

ผลของ Bi_2O_3 ต่อสมบัติการกำบังรังสีของระบบแก้ว $\text{TeO}_2\text{-SiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$

The Effect of Bi_2O_3 on Radiation Shielding Properties of $\text{TeO}_2\text{-SiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$ Glass System

กิตติศักดิ์ ศรีวงศ์ษา^{1*} พัสวี เจริญสุข² ชิชานุชา เพียรโพธิ์กลาง² วชิษฐ์พล มลิวัดย์² กุลนันท์ ปราณอุดมรัตน์³ ลัทธพล ม่วงศรี³ ปารมี เลิศลิมปิยรัตน์³ พันธุ์ศักดิ์ กล้ากล่อมจิตร³ และสุนันทศักดิ์ ระวีวงศ์⁴

Kittisak Sriwongsa^{1*} Passawee Charaensook² Chisanucha Peanpokrang²

Wasitpol Maliwan² Kunlanun Pranudomrat³ Latthapon Muangsri³

Paramee Lertlimpiyarat³ Punsak Gumglomchit³ and Sunantasak Ravangvong⁴

Received: August 29, 2021; Revised: October 6, 2021; Accepted: October 6, 2021

บทคัดย่อ

คุณสมบัติการลดทอนโฟตอนของระบบแก้ว $(70-x)\text{TeO}_2\text{-}30\text{SiO}_2\text{-}x\text{Bi}_2\text{O}_3$ ที่ปรับเปลี่ยนปริมาณของ Bi_2O_3 ที่ 10 20 30 40 และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ ดำเนินการโดยผ่านโปรแกรม Phy-X/PSD ที่พลังงานโฟตอน $10^3 - 10^5$ เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (μ_m) ของระบบแก้วนี้แสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพการกำบังโฟตอนนั้นสัมพันธ์กับปริมาณของ Bi_2O_3 ในแก้ว ซึ่งการเพิ่มปริมาณ Bi_2O_3 ลงในแก้ว ช่วยเพิ่มความสามารถการลดทอนโฟตอนของระบบแก้วนี้ได้มากขึ้น นอกจากนี้ค่า Buildup Factors (BFs) ซึ่งประกอบด้วยค่า Exposure and Energy Absorption Buildup Factors (EBF and EABF) ยังได้มีการคำนวณโดยใช้ทฤษฎี Geometric Progression (G-P) Fitting ที่พลังงานตั้งแต่ 15 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ถึง 15 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ที่ความลึกทะลุผ่านจนถึง 40 (mfp) ผลที่ได้พบว่าอนุภาคของ Bi_2O_3 ที่เข้าไปแทนที่อนุภาคของ TeO_2 ภายในแก้วจะช่วยเพิ่มสมบัติการกำบังรังสีของระบบแก้วนี้ และตัวอย่างแก้ว $20\text{TeO}_2\text{-}30\text{SiO}_2\text{-}50\text{Bi}_2\text{O}_3$ ยังเป็นตัวอย่างแก้วที่มีสมบัติการกำบังรังสีที่ดีที่สุด

คำสำคัญ : สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล; Buildup Factors; แก้วเทลลูไรท์

¹ คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม

² โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยศิลปากร คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม

³ โรงเรียนทิวหินวิทยาลัย ประจวบคีรีขันธ์

⁴ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

¹ Faculty of Education, Silpakorn University, Nakhon Pathom

² The Demonstration School of Silpakorn University, Nakhon Pathom

³ Huahinvithayalai School, Prachuapkhirikhan

⁴ Faculty of Science and Technology, Phetchaburi Rajabhat University

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

Abstract

Photon attenuation properties of glass system in formula $(70-x)\text{TeO}_2-30\text{SiO}_2-x\text{Bi}_2\text{O}_3$ at $x = 10, 20, 30, 40$ and 50 mol%. These glass samples have been simulated through Phy-X/PSD software program at photon energies $10^{-3} - 10^5$ MeV. The mass attenuation coefficient (μ_m) values of the selected glass system exhibited that the shielding performance of the gamma photons is related to the Bi_2O_3 content in glass, thus, the increasing of Bi_2O_3 content to glass improves the capacity of the glass system to attenuate more photons. Further, the method of geometric progression (G-P) fitting has been used to simulated wide energies ranging from 15 keV - 15 MeV and until 40 penetration depths (mfp) for buildup factors (BFs): exposure and energy absorption buildup factors (EBF and EABF). The simulated data reports that Bi_2O_3 partial replacement of TeO_2 in glass system which increases behavior of against radiation and $20\text{TeO}_2-30\text{SiO}_2-50\text{Bi}_2\text{O}_3$ exhibited the best shielding properties.

