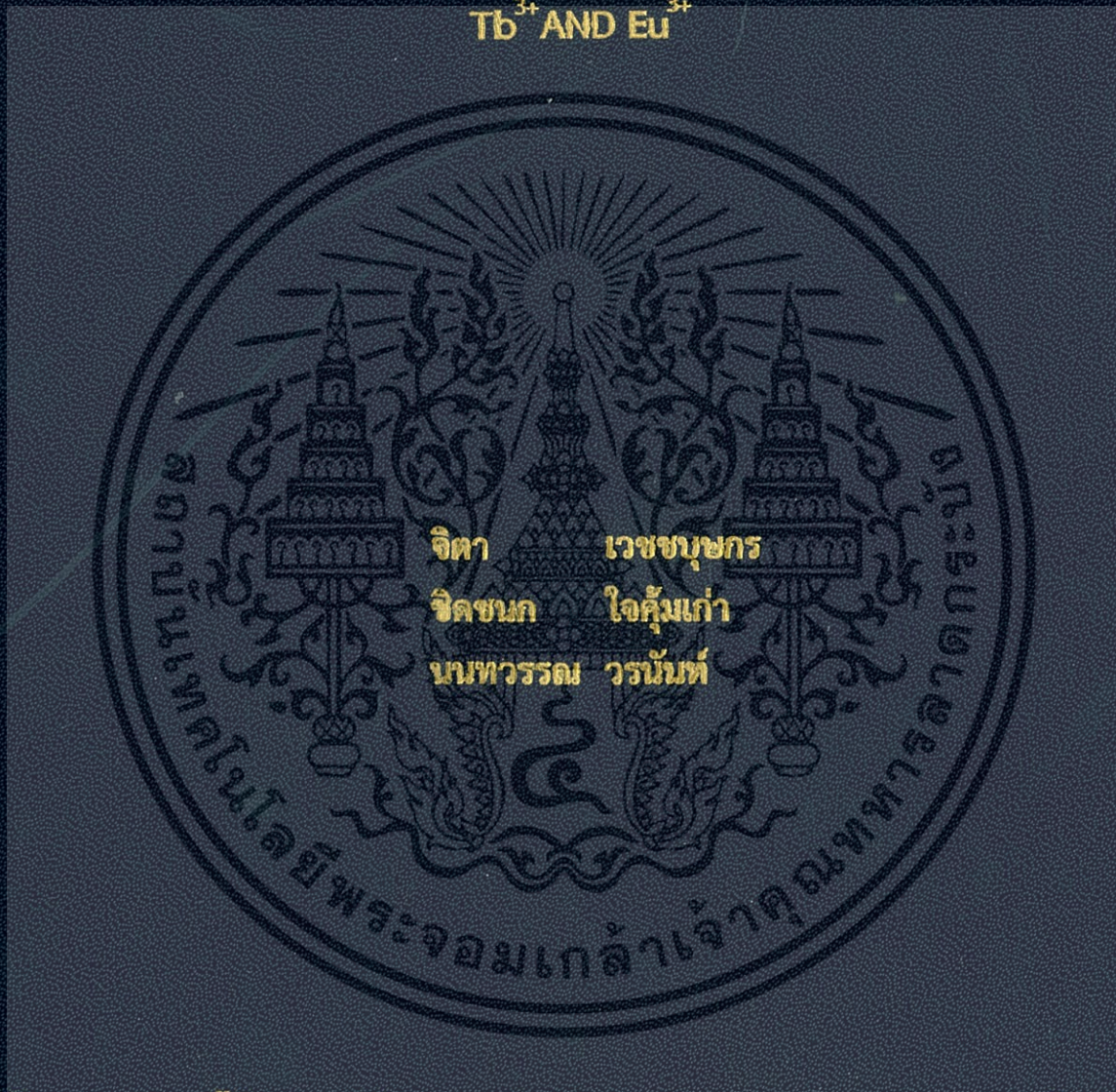


สมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้าของเม็ทชราดิก $\text{In}_6\text{WO}_{12}$ ที่เจือด้วยไอออน
 Tb^{3+} และ Eu^{3+}

OPTICAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF $\text{In}_6\text{WO}_{12}$:
 Tb^{3+} AND Eu^{3+}



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

สมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้าของเม็ดเซรามิก $\text{In}_6\text{WO}_{12}$ ที่เจือด้วย
ไอออน Tb^{3+} และ Eu^{3+}

OPTICAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF $\text{In}_6\text{WO}_{12}$:
 Tb^{3+} AND Eu^{3+}



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ทำกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้ง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2557

OPTICAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF $\text{In}_6\text{WO}_{12}$:
 Tb^{3+} AND Eu^{3+}



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN APPLIED PHYSICS
DEPARTMENT OF PHYSICS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ทำกรณีใดๆทั้งสิ้น KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2014

หัวข้อโครงการพิเศษ สมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้าของเม็ดเซรามิก $\text{In}_6\text{Wo}_{12}$ ที่เจือด้วย ไอออน Tb^{3+} และ Eu^{3+}

OPTICAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF $\text{In}_6\text{Wo}_{12}$: Tb^{3+} AND Eu^{3+}

ชื่อนักศึกษา นางสาวจิตา เวชชบุษกร รหัสนักศึกษา 54050493
นางสาวชิตชนก ใจคุ้มเก่า รหัสนักศึกษา 54050508
นางสาวนนทวรรณ วรรณันท์ รหัสนักศึกษา 54050540

