

การเปล่งแสงสีส้มของแก้วลิเทียมอิตเทรียมบอเรตที่มีการเจือด้วยไอออนของซามาเรียม

The Orange Emission of Lithium Yttrium Borate Glass Doped with Sm³⁺

เอกพล แก้วงาม^{1*}, Hong Joo Kim², C.K. Jayasankar³
ณัฐกฤตา จันทิมา^{1,4} และ จักรพงษ์ แก้วขาว^{1,4}

¹โปรแกรมวิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

²Department of Physics, Kyungpook National University, Korea

³Department of Physics, Sri Venkateswara University, India

⁴ศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีแก้วและวัสดุศาสตร์มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

*eakgapon_9@hotmail.com

บทคัดย่อ

แก้วลิเทียมอิตเทรียมบอเรตที่เจือด้วยไอออนของซามาเรียม (Sm³⁺) ความเข้มข้นในช่วงร้อยละ 0.00 - 1.50 โดยโมล ถูกเตรียมขึ้นเพื่อทำการศึกษาลักษณะการเปล่งแสง จากการวิเคราะห์ พบว่า แก้วตัวอย่างมีการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นของแสงขาว (VIS) และช่วงอินฟราเรดใกล้ (NIR) การกระตุ้นแก้วด้วยแสงความยาวคลื่น 403 และ 470 นาโนเมตร ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงานของ Sm³⁺ จากสถานะพื้น ⁶H_{5/2} ไปสู่สถานะถูกกระตุ้นขั้นต้น ⁶P_{3/2} และ ⁴I_{11/2} ตามลำดับ ต่อมาทั้งคู่ได้มีการลดระดับชั้นพลังงานโดยที่ไม่เกิดการเปล่งแสง ลงมาสู่สถานะ ⁴G_{5/2} ก่อนที่ Sm³⁺ จะเปล่งแสงออกไป แสงความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร (⁴G_{5/2} → ⁶H_{7/2}) ถูกปล่อยออกมาได้อย่างเด่นชัดมากที่สุดโดยอาศัยการกระตุ้นด้วยแสงความยาวคลื่น 403 นาโนเมตร และจากวิเคราะห์มาตรฐานสี CIE 1931 พบว่า แสงที่เปล่งออกมาจากแก้วชนิดนี้เป็นแสงสีส้มเข้ม

คำสำคัญ: ซามาเรียม, แก้วบอเรต, การเปล่งแสง

Abstract

Lithium Yttrium borate glasses with Sm³⁺ doped concentration between 0.00-1.50 mol% were prepared for analyzing the photoluminescence properties. Glass samples absorbed photons in visible light (VIS) and near-infrared (NIR) region. The excitation by photon with 403 and 470 nm made the energy states of Sm³⁺ shift from ⁶H_{5/2} ground state to initial excited state ⁶P_{3/2} and ⁴I_{11/2}, respectively. Then nonradiative relaxation (NR) then occurred causing both energy state decay to ⁴G_{5/2} before Sm³⁺ emitted photons. The strongest emission of 600 nm (⁴D₀ → ⁷F₁) were observed by pumping of 403 nm photon. The analysis of CIE 1931 chromaticity showed that the light emitting from this glass is clearly intense orange.

Keywords: samarium, borate glass, photoluminescence

1. บทนำ

ในปัจจุบันวัสดุที่มีการเปล่งแสงโดยอาศัยสมบัติการเกิดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (photoluminescence) ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ ที่หลากหลาย ผลึกของสารประกอบลิเทียมอิตเทรียมบอเรตที่มีการเจือด้วยไอออนของธาตุกลุ่ม