Keywords: Mass Attenuation Coefficient; Buildup Factors; Tellurite Glass

บทนำ

ในศตวรรษที่ยี่สิบเอ็ดรังสีไอออนไนซ์ได้ถูกนำมาใช้ในชีวิตประจำวันต่าง ๆ มากมาย เช่น ด้านการแพทย์ การเกษตรและการผลิต ซึ่งการแผ่รังสีจะถูกปล่อยออกมาจากเฉพาะแหล่งกัมมันตภาพรังสีแล้วถูกส่งผ่านไปยังสิ่งแวดล้อม ดังนั้นเพื่อเป็นการปกป้องรังสีจากสิ่งแวดล้อมจึงต้องใช้วัสดุที่เหมาะสมในการดูดกลืนรังสีเหล่านั้นเพื่อป้องกันอันตรายทั้งกับสิ่งแวดล้อมและตัวบุคคลที่เกี่ยวข้องทั่วไป ซึ่งการเลือกวัสดุกำบังรังสีที่เหมาะสมนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดและพลังงานของรังสี ดังนั้นวัสดุที่ใช้ต้องให้เกิดประสิทธิภาพที่ดีต้องประกอบด้วยองค์ประกอบที่มีเลขอะตอมสูง เช่น ตะกั่ว แต่เนื่องจากตะกั่วมีความเป็นพิษต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมจึงเป็นเหตุผลหลักที่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงวัสดุที่ปราศจากตะกั่ว [1] วัสดุหนึ่งที่มีความเหมาะสมในการกำบังรังสีหนึ่งในนั้นคือ แก้ว โดยแก้วเทลลูเรียมออกไซด์ (TeO_2) เป็นแก้วที่มีค่าดัชนีหักเหสูง พลังงานโฟนอนต่ำ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง และมีการส่งผ่านอินฟราเรดที่ดี [2] คุณสมบัติทางแสงของแก้วที่ใช้เทลลูเรียมออกไซด์ เป็นองค์ประกอบร่วมกับออกไซด์ของโลหะหนักเป็นที่น่าสนใจอย่างมากในด้านวัสดุแก้วกำบังรังสี [3] บิสมัทออกไซด์ (Bi_2O_3) เป็นตัวเลือกที่มากมายที่นำมาใช้ในระบบแก้วเพื่อใช้งานในด้านกำบังรังสี เนื่องจากมีสมบัติที่เหมาะสม เช่น มีความหนาแน่นและเลขอะตอมยังผลสูง ความแข็งแรงของสนามต่ำ มีหลายงานวิจัยแสดงให้เห็นแล้วว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของบิสมัทในระบบแก้ว จะช่วยให้ระบบแก้วนั้นมีประสิทธิภาพในการกำบังรังสีได้ดีขึ้น [4] - [12] ในขณะที่ซิลิกอนออกไซด์ (SiO_2) ตัวทำหน้าที่ให้โครงสร้างหลักที่นิยมใช้ตัวหนึ่งเนื่องจากมีสมบัติที่ดี เช่น ทนทานต่อสารเคมี มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี [13] - [14]

ในด้านการแผ่รังสีและการวัดปริมาณรังสี มีพารามิเตอร์หลายค่าที่ใช้ในการตรวจสอบสมบัติการกำบังรังสีของวัสดุโดยหนึ่งในนั้น คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (Mass Attenuation

Coefficient: μ_m) ซึ่งเป็นค่าพื้นฐานที่นิยมใช้ในการอธิบายการเกิดอันตรกิริยาของโฟตอนกับวัสดุ เช่น วัสดุจำพวก คอนกรีต โลหะผสม (อัลลอยด์) เหล็กกล้าไร้สนิม (สแตนเลส) พอลิเมอร์ หรือแก้ว เป็นต้น [7] และอีกค่าหนึ่งที่ใช้ในการอธิบายสมบัติการกำบังรังสีของวัสดุคือค่า Buildup Factors ซึ่งค่าเหล่านี้เป็นค่าพื้นฐานและมีความสำคัญมาก [12]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะศึกษาระบบแก้ว $(70-x)\text{TeO}_2\text{-}30\text{SiO}_2\text{-}x\text{Bi}_2\text{O}_3$ โดย $x = 10\ 20\ 30\ 40$ และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ โดยพารามิเตอร์ที่จะนำมาใช้ในการหาประสิทธิภาพต่อการกำบังรังสี ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล และค่า Buildup Factors ซึ่งเป็นค่าที่ใช้พิจารณาสำหรับประยุกต์ใช้งานวัสดุด้านกำบังรังสี

วิธีการศึกษา

ระบบแก้ว $(70-x)\text{TeO}_2\text{-}30\text{SiO}_2\text{-}x\text{Bi}_2\text{O}_3$ ที่ปรับเปลี่ยนปริมาณของ Bi_2O_3 ที่ 10 20 30 40 และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ถ้าปริมาณของ Bi_2O_3 มากกว่านี้จะทำให้อัตราส่วนของสารที่เป็นตัวโครงสร้างหลัก (TeO_2 และ SiO_2) ที่ทำให้เกิดแก้วมีปริมาณน้อยกว่าตัวปรับเปลี่ยนโครงสร้าง ซึ่งจะทำให้ไม่เกิดแก้ว โดยตัวอย่างทั้งหมดจะถูกนำมาวิเคราะห์ค่าทางทฤษฎีต่าง ๆ ตามลำดับ ดังต่อไปนี้ เริ่มจากนำแก้วในแต่ละเงื่อนไขไปคำนวณหาค่าสัดส่วนโดยน้ำหนัก (Fraction by Weight) ของแต่ละธาตุ ซึ่งค่าสัดส่วนโดยน้ำหนักนี้จะถูกนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล สำหรับสารเคมีใด ๆ หรือสารผสมของธาตุ สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (μ_m) ได้จาก “กฎการผสม (Mixture Rule)” ดังสมการที่ (1) ตามสูตร [15]

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

เมื่อ

w_i คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของแต่ละธาตุ
 $(\mu_m)_i$ คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของแต่ละธาตุ

ในส่วนการหาค่า Buildup Factors (BFs) และค่า G-P Fitting Parameters ของระบบแก้ว สามารถหาค่าได้จากค่าเลขอะตอมยังผล (Equivalent Atomic Number: Z_{eq}) ซึ่งสามารถแบ่งได้ 3 ขั้นตอน คือ ความสัมพันธ์ซึ่งแสดงได้ดังงานวิจัย [16] - [17]