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชา ฟิสิกส์
ปีการศึกษา 2557
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์
ประจำปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบ	ว.สายมือชื่อ
รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง	
อ.ภาอรุจ บัณฑิตธาวิทย์	
ผศ.ดร.ชัยสิทธิ์ ภูวรักษ์เกียรติ	
รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ สมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้าของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6-x}\text{Tb}_x\text{WO}_{12}$ ที่เจือด้วย ไอออน Tb^{3+} และ Eu^{3+}

ชื่อนักศึกษา นางสาว จิตา เวชบุษกร รหัสนักศึกษา 54050493

นางสาว ชิตชนก ใจคุ้มเก่า รหัสนักศึกษา 54050508

นางสาว นนทวรรณ วรนนท์ รหัสนักศึกษา 54050540

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์

ภาควิชา ฟิสิกส์

ปีการศึกษา 2557

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ. งามนิตย์ วงษ์เจริญ

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ ได้ทำการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) จากวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง ค่าคงที่ โครงผลึก a และ c ของหนึ่งหน่วยเซลล์แบบเอกซะโกนัลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของไอออนของธาตุ Tb^{3+} และ Eu^{3+} ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากไอออนของธาตุ Tb^{3+} และ Eu^{3+} เข้าแทนที่ในตำแหน่งของไอออนของธาตุ In^{3+} เมื่อกระตุ้นสารเรืองแสง $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ด้วยความยาวคลื่น 358 นาโนเมตร จะเปล่งแสงสีเขียว ที่ความยาวคลื่น 450, 467, 481 และ 491 นาโนเมตร ซึ่งเกิดจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนจาก $^5D_4 \rightarrow ^7F_{3, 4, 5, 6}$ ของไอออนของธาตุ Tb^{3+} แล้วปล่อยสเปกตรัมออกมา ส่วนสารเรืองแสง $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) เมื่อกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 528 นาโนเมตร จะเปล่งแสงสีแดงที่ความยาวคลื่น 587, 606 และ 629 นาโนเมตร ซึ่งเกิดจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนจาก $^5D_0 \rightarrow ^7F_{1, 2, 3}$ ของไอออนของธาตุ Eu^{3+} แล้วปล่อยสเปกตรัมออกมา พารามิเตอร์ทางไฟฟ้ากระแสสลับ สามารถวัดได้ด้วยอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ในช่วงอุณหภูมิ 30 - 70 องศาเซลเซียส ทั้งจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนจะเปลี่ยนตามความถี่และอุณหภูมิ โดยจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเฉพาะในย่านความถี่ต่ำ แต่เมื่อความถี่สูงขึ้นจะมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และพบว่าพลังงานกระตุ้นมีค่าอยู่ในช่วง 0.120 - 0.043 อิเล็กตรอนโวลต์

คำสำคัญ : $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$), $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$), อิมพีแดนซ์ สเปกโทรสโกปี, โฟโตลูมิเนสเซนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ซึ่งเป็นที่มาของการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title OPTICAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF $\text{In}_6\text{WO}_{12}$:
 Tb^{3+} AND Eu^{3+}

Students Miss. Jita Vachabuskorn Student ID 54050493
 Miss. Chidchanok Jaikumgao Student ID 54050508
 Miss. Nontawan Voranan Student ID 54050540

Degree Bachelor of Science in Applied Physics

Department Applied Physics

Academic Year 2014

Advisor Assoc. Prof. Ngamnit Wongcharoen

Abstract

In this special project, $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) and $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ceramics were prepared by a conventional solid state reaction. The increase of lattice parameters a and c of the hexagonal unit cell with the increase of Tb^{3+} and Eu^{3+} contents was observed, respectively. This is probably related to the replacement of Tb^{3+} and Eu^{3+} in In^{3+} site. The emission spectra of the $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) phosphors under 358 nm excitation show green emission peaks at 450, 467, 481 and 491 nm, which were attributed to the $^5\text{D}_4 \rightarrow ^7\text{F}_{3,4,5,6}$ transitions of Tb^{3+} ions, respectively. Moreover, the emission spectra of $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) phosphors under 528 nm excitation show red emission peaks at 587, 606 and 629 nm, which were attributed to $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_{1,2,3}$ transitions of Eu^{3+} ions, respectively. The alternating current parameters of Tb^{3+} and Eu^{3+} -doped $\text{In}_{6(1-x)}\text{WO}_{12}$ ceramics are measured at different frequencies ranging 1 kHz and 1 MHz and temperatures ranging 30 - 70 °C using the impedance spectroscopy. The real and imaginary parts are decreased with increasing temperature at the lower frequencies and are merged at the higher frequencies. Activation energy are found to be 0.120 - 0.043 eV.

