

การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีของสมบัติการกำบังรังสีของแก้วคาลโคเจไนด์ $\text{Sb}_2\text{S}_3\text{-PbI}_2$ Theoretical Analysis of Radiation Shielding Properties of $\text{Sb}_2\text{S}_3\text{-PbI}_2$ Chalcogenide Glasses

กิตติศักดิ์ ศรีวงศ์ษา^{1,2*}, ณัฐสุกร ศรีกล้าพิง², ปญฺญพนธ์ ปฐมชัยอัมพร², พิทยทิต หินอ่อน², พันธุ์ศักดิ์ กล้ากล่อมจิตร³, อภิษฎา
ศิณชกวัฒน์³, ปารมี เลิศลิ้มปิยรัตน์³, ลัทธพล ม่วงศรี³, อุษา อาหาญ⁴, วราภรณ์ นิสสapa⁴ และ สุนันทศักดิ์ ระวังวงศ์⁴
Kittisak Sriwongsa^{1,2*}, Nattakhon Sriklumphung², Panjapont Pathomchaiumporn², Pittayatit Hinon², Punsak Glumglomchit³,
Apichaya Kiinchohawat³, Paramee Lertlimpiyarat³, Latthaphon Muangsri³, Usa Ajham⁴, Warapon Nissapa⁴ and
Sunantasak Ravangvong⁴

¹หลักสูตรฟิสิกส์ศึกษา คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

²โรงเรียนสาธิต มหาวิทยาลัยศิลปากร (มัธยมศึกษา)

³โรงเรียนหัวหินวิทยาลัย จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

⁴สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

¹Education Program in Physics, Faculty of Education, Silpakorn University

²The demonstration school of Silpakorn University (High School)

³Huahin Vitthayalai School, Prachuapkhirikhan

⁴Division of Science and Technology, Faculty of Science and Technology, Phetchaburi Rajabhat University

*Corresponding author; E-mail: sriwongsa_k@silpakorn.edu

Received: 25 September 2021/Revised: 18 November 2021/Accepted: 06 January 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีของสมบัติการกำบังรังสีของแก้วคาลโคเจไนด์ $\text{Sb}_2\text{S}_3\text{-PbI}_2$ ตามสูตร $(100-x)\text{Sb}_2\text{S}_3\text{-}x\text{PbI}_2$ เมื่อ $x = 10, 20, 30, 40$ และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ โดยดำเนินการหาค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องด้วยโปรแกรม Phy-X/PSD ซึ่งค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติการกำบังรังสีของแก้วระบบนี้ประกอบไปด้วยค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (Mass attenuation coefficient: μ_m) เลขอะตอมยังผล (Effective atomic numbers: Z_{eff}) ความหนาแน่นอิเล็กตรอนยังผล (Effective electron density: N_e) ค่าความสัมพันธ์ของเคอร์มากับอากาศ (Kerma relative to air: K_a) ซึ่งค่าทั้งหมดนี้จะดำเนินการที่พลังงาน 10^{-3} ถึง 10^5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ อีกทั้งยังได้มีการศึกษาค่าตัวประกอบการส่งผ่านของแก้ว (Transmission factor: TF) ที่ความหนาตั้งแต่ 0.5 ถึง 3 เซนติเมตร ที่พลังงาน 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ผลการวิจัย พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (μ_m) ของแก้วตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของ PbI_2 และยังพบอีกว่าแก้วตัวอย่างมีค่าเลขอะตอมยังผล (Z_{eff}) มีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนยังผล (N_e) มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของ PbI_2 นอกจากนี้ความสัมพันธ์ของค่าเคอร์มากับอากาศ (K_a) ของแก้วตัวอย่างมีลักษณะของกราฟเหมือนกับ

กราฟของค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล ในขณะที่ค่าตัวประกอบการส่งผ่านที่ความหนาของแก้วตัวอย่างต่างกันที่พลังงาน 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ พบว่าค่าตัวประกอบการส่งผ่านลดลงเมื่อความหนาของแก้วตัวอย่างเพิ่มขึ้นซึ่งการผลการวิจัยทำให้ทราบว่าตัวอย่างแก้ว $50\text{Sb}_2\text{S}_3\text{-}50\text{PbI}_2$ มีสมบัติการกำบังรังสีดีที่สุด

คำสำคัญ: แก้วคัลโคเจไนด์ สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล ค่าตัวประกอบการส่งผ่าน

Abstract

The aim of this research was to analyze the theoretical analysis of $\text{Sb}_2\text{S}_3\text{-PbI}_2$ chalcogenide glasses for their radiation shielding properties in formula $(100\text{-}x)\text{Sb}_2\text{S}_3\text{-}x\text{PbI}_2$ where $x = 10, 20, 30, 40$ and 50 mol%. The radiation shielding parameters such as mass attenuation coefficient (μ_m), effective atomic numbers (Z_{eff}), effective electron density (N_{el}) and kerma relative to air (K_a) value for glass samples were simulated using Phy-X/PSD program at an energy ranging 10^{-3} ถึง 10^5 MeV. It has also been studied transmission factor (TF) for the thickness $0.5\text{--}3$ cm at energy 662 keV. The results exhibited that the mass attenuation coefficient (μ_m) values of these glass samples increased with increasing of PbI_2 concentration. The glass samples with the highest effective atomic numbers (Z_{eff}) values showed the lowest effective electron density (N_{el}) value and vice versa with increasing PbI_2 content. In addition, the kerma relative to air (K_a) values of glass samples tended to like the mass attenuation coefficient. While the transmission factor (TF) was calculated for variation thicknesses at 662 keV and results revealed that TF decreased with increasing thickness of glass samples. These results indicated that the $50\text{Sb}_2\text{S}_3\text{-}50\text{PbI}_2$ sample was excellent radiation shielding properties.

