Simulasi Teoretis terhadap Kaca Borat Terdoping SnO untuk Optimalisasi Efisiensi Perisai Radiasi Sinar Gamma

Theoretical Simulation of SnO-Doped Borate Glasses for Enhanced Gamma Radiation Shielding Performance

Oki Ade Putra[1]*, Dhani Nur Indra Syamputra[1], Fariz Budi Arafat[2], Rin Hafsahtul Asiah[3]

[1]Departemen Fisika, Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Diponegoro, Semarang, Jawa Tengah, Indonesia 50275
[2]Departemen Statistika, Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Diponegoro, Semarang, Jawa Tengah, Indonesia 50275
[3]Departemen Radioterapi dan Kedokteran Nuklir, RSUP dr. Sardjito, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta, Indonesia 55281

Email: *okiadep@fisika.undip.ac.id; dsyamputra@fisika.fsm.undip.ac.id; farizbudia@lecturer.undip.ac.id; rinhafsah@gmail.com

Received: 3rd July 2025; Revised: 16th July 2025; Accepted: 2nd August 2025

Abstrak – *Kaca perisai radiasi berbasis bismut borat telah banyak diteliti karena sifat optik dan ketahanannya yang baik. Dalam penelitian ini, dilakukan evaluasi terhadap pengaruh variasi fraksi mol SnO terhadap kinerja perisai sistem kaca xSnO–(60–x)B_2O_3–20Bi_2O_3–10TiO_2–10MgO dengan x = 0, 4, 8, dan 12 mol%. Perhitungan dilakukan secara teoritis menggunakan perangkat lunak XCOM dari National Institute of Standards and Technology (NIST) pada rentang energi 0,01–3 MeV. Parameter yang dianalisis meliputi koefisien atenuasi massa (MAC), koefisien atenuasi linier (LAC), half value layer (HVL), tenth-value-layer (TVL), dan mean free path (MFP). Hasil simulasi menunjukkan bahwa penambahan SnO secara signifikan meningkatkan densitas kaca, yang berdampak pada peningkatan nilai MAC dan penurunan nilai HVL, TVL, dan MFP. Selain itu, dibandingkan dengan kaca komersial RS-253-G18 dan boraks sintetis 40%, seluruh sampel berbasis SnO menunjukkan performa perisai yang lebih baik. Oleh karena itu, semua sampel kaca berbasis SnO, khususnya dengan 12 mol% SnO, memiliki potensi besar sebagai material alternatif untuk aplikasi pelindung radiasi energi tinggi.*

Kata kunci: *kaca perisai radiasi, SnO (timah(II) oksida), koefisien atenuasi massa (MAC), XCOM-NIST, energi foton gamma*

Abstract – *Radiation shielding glasses based on bismuth borate have attracted significant attention due to their excellent optical properties and high durability. In this study, the influence of varying SnO molar fractions on the radiation shielding performance of xSnO–(60–x)B2O3–20Bi2O3–10TiO2–10MgO glass systems was theoretically evaluated, with x = 0, 4, 8, and 12 mol%. Theoretical calculations were performed using the XCOM software from the National Institute of Standards and Technology (NIST) over the energy range of 0.01–3 MeV. The analyzed parameters included mass attenuation coefficient (MAC), linear attenuation coefficient (LAC), half value layer (HVL), tenth value layer (TVL), and mean free path (MFP). The simulation results revealed that increasing SnO content significantly enhances the glass density, which leads to higher MAC values and reduced HVL, TVL, and MFP values. Furthermore, when compared to commercial shielding glasses such as RS-253-G18 and 40% synthetic borax, all SnO-based samples exhibited superior radiation attenuation performance. Among them, the composition containing 12 mol% SnO demonstrated the most effective shielding behavior, highlighting its strong potential as an alternative high-performance material for gamma radiation protection applications.*

Keywords: *Radiation shielding glass; SnO (tin(II) oxide); mass attenuation coefficient (MAC); XCOM-NIST; gamma photon energy.*

1. Pendahuluan

Pemanfaatan radiasi pengion yang semakin luas dalam bidang medis, industri, dan penelitian menuntut peningkatan sistem proteksi radiasi untuk meminimalkan dampak biologis yang merugikan [1,2]. Tiga prinsip utama dalam proteksi radiasi yaitu pengurangan waktu paparan, peningkatan jarak terhadap sumber radiasi, dan penggunaan material perisai radiasi yang prima merupakan pendekatan fundamental yang harus diimplementasikan guna mengurangi dosis radiasi yang diterima oleh pekerja maupun lingkungan sekitar [3].

Material konvensional seperti campuran antara beton dan timbal masih banyak digunakan sebagai perisai radiasi karena kemampuannya dalam menghambat penyebaran radiasi. Namun, beton memiliki sejumlah keterbatasan, antara lain sifatnya yang kaku (tidak fleksibel), kebutuhan ketebalan yang besar untuk mencapai efisiensi perlindungan, serta kandungan timbal (Pb) dalam konsentrasi tinggi yang bersifat toksik bagi kesehatan manusia dan lingkungan [4,5]. Dalam konteks ini, material berbasis kaca telah muncul sebagai alternatif yang menjanjikan, berkat sejumlah keunggulan seperti transparansi optik (yang memungkinkan pemantauan visual tanpa paparan langsung), fleksibilitas bentuk, stabilitas termal yang tinggi, serta kemudahan dalam proses pembentukan dan kombinasi dengan material lain untuk aplikasi spesifik, termasuk pada ruang terbatas atau perangkat portabel [6,7].