Keywords : $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$), $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$),
 impedance spectroscopy, photoluminescence

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ขออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

รายงานวิจัยฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ งามนิตย์ วงษ์เจริญ รองศาสตราจารย์ ดร. ฐิตินัย แก้วแดง รองศาสตราจารย์ ดร. ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยสิทธิ์ ภูริรักษ์เกียรติ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ ในการทดลองตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุนและการให้คำปรึกษาทางวิชาการที่ติดต่อมารวมไปถึง การปลูกฝังสิ่งที่ดีงามให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์คณะ วิทยาศาสตร์ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์และการแนะนำในการใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (XRD) ของ Bruker รุ่น D8 Advance และ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope : SEM) ยี่ห้อ LEO รุ่น LEO 1455VP

ขอขอบคุณนักศึกษาในห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโฟโตนิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษ แนะนำการใช้อุปกรณ์ต่างๆ ตลอดจนให้คำแนะนำในการใช้โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลผลการ ทดลอง

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ทุกท่าน ที่เมตตาประสิทธิ์ประสาท วิชาตั้งแต่ การศึกษาภาคบังคับจนถึงปัจจุบัน ตลอดจนขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้ความอุปการะ ทุนในการศึกษาเล่าเรียน และเป็นกำลังใจด้วยดีตลอดมา

นางสาว จิตา เวชบุษกร
นางสาว ชิดชนก ใจคุ้มเก่า
นางสาว นนทวรรณ วรรณันท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ณ
สารบัญรูป	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตของกรวิจัย	4
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	4
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 โครงสร้างผลึกของอินเดียมทังสเตนบรอนซ์	6
2.2 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ $\text{In}_6\text{WO}_{12}$	7
2.3 เฟสไดอะแกรมของระบบ $\text{In}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$	8
2.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	9
2.5 ปรากฏการณ์การเรืองแสงของสาร	10
2.5.1 ปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์	12
2.5.2 กลไกการเรืองแสงของปรากฏการณ์ลูมิเนสเซนซ์	16
2.5.3 การเรืองแสงจากเอ็กซิตอนในปรากฏการณ์ต่างๆ	19
2.5.4 การติดตั้งโฟโตลูมิเนสเซนซ์	21
2.5.5 พลังงานกระตุ้น	22
2.5.6 การแตกตัวเป็นไอออนเนื่องจากแสง	22
2.5.7 รัสเซลล์-ฮอนเดอร์คัปปลิง	23
2.5.8 กฎของฮุนด์	25
2.5.9 การบวกของสปินสองตัว	28
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	37
3.1 ขั้นตอนการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ด้วยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	37
3.1.1 การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$)	37
3.1.2 วิธีการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	40
3.2 ขั้นตอนการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(x-1)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ด้วยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	41
3.2.1 การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(x-1)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ด้วยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	41
3.2.2 วิธีการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(x-1)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	45
3.3 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(x-1)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ด้วยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	46
3.3.1 การศึกษาสมบัติโครงสร้างผลึกทางจุลภาค	46
3.3.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกทางมหภาค	46
3.3.3 การศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี	46
3.3.4 การศึกษาสมบัติการเรืองแสง	46
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	49
4.1 ลักษณะของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	49
4.2 ผลการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิบัติการ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เกิดเป็นสารละลายของแข็ง เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ 50 ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1 ผลการศึกษาสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	50
4.2.2 ผลการศึกษาค่าคงที่โครงสร้างผลึก a และ c ของหนึ่งหน่วยเซลล์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล	51
4.2.3 การหาขนาดของเกรนโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	52
4.3 การถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	54
4.4 ผลการศึกษาการเรืองแสงของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	55
4.5 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิรตซ์ และ ในช่วงอุณหภูมิ 30 – 70 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	62
4.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(R_0/R)$ กับ $(1000/T)$ ที่ได้จากค่าความนำไฟฟ้า ของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนในช่วงอุณหภูมิ 80 ถึง 180 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	68
4.7 ผลการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของเม็ดเซรามิกของ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	71
4.7.1 ผลการศึกษาสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	71
4.7.2 ผลการศึกษาค่าคงที่โครงสร้างผลึก a และ c ของหนึ่งหน่วยเซลล์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล	72
4.7.3 ผลการหาขนาดของเกรนโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.8 ผลการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเม็ดเซรามิกของ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	75
4.9 ผลการศึกษาการเรืองแสงของผงผลึกของเม็ดเซรามิกของ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	76
4.10 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับของเม็ดเซรามิกของ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	84
4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(R_0/R)$ กับ $(1000/T)$ ที่ได้จากค่าความนำไฟฟ้า ของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนในช่วงอุณหภูมิ 80 ถึง 180 องศาเซลเซียสของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	90
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	93
5.1 สรุปผลการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคและเชิงมหภาคของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ In_2O_3 , WO_3 , $\text{TbCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{EuCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ด้วยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งเมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง	93
5.2 สรุปผลการศึกษาสมบัติการเรืองแสงของผงผลึกของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ In_2O_3 , WO_3 , $\text{TbCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{EuCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ด้วยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งเมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง	94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3	
สรุผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ In_2O_3 , WO_3 , $\text{TbCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{EuCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ด้วยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งเมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง	94
5.4	
ข้อเสนอแนะ	97
เอกสารอ้างอิง	98
ภาคผนวก	101
ภาคผนวก ก	102
ประวัติผู้เขียน	106