Keywords: Chalcogenide glasses, Mass attenuation coefficient, Transmission factor

บทนำ

เทคโนโลยีหนึ่งที่น่าสนใจในปัจจุบันนี้ คือ การพัฒนาและสร้างวัสดุต่าง ๆ ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับรังสีและไอโซโทปของรังสี โดยส่วนมากจะเป็นรังสีประเภทไอออนไนซ์ต่าง ๆ โดยวัสดุเหล่านี้จะถูกนำมาใช้งานทางการแพทย์ อุตสาหกรรม การเกษตร โรงพยาบาล และศูนย์วิจัย เป็นต้น¹⁻⁴ ซึ่งการได้รับรังสีโดยตรงหรือแม้แต่การฉาย

รังสีทางอ้อมเป็นระยะเวลานาน ๆ จะทำให้เกิดปัญหาสุขภาพหลายอย่าง เช่น ผิวหนังไหม้หรือมะเร็งหลายชนิด ดังนั้น คนที่เกี่ยวข้องควรได้รับการปกป้องรังสีโดยใช้วัสดุอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น ตะกั่ว แวนดา และอื่น ๆ⁵⁻⁶ ดังนั้นจึงมีข้อกำหนดมาตรฐานควบคุมการใช้รังสีในสถานที่ต่าง ๆ เช่น โรงพยาบาล ศูนย์วิจัย และสถานพยาบาล ข้อกำหนดมาตรฐานต่าง ๆ จะมุ่งเน้นไปที่จุดสำคัญสามประการ ได้แก่



1) ลดเวลาการสัมผัสรังสี 2) เพิ่มระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดกัมมันตภาพรังสีกับบุคคล และ 3) ที่สำคัญที่สุด คือ การใช้วัสดุป้องกันซึ่งเรียกว่าวัสดุกำบังรังสี⁷⁻¹⁰ วัสดุเหล่านี้สามารถดูดกลืนรังสีที่เข้ามาและลดความเข้มของรังสีให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัย

ดังนั้นนักวิจัยในสาขาวิศวกรรมนิวเคลียร์จึงพยายามออกแบบวัสดุกำบังรังสีประเภทต่าง ๆ ตามการใช้งานที่จะใช้ร่วมกับวัสดุเหล่านี้ แต่วัสดุเหล่านี้ต้องมีความสามารถสูงในการดูดกลืนรังสีในปริมาณที่มากที่สุด ตัวอย่างเช่น ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา นักวิจัยประสบความสำเร็จในการพัฒนา โลหะผสมเซรามิก โพลีเมอร์ วัสดุที่ประกอบด้วยตะกั่ว แก้ว และคอนกรีต เพื่อนำมาใช้งานด้านการกำบังรังสี¹¹⁻¹⁴ ในวัสดุประเภทต่าง ๆ เหล่านี้ แก้วเป็นวัสดุที่นักวิจัยสนใจกว่าวัสดุอื่น ๆ เนื่องจากแก้วมีคุณสมบัติต่อการกำบังรังสีได้ดี เพราะมีคุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และทางแสงที่ยอดเยี่ยม แก้วยังผลิตได้ง่าย และมีราคาค่อนข้างถูกเมื่อเทียบกับวัสดุประเภทอื่น ข้อดีที่สำคัญที่สุดประการหนึ่งของแก้ว คือ ง่ายในการกำหนด และควบคุมความหนาแน่น โดยใช้ออกไซด์ของธาตุหนัก เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้ว ว่าความหนาแน่นเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของแก้วในการดูดกลืนรังสี และทำให้คุณสมบัติการกำบังรังสีของแก้วที่เตรียมไว้ดีขึ้น¹⁵⁻¹⁷ คุณสมบัติต่อการป้องกันรังสีของแก้วสามารถปรับปรุงได้ โดยการเติมหรือนำสิ่งเจือปนเข้าไปในวัสดุ ด้วยการเติมแก้วที่มีออกไซด์ของโลหะหนัก (HMO) ซึ่งเป็นโลหะออกไซด์ที่มีความหนาแน่นสูง ประสิทธิภาพของวัสดุในการกำบังรังสีโฟตอนที่เข้ามาจะดีขึ้น¹⁸⁻²² โลหะตะกั่วเป็นองค์ประกอบหลักที่นำมาใช้ในระบบ