Beberapa penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa penambahan oksida logam ke dalam matriks kaca dapat meningkatkan kinerja atenuasi radiasi. Sebagai contoh, penambahan Nd_2O_3 ke dalam sistem kaca Bi_2O_3–$50B_2O_3$–SrO–Nd_2O_3 menghasilkan nilai *mass attenuation coefficient* (MAC) tertinggi sebesar 76,72 cm^2/g pada energi foton 0,015 MeV [8]. Pada sistem kaca CoO–Na_2O–B_2O_3, penambahan CdO dengan konsentrasi tinggi diketahui menurunkan nilai *half value layer* (HVL) hingga 4,421 cm pada energi 1,333 MeV [9]. Penelitian lain yang menggunakan TiO_2 dalam sistem La_2O_3–B_2O_3–Gd_2O_3–Nb_2O_5–ZrO_2–SiO_2 menunjukkan peningkatan MAC mencapai 0,5271 cm^2/g pada 0,15 MeV [10]. Meskipun menjanjikan, sebagian besar kajian tersebut belum membahas tentang pengaruh penambahan SnO pada sistem kaca bismut borat.

Dalam penelitian ini, senyawa SnO (timah(II) oksida) digunakan sebagai aditif dalam sistem kaca perisai radiasi. SnO memiliki nomor atom tinggi (Z = 50) dan massa atom yang besar (134,71u), yang membuatnya sangat efektif dalam menyerap radiasi energi tinggi seperti sinar gamma. Densitasnya yang tinggi (6,45 g/cm^3) turut memperkuat efisiensi dalam menghalangi radiasi dibandingkan material lain yang memiliki nomor atom rendah. Selain itu, SnO menunjukkan stabilitas termal dan kimia yang baik, serta tidak mengurangi transparansi kaca secara signifikan, sehingga memungkinkan aplikasinya dalam perangkat yang memerlukan visibilitas dan ketahanan mekanik.

Tujuan dari penelitian ini adalah mengevaluasi performa perisai radiasi dari sistem kaca xSnO–(60–x)B_2O_3–20Bi_2O_3–10TiO_2–10MgO, dengan variasi fraksi mol SnO sebesar 0, 4, 8, dan 12 mol%. Parameter atenuasi seperti MAC, *linear attenuation coefficient* (LAC), HVL, *tenth value layer* (TVL), dan *mean free path* (MFP) dihitung menggunakan perangkat lunak XCOM dari NIST dalam rentang energi foton 0,01–3 MeV. Hasil simulasi ini dibandingkan dengan karakteristik perisai berbasis kaca dan beton komersial, dengan harapan memberikan kontribusi dalam pengembangan material kaca berbasis SnO untuk aplikasi proteksi radiasi di masa mendatang.

2. Landasan Teori

Perhitungan nilai LAC didasarkan pada hukum Lambert-Beer, yang menyatakan bahwa intensitas radiasi akan berkurang secara eksponensial seiring dengan meningkatnya ketebalan material perisai, mengikuti Persamaan (1) [11].

$$I = I_0 e^{-\mu x} \tag{1}$$

Di mana nilai I_0 dan I adalah masing-masing adalah intensitas radiasi sebelum dan sesudah melewati material kaca, μ adalah LAC dalam satuan cm^{-1}, dan *x* adalah ketebalan material (cm).

MAC merupakan parameter penting yang menggambarkan kemampuan material dalam menyerap radiasi per satuan massa. Tidak seperti LAC yang bergantung pada panjang lintasan, MAC memberikan nilai yang lebih umum dan dapat digunakan untuk membandingkan berbagai jenis material, karena mempertimbangkan densitas material. Nilai MAC dihitung dengan membagi LAC dengan densitas material, atau dengan pendekatan fraksi massa unsur penyusunnya seperti Persamaan (2) [12].

$$MAC = \frac{\mu}{\rho} = \sum_i w_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i \quad (2)$$

Di mana, w_i adalah fraksi massa dan $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i$ adalah MAC masing-masing unsur dalam komposisi kaca.

Parameter tambahan untuk mengevaluasi efisiensi perisai meliputi HVL dan TVL. HVL mengindikasikan ketebalan material yang dibutuhkan untuk mereduksi intensitas radiasi hingga 50%, sedangkan TVL menunjukkan ketebalan yang diperlukan untuk mereduksinya hingga 10%. Keduanya dihitung menggunakan Persamaan (3) dan (4) [13].

$$HVL = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (3)$$

$$TVL = \frac{\ln 10}{\mu} \quad (4)$$

Sementara itu, MFP didefinisikan sebagai jarak rata-rata yang ditempuh oleh partikel radiasi sebelum berinteraksi dengan atom dalam material. Nilai MFP dihitung berdasarkan Persamaan (5) [14].