1. คำนวณค่าเลขอะตอมยังผล (Z_{eq})
2. คำนวณค่าพารามิเตอร์ G-P Fitting Parameters
3. คำนวณค่า BFs

เลขอะตอมเทียบเท่า หาได้จากอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การลดทอนของคอมป์ตัน (μ_m)_{Compton} กับสัมประสิทธิ์การลดทอนมวลรวม (μ_m)_{Total} ที่พลังงานใด ๆ และทำได้ดังสมการที่ (2)

$$Z_{eq} = \frac{Z_1(\log R_2 - \log R) + Z_2(\log R - \log R_1)}{\log R_2 - \log R_1} \quad (2)$$

เมื่อ Z_1 และ Z_2 คือ เลขอะตอมที่ได้จากอัตราส่วนของ R_1 และ R_2 โดย R คือ อัตราส่วนของ $(\mu_m)_{\text{Compton}} / (\mu_m)_{\text{Total}}$ ของแก้วที่พลังงานเดียวกัน ค่าพารามิเตอร์ G-P Fitting Parameters ของตัวอย่างแก้วสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของ Z_{eq} และหาได้จากสมการที่ (3)

$$P = \frac{P_1(\log Z_2 - \log Z_{eq}) + P_2(\log Z_{eq} - \log Z_1)}{\log Z_2 - \log Z_1} \quad (3)$$

เมื่อ P_1 และ P_2 คือค่าพารามิเตอร์ G-P Fitting Parameters ที่สอดคล้องกับเลขอะตอมของ Z_1 และ Z_2 ที่พลังงานเดียวกันและค่านี้จะนำไปใช้ในการหาค่า BFs ดังสมการที่ (4) - (6)

$$B(E, X) = 1 + \frac{b-1}{K-1}(K^x - 1) \quad (4)$$

เมื่อ $K \neq 1$

$$B(K, X) = 1 + (b-1)x \quad (5)$$

เมื่อ $K = 1$

และ

$$K(E, x) = cx^a + d \frac{\tanh(\frac{x}{X_K} - 2) - \tanh(-2)}{1 - \tanh(-2)} \quad (6)$$

เมื่อ $x \leq 40$ mfp

โดย E และ x คือ พลังงานของโฟตอนและความลึกทะลุผ่านในเทอมระยะทางอิสระเฉลี่ย (mfp) ค่า a , b , c , d และ X_K คือค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จาก G-P Fitting Parameters ค่า K คือค่าการทะลุผ่านของโฟตอนและปรับเปลี่ยนตามค่าของสเปกตรัม

ผลการศึกษา

สัดส่วนทางเคมีของธาตุแต่ละชนิดที่เป็นองค์ประกอบของระบบแก้วที่ใช้ในการศึกษาวิเคราะห์เพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุกำบังรังสีครั้งนี้ดังตารางที่ 1

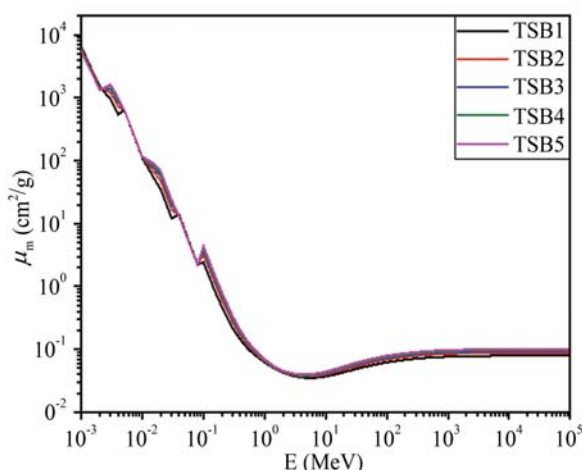
ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของระบบแก้ว (โมลเปอร์เซ็นต์)

ธาตุองค์ประกอบ	รหัสแก้วตัวอย่างและองค์ประกอบทางเคมี (โมลเปอร์เซ็นต์)				
	TSB1	TSB2	TSB3	TSB4	TSB5
TeO_2	60	50	40	30	20
SiO_2	30	30	30	30	30
Bi_2O_3	10	20	30	40	50

ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (μ_m) ของระบบแก้วตัวอย่างที่ได้จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม Phy-X/PSD ที่พลังงานโฟตอน $10^{-3} - 10^5$ เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ดังรูปที่ 1 โดยปรากฏการณ์การดูดกลืนโฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric Absorption: PP) การกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton Scattering: CS) และการผลิตคู่ (Pair Production: PP) เป็นอันตรกิริยาหลักที่สำคัญที่ใช้อธิบายค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลที่แสดงดังรูปที่ 1 จากรูปสามารถแบ่งช่วงพลังงานของโฟตอนออกเป็น 3 ช่วง คือช่วงพลังงานต่ำ (น้อยกว่า 0.3 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์) ช่วงพลังงานปานกลาง (ระหว่าง 0.3 - 3 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์) และช่วงพลังงานสูง (มากกว่า 3 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์) โดยในช่วงพลังงานต่ำค่า μ_m จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อพลังงานโฟตอนเพิ่มขึ้นซึ่งเหตุการณ์นี้อาจเกิดจากปรากฏการณ์การดูดกลืนโฟโตอิเล็กทริกเปลี่ยนแปลงตามการผกผันของพลังงานโฟตอน ($E^{-3.5}$) และในช่วงพลังงานนี้ลักษณะของกราฟไม่ต่อเนื่องกัน เกิดจากพลังงานในช่วงนั้นตกอยู่ในชั้นขอบการดูดกลืน (Absorption Edge) ของธาตุต่าง ๆ ดังตารางที่ 2 ในช่วงพลังงานปานกลางค่า μ_m จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ซึ่งอยู่ในช่วงอันตรกิริยาการกระเจิงแบบคอมป์ตัน และค่า μ_m แปรผกผันกับพลังงาน ($\propto E^{-1}$) หลังจากนั้นค่า μ_m ค่อนข้างจะคงที่ซึ่งการผลิตคู่เป็นอันตรกิริยาหลัก โดยค่า μ_m จะแปรผันตรงกับ $\log E$ อีกทั้งตัวอย่างแก้ว TSB5 นั้นมีค่า μ_m สูงสุดในบรรดาตัวอย่างแก้วทั้งหมดทั้งนี้เนื่องจากการแทนที่ของ TeO_2 ด้วย Bi_2O_3 ซึ่ง Bi นั้นมีความหนาแน่น (9.78 g/cm^3) และเลขอะตอม (83) มากกว่า Te (ความหนาแน่นเท่ากับ 6.23 g/cm^3 และเลขอะตอมเท่ากับ 52) เป็นผลทำให้โอกาสการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโฟตอนกับวัสดุมากที่สุดนำมาซึ่งกักเก็บรังสีได้ดีที่สุด [18] - [20]