แก้วเพื่อใช้เพิ่มประสิทธิภาพต่อการกำบังรังสีจากรังสีที่มีพลังงานสูง²³⁻²⁴

ในปี ค.ศ. 2021 Shangsheng Guan และคณะ ได้พัฒนาระบบแก้วคาลโคเจไนด์ $\text{Sb}_2\text{S}_3\text{-PbI}_2$ ขึ้นมาเพื่อศึกษาคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ของระบบแก้ว เช่น ความหนาแน่น ค่าความแข็งของแก้ว เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านของแสง เป็นต้น²⁵ และระบบแก้วนี้มีส่วนผสมของตะกั่วซึ่งเป็นทางเลือกที่ดีที่จะถูกนำมาพัฒนาเพื่อใช้เป็นวัสดุกำบังรังสี เนื่องจากมีส่วนผสมของธาตุที่มีความหนาแน่นสูง ระบบแก้วนี้จะถูกนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติต่อการกำบังรังสี จากสูตรแก้ว $(100-x)\text{Sb}_2\text{S}_3\text{-xPbI}_2$ โดย $x = 10, 20, 30, 40$ และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ โดยในช่วงโมลเปอร์เซ็นต์ที่ $x = 10\text{-}50$ โมลเปอร์เซ็นต์ ระบบแก้วคาลโคเจไนด์ $\text{Sb}_2\text{S}_3\text{-PbI}_2$ แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของระบบแก้วที่ดี เช่น มีความหนาแน่นที่สูง vickers hardness ที่สูง และมีเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านของแสงที่ดี²⁵ พารามิเตอร์ที่จะนำมาใช้วิเคราะห์คุณสมบัติด้านการกำบังรังสีของตัวอย่างระบบแก้วนี้ ได้แก่ สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล เลขอะตอมยังผล ความหนาแน่นอิเล็กตรอนยังผล และค่าความสัมพันธ์ของค่าเคอร์มากับอากาศ ที่พลังงานตั้งแต่ 10^{-3} ถึง 10^5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งเป็นช่วงพลังงานที่มากพอที่ประยุกต์ใช้งานในด้านรังสีจากแหล่งกำเนิดรังสีที่ใช้ในงานต่าง ๆ ได้ โดยพารามิเตอร์จะถูกวิเคราะห์ด้วยการจำลองสถานการณ์จากซอฟต์แวร์ Phy-X/PSD ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้สำหรับการคำนวณพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการกำบังรังสีและการวัดปริมาณรังสี และค่าการส่งผ่านของโฟตอนจะดำเนินการที่พลังงาน 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ของตัวอย่างแก้วมีความหนาแน่น 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 เซนติเมตร²⁶

**วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย**

การศึกษาคุณสมบัติต่อการกำบังรังสีของแก้วคาลโคเจไนด์ $\text{Sb}_2\text{S}_3\text{-PbI}_2$ ที่พลังงานตั้งแต่ 10^{-3} ถึง 10^5 เมกกะอิเล็กตรอนโวลต์ โดยคำนวณค่า

สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล จากซอฟต์แวร์

Phy-X/PSD องค์ประกอบของ แก้วคาลโคเจไนด์

$\text{Sb}_2\text{S}_3\text{-PbI}_2$ แสดงดัง Table 1

Table 1. Chemical compositions (mol%) of sample glass system (25)

Code	Chemical composition (mol%)	
	Sb_2S_3	PbI_2
EX1	90	10
EX2	80	20
EX3	70	30
EX4	60	40
EX5	50	50

วิธีการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ด้านการกำบังรังสี ได้แก่ การหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (Mass attenuation coefficient; μ_m) สามารถคำนวณได้โดยการใช้ซอฟต์แวร์ Phy-X/PSD ซึ่งจะบอกถึงโอกาสของอัตราการเกิดอันตรกิริยาของโฟตอนต่อตัวกลางทั้งแบบอันตรกิริยารวมและอันตรกิริยาย่อยของแต่ละธาตุและสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลได้ตาม “กฎการผสม (Mixture rule)” จากสมการที่ (1) ²⁷:

$$\mu_m = \sum w_i (\mu_m)_i \quad (1)$$

เมื่อ w_i แทนสัดส่วนโดยน้ำหนักของแต่ละธาตุ
 $(\mu_m)_i$ แทนสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของแต่ละธาตุ

คำนวณไปหาภาคตัดขวางเชิงอะตอม (atom cross-section; σ_a) และภาคตัดขวางเชิงอิเล็กตรอน (Electron cross-section; σ_{el}) ได้จากสมการที่ (2) และ (3) ²⁸:

$$\sigma_a = \frac{1}{N_A} \sum f_i A_i (\mu_m)_i \quad (2)$$

$$\sigma_{el} = \frac{1}{N_A} \sum \frac{f_i A_i}{Z_i} (\mu_m)_i \quad (3)$$

เมื่อ N_A แทนเลขอาโวกาโดร
 f_i แทนสัดส่วนจำนวนอะตอม
 A_i แทนมวลอะตอมของแต่ละธาตุ
 Z_i แทนเลขอะตอมของแต่ละธาตุ



เลขอะตอมยังผล (Effective atomic number; Z_{eff}) และความหนาแน่นอิเล็กตรอน (Effective electron density; N_{el}) สามารถหาได้จากสมการ (4) และ (5) ²⁸:

$$Z_{\text{eff}} = \frac{\sigma_a}{\sigma_{\text{el}}} \quad (4)$$

$$N_{\text{el}} = \frac{\mu_m}{\sigma_{\text{el}}} \quad (5)$$

ความสัมพันธ์ของค่าเคอร์มากับอากาศ (Kerma relative to air; K_a) คำนวณเป็นค่าที่อธิบายการเกิดอันตรกิริยาของรังสีไอออนไนซ์กับวัสดุตัวกลางวัสดุ ซึ่งก็คือค่าพลังงานจลน์ที่ปล่อยออกมาต่อหน่วยมวล และหาได้จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (6) ²⁹⁻³¹:

$$K_a = \frac{(\mu_m)_{\text{sample}}}{(\mu_m)_{\text{air}}} \quad (6)$$

เมื่อ $(\mu_m)_{\text{sample}}$ แทนสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตัวอย่าง

