



การเปล่งแสงและยิลด์ทางแสงของแก้ว La_2O_3 และ Gd_2O_3

เจือด้วยซีเรียมและเพรซีโอดิเมียม

Luminescence and Light Yield of La_2O_3 and Gd_2O_3 Glass Host Co-Doped Ce^{3+} , Pr^{3+}

สุนิสา จิตสุนทรชัยกุล^{4**}, สิทธิเชนทร์ พรหมณัฐ¹, วีระพงศ์ จิวประดิษฐ์กุล²,

Danping Chen³ และ ประพนธ์ เลิศลอยปัญญาชัย^{1*}

Sunisa Jitsoonthonchaiyakul^{4**}, Sittichain Pramchu¹, Weerapong Chewpraditkul²,

Danping Chen³ and Prapon Lertloypanyachai^{1*}

¹ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง ประเทศไทย

² ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ประเทศไทย

³ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences PR China

⁴ สาขาวิชาเทคโนโลยีอัจฉริยะ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา ประเทศไทย

¹ Physics Program, Faculty of Science and Technology, Muban Chombueng Rajabhat University, Thailand

² Physics Department, Faculty of Science, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand

³ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences PR China

⁴ Smart Technology Program, Faculty of Science and Technology, Bansomdejchaopraya Rajabhat University, Thailand

Received : 5 March 2024, Received in revised form : 2 July 2024, Accepted : 18 August 2024

Available online : 9 September 2024

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์และที่มา : พัฒนาประสิทธิภาพของแก้วซิลทิลเลเตอร์ SBAL และ SBALG และปรับปรุงค่ายิลด์ทางแสงของซิลทิลเลเตอร์โดยการเจือซีเรียมและเพรซีโอดิเมียมเทียบกับผลึก BGO เป็นมาตรฐาน

วิธีดำเนินการวิจัย : ในการวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาแก้วซิลทิลเลเตอร์ 2 สูตร ได้แก่ $15\text{SiO}_2 - 30\text{B}_2\text{O}_3 - 25\text{Al}_2\text{O}_3 - 30\text{La}_2\text{O}_3$ (SBAL) และ $15\text{SiO}_2 - 30\text{B}_2\text{O}_3 - 25\text{Al}_2\text{O}_3 - 22.5\text{La}_2\text{O}_3 - 7.5\text{Gd}_2\text{O}_3$ (SBALG) โดยที่ทั้งสองสูตรถูกเจือด้วยซีเรียมและเพรซีโอดิเมียม แก้วตัวอย่างถูกเตรียมด้วยกระบวนการหลอมภายใต้บรรยากาศคาร์บอนมอนอกไซด์และอบอ่อนที่ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

ผลการวิจัย : แถบการดูดกลืนพลังงานประกอบด้วย Gd^{3+} (4f-4f) ที่ 272 นาโนเมตร Pr^{3+} (4f-4f) ที่ 400-500 นาโนเมตร และขอบการดูดกลืนของ Ce^{3+} (5d-4f) ที่ 370 นาโนเมตร นอกจากนี้งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ density functional theory (DFT) และ random phase approximation (RPA) มาใช้ในการทำนายสมรรถนะในการดูดกลืนพลังงานของโครงสร้างแก้วซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในการเปล่งแสงของแก้วตัวอย่าง แถบการคายพลังงานของ Ce^{3+} : 5d - 4f อยู่บริเวณ 370-630 นาโนเมตร และมีการคายพลังงานของ Pr^{3+} ที่ระดับชั้นพลังงาน 4f-4f ของแก้วตัวอย่าง SBAL และ SBALG ที่สถานะระดับชั้นพลังงาน $^1\text{D}_2 - ^3\text{H}_4$ โดยมียอดที่ความยาวคลื่น 604 นาโนเมตร



สรุปผลการวิจัย : การกระตุ้นแก้วตัวอย่างด้วยรังสีเอกซ์พบว่าแก้วตัวอย่าง SBAL มีประสิทธิภาพในการเปล่งแสง 2.52% และแก้วตัวอย่าง SBALG มีประสิทธิภาพที่ 7.83% เมื่อเทียบกับผลึก BGO ค่าyieldทางแสงเมื่อกระตุ้นด้วยอนุภาคแอลฟา (^{238}Pu) พบว่าแก้วตัวอย่าง SBALG มีพลังงานสูงกว่าแก้วตัวอย่าง SBAL เมื่อเทียบกับผลึก BGO ดังนั้นโครงสร้างแก้ว SBALG มีความเหมาะสมในการถูกนำไปใช้เป็นวัสดุซิลิลเลเตอร์ เนื่องจากมีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับรังสีได้ดี

คำสำคัญ : การเปล่งแสง; แก้วซิลิลเลเตอร์; yieldทางแสง

Abstract

Background and Objectives : Develop the efficiency of SBAL and SBALG scintillators and improve the light yield of scintillator by doping Ce^{3+} and Pr^{3+} compared with BGO crystal as standard.

Methodology : In this research, 2 formulas of glass scintillators were developed include: $5\text{SiO}_2 - 30\text{B}_2\text{O}_3 - 25\text{Al}_2\text{O}_3 - 30\text{La}_2\text{O}_3$ (SBAL) and $15\text{SiO}_2 - 30\text{B}_2\text{O}_3 - 25\text{Al}_2\text{O}_3 - 22.5\text{La}_2\text{O}_3 - 7.5\text{Gd}_2\text{O}_3$ (SBALG), Both formular were doped with Ce^{3+} and Pr^{3+} . The glass samples were prepared by melt-quenching method under a CO reducing atmosphere and were annealed at 700°C for 3 hours.

Main Results : The absorption band of energy compose Gd^{3+} (4f-4f) at 272 nm, Pr^{3+} (4f-4f) at 400-500 nm and the absorption edge of Ce^{3+} (5d-4f) at 370 nm. Moreover, this research applied density functional theory (DFT) and random phase approximation (RPA) to predict the energy absorption performance of glass structures that affect the luminescence of glass samples. The emission band of the Ce^{3+} : 5d - 4f transition region 370 - 630 nm and the emission spectra of Pr^{3+} (4f-4f) of glass samples SBAL and SBALG at the energy level $^1\text{D}_2 \rightarrow ^3\text{H}_4$ transition at 604 nm.

Conclusions : Excitation glass sample with X-rays irradiation found that the luminescence efficiency was about 2.52% of SBAL and 7.83% of SBALG glass sample compared with BGO crystals. The light yield (LY) tested under excitation with α particles (^{238}Pu) found that the SBALG glass sample has enegy value higher than SBAL compared with BGO crystal. So SBALG glass structure is suitable for using scintillator material because of it has the good ability to react with radiation.