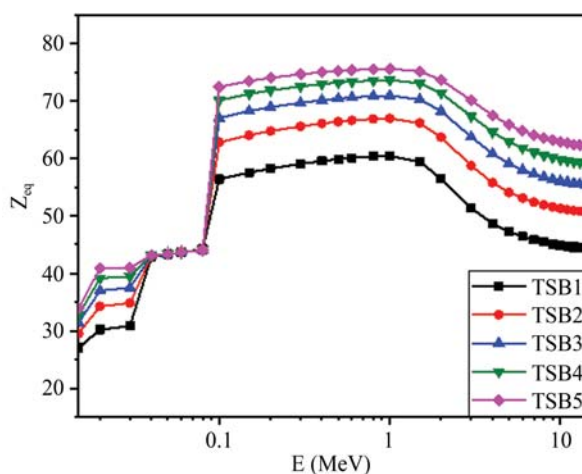
ตารางที่ 2 ชั้นขอบเขตการดูดกลืนพลังงาน (Absorption Edge) (keV)

ธาตุ	เลขอะตอม	M5	M4	M3	M2	M1	L3	L2	L2	K
Bi	83	2.58	2.69	3.18	3.70	4.00	13.42	15.71	16.39	90.53
Te	52					1.01	4.34	4.61	4.94	31.81
Si	14									1.84



รูปที่ 1 สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตัวอย่างแก้วในช่วงพลังงาน $10^{-3} - 10^5$ เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

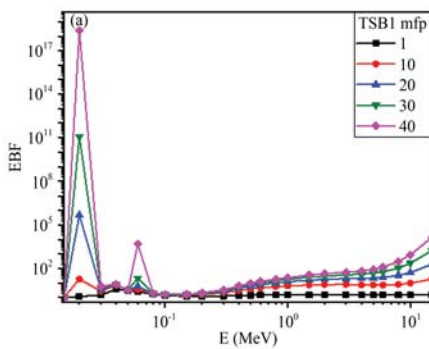
ค่าเลขอะตอมเทียบเท่า (Equivalent Atomic Number: Z_{eq}) ของระบบแก้วตัวอย่างในระดับพลังงานตั้งแต่ 15 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ถึง 15 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์แสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งค่า Z_{eq} นี้หาได้จากการคำนวณโดยใช้ทฤษฎี Geometric Progression (G-P) Fitting และจะเห็นว่าค่านี้จะมีค่าต่ำที่ช่วงพลังงานต่ำ (< 0.1 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์) ซึ่งปรากฏการณ์การดูดกลืนโฟโตอิเล็กทริกเป็นอันตรกิริยาหลัก และเมื่อพลังงานเพิ่มขึ้นค่านี้ก็จะเพิ่มขึ้นและจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ในช่วงพลังงานระดับปานกลาง ซึ่งการกระเจิงแบบคอมป์ตันเป็นอันตรกิริยาหลัก และลดลงอีกครั้งในช่วงพลังงานที่สูงขึ้น ซึ่งการผลิตคู่เป็นอันตรกิริยาหลัก [21]



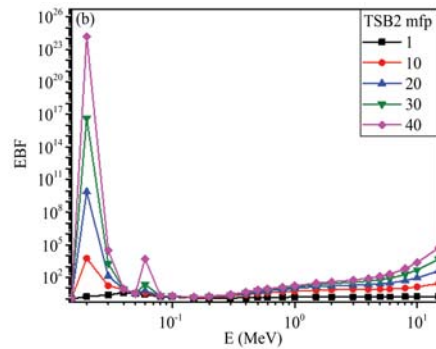
รูปที่ 2 เลขอะตอมเทียบเท่าของตัวอย่างแก้วในช่วงพลังงาน 0.015 - 15 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

ค่า Buildup Factors (BFs) ค่านี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ Exposure Buildup Factors (EBF) และ Energy Absorption Buildup Factor (EABF) [22] โดยทั้ง 2 ค่านี้ที่ช่วงพลังงาน

