

การศึกษาสมบัติการเปล่งแสง การดูดกลืนแสง และสมบัติทางกายภาพของ  
แก้วลิเทียมแลนทานัมบอเรตที่เจือด้วยดิสโพรเซียม  
Study of Photoluminescence, Optical Absorption and Physical Properties  
of  $\text{Li}_2\text{O-La}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$  Glass doped with  $\text{Dy}^{3+}$  Ions

นวลทิพย์ วันทนะ<sup>1\*</sup> HongJoo Kim<sup>2</sup> ณัฐกฤตา จันทิมา<sup>3</sup> อรอนงค์ แซ่มเล็ก<sup>1</sup> และ จักรพงษ์ แก้วขาว<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

<sup>2</sup>Department of Physics, Kyungpook National University

<sup>3</sup>คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

<sup>4</sup>ศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีแก้วและวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

\*w.nuanthip@gmail.com

### บทคัดย่อ

แก้วลิเทียมแลนทานัมบอเรตที่เจือด้วยไอออนของดิสโพรเซียม ( $\text{Dy}^{3+}$ ) ถูกเตรียมขึ้นด้วยเทคนิคการหลอมแล้วทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว โดยเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ  $\text{Dy}_2\text{O}_3$  ที่เจือเข้าไปแทนที่  $\text{B}_2\text{O}_3$  ให้อยู่ในช่วง 0.00 - 1.50 โมลเปอร์เซ็นต์ งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษสมบัติการเปล่งแสง การดูดกลืนแสง และสมบัติทางกายภาพของแก้วดังกล่าว โดยพบว่า ปริมาตรเชิงโมลของแก้วมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของการเจือ  $\text{Dy}_2\text{O}_3$  ในขณะที่ความหนาแน่นของแก้วไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ  $\text{Dy}_2\text{O}_3$  จากผลการดูดกลืนแสงในช่วง UV-VIS-NIR นั้น พบสเปกตรัมของการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 451, 798, 894, 1085 1264 และ 1676 นาโนเมตร สำหรับผลการศึกษาการเปล่งแสงของแก้วตัวอย่างนั้น พบสเปกตรัมการเปล่งแสงที่ความยาวคลื่น 483, 575 และ 664 นาโนเมตร โดยการกระตุ้นด้วยแสงที่ความยาวคลื่น 388 นาโนเมตร ซึ่งการเปล่งแสงของแก้วตัวอย่างนี้มีความเข้มสูงสุดในแก้วที่มีการเจือ  $\text{Dy}_2\text{O}_3$  ลงไป 0.50 โมลเปอร์เซ็นต์

**คำสำคัญ:** แก้วลิเทียมบอเรต, ดิสโพรเซียม, โฟโตลูมิเนสเซนซ์, การดูดกลืนแสง

### Abstract

The lithium lanthanum borate glasses doped with  $\text{Dy}^{3+}$  were prepared by the melt quenching technique. The  $\text{Dy}_2\text{O}_3$  doped concentration was varied and substituted  $\text{B}_2\text{O}_3$  from 0.00 to 1.50 mol% in the glasses. The photoluminescence, optical absorption and physical properties of these glasses have been investigated in this work. The experimental results show that, the molar volume of glasses tended to increase with increasing of  $\text{Dy}_2\text{O}_3$  concentration, but the density were not depending on the concentration of  $\text{Dy}_2\text{O}_3$ . The UV-Vis-NIR spectra, absorption bands at 451, 798, 894, 1085 1264 and 1676 nm have been observed. For  $\text{Dy}^{3+}$  doped glasses, emission bands centered at 483, 575 and 664 nm have been observed with 388 nm excitation wavelength. The emission spectra have shown the strongest band in the glasses with 0.50 mol%  $\text{Dy}_2\text{O}_3$  concentration.