แลนทาไนด์ ($\text{Li}_6\text{Y}(\text{BO}_3)_3:\text{Ln}^{3+}$) เป็นวัสดุที่น่าสนใจ เนื่องจากมีศักยภาพที่ดีต่อการนำไปใช้เป็นวัสดุตัวกลางเลเซอร์ (laser medium) ในอุปกรณ์ให้กำเนิดแสงเลเซอร์ต่างๆ ไอออนของธาตุกลุ่มแลนทาไนด์ (lanthanide; Ln^{3+}) ที่นำมาเจือปนนั้น ส่วนใหญ่เป็น Ln^{3+} ที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงาน 4f-4f ซึ่งมีช่วงเวลาการเปล่งแสง (life time) ยาว ยกตัวอย่างเช่น ในการวิจัยช่วงแรกๆ ผลึก $\text{Li}_6\text{Y}(\text{BO}_3)_3:\text{Nd}^{3+}$ ได้ถูกศึกษาค้นคว้าโดยพบว่า วัสดุดังกล่าวมี fluorescence quenching effect อย่างอ่อน (ปริมาณของสารเจือ Ln^{3+} มีผลเพียงเล็กน้อยต่อการลดความเข้มแสง) และค่า lasing threshold ต่ำ จึงเหมาะต่อการนำไปใช้เป็นวัสดุตัวกลางเลเซอร์เป็นอย่างมาก (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) หลังจากนั้นผลึก $\text{Li}_6\text{Y}(\text{BO}_3)_3:\text{Er}^{3+}$ ได้ถูกศึกษาเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์เลเซอร์ที่มีความปลอดภัยต่อสายตามนุษย์ (Eye-save laser) (Zhao et al., 2006: 418) เป็นต้น เมื่อ Ln^{3+} ถูกเจือเข้าไปในวัสดุที่มีโครงสร้างของสารประกอบ $\text{Y}(\text{BO}_3)_3$ นั้น Ln^{3+} จะถูกล้อมรอบด้วยสภาพแวดล้อมที่มีความไม่สมมาตร (asymmetric) ซึ่งสภาวะดังกล่าวได้ช่วยสนับสนุนการเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงานแบบคู่ขั้วไฟฟ้า (electric dipole transition) ภายในระดับชั้นพลังงาน 4f ได้เป็นอย่างดี ทำให้อุปกรณ์เลเซอร์ที่ใช้วัสดุดังกล่าวเป็นตัวกลางมีการเปล่งแสงที่มีความเข้มสูง (Jubera et al., 2003: 2) จากที่ได้กล่าวมาในข้างต้นจะเห็นได้ว่า $\text{Li}_6\text{Y}(\text{BO}_3)_3:\text{Ln}^{3+}$ เป็นวัสดุที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นวัสดุตัวกลางเลเซอร์เป็นอย่างมาก แต่ที่ผ่านมามีวัสดุดังกล่าวส่วนใหญ่ถูกเตรียมขึ้นมาในรูปแบบของผลึก และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างวัสดุผลึกกับวัสดุแก้วพบว่า แก้วมีคุณสมบัติที่ดีกว่าผลึกในด้านของขั้นตอนการเตรียมที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อนและราคาถูกกว่าผลึก รวมทั้งแก้วสามารถถูกเจือสารลงไปได้ในปริมาณที่มากกว่าผลึกโดยไม่ทำลายโครงสร้างภายในวัสดุ

