

# การเปรียบเทียบคุณสมบัติของแก้วซินทิลเลเตอร์ชนิดแกโดลิเนียมแคลเซียมซิลิโกบอเรต ที่เติมนีโอดีเนียมและเออร์เบียม

## Comparison Study on Gadolinium-Calcium-Silicoborate Scintillation glass doped Neodymium and Erbium

ศิริประภา แก้วแจ้<sup>1\*</sup>, อุทุมมา มั่นะเนมี<sup>1</sup>, สุชาติ โกทนต์<sup>1</sup>,  
พฤทธิพล ลิ้มกิจเจริญภรณ์<sup>2,3</sup> และ จักรพงษ์ แก้วขาว<sup>2,3</sup>

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาคุณสมบัติของแก้วในสูตร  $(55-x) \text{B}_2\text{O}_3: 25\text{Gd}_2\text{O}_3: 10\text{SiO}_2: 10\text{CaO}: x\text{A}_2\text{O}_3$  เมื่อ  $\text{A}_2\text{O}_3$  คือ  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Er}_2\text{O}_3$  เมื่อ  $x = 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$  และ  $2.5$  ร้อยละโดยโมล ผลการศึกษาพบว่า เมื่อความเข้มข้นของนีโอดีเนียมและเออร์เบียมเพิ่มสูงขึ้นค่าความหนาแน่นจะเพิ่มขึ้น และจากการคำนวณด้วยโปรแกรม XCOM ที่ระดับพลังงาน 662 keV พบว่าอันตรกิริยาลดแบบโฟโตอิเล็กทริก การกระเจิงแบบโคฮีเรนต์ และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของแก้วเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของนีโอดีเนียมและเออร์เบียมเพิ่มขึ้น ในขณะที่การกระเจิงแบบคอมป์ตันจะลดลงเมื่อร้อยละของสารที่เติมเพิ่มสูงขึ้น จากการศึกษาพบว่าแก้วแกโดลิเนียมแคลเซียมซิลิโกบอเรตที่เติมนีโอดีเนียมและเออร์เบียม มีความเป็นไปได้สูงที่จะพัฒนาเป็นวัสดุซินทิลเลเตอร์จากแก้ว เพื่อเพิ่มทางเลือกของวัสดุซินทิลเลเตอร์ได้ในอนาคต

**คำสำคัญ:** ซินทิลเลเตอร์, นีโอดีเนียม, เออร์เบียม, ความหนาแน่น, สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล

### Abstract

In this study, the effect of  $(55-x) \text{B}_2\text{O}_3: 25\text{Gd}_2\text{O}_3: 10\text{SiO}_2: 10\text{CaO}: x\text{A}_2\text{O}_3$  where  $\text{A}_2\text{O}_3$  are  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  and  $\text{Er}_2\text{O}_3$  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  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  and  $\text{Er}_2\text{O}_3$  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 the  $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$  glasses have a high possibility of chance to develop into scintillator from glass for increasing the choice rate of scintillator in the future.

**Keywords:** Scintillator, Neodymium, Erbium, Density, Mass attenuation coefficient

### บทนำ

ปัจจุบันสารที่เติมลงในวัสดุผลึกหรือแก้ว เพื่อปรับปรุงหรือเพิ่มคุณสมบัติให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานประเภทต่าง ๆ นั้น นิยมใช้ออกไซด์ของธาตุหายาก (Rare -earth oxide;  $\text{RE}^{n+}$ ) ซึ่งจะให้ปรากฏการณ์ลูมิเนสเซนซ์ที่ดี โดยการ

<sup>1</sup> ภาควิชารังสีเทคนิค คณะเทคนิคการแพทย์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 239 ถนนห้าแยก ตำบลสุเทพ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

<sup>2</sup> ศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีแก้วและวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม 85 ถ.มาลัยแมน อ.เมือง จ.นครปฐม

73000

<sup>3</sup> โปรแกรมวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม 85 ถ.มาลัยแมน อ.เมือง จ.นครปฐม 73000