Keywords: luminescence; glass scintillator; light yield

*Corresponding author. E-mail : praponler@mcr.u.ac.th

**Co-corresponding author. Email : sunisa.ji@bsru.ac.th

บทนำ

ในปัจจุบันวัสดุซิลทิลเลเตอร์มีความสำคัญเป็นอย่างมากในการประยุกต์ใช้งานทางด้านเวชศาสตร์นิวเคลียร์ฟิสิกส์ นิวเคลียร์ การตรวจสอบแบบไม่ทำลาย และธรณีวิทยา โดยในงานวิจัยนี้เน้นไปที่วัสดุแก้วซิลทิลเลเตอร์เนื่องจากขึ้นรูปได้ง่าย และที่สำคัญคือต้นทุนในการผลิตต่ำ ดังนั้นวัสดุแก้วซิลทิลเลเตอร์จึงถือเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ถูกนำมาพิจารณาในการใช้งาน (Blasse & Grabmaier, 1994; Ronda, 2008) จากการศึกษาพบว่าโฮสต์ของแก้ว (Glass host) ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการเปล่งแสงและยึดทิศทางแสงของแก้วตัวอย่าง จึงได้มีการพัฒนาโฮสต์ของแก้วโดยการนำธาตุหายาก (Rare earth) ได้แก่ แลนทานัม (La_2O_3) และแกดโดลิเนียม (Gd_2O_3) มาผสมลงในสูตรโครงสร้างของแก้ว ซึ่งธาตุแลนทานัมสามารถปรับปรุงในเรื่องของเอกซิตอน (Exciton) ในโครงสร้างของแก้วได้ โดยส่งผลทำให้เล็กตรอนกับโฮลกลับมารวมตัวกันได้ดี พร้อมทั้งปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปแบบของแสง (Bartosiewicz *et al.*, 2021; Kohler & Bassler, 2015) นอกจากนี้แลนทานัมยังช่วยในเรื่องของการสิ้นของปฏิกิริยาฟอนอนในโครงสร้างของแก้วซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในการเปล่งแสงของ แก้วตัวอย่าง เช่นกัน (Kaewnuama *et al.*, 2019) ในส่วนของแกดโดลิเนียมช่วยสนับสนุนการส่งผ่านพลังงาน (Energy transfer) ของแกดโดลิเนียมที่ดูดกลืนพลังงานไว้และส่งต่อไปยังสารเจือ (Doping) ในโครงสร้างของแก้ว ทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการเปล่งแสงของแก้วตัวอย่างได้ดียิ่งขึ้น (Blasse & Grabmaier, 1994; Sun *et al.*, 2015)

นอกจากนี้ภายในงานวิจัยยังได้นำเอาทฤษฎีของ density functional theory (DFT) และ random phase approximation (RPA) มาใช้ในการทำนายความสามารถในการดูดกลืนพลังงานของธาตุแต่ละตัวที่ถูกผสมลงในโครงสร้างของ แก้วหรือโฮสต์ของแก้ว ซึ่งความสามารถในการดูดกลืนพลังงานที่ดีย่อมส่งผลต่อการคายพลังงานของ แก้วตัวอย่างเช่นกัน (Becke, 2014) โดยนำข้อมูลมาพัฒนาสูตรแก้วซิลทิลเลเตอร์ SBAL และ SBALG ที่มีการเจือสารซีเรียมและเพอร์ซีโอโดเมียม ซึ่งแก้วตัวอย่างถูกเตรียมด้วยกระบวนการหลอมภายใต้บรรยากาศคาร์บอนมอนอกไซด์และบอบอ่อนที่ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อที่จะได้ค่ายึดทิศทางแสงให้แสงส่องผ่านได้ดี

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้แก้วตัวอย่างถูกเตรียมด้วยกันทั้งหมด 2 สูตร ได้แก่ $15\text{SiO}_2 - 30\text{B}_2\text{O}_3 - 25\text{Al}_2\text{O}_3 - 30\text{La}_2\text{O}_3$ (SBAL) และ $15\text{SiO}_2 - 30\text{B}_2\text{O}_3 - 25\text{Al}_2\text{O}_3 - 22.5\text{La}_2\text{O}_3 - 7.5\text{Gd}_2\text{O}_3$ (SBALG) ในส่วนผสมร้อยละโดยโมล (mol%) และสูตรแก้วทั้งสองสูตรถูกเจือด้วย CeO_2 1.0 ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%) และ Pr_6O_{11} 0.5 wt% โดยแก้วตัวอย่างทั้งสองสูตรถูกเตรียมด้วยกระบวนการหลอมภายใต้สภาวะบรรยากาศคาร์บอนมอนอกไซด์รีดิวซ์ (CO reducing atmosphere) และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยเป็นระดับเกรดวิเคราะห์ที่มีความบริสุทธิ์สูง (>99.95%) ซึ่งสารเคมีที่ใช้เป็นส่วนผสมของวัสดุแก้วซิลทิลเลเตอร์ ได้แก่ SiO_2 , $\text{Al}(\text{OH})_3$, H_3BO_3 , La_2O_3 และ Gd_2O_3 โดยสารเคมีทั้งหมดถูกผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันในโรงบดสาร และนำไปหลอมในเบ้าหลอมอลูมินา ภายใต้สภาวะบรรยากาศคาร์บอนมอนอกไซด์รีดิวซ์ ที่อุณหภูมิ 1,600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นเทน้ำหลอมลงในแม่พิมพ์สแตนเลสและนำไปบอบอ่อนที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และปล่อยให้แก้วตัวอย่าง

เย็นตัวลงในเตาอบอ่อนจนเหลือที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำแก้วตัวอย่างไปขัดให้ใสและมีขนาด $\sim 8 \times 8 \times 1$ ลบ.มม. (Bartosiewicz *et al.*, 2021) นำแก้วตัวอย่างที่ผ่านการขัดเงาเรียบร้อยแล้วไปทดสอบหาค่าความหนาแน่นของแก้วตัวอย่างด้วยวิธีของอาร์คิมิดีส (Archimedes method) จากการทดสอบพบว่าแก้วตัวอย่าง SBAL และ SBALG มีค่าความหนาแน่นที่ 3-85 และ 4.18 กรัม/ซม³ ตามลำดับ ลักษณะทางกายภาพของแก้วซิลทิลเลเตอร์ตัวอย่างที่ผ่านการขัดเงา โดยแก้วตัวอย่าง SBAL โปร่งใสและมีสีใส ในส่วนของแก้วตัวอย่าง SBALG โปร่งใสและมีสีเหลืองใส ดังภาพ Figure 1



Figure 1 Photograph of polishing glass samples SBAL and SBALG.

