

สมบัติการเปล่งแสง และสมบัติทางกายภาพ ของแก้วลิเทียมอิตเทรียมบอเรตที่มีการเจือด้วย ไอออนของยูโรเปียม

The Photoluminescence and Physical Properties in Lithium Yttrium Borate Glass Doped with Eu^{3+}

เอกพล แก้วงาม^{1*} HongJoo Kim² ณัฐกฤตา จันทิมา^{1,3} และ จักรพงษ์ แก้วขาว^{1,3}

¹โปรแกรมวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

²Department of Physics, Kyungpook National University, Korea

³ศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีแก้วและวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

*eakgapon_9@hotmail.com

บทคัดย่อ

แก้วลิเทียมอิตเทรียมบอเรตที่ถูกเจือด้วยไอออนของยูโรเปียม (Eu^{3+}) ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (0.00 - 1.50 โมลเปอร์เซ็นต์) ถูกเตรียมขึ้นมาเพื่อทำการศึกษาสมบัติการเปล่งแสง และสมบัติทางกายภาพ จากการวิเคราะห์พบว่า ความหนาแน่นและปริมาตรเชิงโมลของแก้วมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามความเข้มข้นในการเจือ Eu^{3+} ที่เพิ่มขึ้น แก้วตัวอย่างมีการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นของแสงขาว (VIS) และช่วงใกล้อินฟราเรด (NIR) การกระตุ้นด้วยแสงในช่วง VIS ทำให้เกิดการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานของ Eu^{3+} จากสถานะพื้น 7F_0 และ 7F_1 ไปสู่สถานะถูกกระตุ้นขั้นต้น ต่อมาได้มีการลดระดับชั้นพลังงานโดยที่ไม่เกิดการเปล่งแสง ลงมาสู่สถานะ 5D_0 ก่อนที่ Eu^{3+} จะเปล่งแสงออกไป แสงที่มีความยาวคลื่น 613 นาโนเมตร (${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_1$) ถูกปล่อยออกมาด้วยความเข้มที่สูงที่สุด โดยอาศัยการกระตุ้นด้วยแสงที่มีความยาวคลื่น 394 นาโนเมตร ความเข้มของแสงที่เปล่งออกมามีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเจือของ Eu^{3+}

คำสำคัญ: ยูโรเปียม, แก้วบอเรต, โฟโตลูมิเนสเซนซ์, ปริมาตรเชิงโมล

Abstract

Lithium Yttrium borate glasses with different Eu^{3+} doped concentration (0.00 - 1.50 mol%) were prepared for analyzing the photoluminescence and physical properties. The density and molar volume of glasses tended to increase with increasing of Eu^{3+} concentration. These glass samples absorbed photons in visible light (VIS) and near-infrared (NIR) region. The excitation by photon in VIS region caused the energy state of Eu^{3+} shift from 7F_0 and 7F_1 ground state to initial excited stated. The nonradiative relaxation (NR) occurred causing the energy state decay to 5D_0 before Eu^{3+} emitted photons. The strongest emission of 613 nm wavelength (${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_1$) were observed by pumping with 394 nm photon. The intensity of emission increased with increasing of Eu^{3+} doped concentration.

