

การเปรียบเทียบคุณสมบัติของแก้วซินทิลเลเตอร์ชนิดแกโดลิเนียมแคลเซียมซิลิโกโบเรต ที่เติมเพรซีโอดีเมียมและโฮลเมียม

Comparison Study on Gadolinium-Calcium-Silicoborate Scintillation Glass Doped Praseodymium and Holmium

จักรพงษ์ แก้วขาว^{1,2*} สุชาติ โกทัญย์³, อุทุมมา มัชฌะเนมิ³, ศิริประภา แก้วแจ้ง³,
นัฐวุฒิ ยี่นาง⁴ และพฤทธิพล ลิ้มกิจเจริญภรณ์^{1,2}

¹ศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางด้านเทคโนโลยีแก้วและวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

²โปรแกรมวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

³ภาควิชารังสีเทคนิค คณะเทคนิคการแพทย์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

⁴กลุ่มงานรังสีวิทยา โรงพยาบาลมะเร็งลำปาง

*bull99@windowslive.com

บทคัดย่อ

จากการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและอันตรกิริยาของแก้วตัวอย่างในสูตร $(55-x)B_2O_3 \cdot 25Gd_2O_3 \cdot 10SiO_2 \cdot 10CaO \cdot xA_2O_3$ เมื่อ A_2O_3 คือ Pr_2O_3 และ Ho_2O_3 โดยที่ $x = 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ และ 2.5 ร้อยละโดยโมล ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพพบว่าเมื่อความเข้มข้นของเพรซีโอดีเมียมและโฮลเมียมเพิ่มสูงขึ้นค่าความหนาแน่นจะเพิ่มขึ้น และจากการคำนวณอันตรกิริยาลดลงต่าง ๆ ของแก้วด้วยโปรแกรม XCOM ที่ระดับพลังงาน 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ อันตรกิริยาลดลงแบบโฟโตอิเล็กทริก การกระเจิงแบบโคฮีเรนต์ และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของแก้วมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเพรซีโอดีเมียมและโฮลเมียมเพิ่มขึ้น ในขณะที่การกระเจิงแบบคอมป์ตันจะลดลงเมื่อร้อยละของสารที่เติมเพิ่มสูงขึ้นจากการศึกษาพบว่ามีความเป็นไปได้สูงที่จะสามารถพัฒนาเป็นวัสดุซินทิลเลเตอร์จากแก้วแกโดลิเนียมแคลเซียมซิลิโกโบเรตที่เติมเพรซีโอดีเมียมและโฮลเมียมได้

คำสำคัญ: ซินทิลเลเตอร์, เพรซีโอดีเมียม, โฮลเมียม, สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล, อันตรกิริยา

Abstract

In this study, the physical and partial interaction of glass samples in system $(55-x)B_2O_3 \cdot 25Gd_2O_3 \cdot 10SiO_2 \cdot 10CaO \cdot xA_2O_3$ where A_2O_3 are Pr_2O_3 and Ho_2O_3 and $x = 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ and 2.5 mol% have been investigated. The results show the density of glass samples were increased with concentration of Pr_2O_3 and Ho_2O_3 increased. The theoretical values, calculated by XCOM at 662 keV found that the photoelectric effect, Coherent scattering, Mass attenuation coefficient of glass samples were increased with concentration of glass samples increased, while Compton scattering was decreased with concentration of glass samples increased. From the study shows a high possibility of chance to develop scintillator from gadolinium calcium silicoborate doped with Praseodymium and Holmium.

