

ผลของ Er_2O_3 ต่อการเกิดอันตรกิริยาโฟตอนของระบบแก้ว $\text{P}_2\text{O}_5\text{-ZnO-Li}_2\text{O-Sm}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$

Effect of Er_2O_3 on Photon Interactions of $\text{P}_2\text{O}_5\text{-ZnO-Li}_2\text{O-Sm}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$ Glass System

กิตติศักดิ์ ศรีวงศ์ษา^{1*} สวัสดิพงษ์ เฉพาะตน² ปริสา พรหมณโต² มริษฎา กวีกิจนารา²
และพันธศักดิ์ กล้ากล่อมจิตร²

Kittisak Sriwongsa^{1*} Sawatdipong Chaphoaton² Parisa Pramto²
Marisada Kaweeekijnara² and Punsak Glumglomchit²

Received: March 6, 2021; Revised: June 4, 2021; Accepted: June 7, 2021

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลรวมและสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลย่อยของระบบแก้ว $40\text{P}_2\text{O}_5\text{-}20\text{ZnO-}10\text{Li}_2\text{O-}1\text{Sm}_2\text{O}_3\text{-(}29\text{-x)}\text{Na}_2\text{O-xEr}_2\text{O}_3$ ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าของเออร์เบียมออกไซด์ (Er_2O_3) ที่ปริมาณความเข้มข้น 0 1 2 และ 3 เปอร์เซ็นต์โมล ตามลำดับ โดยการคำนวณทางทฤษฎีด้วยโปรแกรม WinXCom ในช่วงพลังงาน $10^{-3}\text{-}10^5$ เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ผลการวิจัยพบว่ากระบวนการเปลี่ยนแปลงของอันตรกิริยาย่อยในแต่ละช่วงพลังงานที่แตกต่างกัน ประกอบด้วย 3 กระบวนการ คือ การดูดกลืนโฟโต-อิเล็กทริก การกระเจิงแบบคอมป์ตัน และการผลิตคู่ที่โฟตอนพลังงานต่ำ (น้อยกว่า 100 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์) กลาง (100 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ถึง 1 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์) และสูง (มากกว่า 1 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์) ตามลำดับ ทั้งนี้ยังพบอีกว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล เลขอะตอมยังผล และความหนาแน่นอิเล็กตรอนยังผลมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ระยะทางอิสระเฉลี่ยของระบบแก้วมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเออร์เบียมออกไซด์ ซึ่งผลการวิจัยทำให้ทราบว่า การเพิ่มปริมาณของเออร์เบียมออกไซด์ทำให้ระบบแก้วนี้มีความสามารถในการกักขังรังสีดีขึ้น

คำสำคัญ : แก้ว; อันตรกิริยาของโฟตอน; กักขังรังสี

¹ คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม

² โรงเรียนหัวหินวิทยาลัย ประจวบคีรีขันธ์

¹ Faculty of Education, Silpakorn University, Nakhon Pathom

² Huahin Vitthayalai School, Prachuapkhirikhan

* Corresponding Author E - mail Address: sriwongsa_k@silpakorn.edu

Abstract

The aim of this research is to study the total and partial mass attenuation coefficients of $40\text{P}_2\text{O}_5\text{-}20\text{ZnO-}10\text{Li}_2\text{O-}1\text{Sm}_2\text{O}_3\text{-(}29\text{-x)Na}_2\text{O-xEr}_2\text{O}_3$ glass system which varies the concentration of Erbium (III) oxide (Er_2O_3) at 0, 1, 2 and 3 mol% respectively. These parameters have been estimated by theoretical approach using WinXCom program in the energy range of $10^{-3}\text{-}10^5$ MeV. The results have been shown that the variations of partial interaction processes at different energy regions were composed three process. These processes are photoelectric absorption, Compton scattering and pair production which main process at low (less than 100 keV), medium (100 keV–1 MeV) and high (more than 1 MeV) photon energy, respectively. It was also found that the values of mass attenuation coefficients, effective atomic number and effective electron density of glass were increased while mean free path decreased with increasing Erbium (III) oxide concentration. The results indicated that the increasing concentration of Erbium (III) oxide were increased potential radiation shielding.