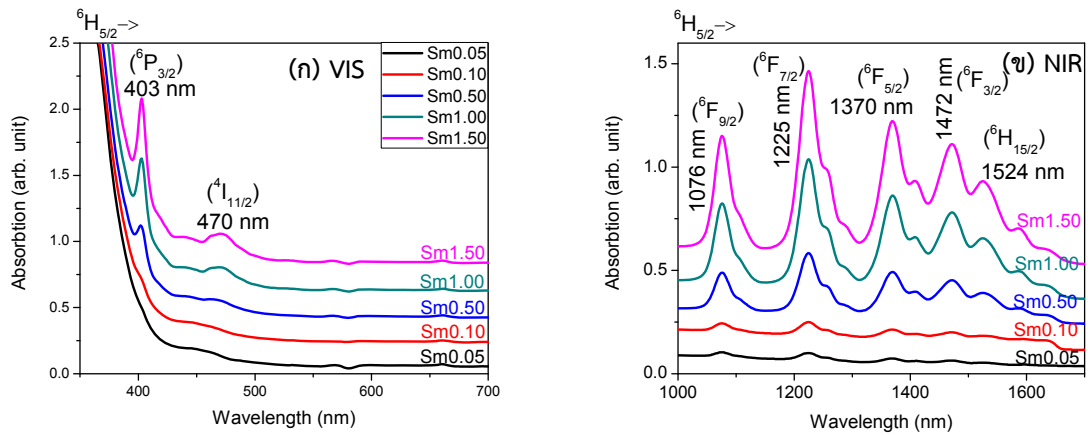
ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงทำการศึกษาสมบัติการเปล่งแสงของแก้วลิเทียมอิตเทรียมบอเรตที่ถูกเจือด้วยไอออนของธาตุกลุ่มแลนทาไนด์ ($\text{LiYBO}:\text{Ln}^{3+}$) โดย Ln^{3+} ที่ถูกเจือลงไปนั้น ผู้วิจัยได้เลือกใช้ Sm^{3+} เนื่องจากในงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า Sm^{3+} มีการเปล่งแสงที่มีความเข้มสูงในช่วงแสงสีแดง-ส้ม เมื่อถูกเจือลงในแก้วบอเรตชนิดอื่นๆ ได้แก่ แก้วสังกะสีอะลูมิเนียมบอเรต (Swapna et al., 2014: 53) แก้วแคดเมียมบอเรต (Sailaja et al., 2013: 29) และแก้วลิเทียมสังกะสีบอเรต (Thomas et al., 2013: 106) เป็นต้น

2. วิธีการทดลอง

แก้ว $\text{LiYBO}:\text{Sm}^{3+}$ ที่มีสูตรองค์ประกอบทางเคมีเป็น $60\text{Li}_2\text{O}-10\text{Y}_2\text{O}_3-(30-x)\text{B}_2\text{O}_3-(x)\text{Sm}_2\text{O}_3$ เมื่อ x มีค่าเท่ากับ 0.00, 0.05, 0.10, 0.50, 1.00 และ 1.50 โมลเปอร์เซ็นต์ถูกเตรียมขึ้นด้วยเทคนิคการหลอมแล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (melt quenching technique) โดยผสมสารเคมี Li_2CO_3 , Y_2O_3 , H_3BO_3 และ Sm_2O_3 ที่มีน้ำหนักรวม 10 กรัม เข้าด้วยกันในบ้ำ หลอมอะลูมินา และนำไปหลอมในเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง หลังจากนั้น สารเคมีที่อยู่ในสถานะหลอมเหลว ถูกนำออกมาเทลงในแม่พิมพ์เหล็กสแตนเลสที่มีความร้อนเพื่อจัดรูปเป็นชิ้นงาน ชิ้นงานที่กำลังเย็นตัวจะถูกนำไปอบในเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 300 °C นาน 3 ชั่วโมง เพื่อลดความเครียด (strain) ที่เกิดขึ้นในเนื้อแก้วเนื่องจากการเย็นตัว แก้ว $\text{LiYBO}:\text{Sm}^{3+}$ ที่เตรียมได้ถูกนำไปศึกษาการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS-NIR สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Shimadzu, UV-3600) เพื่อวิเคราะห์ความยาวคลื่นแสงที่เหมาะสมซึ่งจะใช้ในการกระตุ้นแก้ว หลังจากนั้นนำความยาวคลื่นดังกล่าวไปศึกษาสมบัติการเปล่งแสงของแก้วโดยใช้เครื่องฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Cary Eclipse) ที่มีหลอดขึ้นอนเป็นแหล่งกำเนิดแสง ต่อมานำสเปกตรัมของการเปล่งแสง (emission spectrum) มาวิเคราะห์สีโดยใช้มาตรฐาน CIE 1931 chromaticity

