

การศึกษาค่า Buildup factor ของรังสีแกมมาในระบบแก้วซิลิเกตที่เจือด้วยบิสมัทออกไซด์ แบบเรียบมออกไซด์และตะกั่วออกไซด์ ระหว่างช่วงพลังงาน 0.015 ถึง 15 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

โดยใช้โปรแกรม Phy-X

ศุภกิตต์ ยลพันธ์^{1,2}, จักรพงษ์ แก้วขาว^{1,2} และ พศุฒิพล ลิ้มกิจเจริญภรณ์^{1,2*}

¹ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม, นครปฐม

²ศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางแก้วและวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม, นครปฐม

*ผู้รับผิดชอบบทความ: golfpo@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาพารามิเตอร์ทางรังสีได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล และค่า Buildup factor ในระบบแก้ว ซิลิเกตเจือด้วยบิสมัทออกไซด์ แบบเรียบมออกไซด์ และตะกั่วออกไซด์จากสูตร $20R_mO_n: 80SiO_2$ (เมื่อ R_mO_n คือ Bi_2O_3 , BaO และ PbO) โดยคำนวณจากโปรแกรม Phy-X ระหว่างช่วงพลังงาน 0.015 ถึง 15 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ผลการคำนวณพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของบิสมัทออกไซด์มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือตะกั่วออกไซด์ และบิสมัทออกไซด์ ในส่วนของค่า buildup factors ค่า EBF และ EABF ของแก้วทั้ง 3 ชนิดมีค่าต่ำ ในช่วงพลังงาน 0.15 ถึง 1 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ และสำหรับในช่วงพลังงานมากกว่า 2 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ พบว่าเป็นช่วงพลังงานที่เกิดอันตรกิริยาแบบโฟโตอิเล็กทริก (photoelectric effect) และแฟร์ไอโพรดักชัน (pair production) เป็นอันตรกิริยาหลัก ตามลำดับ ในขณะที่ช่วงพลังงาน 0.1 ถึง 2 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ค่า exposure buildup factors (EBF) และ energy absorption buildup factor (EABF) ของแก้วมีแนวโน้มสูงมากขึ้น เนื่องจากมีการเกิดอันตรกิริยาการกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton scattering) และผลจากการเปรียบเทียบการเกิดอันตรกิริยาต่างๆของแก้วทั้ง 3 ชนิด พบว่า แก้วที่มีการเกิดอันตรกิริยามากที่สุดคือแก้วซิลิเกตที่เจือด้วยบิสมัทออกไซด์ รองลงมาคือตะกั่วออกไซด์ และต่ำที่สุดคือแบบเรียบมออกไซด์

คำสำคัญ: พารามิเตอร์ทางรังสี, แก้วซิลิเกต, ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล, โปรแกรม Phy-X

The Study of Buildup Factor in the Silicate Glass System Doped with Bismuth Oxide, Barium Oxide and Lead Oxide in Energy Range from 0.015 to 15 MeV using the Phy-X Program

Supakit Yonphan^{1,2}, Jakrapong Kaewkhao^{1,2} and Pruittipol Limkitjaroenporn^{1,2*}

¹Physics program, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University, Nakhon Pathom 73000, Thailand

²Center of Excellence in Glass Technology and Materials Science (CEGM), Nakhon Pathom Rajabhat University, Nakhon Pathom, 73000, Thailand

*corresponding author: golfpo@hotmail.com

Abstract

In this research, the mass attenuation coefficients and buildup factor had been investigated in the silicate glass system doped with bismuth oxide barium oxide and lead oxide in compositions of $20R_mO_n: 80SiO_2$ (where R_mO_n are Bi_2O_3 , BaO , and PbO) were computed by the Phy-X program in the energy range 0.015 to 15 MeV. From calculated results, the mass attenuation coefficients value of glasses doped with bismuth oxide was higher than barium oxide and lead oxide. The buildup factor of all glasses shows the low value of EBF and EABF at the energy range 0.15 to 1 MeV and beyond 2 MeV, was found that the photoelectric effect and pair production is a major interaction. While, the EBF and EABF values were higher at energy range 0.1 to 2 MeV, due to the Compton scattering effect is a major interaction. As a result of comparing the interaction of the three types of glass, it was found that the glass with the most interaction was bismuth oxide-doped silicate glass. Followed by the lead oxide, and the lowest is barium oxide.