Keywords: scintillator, praseodymium, holmium, mass attenuation coefficient, interaction

1. บทนำ

ธาตุหายาก (Rare-earth oxide; RE³⁺) อยู่ในรูปออกไซด์นิยมเติมลงในวัสดุผลึกหรือแก้ว เพื่อเพิ่มคุณสมบัติต่าง ๆ เพื่อความเหมาะสมในการใช้งาน ซึ่งธาตุหายากจะมีคุณสมบัติเป็นลูมิเนสเซนส์ที่ดี ซึ่งการเปล่งแสงลูมิเนสเซนส์จะสอดคล้องกับการลดสถานะในชั้น 4f-4f และ 4f-5d ของ RE³⁺ สำหรับการลดสถานะของชั้น 4f-4f นั้น จะใช้รูปแบบการลูมิเนสเซนส์ที่ดี ตั้งแต่ช่วงอัลตราไวโอเล็ตถึงอินฟราเรด ซึ่งเป็นผลมาจากการก่อกำเนิดของอิเล็กตรอนในวง 5s หรือ 5p โดยในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ฟิล์มและแก้วที่เติมไอออนของธาตุหายากเป็นที่สนใจอย่างสูงในวงการเลเซอร์ของแข็ง (Solid state laser) ตัวขยายเชิงแสง (Optical amplifier) และวัสดุซินทิลเลเตอร์ (Scintillator material) [1]

งานวิจัยนี้ทำวัสดุซินทิลเลเตอร์ (Scintillator) หรือ วัสดุซินทิลเลชัน (Scintillation materials) นั้นเป็นชื่อเฉพาะของวัสดุที่มีการเปล่งแสงออกมา เมื่อถูกกระตุ้นด้วยรังสีประเภทต่าง ๆ (บางครั้งอาจเรียกว่า Radioluminescence) โดยในกรณีของรังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมา ส่วนใหญ่นิยมใช้วัสดุซินทิลเลเตอร์ประเภทอินทรีย์ (Inorganic scintillator) [1] ซึ่งโดยมากวัสดุซินทิลเลเตอร์อินทรีย์นิยมประยุกต์ใช้เป็นหัววัดรังสีแบบต่าง ๆ เช่น รังสีเอกซ์ และรังสีแกมมา เป็นต้น นอกจากนี้ประยุกต์ใช้ในการแพทย์ เช่น อุปกรณ์สร้างภาพทางการแพทย์ (Medical imaging) อุปกรณ์ Positron emission tomography (PET) [2] เป็นต้น และใช้อย่างกว้างขวางในวงการฟิสิกส์นิวเคลียร์ ฟิสิกส์พลังงานสูงและฟิสิกส์รังสี [2-4] โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการประยุกต์ทางการแพทย์ ที่ไม่สามารถใช้หัววัดรังสีประเภทสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor detector) หรือในรูปแบบฟิล์มทดแทนได้ เนื่องจากต้องการวัสดุตรวจรับรังสีในขนาดปริมาตรใหญ่ (Large volume) [4]

คุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุซินทิลเลเตอร์สำหรับรังสีเอกซ์ที่ดี ต้องมีความใส มีความเข้มแสงที่เปล่งออกมาแปรผันตรงกับพลังงานของรังสีเอกซ์ ให้ผลผลิตทางแสง (Light yield) สูง มีการสลายตัวทางเวลา (Decay time) ที่เร็ว ทนต่อรังสี (Radiation hardness) ได้ดีและมีความหนาแน่นสูง [2] โดยผลึกที่นิยมในท้องตลาดจะอยู่ในรูปของผลึกเดี่ยว (Single crystal) โครงสร้างผลึกที่เป็นเอกภาพ ซึ่งทำให้มีสมบัติการเปล่งแสงที่ดีหากมีสารเติม (Dopant) ที่เหมาะสม เช่น การเติมสาร Ce³⁺ ในผลึกซินทิลเลเตอร์ต่าง ๆ เป็นต้น [4, 5] ข้อเสียของผลึกซินทิลเลเตอร์ในรูปแบบผลึกเดี่ยวคือ มีราคาต้นทุนในการผลิตค่อนข้างสูง วัสดุที่ทำจากแก้วจึงเป็นทางเลือกที่ใช้การผลิตวัสดุซินทิลเลเตอร์ เนื่องจากต้นทุนในการผลิตไม่สูง ง่ายต่อการดูแลรักษา มีความทนต่อสภาพกรดและเบส ไม่ดูดความชื้น มีความทนต่อรังสีดี และสามารถพัฒนาให้มีผลผลิตทางแสงและค่าสลายตัวทางเวลาที่ดียิ่งขึ้นมากในปัจจุบัน จึงได้รับความนิยมในการวิจัยและเตรียมแก้วเป็นวัสดุซินทิลเลชันอย่างกว้างขวาง [6-16]