3. ผลการวิจัย

3.1 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนแสง

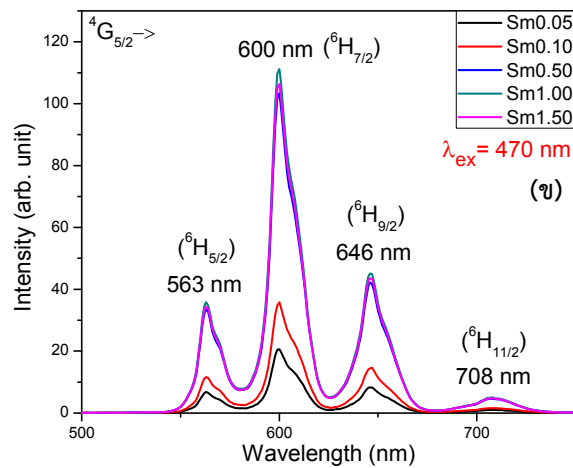
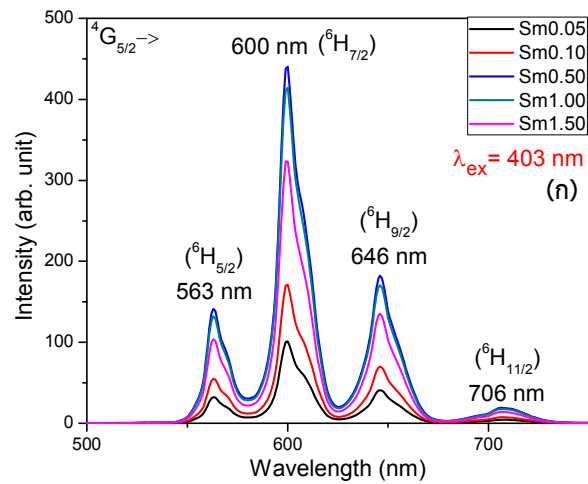


รูปภาพที่ 2 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วง (ก)VIS และ (ข)NIR ของแก้ว LiYBO:Sm³⁺

จากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของแก้ว LiYBO:Sm³⁺ ที่แสดงในรูปภาพที่ 2(ก) และ 2(ข) พบว่า แก้วตัวอย่างมีการดูดกลืนแสงความยาวคลื่นในช่วงแสงที่ตามองเห็น (VIS) และช่วงอินฟราเรดใกล้ (NIR) ตามลำดับ พิกัดที่ปรากฏในสเปกตรัมเหล่านี้แสดงให้เห็นว่า หลังจากมีการดูดกลืนแสงเข้าไป Sm³⁺ เกิดการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานจากสถานะพื้น ⁶H_{5/2} ไปสู่ระดับชั้นพลังงานที่สูงกว่าโดยการดูดกลืนแสงในช่วง VIS ได้แก่ ที่ความยาวคลื่น 403 และ 470 นาโนเมตรทำให้เกิดการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงาน ⁶H_{5/2} → ⁶P_{3/2} และ ⁶H_{5/2} → ⁴I_{11/2} ตามลำดับ สำหรับในช่วง NIR นั้นพบว่า แก้วมีการดูดกลืนแสง 5 ความยาวคลื่น ได้แก่ 1076, 1225, 1370, 1472 และ 1524 นาโนเมตรซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงาน ⁶H_{5/2} → ⁶F_{9/2}, ⁶H_{5/2} → ⁶F_{7/2}, ⁶H_{5/2} → ⁶F_{5/2}, ⁶H_{5/2} → ⁶F_{3/2} และ ⁶H_{5/2} → ⁶H_{15/2} ตามลำดับ (Li et al., 2007: 371 & Rao and Jayasankar, 2013: 205) นอกจากนี้พบว่า เมื่อเจือ Sm³⁺ ลงไปในแก้ว LiYB ในปริมาณที่มากขึ้น จะทำให้แก้วตัวอย่างสามารถดูดกลืนแสงในแต่ละความยาวคลื่นตามที่กล่าวไปได้มากขึ้น สังเกตได้จากความแหลมคมชัดเจนของพีคในสเปกตรัม