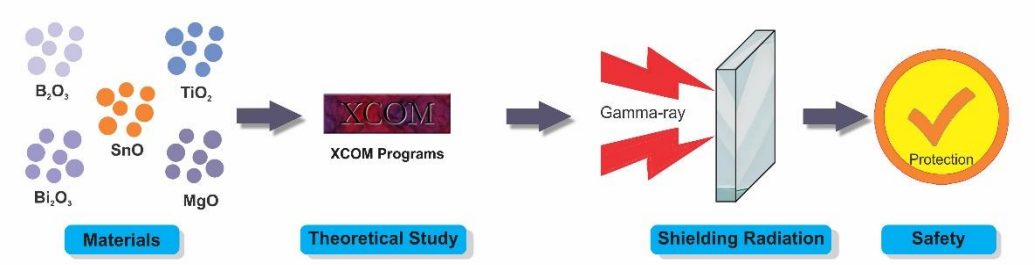
$$MFP = \frac{1}{\mu} \quad (5)$$

Semakin kecil nilai HVL, TVL, dan MFP, maka semakin baik kemampuan material kaca dalam menghalangi penyebaran radiasi, sehingga menunjukkan efisiensi perisai yang lebih tinggi.

3. Metode

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah senyawa oksida pembentuk kaca, yaitu SnO, B_2O_3, Bi_2O_3, TiO_2, dan MgO. Komposisi kimia kaca yang digunakan kimia kaca yang digunakan adalah $xSnO–(60–x)B_2O_3–20Bi_2O_3–10TiO–10MgO$, dengan nilai x sebesar 0, 4, 8, dan 12 mol%. Empat sampel dengan variasi fraksi mol SnO tersebut dianalisis untuk mengetahui karakteristik atenuasi radiasinya pada rentang energi foton tertentu.

Alat bantu yang digunakan dalam penelitian ini adalah perangkat lunak XCOM dari National Institute of Standards and Technology (NIST), yang berfungsi untuk menghitung nilai MAC secara teoritis. Perangkat lunak ini mampu menyimulasikan proses interaksi foton seperti hamburan, absorpsi fotoelektrik, dan produksi pasangan, pada rentang energi 0,001–20 MeV [15]. Alur penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



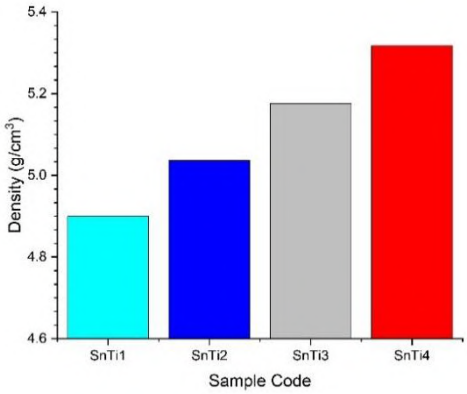
Gambar 1. Alur penelitian pengaruh SnO terhadap kemampuan serap radiasi pengion.

Parameter pendukung lainnya seperti LAC, HVL, TVL, dan MFP juga dihitung untuk menilai performa perisai radiasi masing-masing sampel. Data fraksi berat masing-masing unsur penyusun dalam setiap sampel kaca, yang diperoleh dari basis data XCOM-NIST. Data ini digunakan sebagai input dalam simulasi parameter atenuasi radiasi. ditampilkan pada Tabel 1. Penamaan kode sampel (SnTi1–SnTi4) merepresentasikan urutan variasi fraksi mol SnO dalam sistem kaca $xSnO–(60–x)B_2O_3–20Bi_2O_3–10TiO_2–10MgO$, dengan x = 0, 4, 8, dan 12 mol%. Awalan "Sn" mengacu pada dopan SnO, sedangkan "Ti" menunjukkan keberadaan tetap dari TiO_2 pada sampel.

Table 1. Fraksi berat unsur penyusun dalam setiap sampel kaca, berdasarkan data dari database XCOM–NIST.

Kode Sampel	Komposisi Kimia (mol%)	Fraksi berat unsur dalam setiap sampel						Densitas (g/cm^3)
		B	O	Mg	Ti	Sn	Bi	
SnTi1	$60B_2O_3$–$20Bi_2O_3$–$10TiO_2$–10MgO	0,0882	0,2939	0,0165	0,0325	–	0,5687	4,8992
SnTi2	4SnO–$56B_2O_3$–$20Bi_2O_3$–$10TiO_2$–10MgO	0,0809	0,2802	0,0162	0,0320	0,0317	0,5588	5,0358
SnTi3	8SnO–$52B_2O3$–$20Bi_2O_3$–$10TiO_2$–10MgO	0,0738	0,2670	0,0159	0,0314	0,0624	0,5492	5,1751
SnTi4	12SnO–$48B_2O_3$–$20Bi_2O_3$–$10TiO_2$–10MgO	0,0670	0,2542	0,0157	0,0309	0,0920	0,5400	5,3173

Peningkatan konsentrasi SnO dalam sistem kaca diperkirakan berkontribusi terhadap peningkatan densitas total material. Untuk mengonfirmasi hal tersebut, nilai densitas dari masing-masing sampel dihitung berdasarkan komposisi kimianya. Hasil perhitungan densitas untuk keempat variasi sampel disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Densitas sampel kaca.