**Keywords:** Lithium borate glass, Dysprosium, Photoluminescence, Optical absorption

## 1. บทนำ

ในปัจจุบัน วัสดุทึบแสงเรอ์เทอร์บอเรทที่มีการเจือด้วยด้วยไอออนของธาตุกลุ่มแลนทาไนด์ (LiREBO: Ln<sup>3+</sup>) กำลังเป็นที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับการเปล่งแสง (Luminescence) ยกตัวอย่างเช่น ผลึกของสารประกอบ Li<sub>6</sub>Gd(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>:Ce<sup>3+</sup> (van Eijk., 2004: 337 และ Singh et al., 2013: 208) และ Li<sub>6</sub>Y(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>:Ce<sup>3+</sup> (Czirr et al., 1999: 15) ถูกค้นคว้าวิจัยเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในหัวตรวจวัดนิวตรอนแบบซินทิลเลชัน (Scintillation) ผลึก Li<sub>6</sub>Y(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>:Er<sup>3+</sup> (Zhao et al., 2006: 419) และ Li<sub>6</sub>Y(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>:Yb<sup>3+</sup> (Sablayrolles et al., 2005: 1681) ถูกศึกษาเพื่อประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์เลเซอร์ที่มีความปลอดภัยต่อดวงตา และใช้เป็นสื่อกระตุ้น (Active medium) ในเลเซอร์แบบไดโอดตามลำดับ สำหรับในรูปแบบของผงฟอสฟอรัส จากการศึกษาค้นคว้าที่ผ่านมาพบว่า Li<sub>6</sub>Y(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>:Eu<sup>3+</sup> (Ju et al., 2011: 1297) สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุให้กำเนิดแสงสีแดงในไดโอดและจอพลาสมาได้เป็นอย่างดี ขณะเดียวกันมีการพบว่า ฟอสฟอรัสของ LiLuBO: (Ce<sup>3+</sup>, Pr<sup>3+</sup>, Tm<sup>3+</sup>) (Fawad et al., 2013: 1102) นั้น เป็นวัสดุที่มีศักยภาพสูงต่อการนำไปใช้ในการจับนิวตรอนและรังสีเอกซ์เพื่อประยุกต์ใช้ในงานตรวจสอบวัตถุจากการถ่ายภาพ (Imaging) ด้วยนิวตรอนและรังสีเอกซ์ดังกล่าว จากที่ได้กล่าวมาในข้างต้นจะเห็นได้ว่าวัสดุ LiREBO: Ln<sup>3+</sup> ที่อยู่ในรูปของผลึกและผงฟอสฟอรัส ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานที่หลากหลาย แต่สำหรับวัสดุดังกล่าวในรูปแบบของแก้วยังไม่ได้มีการศึกษาและถูกนำไปประยุกต์ใช้งานมากนัก ดังนั้นผู้วิจัย จึงมีความสนใจที่จะเตรียมแก้ว LiREBO: Ln<sup>3+</sup> เพื่อศึกษาสมบัติต่าง ๆ โดยเฉพาะสมบัติทางการเปล่งแสง (Photoluminescence) การใช้แลนทานัม (La) เป็นองค์ประกอบ RE ในแก้วดังกล่าวเป็นแนวทางที่น่าสนใจ เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ธาตุดังกล่าวสามารถถูกนำไปใช้พัฒนาสมบัติต่าง ๆ ในแก้วได้ ยกตัวอย่างเช่น ความหนาแน่น ความแข็ง จุดหลอมเหลว (Bahari et al., 2011: 203 และ Singh et al., 2009: 3401) ดัชนีหักเหของแสง (Bahari et al., 2011: 203) และความทนทานทางเคมี (Kaur et al., 2012: 2589) สำหรับ Ln<sup>3+</sup> ที่ถูกเจือลงไปนั้น ผู้วิจัยได้เลือกใช้ Dy<sup>3+</sup> เนื่องจากไอออนดังกล่าวสามารถทำให้เกิดการเปล่งแสงที่มีความเข้มสูงในช่วงแสงสีเหลือง และสีน้ำเงินได้ (Rajesh et al., 2012: 841)

ในงานวิจัยนี้ ได้มีการเตรียมแก้วทึบแสงแลนทานัมบอเรทที่มีการเจือด้วยด้วยไอออนของดิสโพรเซียม (LiLaBO:Dy<sup>3+</sup>) เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ การดูดกลืนแสง และการเปล่งแสง รวมทั้งทำการวิเคราะห์หัตถิพลของความเข้มข้นของการเจือ Dy<sup>3+</sup> ที่มีผลต่อสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้