$(\mu_m)_{\text{air}}$ แทนสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของอากาศ

ค่าตัวประกอบการส่งผ่าน (Transmission factor; TF) เป็นอีกค่าหนึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพการกัมมันตรังสีของวัสดุซึ่งค่านี้ถ้ามีค่าน้อยแสดงว่าวัสดุนั้นมีค่าการส่งผ่านของรังสีได้น้อยทำให้รังสีที่ผ่านวัสดุนั้นมีค่าน้อยลดลงตามไปด้วยและในทางกลับกันนั้น

หมายถึงวัสดุนี้มีสมบัติการกัมมันตรังสีที่ดีและหาได้จากสมการที่ (7) ³²:

$$TF = \frac{I}{I_0} = e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)x} \quad (7)$$

เมื่อ I_0 และ I แทนค่าความเข้มของรังสีก่อนและหลังผ่านตัวกลาง

x แทนความหนาของตัวกลาง

μ แทนสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น

ρ ความหนาแน่นของตัวกลาง

ซึ่งสามารถหาค่า $\frac{\mu}{\rho}$ จากความสัมพันธ์

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho}$$

ผลและการอภิปรายผลการวิจัย

การศึกษาคุณสมบัติการกัมมันตรังสีของระบบ แก้วคาลโคเจไนต์ $(100-x)\text{Sb}_2\text{S}_3-x\text{PbI}_2$ โดย $x = 10, 20, 30, 40$ และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ ที่พลังงาน 10^{-3} ถึง 10^5 เมกกะอิเล็กตรอนโวลต์ ด้วยซอฟต์แวร์ Phy-X/PSD ซึ่งค่าต่าง ๆ แสดงและอภิปรายผลได้ดังนี้

สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (Mass attenuation coefficient; μ_m)

สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (Mass attenuation coefficient; μ_m) ค่านี้แสดงถึงการเกิดอันตรกิริยาของโฟตอนกับวัสดุและความสามารถในการลดทอนรังสีของวัสดุ ซึ่งค่านี้ถ้ามีค่ามากจะบอกได้

ว่าวัสดุนั้นมีสมบัติการกำบังรังสีที่ดี โดยอันตรกิริยาหลักของโฟตอนกับวัสดุที่ช่วงพลังงานต่าง ๆ ที่สำคัญได้แก่ ปรากฏการณ์การดูดกลืนโฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric absorption), การกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton scattering) และ การผลิตคู่ (Pair production) จาก Figure 1 สามารถแบ่งช่วงพลังงานของโฟตอนออกเป็น 3 ช่วง คือช่วงพลังงานต่ำ (น้อยกว่า 0.4 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์) ช่วงพลังงานปานกลาง (ระหว่าง 0.4–4 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์) และช่วงพลังงานสูง (มากกว่า 4 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์) โดยในช่วงพลังงานต่ำค่า μ_m จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อพลังงาน โฟตอนเพิ่มขึ้น ซึ่งเหตุการณ์นี้เกิด

จากปรากฏการณ์การดูดกลืนโฟโตอิเล็กทริกเปลี่ยนแปลงตามการผกผันของพลังงาน โฟตอน ($E^{-3.5}$) และในช่วงพลังงานนี้ลักษณะของกราฟไม่ต่อเนื่องกัน เกิดจากพลังงานในช่วงนั้นตกอยู่ในชั้นขอบการดูดกลืน (Absorption edge) ของธาตุต่าง ๆ ดังแสดงใน Table 2 หลังจากนั้น ในช่วงพลังงานปานกลางค่า μ_m จะค่อย ๆ ลดลงอย่างช้า ๆ ซึ่งอยู่ในช่วงอันตรกิริยาคอมป์ตัน และค่า μ_m แปรผกผันกับพลังงาน ($\propto E^{-1}$) หลังจากนั้นค่า μ_m เพิ่มขึ้นอีกครั้ง และค่อนข้างจะคงที่ซึ่งการผลิตรีดิว เป็นอันตรกิริยาหลัก โดยค่า μ_m จะแปรผันตรงกับ $\log E$ ³³

Table 2. Absorption edge (keV)

Element	Atomic number	M5	M4	M3	M2	M1	L3	L2	L1	K
Pb	82	2.48	2.59	3.07	3.55	3.85	13.04	15.20	15.87	88.00
I	53	-	-	-	-	1.072	4.58	4.85	5.19	33.17
Sb	51	-	-	-	-	-	4.13	4.38	4.70	30.49
S	16	-	-	-	-	-	-	-	-	2.47