Berdasarkan Gambar 2, terlihat bahwa peningkatan konsentrasi SnO dalam sistem kaca secara langsung berkontribusi terhadap peningkatan densitas campuran. Hal ini terjadi meskipun fraksi B_2O_3 berkurang, karena SnO memiliki densitas yang lebih tinggi. Densitas maksimum tercatat pada sampel dengan komposisi SnO 12 mol% (SnTi4), yaitu sebesar 5,3172 g/cm^3.

4. Hasil Dan Pembahasan

Pada MAC merupakan parameter utama dalam mengevaluasi kemampuan suatu material dalam menghambat radiasi ionisasi. Semakin tinggi nilai MAC, semakin besar efisiensi material dalam menyerap foton gamma, sehingga menunjukkan kualitas perisai yang lebih baik [16]. Nilai MAC bergantung pada dua faktor utama, yaitu energi foton dan densitas material. Nilai MAC dihitung secara teoritis menggunakan perangkat lunak XCOM–NIST pada rentang energi foton 0,01–3 MeV untuk setiap sampel kaca dengan variasi fraksi mol SnO. Hasil perhitungan MAC ditampilkan secara lengkap pada Tabel 2 berikut.

Berdasarkan Tabel 2, terlihat bahwa nilai MAC secara umum menurun seiring dengan meningkatnya energi foton, yang merupakan karakteristik umum dari interaksi radiasi terhadap material pelindung seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Sebagai contoh, pada sampel SnTi4, nilai MAC mencapai 88,440 cm^2/g pada energi 0,010 MeV dan turun drastis menjadi 0,039 cm^2/g pada energi 3,000 MeV. Tren penurunan ini berkaitan erat dengan mekanisme dominan interaksi foton terhadap materi pada berbagai tingkat energi. Pada energi rendah, interaksi didominasi oleh efek fotoelektrik yang memiliki *cross-section* tinggi dan sangat bergantung pada energi. Seiring meningkatnya energi foton ke tingkat menengah, efek fotoelektrik mulai tergantikan oleh hamburan Compton, di mana probabilitas interaksi sangat dipengaruhi oleh nomor atom efektif (Z_{eff}) [17].

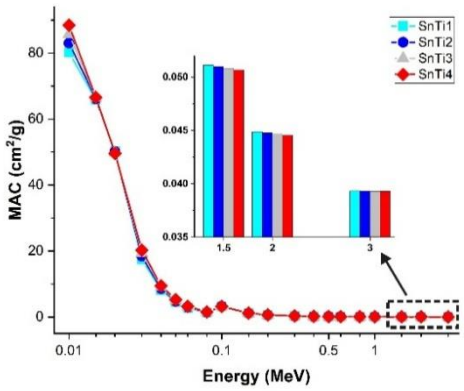
Pada tingkat energi tinggi (E > 1,02 MeV), dominasi beralih pada proses produksi pasangan, yang menyebabkan penurunan nilai MAC menjadi hampir konstan [18]. Fenomena menarik terjadi di sekitar energi 0,100 MeV, di mana terjadi peningkatan mendadak pada nilai MAC. Hal ini diakibatkan oleh

keberadaan *absorption edge* pada kulit K dari unsur berat seperti bismut (Bi), yang juga diamati dalam studi-studi terdahulu pada kaca berbasis Bi_2O_3 [14,19].

Tabel 2. Nilai MAC untuk semua sampel pada rentang energi 0,010 – 3,000 MeV.

Energi	MAC (cm^2/g)			
(MeV)	SnTi1	SnTi2	SnTi3	SnTi4
0,010	80,150	83,010	85,770	88,440
0,015	65,810	66,080	66,330	66,580
0,020	50,340	50,100	49,870	49,640
0,030	17,400	18,380	19,330	20,240
0,040	8,125	8,583	9,025	9,452
0,050	4,495	4,744	4,984	5,216
0,060	2,782	2,932	3,077	3,217
0,080	1,329	1,395	1,459	1,521
0,100	3,206	3,198	3,190	3,183
0,150	1,180	1,176	1,171	1,167
0,200	0,603	0,600	0,598	0,595
0,300	0,264	0,263	0,262	0,261
0,400	0,166	0,165	0,165	0,164
0,500	0,124	0,124	0,123	0,123
0,600	0,102	0,102	0,101	0,101
0,800	0,079	0,078	0,078	0,078
1,000	0,066	0,066	0,066	0,065
1,500	0,051	0,051	0,051	0,051
2,000	0,045	0,045	0,045	0,045
3,000	0,039	0,039	0,039	0,039

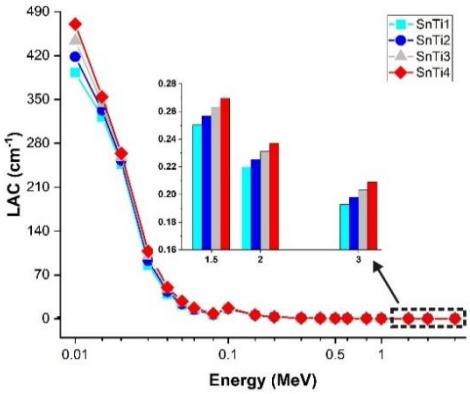
Grafik pada Gambar 3 diperoleh dari hasil simulasi teoritis menggunakan perangkat lunak XCOM–NIST, yang menghasilkan nilai MAC untuk masing-masing sampel pada berbagai tingkat energi foton. Nilai-nilai tersebut telah disajikan sebelumnya pada Tabel 2 dan kemudian divisualisasikan dalam bentuk grafik untuk mempermudah analisis tren hubungan antara energi foton dan nilai MAC.