ในส่วนของการวิเคราะห์สมบัติทางแสงของแก้วตัวอย่างมีการใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้ การวัดค่าการดูดกลืนทางแสงของแก้วตัวอย่างถูกทดสอบโดยเครื่อง Hitachi รุ่น U2900 spectrophotometer การวิเคราะห์การเปล่งแสงของแก้วตัวอย่างถูกวัดด้วยเครื่อง Shimadzu รุ่น RF-5301 PC Spectro-fluorophotometer และการวัดค่าการสลายตัวทางเวลาถูกทดสอบด้วยเครื่อง Edinburgh instruments รุ่น FS5 Fluorescence Spectrometer ในส่วนของสมบัติทางซิลทิลเลชันของแก้วตัวอย่างถูกทดสอบด้วยวิธีเรดิโolumิเนสเซนส์ (Radioluminescence: RL) โดยเครื่อง Horiba Jobin Yvon รุ่น 5000M spectrofluorometer ซึ่งใช้หลอด X-ray เป็น Mo anode, 40 kV, 15mA และค่าyieldทางแสงถูกวัดด้วยหลอดทวีคูณแสง (Bertolaccini *et al.*, 1968) Photonis XP5200B PMT anode ซึ่งต่อกับตัวส่งสัญญาณ CANBERRA 2005 preamplifier และ Tennelec TC243 spectroscopy amplifier วิเคราะห์ลักษณะสัญญาณด้วย Tukan 8k MCA โดยใช้อนุภาคอัลฟา ²³⁸Pu เป็นแหล่งกำเนิด และแก้วตัวอย่างถูกวัดสัญญาณเปรียบเทียบกับผลึกมาตรฐาน Bi₄Ge₃O₁₂ (BGO crystal)

ผลการวิจัย

การคำนวณค่า DFT โครงสร้างที่เสถียรของแต่ละองค์ประกอบของแก้ว ได้แก่ SiO₂, B₂O₃, Al₂O₃ และ La₂O₃ (ทำนายค่าคงที่ในโครงสร้าง ความยาวพันธะ และมุมพันธะต่างๆ ของโครงสร้างที่เสถียร พบว่าสารแลนทานัมออกไซด์ (La₂O₃) เมื่อผสมลงในโครงสร้างของแก้วแล้ว จะเป็นองค์ประกอบที่ส่งผลต่อการเปล่งแสงของแก้วตัวอย่างมากที่สุด ดังภาพ Figure 2

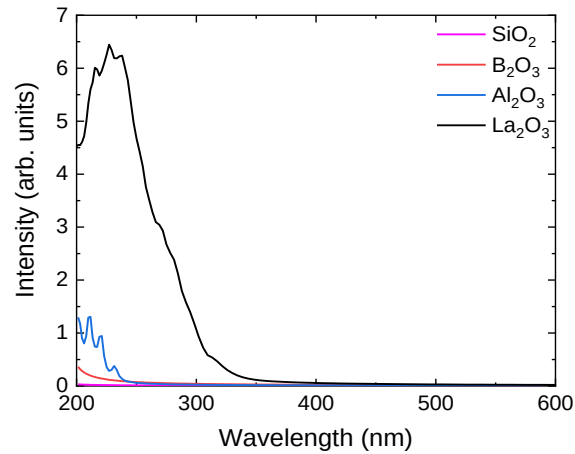


Figure 2 The DFT results of the RPA-based absorption spectrum in order to predict absorption ability of each composition in glass formula

จาก Figure 3 เมื่อพิจารณาการดูดกลืนพลังงานของแก้วตัวอย่าง SBALG กับ SBAL ที่เจือ Ce^{3+} และ Pr^{3+} พบว่า มีค่าการดูดกลืนพลังงานอยู่ที่ 380 นาโนเมตร และ ช่วง 400 – 500 นาโนเมตร โดยการดูดกลืนพลังงานของแก้วตัวอย่าง SBALG: Ce, Pr สูงกว่าการดูดกลืนพลังงานของแก้วตัวอย่าง SBAL : Ce, Pr

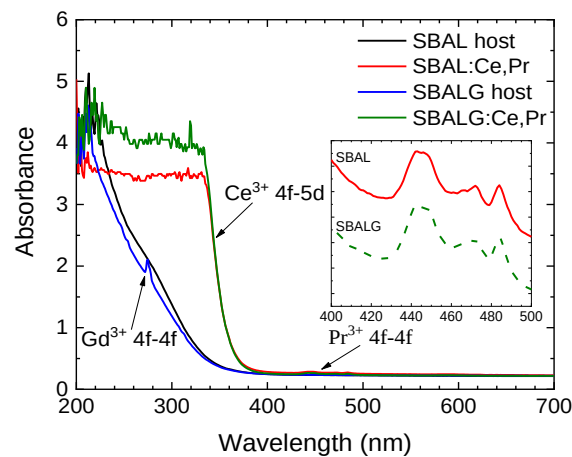


Figure 3 Absorption spectra of SBAL and SBALG glass host doped Ce^{3+} , Pr^{3+}

ผลการทดสอบค่าการเปล่งแสง (Photoluminescence) ของแก้วตัวอย่าง SBAL:Ce, Pr และ SBALG:Ce, Pr แสดงใน Figure 4 และ Figure 5 ตามลำดับ โดยพบว่าเส้นสเปกตรัมการกระตุ้น (PLE) $\lambda_{em} = 430$ นาโนเมตร มียอดอยู่ที่ประมาณ 352 นาโนเมตร (ช่วงการดูดกลืน 230-400 นาโนเมตร) และสามารถพบได้ในแก้วตัวอย่างทั้งสองชนิด (Figure 4A และ Figure 5A) แต่ในแก้วตัวอย่าง SBALG พบว่ามียอดที่ประมาณ 272 นาโนเมตรด้วย ในส่วนของสเปกตรัมการคายพลังงาน (PL) $\lambda_{ex} = 352$ นาโนเมตร พบว่าแก้วตัวอย่างทั้งสองชนิดมีการคายพลังงานอยู่ในช่วง 370-630 นาโนเมตร และมียอดของสเปกตรัมที่ 430 นาโนเมตร

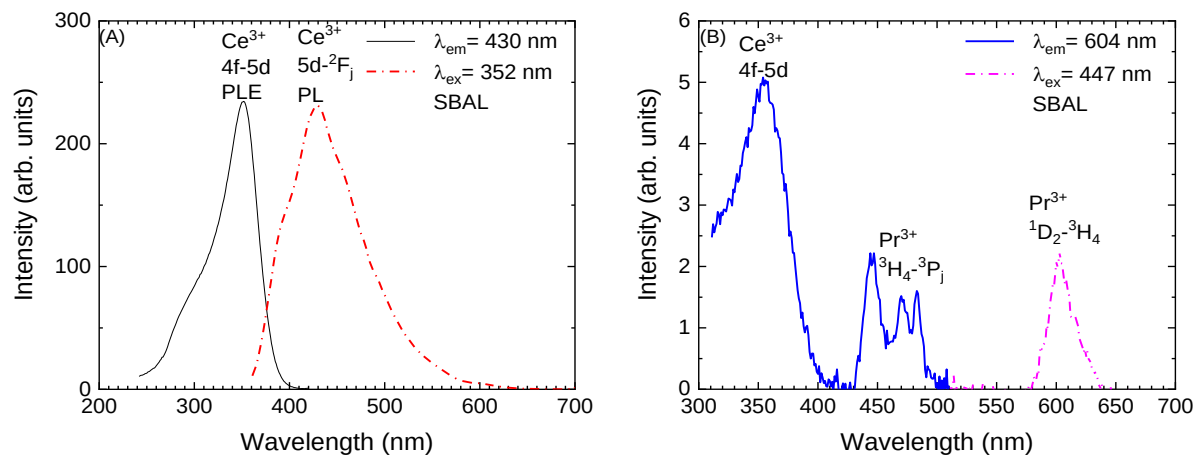


Figure 4 PLE and PL spectra of SBAL host under excitation at 352 nm (A) and 447 nm (B)