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงชนิดของปรากฏการณ์ลูมิเนสเซนซ์ตามวิธีการกระตุ้นแบบต่างๆ	11
2.2 แสดงค่า S , L และ J ของอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรชั้น ดี (d - shell : $l = 2$) และ วงโคจรชั้น เอฟ (f - shell : $l = 3$)	26
2.3 แสดงค่า S , L และ J และ g_l ของอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรชั้น ดี (d - shell : $l = 2$) และวงโคจรชั้น เอฟ (f - shell : $l = 3$)	27
2.4 แสดงฟังก์ชันแจกแจงของระบบที่ประกอบด้วยอิเล็กตรอน 2 ตัว	29
3.1 แสดงปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง	40
3.2 แสดงปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งเมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง	45
4.1 แสดงค่าคงที่โครสฟลัก a และ c ของหนึ่งหน่วยเซลล์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบแบบเฮกซะโกนัลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของไอออนของธาตุ Tb^{3+} ของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	51
4.2 แสดงขนาดของเกรนของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	53
4.3 แสดงค่าพลังงานกระตุ้นของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.01 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	70
4.4 แสดงค่าคงที่โครสฟลัก a และ c ของหนึ่งหน่วยเซลล์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของไอออนของธาตุ Eu^{3+} ของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	72
4.5 แสดงขนาดของเกรนของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	74
4.6 แสดงค่าพลังงานกระตุ้นของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.01 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	92

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนัลของเม็ดเซรามิกของสารประกอบอินเดียมทั้งสแตโนบรอนซ์	6
2.2	แสดงโครงสร้างผลึกของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_6\text{WO}_{12}$ ในระบบรอมโบฮีดรัล	7
2.3	แสดงโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_6\text{WO}_{12}$	8
2.4	แสดงเฟสไดอะแกรมของระบบของเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_2\text{O}_3 - \text{WO}_3$ ในช่วงอุณหภูมิ 700 - 1400 องศาเซลเซียส จุดวงกลมทึบแสดงเฟสเดี่ยว ส่วนจุดวงกลมโปร่งแสดงเฟสผสม	9
2.5	แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์	10
2.6	แสดงภาพโครงสร้างของพันธะเคมีระหว่างอะตอม ที่มีลักษณะของการจับกันของอะตอมที่คล้ายกับการควมมีสปริงยึดอยู่ระหว่างอะตอม	12
2.7	แสดงแผนภาพการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนในปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์	12
2.8	แสดงกระบวนการการรวมตัวของพาหะที่ทำให้เกิดการเรืองแสง และไม่เรืองแสงในปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์	13
2.9	แสดงแผนภาพการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนในปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์ ก. แอนติ-สโตกส์ (anti-stokes) ข. ปรากฏการณ์การเรืองแสงแบบปกติ	14
2.10	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มแสงที่เปล่งออกมา กับ ความยาวคลื่นในปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์	14
2.11	แสดงแผนภาพกระบวนการเรืองแสงในปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์โดยการเจือสาร 2 ชนิดจะมีเซนซีไทเซอร์ เป็นตัวดูดกลืนแสง และ แอ็คติเวเตอร์ เป็นตัวปลดปล่อยแสงโดยรับพลังงานมาจากเซนซีไทเซอร์	15
2.12	แสดงแผนภาพกระบวนการเรืองแสงในปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพาหะ ก. แสดงถึงตัวแอ็คติเวเตอร์ (A) ในโครงผลึกเจ้าบ้าน (H) ข. แสดงทั้ง เซนซีไทเซอร์ (S) และ แอ็คติเวเตอร์ (A) ในโครงผลึกเจ้าบ้าน (H)	15
2.13	แผนภาพแสดงการเรืองแสงในปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์ภายในระดับพลังงานของอะตอมของสารเจือที่มีระดับพลังงานอยู่ในช่องว่างแถบพลังงานหลายค่า	16
2.14	แสดงการย้ายสถานะพลังงานแบบมีการเรืองแสงของพาหะอิสระ ระหว่างแถบนำ และ แถบเวเลนซ์	16