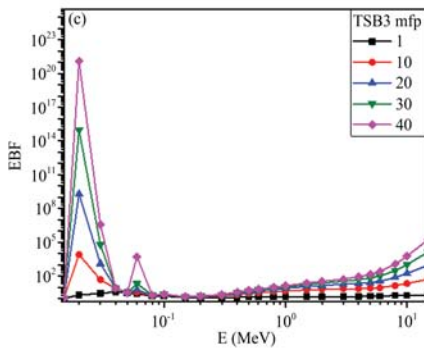
0.015 - 15 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ที่ความลึกทะลุผ่าน 1 - 40 mfp ดังรูปที่ 3 และ 4 ค่าทั้ง 2 ค่านี้เป็นค่าที่สำคัญอย่างหนึ่งที่ใช้ในการออกแบบวัสดุเพื่อกำบังรังสี จากรูปที่ 3 และ 4 จะเห็นได้ว่าค่า EBF และ EABF จะมีค่าต่ำที่พลังงานต่ำเนื่องจากปรากฏการณ์การดูดกลืนโฟโตอิเล็กทริกเป็นอันตรกิริยาหลักและจะมียอดแหลมซึ่งเกิดจากขอบการดูดกลืนในชั้นพลังงาน K (K-Absorption Edge) ของธาตุต่าง ๆ ตามที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้แล้ว ในช่วงพลังงานปานกลางซึ่งการกระเจิงแบบคอมป์ตันเป็นอันตรกิริยาหลัก ค่า EBF และ EABF จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากโฟตอนได้สูญเสียพลังงานจากการชนกันทำให้มีการสะสมพลังงานเกิดขึ้นภายในวัสดุตัวกลางเป็นเวลานาน ในขณะที่พลังงานสูงซึ่งการผลิตคู่เป็นอันตรกิริยาหลักและจากรูปที่ 3 และ 4 เมื่อเพิ่มค่าการทะลุผ่าน ค่า EABF และ EBF จะเพิ่มขึ้นเพราะโฟตอนจะกระเจิงตัวเพิ่มขึ้นตามความยาวเส้นทางที่เพิ่มขึ้น [23] - [24]



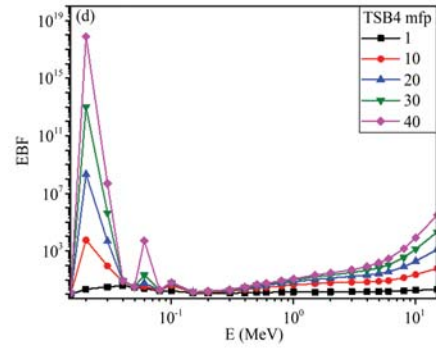
(ก) ค่า EBF ของตัวอย่างแก้วที่ 1



(ข) ค่า EBF ของตัวอย่างแก้วที่ 2

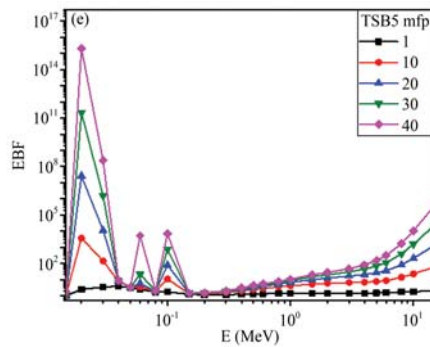


(ค) ค่า EBF ของตัวอย่างแก้วที่ 3



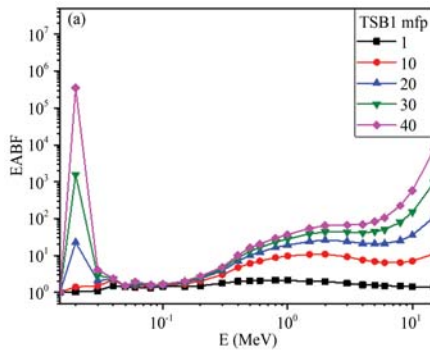
(ง) ค่า EBF ของตัวอย่างแก้วที่ 4

รูปที่ 3 EBF ของตัวอย่างแก้วในช่วงพลังงาน 0.015 - 15 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ที่ความลึกทะลุผ่าน 1 - 40 mfp

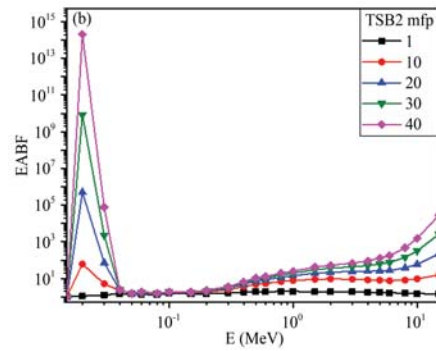


(จ) ค่า EBF ของตัวอย่างแก้วที่ 1

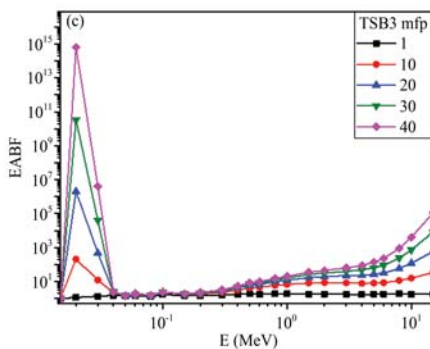
รูปที่ 3 EBF ของตัวอย่างแก้วในช่วงพลังงาน 0.015 - 15 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ที่ความลึกทะลุผ่าน 1 - 40 mfp (ต่อ)