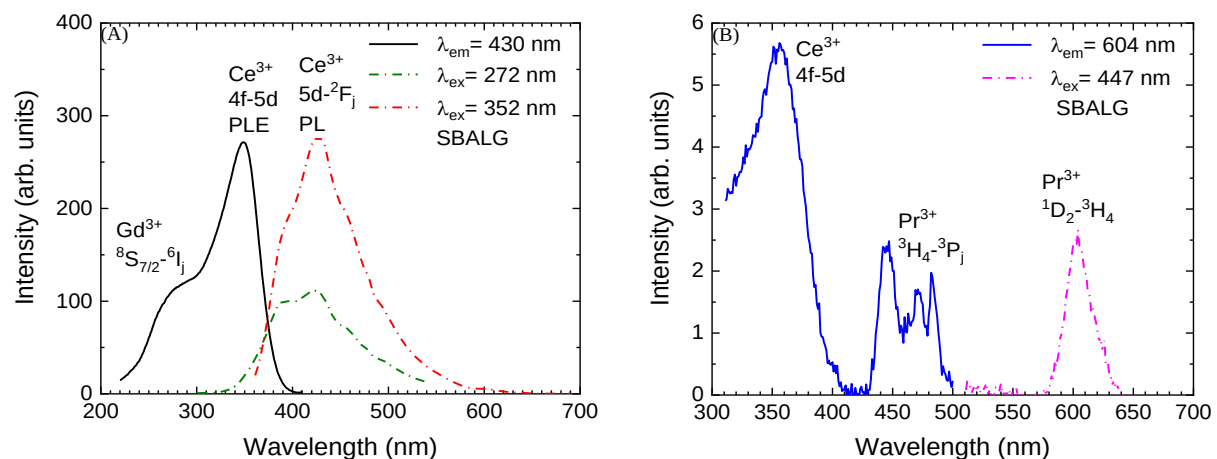


Figure 5 PLE and PL spectra of SBALG host under excitation at 352 nm, 272 nm (A) and 447 nm (B)

การทดสอบสมบัติทางด้านซิลทิลเลชันด้วยเทคนิคเรดิโอลูมิเนสเซนส์ (Radioluminescence: RL) แสดงใน Figure 6 โดยเทคนิค RL เป็นการทดสอบสมบัติทางด้านซิลทิลเลชันของแก้วตัวอย่างโดยการยิงรังสีเอกซ์ไปที่จุดศูนย์กลางการเปล่งแสง (Luminescence center) ของแก้วตัวอย่าง เพื่อดูประสิทธิภาพการเปล่งแสงของแก้วตัวอย่างที่ตอบสนองต่อรังสีเอกซ์ โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเปล่งแสงของแก้วตัวอย่างกับผลึกมาตรฐาน $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO) จากผลการทดลองพบว่า แก้ว SBAL มีช่วงการคายพลังงาน 340-530 นาโนเมตร และมียอดอยู่ที่ 380 นาโนเมตร ในขณะที่แก้ว SBALG มีช่วงการคายพลังงานตั้งแต่ 300-530 นาโนเมตร และมียอดอยู่ที่ 312 นาโนเมตร และมียอดหลักการคายพลังงานความยาวคลื่น 380 นาโนเมตร เช่นเดียวกับแก้วตัวอย่าง SBAL ในส่วนของผลึก BGO มีการคายพลังงานอยู่ในช่วง 340-7000 นาโนเมตร และมียอดอยู่ที่ 470 นาโนเมตร

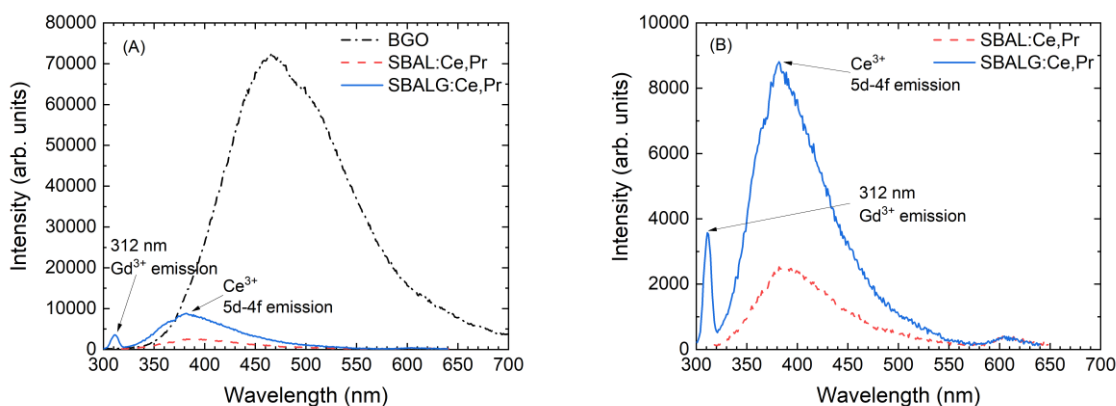


Figure 6 (A)RL spectra of SBAL and SBALG glass host compared with BGO crystal

(B) RL spectra of SBAL compared SBALG

Figure 7 แสดงภาพโฟโตพีค (Photo-peak) ซึ่งเป็นการทดสอบสมบัติทางด้านซิลทิลเลชันของแก้วตัวอย่าง เปรียบเทียบกับผลึก BGO โดยการวัดค่าyieldทางแสง (Light yield) ซึ่งใช้แหล่งกำเนิดเป็นอนุภาคอัลฟา (^{238}Pu 5.5 MeV) ในการกระตุ้นแก้วตัวอย่าง เพื่อให้เกิดการเปล่งแสง จากผลการวัดค่าyieldทางแสงพบว่าแก้วตัวอย่าง SBAL และ SBALG มีค่าyieldทางแสงเป็น 14.10 และ 20.37 ph/MeV ตามลำดับ โดยค่าyieldทางแสงของแก้วตัวอย่างและการเทียบประสิทธิภาพของแก้วตัวอย่างกับผลึก BGO ถูกสรุปใน Table 1

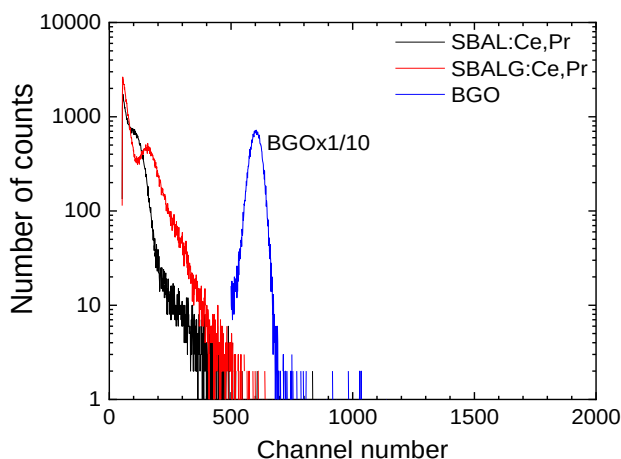


Figure 7 Pulse height spectra of SBAL and SBALG glass host compared with BGO crystal that used 5.5 MeV α particles source

Table 1 Light yield (LY) value was excited by α particles (^{238}Pu) of scintillating glasses.