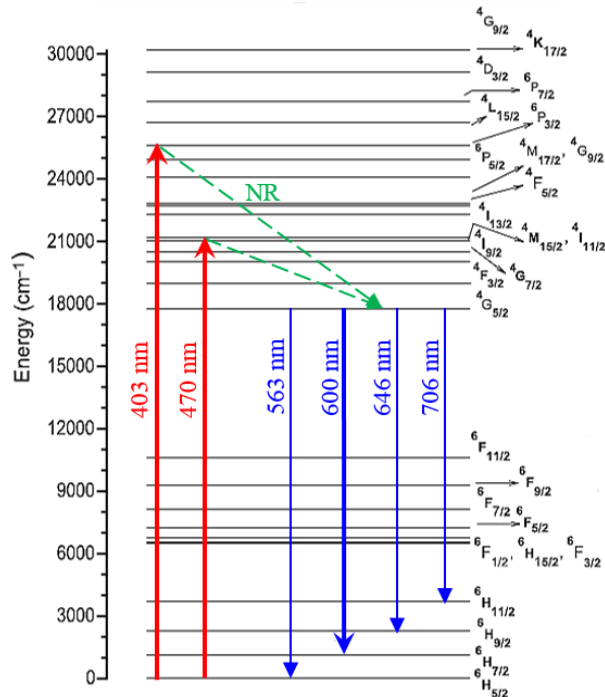
3.2 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมการเปล่งแสง

จากที่กล่าวไปในข้างต้น แก้วตัวอย่างสามารถดูดกลืนแสงในช่วง VIS ได้ 2 ความยาวคลื่น ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้นำแสงความยาวคลื่นทั้งสองได้แก่ 403 และ 470 นาโนเมตรไปกระตุ้นแก้ว LiYBO:Sm³⁺ เพื่อศึกษาสเปกตรัมการเปล่งแสง โดยแสดงผลอยู่ในรูปภาพที่ 3 (ก) และ 3 (ข) ตามลำดับ สเปกตรัมการเปล่งแสงทั้งสองมีรูปแบบที่คล้ายกัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเปล่งแสงความยาวคลื่น 563, 600, 646 และ 706 (708) นาโนเมตร โดยแสงความยาวคลื่น 600 นาโนเมตรถูกปล่อยออกมาได้อย่างเด่นชัดมากที่สุด เมื่อพิจารณาความยาวคลื่นของแสงที่ใช้ในการกระตุ้นพบว่า แสงความยาวคลื่น 403 นาโนเมตรสามารถกระตุ้นให้แก้วเปล่งแสงออกมาด้วยความเข้มที่สูงกว่าการกระตุ้นด้วยแสง 470 นาโนเมตร ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่ชี้ให้เห็นว่า แก้วสามารถดูดกลืนแสงความยาวคลื่น 403 นาโนเมตรได้มากกว่า 470 นาโนเมตร จึงกระตุ้นแก้วและทำให้แก้วเปล่งแสงได้มากกว่า นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการเปล่งแสงกับความเข้มชั้นของ Sm₂O₃ ในแก้ว พบว่า แก้วตัวอย่างที่กระตุ้นด้วยแสงความยาวคลื่น 403 นาโนเมตร มีการเปล่งแสงออกมาได้มากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณการเจือ Sm₂O₃ ในช่วงร้อยละ 0.05 - 0.50 โดยโมล หลังจากนั้นความเข้มแสงจะลดลงตามปริมาณการเจือ การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเกิดจากปรากฏการณ์ concentration quenching effect โดยเมื่อเจือ Sm₂O₃ ในปริมาณที่สูงเกินจุดที่เหมาะสมจะทำให้ Sm³⁺ อยู่ใกล้กันมากเกินไปจนสามารถดูดกลืนแสงที่กำลังเปล่งออกไปจาก Sm³⁺ ที่อยู่ใกล้เคียงกลับเข้ามาได้ ความเข้มของการเปล่งแสงจึงลดลง ในส่วนของการกระตุ้นแก้วด้วยแสงความยาวคลื่น 470 นาโนเมตรนั้น สามารถอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าวได้ในทำนองเดียวกัน