## 2. วิธีการทดลอง

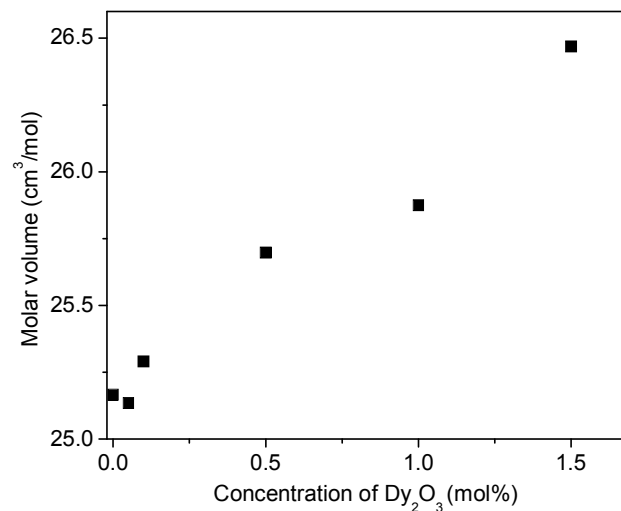
ผู้วิจัยได้ทำการเตรียมแก้ว LiLaBO:Dy<sup>3+</sup> จากสูตรขององค์ประกอบทางเคมี 60Li<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 10La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: (30-x)B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: xDy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> โดย ที่ x มีค่าเป็น 0.00, 0.05, 0.10, 0.50, 1.00 และ 1.50 โมลเปอร์เซ็นต์ ด้วยวิธีการหลอมแล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (melt quenching technique) สารเคมีตั้งต้นที่ใช้คือ Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> และ Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ซึ่งมีความบริสุทธิ์สูง โดยทั้งหมดถูกผสมลงในบ้ำหลอมอะลูมินา เพื่อนำไปหลอมในเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ต่อมานำแก้วที่หลอมได้เทลงในแม่พิมพ์สแตนเลสที่อุณหภูมิห้อง และนำไปอบอ่อนที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อลดความเครียดเชิงความร้อนที่เกิดขึ้นในแก้ว แก้วตัวอย่างที่เตรียมได้ถูกนำมาวัดความหนาแน่น ( $\rho$ ) โดยอาศัยหลักการแทนที่น้ำของ Archimedes หลังจากนั้นนำค่าความหนาแน่นที่ได้มาคำนวณหาปริมาตรเชิงโมล ( $M_T$ ) จากความสัมพันธ์  $V_M = M_T / \rho$  เมื่อ  $M_T$  คือ น้ำหนักโมเลกุลโดยรวมขององค์ประกอบทางเคมีในแก้วตัวอย่าง สำหรับการวิเคราะห์สเปกตรัมนั้น แก้วตัวอย่างถูกนำไปศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่องมือ UV-Vis-NIR spectrophotometer รุ่น Shimadzu, UV-3600 และถูกนำไปศึกษาสมบัติการเปล่งแสงโดยใช้เครื่องฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Cary Eclipse)

### 3. ผลการวิจัย

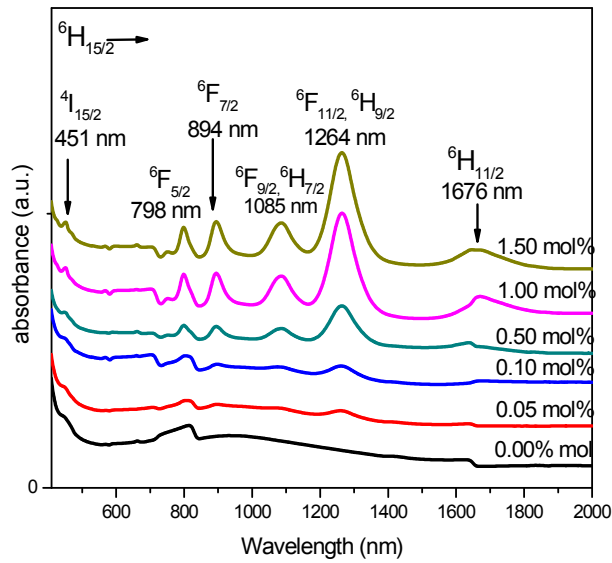
ผลการศึกษาความหนาแน่นและปริมาตรเชิงโมลของแก้วตัวอย่างแสดงดังตารางที่ 1 และรูปภาพที่ 1 ตามลำดับ โดยพบว่า ความหนาแน่นของแก้วจะมีค่าที่ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ  $Dy_2O_3$  ที่เจือลงไปแก้ว ขณะที่ปริมาตรเชิงโมลของแก้วมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ  $Dy_2O_3$  ที่เจือลงไปแก้วเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเข้าไปของ  $Dy^{3+}$  ในโครงร่างแก้ว ได้ไปทำลายออกซิเจนที่เป็นสะพานที่เชื่อมต่อประจุ ทำให้เกิด non-bridging oxygen (NBOs) เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก ซึ่งส่งผลให้เกิดพื้นที่ช่องว่างในโครงร่างแก้ว และการขยายตัวของปริมาตรเชิงโมลของแก้ว ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ความหนาแน่นและปริมาตรเชิงโมลของแก้ว  $LiLaBO:Dy^{3+}$