Samples	Photoelectron yield	LY α of 5.50 MeV	LY α (% of BGO crystal)
	(phe/MeV)	(ph/MeV)	
BGO crystal	287	1250	100
SBAL:Ce, Pr	4.09	14.10	1.20
SBALG:Ce, Pr	5.90	20.37	1.63

การทดสอบวัดค่าการสลายตัวทางเวลาด้วยแสง (Photoluminescence decay time หรือ PL decay time) เป็นหนึ่งในสมบัติที่สำคัญของวัสดุซิลิเกตเลเตอร์ โดยวัสดุซิลิเกตเลเตอร์ที่ดีต้องมีค่าการสลายตัวทางเวลาที่สั้น (Short decay time) โดยค่าการสลายตัวทางเวลาสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$I(t) = A_1 \exp(-t/\tau_1) + A_2 \exp(-t/\tau_2) + \text{background} \quad (1)$$

ซึ่ง

$I(t)$ luminescence intensity

A amplitude

t time

τ decay time (τ_1 is fast component, τ_2 is slow component)

และความสัมพันธ์ปริมาณความเข้มของการสลายตัวทางเวลาเป็นไปตามสมการที่ (2)

$$I_i = (A_i \tau_i) / (\sum A_i \tau_i) \quad \text{เมื่อ } i = 1, 2 \quad (2)$$

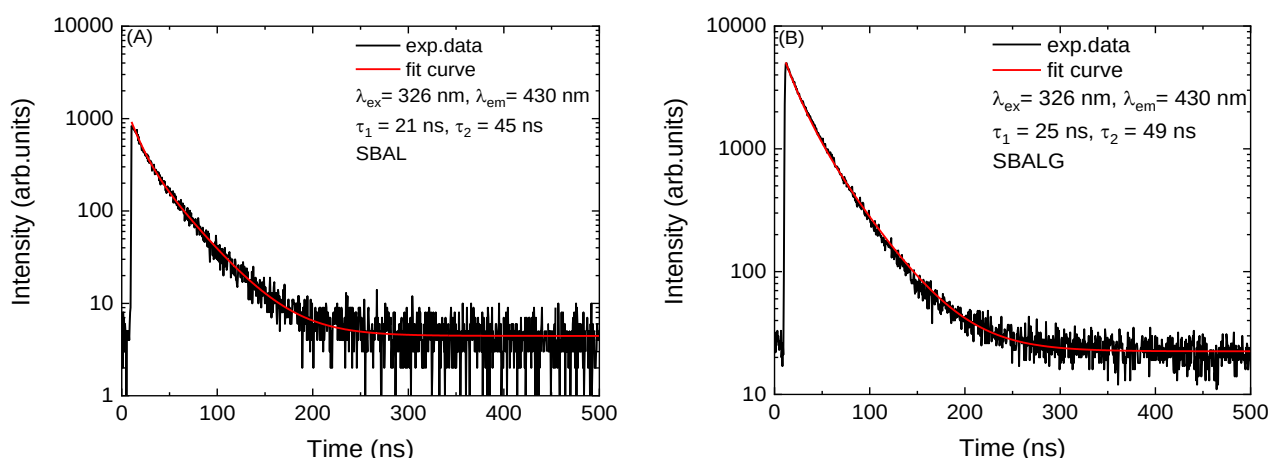


Figure 8 PL decays time of SBAL (A) and SBALG (B) glass host under excitation at 326 nm, and emission at 430 nm

Figure 8 แสดงผลการทดลอง PL decay เมื่อกระตุ้นแก้วตัวอย่างที่ $\lambda_{ex} = 326$ นาโนเมตร และ $\lambda_{em} = 430$ นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นของซีเรียมที่เป็นตัวหลักในการเปล่งแสง พบว่าแก้วตัวอย่างทั้งสองชนิดมีค่าการสลายตัวทางเวลาใกล้เคียงกัน โดยที่แก้วตัวอย่าง SBAL:Ce, Pr มีค่า Fast component เท่ากับ 21 นาโนวินาที ($I = 34\%$) และ Slow component เท่ากับ 45 นาโนวินาที ($I = 66\%$) และในส่วนของแก้วตัวอย่าง SBALG:Ce, Pr มีค่า Fast component เท่ากับ 25 นาโนวินาที ($I = 36\%$) และ Slow component เท่ากับ 49 นาโนวินาที ($I = 64\%$) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงการสลายตัวทางเวลาของแก้วตัวอย่างทั้งสองชนิดที่ใช้เวลาน้อยมาก (Short decay time) ที่เป็นเช่นนั้นก็เนื่องมาจากการถ่ายโอนพลังงานจาก Ce^{3+} ในชั้น 5d ไปยัง Pr^{3+} ในชั้น 4f-4f นั่นเอง หรือเป็นผลจากการเพิ่มประสิทธิภาพการลดชั้นพลังงานแบบไม่เปล่งแสง (Non-radiative) ในกระบวนการถ่ายโอนพลังงาน¹⁰ ดังนั้นแก้วตัวอย่าง SBAL:Ce, Pr และ SBALG:Ce, Pr มีค่าการสลายตัวทางเวลาที่ดีมาก ซึ่งเป็นหนึ่งในสมบัติที่ต้องการของวัสดุซิลิเกตเลเซอร์

วิจารณ์ผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้การคำนวณด้วยทฤษฎี Density functional theory (DFT) ซึ่งเป็นการทำนายสมบัติของวัสดุจากระดับอิเล็กทรอนิกส์ ภายใต้อิทธิพลของศักย์จากนิวเคลียสในสสาร (อะตอม โมเลกุล หรือของแข็ง) โดยทฤษฎี DFT ใช้การแก้

สมการด้วย Kohn-Sham เป็นหลัก เพื่อหาสมบัติของวัสดุจากฟังก์ชันคลื่นและระดับชั้นพลังงาน อย่างไรก็ตามการคำนวณ DFT ไม่ใช้การคำนวณแบบเที่ยงตรง (Exact solution) เนื่องจากมีการประมาณที่ซับซ้อน และยังมีค่าพารามิเตอร์เชิงตัวเลขหลายค่า เช่น ค่าพลังงานระงับ (Energy cutoff) และความหนาแน่นของ k-point การประมาณพจน์ exchange-correlation ที่เหมาะสม การรวมผลของแรงแวนเดอร์วาลส์ และผลการคำนวณแบบ Hybrid functional และอื่น ๆ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ในการคำนวณเหล่านี้ ต้องเลือกให้เหมาะกับระบบที่กำลังศึกษาและเหมาะสมกับสมบัติที่ต้องการทำนาย จากผลการคำนวณ DFT เพื่อทำนายโครงสร้างที่เสถียรของแต่ละองค์ประกอบของแก้ว พบว่าแลนทานัมออกไซด์มีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานหรือถูกกระตุ้นได้ดีที่สุด (Figure 2) ดังนั้นจากการคำนวณเบื้องต้นจึงสามารถนำแลนทานัมออกไซด์มาเป็นส่วนผสมหลักในแก้วตัวอย่าง ซึ่งคาดว่าจะสามารถช่วยในเรื่องการปรับปรุงการเปล่งแสงและยึดทิศทางแสงของแก้วตัวอย่างได้ (Pramchu *et al.*, 2022)