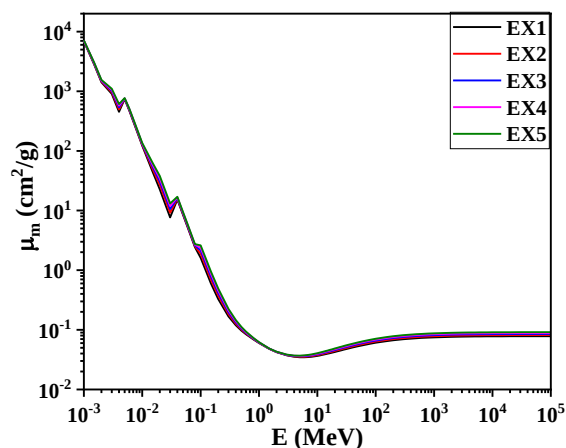


Figure 1. The mass attenuation coefficient of the sample glass in the energy range 10^{-3} - 10^5 MeV

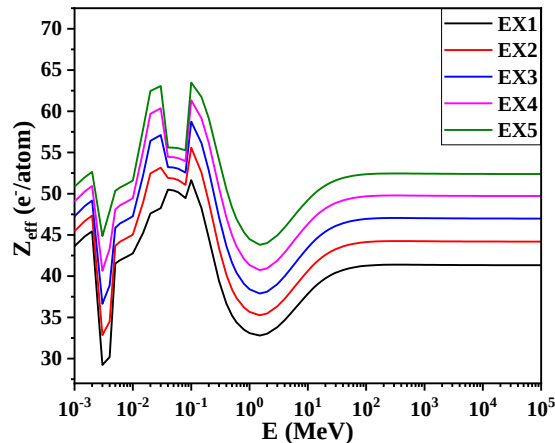


Figure 2. The effective atomic number of the sample glass in the energy range 10^{-3} - 10^5 MeV

เลขอะตอมยังผล (Effective atomic number: Z_{eff})

เลขอะตอมยังผล (Effective atomic number: Z_{eff}) เป็นค่าที่สามารถนำมาใช้ในการประเมินค่าโอกาสในการเกิดอันตรกิริยาระหว่างรังสีกับตัวกลางวัสดุ เป็นตัวเลขที่บอกรายละเอียดทางเคมีของวัสดุผสมคล้ายกับเลขอะตอมของธาตุ อย่างไรก็ตามเลขอะตอมยังผลไม่เหมือนกับเลขอะตอมของธาตุ เพราะไม่มีค่าคงที่ แต่จะแตกต่างกันไปตามพลังงานจากแหล่งกำเนิด เลขอะตอมยังผลสามารถนำมาใช้เพื่อเปรียบเทียบโอกาสในการเกิดอันตรกิริยาระหว่างรังสีที่ผ่านเข้าไปในตัวกลางวัสดุผสมที่หลากหลาย³⁴ ค่าเลขอะตอมยังผลของระบบแก้ว รหัส EX1-EX5 ตัวอย่างแก้วในช่วงพลังงาน 10^{-3} - 10^5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ แสดงได้ดัง Figure 2 เลขอะตอมยังผลของระบบแก้วรหัส EX1-EX5 โดยที่ช่วงพลังงานต่ำเลขอะตอมยังผลมีค่าสูงสุดเนื่องจากมีอันตรกิริยาหลักคือ อันตรกิริยาปรากฏการณ์ดูดกลืนโฟโตอิเล็กทริก

นอกจากนี้กราฟยังมียอดแหลมสองจุดที่พลังงาน 0.04 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ และ 0.1 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ เนื่องจากอยู่ในช่วงของขอบดูดกลืน K ของธาตุต่าง ๆ ที่พลังงานระดับปานกลางเลขอะตอมยังผลมีค่าต่ำสุดซึ่งเกิดจากอันตรกิริยาหลัก คือ การกระเจิงแบบคอมป์ตัน หลังจากนั้นเลขอะตอมยังผลจะเพิ่มค่าเกือบคงที่ซึ่งเกิดจากอันตรกิริยาหลัก คือ การผลิตคู่เห็นได้ชัดเจนว่าแนวโน้มของเลขอะตอมยังผลของระบบแก้วทั้ง 5 เป็นไปตามค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าค่าเลขอะตอมยังผลที่สูงขึ้นสอดคล้องกับการดูดกลืนรังสีที่ดีขึ้นสำหรับวัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของ PbI_2 ส่งผลให้เลขอะตอมยังผลของระบบแก้วคาลโคเจไนต์มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มโมเลกุลอินทรีย์ของธาตุที่มีเลขอะตอมสูง ๆ ในระบบแก้วใด ๆ จะส่งผลทำให้ค่าเลขอะตอมยังผลของระบบแก้วเพิ่มขึ้นด้วย³⁵

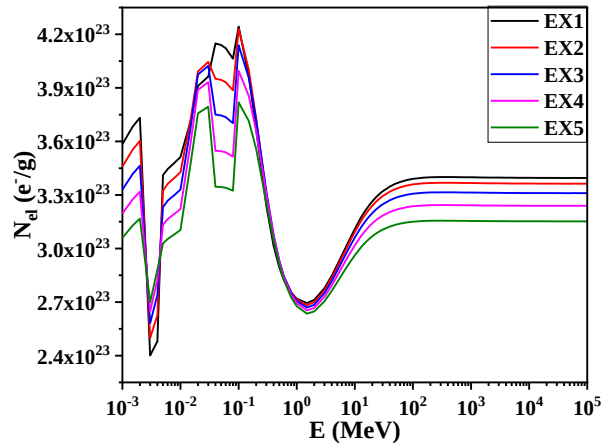


Figure 3. The effective electron density of the sample glass in the energy range 10^{-3} - 10^5 MeV