Keywords: Europium, Borate glass, Photoluminescence, Molar volume

1. บทนำ

ในปัจจุบันวัสดุซึ่งมีการเปล่งแสงโดยอาศัยสมบัติการเกิดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence) ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานต่าง ๆ ที่หลากหลาย โดยเฉพาะในอุปกรณ์ตรวจจับรังสี และอุปกรณ์ให้กำเนิดแสงแบบต่าง ๆ ผลึกของสารประกอบลิเทียมอิตเทรียมบอเรต ที่มีการเจือด้วยไอออนของธาตุกลุ่มแลนทาไนด์ ($\text{Li}_6\text{Y}(\text{BO}_3)_3: \text{Ln}^{3+}$) เป็นวัสดุที่ถูกนำไปศึกษาค้นคว้าวิจัยอย่างกว้างขวาง โดยเป็นที่คาดว่าจะเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในหัวตรวจจับนิวตรอนแบบซินทิลเลเตอร์ (Scintillator) และในอุปกรณ์ให้กำเนิดแสงเลเซอร์ที่มีศักยภาพในอนาคต การพัฒนาหัวตรวจจับนิวตรอนแบบซินทิลเลเตอร์ในช่วงแรก ๆ นั้น ผลึก $\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3: \text{Ce}^{3+}$ ได้ถูกสังเคราะห์ขึ้นมาก่อน เนื่องจากลิเทียม แกโดลิเนียม และโบรอน มีค่าภาคตัดขวางในการตรวจจับนิวตรอน (Neutron capture cross section) ที่สูง (van Eijk, 2004: 337 & Singh et al., 2013: 208) แต่จากการศึกษาพบว่า เมื่อนิวตรอนได้จับตัวกับแกโดลิเนียมในผลึกดังกล่าว รังสีแกมมาพลังงานสูงจะถูกปล่อยออกมาเนื่องจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ และสามารถพุ่งทะลุผ่านออกมาจากหัววัดซินทิลเลเตอร์ที่บางได้ (van Eijk, 2004: 337) นอกจากนี้ผลึกดังกล่าว ยังมีความอ่อนไหวต่อรังสีแกมมาพื้นหลัง (Gamma ray background) ที่เกิดจากแหล่งจ่ายนิวตรอนแบบสเปลลาชัน (Neutron spallation source) อีกด้วย การแทนที่แกโดลิเนียมด้วยอิตเทรียม (เปลี่ยนโครงสร้างผลึกจาก $\text{Li}_6\text{Y}(\text{BO}_3)_3$ เป็น $\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3$) สามารถแก้ไขปัญหานี้ (Yavetskiy et al., 2007: 77) รวมทั้งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของโบรอนในผลึกสำหรับการตรวจจับนิวตรอนได้ (Czirr et al., 1999: 15) สำหรับการประยุกต์ใช้งานทางด้านเลเซอร์นั้น ในช่วงแรกผลึก $\text{Li}_6\text{Y}(\text{BO}_3)_3: \text{Nd}^{3+}$ ได้ถูกวิจัยค้นคว้าและพบว่ามีความ fluorescence quenching effect อย่างอ่อน และค่า lasing threshold ต่ำ ซึ่งเหมาะต่อการนำไปใช้เป็นวัสดุเปล่งแสงในอุปกรณ์เลเซอร์เป็นอย่างมาก (Luo et al., 1991: K5) ต่อมาผลึก $\text{Li}_6\text{Y}(\text{BO}_3)_3: \text{Yb}^{3+}$ ได้ถูกนำไปใช้เป็นวัสดุสื่อกระตุ้น (Active medium) เพื่อทำให้เกิดการเปล่งแสงในเลเซอร์แบบ Short pulse (Sablayrolles et al., 2005: 1681) และผลึก $\text{Li}_6\text{Y}(\text{BO}_3)_3: \text{Er}^{3+}$ ได้ถูกศึกษาเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์เลเซอร์ที่มีความปลอดภัยต่อสายตาตามนุษย์ (Eye-safe laser) (Zhao et al., 2006: 418) ตามลำดับ จากที่ได้กล่าวมาในข้างต้นจะเห็นได้ว่า $\text{Li}_6\text{Y}(\text{BO}_3)_3: \text{Ln}^{3+}$ มีสมบัติการเปล่งแสงและการประยุกต์ใช้ในงานที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก แต่ที่ผ่านมามีวัสดุดังกล่าวส่วนใหญ่ถูกเตรียมขึ้นมาให้อยู่ในรูปแบบของผลึก และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างวัสดุผลึกกับแก้วพบว่า แก้วมีความสมบัติที่ดีกว่าผลึกในด้านความหลากหลายของขนาดและรูปร่างที่ได้จากการเตรียม รวมทั้งแก้วสามารถถูกเจือสารลงไปในปริมาณที่มากกว่าผลึกโดยไม่ทำลายโครงสร้างภายในวัสดุ