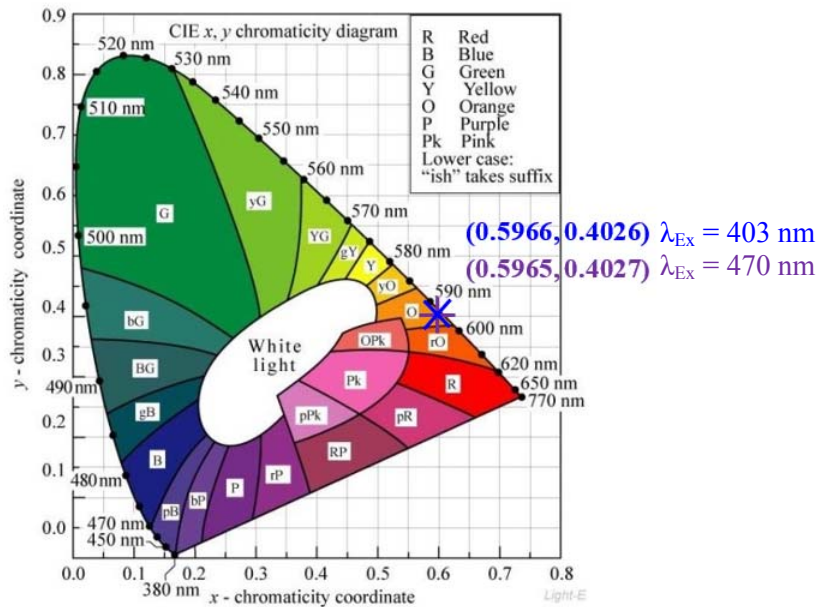
รูปภาพที่ 3สเปกตรัมการเปล่งแสงของแก้ว LiYBO:Sm³⁺ (ก)ที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงความยาวคลื่น 403นาโนเมตรและ (ข) ที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงความยาวคลื่น470 นาโนเมตร

สำหรับกลไกการเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงานของ Sm³⁺ ที่เกิดขึ้นนั้น แสดงดังรูปภาพที่ 4 โดยสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อทำการกระตุ้นแก้ว LiYBO:Sm³⁺ ด้วยแสงความยาวคลื่น 403 และ 470 นาโนเมตร จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงานของ Sm³⁺ จากสถานะพื้น ⁶H_{5/2} ไปสู่สถานะถูกกระตุ้นชั้นต้น ⁶P_{3/2} และ ⁴I_{11/2} ตามลำดับต่อมาสถานะพลังงานทั้งคู่ได้ลดระดับชั้นลงมาโดยที่ไม่เกิดการเปล่งแสง (nonradiative relaxation; NR) สู่สถานะ ⁴G_{5/2} ก่อนที่ Sm³⁺ จะเปล่งแสงออกไปโดยการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงาน ⁴G_{5/2} → ⁶H_{5/2}, ⁴G_{5/2} → ⁶H_{7/2}, ⁴G_{5/2} → ⁶H_{9/2} และ ⁴G_{5/2} → ⁶H_{11/2} ทำให้เกิดการเปล่งแสงความยาวคลื่น 563, 600, 646 และ 706 (708) นาโนเมตร ตามลำดับ (Li et al., 2007: 371 & Rao and Jayasankar, 2013: 205) ดังที่ปรากฏในสเปกตรัมการเปล่งแสง



รูปภาพที่ 4 แผนภาพการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานของ Sm^{3+} ในแก้ว $LiYBO_3:Sm^{3+}$
(Rao and Jayasankar, 2013: 206)

3.4 ผลการวิเคราะห์สีตามมาตรฐาน CIE 1931 chromaticity



รูปภาพที่ 5 แผนภาพระบุสีตามมาตรฐาน CIE 1931 chromaticity ของแก้ว $LiYBO_3:Sm^{3+}$
(Rao and Jayasankar, 2013: 206)

ผู้วิจัยนำสเปกตรัมการเปล่งแสงของแก้ว $LiYBO_3:Sm^{3+}$ ที่มี Sm_2O_3 เข้มข้นร้อยละ 0.50 โดยโมลมาวิเคราะห์สีตามมาตรฐาน CIE 1931 chromaticity ดังแสดงผลอยู่ในรูปภาพที่ 5 ผลจากการศึกษาพบว่า การกระตุ้นแก้วด้วยแสงความยาวคลื่น 403 และ 470 นาโนเมตร ทำให้แก้วตัวอย่างเปล่งแสงที่มีพิกัดของสีตามมาตรฐาน CIE 1931(x, y) ได้ใกล้เคียงกันมาก โดยมีค่าเท่ากับ (0.5966, 0.4026) และ (0.5965, 0.4027) ตามลำดับ เมื่อระบุพิกัดทั้งสองลงในแผนภาพแสดงสีพบว่า การ

