

การศึกษาอันตรกิริยารังสีแกมมาของแก้วเกลือแกโดลิเนียมบอเรตระหว่างช่วงพลังงาน

0.015 ถึง 15 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ โดยใช้โปรแกรม Phy-X

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

¹ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม, นครปฐม

²ศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางแก้วและวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม, นครปฐม

*ผู้รับผิดชอบบทความ: mink110@hotmail.com

บทคัดย่อ

การศึกษาอันตรกิริยารังสีแกมมาของแก้วเกลือแกโดลิเนียมบอเรต จากสูตร $(72.5-x)B_2O_3 : xGa_2O_3 : 27.5Gd_2O_3$ (เมื่อ $x = 5, 10, 15, 20$ และ 25 เปอร์เซ็นต์โดยโมล) โดยคำนวณจากโปรแกรม Phy-X ระหว่างช่วงพลังงาน 0.015 ถึง 15 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ผลการคำนวณพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล ค่าเลขอะตอมยังผลและค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนยังผลมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงพลังงาน 0.015 ถึง 0.2 เมกะอิเล็กตรอน และพบขอบการดูดกลืนรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 0.06 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ในช่วงพลังงาน 0.2 ถึง 2 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ มีแนวโน้มลดลงโดยมีอันตรกิริยาการกระเจิงแบบอินโคฮีเรนต์ (incoherent scattering) เป็นอันตรกิริยาหลัก และมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อพลังงานมากกว่า 2 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลมีค่าใกล้เคียงกันสำหรับทุกความเข้มข้นของเกลือออกไซด์ ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนยังผลมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของเกลือออกไซด์เพิ่มขึ้น และค่าเลขอะตอมยังผลมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของเกลือออกไซด์เพิ่มขึ้นที่พลังงาน 0.015 ถึง 0.2 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเกลือออกไซด์เพิ่มขึ้นที่พลังงาน มากกว่า 0.2 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการกำบังรังสีของแก้วเกลือแกโดลิเนียมบอเรตซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นวัสดุกำบังรังสีแกมมาได้

คำสำคัญ: ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล, เลขอะตอมยังผล, ความหนาแน่นอิเล็กตรอนยังผล, โปรแกรม Phy-X

The Gamma-Ray Interaction Study of Gallium Gadolinium Borate Glass in Energy Range from 0.015 to 15 MeV using the Phy-X Program

Supakit Yonphan^{1,2}, Pruittipol Limkitjaroenporn^{1,2} and Jakrapong Kaewkhao^{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: mink110@hotmail.com

Abstract

The gamma-ray interaction study of gallium gadolinium borate glass in the compositions of $(72.5-x)\text{B}_2\text{O}_3 : x\text{Ga}_2\text{O}_3 : 27.5\text{Gd}_2\text{O}_3$ (where x is 0, 5, 10, 15, and 20 mol%) were computed by the Phy-X program in the energy range 0.015 to 15 MeV. From the calculation result, the mass attenuation coefficients, effective atomic number and effective electron density show the same trend in this energy range. The results show the rapid decrease with gamma ray energy in energy range 0.015 to 0.2 MeV and the K absorption edge were appear at 0.06 MeV. In the energy range 0.2 to 2 MeV, the results were decrease with the incoherent scattering is the main interaction. The results show increasing with a little at energy beyond 2 MeV. The mass attenuation coefficients show the closely values when compared. The effective electron density values show the decrease with the increasing of Ga_2O_3 concentration in glass matrix. The effective atomic number were decrease with gallium oxide content in energy range 0.015 to 0.2 MeV and show the increase at energy higher than 0.2 MeV. These results reflected to the radiation shielding ability of the gallium gadolinium borate glass in radiation shielding applications.

