kemampuan meredam radiasi dan retensi integritas struktural material. Komposisi hibrida diharapkan mampu mendistribusikan tegangan mekanik secara sinergis untuk mempertahankan ketangguhan polimer, sekaligus memberikan opasitas yang mumpuni terhadap radiasi pengion.

Adapun parameter pembeda dari penelitian ini berfokus pada evaluasi terpadu antara sifat mekanik (*Tensile Strength* dan *Elongation at Break*) dengan parameter fisika radiasi yang komprehensif, mencakup *Linear Attenuation Coefficient* (LAC), *Mass Attenuation Coefficient* (MAC), *Half Value Layer* (HVL), *Tenth Value Layer* (TVL), dan *Mean Free Path* (MFP). Untuk memastikan kelayakan aplikatifnya, pengujian atenuasi diukur secara spesifik pada dua spektrum yang kontras, yakni energi rendah (59,5 keV dari Am-241) yang merepresentasikan dominasi efek fotolistrik, dan energi menengah-tinggi (662 keV dari Cs-137) yang dikendalikan oleh hamburan Compton. Melalui modifikasi komposisi fisik ini, penelitian bertujuan membuktikan bahwa sinergi hibrida PVA/ Bi_2O_3 / WO_3 sangat potensial diaplikasikan sebagai material perisai radiasi diagnostik yang tidak hanya efisien dan aman, tetapi juga ergonomis dan tangguh secara struktural.

1.2. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini yaitu:

1. Menganalisis karakteristik sifat mekanik (*tensile strength* dan *elongation at break*) serta parameter perisai radiasi yang meliputi *Linear Attenuation Coefficient* (LAC), *Mass Attenuation Coefficient* (MAC), *Half Value Layer* (HVL), *Tenth Value Layer* (TVL), dan *Mean Free Path* (MFP) pada komposit berbasis polimer PVA.).
2. Mengevaluasi pengaruh variasi massa paduan *filler* Bi_2O_3 dan WO_3 terhadap efektivitas atenuasi radiasi material komposit, baik pada paparan tingkat energi rendah (efek fotolistrik) maupun energi menengah-tinggi (hamburan Compton).

1.3. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini, yaitu:

1. Memberikan kontribusi literatur keilmuan di bidang fisika material dan fisika radiasi terkait interaksi radiasi pengion dengan komposit polimer bebas timbal.
2. Membuktikan secara empiris sinergitas pelemahan hamburan foton dari perpaduan dua elemen logam berat (Bismuth dan Tungsten) di dalam matriks PVA sebagai referensi dasar bagi pengembangan material proteksi radiasi tingkat lanjut.