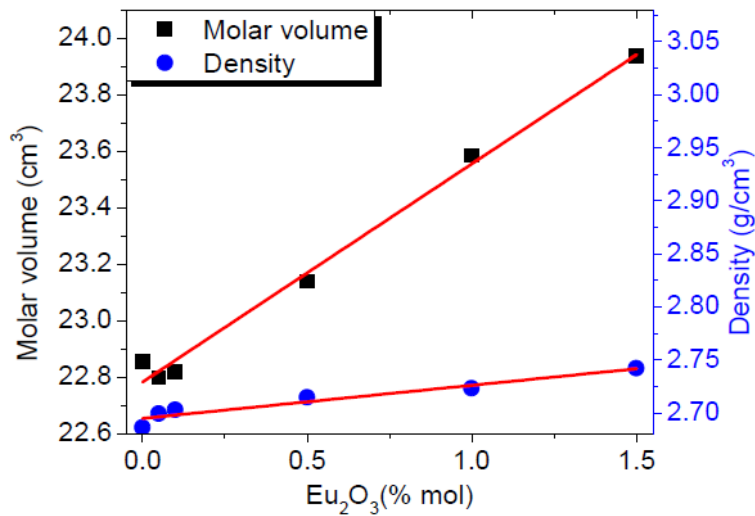
ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงทำการศึกษาสมบัติการเปล่งแสง และสมบัติทางกายภาพของแก้วลิเทียมอิตเทรียมบอเรตที่ถูกเจือด้วยไอออนของธาตุกลุ่มแลนทาไนด์ ($\text{LiYBO}_3: \text{Ln}^{3+}$) โดย Ln^{3+} ที่ถูกเจือลงไปนั้น ผู้วิจัยได้เลือกใช้ Eu^{3+} เนื่องจากในงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า Eu^{3+} มีการเปล่งแสงที่มีความเข้มสูงในช่วงแสงสีแดงเมื่อถูกเจือลงในสารประกอบ $\text{Li}_6\text{Y}(\text{BO}_3)_3$. (Yavetskiy et al., 2007: 77, Ju et al., 2011: 1297 & Jubera et al., 2003: 1)

2. วิธีการทดลอง

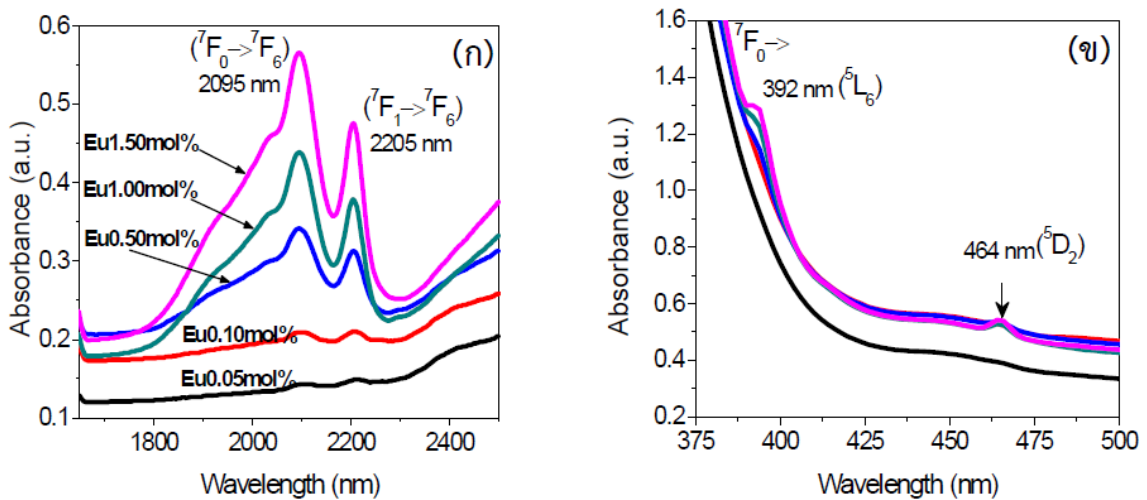
แก้ว $\text{LiYBO}_3: \text{Eu}^{3+}$ ในงานวิจัยนี้ถูกเตรียมขึ้นมาโดยใช้ระบบองค์ประกอบทางเคมีเป็น $60\text{Li}_2\text{O} - 10\text{Y}_2\text{O}_3 - (30-x)\text{B}_2\text{O}_3 - (x)\text{Eu}_2\text{O}_3$ เมื่อ x มีค่าเท่ากับ 0.00, 0.05, 0.10, 0.50, 1.00 and 1.50 โมลเปอร์เซ็นต์ แก้วดังกล่าวถูกสังเคราะห์ด้วยเทคนิคการหลอมแล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Melt quenching technique) โดยผสมสารเคมี Li_2CO_3 , Y_2O_3 , H_3BO_3 และ Eu_2O_3 ที่มีน้ำหนักรวม 10 กรัม ลงในเข้าหลอมอะลูมินา และนำไปหลอมในเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง หลังจากนั้น สารเคมีที่หลอมเหลวดังกล่าวจะถูกนำออกมาเทลงในแม่พิมพ์เหล็กสแตนเลสที่อุณหภูมิห้อง เพื่อจัดรูปเป็นชิ้นงาน ชิ้นงานที่กำลังเย็นตัวจะถูกนำไปอบอ่อนที่อุณหภูมิ 300 °C นาน 3 ชั่วโมง เพื่อลดความเครียดที่เกิดขึ้นจากการเย็นตัวในเนื้อแก้ว แก้ว $\text{LiYBO}_3: \text{Eu}^{3+}$ ที่เตรียมได้ถูกนำไปศึกษาความหนาแน่น (ρ) โดยอาศัยหลักการของอาร์คิมิดีส (Archimedes principle) ซึ่งมีการวัดน้ำหนักของแก้วในอากาศและในน้ำโดยใช้อุปกรณ์ไมโครบาลานซ์แบบ 4-digit sensitive (AND, HR-200) หลังจากนั้น ρ ที่วัดได้จะถูกนำไปคำนวณเพื่อหาค่าปริมาตรเชิงโมล (Molar volume; V_M) โดยอาศัยความสัมพันธ์ $V_M = M_T/\rho$ เมื่อ M_T คือน้ำหนักโมเลกุลโดยรวมขององค์ประกอบทางเคมีในแก้วตัวอย่าง สำหรับการดูดกลืนแสงของแก้วนั้น ถูกศึกษาด้วยเครื่อง UV-VIS-NIR สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Shimadzu, UV-3600) ขณะที่สมบัติการเปล่งแสงนั้น ได้มีการศึกษาสเปกตรัมของการถูกกระตุ้น (Excitation spectra) และการเปล่งแสง (Emission spectra) ในแก้วตัวอย่างโดยใช้เครื่องฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Cary Eclipse) ที่มีหลอดซินอนเป็นแหล่งกำเนิดแสง