Keywords: mass attenuation coefficient, effective atomic number, electron density, Phy-X Program

1. บทนำ

ในปัจจุบันสารกัมมันตรังสีถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย เช่น ทางด้านการเกษตร การแพทย์ อุตสาหกรรมรวมไปถึงการค้นคว้าทางวิทยาศาสตร์ ถึงแม้มนุษย์จะนำประโยชน์จากรังสีแกมมาใช้แต่หากไม่มีการป้องกันที่ดีก็อาจจะส่งผลให้เกิดอันตรายต่อชีวิตได้ ดังนั้นเราจึงต้องมีการคิดค้นหาวัสดุที่สามารถกักรังสีได้ (M.H.A. Mhare et al., 2020) จากงานวิจัยพบว่าวัสดุที่นำมาใช้ในการกักรังสีจะต้องมีค่าความหนาแน่นที่สูงเพราะจะส่งผลต่อคุณสมบัติการกักรังสีที่สูงขึ้นตามไปด้วย

โดยทั่วไป ตะกั่วเป็นวัสดุที่ใช้ในการกำบังรังสีด้วยคุณสมบัติที่เหมาะสม เช่น มีความหนาแน่นสูง ราคาไม่แพง และง่ายต่อการผลิต แต่ตะกั่วเป็นวัสดุที่มีความทึบแสง และยังเป็นวัสดุที่เป็นสารพิษจึงมีข้อจำกัดในการใช้งาน ทำให้ไม่เหมาะกับการใช้งานบางประเภท ดังนั้น การศึกษาวัสดุกำบังรังสีโดยไม่ใช้ตะกั่วจึงเพิ่มมากขึ้น (M. Bektasoglu et al., 2020) วัสดุแก้วเป็นอีกหนึ่งวัสดุที่น่าสนใจเนื่องจากมีคุณสมบัติที่เหมาะสมและมีข้อได้เปรียบกว่าวัสดุชนิดอื่น คือ มีความโปร่งแสง ง่ายต่อการผลิต และสามารถเพิ่มคุณสมบัติการกำบังรังสีโดยการเพิ่มสารที่มีความหนาแน่นสูงลงในองค์ประกอบแก้วได้ (N. Chanthima et al., 2013)

ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล ค่าเลขอะตอมยังผล และค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนยังผล เป็นปริมาณที่สำคัญในการศึกษาอันตรกิริยาของรังสีแกมมาต่อสสาร เนื่องจากปริมาณเหล่านี้สามารถนำไปใช้ในการแก้ปัญหาทางฟิสิกส์รังสีและเป็นที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในหลายๆ ด้าน (Singh, et al., 2008) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาอันตรกิริยาต่างๆ และเพื่อง่ายต่อการศึกษาในงานวิจัยนี้จึงได้เลือก โปรแกรม Phy-X มาใช้เพื่อคำนวณหาอันตรกิริยาต่างๆ โดยที่ โปรแกรม Phy-X เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานด้านวิทยาศาสตร์ การแพทย์ และวิศวกรรมวัสดุ เพราะซอฟต์แวร์ดังกล่าวสามารถใช้ตรวจสอบและรายงานผลข้อมูลของการดูดกลืนรังสีแกมมาในวัสดุต่างๆ ซึ่งนำมาสามารถคำนวณสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล และอันตรกิริยาย่อยต่างๆ ของธาตุ สารประกอบ หรือสารผสมได้ และสามารถใช้ได้ฟรีจากเว็บไซต์ <https://phy-x.net/> (Y. Al-Hadeethi, et al., 2020)

งานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาอันตรกิริยาระหว่างรังสีแกมมาของแก้วแคลเซียมแกลโดลิเนียมบอเรตจากสูตร $(72.5-x)B_2O_3 : xGa_2O_3 : 27.5Gd_2O_3$ เมื่อ $x = 5, 10, 15, 20$ และ 25 เปอร์เซ็นต์โดยโมล โดยคำนวณจากโปรแกรม Phy-X ระหว่างช่วงพลังงาน 0.015 ถึง 15 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ เพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล ค่าเลขอะตอมยังผล และค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนยังผล และนำผลที่ได้ไปประยุกต์ใช้เพื่อเตรียมเป็นวัสดุสำหรับพัฒนาวัสดุกำบังรังสีต่อไป