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.15 แสดงการเรืองแสงที่เกิดจากการรวมตัวของอิเล็กตรอนอิสระและโฮลที่ถูกจับอยู่ที่ระดับพลังงานของอะตอมผู้รับ (กรณีซ้าย) และการเรืองแสงที่เกิดจากการรวมตัวของอิเล็กตรอนที่ถูกจับอยู่ที่ระดับพลังงานของอะตอมผู้ให้และโฮลอิสระ (กรณีขวา)	17
2.16 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสง และการเรืองแสงของศูนย์กลาง เอฟ (F center) ในผลึกของสารประกอบ KCl	18
2.17 แสดงแผนภาพเอ็กซิตอนที่ถูกจับที่ระดับพลังงานของอะตอมผู้ให้	19
2.18 แสดงสเปกตรัมการเรืองแสงของเอ็กซิตอนชนิดที่มีแรงยึดเหนี่ยวคู่อิเล็กตรอนของผลึกของสารประกอบกึ่งตัวนำ GaP : S	20
2.19 แสดงแผนภาพการเรืองแสงที่เกิดจากการย้ายสถานะพลังงานระหว่าง คู่ของอะตอมผู้ให้ และ อะตอมผู้รับ	21
2.20 แสดงแผนภาพการติดตั้งระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์	21
2.21 แสดงปรากฏการณ์คัปปลิงของอันตรกิริยาระหว่างโมเมนต์เชิงมุมของออร์บิทัลกับสปินของอะตอมที่มีอิเล็กตรอนสองตัว	24
ก. แสดงรัสเซลล์-ซอนเดอ์คัปปลิงของอะตอมที่มีอิเล็กตรอนสองตัว ข. แสดงวิธีการคำนวณหาค่าแฟกเตอร์ของการแตกออกของระดับพลังงาน g_J เมื่อ $\mu_m = -g_J \mu_B J$	24
2.22 แสดงแผนภาพการรวมเวกเตอร์สปินของอะตอมที่มีอิเล็กตรอน 2 ตัว	31
2.23 แสดงสเปกตรัมของฟลักซ์ความเข้มการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารเรืองแสง $Sr_3AlO_4F : RE^{3+}$ ($RE = Ce^{3+}, Tb^{3+}, Ce^{3+}/Tb^{3+}$)	31
2.24 แสดงแถบการกระตุ้นด้วยพลังงานโฟตอนและแถบการเปล่งแสงของสารเรืองแสง	33
ก. $Sr_3AlO_4F : 1\%Ce^{3+}$ ข. $Sr_3AlO_4F : 1\%Tb^{3+}$ ค. $Sr_3AlO_4F : 1\%Ce^{3+}, 1\%Tb^{3+}$	33
2.25 แสดงค่าชีวิตของการสลายตัวของสารเรืองแสงเมื่อกระตุ้นด้วยแสงความยาวคลื่น 370 นาโนเมตร ของไอออนของธาตุ Ce^{3+} ในสารเรืองแสง $Sr_3AlO_4F : 1\%Ce^{3+}, xTb^{3+}$	34
2.26 แสดงแถบการเรืองแสงของสารเรืองแสง $Sr_3AlO_4F : 1\%Ce^{3+}, xTb^{3+}$ เมื่อ $x = 0\%, 1\%, 5\%, 10\%, 20\%$	35
2.27 แสดงแผนภาพระดับพลังงานของไอออนของธาตุ Ce^{3+} และไอออนของธาตุ Tb^{3+} และกระบวนการถ่ายโอนพลังงานแสงจากไอออนของธาตุ Ce^{3+} ไปยังไอออนของธาตุ Tb^{3+} ในสารเรืองแสง $Sr_3AlO_4F : Ce^{3+}, Tb^{3+}$	36

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า I_{so}/I_s กับ $C^{1/3}$ สารเรืองแสง Sr_3AlO_4F : Ce^{3+}, Tb^{3+}	36
3.1 แสดงภาพถ่ายของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $In_{6(1-x)}Tb_{6x}WO_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งเมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง	41
3.2 แสดงภาพถ่ายของเม็ดเซรามิกสารประกอบ $In_{6(1-x)}Eu_xWO_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งเมื่อผ่านการเผาผลึกที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง	46
3.3 แสดงภาพถ่ายเครื่องสเปกโทรฟลูออโรโฟโตมิเตอร์ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น RF-5301PC	47
3.4 แสดงแผนภาพหลักการการทำงานของเครื่องสเปกโทรฟลูออโรโฟโตมิเตอร์ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น RF-5301PC	48
4.1 แสดงภาพถ่ายของเม็ดเซรามิก $In_{6(1-x)}Tb_{6x}WO_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และ $In_{6(1-x)}Eu_xWO_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง ก. เม็ดเซรามิก $In_{6(1-x)}Tb_{6x}WO_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ข. เม็ดเซรามิก $In_{6(1-x)}Eu_xWO_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$)	49
4.2 แสดงที่ความเข้มของสเปกตรัมการเปลวเบนรังสีเอกซ์ของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $In_{6(1-x)}Tb_{6x}WO_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	50
4.3 แสดงค่าคงที่โครงสร้าง a และ c ของหนึ่งหน่วยเซลล์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของไอออนของธาตุ Tb^{3+} ของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $In_{6(1-x)}Tb_{6x}WO_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	51
4.4 แสดงกราฟที่ใช้คำนวณหาขนาดเกรนของเม็ดเซรามิก $In_{6(1-x)}Tb_{6x}WO_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	52
4.5 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบริเวณผิวหน้าของเม็ดเซรามิก $In_{6(1-x)}Tb_{6x}WO_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	54