ความหนาแน่นอิเล็กตรอนยังผล (Effective electron density; N_{el}) จาก Figure 3 จะเห็นได้ว่ากราฟมีแนวโน้มคล้ายกับกราฟของเลขอะตอมยังผล (Z_{eff}) แต่อย่างไรก็ตามกราฟนั้นมีลักษณะที่ตรงข้ามกัน เช่น ตัวอย่างแก้ว EX5 มีค่า Z_{eff} สูงที่สุดในขณะที่ตัวอย่างแก้วนี้มีค่า N_{el} ต่ำที่สุดในขณะเดียวกัน

ตัวอย่างแก้ว EX1 มีค่า Z_{eff} ต่ำที่สุด แต่ค่า N_{el} มีค่าสูงที่สุด ที่เป็นเช่นนี้เป็นผลมาจาก PbI_2 ที่ผสมลงไปทำให้เกิดพื้นที่ว่างในโครงสร้างของตัวอย่างที่มากขึ้น ทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนต่อพื้นที่ภาคตัดขวางลดลงลง จึงเป็นผลทำให้ EX5 มีค่า N_{el} ต่ำที่สุด ³⁶

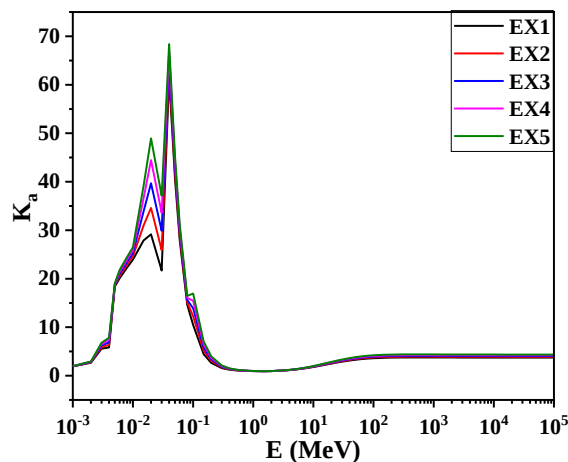


Figure 4. Kerma relative to air of the sample glass in the energy range 10^{-3} - 10^5 MeV

ความสัมพันธ์ของค่าเคอร์มากับอากาศ (Kerma relative to air; K_a) ของระบบแก้วตัวอย่างที่

ช่วงพลังงาน 10^{-3} - 10^5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ดังแสดงดัง Figure 4 พบว่าค่านี้มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงต่ำ

(< 0.04 MeV) ซึ่งในช่วงพลังงานนี้มีจุดยอดสองจุดที่พลังงาน 0.02 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์และ 0.04 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ และลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงพลังงาน (< 1.5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์) หลังจากนั้นเพิ่มขึ้นจนถึง พลังงาน 10^2 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ เริ่มคงที่จนถึง 10^5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งเหตุการณ์

เหล่านี้ขึ้นอยู่กับอันตรกิริยาต่าง ๆ ตามที่ได้กล่าวมาแล้วก่อนหน้านี้ คือ ที่พลังงานต่ำ อันตรกิริยาหลักคือปรากฏการณ์การดูดกลืนโฟโตอิเล็กทริก พลังงานระดับปานกลางได้แก่การกระเจิงแบบคอมป์ตัน และที่ระดับพลังงานสูงการผลิตคู่อันตรกิริยาหลัก²⁹⁻³¹

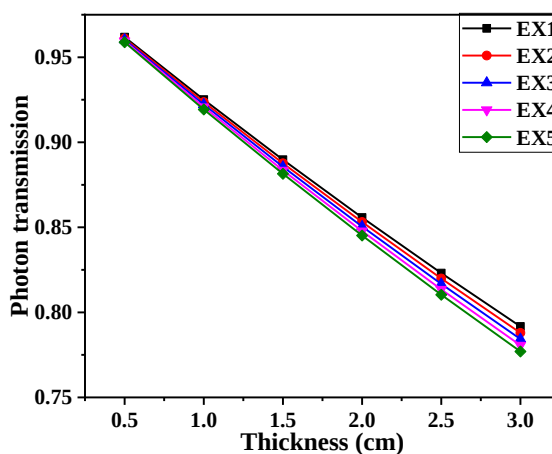


Figure 5. The transmission factor of the sample glass at the thickness 0.5-3 cm

ตัวประกอบการส่งผ่าน (Transmission factor; TF) ของตัวอย่างแก้วที่ความหนา 0.5–3.0 เซนติเมตร ที่พลังงาน 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ แสดงดัง Figure 5 พบว่า ค่านี้นลดลงเมื่อความหนาของแก้วเพิ่มขึ้น นั่นแสดงให้เห็นว่าเวลาที่โฟตอนเคลื่อนที่ผ่านในวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้เกิดอันตรกิริยาของโฟตอนภายในตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าตัวประกอบการส่งผ่านมีค่าลดลง³⁷ และจากภาพจะเห็นได้ว่าตัวอย่างแก้ว EX5 มีค่าต่ำที่สุดซึ่งชี้ให้เห็นว่าตัวอย่างนี้มีสมบัติการกำบังรังสีดีที่สุด