2. ทฤษฎี

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอันตรกิริยาระหว่างรังสีแกมมาของแก้วแคลเซียมแกลโดลิเนียมบอเรต โดยการคำนวณจากโปรแกรม Phy-X ซึ่งเป็นฐานข้อมูลที่สามารถคำนวณสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล และอันตรกิริยาย่อยต่างๆ ของธาตุ สารประกอบ หรือสารผสม เช่น การเกิดอันตรกิริยาโฟโตอิเล็กทริก อันตรกิริยากระเจิงแบบอินโคฮีเรนท์ อันตรกิริยากระเจิงแบบโคฮีเรนท์และอันตรกิริยาเพอร์โฟดักชัน เป็นต้น โดยสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลได้จากสมการที่ 1 (Kirdsiri et al., 2012; Limkitjaroenporn et al., 2012)

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad (1)$$

เมื่อ μ_m คือค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (cm^2/g) และ μ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (cm^{-1}) และ ρ คือ ความหนาแน่นของตัวกลาง (g/cm^3) ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของธาตุ สารประกอบหรือสารผสมได้ โดยใช้โปรแกรม Phy-X ช่วยในการคำนวณ โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2) (Kirdsiri et al., 2012; Limkitjaroenporn et al., 2012)

$$\mu_m = \sum W_i (\mu_m)_i \quad (2)$$

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

การคำนวณหาค่าเลขอะตอมยังผล ซึ่งมีนิยามคือ ค่าเฉลี่ยของเลขอะตอมในสสารที่เป็นสารประกอบหรือของผสม ซึ่งอาจมีค่าไม่คงที่ขึ้นกับอันตรกิริยาระหว่างโฟตอนจากรังสีตกกระทบของสสารนั้น นิยามจากสมการ

$$Z_{eff} = \frac{\delta_{t,a}}{\delta_{t,el}} \quad (3)$$

โดย $\delta_{t,a}$ คือ ภาคตัดขวางรวมของอันตรกิริยาทั้งหมดต่ออะตอมซึ่งมีสมการเป็น

$$\delta_{t,a} = \frac{\mu_m}{N_A \sum_i (w_i/A_i)} \quad (4)$$

และ $\delta_{t,el}$ คือ ภาคตัดขวางรวมของอันตรกิริยาทั้งหมดต่ออิเล็กตรอนซึ่งมีสมการเป็น

$$\delta_{t,el} = \frac{1}{N_A} \sum_i \frac{f_i A_i}{Z_i} (\mu_m)_i \quad (5)$$

เมื่อ N_A คือ เลขอะโวกาโดร มีค่าเท่ากับ 6.02×10^{23}

A_i คือ เลขมวลของธาตุแต่ละชนิดในสาร

Z_i คือ เลขอะตอมของธาตุแต่ละชนิดในสาร

f_i คือ อัตราส่วนของอะตอมของธาตุแต่ละชนิดในสารต่อมวล 1 กรัม กับจำนวนอะตอมทั้งหมดของสารต่อมวล 1 กรัม

การคำนวณค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนยังผล สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$N_e = \frac{\mu_m}{\delta_{t,el}} \quad (6)$$

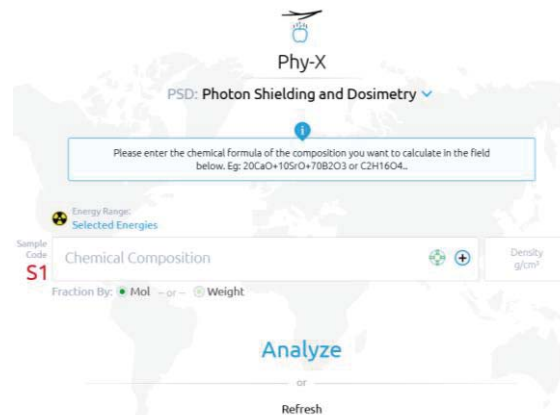
เมื่อ μ_m คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (cm^2/g) และ $\delta_{t,el}$ คือ ภาคตัดขวางรวมของอันตรกิริยาทั้งหมดต่ออิเล็กตรอน