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและเตรียมแก้วในสูตร (55-x) B₂O₃:25 Gd₂O₃: 10SiO₂: 10CaO: xA₂O₃ เมื่อ A₂O₃ คือ Pr₂O₃ และ Ho₂O₃ โดยที่ x = 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 ร้อยละโดยโมล แล้วศึกษาสมบัติทางกายภาพ และอันตรกิริยาของรังสีแกมมา (โฟตอน) 662 keV ต่อแก้ว เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาวัสดุซินทิลเลเตอร์จากแก้วในอนาคต

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 ขั้นตอนการเตรียมแก้ว (Glass Preparation)

ออกแบบแก้วตัวอย่างจากสูตร (55-x) B₂O₃:25 Gd₂O₃: 10SiO₂: 10CaO: xA₂O₃ เมื่อ A₂O₃ คือ Pr₂O₃ และ Ho₂O₃ เมื่อ x = 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 ร้อยละโดยโมล ด้วยวิธีการหลอมและทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิ 1400 °C น้ำหนักโดยรวม 20 กรัม หลอมในบ้ำหลอมอะลูมินา จากนั้นทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิห้อง (Melt-quenching method) โดยเทน้ำแก้วใส่แม่พิมพ์สแตนเลส จากนั้นนำไปเข้าเตาเพื่ออบที่อุณหภูมิ 550 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อลดความเค้นแล้วนำแก้วไปตัดและขัดให้มีขนาดเท่ากับ 1.5 × 1.0 × 0.3 cm³ เพื่อควบคุมความหนาของแก้ว และเพื่อความสะอาดก่อนการนำไปทดสอบสมบัติทางต่าง ๆ

2.2 ขั้นตอนการวัดความหนาแน่น (Density measurement)

วัดค่าความหนาแน่นของแก้วตัวอย่างด้วยเครื่อง Density measurement apparatus บริษัท AND รุ่น model HR-200 โดยใช้สมการ (1) [17-19]

$$\rho = \frac{W_a}{W_a - W_b} \times \rho_b \quad (1)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่น (g/cm^3) W_a คือ น้ำหนักที่ชั่งในอากาศ (g), W_b คือ น้ำหนักที่ชั่งในไซริน (g), และ ρ_b คือ ความหนาแน่นของไซริน (0.863 g/cm^3)

2.3 ขั้นตอนการหาโอกาสในการเกิดอันตรกิริยาของรังสีในตัวกลาง

โอกาสในการเกิดอันตรกิริยาของรังสีในตัวกลางสามารถคำนวณโดยใช้โปรแกรม XCOM [20, 21] ซึ่งเป็นฐานข้อมูลที่สามารถคำนวณสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล และอันตรกิริยาอย่างต่าง ๆ ของธาตุ สารประกอบ หรือสารผสม เช่น การกระเจิงแบบโคฮีเรนต์ การกระเจิงแบบคอมป์ตัน อันตรกิริยาแบบโฟโตอิเล็กทริก กระบวนการเกิดแพร์โฟตกซ์โดยสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลได้จากสมการ (2) [17, 18]

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad (2)$$

เมื่อ μ_m คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (cm^2/g), μ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (cm^{-1}) และ ρ คือ ความหนาแน่นของตัวกลาง (g/cm^3)

ซึ่งสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของธาตุ สารประกอบ หรือสารผสมได้โดยการใช้โปรแกรม XCOM ในการคำนวณ สามารถคำนวณได้จากสมการ (3) [17, 18]

$$\mu_m = \sum w_i (\mu_m)_i \quad (3)$$

เมื่อ w_i คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของธาตุหรือสารประกอบ และ $(\mu_m)_i$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของธาตุแต่ละชนิดจากสมการที่ 3 สามารถหา Total cross-section (σ) [17, 18] ได้ดังสมการ (4)