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล เลขอะตอมยังผลและความสัมพันธ์ของค่าเคอร์มากับอากาศของระบบแก้วคาลโคเจไนด์ $(100-x)\text{Sb}_2\text{S}_3-x\text{PbI}_2$ โดย $x = 10, 20, 30, 40$ และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ ที่พลังงาน 10^{-3} ถึง 10^5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ด้วยซอฟต์แวร์ Phy-X/PSD พบว่ารังสีสามารถผ่านแก้วตัวอย่าง $50\text{Sb}_2\text{S}_3-50\text{PbI}_2$ (EX5) ได้ต่ำที่สุด แต่ทว่าเมื่อพิจารณาค่าของความหนาแน่นอิเล็กตรอนยังผลพบว่ามีผลตรงข้ามกับค่าต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้น เป็นผลมาจาก PbI_2 ที่ผสมลงไปทำให้เกิดพื้นที่ว่างในโครงสร้างของตัวอย่างที่มากขึ้น ทำให้ความหนาแน่น

ของอิเล็กตรอนต่อพื้นที่ภาคตัดขวางลดลงลดลง จึงเป็นผลทำให้ EX5 มีค่า N_{el} ต่ำที่สุดและเมื่อพิจารณาค่าตัวประกอบการส่งผ่านที่พลังงาน 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์และความหนาที่ 0.5–3.0 เซนติเมตร พบว่าแก้วตัวอย่าง EX5 มีค่าต่ำสุดนั้นแสดงให้เห็นว่าแก้วตัวอย่าง EX5 มีสมบัติในการกำบังรังสีที่ดีที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ที่สนับสนุนงานวิจัยนี้ ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ที่อำนวยความสะดวกสำหรับเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ค่าต่าง ๆ ในงานวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- 1 S Yasmin, BS Barua, MU Khandaker, MA Rashid, DA Bradley, MA Olatunji, M Kamal. Studies of ionizing radiation shielding effectiveness of silica-based commercial glasses used in Bangladeshi dwellings, Results Phys 2018;9:541-9.
- 2 H Akyildirim, E Kavaz, FI El-Agawany, E Yousef, YS Rammah. Radiation shielding features of zirconolite silicate glasses using XCOM and FLUKA simulation code. J Non-Cryst Solids 2020;545:120245.
- 3 Y Al-Hadeethi, MI Sayyed, YS Rammah. Fabrication, optical, structural and gamma

radiation shielding characterizations of $\text{GeO}_2\text{-PbO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ glasses, Ceram Int 2020;46:2055-62.

- 4 S Yasmin, ZS Rozaila, MU Khandaker, BS Barua, FUZ Chowdhury, MA Rashid, DA Bradley. The radiation shielding offered by the commercial glass installed in Bangladeshi dwellings. Radiat Eff Defects Solids 2018;173:657-72.
- 5 S Shamsan Obaid, K Dhammajyot Gaikwad, P Pravina Pawar. Determination of gamma ray shielding parameters of rocks and concrete. Radiat Phys Chem 2018;144:356-60.
- 6 M Dong, X Xue, H Yang, Z Li. Highly cost-effective shielding composite made from vanadium slag and boron-rich slag and its properties. Radiat Phys Chem 2017;141:239-44.
- 7 M Dong, X Xue, H Yang, D Liu, C Wang, Z Li. A novel comprehensive utilization of vanadium slag: as gamma ray shielding material. J Hazard Mater 2016;318:751-7.
- 8 MHA Mhareb. Physical, optical and shielding features of $\text{Li}_2\text{O-B}_2\text{O}_3\text{-MgO-Er}_2\text{O}_3$ glasses co-doped of Sm_2O_3 . Appl Phys A 2020;126:71.
- 9 S Kaewjaeng, S Kothan, W Chaiphaksa, N Chanthima, R Rajaramkrishna, HJ Kim, J Kaewkhao. High transparency $\text{La}_2\text{O}_3\text{-CaO-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ glass for diagnosis X-rays

- shielding material application. Radiat Phys Chem 2019;160:41-7.
- 10 M Dong, X Xue, S Liu, H Yang, Z Li, MI Sayyed, O Agar. Using iron concentrate in Liaoning province, China, to prepare material for X-ray shielding. J Cleaner Prod 2019;210:653-9.
- 11 R Bagheri, AK Moghaddam, SP Shirmardi, B Azadbakht, M Salehi. Determination of gamma-ray shielding properties for silicate glasses containing Bi_2O_3 , PbO , and BaO . J Non-Cryst Solids 2018;479:62-71.
- 12 AH El-Kateb, RAM Rizk, AM Abdul-Kader. Determination of atomic cross-sections and effective atomic numbers for some alloys. Ann Nucl Energy 2000;27:1333-43.
- 13 HC Manjunatha, L Seenappa, BM Chandrika, C Hanumantharayappa. A study of photon interaction parameters in barium compounds. Ann Nucl Energy 2017;109:310-7.
- 14 HC Manjunatha, L Seenappa, BM Chandrika, KN Sridhar, C Hanumantharayappa. Gamma, X-ray and neutron shielding parameters for the Al-based glassy alloys. Appl Radiat Isotope 2018;139:187-94.
- 15 YS Alajerami, D Drabold, MHA Mhareb, KLA Cimat, G Chen, M Kurudirek. Radiation shielding properties of bismuth borate glasses doped with different concentrations of cadmium oxides. Ceram Int 2020;46:12718-26.
- 16 Y Al-Hadeethi, MI Sayyed, H Mohammed, L Rimondin. X-ray photons attenuation characteristics for two tellurite based glass systems at dental diagnostic energies. Ceram Int 2020;46:251-7.
- 17 R Kurtulus, T Kavas, I Akkurt, K Gunoglu. An experimental study and WinXCom calculations on X-ray photon characteristics of Bi_2O_3 - and Sb_2O_3 -added waste soda-lime-silica glass. Ceram Int 2020;46:21120-7.
- 18 Al-Hadeethi Y, Sayyed MI. Analysis of borosilicate glasses doped with heavy metal oxides for gamma radiation shielding application using Geant4 simulation code. Ceram Int 2019;45:24858-64.
- 19 Singh KJ, Kaur S, Kaundal RS. Comparative study of gamma ray shielding and some properties of $\text{Pb-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ and $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ glass systems. Radiat Phys Chem 2014;96:153-7.
- 20 Waly ESA, Al-Qous GS, Bourham MA. Shielding properties of glasses with different heavy elements additives for radiation shielding in the energy range 15–300 keV. Radiat Phys Chem 2018;150:120-4.
- 21 Chanthima N, Kaewkhao J, Limsuwan P. Study of photon interactions and shielding