mol% of $Dy_2O_3$	$\rho$ ( $g/cm^3$ )	$V_M$ ( $cm^3/mol$ )
0.00	2.8370	25.1663
0.05	2.8464	25.1357
0.10	2.8350	25.2908
0.50	2.8373	25.6975
1.00	2.8765	25.8751
1.50	2.8693	26.4686

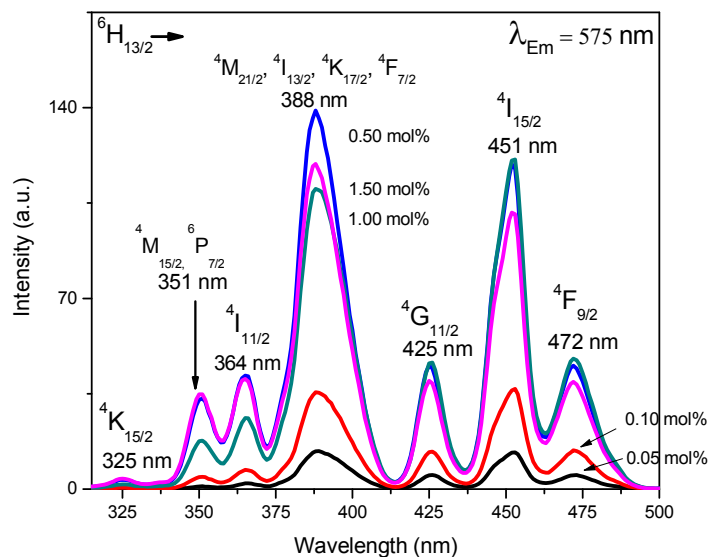


รูปภาพที่ 1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรเชิงโมลของแก้ว  $LiLaBO:Dy^{3+}$  กับความเข้มข้นของการเจือ  $Dy_2O_3$

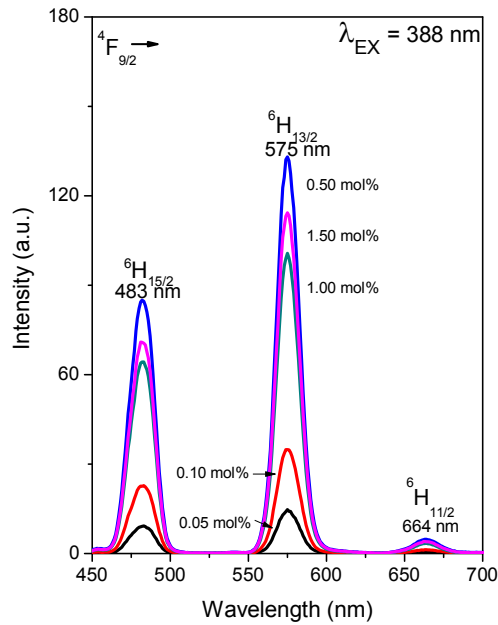


รูปภาพที่ 2 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของแก้ว LiLaBO:Dy<sup>3+</sup> ซึ่งมีการเจือ Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