ค่า Half Value Layer (HVL) หมายถึงค่าความหนาของโลหะหรือวัสดุที่นำมาบังลำรังสีเอกซ์แล้วทำให้ความเข้มรังสีลดลงเหลือครึ่งเดียวจากเดิม โดยสามารถหาได้จากสมการ (L. Shamshad et al et al., 2017)

$$HVL = \frac{0.693}{\mu} \quad (7)$$

โปรแกรม Phy-x ซอฟต์แวร์ดังกล่าวสามารถใช้ตรวจสอบและรายงานผลข้อมูลของการดูดกลืนรังสีแกมมาในวัสดุต่างๆ ซึ่งนำมาสามารถคำนวณสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล และอันตรกิริยาลดทอนต่างๆของธาตุ สารประกอบ หรือสารผสมได้ (Y. Al-Hadeethi, et al, 2020)

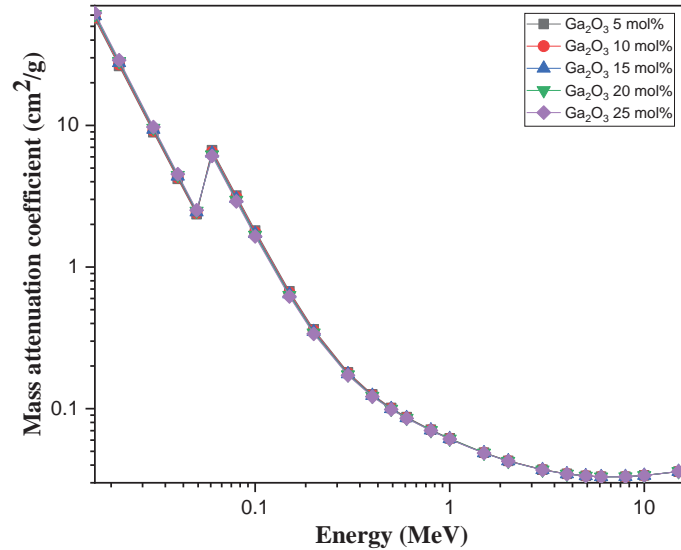
วิธีการใช้งาน เริ่มจากเข้าไปที่เว็บไซต์ <https://phy-x.net/> จากนั้นกรอกสูตรทางเคมีของสารที่ต้องการตรวจสอบ ดังเช่นในงานวิจัยนี้คือ $(72.5-x)\text{B}_2\text{O}_3 : x\text{Ga}_2\text{O}_3 : 27.5\text{Gd}_2\text{O}_3$ จากนั้น สามารถเริ่มกระบวนการคำนวณได้โดยกดที่ปุ่ม Analyze และเมื่อโปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูลเสร็จเรียบร้อยแล้ว โปรแกรมจะนำเสนอข้อมูลออกมาในรูปแบบของไฟล์ Excel และนำข้อมูลที่ได้ไปเพื่อวิเคราะห์และใช้สรุปผลในขั้นต่อไป