\* bulli99@windowslive.com

เปล่งแสงลูมิเนสเซนส์จะสอดคล้องกับการลดสถานะในชั้น 4f-4f และ 4f-5d ของ  $RE^{3+}$  สำหรับการลดสถานะของชั้น 4f-4f นั้น จะใช้รูปแบบการลูมิเนสเซนส์ที่ดี ตั้งแต่ช่วงอัลตราไวโอเล็ตถึงอินฟราเรด ซึ่งเป็นผลมาจากการกักขังของอิเล็กตรอนในวง 5s หรือ 5p โดยในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ผลึกและแก้วที่เติมไอออนของธาตุหายากเป็นที่สนใจอย่างสูงในวงการเลเซอร์ของแข็ง (solid state laser) ตัวขยายเชิงแสง (optical amplifier) และวัสดุซินทิลเลเตอร์ (scintillator material) (Tripathi et al., 2006) เป็นต้น

วัสดุซินทิลเลเตอร์ (scintillator) หรือ วัสดุซินทิลเลชัน (scintillation materials) นั้น เป็นชื่อเฉพาะของวัสดุที่มีการเปล่งแสงออกมา เมื่อถูกกระตุ้นด้วยรังสีประเภทต่าง ๆ (บางครั้งอาจเรียกว่า radioluminescence) โดยในกรณีของรังสีเอกซ์ หรือรังสีแกมมา ส่วนใหญ่นิยมใช้วัสดุซินทิลเลเตอร์ประเภทอนินทรีย์ (inorganic scintillator) (Eilk, 2001) ซึ่งโดยมากวัสดุซินทิลเลเตอร์อนินทรีย์นิยมประยุกต์ใช้เป็นหัววัดรังสีแบบต่าง ๆ เช่น รังสีเอกซ์ และรังสีแกมมา เป็นต้น นอกจากนี้ประยุกต์ใช้ในการแพทย์ เช่น อุปกรณ์สร้างภาพทางการแพทย์ (medical imaging) อุปกรณ์ *positron emission tomography (PET)* (Moszynski, 2003) เป็นต้น และใช้อย่างกว้างขวางในวงการฟิสิกส์นิวเคลียร์ ฟิสิกส์พลังงานสูงและฟิสิกส์รังสี (Weber, 2002) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการประยุกต์ทางการสร้างภาพถ่ายทางการแพทย์ ที่ไม่สามารถใช้หัววัดรังสีประเภทสารกึ่งตัวนำ (semiconductor detector) หรือในรูปแบบฟิล์มทดแทนได้ เนื่องจากต้องการวัสดุตรวจวัดรังสีในขนาดปริมาตรใหญ่ (large volume) (Melcher, 2005)

คุณสมบัติสำคัญของวัสดุซินทิลเลเตอร์สำหรับรังสีเอกซ์ที่ดีจะต้องใส มีความเข้มแสงที่เปล่งออกมาแปรผันตรงกับพลังงานของรังสีเอกซ์ ให้ผลผลิตทางแสง (light yield) สูง มีการสลายตัวทางเวลา (Decay time) ที่เร็ว ทนต่อรังสี (radiation hardness) ได้ดีและมีความหนาแน่นสูง (Eilk, 2001) โดยทั่วไปแล้ว วัสดุซินทิลเลเตอร์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาดส่วนมากจะอยู่ในรูปของผลึกเดี่ยว (single crystal) และผลิตโดยใช้เครื่องปลูกผลึกเดี่ยวแบบต่าง ๆ ซึ่งปัจจุบันในเมืองไทยยังไม่มีผู้ใดสามารถปลูกผลึกซินทิลเลเตอร์ได้เอง สมบัติที่ดีของผลึกเดี่ยวนี้คือมีความใส มีองค์ประกอบที่ชัดเจน (หากสัดส่วนของสารผิดไป ก็จะไม่เกิดเป็นผลึกเดี่ยว) และมีโครงสร้างผลึกที่เป็นเอกภาพ ทำให้มีสมบัติการเปล่งแสงที่ดี หากมีสารโด๊ป (dopant) ที่เหมาะสม เช่น การโด๊ป  $Ce^{3+}$  ในผลึกซินทิลเลเตอร์ต่าง ๆ เป็นต้น (Fu et al., 2002; Iltisa et al., 2006; Weber, 2004) ข้อเสียของผลึกซินทิลเลเตอร์ในรูปแบบผลึกเดี่ยวคือ มีราคาต้นทุนในการผลิตสูงมาก (ราคาประมาณ 20 ล้านบาท ในกรณีของเครื่องมือระดับห้องปฏิบัติการ ส่วนมากเป็นผลึกที่มีสมบัติดูดความชื้นสูง ต้องใช้ความระมัดระวังสูงในการดูแลรักษา และทำเป็นปริมาตรขนาดใหญ่ได้ยากมาก (ในกรณีของการสร้างภาพทางการแพทย์ จำเป็นต้องใช้วัสดุตรวจวัดที่มีขนาดใหญ่ เพื่อประสิทธิภาพของภาพที่สร้างขึ้น)