เมื่อพิจารณารูปภาพที่ 2 ซึ่งแสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสง (absorption spectra) ของแก้ว LiLaBO:Dy<sup>3+</sup> พบว่า แก้วตัวอย่างดังกล่าวมีการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ช่วงแสงขาว (visible light) ไปจนถึงความยาวคลื่นช่วงใกล้อินฟราเรด (near-infrared) ซึ่งประกอบไปด้วยแสงที่มีความยาวคลื่น 451, 798, 894, 1085, 1264 และ 1676 นาโนเมตร อันแสดงให้เห็นถึงการที่แก้วดูดกลืนพลังงานและเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงานจากสถานะพื้น <sup>6</sup>H<sub>15/2</sub> ขึ้นไปยังสถานะ <sup>4</sup>I<sub>15/2</sub> (451นาโนเมตร), <sup>6</sup>F<sub>5/2</sub> (798 นาโนเมตร), <sup>6</sup>F<sub>7/2</sub> (894 นาโนเมตร), (<sup>6</sup>H<sub>7/2</sub>, <sup>6</sup>F<sub>9/2</sub>) (1085 นาโนเมตร), (<sup>6</sup>F<sub>11/2</sub>, <sup>6</sup>H<sub>9/2</sub>) (1264 นาโนเมตร) และ <sup>6</sup>H<sub>11/2</sub> (1676 นาโนเมตร) (Lakshminarayana and Qiu, 2009:1177) ตามลำดับ นอกจากนี้จากสเปกตรัมดังกล่าวพบว่า ความเข้มของการดูดกลืนแสงมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นในการเจือ Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ลงไปในแก้ว

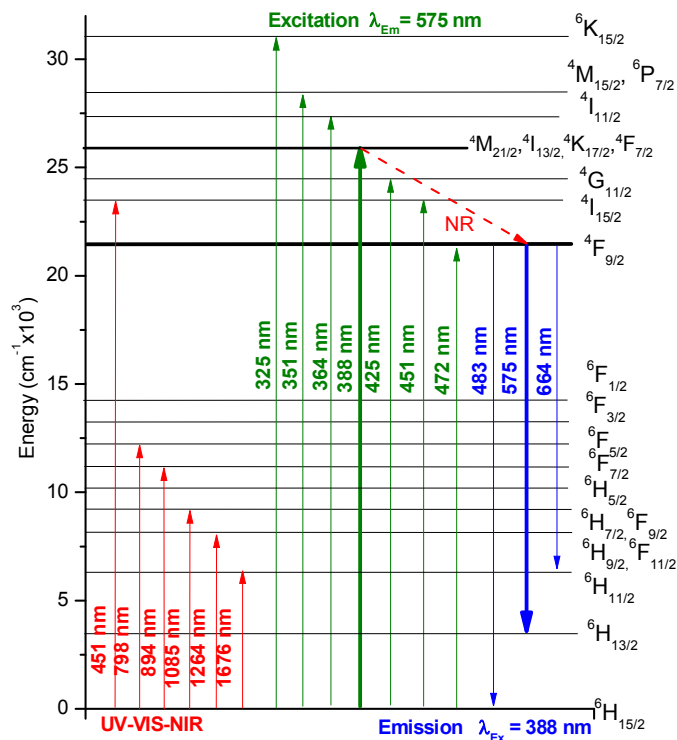


รูปภาพที่ 3 สเปกตรัมการถูกกระตุ้นของแก้ว LiLaBO:Dy<sup>3+</sup> ซึ่งมีการเจือ Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ



รูปภาพที่ 4 สเปกตรัมการเปล่งแสงของแก้ว LiLaBO:Dy<sup>3+</sup> ซึ่งมีการเจือ Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