Keywords: Glass; Photon Interaction; Radiation Shielding

บทนำ

ผลกระทบของกลุ่มธาตุโลหะหายาก (Rare-Earth ions; RE) บนโครงข่ายแก้วกลายเป็นหนึ่งในประเด็นร้อนทางวิทยาศาสตร์ด้านแก้ว เมื่อเร็ว ๆ นี้แก้วที่เจือด้วยออกไซด์ของกลุ่มธาตุโลหะหายากได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากมีคุณสมบัติที่พิเศษในการนำไปใช้งานทางเทคโนโลยีที่แตกต่างกัน เช่น ด้านการสื่อสารด้วยแสง [1] เลเซอร์โซลิดสเตต เช่น ไฟเบอร์เลเซอร์อินฟราเรดกลาง [2] และตัวแปลงความถี่ [3] ดังนั้นจึงมีความพยายามอย่างมากในการค้นหาวัสดุเพื่อใช้เป็นโครงสร้างหลักที่เหมาะสมสำหรับกลุ่มธาตุโลหะหายาก แก้วมีบทบาทสำคัญมากในการใช้งานร่วมกับอุปกรณ์อื่น ๆ เนื่องจากมีข้อได้เปรียบพิเศษคือ แก้วเป็นไอโซโทปของคุณสมบัติทางกายภาพและมีต้นทุนในการจัดเตรียมต่ำ [4] ข้อดีที่น่าสนใจที่สุดของการใช้แก้วเป็นวัสดุหลัก คือ ความเป็นไปได้ที่จะสร้างรูปร่างผ่านกระบวนการผลิตที่เรียบง่ายและมีประสิทธิภาพสูง [5] แก้วที่เจือด้วยธาตุหายากเป็นที่ทราบกันดีว่ามีคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพที่ยืดหยุ่น เช่น ความทนทานต่อสารเคมีที่สูงขึ้น แข็งแรงเพิ่มขึ้น และมีโมดูลัสยืดหยุ่นที่ดี เนื่องจากความแรงของสนามที่สูงเกินจริงของแก้วเหล่านี้มากกว่าตัวทำลายโครงข่ายของแก้วแบบอื่น [6] ในบรรดาการโครงข่ายแก้ว (Glass Matrix) กลุ่มแก้วฟอสเฟตมีคุณสมบัติทางแสงที่แน่นอน เช่น มีช่องส่งสัญญาณอินฟราเรดขนาดใหญ่ จุดหลอมเหลวต่ำ และความเข้มการรับแสงสูง ซึ่งความเข้มการรับแสงสูงในแก้วฟอสเฟตเกิดจากลักษณะเฉพาะของความสามารถในการละลายสูงของไอออน ซึ่งตัวกระตุ้นที่ใช้จะใช้ในปริมาณที่ค่อนข้างน้อย [7] อย่างไรก็ตามข้อเสียของแก้วฟอสเฟต คือ มีความทนทานต่อสารเคมีที่ไม่ดีซึ่งสามารถแก้ไขข้อเสียนี้ได้โดยการใส่ออกไซด์ของโลหะอัลคาไลน์และโลหะอัลคาไลน์เอิร์ธเข้าไป [8] โดยทั่วไปแล้ว กลุ่มธาตุหายากจะประกอบส่วนใหญ่จะใช้เป็นตัวทำลายโครงข่ายแก้ว ซึ่งรวมกับ

ช่องว่างระหว่าง รูปร่างโมเลกุลทรงสี่หน้าของ PO_4 (PO_4 Tetrahedral) เนื่องจากรัศมีไอออนิกของ แลนทาไนด์จะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของเลขอะตอม นอกจากนี้ความแรงของสนามจะเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตามการเปลี่ยนแปลงของรัศมีไอออนิก [9] การเปลี่ยนแปลงนี้ทำให้เกิดคุณสมบัติทางกายภาพต่าง ๆ มากมาย [10] รูปร่างโมเลกุลทรงสี่หน้าฟอสเฟต PO_4 ที่เชื่อมต่อกันใน P_2O_5 ที่มีลักษณะคล้ายแก้ว โดยสามมุมของออกซิเจนและมุมที่สี่เชื่อมติดกันเป็นสองเท่า [11] การรวมตัวไอออนของธาตุหายาก (RE) (ตัวทำลายโครงข่าย) ไค ๆ ในแก้วฟอสเฟตส่งผลให้เกิดการสลายพันธะยึดเหนี่ยวของพันธะ P-O-P และการก่อตัวของพันธะที่ไม่ยึดเหนี่ยวต่อของพันธะ P-O-RE [12] ตามจำนวนของออกซิเจนในการเชื่อมโครงสร้างของรูปร่างโมเลกุลทรงสี่หน้าของ PO_4 สามารถอธิบายได้ด้วยรหัส Qn ที่ใช้โดย Moustafa, Y. M. and El-Egili, K. [13] ในบรรดาแก้วแลนทาไนด์ฟอสเฟต แก้วที่เจือด้วย Er^{3+} มีความน่าสนใจอย่างยิ่งสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานมากมาย เช่น เลเซอร์ ไมโครชิป เออร์เบียมเจือไฟเบอร์แอมพลิฟายเออร์ (EDFA) ในระบบมัลติเพล็กซ์การแบ่งความยาวคลื่น (WDM) และระบบเลเซอร์ที่ปลอดภัยต่อดวงตา [14] เนื่องจาก Er_2O_3 มีคุณสมบัติที่เหมาะสมไม่ว่าจะเป็นทั้งเรื่องของความหนาแน่นและเลขอะตอม [15] - [16] รังสีแกมมาและรังสีเอกซ์ ถูกนำมาใช้ในด้านการศึกษา อุตสาหกรรม ฟิสิกส์พลังงานสูง และด้านอื่น ๆ รังสีทั้งสองมีอันตรายต่อมนุษย์ วิธีการป้องกันรังสีแบ่งได้เป็น 3 วิธี คือ 1) เวลา ควรใช้เวลาให้น้อย ๆ เมื่ออยู่ใกล้รังสี 2) ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดรังสี กล่าวคือควรอยู่ห่างมาก ๆ และ 3) วัสดุกำบังรังสี กล่าวคือเป็นวัสดุที่ใช้พื้นฐานโอกาสในการเกิดอันตรกิริยาระหว่างรังสีกับตัวกลางที่รังสีผ่านเข้าไป อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างรังสีวัสดุ เช่น การดูดกลืนโฟโตอิเล็กทริก การกระเจิงแบบโคฮีเรนต์ การกระเจิงแบบอินโคฮีเรนต์ และอันตรกิริยาคู่ เป็นต้น โอกาสในการเกิดปฏิิกิริยานี้ส่งผลโดยตรงต่อเครื่องมือวัดรังสี เช่น รูปร่างทางการแพทย์ และวัสดุกำบังรังสี ในปัจจุบันนักวิจัยด้านวัสดุกำบังรังสีพบว่าสามารถพัฒนาคุณสมบัติในการกำบังรังสีให้ดีขึ้นจากการผสมธาตุที่มีเลขอะตอมสูง ๆ เข้าไป แก้วกำบังรังสี ถูกนิยมนำมาใช้ในด้านรูปร่างทางการแพทย์ ออปติคอลอิเล็กทรอนิกส์ และวัสดุกำบังรังสี [17] - [22] ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของ Er_2O_3 ต่อการเกิดอันตรกิริยาโฟตอนของระบบแก้ว $\text{P}_2\text{O}_5\text{-ZnO-Li}_2\text{O-Sm}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$ ตามสูตรแก้ว $40\text{P}_2\text{O}_5\text{-}20\text{ZnO-}10\text{Li}_2\text{O-}1\text{Sm}_2\text{O}_3\text{-(}29\text{-x)Na}_2\text{O-xEr}_2\text{O}_3$ โดยที่ $x = 0\ 1\ 2$ และ 3 เปอร์เซ็นต์โมล ในช่วงพลังงาน $10^{-3}\text{-}10^5$ เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ตัวแปรที่จะทำการศึกษาและวิเคราะห์ ได้แก่ อันตรกิริยาย่อย สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล เลขอะตอมยังผล ความหนาแน่น อิเล็กตรอนยังผล และระยะทางอิสระเฉลี่ย

วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

ระบบแก้ว $\text{P}_2\text{O}_5\text{-ZnO-Li}_2\text{O-Sm}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$ ตามสูตรแก้ว $40\text{P}_2\text{O}_5\text{-}20\text{ZnO-}10\text{Li}_2\text{O-}1\text{Sm}_2\text{O}_3\text{-(}29\text{-x)Na}_2\text{O-xEr}_2\text{O}_3$ โดยที่ $x = 0\ 1\ 2$ และ 3 เปอร์เซ็นต์โมล ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ถูกนำมาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ด้านรังสี ได้แก่ การหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (Mass Attenuation Coefficient; μm) สามารถคำนวณได้โดยการใช้โปรแกรม WinXCom ซึ่งบอกถึงอัตราการเกิดอันตรกิริยาของโฟตอนต่อตัวกลางทั้งแบบอันตรกิริยารวมและอันตรกิริยาย่อยของแต่ละธาตุและสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลได้ตาม “กฎการผสม (Mixture Rule)” จากสมการที่ (1) [23]:

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

เมื่อ

w_i แทนสัดส่วนโดยน้ำหนักของแต่ละธาตุ
 $(\mu_m)_i$ แทนสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของแต่ละธาตุ

ค่า $(\mu_m)_i$ สามารถนำไปหาภาคตัดขวางเชิงอะตอม (Atom Cross-Section; σ_a) และภาคตัดขวางเชิงอิเล็กตรอน (Electron Cross-Section; σ_{el}) ได้จากสมการที่ (2) และ (3) [24]:

$$\sigma_a = \frac{\mu_m}{N_A \sum_i (w_i/A_i)} \quad (2)$$

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

เมื่อ

N_A แทนเลขอาโวกาโดร
 A_i แทนมวลอะตอมของแต่ละธาตุ
 f_i แทนสัดส่วนจำนวนอะตอม
 Z_i แทนเลขอะตอมของแต่ละธาตุ

การหาค่าเลขอะตอมยังผล (Effective Atomic Number; Z_{eff}) และการหาค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอน (Effective Electron Density; N_{el}) สามารถหาได้จากสมการที่ (4) และ (5) [24]:

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

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

และค่าระยะทางอิสระเฉลี่ย (Mean Free Path; MFP) คือ ระยะทางเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ของโฟตอนก่อนที่จะอันตรกิริยาชนกับวัสดุ ซึ่งอธิบายได้ตามสมการที่ [25]:

$$\text{MFP} = \frac{1}{\mu} \quad (6)$$

เมื่อ

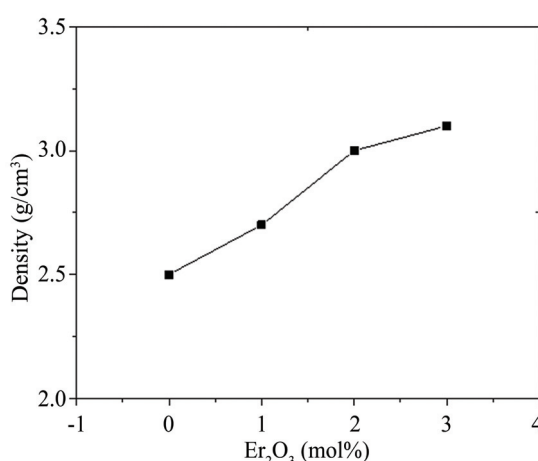
μ แทนสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น

ผลการทดลองและอภิปรายผล

สัดส่วนทางเคมีของระบบแก้วตัวอย่างเพื่อนำไปคำนวณหาอันตรกิริยาของรังสีต่อระบบแก้วตัวอย่างในการวิเคราะห์เพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุกำบังรังสีแสดงดังตารางที่ 1

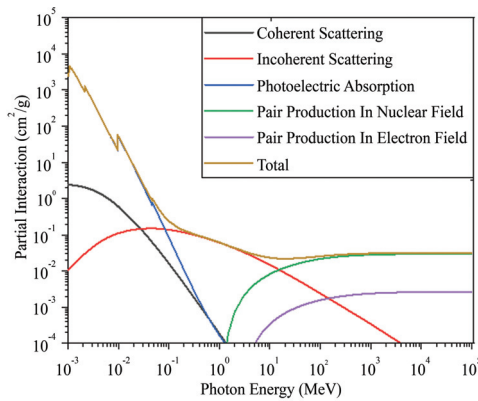
ตารางที่ 1 สัดส่วนองค์ประกอบทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โมล) ของระบบแก้วตัวอย่าง [26]