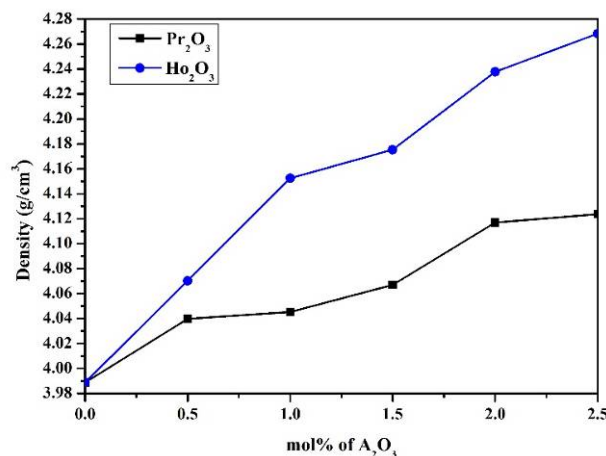
$$\sigma = \sigma_{coh} + \sigma_{incoh} + \tau + K + \sigma_{pho,n} \quad (4)$$

เมื่อ σ คือ Total cross-section σ_{coh} คือ การกระเจิงแบบโคฮีเรนต์ (Coherent scattering cross-section) σ_{incoh} คือ การกระเจิงแบบอินโคฮีเรนต์ (Incoherent scattering cross-section) τ คือ Atomic photoelectric cross-section K คือ Positron electron pair production และ $\sigma_{pho,n}$ คือ Photonuclear cross section

3. ผลการวิจัย

จากการออกแบบและผลิตแก้วจากสูตร $(55-x)\text{B}_2\text{O}_3 : 25\text{Gd}_2\text{O}_3 : 10\text{SiO}_2 : 10\text{CaO} : x\text{A}_2\text{O}_3$ เมื่อ A_2O_3 คือ Pr_2O_3 และ Ho_2O_3 เมื่อ $x = 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ และ 2.5 ร้อยละโดยโมล นำแก้วไปขัดและตัดให้มีขนาดมิติเป็น $1.5 \times 1.0 \times 0.3 \text{ cm}^3$ แล้วศึกษาคุณสมบัติด้านความหนาแน่น ผลการศึกษาแสดงดังรูปภาพที่ 1

3.1 ความหนาแน่น



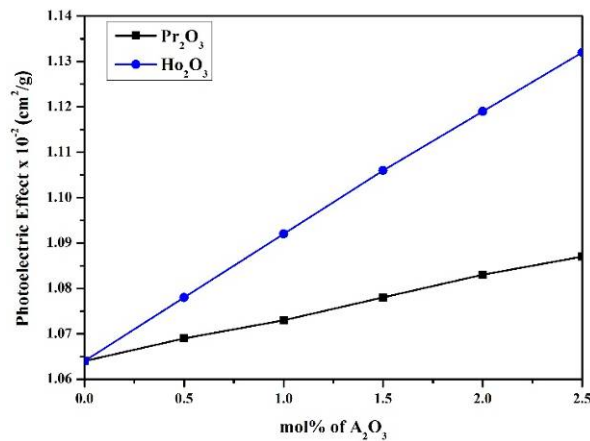
รูปภาพที่ 1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความเข้มข้นของแก้วตัวอย่างในแกน x และความหนาแน่นของแก้วในแกน y

จากการศึกษา พบว่าค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเมื่อร้อยละความเข้มข้นของสารที่เติมเข้าไปเพิ่มขึ้น และแก้วที่เติมโฮลเมียมมีค่าความหนาแน่นสูงกว่าเพอร์ซีโอติเมียมทุกร้อยละความเข้มข้น เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับแก้วที่ไม่เติมธาตุหายาก พบว่าค่าความหนาแน่นของแก้วที่ไม่เติมธาตุหายากมีค่าเท่ากับ $3.988 \pm 0.001 \text{ g/cm}^3$ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าแก้วที่เติมเพอร์ซีโอติเมียมและโฮลเมียมทุกร้อยละความเข้มข้น