3. ผลการวิจัย

แก้ว LiYBO: Eu³⁺ ที่เตรียมได้มีลักษณะสีเหลืองอ่อน มีความใสและโปร่งแสงเป็นอย่างดี ความหนาแน่นและปริมาตรเชิงโมลของแก้วดังกล่าว มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามความเข้มข้นในการเจือของ Eu₂O₃ ดังแสดงในรูปภาพที่ 1 ในส่วนของความหนาแน่นนั้นสามารถอธิบายได้ว่า เกิดจากการที่ Eu₂O₃ มีมวลโมเลกุลมากกว่า B₂O₃ และจากสูตรองค์ประกอบทางเคมีของแก้วที่แสดงไว้ข้างต้นนั้น Eu₂O₃ ถูกเจือลงไปแทนที่โดยไปแทนที่ปริมาณของ B₂O₃ ทำให้หน้าหนักเฉลี่ยของไอออนออกไซด์ในแก้วมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นของแก้วมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น สำหรับปริมาตรเชิงโมลของแก้วที่เพิ่มขึ้นนั้นเกิดจากการเพิ่มปริมาณของ Non-bridging oxygen (NBOs) ในโครงข่ายแก้ว โดยเมื่อ Eu³⁺ ถูกเจือเข้าไปเนื้อแก้ว ไอออนดังกล่าวจะประพฤติตัวเป็นโมดิฟายเออ (Modifier) ซึ่งจะทำลายออกซิเจนที่เป็นสะพานเชื่อมต่อประจุ และทำให้เกิดช่องว่างภายในโครงข่ายแก้ว ปริมาตรเชิงโมลของแก้วจึงมีการขยายตัวขึ้น