วัสดุอีกประเภทหนึ่งที่มีความใส และง่ายต่อการสังเคราะห์ ได้แก่ วัสดุประเภทแก้ว (glass) ซึ่งใช้กระบวนการเตรียมโดยวิธีหลอมและทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว (melt-quenching technique) การเตรียมแก้วนี้ยังสามารถเปลี่ยนแปลงปริมาณสัดส่วนของสารที่เป็นโครงสร้างแก้วแต่ละชนิดได้ และเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารโด๊ปได้ง่ายอีกด้วย ทำให้มีต้นทุนในการผลิตราคาไม่แพง และง่ายต่อการดูแลรักษา มีความทนต่อสภาพกรดและเบส ไม่ดูดความชื้น มีความทนต่อรังสีดี และสามารถพัฒนาให้มีผลผลิตทางแสงและค่าสลายตัวทางเวลาที่ดีขึ้นมากในปัจจุบัน จึงได้รับความนิยมในการวิจัยและเตรียมแก้วเป็นวัสดุซินทิลเลชันอย่างกว้างขวาง (Chewpraditkul et al., 2012; Chewpraditkul et al., 2013; Fu et al., 2008; Fukabori et al., 2011; He et al., 2011; Jiang et al., 2004; Mares et al., 2001; Martini et al., 2012; Pan et al., 2008; Rodová et al., 2004; Santiago et al., 2011; Sun et al., 2013)

งานวิจัยนี้ได้เตรียมแก้วในสูตร  $(55-x) B_2O_3:25 Gd_2O_3: 10SiO_2: 10CaO: xA_2O_3$  เมื่อ  $A_2O_3$  คือ  $Nd_2O_3$  และ  $Er_2O_3$  เมื่อ  $x = 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$  และ  $2.5$  ร้อยละโดยโมล แล้วศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางอันตรกิริยาของรังสีแกมมา (โฟตอน) ที่พลังงาน 662 keV ต่อแก้วเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาวัสดุซินทิลเลเตอร์จากแก้วในอนาคต

## อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

### 1. ขั้นตอนการเตรียมแก้ว (glass preparation)

เตรียมแก้วจากสูตร  $(55-x) B_2O_3:25 Gd_2O_3: 10SiO_2: 10CaO: xA_2O_3$  เมื่อ  $A_2O_3$  คือ  $Nd_2O_3$  และ  $Er_2O_3$  เมื่อ  $x = 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$  และ  $2.5$  ร้อยละโดยโมล โดยวิธีการหลอมและทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิ 1400 °C น้ำหนักโดยรวม 20 กรัม หลอมในเตาหลอมอะลูมินา จากนั้นทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิห้อง (melt-quenching

method) โดยเทแก้วใส่สแตนเลส และนำไปเข้าเตาเพื่ออบที่อุณหภูมิ 550 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อลดความเค้นแล้วนำแก้วไปขัดและตัดให้มีขนาดมิติเป็น  $1.5 \times 1.0 \times 0.3 \text{ cm}^3$  เพื่อควบคุมความหนาของแก้ว และเพื่อความสะดวกต่อการนำไปทดสอบสมบัติทางวิทยาศาสตร์ด้วยเครื่องมือต่างๆ

## 2. ขั้นตอนการวัดความหนาแน่น (density measurement)

นำแก้วที่ได้มาวัดค่าความหนาแน่นด้วยเครื่อง density measurement apparatus บริษัท AND รุ่น model HR-200 โดยใช้สมการ (1) (Kaewjaeng et al., 2012; Limkitjaroenporn et al., 2012)