- properties of silicate glasses containing Bi_2O_3 , BaO and PbO in the energy region of 1 keV to 100 GeV. *Ann Nucl Energy* 2012;41:119-24.
- 22 Marzouk MA, Abo-Naf SM, Zayed HA, Hassan NS. Photoluminescence and semiconducting behavior of Fe, Co, Ni and Cu implanted in heavy metal oxide glasses. *J Mater Res Technol* 2016;5:226-33.
- 23 Ioan MR. Study of the optical materials degradation caused by gamma radiation and the recovery process by controlled heat treatment. *Rom J Phys* 2016;61: 892-902.
- 24 Ioan MR. Analyzing of the radiation induced damage to optical glasses by using online heating laser measurements. *Rom J Phys* 2016;61:614-25.
- 25 Shangsheng Guan, Shengzhi Sun, Dan Chen, Jiahui Zhang, Shiliang Kang, Tiefeng Xu and Changgui Lin. Formation and physical and structural properties of Sb_2S_3 - PbI_2 chalcogenide glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids* 2021;570:120993
- 26 Erdem Şakar, Özgür Fırat Özpolat, Bünyamin Alım, MI Sayyed, Murat Kurudirek. Phy-X/PSD: Development of a user friendly online software for calculation of parameters relevant to radiation shielding and dosimetry. *Radiation Physics and Chemistry* 2020;166:108496
- 27 Kittisak Sriwongsa, Pimkanok Prapume, Pisinee Lertthamrongyot, Nopparat Suksee, Pawat Pongampai, Supawan Rupsang, Punsak Glumglomchit, Sunantasak Ravangvong. Investigation for radiation shielding efficiency of copper zing phosphate glass system doped with barium oxide. *PSRU Journal of Science and Technology* 2021;6:123-37
- 28 Khobkham C, Chiphaksa W, Limkitjaroenporn P, Prongsamrong P, Wiwatkanjana P, Kaewkhao J. Theoretical Study of The Photon Interaction for Zirconium Alloy at 1 keV to 100 MeV. *Key Engineering Materials* 2016;675-676:730-3.
- 29 MHM Zaid, KA Matori, HAA Sidek, IR Ibrahim. Bismuth modified gamma radiation shielding properties of titanium vanadium sodium tellurite glasses as a potent transparent radiation resistant glass applications *Nucl Eng Technol* 2021;53:1323-30.
- 30 KM Singh, A Rani, MH Singh. Shielding behaviors of some polymer and plastic materials for gamma-rays. *Radiat Phys Chem* 2015;106:247-54.
- 31 VP Singh, NM Badiger, AM El-Khayatt. Study on γ -ray exposure buildup factors and fast neutron-shielding properties of some building materials. *Radiat Eff Defect S* 2014;169:547-59.



- 32 M Kamislioglu. Research on the Effects of Bismuth Borate Glass System on Nuclear Radiation Shielding Parameters. Results in Physics 2021;22:103844.
- 33 Agar O, Kavaz E, Altunsoy EE, Kilicoglu O, Tekin HO, Sayyed MI, Erguzel TT, Tarhan N. Er_2O_3 effects on photon and neutron shielding properties of $\text{TeO}_2\text{-Li}_2\text{O-ZnO-Nb}_2\text{O}_5$ glass system. Results in Physics 2019;13:102277.
- 34 I Olarinoye. Variation of effective atomic numbers of some thermoluminescence and phantom materials with photon energies. Res J Chem Sci 2011;1:64-9.
- 35 AM Abdel-Latif, MI Sayyed, HO Tekin, MM Kassab. Optimizing the shielding properties of strength-enhanced concrete containing marble. Pap Phys 2020;12:120005.
- 36 Harinder Singh, Jeewan Sharma, Tejbir Singh. Extensive investigations of photon interaction properties for $\text{Zn}_x\text{Te}_{100-x}$ alloys. Nuclear Engineering and Technology 2018;50:1364-71.
- 37 MY Hanfi, MI Sayyed, Eloic Lacomme, KA Mahmoud, I Akkurt. The influence of MgO on the radiation protection and mechanical properties of tellurite glasses. Nuclear Engineering and Technology 2021;53:2000-10.