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

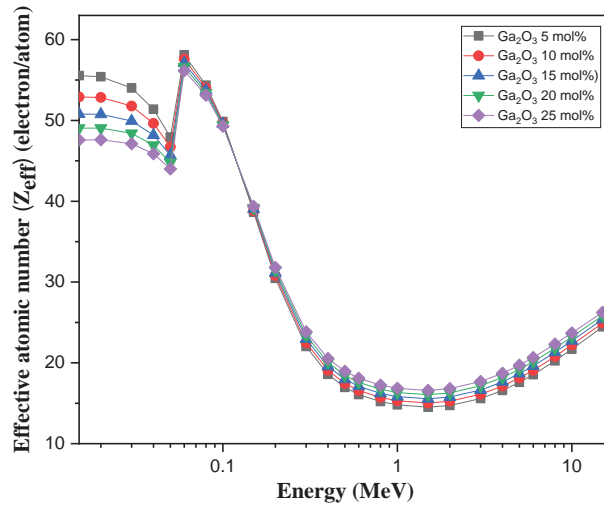
3. ผลการวิจัย

จากการศึกษาอันตรกิริยาระหว่างรังสีแกมมาของแก้วเกลือแกงแกลเลียมแกโดลิเนียมบอเรตสูตร $(72.5-x)\text{B}_2\text{O}_3 : x\text{Ga}_2\text{O}_3 : 27.5\text{Gd}_2\text{O}_3$ เมื่อ $x = 5, 10, 15, 20$ และ 25 เปอร์เซ็นต์โดยโมล โดยคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล ค่าเลขอะตอมยังผลและค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนยังผลจากโปรแกรม Phy-X ระหว่างช่วงพลังงาน 0.015 to 15 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ผลจากการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล ค่าเลขอะตอมยังผลและค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนยังผล แสดงในรูปภาพที่ 2, 3 และ 4 ตามลำดับ

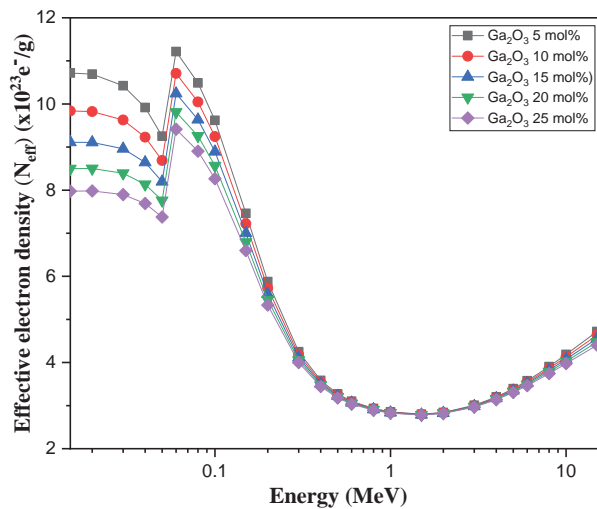


รูปภาพที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของแก้วเกลือแกงแกลเลียมแกโดลิเนียมบอเรต

จากผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลดังแสดงในรูปที่ 2 แสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงพลังงาน 0.015 ถึง 0.2 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งเป็นช่วงพลังงานที่อันตรกิริยาโฟโตอิเล็กทริก (photoelectric effect) เป็นอันตรกิริยาหลัก และพบขอบการดูดกลืนรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 0.06 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งสอดคล้องกับขอบการดูดกลืนรังสีเอกซ์ของอิเล็กตรอนในชั้น K ของธาตุแกเลียมซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของแก้ว ในช่วงพลังงาน 0.2 ถึง 2 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลมีแนวโน้มลดลงโดยมีอันตรกิริยาการกระเจิงแบบอินโคฮีเรนท์ (incoherent scattering) เป็นอันตรกิริยาหลัก อันตรกิริยาแพร์โปรดักชัน (pair production) จะเกิดขึ้นเมื่อพลังงานรังสีแกมมาเท่ากับ 1.022 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ และเป็นอันตรกิริยาหลักเมื่อพลังงานรังสีแกมมามากกว่า 2 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งเป็นผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลเพิ่มขึ้นเมื่อพลังงานรังสีแกมมามากกว่า 2 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ และเมื่อทำการเปรียบเทียบกันพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลที่ความเข้มข้นของแกเลียมออกไซด์ต่างกันมีค่าใกล้เคียงกัน