จากผลการศึกษาสเปกตรัมการถูกกระตุ้น (excitation spectra) ของแก้วที่มีการเปล่งแสงที่ความยาวคลื่น 575 นาโนเมตร ซึ่งแสดงในรูปภาพที่ 3 พบว่า แก้วมีการถูกกระตุ้นด้วยแสงทั้งหมด 7 ความยาวคลื่น ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานของ Dy<sup>3+</sup> จากสถานะพื้น <sup>6</sup>H<sub>15/2</sub> ขึ้นไปยังสถานะที่ถูกกระตุ้นขั้นต้น (initial excited state) ดังต่อไปนี้ <sup>4</sup>K<sub>15/2</sub> (325 นาโนเมตร), (<sup>4</sup>M<sub>15/2</sub>, <sup>6</sup>P<sub>7/2</sub>) (351 นาโนเมตร), <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> (364 นาโนเมตร), (<sup>4</sup>M<sub>21/2</sub>, <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub>, <sup>4</sup>K<sub>17/2</sub>, <sup>4</sup>F<sub>7/2</sub>) (388 นาโนเมตร), <sup>4</sup>G<sub>11/2</sub> (425 นาโนเมตร), <sup>4</sup>I<sub>15/2</sub> (451 นาโนเมตร) และ <sup>4</sup>F<sub>9/2</sub> (472 นาโนเมตร) (Li et al., 2007:372 และ Lakshminarayana and Qiu, 2009:1177) จากการวิเคราะห์สเปกตรัมพบว่า พีคของการถูกกระตุ้นด้วยแสงที่มีความยาวคลื่น 388 นาโนเมตร มีความเข้มสูงที่สุด ดังนั้นจึงมีการนำความยาวคลื่นดังกล่าวไปใช้ในการกระตุ้น Dy<sup>3+</sup> เพื่อศึกษาสเปกตรัมของการเปล่งแสง (emission spectra) ดังแสดงผลในรูปภาพที่ 4 ทำให้ทราบได้ว่า Dy<sup>3+</sup> มีการเปล่งแสงออกมา 3 ความยาวคลื่น ประกอบไปด้วย 483 575 และ 664 นาโนเมตร ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานจากสถานะที่ถูกกระตุ้น <sup>4</sup>F<sub>9/2</sub> ไปยังสถานะที่ต่ำกว่า <sup>6</sup>H<sub>15/2</sub> (483 นาโนเมตร), <sup>6</sup>H<sub>13/2</sub> (575 นาโนเมตร) และ <sup>6</sup>H<sub>11/2</sub> (664 นาโนเมตร) (Li et al., 2007:373 และ Lakshminarayana and Qiu, 2009:1178) ตามลำดับ โดยแสงที่ถูกปล่อยออกมาแล้วมีความเข้มสูงที่สุดคือ แสงที่ความยาวคลื่น 575 นาโนเมตร จากสเปกตรัมดังกล่าวพบว่า ความเข้มของการเปล่งแสงดังกล่าวเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเจือ Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ในแก้วจนถึงการเจือที่ 0.50 โมลเปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นความเข้มของการเปล่งแสงจะลดลง การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีสาเหตุมาจากการเกิด concentration quenching effect (Rajesh et al., 2012: 841) ของ Dy<sup>3+</sup> ในโครงสร้างแก้ว LiLaBO นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้มีการสรุปภาพรวมของสเปกตรัมทั้งหมดที่ศึกษาได้จากงานวิจัยไว้ในรูปภาพที่ 5 โดยสามารถสังเกตเห็นการลดระดับชั้นพลังงานลงมาโดยไม่มีการเปล่งแสง (nonradiative relaxation; NR) ของ Dy<sup>3+</sup> จากสถานะถูกกระตุ้นขั้นต้นต่าง ๆ ลงมายังสถานะ <sup>4</sup>F<sub>9/2</sub> พลังงานที่ลดลงไปดังกล่าวอาจเปลี่ยนรูปไปอยู่ในลักษณะของการสั่นของโครงสร้างแก้ว ที่เรียกว่า โฟนอน (Phonon)



รูปภาพที่ 5 แผนภาพการเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงานของ Dy<sup>3+</sup> เนื่องจากสเปกตรัมต่าง ๆ ในแก้ว LiLaBO:Dy<sup>3+</sup> (Lakshminarayana and Qiu, 2009:1178)