Gambar 3. Hubungan antara MAC dan energi foton.

Selain energi, densitas material turut memengaruhi nilai MAC. Semakin tinggi densitas, semakin besar jumlah elektron per satuan volume, sehingga meningkatkan probabilitas interaksi antara foton dan elektron [19]. Penjelasan ini merujuk pada Gambar 3, yang menunjukkan hubungan antara energi foton dan nilai MAC berdasarkan hasil simulasi. Data menunjukkan bahwa sampel SnTi4, dengan konsentrasi SnO tertinggi (12 mol%), memiliki densitas paling besar dan secara konsisten menunjukkan nilai MAC tertinggi pada setiap tingkat energi. Sebagai contoh, pada energi 0,015 MeV, nilai MAC berturut-turut untuk sampel SnTi1 hingga SnTi4 adalah 65,810 cm^2/g, 66,080 cm^2/g, 66,330 cm^2/g, dan 66,580 cm^2/g.

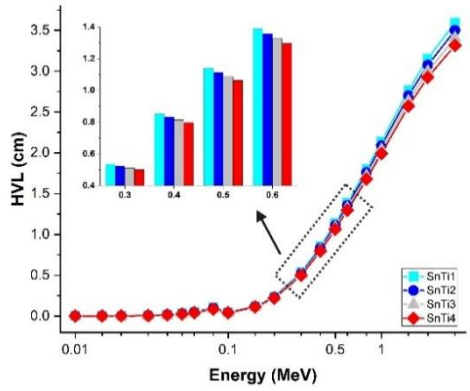
Nilai LAC diperoleh dengan mengalikan nilai MAC dengan densitas sampel, sesuai dengan persamaan (2). Grafik hubungan antara nilai LAC dan energi foton ditampilkan pada Gambar 4 untuk mempermudah visualisasi perbedaan performa antar sampel dalam menyerap radiasi.



Gambar 4. Hubungan antara LAC dan energi foton.

Grafik LAC terhadap energi menunjukkan pola yang serupa dengan MAC, yaitu menurun seiring peningkatan energi foton seperti pada Gambar 4. Sebagai contoh, pada sampel SnTi2, nilai LAC sebesar 418,021 cm^{-1} pada 0,015 MeV dan menurun menjadi 0,198 cm^{-1} pada 3,000 MeV. Tidak seperti MAC, nilai LAC dipengaruhi secara langsung oleh perubahan densitas material [6]. Pada energi 0,050 MeV, nilai LAC meningkat seiring dengan peningkatan fraksi mol SnO yaitu masing-masing 22,021 cm^{-1}, 23,889 cm^{-1}, 25,792 cm^{-1}, dan 27,734 cm^{-1} untuk sampel SnTi1 hingga SnTi4. Hasil ini menegaskan bahwa peningkatan kandungan SnO berkontribusi langsung terhadap efektivitas perisai melalui peningkatan densitas dan probabilitas interaksi foton-elektron.

Nilai HVL yang lebih rendah menandakan efisiensi perisai yang lebih tinggi, karena material tersebut mampu menahan radiasi dengan ketebalan yang lebih kecil [9]. Nilai HVL dihitung menggunakan Persamaan (3), yang bergantung pada nilai LAC masing-masing sampel. Hasil perhitungan nilai HVL untuk setiap sampel kaca pada berbagai energi foton disajikan dalam Gambar 5.

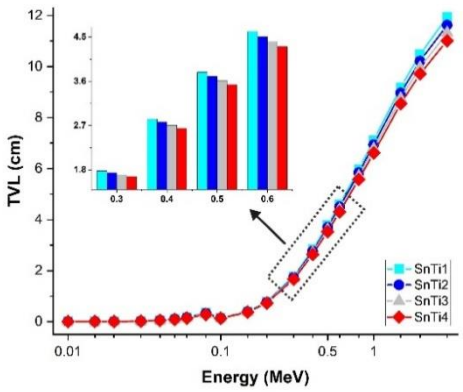


Gambar 5. Hubungan antara HVL dan energi foton untuk sampel SnTi.

Nilai HVL dipengaruhi secara signifikan oleh dua faktor utama, yaitu energi foton yang digunakan dan densitas material pelindung. Pertama, seiring dengan meningkatnya energi foton, dibutuhkan ketebalan material yang lebih besar untuk mencapai pengurangan intensitas radiasi yang sama. Sebagai contoh, pada sampel SnTi3, nilai HVL meningkat secara bertahap dari 0,0026 cm pada energi 0,020 MeV menjadi 0,2240 cm pada 0,200 MeV, dan mencapai 2,9990 cm pada 2,000 MeV. Peningkatan ini mencerminkan bahwa foton dengan energi lebih tinggi memiliki penetrasi yang lebih besar dan memerlukan material yang lebih tebal untuk diredam secara efektif [20].