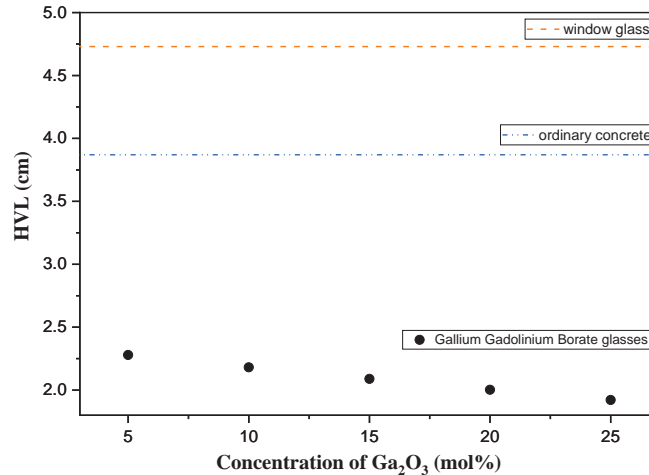
รูปภาพที่ 3 ค่าเลขอะตอมยังผลของแก้วแกเลียมแกโดลิเนียมบอเรต



รูปภาพที่ 4 ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนยังผลของแก้วแกเลียมแกโดลิเนียมบอเรต

จากรูปที่ 3 และ 4 แสดงถึงค่าเลขอะตอมยังผลและค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนยังผล โดยผลการคำนวณแสดงให้เห็นถึงค่าเลขอะตอมยังผลและค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนยังผลมีแนวโน้มเดียวกันกับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล โดยในช่วงพลังงาน 0.015 ถึง 0.2 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งเป็นช่วงพลังงานที่อันตรกิริยาโฟโตอิเล็กตริกเป็นอันตรกิริยาหลัก ค่าเลขอะตอมยังผลและค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนยังผลมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของแกเลียมออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากเมื่อเปอร์เซ็นต์โดยโมลของแกเลียมออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น จะเป็นผลทำให้เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแกโดลิเนียมออกไซด์ซึ่งเป็นธาตุที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากสุดในแก้วมีค่าลดลง ส่งผลทำให้ค่าความหนาแน่นลดลงจึงเป็นผลทำให้อันตรกิริยาโฟโตอิเล็กตริกลดลงเมื่อความเข้มข้นของแกเลียมออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับในช่วงพลังงานที่มากกว่า 2 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนยังผลมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของแกเลียมออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นจำนวนของอิเล็กตรอนที่เกิดอันตร

กิริยาต่อมวลของแก้วมีแนวโน้มลดลงในช่วงพลังงานนี้ แต่ค่าเลขอะตอมยังผลในช่วงพลังงานที่มากกว่า 2 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแกลเลียมออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นจำนวนของอิเล็กตรอนที่เกิดอันตรกิริยาต่ออะตอมของแก้วเพิ่มขึ้นในช่วงพลังงานนี้



รูปภาพที่ 5 ค่า Half Value Layer (HVL) ของแก้วแกลเลียมแกโดลิเนียมบอเรต

ค่า Half Value Layer (HVL) ของแก้วแกลเลียมแกโดลิเนียมบอเรตเปรียบเทียบกับวัสดุกำบังรังสี เช่น กระจก (window glass) และคอนกรีต (ordinary concrete) ที่พลังงาน 0.662 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ แสดงดังรูปภาพที่ 5 พบว่า ค่า HVL ของแก้วแกลเลียมแกโดลิเนียมบอเรตมีค่าลดลงตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของแกลเลียมออกไซด์ และจากการเปรียบเทียบกับวัสดุกำบังรังสี พบว่า ทุกความเข้มข้นของแก้วแกลเลียมแกโดลิเนียมบอเรต ค่า HVL มีค่าน้อยกว่าวัสดุกำบังรังสีดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุกำบังรังสี แก้วแกลเลียมแกโดลิเนียมบอเรตมีความสามารถในการกำบังรังสีได้ดีกว่าในทุกความเข้มข้น แสดงถึงคุณสมบัติที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นวัสดุกำบังรังสีได้

4. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาอันตรกิริยาระหว่างรังสีแกมมาของแก้วแกลเลียมแกโดลิเนียมบอเรต โดยการคำนวณจากโปรแกรม Phy-X ระหว่างช่วงพลังงาน 0.015 ถึง 15 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ผลจากการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล ค่าเลขอะตอมยังผล และค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนยังผล มีแนวโน้มเดียวกันคือ มีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงพลังงาน 0.015 ถึง 0.2 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งเป็นช่วงพลังงานที่อันตรกิริยาโฟโตอิเล็กทริก (photoelectric effect) เป็นอันตรกิริยาหลัก และพบขอบการดูดกลืนรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 0.06 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ สอดคล้องกับขอบการดูดกลืนรังสีเอกซ์ของอิเล็กตรอนในชั้น K ของธาตุแกลเลียมซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของแก้ว ในช่วงพลังงาน 0.2 ถึง 2 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ มีแนวโน้มลดลงโดยอันตรกิริยาการกระเจิงแบบอินโคฮีเรนต์ (incoherent scattering) เป็นอันตรกิริยาหลัก และมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อพลังงานมากกว่า 2 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งอันตรกิริยาแพโรดักชันเป็นอันตรกิริยาหลักในช่วงพลังงานนี้ และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลมีค่าใกล้เคียงกันสำหรับทุกความเข้มข้นของแกลเลียมออกไซด์ ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนยังผลมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของแกลเลียมออกไซด์เพิ่มขึ้น และค่าเลขอะตอมยังผลมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของแกลเลียมออกไซด์เพิ่มขึ้นที่พลังงาน 0.015 ถึง 0.2 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแกลเลียมออกไซด์เพิ่มขึ้นที่พลังงานมากกว่า 0.2 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ และจากการเปรียบเทียบการเกิดอันตรกิริยาของแก้วแกลเลียมแกโดลิเนียมบอเรตที่ความ

เข้มข้นต่างๆ พบว่าแก้วเกลือแกงโซเดียมโบรไมด์ที่มีความเข้มข้น 25 เปอร์เซ็นต์โดยโมล มีการเกิดอันตรกิริยามากที่สุด แสดงถึงคุณสมบัติในการกำบังรังสีได้มากที่สุดด้วย และเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุกำบังรังสีเช่น กระจก (window glass) และคอนกรีต (ordinary concrete) พบว่า แก้วเกลือแกงโซเดียมโบรไมด์มีความสามารถในการกำบังรังสีได้ดีกว่า แสดงให้เห็นว่าแก้วเกลือแกงโซเดียมโบรไมด์สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นวัสดุกำบังรังสีแกมมาได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีแก้วและวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครปฐม และงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ภายใต้โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ระดับปริญญาเอก (NRCT5-RRI63015-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
- Kirdsiri, K., Kaewkhao, J. & Limsuwan, P. (2012). **Photon interaction in borate glass doped with Bi₂O₃ at different energies,** Procedia Engineering, 32, 727-733.
- L. Shamshad et al.(2017). **A comparative study of gadolinium-based oxide and oxyfluoride glasses as low energy radiation shielding materials.** Prog. Nucl. Energy, volume 97
- Limkitjaroenpona, 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.H.A. Mhare, Y.S.M. Alajerami, Nidal Dwaikat, M.S. Al-Buriah, Muna Alqahtani, Fatimh Alshahri, Noha Saleh, N. Alonizan, M.A. Saleh, M.I. Sayyed. (2021). **Investigation of photon, neutron and proton shielding features of H₃BO₃-ZnO-Na₂O-BaO glass system.** Nuclear Engineering and Technology. Volume 53, Issue 3,
- M. Bektasoglu, M. Ali Mohammad. (2020). **Investigation of radiation shielding properties of TeO₂-ZnO-Nb₂O₅- Gd₂O₃ glasses at medical diagnostic energies.** Ceramics International, volume 46, Issue 10, Part B, pp. 16217-16223
- 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, pp. 23-28
- Singh, K.J., Singh, N., Kaundal, R.S., & Singh, K. (2008). **Gamma-ray shielding and structural properties of PbO-SiO₂ glasses.** Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 266, 944-948
- 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