รหัส	องค์ประกอบทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โมล)					
	P_2O_5	ZnO	Li_2O	Sm_2O_3	Na_2O	Er_2O_3
Ex1	40	20	10	1	29	0
Ex2	40	20	10	1	28	1
Ex3	40	20	10	1	27	2
Ex4	40	20	10	1	26	3
Ex5	40	20	10	1	25	4

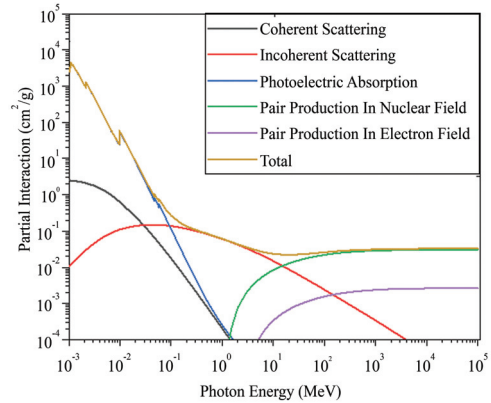


รูปที่ 1 ความหนาแน่นของระบบแก้ว P_2O_5 -ZnO- Li_2O - Sm_2O_3 - Na_2O

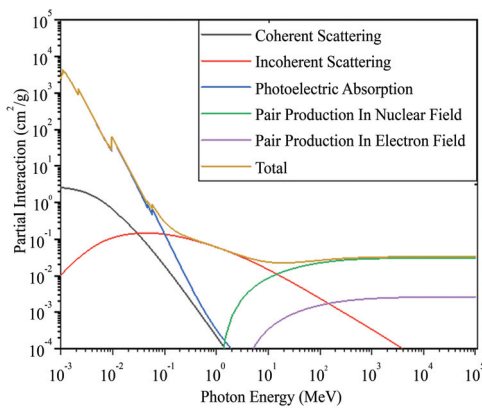
จากการศึกษาอันตรกิริยาของรังสีต่อระบบแก้ว $40P_2O_5$ - $20ZnO$ - $10Li_2O$ - $1Sm_2O_3$ -($29-x$) Na_2O - xEr_2O_3 โดยที่ $x = 0, 1, 2$ และ 3 เปอร์เซ็นต์โมล ในช่วงพลังงาน 10^{-3} - 10^5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ เพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุกำบังรังสีพบว่า ค่าความหนาแน่นของระบบแก้วมีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของ Er_2O_3 ซึ่งเกิดจากการแทนที่อะตอมของ Na_2O ด้วย Er_2O_3 ที่มีมวลโมเลกุลที่มากกว่าดังรูปที่ 1 นั้นทำให้โอกาสในการเกิดอันตรกิริยาของรังสีกับระบบแก้วมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้ระบบแก้วตัวอย่างมีโอกาสในการเป็นวัสดุกำบังรังสีที่ดี