การทดสอบหาค่าสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานของแก้วตัวอย่างที่เจือด้วย Ce^{3+} , Pr^{3+} เปรียบเทียบกับแก้วตัวอย่าง SBALG และ SBAL (Figure 3) พบว่าเส้นสเปกตรัมของแก้วตัวอย่าง SBALG มีช่วงการดูดกลืนพลังงานของ Gd^{3+} ที่ 272 นาโนเมตร ในระดับชั้นพลังงาน 4f-4f ของแกดโดลิเนียม (Lertloypanyachai *et al.*, 2017) เมื่อเทียบกับแก้วตัวอย่างของ SBAL นั่นคือข้อแตกต่างที่สังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนในแก้วตัวอย่างทั้งสองชนิด เมื่อเจือด้วยซีเรียมและเพรซีโอดิเนียมพบว่าเส้นสเปกตรัมการดูดกลืนของแก้วตัวอย่างทั้งสองชนิดมีการดูดกลืนในช่วงตั้งแต่ 200-380 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงการดูดกลืนพลังงานของ Ce^{3+} ในระดับชั้นพลังงาน 4f-5d (Lertloypanyachai *et al.*, 2017) โดยมีขอบการดูดกลืนพลังงานไอออนของซีเรียมเริ่มต้นที่ 380 นาโนเมตร และสังเกตได้ว่าแก้วตัวอย่าง SBALG:Ce, Pr มีการดูดกลืนพลังงานที่มากกว่าแก้วตัวอย่างของ SBAL:Ce, Pr นอกจากนี้ยังพบว่าการดูดกลืนพลังงานของ Pr^{3+} ที่ช่วง 400-500 นาโนเมตร ซึ่งอยู่ในระดับชั้นพลังงาน 4f-4f (P. Lertloypanyachai *et al.*, 2017) และสามารถพบได้ในแก้วตัวอย่างทั้งสองชนิดเช่นกัน (ภาพแทรกใน Figure 3)

การทดสอบค่าการเปล่งแสง (Photoluminescence) ของแก้วตัวอย่าง SBAL:Ce, Pr และ SBALG:Ce, Pr แสดงใน Figure 4 และ Figure 5 ตามลำดับ โดยพบว่าเส้นสเปกตรัมการกระตุ้น (PLE) $\lambda_{\text{em}} = 430$ นาโนเมตร ซึ่งเป็นการดูดกลืนพลังงานของ Ce^{3+} ในระดับชั้นพลังงาน 4f-5d มียอดอยู่ที่ประมาณ 352 นาโนเมตร (ช่วงการดูดกลืน 230-400 นาโนเมตร) และสามารถพบได้ในแก้วตัวอย่างทั้งสองชนิด (Figure 4A และ Figure 5A) แต่ในแก้วตัวอย่าง SBALG พบว่ามียอดพิคที่ประมาณ 272 นาโนเมตรด้วย ซึ่งเป็นยอดของ Gd^{3+} ในระดับชั้นพลังงาน $^8\text{S}_{7/2} - ^6\text{I}_7$ ตามที่แสดงใน Figure 5A โดยเป็นการดูดกลืนพลังงานของแกดโดลิเนียม (Lertloypanyachai *et al.*, 2016) ในส่วนของสเปกตรัมการคายพลังงาน (PL) $\lambda_{\text{ex}} = 352$ นาโนเมตร พบว่าแก้วตัวอย่างทั้งสองชนิดมีการคายพลังงานอยู่ในช่วง 370-630 นาโนเมตร และมียอดของสเปกตรัมที่ 430 นาโนเมตร

ในกรณีของแก้วตัวอย่าง SBALG เมื่อลดองกระตุ้นที่ $\lambda_{\text{ex}} = 272$ นาโนเมตร ซึ่งเป็นยอดการดูดกลืนพลังงานของแกดโดลิเนียม (Figure 5A) พบว่าสเปกตรัมการคายพลังงาน (PL) มีการคายพลังงานในช่วงความยาวคลื่น 350-530 นาโนเมตร และมียอดอยู่ที่ประมาณ 430 นาโนเมตร ซึ่งสอดคล้องกับช่วงความยาวคลื่นของการคายพลังงานของซีเรียม นั่นหมายความว่าแกดโดลิเนียมมีการถ่ายโอนพลังงาน (Energy transfer) จาก Gd^{3+} ไปยัง Ce^{3+} เท่ากับเป็นการเพิ่มพลังงานให้กับการคาย

พลังงานของซีเรียม ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในการเปล่งแสงของแก้วตัวอย่าง (Lertloypanyachai *et al.*, 2017; Lertloypanyachai *et al.*, 2016) เมื่อพิจารณาใน Figure 4B และ Figure 5B ที่สเปกตรัมการคายพลังงาน (PL) โดยกระตุ้นที่ $\lambda_{ex} = 447$ นาโนเมตร ซึ่งเป็นการกระตุ้นในระดับชั้นพลังงาน $^3H_4-^3P_1$ (4f-4f) ของ Pr^{3+} พบว่าแก้วตัวอย่างทั้งสองชนิดมีการคายพลังงานในช่วงความยาวคลื่น 580-640 นาโนเมตร และมียอดอยู่ที่ 604 นาโนเมตร ซึ่งเป็นระดับชั้นพลังงาน $^1D_2-^3H_4$ ของ Pr^{3+} (Lertloypanyachai *et al.*, 2017; Wu & Ren, 2013) โดยการเจือร่วม (Co-doped) ในส่วนของ Pr^{3+} ช่วยลดเวลาการสลายตัว (Decay time) ทางพลังงานของแก้วตัวอย่างนั่นเอง (Wu & Ren, 2013)