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

เมื่อ  $\rho$  คือ ความหนาแน่น ( $\text{g/cm}^3$ ),  $W_a$  คือ น้ำหนักที่ชั่งในอากาศ (g),  $W_b$  คือ น้ำหนักที่ชั่งในไซรีน (g) และ  $\rho_b$  คือ ความหนาแน่นของไซรีน ( $0.863 \text{ g/cm}^3$ )

## 3. ขั้นตอนการหาโอกาสในการเกิดอันตรกิริยาของรังสีในตัวกลาง

การทำโอกาสในการเกิดอันตรกิริยาของรังสีในตัวกลางสามารถหาโดยใช้โปรแกรม XCOM (Gerward et al., 2001; Gerward et al., 2004) ซึ่งเป็นฐานข้อมูลที่สามารถคำนวณสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล และอันตรกิริยาอย่างอื่นต่าง ๆ ของธาตุ สารประกอบ หรือสารผสม เช่น การกระเจิงแบบโคฮีเรนต์ การกระเจิงแบบคอมป์ตัน อันตรกิริยาแบบโฟโตอิเล็กทริก กระบวนการเกิดแพร์โฟตักซ์ชันโดยสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลได้จากสมการ (2) (Kirdsiri, et al., 2012; Limkitjaroenporn et al., 2012)

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

เมื่อ  $\mu_m$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ),  $\mu$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น ( $\text{cm}^{-1}$ ) และ  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของตัวกลาง ( $\text{g/cm}^3$ )

ซึ่งสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของธาตุ สารประกอบ หรือสารผสมได้โดยการใช้โปรแกรม XCOM ช่วยในการคำนวณสามารถคำนวณได้จากสมการ (3) (Kirdsiri, et al., 2012; Limkitjaroenporn et al., 2012)

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

เมื่อ  $w_i$  คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของธาตุหรือสารประกอบ และ  $(\mu_m)_i$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของธาตุแต่ละชนิดจากสมการที่ 3 สามารถหา Total cross-section ( $\sigma$ ) (Kirdsiri, et al., 2012; Limkitjaroenporn et al., 2012) ได้ดังสมการ (4)

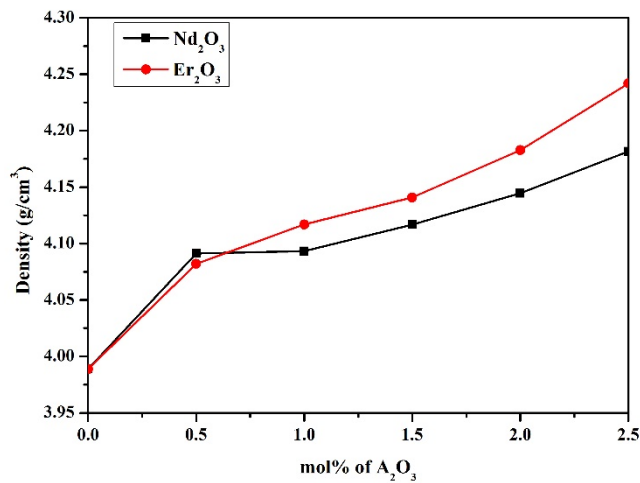
$$\sigma = \sigma_{coh} + \sigma_{incoh} + \tau + K + \sigma_{pho,n} \quad (4)$$

เมื่อ  $\sigma$  คือ Total cross-section,  $\sigma_{coh}$  คือ การกระเจิงแบบโคฮีเรนต์ (coherent scattering cross-section),  $\sigma_{incoh}$  คือ การกระเจิงแบบอินโคฮีเรนต์ (incoherent scattering cross-section),  $\tau$  คือ atomic photoelectric cross-section,  $K$  คือ positron electron pair production และ  $\sigma_{pho,n}$  คือ photonuclear cross section

## ผลการทดลอง

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  $\text{A}_2\text{O}_3$  คือ  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Er}_2\text{O}_3$  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