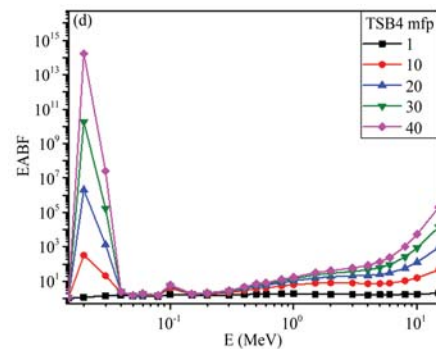
(ก) ค่า EABF ของตัวอย่างแก้วที่ 1



(ข) ค่า EABF ของตัวอย่างแก้วที่ 2

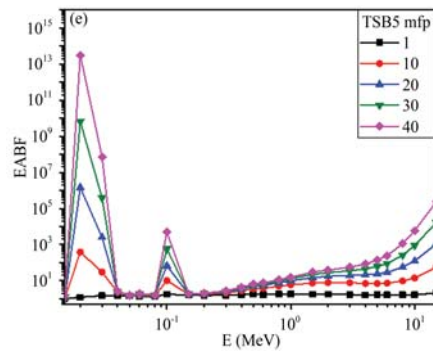


(ค) ค่า EABF ของตัวอย่างแก้วที่ 3



(ง) ค่า EABF ของตัวอย่างแก้วที่ 4

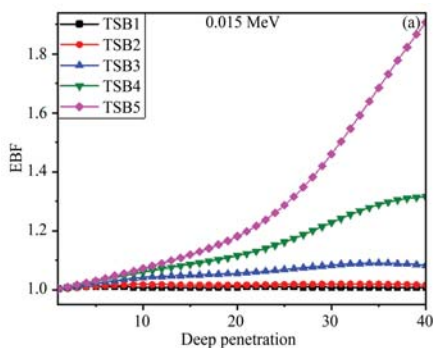
รูปที่ 4 EABF ของตัวอย่างแก้วในช่วงพลังงาน 0.015 - 15 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ที่ความลึกทะลุผ่าน 1 - 40 mfp



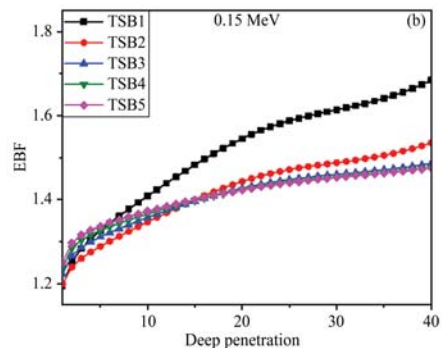
(จ) ค่า EABF ของตัวอย่างแก้วที่ 5

รูปที่ 4 EABF ของตัวอย่างแก้วในช่วงพลังงาน 0.015 - 15 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ที่ความลึกทะลุผ่าน 1 - 40 mfp (ต่อ)

ค่า Exposure and Energy Absorption Buildup Factors (EBF and EABF) ของระบบแก้ว ตัวอย่างที่ความลึกทะลุผ่าน (Penetration Depths: PD) จนถึง 40 mfp ที่พลังงาน 0.015 0.15 1.5 และ 15 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ดังรูปที่ 5 และ 6 จากรูปพบว่าผลที่ได้พบว่าค่า EBF และ EABF ของแก้วตัวอย่างที่พลังงาน 0.015 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ค่อนข้างเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเพิ่มระยะความลึกทะลุผ่านในช่วงพลังงานปานกลาง (0.15 - 1.5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์) และที่พลังงานสูง (15 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์) ค่า EBF และ EABF เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะความลึกทะลุผ่านซึ่งเหตุการณ์นี้เกิดจากความน่าจะเป็นของโฟตอนที่เกิดอันตรกิริยากับตัวอย่างแก้วในช่วงพลังงานนี้ซึ่งแปรผันตาม Z^2 คือ มีการกระเจิงในระดับทุติยภูมิมากขึ้น [25]

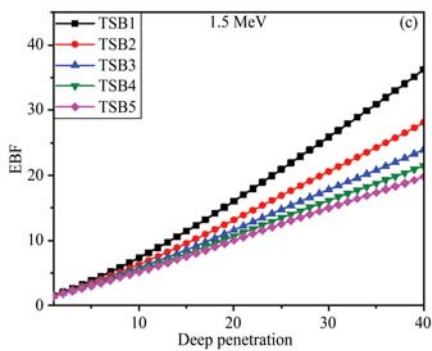


(ก) EBF ของตัวอย่างแก้วที่พลังงาน 0.015 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

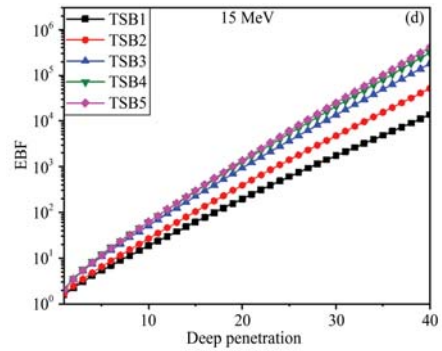


(ข) EBF ของตัวอย่างแก้วที่พลังงาน 0.15 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

รูปที่ 5 EBF ของตัวอย่างแก้วที่ความลึกทะลุผ่านจนถึง 40 mfp ที่พลังงานต่าง ๆ

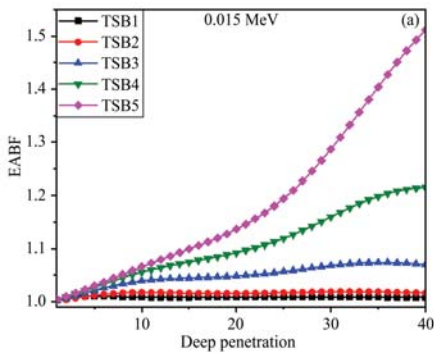


(ค) EBF ของตัวอย่างแก้วที่พลังงาน
1.5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