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 แสดงพิกัดความเข้มของแถบเรืองแสงเมื่อกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 326, 353 และ 388 นาโนเมตร ตามลำดับของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($x = 0.01$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	55
4.7 แสดงพิกัดความเข้มของแถบเรืองแสงเมื่อกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 326, 353 และ 388 นาโนเมตร ตามลำดับของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($x = 0.02$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	56
4.8 แสดงพิกัดความเข้มของแถบเรืองแสงเมื่อกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 326, 353 และ 388 นาโนเมตร ตามลำดับของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($x = 0.03$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	56
4.9 แสดงพิกัดความเข้มของแถบเรืองแสงเมื่อกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 326, 353 และ 388 นาโนเมตร ตามลำดับของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($x = 0.04$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	57
4.10 แสดงพิกัดความเข้มของแถบเรืองแสงเมื่อกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 326, 353 และ 388 นาโนเมตร ตามลำดับของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($x = 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	57
4.11 แสดงความเข้มสัมพัทธ์ของแถบเรืองแสงที่ความยาวคลื่น 467 นาโนเมตรที่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณความเข้มข้นของไอออนของธาตุ Tb^{3+} ของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	58
4.12 แสดงพิกัดความเข้มของแถบพลังงานกระตุ้นเมื่อพิจารณาการเรืองแสงที่ความยาวคลื่น 450, 467, 481 และ 491 นาโนเมตร ตามลำดับของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($x = 0.01$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	59
4.13 แสดงพิกัดความเข้มของแถบพลังงานกระตุ้นเมื่อพิจารณาการเรืองแสงที่ความยาวคลื่น 450, 467, 481 และ 491 นาโนเมตร ตามลำดับของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($x = 0.02$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 แสดงพิกัดความเข้มของแถบพลังงานกระตุ้นเมื่อพิจารณาการเรืองแสงที่ความยาวคลื่น 450, 467, 481 และ 491 นาโนเมตร ตามลำดับของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($x = 0.03$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	60
4.15 แสดงพิกัดความเข้มของแถบพลังงานกระตุ้นเมื่อพิจารณาการเรืองแสงที่ความยาวคลื่น 450, 467, 481 และ 491 นาโนเมตร ตามลำดับของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($x = 0.04$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	60
4.16 แสดงพิกัดความเข้มของแถบพลังงานกระตุ้นเมื่อพิจารณาการเรืองแสงที่ความยาวคลื่น 450, 467, 481 และ 491 นาโนเมตร ตามลำดับของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($x = 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	61
4.17 แสดงพิกัดความเข้มของแถบพลังงานกระตุ้นและแถบเรืองแสงของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	61
4.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C-f, D-f, G-f, Z'-f และ Z''-f ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($x = 0.00$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	62
4.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C-f, D-f, G-f, Z'-f และ Z''-f ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($x = 0.01$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	63
4.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C-f, D-f, G-f, Z'-f และ Z''-f ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($x = 0.02$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C-f, D-f, G-f, Z'-f และ Z''-f ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($x = 0.03$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	65
4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C-f, D-f, G-f, Z'-f และ Z''-f ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($x = 0.04$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	66
4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C-f, D-f, G-f, Z'-f และ Z''-f ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($x = 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	67
4.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(R_0/R)$ กับ $(1000/T)$ ที่ได้จากค่าความนำไฟฟ้าของค้ำอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนในช่วงอุณหภูมิ 80 ถึง 180 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.01 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	68
4.25 แสดงพิกัดความเข้มของสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	71
4.26 แสดงค่าคงที่โครงสร้างผลึก a และ c ของหนึ่งหน่วยเซลล์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลมีแนวโน้มนำเพิ่มขึ้นตามปริมาณของไอออน Eu^{3+} ของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	72
4.27 แสดงกราฟที่ใช้คำนวณหาขนาดเกรนของเม็ดเซรามิกของ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	73
4.28 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบริเวณผิวหน้าของเม็ดเซรามิกของ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	75

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.29 แสดงพิกัดความเข้มของแถบเรืองแสงเมื่อกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 400, 460 และ 529 นาโนเมตร ตามลำดับของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($x = 0.01$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	76
4.30 แสดงพิกัดความเข้มของแถบเรืองแสงเมื่อกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 400, 460 และ 529 นาโนเมตร ตามลำดับของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($x = 0.02$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	77
4.31 แสดงพิกัดความเข้มของแถบเรืองแสงเมื่อกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 400, 460 และ 529 นาโนเมตร ตามลำดับของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($x = 0.03$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	77
4.32 แสดงพิกัดความเข้มของแถบเรืองแสงเมื่อกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 400, 460 และ 529 นาโนเมตร ตามลำดับของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($x = 0.04$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	78
4.33 แสดงพิกัดความเข้มของแถบเรืองแสงเมื่อกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 400, 460 และ 529 นาโนเมตร ตามลำดับของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($x = 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	78
4.34 แสดงความเข้มสัมพัทธ์ของแถบเรืองแสงที่ความยาวคลื่น 606 นาโนเมตร ที่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณความเข้มข้นของไอออนของธาตุ Eu^{3+} ของผงผลึกเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	79
4.35 แสดงพิกัดความเข้มของแถบพลังงานกระตุ้นเมื่อพิจารณาการเรืองแสงที่ความยาวคลื่น 587, 606 และ 629 นาโนเมตร ตามลำดับของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($x = 0.01$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	80
4.36 แสดงพิกัดความเข้มของแถบพลังงานกระตุ้นเมื่อพิจารณาการเรืองแสงที่ความยาวคลื่น 587, 606 และ 629 นาโนเมตร ตามลำดับของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($x = 0.02$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.37 แสดงพิกัดความเข้มของแถบพลังงานกระตุ้นเมื่อพิจารณาการเรืองแสงที่ความยาวคลื่น 587, 606 และ 629 นาโนเมตร ตามลำดับของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($x = 0.03$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	81
4.38 แสดงพิกัดความเข้มของแถบพลังงานกระตุ้นเมื่อพิจารณาการเรืองแสงที่ความยาวคลื่น 587, 606 และ 629 นาโนเมตร ตามลำดับของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($x = 0.04$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	81
4.39 แสดงพิกัดความเข้มของแถบพลังงานกระตุ้นเมื่อพิจารณาการเรืองแสงที่ความยาวคลื่น 587, 606 และ 629 นาโนเมตร ตามลำดับของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($x = 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	82
4.40 แสดงพิกัดความเข้มของแถบพลังงานกระตุ้นและแถบเรืองแสงของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	82
4.41 แสดงระดับพลังงานภายในไอออนของธาตุ Tb^{3+} และ ไอออนของธาตุ Eu^{3+} ที่เจืออยู่ในผงผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	83
4.42 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C-f, D-f, G-f, Z'-f และ Z''-f ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($x = 0.00$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	84
4.43 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C-f, D-f, G-f, Z'-f และ Z''-f ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($x = 0.01$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.44 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C-f, D-f, G-f, Z'-f และ Z''-f ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($x = 0.02$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	86
4.45 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C-f, D-f, G-f, Z'-f และ Z''-f ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($x = 0.03$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	87
4.46 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C-f, D-f, G-f, Z'-f และ Z''-f ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($x = 0.04$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	88
4.47 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C-f, D-f, G-f, Z'-f และ Z''-f ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($x = 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	89
4.48 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(R_0/R)$ กับ $(1000/T)$ ที่ได้จากค่าความนำไฟฟ้าของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนในช่วงอุณหภูมิ 80 ถึง 180 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