Faktor kedua yang memengaruhi HVL adalah densitas material. Material dengan densitas lebih tinggi memiliki kerapatan elektron yang lebih besar, sehingga meningkatkan kemungkinan terjadinya interaksi antara foton dan elektron [20]. Hal ini menghasilkan nilai HVL yang lebih rendah. Sebagai ilustrasi, pada energi 0,4 MeV, nilai HVL menurun secara bertahap dari 0,8522 cm (SnTi1) menjadi 0,8331 cm (SnTi2), 0,8142 cm (SnTi3), dan 0,7958 cm (SnTi4). Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan fraksi mol SnO dalam sistem kaca meningkatkan densitas material dan memperkuat kemampuan perisai, walaupun disertai dengan penurunan fraksi mol B_2O_3 yang bersifat ringan.

Nilai TVL dihitung menggunakan Persamaan (4), berdasarkan nilai LAC masing-masing sampel. Grafik hubungan antara nilai TVL dan energi foton ditunjukkan pada Gambar 6.



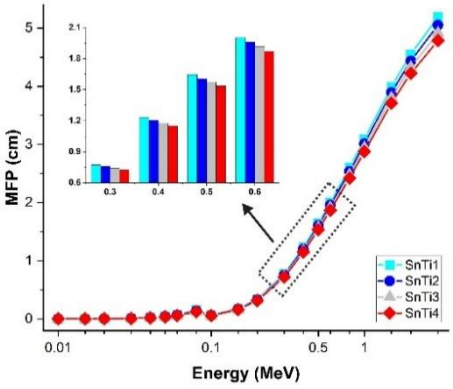
Gambar 6. Hubungan antara TVL dan energi foton untuk sampel SnTi.

TVL adalah parameter yang sepadan dengan HVL, dengan perbedaan bahwa TVL menunjukkan ketebalan material yang dibutuhkan untuk menurunkan intensitas radiasi hingga 10% dari nilai awalnya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6. Secara umum, nilai TVL menunjukkan tren yang sama dengan HVL, meningkat seiring dengan bertambahnya energi foton, dan menurun dengan meningkatnya densitas material [21].

Pada tingkat energi tinggi, efek produksi pasangan mulai mendominasi, dan perubahan nilai TVL menjadi lebih stabil. Selain itu, fenomena *absorption edge* akibat unsur berat seperti Bi menyebabkan penurunan mendadak pada nilai HVL dan TVL di sekitar energi 0,100 MeV [14], [19]. Secara keseluruhan, pada rentang energi 0,3 MeV, 0,4 MeV, 0,5 MeV, dan 0,6 MeV, sampel SnTi4 menunjukkan nilai TVL yang paling rendah dibandingkan sampel lainnya. Hal ini mengindikasikan bahwa SnTi4 memiliki kemampuan paling efektif dalam mereduksi intensitas radiasi hingga 10% dengan ketebalan material yang lebih tipis. Dengan kata lain, penambahan SnO hingga 12 mol% secara nyata meningkatkan efisiensi perisai, terutama pada tingkat energi menengah.

Nilai MFP yang lebih kecil menunjukkan bahwa material tersebut lebih efektif dalam meredam radiasi, karena partikel memiliki kemungkinan lebih besar untuk berinteraksi dalam jarak pendek [14]. Nilai MFP dalam penelitian ini dihitung menggunakan Persamaan (5), dan hasilnya divisualisasikan pada Gambar 7.

Berdasarkan Gambar 7, untuk sampel yang sama (misalnya SnTi4), nilai MFP menunjukkan kecenderungan meningkat seiring bertambahnya energi foton. Sebagai contoh, pada energi 0,01 MeV, nilai MFP hanya sebesar 0,0021 cm, sedangkan pada 3 MeV meningkat tajam menjadi 4,7853 cm. Fenomena ini dapat dijelaskan oleh kenyataan bahwa pada energi tinggi, peluang terjadinya interaksi antara foton dan elektron menjadi lebih kecil akibat peningkatan energi kinetik foton, sehingga menurunkan probabilitas interaksi dalam material [17].



Gambar 7. Variasi MFP terhadap energi foton untuk berbagai sampel kaca.

Untuk mengevaluasi kinerja perisai kaca berbasis SnO secara lebih lanjut, dilakukan perbandingan nilai MFP dengan dua material referensi, yaitu kaca komersial RS-253-G18 [8] dan boraks sintetis 40% [22]. Evaluasi dilakukan pada dua tingkat energi foton, yakni 0,662 MeV dan 1,332 MeV, untuk mengamati pengaruh fraksi mol SnO terhadap performa perisai radiasi. Nilai MFP pada kedua energi tersebut diperoleh dari hasil simulasi menggunakan perangkat lunak XCOM–NIST, berdasarkan input komposisi kimia masing-masing sampel.