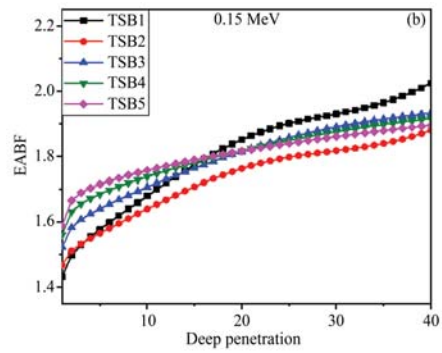


(ง) EBF ของตัวอย่างแก้วที่พลังงาน
15 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

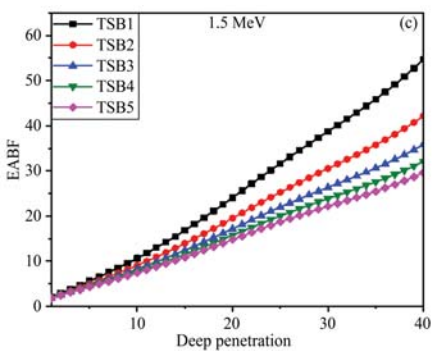
รูปที่ 5 EBF ของตัวอย่างแก้วที่ความลึกทะลุผ่านจนถึง 40 mfp ที่พลังงานต่าง ๆ (ต่อ)



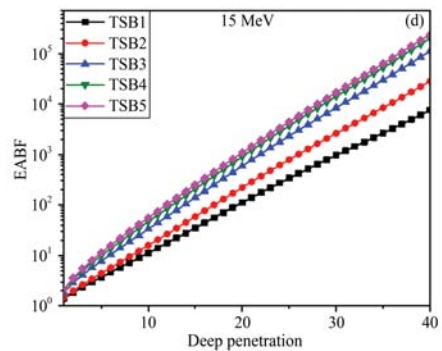
(ก) EABF ของตัวอย่างแก้วที่พลังงาน
0.015 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์



(ข) EABF ของตัวอย่างแก้วที่พลังงาน
0.15 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์



(ค) EABF ของตัวอย่างแก้วที่พลังงาน
1.5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์



(ง) EABF ของตัวอย่างแก้วที่พลังงาน
15 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

รูปที่ 6 EABF ของตัวอย่างแก้วที่ความลึกทะลุผ่านจนถึง 40 mfp ที่พลังงานต่าง ๆ

สรุป

ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของระบบแก้ว คือ $(70-x)\text{TeO}_2\text{-}30\text{SiO}_2\text{-}x\text{Bi}_2\text{O}_3$ โดย $x = 10, 20, 30, 40$ และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ ซึ่งถูกคำนวณผ่านโปรแกรม Phy-X/PSD ที่พลังงานโฟตอน $10^{-3} - 10^5$ เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ในขณะที่ค่า Exposure and Energy Absorption Buildup Factors (EBF และ EABF) ได้คำนวณโดยใช้ทฤษฎี Geometric Progression (G-P) Fitting ที่พลังงานตั้งแต่ 15 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ถึง 15 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ที่ความลึกทะลุผ่านจนถึง 40 (mfp) ผลที่ได้พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ Bi_2O_3 จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล ค่า EBF และ EABF มีเพิ่มขึ้น โดยแก้วตัวอย่างแก้ว คือ $20\text{TeO}_2\text{-}30\text{SiO}_2\text{-}50\text{Bi}_2\text{O}_3$ (TSB5) ซึ่งมีปริมาณ Bi_2O_3 และมีองค์ประกอบของธาตุที่มีเลขอะตอมเทียบเท่าสูงสุดนั้นมีสมบัติการก่้างโฟตอนดีที่สุดที่สุดในบรรดตัวอย่างแก้วที่ศึกษาในครั้งนี้

กิตติกรรมประกาศ

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

References

- [1] Issa, S. A. M., Rashad, M., Zakaly, H. M. H., Tekin, H. O., and Abouhaswa, A. S. (2020). $\text{Nb}_2\text{O}_5\text{-Li}_2\text{O-Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ Novel Glassy System: Evaluation of Optical, Mechanical, and Gamma Shielding Parameters. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**. Vol. 31, No. 24, pp. 1-18. DOI: 10.1007/s10854-020-04707-7
- [2] Prakash, G. V., Rao, D. N., and Bhatnagar, A. K. (2001). Linear Optical Properties of Niobium-based Tellurite Glasses. **Solid State Communications**. Vol. 119, Issue 1, pp. 39-44. DOI: 10.1016/S0038-1098(01)00195-8
- [3] Al-Hadeethi, Y. and Sayyed, M. I. (2020). A Comprehensive Study on the Effect of TeO_2 on the Radiation Shielding Properties of $\text{TeO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Bi}_2\text{O}_3\text{-LiF-SrCl}_2$ Glass System Using Phy-X/PSD Software. **Ceramics International**. Vol. 46, Issue 5, pp. 6136-6140. DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.11.078
- [4] Limkitjaroenporn, P., Kaewkhao, J., Limsuwan, P., and Chewpraditkul, W. (2011). Physical, Optical, Structural and Gamma-Ray Shielding Properties of Lead Sodium Borate Glasses. **Journal of Physics and Chemistry of Solids**. Vol. 72, Issue 4, pp. 245-251. DOI: 10.1016/j.jpcs.2011.01.007
- [5] Kirdsiri, K., Kaewkhao, J., Chanthima, N., and Limsuwan, P. (2011). Comparative Study of Silicate Glasses Containing Bi_2O_3 , PbO and BaO : Radiation Shielding and Optical Properties. **Annals of Nuclear Energy**. Vol. 38, Issue 6, pp. 1438-1441