การทดสอบสมบัติทางด้านซิลทิลเลชันด้วยเทคนิคเรดิโอลูมิเนสเซนส์ (Radioluminescence: RL) แสดงใน Figure 6 โดยเทคนิค RL เป็นการทดสอบสมบัติทางด้านซิลทิลเลชันของแก้วตัวอย่างโดยการยิงรังสีเอกซ์ไปที่จุดศูนย์กลางการเปล่งแสง (Luminescence center) ของแก้วตัวอย่าง เพื่อดูประสิทธิภาพการเปล่งแสงของแก้วตัวอย่างที่ตอบสนองต่อรังสีเอกซ์ โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเปล่งแสงของแก้วตัวอย่างกับผลึกมาตรฐาน $Bi_4Ge_3O_{12}$ (BGO crystal) จากผลการทดลองพบว่าแก้วตัวอย่าง SBAL มีช่วงการคายพลังงาน 340-530 นาโนเมตร และมียอดอยู่ที่ 380 นาโนเมตร ซึ่งเป็นการคายพลังงานของซีเรียมที่ระดับชั้น 5d-4f ในขณะที่แก้วตัวอย่าง SBALG มีช่วงการคายพลังงานตั้งแต่ 300-530 นาโนเมตร และมียอดอยู่ที่ 312 นาโนเมตร โดยเป็นการคายพลังงานของแกดโดลิเนียมที่ระดับชั้น $^6P_1-^8S_{7/2}$ และมียอดหลักการคายพลังงานของซีเรียมที่ระดับชั้น 5d-4f ที่ความยาวคลื่น 380 นาโนเมตร เช่นเดียวกับแก้วตัวอย่าง SBAL (Lertloypanyachai *et al.*, 2017; Lertloypanyachai *et al.*, 2016) ในส่วนของผลึก BGO มีการคายพลังงานในช่วง 340-700 นาโนเมตร และมียอดอยู่ที่ 470 นาโนเมตร เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเปล่งแสงของแก้วตัวอย่างกับผลึก BGO โดยการกระตุ้นด้วยรังสีเอกซ์พบว่าแก้วตัวอย่าง SBAL และ SBALG มีประสิทธิภาพเป็น 2.52% และ 7.83% ของผลึก BGO ตามลำดับ นอกจากนี้ยังสามารถสังเกตได้ว่าแก้วตัวอย่าง SBALG มีค่าการเปล่งแสงที่ดีกว่าแก้วตัวอย่าง SBAL เพราะแก้วตัวอย่างที่มีองค์ประกอบของแกดโดลิเนียมช่วยสนับสนุนการถ่ายโอนพลังงานจาก Gd^{3+} ไปยัง Ce^{3+} ทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการคายพลังงานของแก้วตัวอย่างให้ดียิ่งขึ้น (Lertloypanyachai *et al.*, 2016; Lertloypanyachai *et al.*, 2021; Chewpraditkul *et al.*, 2019) ในส่วนของสาเหตุหลักที่ทำให้ค่าการเปล่งแสงในแก้วตัวอย่างทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับผลึก BGO นั้น สามารถสันนิษฐานได้ว่าเป็นผลเนื่องมาจากกับดัก (Trapping) หรือจุดบกพร่องที่มีอยู่อย่างมากมายในโครงสร้างของแก้ว (Ghosh, 1968) โดยกับดักอยู่ในขั้นตอนของ Transportation ซึ่งคอยดักจับอิเล็กตรอนที่จะกลับมารวมตัวกับโฮล ทำให้อิเล็กตรอนไม่สามารถคายพลังงานออกมาและกลับไปรวมตัวกับโฮลได้ จึงทำให้ค่าพลังงานที่ปลดปล่อยออกมามีค่าต่ำ และส่งผลต่อประสิทธิภาพในการเปล่งแสงของแก้วตัวอย่างทั้งสองชนิด

เมื่อวิเคราะห์ผลการวัดค่าซิลด์ทางแสง Figure 7 สามารถเห็นได้อย่างชัดเจนว่าแก้วตัวอย่าง SBAL และ SBALG มีค่าซิลด์ทางแสงค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับผลึกมาตรฐาน BGO สาเหตุที่แก้วตัวอย่างแก้วซิลทิลเลเตอร์มีค่าซิลด์ทางแสงต่ำนั้น เนื่องมาจากกับดักหรือจุดบกพร่อง (Ghosh, 1968) ที่อยู่ภายในโครงสร้างของแก้วคอยทำหน้าที่ดักจับอิเล็กตรอน ทำให้ความสามารถในการคายพลังงานลดต่ำลง (เช่นเดียวกับในกรณีที่วัดสมบัติทางด้านซิลทิลเลชันของแก้ว

ตัวอย่างภายใต้การกระตุ้นด้วยรังสีเอกซ์เมื่อทดสอบด้วยเทคนิค RL) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ (Lertloypanyachai *et al.*, 2017) ที่ทำการเจือรวม Ce^{3+} และ Pr^{3+} ในแก้วซิลิเกตเลเซอร์ โดยกับดักที่อยู่ในขั้นตอน Transport ของกระบวนการเปล่งแสง คอยดักจับอิเล็กตรอนในแก้วตัวอย่าง ทำให้อิเล็กตรอนบางส่วนถูกดักจับและติดอยู่ในกับดักนั้น ส่วนอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาบางส่วนก็เดินทางได้เข้ามาในการเข้าสู่กระบวนการขั้นตอนการเปล่งแสงหรือ Luminescence ดังนั้นกับดักจึงเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ค่าyieldทางแสงมีค่าน้อยในแก้วตัวอย่าง SBAL และ SBALG

เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพค่าyieldทางแสงระหว่างแก้วตัวอย่าง SBAL และ SBALG พบว่าแก้วตัวอย่าง SBALG (20.37 ph/MeV) มีค่าyieldทางแสงมากกว่าแก้วตัวอย่าง SBAL (14.10 ph/MeV) โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้ แก้วตัวอย่าง SBALG มีแกดโดลิเนียมในโครงสร้างของแก้วซึ่งช่วยสนับสนุนในการถ่ายโอนพลังงานจากแกดโดลิเนียมไปยังซีเรียมที่เป็นตัวหลักในการเปล่งแสงของแก้วตัวอย่าง (Lertloypanyachai *et al.*, 2016) และความหนาแน่นของแก้วตัวอย่างที่มีผลต่อการเกิดอันตรกิริยาภายในแก้วตัวอย่างเมื่อถูกกระตุ้นด้วยอนุภาคพลังงานสูงหรือรังสี ยิ่งแก้วตัวอย่างมีความหนาแน่นมากก็สามารถเกิดอันตรกิริยาภายในแก้วตัวอย่างได้ดี (Lertloypanyachai *et al.*, 2023) โดยแก้วตัวอย่าง SBALG มีความหนาแน่น 4.18 กรัม/ซม³ ซึ่งมากกว่าแก้วตัวอย่าง SBAL 3.85 กรัม/ซม³ และสอดคล้องกับผลการทดสอบการดูดกลืนพลังงานของแก้วตัวอย่างดังแสดงใน Figure 3 โดยที่แก้วตัวอย่าง SBALG:Ce, Pr มีการดูดกลืนพลังงานที่มากกว่าแก้วตัวอย่าง SBAL:Ce, Pr จึงทำให้สามารถคายพลังงานออกมาได้มากกว่านั่นเอง

สรุปผลการวิจัย

การพัฒนาประสิทธิภาพของแก้วซิลิเกตเลเซอร์ SBAL และ SBALG และเพื่อปรับปรุงค่าyieldทางแสงของซิลิเกตเลเซอร์ ให้แสงส่องผ่านได้ดีโดยการเจือ ซีเรียมและเพอร์ซีโอโดเนียมที่ถูกเตรียมด้วยกระบวนการหลอมภายใต้บรรยากาศคาร์บอนมอนอกไซด์และอบอ่อนที่ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นั้นทำให้แก้วตัวอย่างมีสมบัติทางด้านการเปล่งแสงและซิลิเกตเลเซอร์ของแก้วตัวอย่าง SBAL:Ce, Pr และ SBALG:Ce, Pr การเปล่งแสงอยู่ที่ความยาวคลื่น 430 นาโนเมตร ซึ่งเป็นยอดหลักของตัวซีเรียมในการปลดปล่อยพลังงานจากชั้น 5d-4f และพิสูจน์ได้จากสเปกตรัมการคายพลังงานที่ทดสอบด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนส์ ในกรณีของแก้วตัวอย่าง SBALG:Ce, Pr ซึ่งมีตัวแกดโดลิเนียมอยู่ในโครงสร้างของแก้ว สามารถเห็นช่วงการดูดกลืนพลังงานที่ความยาวคลื่น 272 นาโนเมตร จากสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานและสเปกตรัมการกระตุ้นซึ่งมียอดของ Gd^{3+} เมื่อทำการกระตุ้นแก้วตัวอย่าง SBALG:Ce, Pr ที่ความยาวคลื่น 272 นาโนเมตร พบว่าสเปกตรัมการคายพลังงานของแกดโดลิเนียมอยู่ที่ช่วง 350-530 นาโนเมตร และมียอดอยู่ที่ประมาณ 430 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงการคายพลังงานของซีเรียม หมายความว่าแกดโดลิเนียมมีการถ่ายโอนพลังงานไปยังซีเรียมนั่นเอง เท่ากับเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการเปล่งแสงของแก้วตัวอย่าง SBALG:Ce, Pr ซึ่งส่งผลต่อสมบัติทางด้านซิลิเกตเลเซอร์ด้วย นอกจากนี้สมบัติทางด้านซิลิเกตเลเซอร์ของแก้วตัวอย่างด้วยเทคนิคเรดิโอลูมิเนสเซนส์ (RL) และyieldทางแสง (LY) โดยเปรียบเทียบกับผลึกมาตรฐาน BGO พบว่าแก้วตัวอย่าง SBAL:Ce, Pr และ SBALG:Ce, Pr เมื่อถูกทดสอบการตอบสนองต่อรังสีเอกซ์ (การทดสอบ RL) ได้ประสิทธิภาพเป็น