### 1. ความหนาแน่น



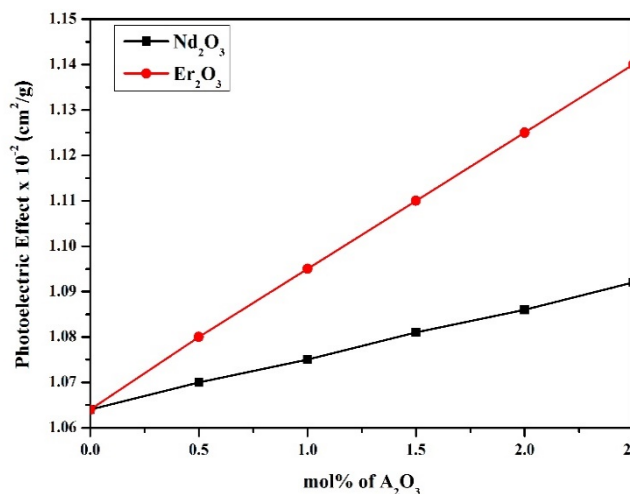
รูปภาพที่ 1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความเข้มข้นของแก้วตัวอย่างในแกน x และค่าความหนาแน่นของแก้วในแกน y

จากการศึกษา พบว่า ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเมื่อร้อยละความเข้มข้นของสารที่เติมเข้าไปเพิ่มขึ้น และแก้วที่เติมเออร์เบียมมีค่าความหนาแน่นสูงกว่านีโอดีเนียมที่ร้อยละความเข้มข้นตั้งแต่ 1.0-2.5 ร้อยละโดยโมล เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับแก้วที่ไม่เติมธาตุหายาก พบว่าค่าความหนาแน่นของแก้วที่ไม่เติมธาตุหายากมีค่าเท่ากับ  $3.988 \pm 0.001 \text{ g/cm}^3$  ซึ่งมีค่าต่ำกว่าแก้วที่เติมนีโอดีเนียม และเออร์เบียมทุกร้อยละความเข้มข้น

### 2. ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลและอันตรกิริยาลดทอนของแก้วตัวอย่าง

งานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม XCOM เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลและอันตรกิริยาลดทอนของแก้วตัวอย่างที่ระดับพลังงาน 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (keV)

#### สัมประสิทธิ์การลดทอนอันตรกิริยาโฟโตอิเล็กทริกของแก้วตัวอย่าง

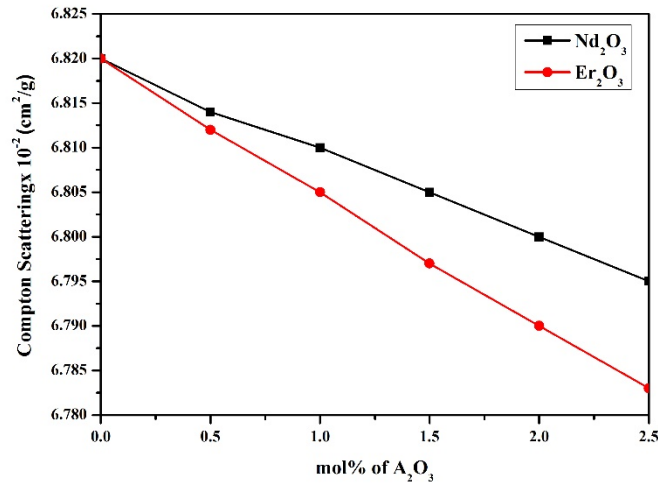


รูปภาพที่ 2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแกน x คือ ร้อยละความเข้มข้นของแก้วที่เติมธาตุหายากชนิดต่าง ๆ และแกน y คือ อันตรกิริยาแบบโฟโตอิเล็กทริก

จากกราฟพบว่า สัมประสิทธิ์การลดทอนอันตรกิริยาแบบโฟโตอิเล็กทริกของธาตุหายากแต่ละชนิดมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อร้อยละความเข้มข้นของแก้วที่เติมธาตุหายากเพิ่มขึ้น และแก้วที่เติมเออร์เบียมมีอันตรกิริยาแบบโฟโตอิเล็กทริกสูงกว่าแก้วที่เติมนีโอดีเนียม

เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับแก้วที่ไม่เติมธาตุหายาก พบว่าอันตรกิริยาแบบโพโตอิเล็กทริกของแก้วที่เติมนีโอไดเนียมซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง  $1.070-1.092 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{g}$  และเออร์เบียมซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง  $1.080-1.140 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{g}$  ซึ่งมีค่าสูงกว่าแก้วที่ไม่เติมธาตุหายากมีค่าเท่ากับ  $1.064 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{g}$  ทุกร้อยละความเข้มข้น