Pada energi 0,662 MeV, ditemukan bahwa peningkatan kandungan SnO pada sistem kaca menyebabkan penurunan nilai MFP. Nilai MFP berturut-turut untuk sampel SnTi1 hingga SnTi4 adalah 2,2295 cm, 2,2210 cm, 2,2123 cm, dan 2,2033 cm. Sebagai pembanding, nilai MFP untuk RS-253-G18 dan boraks sintetis 40% masing-masing tercatat sebesar 4,800 cm dan 5,500 cm. Hasil ini menegaskan bahwa seluruh sampel kaca SnTi memiliki efektivitas perisai yang lebih tinggi dibandingkan dengan material komersial, dengan keunggulan tambahan berupa sifat transparan dan fleksibel yang membuatnya lebih sesuai untuk aplikasi desain modern dan ruang terbatas.

Pada tingkat energi yang lebih tinggi, yaitu 1,332 MeV, tren yang serupa juga diamati. Sampel SnTi4 kembali menunjukkan nilai MFP paling rendah sebesar 3,7736 cm, dibandingkan dengan SnTi3 (3,7624 cm), SnTi2 (3,7507 cm), dan SnTi1 (3,7383 cm). Sementara itu, nilai MFP untuk RS-253-G18 dan boraks sintetis 40% masing-masing tercatat sebesar 7,800 cm dan 8,200 cm. Penurunan nilai MFP pada sampel kaca SnTi disebabkan oleh penambahan SnO, yang meningkatkan densitas material dan memperbesar peluang terjadinya interaksi antara foton dan elektron [19].

Secara umum, data ini menunjukkan bahwa peningkatan fraksi mol SnO dalam sistem kaca $xSnO–(60–x)B_2O_3–20Bi_2O_3–10TiO_2–10MgO$ secara konsisten memperbaiki karakteristik perisai dengan memperpendek MFP, menjadikan kaca berbasis SnO sebagai kandidat unggul untuk aplikasi pelindung radiasi dibandingkan material konvensional yang bersifat tidak transparan dan kaku.

5. Kesimpulan

Penelitian ini telah mengevaluasi secara teoritis karakteristik perisai radiasi dari sistem kaca $xSnO–(60–x)B_2O_3–20Bi_2O_3–10TiO_2–10MgO$ dengan variasi fraksi mol SnO sebesar 0, 4, 8, dan 12 mol%. Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak XCOM menunjukkan bahwa penambahan SnO secara signifikan meningkatkan densitas kaca, yang berdampak pada peningkatan kemampuan atenuasi terhadap radiasi gamma. Parameter perisai radiasi seperti koefisien atenuasi massa (MAC), koefisien atenuasi linier (LAC), *half value layer* (HVL), *tenth value layer* (TVL), dan mean free path (MFP) semuanya menunjukkan bahwa performa perisai meningkat seiring peningkatan kandungan SnO. Dibandingkan dengan material komersial seperti kaca RS-253-G18 dan boraks sintetis 40%, seluruh sampel berbasis SnO menunjukkan efisiensi perlindungan yang lebih baik. Secara khusus, sampel SnTi4 dengan kandungan SnO sebesar 12 mol% menunjukkan kinerja terbaik pada seluruh parameter yang diuji, menjadikannya kandidat unggulan untuk aplikasi pelindung radiasi transparan di berbagai bidang seperti industri medis, nuklir, dan teknologi deteksi radiasi.

Ucapan Terima Kasih

Proyek ini didanai oleh Universitas Diponegoro melalui skema Riset Dosen Muda dengan nomor kontrak 222-178/UN7.D2/PP/IV/2025. Kami juga mengucapkan terima kasih kepada LPPM Universitas Diponegoro atas dukungan dan bantuannya selama pelaksanaan proyek ini.

Pustaka

[1] A. G. Nuñez-Briones *et al.*, 'Nontoxic flexible PVC nanocomposites with Ta2O5 and Bi2O3 nanoparticles for shielding diagnostic X-rays', *Radiat. Phys. Chem.*, vol. 202, p. 110512, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.radphyschem.2022.110512.

[2] M. S. Al-Buriahi, R. Kurtulus, C. Eke, S. Alomairy, and I. O. Olarinoye, 'An insight into advanced glass systems for radiation shielding applications: A review on different modifiers and heavy metal oxides-based glasses', *Heliyon*, vol. 10, no. 22, p. e40249, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e40249.

[3] M. Dong *et al.*, 'Upcycling of boron bearing blast furnace slag as highly cost-effective shield for protection of neutron radiation hazard: An innovative way and proposal of shielding mechanism', *J. Clean. Prod.*, vol. 355, p. 131817, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.131817.

[4] A. L. Wani, A. Ara, and J. A. Usmani, 'Lead toxicity: a review', *Interdiscip. Toxicol.*, vol. 8, no. 2, pp. 55–64, Jun. 2015, doi: 10.1515/intox-2015-0009.

[5] E. Hannachi, M. I. Sayyed, Y. Slimani, and K. A. Mahmoud, 'Assessment of shielding efficiency of highly energetic electromagnetic radiation for lead-free cuprate-class material: Effect of MnFe2O4 ratios', *Inorg. Chem. Commun.*, vol. 169, p. 112996, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.inoche.2024.112996.

[6] A. H. Almuqrin, M. I. Sayyed, F. F. Alharbi, and M. Elsafi, 'Experimental evaluation of the impact of ZnO on the radiation shielding ability of B2O3–PbO–ZnO–CaO glass systems', *Opt. Mater.*, vol. 157, p. 116213, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.optmat.2024.116213.