2.52% และ 7.83% ของผลึก BGO ตามลำดับ ในส่วนของการทดสอบค่าอิเล็กตรอนที่เปล่งด้วยอนุภาคอัลฟา พบว่าแก้วตัวอย่าง SBAL:Ce, Pr และ SBALG:Ce, Pr มีประสิทธิภาพอยู่ที่ 14.10 (1.20% ของ BGO) และ 20.37 (1.63% ของ BGO) ph/MeV ตามลำดับ ซึ่งถือว่ามีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำสำหรับวัสดุซิลิลเลเตอร์ เมื่อนำแก้วตัวอย่างไปทดสอบค่าการสลายตัวทางเวลา พบว่าแก้วตัวอย่างทั้งสองชนิดให้ค่าการสลายตัวทางเวลาที่น้อยมาก โดยอยู่ในระดับนาโนวินาทีและเป็นลักษณะเฉพาะที่เด่นมากของแก้วตัวอย่างชุดนี้ ที่ Fast component ของแก้วตัวอย่าง SBAL:Ce, Pr และ SBALG:Ce, Pr มีค่า 21 และ 25 นาโนวินาที ตามลำดับ ดังนั้นแก้วตัวอย่างจากงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นพวกอุปกรณ์ทางแสง เช่น โฟโตไดโอด อุปกรณ์วัดและตรวจจับสนิวทริโน อุปกรณ์รังสีทางการแพทย์ หรืออุปกรณ์ตรวจจับสนิวทริโนโดยไม่ทำลายชิ้นงาน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากงบประมาณเพื่อสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund; FF) จัดสรรงบประมาณจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ปีงบประมาณ พ.ศ. 2565 ผ่านการพิจารณาจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง ภายใต้รหัสโครงการ 50166 ขอขอบคุณสำหรับความอนุเคราะห์ของศูนย์เครื่องมือสาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง

เอกสารอ้างอิง

- Bartosiewicz, K., Horai, T., Yamaji, A., Yoshikawa, A., Kurosawa, S., Kim, K.J., Vistovsky, V., Voloshinovskii, A., & Zorenko, Y. (2021). Bright exciton luminescence from La doped Lu₃Al₅O₁₂ single crystals, *J. Lumin.*, 235, 118013.
- Becke, A.D. (2014). Perspective: Fifty years of density-functional theory in chemical physics. *J. Chem. Phys.*, 140, 18A301.
- Bertolaccini, M., Cova, S., & Bussolatti, C. (1968). A technique for absolute measurement of the effective photoelectron per keV yield in scintillation counters, In *Proceeding of the Nuclear Electronics Symposium*. (pp. 1-8). France : Versailles.
- Blasse, G., & Grabmaier, B.C. (1994). *Luminescent Materials*. Germany : Springer.



- Chewpraditkul, W., Pattanaboonmee, N., Yawai, N., Lertloypanyachai, P., Sreebunpeng, K., & Chen, D. (2019). Luminescence and scintillation properties of Ce^{3+} -doped $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-BaF}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$ glasses. *Optical Materials*, 98, 109468.
- Ghosh,, A.K. (1968). The nature of trapping and luminescence centers due to thallium in glass. *Phys. Chem. Solids Pergamon Press*, 29, 1387 – 1393.
- Kaewnuama, E., Wantana, N., Kaewkhao, J., & Kim, H.J. (2019). X-ray Induced Luminescence and Physical Properties of Lithium Lanthanum Borate Glass Doped with Ce^{3+} for Radiation Detection Material. *Materials Today: Proceedings*, 17, 1787–1793.
- Kohler, A. , & Bassler, H. (2015). *Electronic Processes in Organic Semiconductors*. Germany : Wiley-VCH.
- Lertloypanyachai, P., Yawai, N., Chewpraditkul, W., & Chen, D. (2021). Investigation CeF_3 Doped $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-BaF}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$ Glasses Effect on Luminescence and Scintillation Properties. *SNRU Journal of Science and Technology*, 3, 96-102.
- Lertloypanyachai, P., Chewpraditkul, W., Chen, D., V. Babin, V.,& Nikl, M. (2016). Luminescence and Scintillation Response of Ce^{3+} -doped Oxide Glasses with High Gd_2O_3 Content. *Key Engineering Materials*, 675-676, 434-437.
- Lertloypanyachai, P., Chewpraditkul, W., Chen, D., Babin, V.,& Nikl, M. (2017). Luminescence, scintillation, and energy transfer in $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{:Ce}^{3+}$, Pr^{3+} glasses. *Phys. Status Solidi A*, 214(9), 1700072.
- Lertloypanyachai, P., Chewpraditkul, W., Yawai, N., Sreebunpeng, K., & Nikl, M. (2023). Luminescence and light yield of Ce^{3+} -doped $(60-x) \text{SiO}_2\text{-}x\text{BaF}_2\text{-}20\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}20\text{Gd}_2\text{O}_3$ scintillation glasses: The effect of BaF_2 admixture. *Optical Materials*, 289, 171272.
- Pramchu S., Supatutkul C., & Srisakonsub P. (2022). Systematic first-principles study of $\text{Y}_3\text{Al}_{5-x}\text{Ga}_x\text{O}_{12}$ for the efficient predictions of structural properties and electronic structure. *RMUTSB Acad. J*, 10(2), 202-215.
- Ronda, C.R. (2008). *Luminescence from theory to applications*. Germany : Wiley-VCH.



Sun X., Yang Q., Xie P., Gao P., & Wu H. (2015). Effects of substitution of BaF_2 for GdF_3 on optical properties of dense oxyfluoride borogermanate scintillating glasses. *J. Rare Earths*, 33, 800-804.

Wu Y., & Ren G. (2013). Energy transfer and radiative recombination processes in $(\text{Gd, Lu})_3\text{Ga}_3\text{Al}_2\text{O}_{12}:\text{Pr}^{3+}$ scintillators. *Optical Materials*, 35, 2146–2154.