เม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_2\text{O}_3 - \text{WO}_3$ ได้รับความสนใจกันอย่างมาก เนื่องจากมีศักยภาพสูงในการประยุกต์เป็นสิ่งประดิษฐ์ทางไฟฟ้าและทางแสง ตัวอย่างเช่นเม็ดเซรามิกของสารประกอบ WO_3 เป็นวัสดุอิเล็กโตรโครมิก (electro chromic) ที่โดดเด่น สามารถประยุกต์ใช้เป็นหน้าต่างอัจฉริยะ (smart window) สำหรับบ้านและรถยนต์เพื่อการประหยัดพลังงาน (Richard and Edwards, 2003; Ramana et al., 2006) นอกจากนี้ฟิล์มบางของสารประกอบ WO_3 ยังมีความสามารถตรวจจับมลพิษทางสิ่งแวดล้อมได้เป็นอย่างดี ส่วนฟิล์มบางของสารประกอบ In_2O_3 เป็นวัสดุพื้นฐานสำหรับประดิษฐ์เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง ITO ในจอแสดงผลชนิดแบน เม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_2(\text{WO}_4)_3$ มีสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าชนิดแคตไอออนที่มีประจุ +3 (trivalent cation conductor) ส่วนเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_6\text{WO}_{12}$ มีศักยภาพที่จะประยุกต์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับอนุภาคนิวตริโนจากดวงอาทิตย์ได้ (Gaewdang et al., 1993)

ทังสเตนบรอนซ์ (tungsten bronzes) มีสูตรเคมีคือ M_xWO_3 เมื่อ M คือ อะตอมของโลหะ สารประกอบนี้เกิดจากแต่ละออกตะฮีดรัลของสารประกอบ WO_3 จับกันในรูปแบบไข่มุมติดกัน (corner sharing) เชื่อมต่อกันเป็นโครงข่ายอุโมงค์ (tunnel network) ในสามมิติ เนื่องจากในอุโมงค์เป็นที่ว่าง ดังนั้นจึงสามารถเติมอะตอมโลหะ M เข้าไปได้ รู้อุโมงค์อาจจะเป็นรูปสามเหลี่ยมหรือเป็นหกเหลี่ยมก็ได้สำหรับเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{0.02}\text{WO}_3$ และ $\text{In}_{0.03}\text{WO}_3$ จะมีรู้อุโมงค์แบบรูปสามเหลี่ยม แต่ถ้าปริมาณของไอออนของธาตุ In^{3+} เพิ่มขึ้น รู้อุโมงค์จะกลายเป็นรูปหกเหลี่ยมซึ่งจะมีชื่อเรียกว่า HTB (hexagonal tungsten bronzes) เอกลักษณ์ของ HTB คือ จะมีสีน้ำเงินเข้ม แต่ถ้าไอออนของธาตุ In^{3+} เพิ่มขึ้นอีก สารประกอบนี้จะสะท้อนแสงแวววาวคล้ายโลหะ ในแง่ของโครงสร้างทางเรขาคณิต เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของไอออนโลหะจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.33 แต่อย่างไรก็ตามมีผู้รายงานว่า เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) มีค่าสูงสุดได้เท่ากับ 0.4 (Richard, 2003)

รากาเวน (Raghavan, 1976) ได้เสนอวิธีการใหม่ในการตรวจวัดนิวตริโนจากดวงอาทิตย์โดยผ่านปฏิกิริยานิวเคลียร์ $\nu(E > 128 \text{ กิโลอิเล็กตรอนโวลต์}) + {}^{115}\text{In} \rightarrow e^- + {}^{115}\text{Sn}^* + \gamma$ จากนั้นนิวเคลียสของธาตุ ${}^{115}\text{Sn}^*$ จะปล่อยรังสีแกมมาที่มีพลังงาน 116 และ 496 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ โดยที่ ${}^{115}\text{Sn}^*$ มีช่วงชีวิต 3.2 ไมโครวินาที ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะสร้างตัวตรวจวัดนิวตริโนที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารประกอบ InBO_3 ที่มีเปอร์เซ็นต์ของไอออนของธาตุ In^{3+} ในปริมาณที่สูงจึงเหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นตัวตรวจวัดนิวตริโน โดยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาสมบัติการเรืองแสงของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ InBO_3 เป็นแถบกว้างที่มีจุดสูงสุดที่พลังงาน 3.10 อิเล็กตรอนโวลต์ ค่าเลื่อนไปของสโตก (Stoke shift) มีค่าประมาณ 1.26 อิเล็กตรอนโวลต์ ค่าเลื่อนไปของสโตกนี้มีค่ามากกว่าค่าที่พบในเม็ด