[7] J. S. Alzahrani, Z. A. Alrowaili, C. Sriwunkum, and M. S. Al-Buriahi, 'Radiation and nuclear shielding performance of tellurite glass system containing Li2O and MoO3: XCOM and FLUKA Monte Carlo', *J. Radiat. Res. Appl. Sci.*, vol. 17, no. 2, p. 100923, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.jrras.2024.100923.

[8] H. H. Hegazy *et al.*, 'Nuclear shielding properties of B2O3–Bi2O3–SrO glasses modified with Nd2O3: Theoretical and simulation studies', *Ceram. Int.*, vol. 47, no. 2, pp. 2772–2780, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.ceramint.2020.09.131.

[9] A. Maatouk *et al.*, 'Compositional impacts of high CdO content on the structure and radiation shielding efficiency of CoO–Na2O–B2O3 glass system', *Radiat. Phys. Chem.*, vol. 225, p. 112142, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.radphyschem.2024.112142.

[10] G. Hoşgör, E. Tabar, E. Kemah, and H. Yakut, 'Influence of TiO2 content on the radiation shielding properties of the La2O3-B2O3-Gd2O3-Nb2O5-ZrO2-SiO2 glasses', *Radiat. Phys. Chem.*, vol. 226, p. 112281, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.radphyschem.2024.112281.

[11] K. E. Kamaruddin, S. Y. Kok, R. M. Ramli, and N. Z. Noor Azman, 'X-ray attenuation measurement of electrospun polymer composite mats containing Bi2O3/WO3 nanofillers as X-ray shielding material', *Appl. Phys. A*, vol. 130, no. 6, p. 455, Jun. 2024, doi: 10.1007/s00339-024-07600-w.

[12] N. Alomayrah *et al.*, 'Effect of CaF2 on the radiation attenuation properties of SiO2–P2O5–CaO–Na2O bioactive glasses: Theoretical and simulation studies', *Results Phys.*, vol. 58, p. 107441, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.rinp.2024.107441.

[13] Y. Hou, M. Li, Y. Gu, Z. Yang, R. Li, and Z. Zhang, 'Gamma Ray Shielding Property of Tungsten Powder Modified Continuous Basalt Fiber Reinforced Epoxy Matrix Composites', *Polym. Compos.*, vol. 39, no. S4, Dec. 2018, doi: 10.1002/pc.24469.

[14] A. S. Abouhaswa, M. H. A. Mhareb, A. Alalawi, and M. S. Al-Buriahi, 'Physical, structural, optical, and radiation shielding properties of B2O3- 20Bi2O3- 20Na2O2- Sb2O3 glasses: Role of Sb2O3', *J. Non-Cryst. Solids*, vol. 543, p. 120130, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2020.120130.

[15] A. Şengül, 'Gamma-ray attenuation properties of polymer biomaterials: Experiment, XCOM and GAMOS results', *J. Radiat. Res. Appl. Sci.*, vol. 16, no. 4, p. 100702, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.jrras.2023.100702.

[16] Ü. Alver *et al.*, 'Ulexite/HDPE-Bi2O3/HDPE layered composites for neutron and gamma radiation shielding', *Appl. Radiat. Isot.*, vol. 200, p. 110940, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.apradiso.2023.110940.
[17] F. I. El-Agawany, O. L. Tashlykov, K. A. Mahmoud, and Y. S. Rammah, 'The radiation-shielding properties of ternary SiO2–SnO–SnF2 glasses: Simulation and theoretical study', *Ceram. Int.*, vol. 46, no. 15, pp. 23369–23378, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.ceramint.2020.04.042.
[18] P. Kaur, D. Singh, and T. Singh, 'Heavy metal oxide glasses as gamma rays shielding material', *Nucl. Eng. Des.*, vol. 307, pp. 364–376, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.nucengdes.2016.07.029.
[19] S. Yin, H. Wang, S. Wang, J. Zhang, and Y. Zhu, 'Effect of B2O3 on the Radiation Shielding Performance of Telluride Lead Glass System', *Crystals*, vol. 12, no. 2, p. 178, Jan. 2022, doi: 10.3390/cryst12020178.
[20] N. A. M. Alsaif *et al.*, 'Comprehensive study of radiation shielding and mechanical features of Bi2O3-TeO2-B2O3-GeO2 glasses', *J. Aust. Ceram. Soc.*, vol. 57, no. 4, pp. 1267–1274, Sep. 2021, doi: 10.1007/s41779-021-00623-z.
[21] I. N. Fathy *et al.*, 'Enhancing mechanical properties and radiation shielding of high-strength concrete with bulk lead oxide and granodiorite', *Nucl. Eng. Des.*, vol. 429, p. 113626, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.nucengdes.2024.113626.
[22] K. J. Singh, N. Singh, R. S. Kaundal, and K. Singh, 'Gamma-ray shielding and structural properties of PbO–SiO2 glasses', *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. Mater. At.*, vol. 266, no. 6, pp. 944–948, Mar. 2008, doi: 10.1016/j.nimb.2008.02.004.