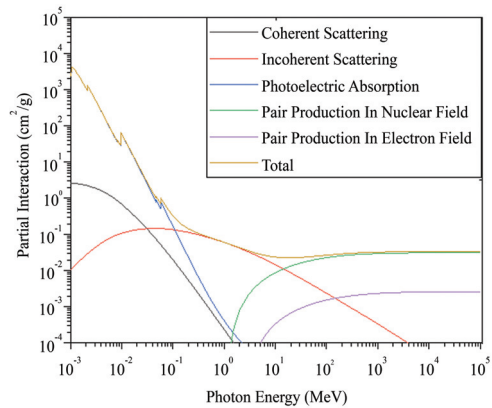
(ก) EX1



(ข) EX2



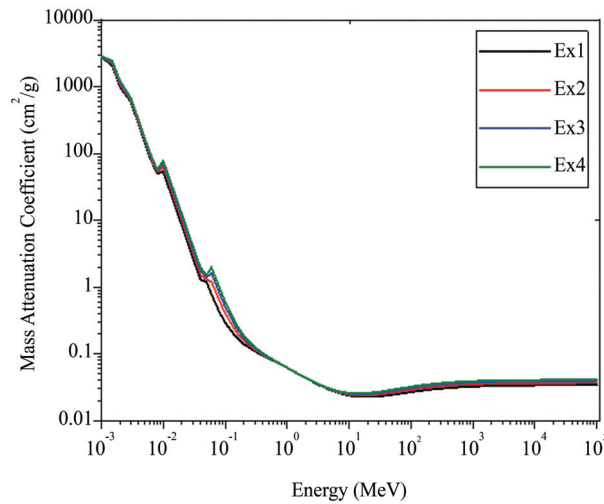
(ค) EX3



(ง) EX4

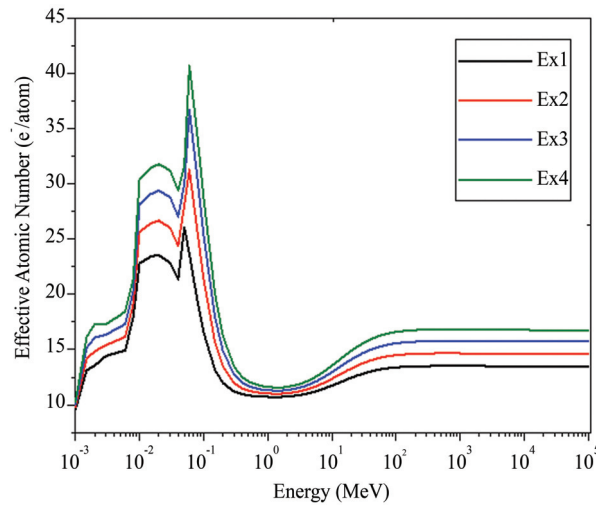
รูปที่ 2 สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลสำหรับอันตรกิริยารวมและอันตรกิริยาย่อยของระบบแก้ว ตัวอย่างกับระดับพลังงานในช่วง 10^{-3} - 10^5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลแบบอันตรกิริยารวมและอันตรกิริยาย่อยของระบบแก้วตัวอย่าง ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม WinXCom แสดงลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ การลดทอนเชิงมวลแบบอันตรกิริยารวมของระบบแก้วตัวอย่างในช่วงพลังงาน 10^{-3} - 10^5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 2 และ 3 แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิ์การลดทอน เชิงมวลของระบบแก้วตัวอย่างในช่วงพลังงาน 10^{-3} - 10^5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

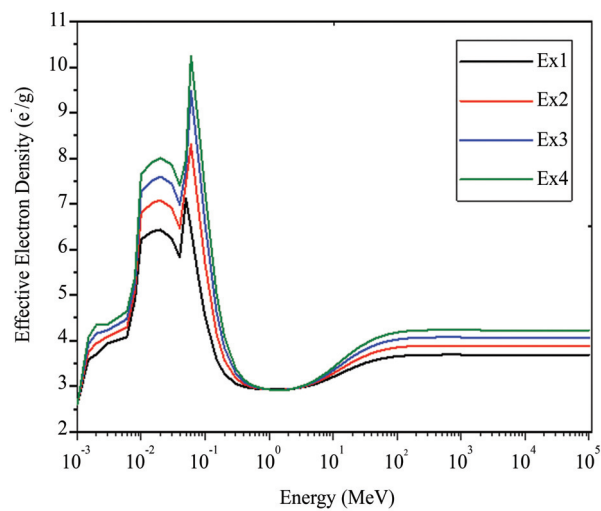


รูปที่ 3 สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลกับระดับพลังงานในช่วง 10^{-3} - 10^5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

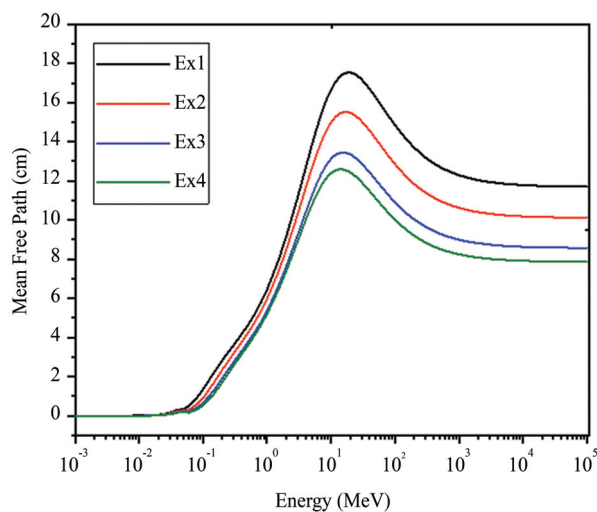
ค่าเลขอะตอมยังผล (Z_{eff}) และค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนยังผล (N_{el}) ของระบบแก้วตัวอย่าง ในระดับพลังงานในช่วง 10^{-3} - 10^5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ แสดงดังรูปที่ 4 และ 5



รูปที่ 4 เลขอะตอมยังผลของระบบแก้วตัวอย่างกับระดับพลังงานในช่วง 10^{-3} - 10^5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์



รูปที่ 5 ความหนาแน่นอิเล็กตรอนยังผลของระบบแก้วตัวอย่างกับระดับพลังงานในช่วง 10^{-3} - 10^5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์



รูปที่ 6 ระยะทางอิสระเฉลี่ยของระบบแก้วกับระดับพลังงานในช่วง 10^{-3} - 10^5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางอิสระเฉลี่ยของระบบแก้วตัวอย่างที่ระดับพลังงานในช่วง 10^{-3} - 10^5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์แสดงดังรูปที่ 6

อภิปรายผลการวิจัย

ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลสำหรับอันตรกิริยารวมของระบบแก้วตัวอย่างกับระดับพลังงานในช่วง 10^{-3} - 10^5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ พบว่าลักษณะของกราฟมีแนวโน้มลดลงตามระดับพลังงาน

ที่เพิ่มมากขึ้นดังรูปที่ 2 จากรูปพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลสำหรับการกระเจิงแบบโคฮีเรนต์หลังจากพลังงานโฟตอนที่ 10 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อพลังงานโฟตอนเพิ่มขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลสำหรับการกระเจิงแบบคอมป์ตันมีอัตราการลดลงเช่นเดียวกัน การลดลงของทั้งสองมีสัดส่วนผกผันกันต่อพลังงานโฟตอน ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลสำหรับการดูดกลืนโฟโตอิเล็กทริกจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อพลังงานโฟตอนเพิ่มขึ้น อาจเกิดจากภาคตัดขวางโฟโตอิเล็กทริกเปลี่ยนแปลงตามการผกผันของพลังงานโฟตอน $E^{7/2}$ ส่วนประกอบทางเคมีของแก๊วออกไซด์มีความสำคัญมากเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลสำหรับการดูดกลืนโฟโตอิเล็กทริกจะขึ้นกับเลขอะตอมในวัสดุโดยมีอันตรกิริยาเป็นแบบ Z^{4-5} ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลสำหรับการผลิตคู่แบบนิวเคลียร์ และแบบอิเล็กตรอน ตามลำดับนั้น พบว่าทั้งสองแบบจะมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลเพิ่มขึ้นเมื่อพลังงานโฟตอนเพิ่มขึ้นถึง 400 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ หลังจากพลังงานนั้นค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลมีค่าเกือบจะคงที่ อาจเป็นเพราะสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลสำหรับการผลิตคู่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ $\log E$ การผลิตคู่แบบนิวเคลียร์จะขึ้นกับค่า Z^2 ในขณะที่การผลิตคู่แบบอิเล็กตรอนเกือบจะเป็นแบบเชิงเส้น ดังนั้นในช่วงพลังงานสูงลักษณะของค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลรวมในรูปจะมาจากค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลสำหรับการผลิตคู่แบบนิวเคลียร์ที่ขึ้นกับค่า Z^2 [27] - [28]

ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลสำหรับอันตรกิริยาของระบบแก๊วตัวอย่างกับระดับพลังงานในช่วง 10^{-3} - 10^5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ พบว่าลักษณะของกราฟมีแนวโน้มลดลงตามระดับพลังงานที่เพิ่มมากขึ้น ดังรูปที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลมาจากการเกิดอันตรกิริยาในแต่ละช่วงพลังงาน แบ่งออกเป็น 3 ปรากฏการณ์หลักคือ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเกิดที่พลังงานต่ำกว่า 100 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ การกระเจิงแบบคอมป์ตันจะเกิดที่พลังงาน 100 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ถึง 1 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ และการผลิตคู่จะเกิดที่พลังงานตั้งแต่ 1 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ และเมื่อพลังงานเพิ่มขึ้นถึงระดับพลังงาน 400 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ หลังจากนั้นจะมีค่าเกือบคงที่เป็นเส้นขนานกันตามซึ่งแต่ละกระบวนการจะแปรผันกับค่าพลังงาน $E^{-3.5}$, E^{-1} and $\log E$ [27] จากรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าแก๊วตัวอย่าง Ex4 มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลสูงที่สุดนั้นแสดงให้เห็นว่าแก๊วตัวอย่างนี้มีสมบัติการกำบังรังสีดีที่สุดในบรรดาแก๊วตัวอย่างทั้งหมด

ผลการศึกษาเลขอะตอมยังผล (Z_{eff}) และความหนาแน่นอิเล็กตรอนยังผล (N_{el}) ของระบบแก๊วตัวอย่างกับระดับพลังงานในช่วง 1 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ถึง 100 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ พบว่ามีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงการดูดกลืนโฟโตอิเล็กทริก โดยพบจุดสูงสุดของค่าเลขอะตอมยังผลและความหนาแน่นอิเล็กตรอนยังผลที่พลังงาน 0.06 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ และจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 0.06 - 0.3 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ จนถึงจุดต่ำสุดที่ 1.5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งเป็นช่วงอันตรกิริยาการกระเจิงแบบอินโคฮีเรนต์ หลังจากนั้นค่าเลขอะตอมยังผล และความหนาแน่นอิเล็กตรอนยังผลจะเพิ่มขึ้นเมื่อระดับพลังงานสูงขึ้น และเริ่มคงที่จากช่วงระดับพลังงาน > 100 MeV เป็นต้นไป ดังรูปที่ 4 และ 5 จะเห็นได้ว่าแก๊วตัวอย่าง Ex4 มีค่าเลขอะตอมยังผล และความหนาแน่นอิเล็กตรอนยังผลสูงที่สุดนั้นแสดงให้เห็นว่าแก๊วตัวอย่างนี้มีโอกาสจะเกิดอันตรกิริยากับโฟตอนได้ดีที่สุดส่งผลให้มีสมบัติการกำบังรังสีดีที่สุดในบรรดาแก๊วตัวอย่างทั้งหมด

ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางอิสระเฉลี่ย (MFP) ของระบบแก้วตัวอย่างที่ระดับพลังงานในช่วง 10^{-3} - 10^5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ดังรูปที่ 6 พบว่าแก้วตัวอย่าง Ex4 มีค่าต่ำกว่าแก้วตัวอย่างอื่น ๆ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีคุณสมบัติในการกักขังรังสีที่ดีกว่าตัวอย่างแก้วอื่น ๆ และสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุกักขังรังสีได้ [27], [29] - [30]

สรุปผล

จากการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์มีผลต่อการป้องกันรังสีของระบบแก้วที่ใช้ในงานวิจัย ตามสูตร $40\text{P}_2\text{O}_5\text{-}20\text{ZnO-}10\text{Li}_2\text{O-}1\text{Sm}_2\text{O}_3\text{-(}29\text{-x)Na}_2\text{O-xEr}_2\text{O}_3$ โดยที่ $x = 0\ 1\ 2$ และ 3 เปอร์เซ็นต์โมล ที่ช่วงพลังงาน 10^{-3} - 10^5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ โดยการวิเคราะห์ความหนาแน่น และคำนวณจากโปรแกรมมาตรฐาน WinXCom พบว่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลสำหรับอันตรกิริยารวมของระบบแก้วมีค่าลดลงตามระดับพลังงานที่เพิ่มขึ้น มีลักษณะแตกต่างกัน 3 ช่วง ซึ่งขึ้นกับพลังงานในแต่ละช่วงที่แตกต่างกัน คือ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก การกระเจิงแบบคอมป์ตัน และการผลิตคู่ ซึ่งเป็นอันตรกิริยาหลักที่จะเกิดในช่วงพลังงานต่ำ ช่วงกลางของพลังงาน และช่วงพลังงานสูง ตามลำดับ ค่าระยะทางอิสระเฉลี่ยของแก้วตัวอย่างที่ประกอบด้วยปริมาณ Er_2O_3 สูงสุด (Ex4) มีคุณสมบัติในการกักขังรังสีที่ดีกว่าตัวอย่างแก้วอื่น ๆ และสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุกักขังรังสีได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และ Thailand Science Research and Innovation (TSRI) ที่สนับสนุนงานวิจัยนี้ ผู้เขียนขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร. Gerward L. สำหรับซอฟต์แวร์ WinXCom