Keywords: radiation parameters, silicate glass, mass attenuation coefficients, the Phy-X Program

1. บทนำ

วัสดุแก้วเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับใช้ในงานบางประเภทเนื่องจากมีคุณสมบัติที่โปร่งแสง ดังนั้นจึงถูกเลือกนำมาใช้สำหรับเป็นวัสดุในการกำบังรังสีในงานด้านต่างๆ เช่น คลินิกทันตกรรม ห้องปฏิบัติการรังสี หรือแม้กระทั่ง ในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ ซึ่งได้รับความสนใจจากนักวิจัย (Esra Kavaz et al., 2018) ในการกำบังรังสีจำเป็นต้องให้รังสีนั้นเกิดอันตรกิริยากับวัสดุนั้นๆ ให้ได้มากที่สุด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาเกี่ยวกับอันตรกิริยาระหว่างรังสีกับสสารต่างๆ เพื่อเพิ่มความสามารถในการกำบังรังสี (N. Singh et al., 2006)

การศึกษาค่า Buildup factor เป็นค่าที่แสดงถึงอัตราส่วนระหว่างรังสีทั้งหมดที่เข้าสู่หัววัดซึ่งเป็นปริมาณรังสีจริงที่ใช้ในการประยุกต์วัสดุกำบังรังสีในด้านต่างๆ กับรังสีที่เป็นลำรังสีซึ่งเกิดจากการ collimate เข้าสู่หัววัดรังสีซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ (K. Singh et al., 2013) โดยค่า buildup factor มี 2 ชนิด คือ energy absorption buildup factor (EABF) และ exposure buildup factor (EBF) โดย EABF คือค่า buildup factor ที่เกิดจากการสูญเสียพลังงานของรังสีในเนื้อของวัสดุ และ EBF เป็นค่า buildup factor ในอากาศหลังจากการถูกกำบังด้วยวัสดุกำบังรังสี (Esra Kavaz et al., 2018)

งานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาแก้วจากสูตร $20R_mO_n: 80SiO_2$ (เมื่อ R_mO_n คือ Bi_2O_3 , BaO , และ PbO) โดยคำนวณจากโปรแกรม Phy-X ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ที่สามารถคำนวณสมบัติการกำบังรังสีของธาตุ สารประกอบ หรือสารผสมๆ ได้ (Y. Al-Hadeethi, et al, 2020) ค่า Buildup factor ของแก้วตัวอย่างได้ถูกศึกษาในระหว่างช่วงพลังงาน 0.015 ถึง 15 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ผลที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับวัสดุในการกำบังรังสีต่อไป

2. ทฤษฎี

2.1 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล

ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของธาตุ สารประกอบ หรือสารผสมสามารถหาได้โดยใช้โปรแกรม Phy-X ช่วยในการคำนวณ โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ (Kirdsiri et al., 2012; Limkitjaroenporn et al., 2012)

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

เมื่อ W_i คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของธาตุหรือสารประกอบ และ $(\mu_m)_i$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของธาตุแต่ละชนิด

2.2 ทฤษฎี Buildup Factor

การดูดกลืนรังสีของวัสดุมีปรากฏการณ์หลักคือ โฟโตอิเล็กทริก (photoelectric) การกระเจิงคอมป์ตัน (Compton scattering) และ แพร่โพรงตัน (pair production) ซึ่งส่งผลทำให้รังสีลดลงเมื่อผ่านเข้าไปในเนื้อของวัสดุหรือสสาร เมื่อรังสีเคลื่อนที่ผ่านไปยังเนื้อของสสาร รังสีจะสามารถเคลื่อนผ่านได้หลายลักษณะ คือ พุ่งผ่านไปยังเนื้อของสสารแล้วเข้าสู่หัววัดรังสีซินทิลเลชันโดยตรง หรือรังสีอาจจะเกิดการกระเจิงจากสภาพแวดล้อมภายนอก ซึ่งส่งผลให้ค่าทางการทดลองนั้นมีความคลาดเคลื่อน จึงจำเป็นต้องใช้ค่า Buildup Factor ซึ่งช่วยแก้ไขข้อผิดพลาดได้