- [6] Kaewjang, S., Maghanemi, U., Kothan, S., Kim, H. K., Limkitjaroenporn, P., and Kaewkhao, J. (2015). New Gadolinium Based Glasses for Gamma-Rays Shielding Materials. **Nuclear Engineering and Design**. Vol. 280, pp. 21-26. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2014.08.030
- [7] Chanthima, N., Kaewkhao, J., Limkitjaroenporn, P., Tuscharoen, T., Kothan, S., Tungjai, M., Kaewjaeng, S., Sarachai, S., and Limsuwan, P. (2017). Development of BaO-ZnO-B₂O₃ Glasses as a Radiation Shielding Material. **Radiation Physics and Chemistry**. Vol. 137, pp. 72-77. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2016.03.015
- [8] Kaewjaeng, S., Kothan, S., Chaiphaksa, W., Chanthima, N., Rajaramakrishna, R., Kim, H. J., and Kaewkhao, J. (2019). High Transparency La₂O₃-CaO-B₂O₃-SiO₂ Glass for Diagnosis X-Rays Shielding Material Application. **Radiation Physics and Chemistry**. Vol. 160, pp. 41-47. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2019.03.018
- [9] Boonin, K., Yasaka, P., Limkitjaroenporn, P., Rajaramakrishna, R., Askin, A., Sayyed, M. I., Kothan, S., and Kaewkhao, J. (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
- [10] Cheewasukhanont, W., Limkitjaroenporn, P., Kothan, S., Kedkaew, C., and Kaewkhao, J. (2020). The Effect of Particle Size on Radiation Shielding Properties for Bismuth Borosilicate Glass. **Radiation Physics and Chemistry**. Vol. 172, p. 108791. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2020.108791
- [11] Donga, 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. 12-16. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2017.04.018
- [12] Singh, V. P., Badiger, N. M., Chanthima, N., and Kaewkhao, J. (2014). Evaluation of Gamma-ray Exposure Buildup Factors and Neutron Shielding for Bismuth Borosilicate Glasses. **Radiation Physics and Chemistry**. Vol. 98, pp. 14-21
- [13] Kaewjaeng, S., Kothan, S., Chaiphaksa, W., Chanthima, N., Rajaramakrishna, R., Kim, H. J., and Kaewkhao, J. (2019). High Transparency La₂O₃-CaO-B₂O₃-SiO₂ Glass for Diagnosis X-Rays Shielding Material Application. **Radiation Physics and Chemistry**. Vol. 160, pp. 41-47. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2019.03.018
- [14] Kaewjaeng, S., Jumpee, C., Kothan, S., Kaewkhao, J., Srisittipokakun, N., and Kim, H. J. (2019). White Emission from NaO-BaO-Bi₂O₃-SiO₂ Glass System Doped with Dy³⁺. **Materials Today: Proceedings**. Vol. 17, pp. 1774-1779
- [15] 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

- [16] Saddeek, Y. B., Issa, S. A. M., Guclu, E. E. A., Kilicoglu, O., Susoy, G., and Tekin, H. O. (2020). Alkaline Phosphate Glasses and Synergistic Impact of Germanium Oxide (GeO_2) Additive: Mechanical and Nuclear Radiation Shielding Behaviors. **Ceramics International**. Vol. 46, Issue 10, Part B, pp. 16781-16797. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.03.254
- [17] Şakar, E. (2020). Determination of Photon-Shielding Features and Build-Up Factors of Nickel-Silver Alloys. **Radiation Physics and Chemistry**. Vol. 172, p. 108778. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2020.108778
- [18] 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
- [19] Sriwongsa, K., Chaphoaton, S., Pramto, P., Kaweeekijnara, M., and Glumglomchit, P. (2021). 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. **RMUTI JOURNAL Science and Technology**. Vol. 14, No. 2, pp. 1-13
- [20] 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
- [21] Oto, B., Yıldız, N., Korkut, T., and Kavaz, E. (2015). Neutron Shielding Qualities and Gamma Ray Buildup Factors of Concretes Containing Limonite Ore. **Nuclear Engineering and Design**. Vol. 293, pp. 166-175. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2015.07.060
- [22] Sayyed, M. i. and Elhouichet, H. (2017). Variation of Energy Absorption and Exposure Buildup Factors with Incident Photon Energy and Penetration Depth for Boro-Tellurite ($\text{B}_2\text{O}_3\text{-TeO}_2$) Glasses. **Radiation Physics and Chemistry**. Vol. 130, pp. 335-342. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2016.09.019
- [23] Hanfi, M. Y., Sayyed, M. I., Lacomme, E., Mahmoud, K. A., and Akkurt, I. (2021). The Influence of MgO on the Radiation Protection and Mechanical Properties of Tellurite Glasses. **Nuclear Engineering and Technology**. Vol. 53, Issue 6, pp. 2000-2010. DOI: 10.1016/j.net.2020.12.012
- [24] Rammah, Y. S., Olarinoye, I. O., El-Agawany, F. I., El-Adawy, A., Gamal, A., and El Sayed, Y. (2020). Elastic Moduli, Photon, Neutron, and Proton Shielding Parameters of Tellurite Bismo-Vanadate ($\text{TeO}_2\text{-V}_2\text{O}_5\text{-Bi}_2\text{O}_3$) Semiconductor Glasses. **Ceramics International**. Vol. 46, Issue 16, Part A, pp. 25440-25452. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.07.014
- [25] Al-Buriahi, M. S., Sayyed, M. I., and Al-Hadeethi, Y. (2020). Role of TeO_2 in Radiation Shielding Characteristics of Calcium Boro-Tellurite Glasses. **Ceramics International**. Vol. 46, Issue 9, pp. 13622-13629. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.02.148