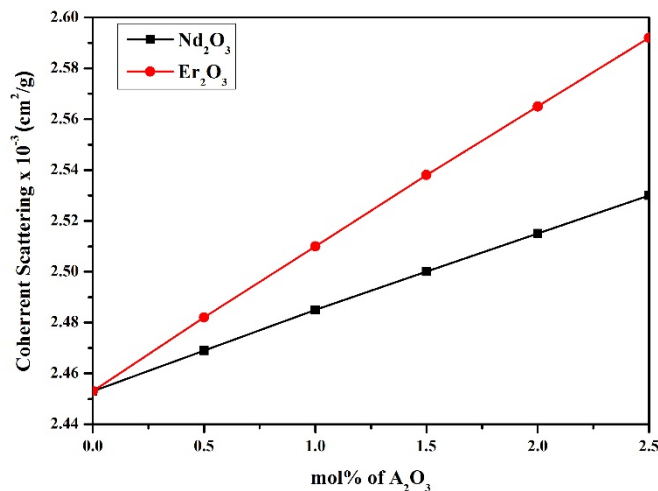
#### อันตรกิริยาการกระเจิงแบบคอมป์ตันของแก้วตัวอย่าง



รูปภาพที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแกน x คือ ร้อยละความเข้มข้นของแก้วที่เติมธาตุหายากชนิดต่าง ๆ และแกน y คือ อันตรกิริยาการกระเจิงแบบคอมป์ตัน

จากข้อมูลพบว่า การเกิดอันตรกิริยาการกระเจิงแบบคอมป์ตัน ของแก้วที่เติมธาตุหายากแต่ละชนิดมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของแก้วที่เติมธาตุหายากเพิ่มขึ้น และแก้วที่เติมเออร์เบียมมีสัมประสิทธิ์การลดทอนอันตรกิริยาการกระเจิงแบบคอมป์ตัน ต่ำกว่านีโอไดเนียม เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับแก้วที่ไม่เติมธาตุหายาก พบว่าสัมประสิทธิ์การลดทอนอันตรกิริยาการกระเจิงแบบคอมป์ตันของแก้วที่เติมนีโอไดเนียมซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง  $6.814-6.765 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{g}$  และเออร์เบียมซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง  $6.812-6.783 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{g}$  ซึ่งมีค่าสูงกว่าแก้วที่ไม่เติมธาตุหายากมีค่าเท่ากับ  $6.820 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{g}$  ทุกความเข้มข้น

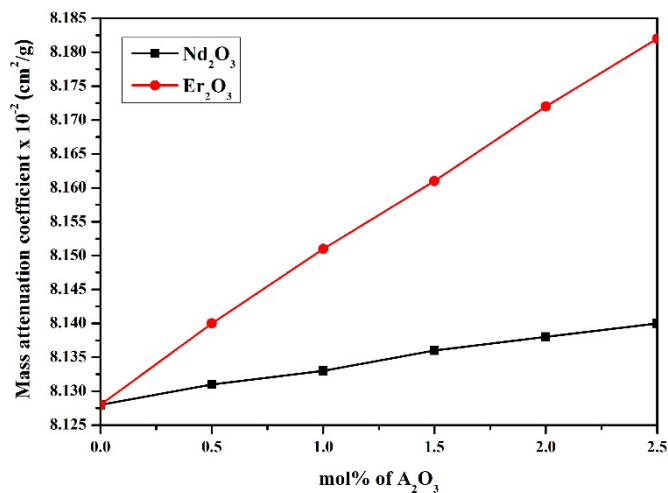
#### อันตรกิริยาการกระเจิงแบบโคฮีเรนต์ของแก้วตัวอย่าง



รูปภาพที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแกน x คือ ร้อยละความเข้มข้นของแก้วที่เติมธาตุหายากชนิดต่าง ๆ และแกน y คือ อันตรกิริยาการกระเจิงแบบโคฮีเรนต์