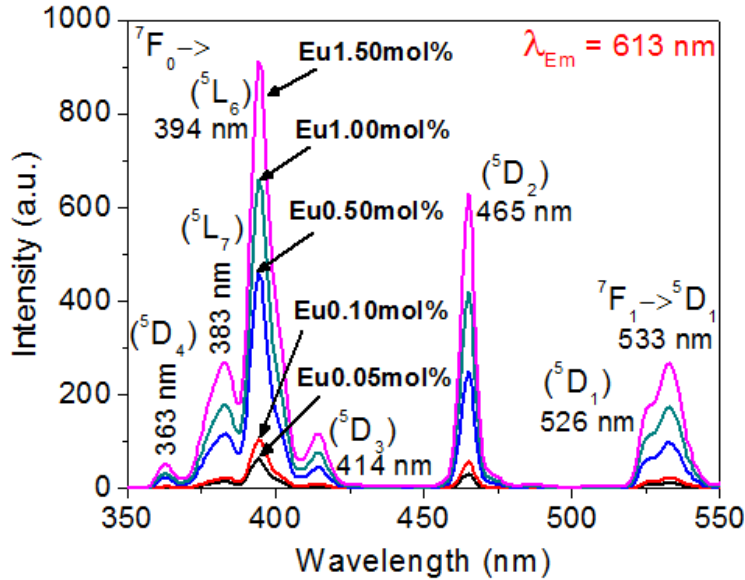
รูปภาพที่ 1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่นและปริมาตรเชิงโมลของแก้ว LiYBO: Eu³⁺ กับความเข้มข้นในการเจือ Eu₂O₃



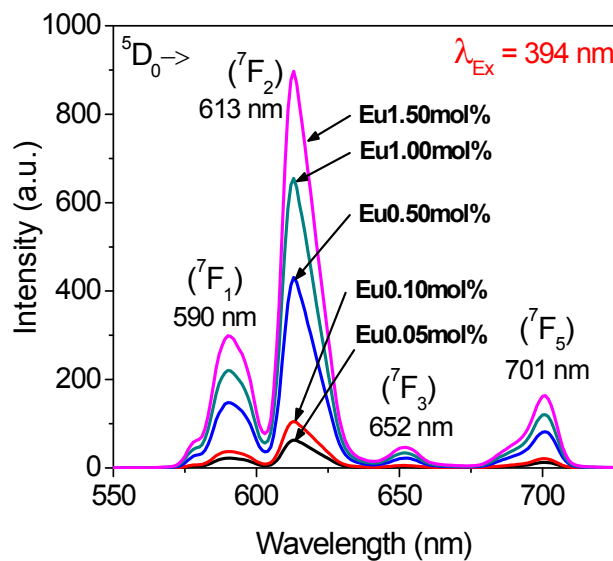
รูปภาพที่ 2 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วง (ก) NIR และ (ข) VIS ของแก้ว LiYBO:Eu³⁺

จากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของแก้ว LiYBO:Eu³⁺ ที่แสดงในรูปภาพที่ 2(ก) และ 2(ข) พบว่า แก้วดังกล่าวมีการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นใกล้อินฟราเรด (NIR) และช่วงแสงที่ตามองเห็น (VIS) ตามลำดับ พีกที่ปรากฏในสเปกตรัมของการดูดกลืนเหล่านี้แสดงให้เห็นว่า Eu³⁺ มีการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานจากสถานะพื้น ⁷F₀ และ ⁷F₁ ไปสู่ระดับชั้นพลังงานที่สูงกว่า โดยในช่วง NIR การดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 2095 และ 2205 นาโนเมตร มีการปรากฏขึ้นอย่างเด่นชัด ซึ่งแสดง

ถึงการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงาน ${}^7F_0 \rightarrow {}^7F_6$ และ ${}^7F_1 \rightarrow {}^7F_6$ ตามลำดับ สำหรับในช่วง VIS นั้น พบการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 392 และ 464 นาโนเมตร ทำให้ทราบได้ว่า Eu^{3+} มีการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงาน ${}^7F_0 \rightarrow {}^5L_6$ และ ${}^7F_0 \rightarrow {}^5D_2$ เกิดขึ้นตามลำดับ (Li et al., 2007: 367 & Balaji et al., 2007: 62) นอกจากนี้พบว่า เมื่อมีการเจือ Eu^{3+} ลงไปในแก้ว LiYBO มากขึ้น การดูดกลืนแสงและการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานเหล่านี้จะเกิดได้มากขึ้น โดยสังเกตได้จากการที่พีคของสเปกตรัมของการดูดกลืนดังกล่าวมีความแหลมคมมากขึ้นตามความเข้มข้นของ Eu_2O_3 ที่เป็นองค์ประกอบในแก้ว