โดยเริ่มจากการคำนวณหาค่า equivalent atomic number (Z_{eq}) ซึ่งเป็นค่าที่อธิบายถึงอัตราส่วนของการกระเจิงคอมป์ตันเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลโดยสามารถคำนวณได้จากสมการ

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

เมื่อ Z_1 และ Z_2 คือ จำนวนอะตอมของธาตุ ซึ่งสอดคล้องกับอัตราส่วนของ R_1 และ R_2 ตามลำดับ และ R คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของการกระเจิงคอมป์ตันต่อค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลทั้งหมด (M.I. Sayyed et al., 2017) และค่า Z_{eq} ถูกนำมาคำนวณโดยใช้วิธี G-P fitting parameter ในช่วงพลังงาน 0.015 ถึง 15 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ดังสมการ

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

นอกจากนี้หาค่า EBF และ EAEF ได้โดยใช้พารามิเตอร์ (b, c, a, Xk, and d) ซึ่งได้จากโปรแกรม Phy-X (Erdem Şakar et al., 2020)

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

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

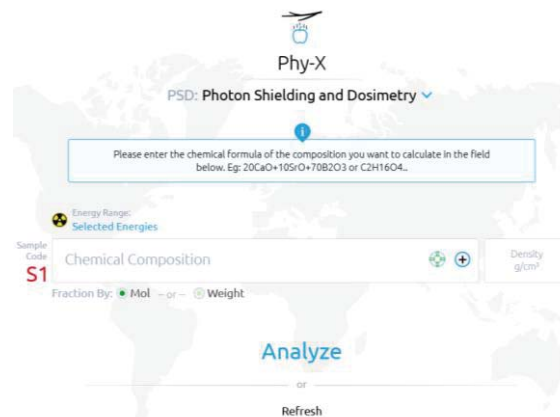
$$K(E, x) = cx^a + d \frac{\tanh(\frac{x}{x_k}) - \tanh(-2)}{1 - \tanh(-2)}, x \leq 40mfp \quad (6)$$

โปรแกรม phy-x เป็นซอฟต์แวร์ที่สามารถคำนวณสมบัติการกำบังรังสีของธาตุ สารประกอบ หรือสารผสมต่างๆ โดยมีวิธีการใช้งานดังนี้

ขั้นตอนแรก เข้าไปที่เว็บไซต์ <https://phy-x.net/> เพื่อเริ่มการใช้งาน จากนั้นนำสูตรทางเคมีของแก้วที่ต้องการวิเคราะห์กรอกลงในช่อง Chemical Composition

จากนั้น กดที่ปุ่ม Analyze เพื่อเป็นการเริ่มกระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลของตัวโปรแกรม

เมื่อโปรแกรมสิ้นสุดการวิเคราะห์ข้อมูล โปรแกรมจะทำการนำเสนอข้อมูลออกมาในรูปแบบของไฟล์ excel และสามารถนำผลที่ได้มาสรุปและใช้สำหรับงานวิจัยในขั้นต่อไป

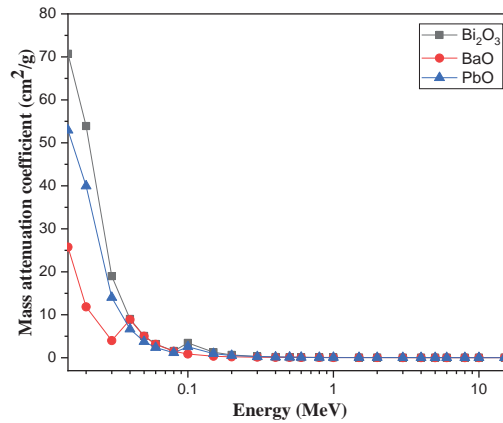


รูปภาพที่ 1 โปรแกรม Phy-x (Y. Al-Hadeethi, et al, 2020)