จากกราฟพบว่า การเกิดสัมประสิทธิ์การลดทอนอันตรกิริยาการกระเจิงแบบโคฮีเรนต์ของธาตุหายากแต่ละชนิดมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของแก้วที่เติมธาตุหายากเพิ่มขึ้น และแก้วที่เติมเออร์เบียมมีสัมประสิทธิ์การลดทอนอันตรกิริยาการกระเจิงแบบโคฮีเรนต์สูงกว่าแก้วที่เติมนีโอไดเนียม เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับแก้วที่ไม่เติมธาตุหายาก พบว่าอันตรกิริยาการกระเจิงแบบโคฮีเรนต์ของแก้วที่เติมนีโอไดเนียมซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง  $2.469-2.530 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{g}$  และเออร์เบียมซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง  $2.482-2.592 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{g}$  ซึ่งมีค่าสูงกว่าแก้วที่ไม่เติมธาตุหายากมีค่าเท่ากับ  $2.453 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{g}$  ทุกร้อยละความเข้มข้น อย่างไรก็ตามการอันตรกิริยาการกระเจิงแบบโคฮีเรนต์นี้ยังมีสัดส่วนน้อยกว่าอันตรกิริยาแบบโฟโตอิเล็กทริกอันตรกิริยาการกระเจิงแบบคอมป์ตัน

ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของแก้วตัวอย่าง



รูปภาพที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแกน x คือ ร้อยละความเข้มข้นของแก้วที่เติมธาตุหายากชนิดต่าง ๆ และแกน y คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวล

จากกราฟพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของธาตุหายากแต่ละชนิดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อร้อยละความเข้มข้นของแก้วที่เติมธาตุหายากเพิ่มขึ้น และแก้วที่เติมเออร์เบียมมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลสูงกว่านีโอไดเนียม เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับแก้วที่ไม่เติมธาตุหายาก พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของแก้วที่เติมนีโอไดเนียมซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง  $8.131-8.140 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{g}$  และเออร์เบียมซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง  $8.140-8.182 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{g}$  ซึ่งมีค่าสูงกว่าแก้วที่ไม่เติมธาตุหายากมีค่าเท่ากับ  $8.128 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{g}$  ทุกความเข้มข้น

**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  $\text{A}_2\text{O}_3$  คือ  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Er}_2\text{O}_3$  เมื่อ  $x = 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$  และ  $2.5$  ร้อยละโดยโมล ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพพบว่า เมื่อสารที่เติมมีความเข้มข้นสูงขึ้น ค่าความหนาแน่นของแก้วที่เติมเออร์เบียมมีค่าความหนาแน่นสูงกว่านีโอไดเนียม และแก้วทั้งสองชนิดมีค่าความหนาแน่นสูงกว่าแก้วแกโดลิเนียมแคลเซียมซิลิโกบอเรต ในขณะที่อันตรกิริยาอ้อยแบบโฟโตอิเล็กทริกการกระเจิงแบบโคฮีเรนต์ และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของแก้วเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของนีโอไดเนียมและเออร์เบียมเพิ่มขึ้น ในขณะที่การกระเจิงแบบคอมป์ตันจะลดลงเมื่อร้อยละของสารที่เติมเพิ่มสูงขึ้น จากการศึกษาพบว่า แก้วแกโดลิเนียมแคลเซียมซิลิโกบอเรตที่เติมนีโอไดเนียมและเออร์เบียม มีความเป็นไปได้สูงที่จะพัฒนาวัสดุเป็นซินทิลเลเตอร์จากแก้ว เนื่องจากมีความหนาแน่นสูงและมีอันตรกิริยาโฟโตอิเล็กทริกเกิดขึ้นสูงเมื่อรังสีแกมมาเข้าไปในแก้ว งานวิจัยนี้จึงเป็นข้อมูลพื้นฐานทางฟิสิกส์ที่สำคัญเพื่อเพิ่มทางเลือกของวัสดุซินทิลเลเตอร์ได้ในอนาคต

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชารังสีเทคนิค คณะเทคนิคการแพทย์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีแก้วและวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ในการแนะนำการใช้โปรแกรมคำนวณในการวิจัย