รูปภาพที่ 3 สเปกตรัมการของการถูกกระตุ้นของแก้ว LiYBO:Eu^{3+} ที่ความยาวคลื่น 613 นาโนเมตร

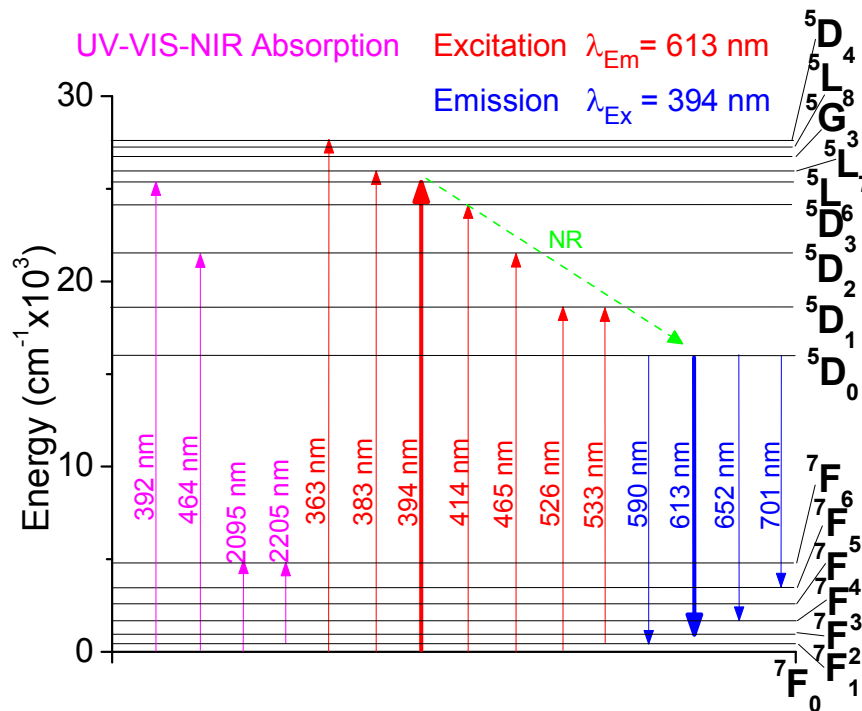


รูปภาพที่ 4 สเปกตรัมการของการเปล่งแสงของแก้ว LiYBO:Eu^{3+} ที่ความยาวคลื่น 394 นาโนเมตร

ผลการศึกษสมบัติการเปล่งแสงของแก้ว LiYBO:Eu^{3+} ประกอบไปด้วยผลการวัดสเปกตรัมของการถูกกระตุ้น และการเปล่งแสง ดังแสดงในรูปภาพที่ 3 และ 4 ตามลำดับ โดยในกรณีนี้ที่แก้วตัวอย่างมีการเปล่งแสงความยาวคลื่น 613 นาโนเมตร นั้น มีการพบพีคสเปกตรัมของการถูกกระตุ้นทั้งหมด 7 พีค (รูปภาพที่ 3) แสดงถึงการที่ Eu^{3+} ได้ถูกกระตุ้นด้วยแสงที่มีความยาวคลื่น 363, 383, 394, 414, 465, 526 และ 533 นาโนเมตร ทำให้เกิดการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานจากสถานะพื้นไปสู่ระดับชั้นพลังงานที่สูงกว่า ได้แก่ ${}^7F_0 \rightarrow {}^5D_4$ (363 นาโนเมตร), 5L_7 (383 นาโนเมตร), 5L_6 (394 นาโนเมตร), 5D_3 (414 นาโนเมตร), 5D_2 (465 นาโนเมตร), 5D_1 (526 นาโนเมตร) (Li et al., 2007: 367) และ ${}^7F_1 \rightarrow {}^5D_1$ (533 นาโนเมตร) (Ju et al., 2011: 1297) ตามลำดับ พีคของการถูกกระตุ้นด้วยแสงที่มีความยาวคลื่น 394 และ 465 นาโนเมตร นั้น มีความ