3.2 ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลและอันตรกิริยาย่อยของแก้วตัวอย่าง

งานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม XCOM [20, 21] เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลและอันตรกิริยาย่อยของแก้วตัวอย่างที่ระดับพลังงาน 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (keV)

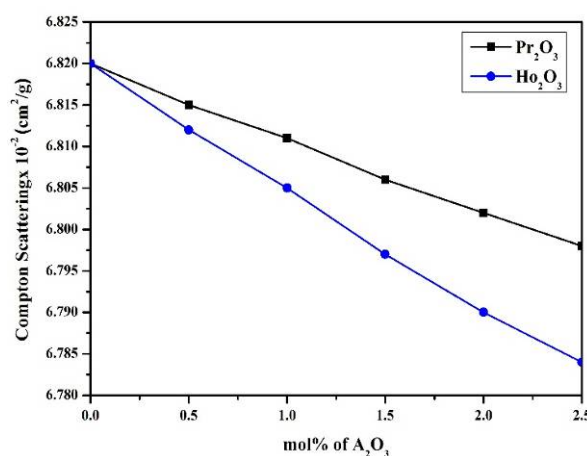
สัมประสิทธิ์การลดทอนอันตรกิริยาโฟโตอิเล็กทริกของแก้วตัวอย่าง



รูปภาพที่ 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแกน x คือ ร้อยละความเข้มข้นของแก้วที่เติมธาตุหายากชนิดต่าง ๆ และแกน y คือ อันตรกิริยาแบบโฟโตอิเล็กทริก

จากกราฟพบว่า สัมประสิทธิ์การลดทอนอันตรกิริยาแบบโฟโตอิเล็กทริกของธาตุหายากแต่ละชนิดมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อร้อยละความเข้มข้นของแก้วที่เติมธาตุหายากเพิ่มขึ้น และแก้วที่เติมโฮลเมียมมีอันตรกิริยาแบบโฟโตอิเล็กทริกสูงกว่าแก้วที่เติมเพอร์ซีโอติเมียม เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับแก้วที่ไม่เติมธาตุหายาก พบว่าอันตรกิริยาแบบโฟโตอิเล็กทริกของแก้วที่เติมเพอร์ซีโอติเมียมซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง $1.069-1.087 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{g}$ และโฮลเมียมซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง $1.078-1.132 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{g}$ ซึ่งมีค่าสูงกว่าแก้วที่ไม่เติมธาตุหายากมีค่าเท่ากับ $1.064 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{g}$ ทุกร้อยละความเข้มข้น

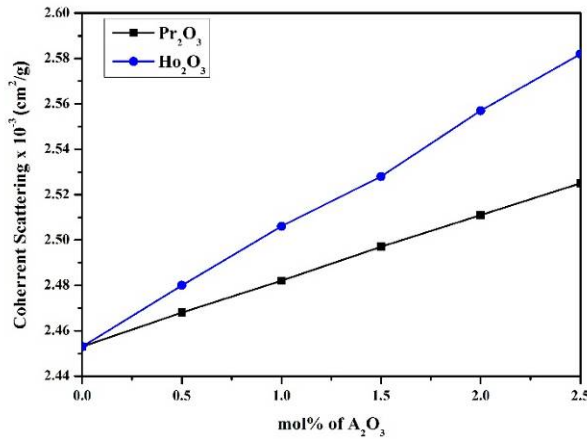
อันตรกิริยาการกระเจิงแบบคอมป์ตันของแก้วตัวอย่าง



รูปภาพที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแกน x คือ ร้อยละความเข้มข้นของแก้วที่เติมธาตุหายากชนิดต่าง ๆ และแกน y คือ อันตรกิริยาการกระเจิงแบบคอมป์ตัน