References

- [1] Rivera-López, F., Babu, P., and Jyothi, L. (2012). $\text{Er}^{3+}\text{-Yb}^{3+}$ Codoped Phosphate Glasses Used for An Efficient $1.5\ \mu\text{m}$ Broadband Gain Medium. **Optical Materials**. Vol. 34, Issue 8, pp. 1235-1240. DOI: 10.1016/j.optmat.2012.01.017
- [2] Sójka, L., Tang, Z., and Furniss, D. (2014). Broadband, Midinfrared Emission from Pr^{3+} Doped GeAsGaSe Chalcogenide Fiber, Optically Clad. **Optical Materials**. Vol. 36, Issue 6, pp. 1076-1082. DOI: 10.1016/j.optmat.2014.01.038
- [3] Wang, H. Q., Batentschuk, M., Osvet, A., Pinna, L., and Brabec, C. J. (2011). Rare-Earth Ion Doped Up-Conversion Materials for Photovoltaic Applications. **Advanced Materials**. Special Issue: Hierarchical Structures Towards Functionality. Vol. 23, Issue 22-23, pp. 2675-2680. DOI: 10.1002/adma.201100511

- [4] Chen, L., He, D., Luan, F., Hu, L., and Chen, W. (2009). An Efficient Erbium Doped Phosphate Laser Glass for High Average Power Pumping. **Journal of Alloys and Compounds**. Vol. 482, Issue 1-2, pp. 261-263. DOI: 10.1016/j.jallcom.2009.03.173
- [5] Hajer, S. S., Halimah, M. K., Azmi, Z., and Azlan, M. N. (2014). Optical Properties of Zinc-Borotellurite Doped Samarium. **Chalcogenide Letters**. Vol. 11, No. 11, pp. 553-566
- [6] Aronne, A., Esposito, S., and Pernice, P. (1997). FTIR and DTA Study of Lanthanum Aluminosilicate Glasses. **Materials Chemistry and Physics**. Vol. 51, Number 2, pp. 163-168
- [7] Pugliese, D., Boetti, N. G., and Lousteau, J. (2016). Concentration Quenching in an Er-Doped Phosphate Glass for Compact Optical Lasers and Amplifiers. **Journal of Alloys and Compounds**. Vol. 657, pp. 678-683. DOI: 10.1016/j.jallcom.2015.10.126
- [8] Rasool, S. N., Jamalaiah, B. C., Suresh, K., Moorthy, L. R., and Jayasankar, C. K. (2017). Spectroscopic Properties of Er³⁺-doped Phosphate Based Glasses for Broadband 1.54 μm Emission. **Journal of Molecular Structure**. Vol. 1130, pp. 837-843
- [9] Liang, X., Li, H., Wang, C., Yu, H., Li, Z., and Yang, S. (2014). Physical and Structural Properties of Calcium Iron Phosphate Glass Doped with Rare Earth. **Journal of Non-Crystalline Solids**. Vol. 402, pp. 135-140. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2014.05.021
- [10] Lofaj, F., Satet, R., Hoffmann, M. J., and de Arellano López, A. R. (2004). Thermal Expansion and Glass Transition Temperature of the Rare-Earth Doped Oxytrifluoride Glasses. **Journal of the European Ceramic Society**. Vol. 24, Issue 12, pp. 3377-3385. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2003.10.012
- [11] Stoch, P., Stoch, A., Ciecinska, M., Krakowiak, I., Sitarz, M. (2016). Structure of Phosphate and Iron-Phosphate Glasses by DFT Calculations and FTIR/Raman Spectroscopy. **Journal of Non-Crystalline Solids**. Vol. 450, pp. 48-60. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2016.07.027
- [12] Sołtys, M., Pisarska, J., Leśniak, M., Sitarz, M., and Pisarski, W. A. (2018). Structural and Spectroscopic Properties of Lead Phosphate Glasses Doubly Doped with Tb³⁺ and Eu³⁺ ions. **Journal of Molecular Structure**. Vol. 1163, pp. 418-427. DOI: 10.1016/j.molstruc.2018.03.021
- [13] Moustafa, Y. M. and El-Egili, K. (1998). Infrared Spectra of Sodium Phosphate Glasses. **Journal of Non-Crystalline Solids**. Vol. 240, Issue 1-3, pp. 144-153. DOI: 10.1016/S0022-3093(98)00711-X
- [14] Soo, S. (2014). Structural, Thermal and Spectroscopic Properties of Highly Er³⁺-doped Novel Oxyfluoride Glasses for Photonic Application. **Materials Research Bulletin**. Vol. 51, pp. 336-344. DOI: 10.1016/j.materresbull.2013.12.023
- [15] Tijani, S. A., Kamal, S. M., Al-Hadeethi, Y., Arib, M., Hussein, M. A., Wageh, S., and Dim, L. A. (2018). Radiation Shielding Properties of Transparent Erbium Zinc Tellurite Glass System Determined at Medical Diagnostic Energies. **Journal of Alloys and Compounds**. Vol. 741, pp. 293-299. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.01.109