สอดคล้องกับผลสเปกตรัมของการดูดกลืนแสงในย่าน VIS ที่ได้แสดงไปก่อนหน้านี้ จากสเปกตรัมของการถูกกระตุ้นดังกล่าว พิกัดที่ความยาวคลื่น 394 นาโนเมตร นั้น แสดงความเข้มของการถูกกระตุ้นออกมามากที่สุด ดังนั้น ผู้วิจัยจึงทำการศึกษา สเปกตรัมของการเปล่งแสง โดยการกระตุ้นแก้วตัวอย่างด้วยแสงความยาวคลื่น 394 นาโนเมตร พิกัดที่ปรากฏขึ้นเนื่องจากการ เปล่งแสงมีทั้งหมด 4 พิก (รูปภาพที่ 4) ซึ่งแสดงถึงการที่ Eu^{3+} มีการเปล่งแสงที่ความยาวคลื่น 590, 613, 652 และ 701 นา โนเมตร ออกมา โดยอาศัยการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานจากสถานะที่ถูกกระตุ้น $^5\text{D}_0$ ไปสู่ระดับชั้นพลังงานที่ต่ำกว่า เช่น $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_1$ (590 นาโนเมตร), $^7\text{F}_2$ (613 นาโนเมตร), $^7\text{F}_3$ (652 นาโนเมตร) และ $^7\text{F}_5$ (701 นาโนเมตร) (Li et al., 2007: 367) ตามลำดับ ซึ่งแสงที่มีความยาวคลื่น 613 นาโนเมตร ถูกปล่อยออกมาด้วยความเข้มที่สูงที่สุด นอกจากนี้พบว่าความเข้ม ของการเปล่งแสงดังกล่าวมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณการเจือ Eu^{3+} ในแก้ว

แผนภาพโดยรวมของการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานทั้งหมดเนื่องจากสเปกตรัมของแก้ว LiYBO:Eu^{3+} ที่ศึกษาได้ใน งานวิจัยนี้ แสดงอยู่ในรูปภาพที่ 5 ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่า เมื่อ Eu^{3+} ถูกกระตุ้นด้วยแสงและระดับชั้นพลังงานเกิดการ เปลี่ยนแปลงจากสถานะพื้น $^7\text{F}_0$ และ $^7\text{F}_1$ ขึ้นไปสู่สถานะที่ถูกกระตุ้นขั้นต้นแล้ว ในช่วงแรก ไอออนดังกล่าวมีการลดระดับชั้น พลังงานลงมาสู่สถานะที่มีพลังงานต่ำกว่า ($^5\text{D}_0$) โดยไม่ได้มีการเปล่งแสงออกมา (Nonradiative relaxation; NR) ซึ่งคาดว่า มีสาเหตุมาจากการสูญเสียพลังงานไปให้กับการสั่นของโครงร่างแก้วเนื่องจากความร้อนที่เรียกว่า โฟนอน (Phonon) หลังจากนั้น Eu^{3+} จึงมีการลดระดับชั้นพลังงานลงมาจากสถานะ $^5\text{D}_0$ โดยการเปล่งแสงออกมา



รูปภาพที่ 5 แผนภาพการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานเนื่องจากการเกิดสเปกตรัมของ Eu^{3+} ในแก้ว LiYBO:Eu^{3+} (Li et al., 2007: 367)

4. สรุปผลการวิจัย

แก้ว LiYBO:Eu^{3+} ที่เตรียมได้มีลักษณะสีเหลืองอ่อนและใสโปร่งแสง ความหนาแน่นและปริมาตรเชิงโมลของแก้วมี แนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของการเจือ Eu_2O_3 ที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งมีสาเหตุมาจากการที่ B_2O_3 ถูกแทนที่ด้วย Eu_2O_3 ซึ่งมี มวลโมเลกุลที่มากกว่า และการที่ Eu^{3+} ทำให้เกิดการเพิ่มจำนวนขึ้นของ NBOs ในโครงร่างแก้ว ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ สเปกตรัมของการดูดกลืนแสง, สเปกตรัมของการถูกกระตุ้น และสเปกตรัมของการเปล่งแสง ทำให้สามารถสรุปได้ว่า แก้ว ตัวอย่างมีการดูดกลืนแสงทั้งในช่วงของ VIS และ NIR โดยเมื่อการดูดกลืนในช่วง VIS เกิดขึ้น Eu^{3+} ที่ถูกเจืออยู่ในแก้วจะมีการ