## เอกสารอ้างอิง

- Chewpraditkul, W., Shen, Y., Chen, D., Yu, B., Prusa, P., Nikl, M., Beitlerova, A., & Wanarak, C. (2012). Luminescence and scintillation of Ce<sup>3+</sup>-doped high silica glass. *Optical materials*, 34 (11, September), 1762–1766.
- Chewpraditkul, W., Shen, Y., Chen, D., Beitlerova, A., & Nikl, M. (2013). Luminescence of Tb<sup>3+</sup>-doped high silica glass under UV and X-ray excitation. *Optical Materials*, 35 (3, January), 426-430.
- 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, March), 1-14.
- Fu, J., Parker, J.M., Brown, R.M., & Flower, P.S. (2002). Eu<sup>2+</sup> ions in CaF<sub>2</sub>-containing transparent glass ceramics. *Mateirlas Research Bulletin*, 37 (11, September), 1843–1849.
- Fu, J., Kobayashi, M., Sugimoto, S., & Parker, J.M. (2008), Eu<sup>3+</sup>-activated heavy scintillating glasses. *Materials Research Bulletin*, 43 (6, June), 1502-1508.
- 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, February), 911-914.
- Gerward, L., Guilbert, N., Jensen, K.B., & Leving, H. (2001). X-ray absorption in matter: Reengineering XCOM. *Am J Radiation Physics and Chemistry*, (6, January), 23-24.
- Gerward, L., Guilbert, N., Jensen, K.B., & Leving, H. (2004). WinXCom-a program for calculation X-ray attenuation coefficients. *Am J Radiation Physics and Chemistry*, (71, October-November), 653-654.
- He, D., Yu, D., Cheng, J., Li, S., & Hu, L. (2011). Effect of Tb<sup>3+</sup> concentration and sensitization of Ce<sup>3+</sup> on luminescence properties of terbium doped phosphate scintillating glass. *Journal of Alloys and Compounds*, 509 (5, February), 1906-1909.
- Iltisa, A., Mayhugh, M.R., Mengeb, P., Rozsab, C.M., Sellesc, 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**, 563 (2, July), 359-363.
- Jiang, C., Jiang, P., Zhang, J., & Gan, F. (2004). Radioluminescence of Ce<sup>3+</sup>-doped B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-BaO glass. *Physics Letters A*, 323 (3–4, March), 323-328.
- Kirdsiri, K., Kaewkhao, J., & Limsuwan, P. (2012). Photon Interaction in Borate Glass Doped with Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> at Different Energies. *Procedia Engineering*, (32, November), 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, November), 847 – 854.

- Mares, J.A., Nikl, M., Nitsch, K., Solovieva, N., Krasnikov, A., & Zazubovich, S. (2001). A role of  $Gd^{3+}$  in scintillating processes in Tb-doped Na-Gd phosphate glasses. *Journal of Luminescence*, 94-95 (December), 321-324.
- Martini, M., Fasoli, M., Villa, I., & Guibert, P. (2012). Radioluminescence of synthetic and natural quartz. *Radiation Measurements*, 47 (9, September), 846-850.
- 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 (1-2, January), 6-14.
- Moszynski, M. (2003). Inorganic scintillation detectors in yray spectrometry. *Inorganic scintillation detectors in yray spectrometry*, 505 (1-2, June), 101-110.
- 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, September), 215-219.
- 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, August-December), 489-492.
- 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, December), 1488-1491.
- Sun, X.Y., Jing, D.G., Wang, W.F., Cao, C.Y., Li, Y.N., Zhen, G.T., Wang, H., Yang, X.X., Chen, H.H., Zhang, Z.J., & Zhao, J.T. (2013). Luminescence properties of  $B_2O_3$ - $GeO_2$ - $Gd_2O_3$  scintillating glass doped with rare-earth and transition-metal ions. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: **Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, 716 (December), 90-95.
- Tripathi, G., Rai, V.K., & Rai, S.B. (2006). Optical properties of  $Sm^{3+}$ :CaO-Li<sub>2</sub>O-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-BaO glass and codoped  $Sm^{3+}$ :Eu<sup>3+</sup>. *Applied Physics B*, 84 (3, September), 459-464.
- Weber, M.J. (2002). Inorganic scintillators: Today and tomorrow. *Journal of Luminescence*, 100 (4, December), 35-45.
- Weber, M.J. (2004). Scintillation: mechanisms and new crystals. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: **Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, 527 (1-2, July), 9-14.