#### 4. สรุปผลการวิจัย

แก้ว LiLaBO:Dy<sup>3+</sup> ที่เตรียมได้ มีสมบัติทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงไปตามความเข้มข้นสาร Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่เติมลงไป ในแก้ว ความหนาแน่นของแก้วมีการเปลี่ยนแปลงตามปริมาณการเจือ Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> แต่ไม่สามารถระบุแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงได้ ขณะที่ปริมาตรเชิงโมลมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเจือ Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งมีสาเหตุมาจากการเพิ่มจำนวนของ NBOs ในโครงร่างแก้ว มีการศึกษาพบการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นในช่วงระหว่าง VIS และ NIR โดยจากการวิเคราะห์พบว่า แสงที่ความยาวคลื่น 388 นาโนเมตร จะเข้าไปกระตุ้น Dy<sup>3+</sup> ในแก้วให้เกิดการปล่อยแสงออกมาโดยมีความเข้มของการเปล่งแสงสูงสุดอยู่ที่ความยาวคลื่น 575 นาโนเมตร แสงที่ถูกปล่อยออกมามีความเข้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเจือ Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ในแก้วจนถึงการเจือที่ 0.50 โมลเปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นความเข้มของแสงที่ออกมาจะลดลง ซึ่งมีสาเหตุมาจากการเกิด concentration quenching effect

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีแก้วและวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม มหาวิทยาลัยศิลปากร และ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช) สำหรับการสนับสนุนงานวิจัยนี้เป็นอย่างดี

## 6. เอกสารอ้างอิง

- Bahari, A. Anasari, A. & Rahmani, Z. (2011). Low temperature synthesis of  $\text{La}_2\text{O}_3$  and  $\text{CrO}_2$  by Sol –Gel process. **Journal of Engineering and Technology Research**, (3(7)), 203-208.
- 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.
- Fawad, U. Oh, M. Park, H. & Kim, H.J. (2013) Synthesis and Characterization of  $\text{Ce}^{3+}$ -,  $\text{Pr}^{3+}$ -,  $\text{Tm}^{3+}$ - doped  $\text{Li}_6\text{Lu}(\text{BO}_3)_3$  Phosphors of X-ray and Neutron Imaging. **Journal of the Korean Physics society**, (62(8)), 1102-1107.
- Ju, G. Y Hu., Wu, H. Yang, Z. Fu, C. Mu, Z. & Kang, F. (2011). A red-emitting heavy doped phosphor  $\text{Li}_6\text{Y}(\text{BO}_3)_3:\text{Eu}^{3+}$  for white light-emitting diodes. **Optical Materials**, (33), 1297–1301.
- Kaur, G. Pandey, O.P. & Singh, K. (2012). Effect of modifiers field strength on optical, structural and mechanical properties of lanthanum borosilicate glasses. **Journal of Non-Crystalline Solids**, (358), 2589–2596.
- Lakshminarayana, G. & Qiu, J. (2009). Photoluminescence of  $\text{Pr}^{3+}$ ,  $\text{Sm}^{3+}$  and  $\text{Dy}^{3+}$ :  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-LiF-GdF}_3$  glass ceramics and  $\text{Sm}^{3+}$ ,  $\text{Dy}^{3+}$ :  $\text{GeO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-ZnO-LaF}_3$  glasses. **Physica B**, (404), 1169–1180.
- Li, Y.Ch. Chang, Y.H. Lin, Y.F. Chang, Y.S. & Lin, Y.J. (2007). Synthesis and luminescent properties of  $\text{Ln}^{3+}$  ( $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Sm}^{3+}$ ,  $\text{Dy}^{3+}$ )-doped lanthanum aluminum germanate  $\text{LaAlGe}_2\text{O}_7$  phosphors. **Journal of Alloys and Compounds**, (439), 367–375.
- Rajesh, D. Ratnakaram, Y.C. Seshadri, M. Balakrishna, A. & Krishna, T.S. (2012). Structural and luminescence properties of  $\text{Dy}^{3+}$  ion in strontium lithium bismuth borate glasses. **Journal of Luminescence**, (132), 841–849.
- Sablaylorles, J. Jubera, V. Chaminade, J.P. Manek-Höninger, 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.
- Singh, K. Bala, I. & Kumar, V. (2009). Structural, Optical and bioactive properties of calcium borosilicate glasses. **Ceramics International**, (35) 3401–3406.
- Singh, A.K. Tyagi, M. Singh, S.G. Desai, D.G. Sen, S. & Gadkari, S.C. (2013). Understanding energy transfer in Ce doped  $\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3$ : 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.
- 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.