- [16] Li, R., Gu, Y., Zhang, G., Yang, Z., Li, M., and Zhang, Z. (2017). Radiation Shielding Property of Structural Polymer Composite: Continuous Basalt Fiber Reinforced Epoxy Matrix Composite Containing Erbium Oxide. **Composites Science and Technology**. Vol. 143, pp. 67-74. DOI: 10.1016/j.compscitech.2017.03.002
- [17] Agar, O., Kavaz, E., Altunsoy, E. E., Kilicoglu, O., Tekin, H. O., Sayyed, M. I., Erguzel, T. T., and Tarhan, N. (2019). 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**. Vol. 13, p. 102277. DOI: 10.1016/j.rinp.2019.102277
- [18] Tekin, H. O., Altunsoy, E. E., Kavaz, E., Sayyed, M. I., Agar, O., and Kamislioglu, M. (2019). Photon and Neutron Shielding Performance of Boron Phosphate Glasses for Diagnostic Radiology Facilities. **Results in Physics**. Vol. 12, pp. 1457-1464. DOI: 10.1016/j.rinp.2019.01.060
- [19] Boonin, K., Yasaka, P., Limkitjaroenporn, P., and Rajaramakrishna, R.(2020). Effect of BaO on Lead Free Zinc Barium Tellurite Glass for Radiation Shielding Materials in Nuclear Application. **Journal of Non-Crystalline Solids**. Vol. 550, p. 120386. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2020.120386
- [20] Abouhaswa, A. S. and Kavaz, E. (2020). Bi_2O_3 Effect on Physical, Optical, Structural and Radiation Safety Characteristics of $\text{B}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-ZnO-CaO}$ Glass System. **Journal of Non-Crystalline Solids**. Vol. 535, p.119993. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2020.119993
- [21] Hanane, B., Soumya, F., Moutataouia, M., Baach, B., Elbadaoui, A., Abderrazak, N., and Taoufiq, G. (2020). Structural Investigation of $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-P}_2\text{O}_5\text{-B}_2\text{O}_3\text{-V}_2\text{O}_5$ Quaternary Glass System by Raman, FTIR and Thermal Analysis. **Chemical Physics Letters**. Vol. 760, p. 138031. DOI: 10.1016/j.cplett.2020.138031
- [22] Boukhris, I., Kebaili, I., Burihi, M. S. A., and Sayyed, M. I. (2021). Radiation Shielding Properties of Tellurite-Lead-Tungsten Glasses Against Gamma and Beta Radiations. **Journal of Non-Crystalline Solids**. Vol. 551, p. 120430. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2020.120430
- [23] Chanthima, N. and Kaewkhao, J. (2013). Investigation on Radiation Shielding Parameters of Bismuth Borosilicate Glass from 1 keV to 100 GeV. **Annals of Nuclear Energy**. Vol. 55, pp. 23-28. DOI:10.1016/j.anucene.2012.12.011
- [24] Khobkham, C., Chiphaksa, W., Limkitjaroenporn, P., Prongsamrong, P., Wiwatkanjana, P., and Kaewkhao, J. (2016). Theoretical Study of the Photon Interaction for Zirconium Alloy at 1 keV to 100 MeV. *Key Engineering Materials*. Vol. 675-676, pp. 730-733. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.675-676.730
- [25] Issa, Shams A. M., Kumar, Ashok., Sayyed, M. I., Dong, M. G., and Elmahroug, Y. (2018). Mechanical and Gamma-Ray Shielding Properties of $\text{TeO}_2\text{-ZnO-NiO}$ Glasses. **Materials Chemistry and Physics**. Vol. 212, pp. 12-20. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2018.01.058
- [26] Elbakey, A. A., Farag, M. A., El-Okr, M., Elrasasi, T. Y., and El-Mansy, M. K. (2020). Preparation and Characterization of Phosphate Glasses Co-doped with Rare Earth Ions. **Egyptian Journal of Chemistry**. Vol. 63, Issue 5, pp. 1955-1964. DOI: 10.21608/ejchem.2019.15556.1944

- [27] Agar, O., Kavaz, E., Altunsoy, E. E., Kilicoglu, O., Tekin, H. O., Sayyed, M. I., Erguzel, T. T., and Tarhan, N. (2019). 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**. Vol. 13, p. 102277. DOI: 10.1016/j.rinp.2019.102277
- [28] Gupta, S. and Sidhu, G. S. (2013). Measurement of Total and Partial Mass Attenuation Coefficients of Oxide Glasses: A Radiation Field. **International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)**. Vol. 3, Issue 6, pp. 3830-3835
- [29] Sayyed, M. I., Tekin, H. O., Taki, M. M., Mhareb, M. H. A., Agar, O., Şakar, E., Kaky, K. M. (2020). $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-ZnO-BaO-Li}_2\text{O}$ Glass System for Gamma Ray Shielding Applications. **Optik**. Vol. 201, p. 163525. DOI: 10.1016/j.ijleo.2019.163525
- [30] Dong, M. G., Sayyed, M. I., Lakshminarayana, G., Ersundu, M. Ç., Ersundu, A. E., Nayar, P., and Mahdi, M. A. (2017). Investigation of Gamma Radiation Shielding Properties of Lithium Zinc Bismuth Borate Glasses Using XCOM Program and MCNP5 Code. **Journal of Non-Crystalline Solids**. Vol. 468, pp. July. 12-16. DOI:10.1016/j.jnoncrysol.2017.04.018