3. ผลการวิจัย

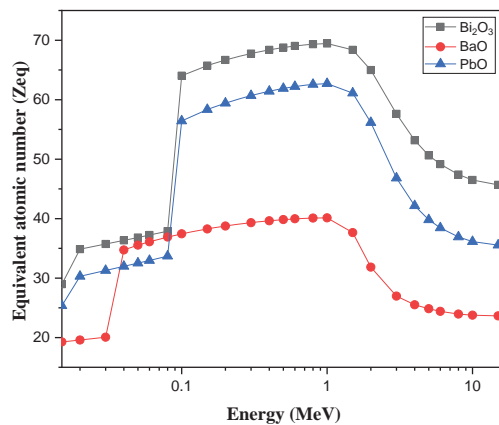
จากผลการศึกษาพารามิเตอร์ทางรังสีในระบบแก้วซิลิเกตเจือด้วยบิสมีทออกไซด์ แบเรียมออกไซด์และตะกั่วออกไซด์จากสูตร $20R_mO_n \cdot 80SiO_2$ (เมื่อ R_mO_n คือ Bi_2O_3 , BaO , และ PbO) โดยการคำนวณจากโปรแกรม Phy-X ระหว่างช่วงพลังงาน 0.015 ถึง 15 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

ในรูปภาพที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลระหว่างบิสมีทออกไซด์ แบเรียมออกไซด์และตะกั่วออกไซด์ ซึ่งสามารถบอกถึงความน่าจะเป็นของโอกาสการเกิดอันตรายกัมมันตรังสีในวัสดุ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของแก้วที่เติมบิสมีทออกไซด์จะมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ ตะกั่วออกไซด์ และแบเรียมออกไซด์ ตามลำดับ ซึ่งเกิดจากมวลโมเลกุลของบิสมีทออกไซด์มีค่ามากที่สุด เมื่อเติมในระบบแก้วซิลิเกตจึงส่งผลให้มีโอกาสที่จะเกิดอันตรายกัมมันตรังสีมากที่สุดและทำให้แก้วตัวอย่างมีคุณสมบัติการป้องกันรังสีที่สูงมากขึ้นด้วย



รูปภาพที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของแก้วซีลีเกตที่เจือด้วยบิสมัทออกไซด์ แบเรียมออกไซด์และตะกั่วออกไซด์

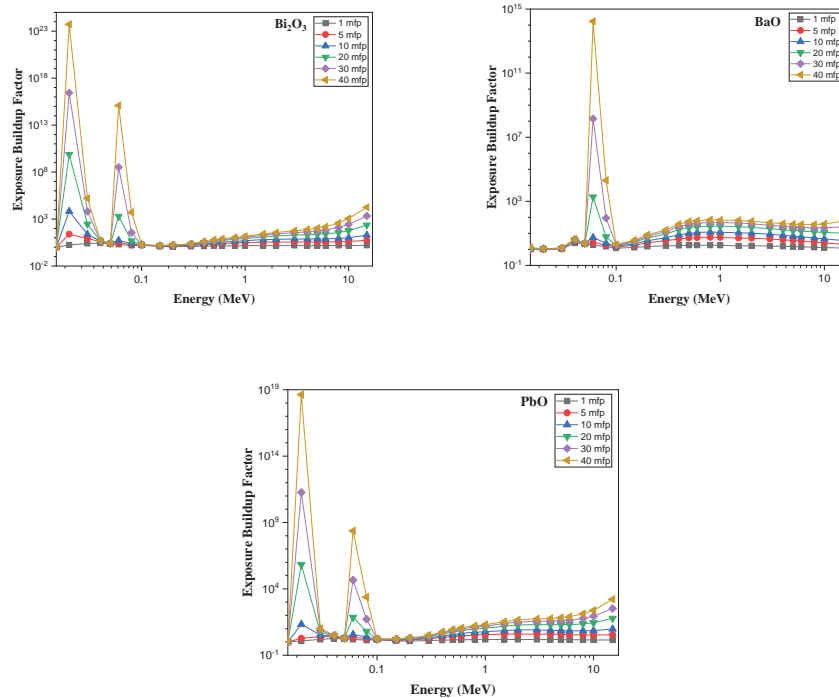
ในรูปภาพที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบค่า equivalent atomic number (Z_{eq}) ของแก้วซีลีเกตที่เจือด้วยบิสมัทออกไซด์ แบเรียมออกไซด์และตะกั่วออกไซด์ ซึ่งพบว่า ในช่วงพลังงาน 0.1 ถึง 2 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ค่า Z_{eq} ของแก้วที่เติมด้วยบิสมัทออกไซด์และตะกั่วออกไซด์มีค่าสูง และสำหรับแก้วที่เติมด้วยแบเรียมออกไซด์พบว่ามีค่าสูงในช่วงพลังงาน 0.04 ถึง 2 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ เนื่องจากเกิดอันตรกิริยาการกระเจิงแบบคอมป์ตันสูงในช่วงพลังงานนี้ (Y.S. Rammah et al., 2013) และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกันพบว่าค่า Z_{eq} ของแก้วที่เติมด้วยบิสมัทออกไซด์มีค่าสูงที่สุด เนื่องมาจากการเกิดอันตรกิริยาของแก้วที่เติมบิสมัทออกไซด์มีค่าสูงที่สุดสอดคล้องกับผลของค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล



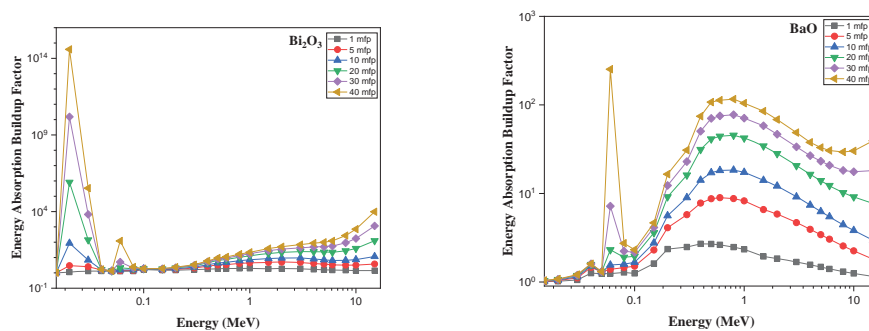
รูปภาพที่ 3 ค่า equivalent atomic number ของแก้วซีลีเกตที่เจือด้วยบิสมัทออกไซด์ แบเรียมออกไซด์และตะกั่วออกไซด์

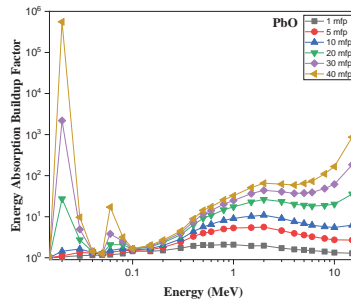
ในรูปที่ 4 และ 5 แสดงค่า exposure buildup factors (EBF) และ energy absorption buildup factor (EABF) ของแก้วซีลีเกตที่เจือด้วยบิสมัทออกไซด์ แบเรียมออกไซด์และตะกั่วออกไซด์ พบว่า ในช่วงพลังงาน 0.15 ถึง 1 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ค่า EBF และ EABF ของแก้วทั้ง 3 ชนิดมีค่าน้อย ผลเนื่องมาจากการเกิดอันตรกิริยาแบบโฟโตอิเล็กทริก (photoelectric effect) ซึ่งเป็นอันตรกิริยาหลัก เช่นเดียวกับในช่วงพลังงานมากกว่า 2 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ พบว่าค่า EBF และ EABF ของแก้วชนิดมีค่า

น้อยเช่นกัน ซึ่งเป็นช่วงพลังงานที่อันตรกิริยาแพร์โปรดักชัน (pair production) เป็นอันตรกิริยาหลัก โดยสาเหตุที่ส่งผลให้ค่า EBF และ EABF มีค่าน้อยลงนั้น เป็นผลมาจากการดูดกลืนรังสีได้อย่างสมบูรณ์ สำหรับในช่วงพลังงาน 0.1 ถึง 2 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ค่า EBF และ EABF ของแก้วจะมีแนวโน้มสูงมากขึ้นเนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาการกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton scattering) สูงในช่วงพลังงานนี้ ซึ่งทำให้เกิดการกระจายตัวของโฟตอนส่งผลให้มีการดูดซึมโฟตอนที่ไม่สมบูรณ์แต่ก็ยังช่วยลดความเข้มของโฟตอน ส่งผลให้ค่า EBF และ EABF มีค่าสูงตามไปด้วย และในช่วงพลังงาน 0.08 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ จะเห็นว่าแนวโน้มของค่า EBF และ EABF มีค่าสูงมาก ซึ่งพบว่าเกิดจากขอบการดูดกลืนรังสีเอกซ์ซึ่งสอดคล้องกับขอบการดูดกลืนรังสีเอกซ์ของอิเล็กตรอนในชั้น K ของธาตุบิสมัท แบเรียมและตะกั่ว ตามลำดับ (M.I. Sayyed *et al.*, 2017)