จากข้อมูลพบว่า การเกิดอันตรกิริยาการกระเจิงแบบคอมป์ตัน ของแก้วที่เติมธาตุหายากแต่ละชนิดมีค่าลดลง เมื่อความเข้มข้นของแก้วที่เติมธาตุหายากเพิ่มขึ้น และแก้วที่เติมโฮลเมียมมีสัมประสิทธิ์การลดทอนอันตรกิริยาการกระเจิงแบบคอมป์ตัน ต่ำกว่าเพอร์ซีโอติเมียม เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับแก้วที่ไม่เติมธาตุหายาก พบว่าสัมประสิทธิ์การลดทอนอันตรกิริยาการกระเจิงแบบคอมป์ตันของแก้วที่เติมเพอร์ซีโอติเมียมซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง $6.815-6.798 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{g}$ และโฮลเมียมซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง $6.812-6.784 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{g}$ ซึ่งมีค่าสูงกว่าแก้วที่ไม่เติมธาตุหายากมีค่าเท่ากับ $6.820 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{g}$ ทุกความเข้มข้น

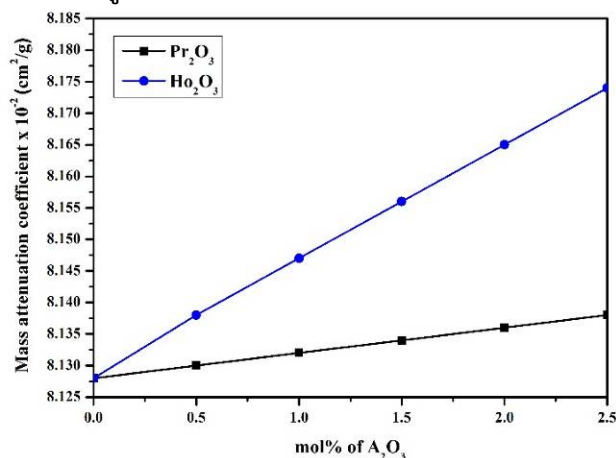
อันตรกิริยาการกระเจิงแบบโคฮีเรนต์ของแก้วตัวอย่าง



รูปภาพที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแกน x คือ ร้อยละความเข้มข้นของแก้วที่เติมธาตุหายากชนิดต่าง ๆ และแกน y คือ อันตรกิริยาการกระเจิงแบบโคฮีเรนต์

จากกราฟพบว่า การเกิดสัมประสิทธิ์การลดทอนอันตรกิริยาการกระเจิงแบบโคฮีเรนต์ของธาตุหายากแต่ละชนิดมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของแก้วที่เติมธาตุหายากเพิ่มขึ้น และแก้วที่เติมโฮลเมียมมีสัมประสิทธิ์การลดทอนอันตรกิริยาการกระเจิงแบบโคฮีเรนต์สูงกว่าแก้วที่เติมเพอร์ซีโอติเมียม เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับแก้วที่ไม่เติมธาตุหายาก พบว่าอันตรกิริยาการกระเจิงแบบโคฮีเรนต์ของแก้วที่เติมเพอร์ซีโอติเมียมซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง $2.468-2.525 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{g}$ และโฮลเมียมซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง $2.480-2.582 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{g}$ ซึ่งมีค่าสูงกว่าแก้วที่ไม่เติมธาตุหายากมีค่าเท่ากับ $2.453 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{g}$ ทุกร้อยละความเข้มข้น อย่างไรก็ตามการอันตรกิริยาการกระเจิงแบบโคฮีเรนต์นี้ยังมีสัดส่วนน้อยกว่าอันตรกิริยาแบบโฟโตอิเล็กทริกอันตรกิริยาการกระเจิงแบบคอมป์ตัน

ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของแก้วตัวอย่าง



รูปภาพที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแกน x คือ ร้อยละความเข้มข้นของแก้วที่เติมธาตุหายากชนิดต่าง ๆ และแกน y คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวล

จากกราฟพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของธาตุหายากแต่ละชนิดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อร้อยละความเข้มข้นของแก้วที่เติมธาตุหายากเพิ่มขึ้น และแก้วที่เติมโฮลเมียมมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลสูงกว่าเพอร์ซีโอติเมียม เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับแก้วที่ไม่เติมธาตุหายาก พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของแก้วที่เติมเพอร์ซีโอติเมียม ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง $8.130-8.138 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{g}$ และโฮลเมียมซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง $8.138-8.174 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{g}$ ซึ่งมีค่าสูงกว่าแก้วที่ไม่เติมธาตุหายากมีค่าเท่ากับ $8.128 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{g}$ ทุกความเข้มข้น

4. สรุปผลการทดลอง

จากการเปรียบเทียบคุณสมบัติของแก้วในสูตร $(55-x)\text{B}_2\text{O}_3: 25\text{Gd}_2\text{O}_3: 10\text{SiO}_2: 10\text{CaO}: x\text{A}_2\text{O}_3$ เมื่อ A_2O_3 คือ Pr_2O_3 และ Ho_2O_3 เมื่อ $x = 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ และ 2.5 ร้อยละโดยโมล ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพพบว่าเมื่อสารที่เติมมีความเข้มข้นสูงขึ้นค่าความหนาแน่นของแก้วที่เติมโฮลเมียมมีค่าความหนาแน่นสูงกว่าเพอร์ซีโอติเมียม แก้วทั้งสองชนิดมีค่าความหนาแน่นสูงกว่าแก้วแกโดลิเนียมแคลเซียมซิลิโกบอเรต ในขณะที่อันตรกิริยาออยแบบโพโตอิเล็กทริก การกระเจิงแบบโคฮีเรนต์ และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของแก้วเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเพอร์ซีโอติเมียมและโฮลเมียมเพิ่มขึ้น ในขณะที่การกระเจิงแบบคอมป์ตันจะลดลงเมื่อร้อยละของสารที่เติมเพิ่มสูงขึ้น จากการศึกษาพบว่าแก้วแกโดลิเนียมแคลเซียมซิลิโกบอเรตที่เติมเพอร์ซีโอติเมียมและโฮลเมียม มีความเป็นไปได้สูงที่จะพัฒนาวัสดุเป็นซินทิลเลเตอร์จากแก้ว เนื่องจากมีความหนาแน่นสูงและมีอันตรกิริยาโพโตอิเล็กทริกเกิดขึ้นสูงเมื่อรังสีแกมมาเข้าไปในแก้ว งานวิจัยนี้จึงเป็นข้อมูลพื้นฐานทางฟิสิกส์ที่สำคัญเพื่อเพิ่มทางเลือกของวัสดุซินทิลเลเตอร์ได้ในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชารังสีเทคนิค คณะเทคนิคการแพทย์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีแก้วและวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ในการแนะนำการใช้โปรแกรมคำนวณในการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

1. Eilk, C.W.E., (2001). Inorganic-scintillator development. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, **Detectors and Associated Equipment**, 460, 1-14.
2. Moszynski, M., (2003). Inorganic scintillation detectors in y ray spectrometry. **Inorganic scintillation detectors in yray spectrometry**, 505, 101-110.
3. Melcher, C.L., (2005). Perspectives on future development of new scintillators. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, **Detectors and Associated Equipment**, 537, 6-14.
4. Fu, J., Parker, J.M., Brown, R.M., Flower, P.S., (2003). Eu^{2+} ions in CaF_2 -containing high Gd_2O_3 concentrations. **Journal of Non-Crystalline Solids**, 326&327, 335-338.
5. Iltisa, A., Mayhugh, M.R., Mengeb, P., Rozsab, C.M., Selllesc, O., Solovyev, V., (2006), Lanthanum halide scintillators: Properties and Applications. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, **Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, 359-363
6. Chewpraditkul, W., Shen, Y., Chen, D., Yu, B., Prusa, P., Nikl, M., Beitlerova, A., Wanarak, C., (2012). Luminescence and scintillation of Ce^{3+} doped high silica glass. **Optical materials**, 34 (11), 1762-1766.