เปลี่ยนระดับชั้นพลังงานจากสถานะพื้น 7F_0 และ 7F_1 ไปสู่ระดับชั้นพลังงานที่สูงกว่า หลังจากนั้น NR ได้เกิดขึ้นและลดลงระดับชั้นพลังงานลงสู่สถานะ 5D_0 ก่อนที่จะมีการเปล่งแสงออกไป นอกจากนี้พบว่า การกระตุ้นด้วยแสงที่มีความยาวคลื่น 394 นาโนเมตร ทำให้ Eu^{3+} เกิดการเปล่งแสงที่มีความยาวคลื่น 613 นาโนเมตร ออกมาด้วยความเข้มสูงสุด โดยความเข้มของการเปล่งแสงดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเจือของ Eu^{3+} ในแก้ว $LiYBO$

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีแก้วและวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) สำหรับความอนุเคราะห์และการสนับสนุนงานวิจัยนี้เป็นอย่างดี

6. เอกสารอ้างอิง

- Balaji, S. Abdul Azeem, P. & Reddy, R.R. (2007). Absorption and emission properties of Eu^{3+} ions in Sodium fluoroborate glasses. **Physica B**, (394), 62–68.
- Czirr, J.B. MacGillivray, G.M. MacGillivray, R.R. & Seddon, P.J. (1999). Performance and characteristics of a new scintillator. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A**, (424), 15-19.
- Ju, G. Hu, Y. Wu, H. Yang, Z. Fu, C. Mu, Z. & Kang, F. (2011). A red-emitting heavy doped phosphor $Li_6Y(BO_3)_3:Eu^{3+}$ for white light-emitting diodes. **Optical Materials**, (33), 1297–1301.
- Jubera, V. Chaminade, J.P. Garcia, A. Guillen, F. & Fouassier, C. (2003). Luminescent properties of Eu^{3+} -activated lithium rare earth borates and oxyborates. **Journal of Luminescence**, (101), 1–10.
- Li, Y. Chang, Y. Lin, Y. Chang, Y. & Lin, Y. (2007). Synthesis and luminescent properties of Ln^{3+} (Eu^{3+} , Sm^{3+} , Dy^{3+})-doped lanthanum aluminum germanate $LaAlGe_2O_7$ phosphors. **Journal of Alloys and Compounds**, (439), 367–375.
- Luo, Z. Zhang, H. Huang, Y. Qiu, M. Huang, Y. Tu, C. & Jiang, A. (1991). Study of $Li_6Y(BO_3)_3Nd^{3+}$ Crystal- A new laser crystal. **Crystal Research and Technology**, (26), K5.
- Sablaylorles, J. Jubera, V. Chaminade, J.P. Manek-Ho'nninger, I. Murugan, S. Cardinal, T. Olazcuaga, R. Garcia, A. & Salin, F. (2005). Crystal growth, Luminescent and lasing properties of the ytterbium doped $Li_6Y(BO_3)_3$ compound. **Optical Materials**, (27), 1681–1685.
- Singh, A.K. Tyagi, M. Singh, S.G. Desai, D.G. Sen, S. & Gadkari, S.C. (2013). Understanding energy transfer in Ce doped $Li_6Gd(BO_3)_3$: A study of millisecond decay kinetics in 77–300 K range. **Journal of Luminescence**, (137), 208–213.
- van Eijk, C.W.E. (2004). Inorganic scintillators for thermal neutron detection. **Radiation Measurements**, (38), 337 – 342.
- Yavetskiy, R.P. Tolmachev, A.V. Dolzhenkova, E.F. & Baumer, V.N. (2007). Thermally stimulated luminescence mechanism of $Li_6Y(BO_3)_3:Eu^{3+}$ single crystals, **Journal of Alloys and Compounds**, (429), 77–81.
- Zhao, Y. Gong, X. Lin, Y. Luo, Z. & Huang, Y. (2006). Growth and spectral properties of $Er^{3+}:Li_6Y(BO_3)_3$ crystal. **Materials Letters**, (60), 418–421.