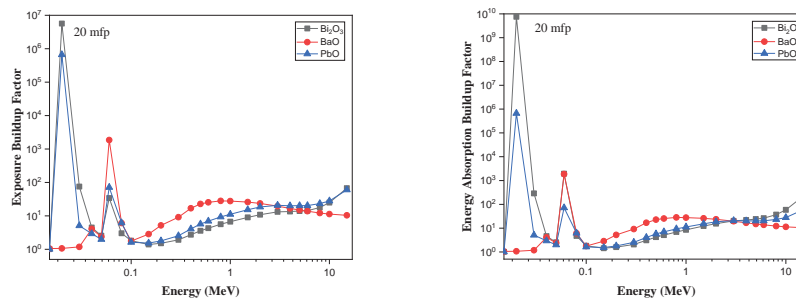
รูปภาพที่ 4 ค่า exposure buildup factors ของแก้วซิลิเกตที่เจือด้วยบิสมัทออกไซด์ แบเรียมออกไซด์และตะกั่วออกไซด์ ในช่วง 1-40 mfp





รูปภาพที่ 5 energy absorption buildup factor ของแก้วซิลิเกตที่เจือด้วยบิสมัทออกไซด์ แบเรียมออกไซด์และตะกั่วออกไซด์ ในช่วง 1-40 mfp

ในรูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบค่า EBF และ EABF ของแก้วซิลิเกตที่เจือด้วยบิสมัทออกไซด์ แบเรียมออกไซด์และตะกั่วออกไซด์ พบว่าค่าทั้ง 2 ค่า มีค่าลดลงเมื่อพลังงานเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากผลของการกระเจิงของรังสี ซึ่งสอดคล้องกับผลของการกระเจิงแบบคอมป์ตันซึ่งเป็นอันตรกิริยาหลัก และจากการสังเกตแนวโน้มของการเกิดอันตรกิริยาซึ่งส่งผลถึงความสามารถในการกำบังรังสีของแก้วทั้ง 3 ชนิด พบว่าแก้วซิลิเกตที่เจือด้วยบิสมัทออกไซด์มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือตะกั่วออกไซด์ ตามลำดับ



รูปภาพที่ 6 เปรียบเทียบค่า EBF และ EABF ของแก้วซิลิเกตที่เจือด้วยบิสมัทออกไซด์ แบเรียมออกไซด์และตะกั่วออกไซด์ ในช่วง 20 mfp

4. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาพารามิเตอร์ทางรังสีในระบบแก้วซิลิเกตเจือด้วยบิสมัทออกไซด์ แบเรียมออกไซด์และตะกั่วออกไซด์ โดยการคำนวณจากโปรแกรม Phy-X ระหว่างช่วงพลังงาน 0.015 ถึง 15 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ผลจากการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของแก้วทั้ง 3 ชนิด พบว่า แก้วซิลิเกตเจือด้วยบิสมัทออกไซด์มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือตะกั่วออกไซด์ และบิสมัทออกไซด์ ตามลำดับ ในส่วนของค่า buildup factors ค่า EBF และ EABF ของแก้วทั้ง 3 ชนิดมีค่าต่ำ ในช่วงพลังงาน 0.15 ถึง 1 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ เช่นเดียวกับในช่วงพลังงานมากกว่า 2 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ พบว่า ค่า EBF และ EABF ของแก้วชนิดมีค่าต่ำเช่นกัน ซึ่งเป็นช่วงพลังงานที่อันตรกิริยาแบบโฟโตอิเล็กทริก (photoelectric effect) และแพร์โปรดักชัน (pair production) เป็นอันตรกิริยาหลัก ตามลำดับ ในขณะที่ช่วงพลังงาน 0.1 ถึง 2 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ค่า EBF และ EABF ของแก้วจะมีแนวโน้มสูงมากขึ้นเนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาการกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton scattering) สูงในช่วงพลังงานนี้ และในช่วงพลังงาน 0.08 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ จะเห็นว่าแนวโน้มของค่า EBF และ EABF มีค่าสูงมาก ซึ่งพบว่าเกิดจากขบวนการดูดกลืนรังสีเอกซ์ซึ่งสอดคล้องกับขบวนการดูดกลืนรังสีเอกซ์ของอิเล็กตรอนในชั้น K ของธาตุบิสมัท แบเรียมและตะกั่ว ตามลำดับ และจากการ