7. Chewpraditkul, W., Shen, Y., Chen, D., Beitlerova, A., Nikl, M., (2013). Luminescence of Tb³⁺-doped high silica glass under UV and X-ray excitation. **Optical Materials**, 35 (3), 426-430.
8. Fu, J., Kobayashi, M., Sugimoto, S., Parker, J.M., (2008), Eu³⁺-activated heavy scintillating glasses. **Materials Research Bulletin**, 43, (6), 1502-1508.
9. Fukabori, A., Yanagida, T., Chani, V., Moretti, F., Pejchal, J., Yokota, Y., Kawaguchi, N., Kamada, K., Watanabe, K., Murata, T., Arikawa, Y., Yamanoi, K., Shimizu, T., Sarukura, N., Nakai, M., Norimatsu, T., Azechi, H., Fujino, S., Yoshida, H., Yoshikawa, A., (2011). Optical and scintillation properties of Pr-doped Li-glass for neutron detection in inertial confinement fusion process. **Journal of Non-Crystalline Solids**, 357 (3), 911-914.
10. He, D., Yu, D., Cheng, J., Li, S., Hu, L., (2011) Effect of Tb³⁺ concentration and sensitization of Ce³⁺ on luminescence properties of terbium doped phosphate scintillating glass. **Journal of Alloys and Compounds**, 509 (5), 1906-1909.
11. Jiang, C., Jiang, P., Zhang, J., Gan, F., (2004). Radioluminescence of Ce³⁺-doped B₂O₃-SiO₂-Gd₂O₃-BaO glass. **Physics Letters A**, 323 (3-4), 323-328.
12. Mares, J.A., Nikl, M., Nitsch, K., Solovieva, N., Krasnikov, A., Zazubovich, S., (2001). A role of Gd³⁺ in scintillating processes in Tb-doped Na-Gd phosphate glasses. **Journal of Luminescence**, 94-95, 321-324.
13. Martini, M., Fasoli, M., Villa, I., Guibert, P., Radioluminescence of synthetic and natural quartz. **Radiation Measurements**, 47, (9), 846-850.
14. Pan, Z., James, K., Cui, Y., Burger, A., Cherepy, N., Payne, S.A., Mu, R., Morgan, S.H., (2008). Terbium-activated lithium-lanthanum-aluminosilicate oxyfluoride scintillating glass and glass-ceramic. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, **Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, 594 (2), 215-219.
15. Rodová, M., Cihlar, A., Kuizek, K., Nitch K., Solovieva. N., (2004). Preparation and properties of Ce-doped Na-Gd phosphate glasses. **Radiation Measurements**, 38 (4-6), 489-492.
16. Santiago, M., Marcazzó, J., Grasselli, C., Lavat, A., Molina, P., Spano, F., Caselli, E., (2011). Thermo- and radioluminescence of undoped and Dy-doped strontium borates prepared by sol-gel method. **Radiation Measurements**, 46 (12), 1488-1491.
17. Kirdsiri, K., Kaewkhao, J., Limsuwan, P., (2012). Photon Interaction in Borate Glass Doped with Bi₂O₃ at Different Energies. **Procedia Engineering**, (32), 727 – 733.
18. 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.
19. Kaewjaeng, S., Kaewkhao, J., Limsuwan, P., Maghaemi, U., (2012) , Effect of BaO on Optical, Physical and Radiation Shielding Properties of SiO₂-B₂O₃-Al₂O₃-CaO-Na₂O Glasses System, **Procedia Engineering** 32, 1080 – 1086 .
20. Gerward, L., Guilbert, N., Jensen, K.B., Levring, H., (2001), X-ray absorption in matter: Reengineering XCOM. **Am J Radiation Physics and Chemistry**, 6:23-24.
21. Gerward, L., Guilbert, N., Jensen, K.B., Levring, H., (2004), WinXCom-a program for calculation X-ray attenuation coefficients. **Am J Radiation Physics and Chemistry**, 71:653-654.