กระตุ้นด้วยแสงความยาวคลื่นทั้งสองทำให้แก้วเปล่งแสงสีส้มที่มีความเข้มสูงออกมา แก้วดังกล่าวจึงเป็นวัสดุที่น่าสนใจต่อการนำไปพัฒนาเพื่อใช้เป็นวัสดุตัวกลางเลเซอร์ในอุปกรณ์เลเซอร์ที่มีการเปล่งแสงสีส้มเป็นอย่างมาก

4. สรุปผลการวิจัย

แก้ว LiYBO:Sm^{3+} ที่เตรียมได้มีการดูดกลืนแสงทั้งในช่วงของ VIS และ NIR โดยการดูดกลืนแสงความยาวคลื่น 403 และ 470 นาโนเมตรนั้น ทำให้ระดับชั้นพลังงานของ Sm^{3+} เกิดการเปลี่ยนแปลงจากสถานะพื้น $^6\text{H}_{5/2}$ ไปสู่ระดับชั้น $^6\text{P}_{3/2}$ และ $^4\text{I}_{11/2}$ ตามลำดับ หลังจากนั้น NR ได้เกิดขึ้นและลดลงระดับชั้นพลังงานทั้งคู่มุ่งมาสู่สถานะ $^4\text{G}_{5/2}$ ก่อนที่จะมีการเปล่งแสงที่มีความเข้มสูงออกไปการกระตุ้นแก้วด้วยแสงความยาวคลื่น 403 นาโนเมตร ทำให้แก้วเปล่งแสงความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ออกมาได้อย่างเด่นชัดที่สุดแสงที่เปล่งออกมาจากแก้วดังกล่าวเป็นแสงสีส้มเข้มที่มีความชัดเจน จึงเหมาะต่อการนำแก้วชนิดนี้ไปพัฒนาเพื่อใช้เป็นวัสดุตัวกลางเลเซอร์ที่มีการเปล่งแสงสีส้มโดยการเจือ Sm^{3+} ลงไปในแก้ว LiYBO ด้วยความเข้มข้นร้อยละ 0.50 โดยโมล

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีแก้วและวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม สำหรับการอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัยนี้ และผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) สำหรับความอนุเคราะห์และการสนับสนุนงานวิจัยนี้เป็นอย่างดี

6. เอกสารอ้างอิง

- 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 $\text{LaAlGe}_2\text{O}_7$ 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 $\text{Li}_6\text{Y}(\text{BO}_3)_3\text{Nd}^{3+}$ 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 $\text{Li}_6\text{Y}(\text{BO}_3)_3$ compound. **Optical Materials**, (27), 1681–1685.
- Sailaja, S. Nageswara Raju, C. Adinarayana Reddy, C. Deva Prasad Raju, B. Young-Dahl Jho & Sudhaka Reddy, B. (2013). Optical properties of Sm^{3+} -doped cadmium bismuth borate glasses. **Journal of Molecular Structure**, (1038), 29–34.
- Srinivasa Rao, Ch. & Jayasankar, C. K. (2013). Spectroscopic and radiative properties of Sm^{3+} -doped K–Mg–Al phosphate glasses. **Optics Communications**, (286), 204–210.
- Swapna, K. Mahamuda, Sk. Srinivasa Rao, A. Shakya, S. Sasikala, T. Haranath, D. & Vijaya Prakash, G. (2014). Optical studies of Sm^{3+} ions doped Zinc Alumino Bismuth Borate glasses. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, (125), 53–60.
- Thomas, S. Nayab Rasool, Sk. Rathaiah, M. Venkatramu, V. Joseph, C. & Unnikrishnan, N. V. (2013). Spectroscopic and dielectric studies of Sm^{3+} ions in lithium zinc borate glasses. **Journal of Non-Crystalline Solids**, (376), 106–116.
- Zhao, Y. Gong, X. Lin, Y. Luo, Z. & Huang, Y. (2006). Growth and spectral properties of $\text{Er}^{3+}:\text{Li}_6\text{Y}(\text{BO}_3)_3$ crystal. **Materials Letters**, (60), 418–421.