เปรียบเทียบค่า EBF และ EABF ของแก้วของแก้วทั้ง 3 ชนิด พบว่าอัตราการเกิดอันตรกิริยาของแก้วซิลิเกตที่เจือด้วยบิสมัท ออกไซด์พบว่ามีค่ามากที่สุด รองลงมาคือตะกั่วออกไซด์ ตามลำดับ ดังนั้นจากการศึกษาพารามิเตอร์ทางรังสีต่างๆ จึงสามารถสรุปได้ว่า แก้วซิลิเกตที่เจือด้วยบิสมัทออกไซด์มีความสามารถในการกำบังรังสีได้ดีที่สุดรองลงมาคือ แบเรียมออกไซด์และตะกั่วออกไซด์ ตามลำดับ

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีแก้วและวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครปฐม และงานวิจัยนี้ ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ภายใต้โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ระดับปริญญาเอก (NRCT5-RR163015-P19)

6. เอกสารอ้างอิง

- Erdem Şakar, Özgür Fırat Özpolat, Bünyamin Alım, M.I. Sayyed, Murat Kurudirek. (2020). **Phy-X / PSD: Development of a user friendly online software for calculation of parameters relevant to radiation shielding and dosimetry.** Radiation Physics and Chemistry Volume 166, 108496
- Esra Kavaz, Nergiz Yıldız Yorgun. (2018). **Gamma ray buildup factors of lithium borate glasses doped with minerals.** Journal of Alloys and Compounds. Journal of Alloys and Compounds 752, 61-67
- Kirdsiri, K., Kaewkhao, J. & Limsuwan, P. (2012). **Photon interaction in borate glass doped with Bi₂O₃ at different energies.** Procedia Engineering, 32, 727-733.
- Limkitjaroenporn P., Kaewkhao J., Chewpraditkul W., & Limsuwan, P. (2012). **Mass attenuation coefficient and effective atomic number of Ag/Cu/Zn alloy at different photon energy by compton scattering technique.** Procedia Engineering. 32, 847-854
- M.I.Sayyed, H.Elhouichet. (2017). **Variation of energy absorption and exposure buildup factors with incident photon energy and penetration depth for boro-tellurite (B₂O₃-TeO₂) glasses.** Radiation Physics and Chemistry. Volume 130, Pages 335-342
- N. Chanthima, J. Kaewkhao. (2013). **Investigation on radiation shielding parameters of bismuth borosilicate glass from 1 keV to 100 GeV.** Annals of Nuclear Energy, volume 55, Pages 23-28
- N. Singh, K. Singh, and H. Singh. (2006). **Gamma-ray attenuation studies of PbO-BaO-B₂O₃ glass system.** Rad. Meas. Vol. 41. pp. 84-88.
- Y. Al-Hadeethi, M.I. Sayyed. 2020. **A comprehensive study on the effect of TeO₂ on the radiation shielding properties of TeO₂-B₂O₃-Bi₂O₃-LiF-SrCl₂ glass system using Phy-X / PSD software.** Ceramics International Volume 46, Issue 5, Pages 6136-6140
- Y.S. Rammah, K.A. Mahmoud, M.I. Sayyed, F.I. El-Agawany, R.El-Mallawany. (2020). **Novel vanadyl lead phosphate glasses: P₂O₅-PbO-ZnO single bond Na₂O-V₂O₅: Synthesis, optical, physical and gamma photon attenuation properties,** Journal of Non-Crystalline Solids, volume 534, 119944