เซรามิกของสารประกอบ InBO_3 : Bi^{3+} ซามินาดและผู้ร่วมงาน (Chaminade et al., 1990) ได้ทำการศึกษาสมบัติเรืองแสงของผลึกเดี่ยวของสารประกอบ InBO_3 : Tb^{3+} ซึ่งการเรืองแสงจะอยู่ในย่านแสงสีเขียว นอกจากนี้ยังมีการเจือด้วยไอออนของธาตุ Cr^{3+} ลงในเม็ดเซรามิกของสารประกอบ InBO_3 ซึ่งแถบการเรืองแสงจะเกิดจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนจาก ${}^4T_2 \rightarrow {}^4A_2$ ซึ่งสามารถนำไปประดิษฐ์เป็นตัวเพิ่มความเข้มแสงให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ อีกทั้งได้มีการศึกษาสมบัติการเรืองแสงของไอออนของธาตุ Ce^{3+} ในเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_x\text{Sc}_{1-x}\text{BO}_3$ ($0 \leq x \leq 1$) การเปล่งแสงจะอยู่ในย่านแสงสีม่วง (Gaewdang et al., 1994) $\text{In}_6\text{WO}_{12}$ สามารถเปล่งแสงได้ในช่วงย่านแสงสีน้ำเงินจนถึงแสงสีเขียว ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 150 เคลวิน ดังนั้นจึงน่าสนใจที่จะศึกษาสมบัติการเรืองแสงของไอออนของธาตุ Tb^{3+} และ Eu^{3+} ในเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_6\text{WO}_{12}$

เมื่อไม่นานมานี้ ได้มีการพัฒนาหลอดแอลอีดีที่เปล่งแสงสีขาว (white LEDs) ขึ้นมาเพื่อจะใช้แทนหลอดไฟฟ้ที่ใช้กันอยู่ทั่วไป ซึ่งส่วนมากคือหลอดฟลูออเรสเซนต์ เนื่องจากหลอดแอลอีดีที่เปล่งแสงสีขาว มีประสิทธิภาพสูงมีความสว่างมาก มีอายุการใช้งานยาวนานและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Liu et al., 2012) ในปี ค.ศ. 1996 ได้มีการผลิตหลอดแอลอีดีที่เปล่งแสงสีขาวจากชิพของสารกึ่งตัวนำ InGaN ซึ่งเคลือบด้วยสารเรืองแสงสีเหลืองของสารประกอบ $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$: Ce^{3+} (Yoon et al., 2014) ซึ่งสารกึ่งตัวนำ InGaN จะเปล่งแสงสีน้ำเงินออกมาผสมกับสีเหลืองของ $\text{YAG} : \text{Ce}^{3+}$ จะกลายเป็นแสงสีขาวโดยหลักการแล้วหลอดไฟฟ้จากแอลอีดีจะให้แสงสีขาวได้นั้นมี 3 วิธี คือ วิธีที่ 1 คือ แสงสีขาวได้จากการผสมสีของแอลอีดีที่เปล่งแสงสีแดง แอลอีดีที่เปล่งแสงสีเขียว และแอลอีดีที่เปล่งแสงสีน้ำเงิน วิธีที่ 2 คือใช้แอลอีดีที่เปล่งแสงอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับสารเรืองแสงไตรคัลเลอร์ที่ให้ทั้งสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน วิธีที่ 3 คือใช้แอลอีดีที่เปล่งแสงสีน้ำเงินร่วมกับสารเรืองแสงสีเหลือง

การพัฒนาหลอดไฟฟ้แบบแอลอีดีที่เปล่งแสงอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับสารเรืองแสงไตรคัลเลอร์สีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน นั้นจะเป็นแนวทางที่เหมาะสมในการพัฒนาหลอดไฟฟ้ชนิดโซลิตสเตรท เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานไฟฟ้เป็นพลังงานแสง มีเสถียรภาพของสีสูงภายใต้การไบแอสกระแสค่าต่างๆ ในอนาคตอันใกล้นี้ แอลอีดีที่เปล่งแสงสีขาวจะเข้ามาแทนที่หลอดไฟฟ้ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน โดยส่วนใหญ่สารเรืองแสงจะผลิตจากวัสดุสารอนินทรีย์สถานะของแข็งของสารประกอบ แวนาเดต โมลิบเดต และ ทังสเตต ที่เจือด้วยไอออนของธาตุที่หายาก (rare earth) เช่น Eu^{3+} , Tb^{3+} และ Ce^{3+} เป็นต้น ไอออนของธาตุ Eu^{3+} จะเปล่งแสงสีแดงที่มีความยาวคลื่นประมาณ 614 นาโนเมตร ซึ่งเกิดจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนจาก ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$ ส่วนไอออนของธาตุ Tb^{3+} จะเปล่งแสงสีเขียว ความยาวคลื่นประมาณ 544 นาโนเมตร เนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนจาก ${}^5D_4 \rightarrow {}^7F_5$ ไอออนของธาตุ Ce^{3+} จะเปล่งแสงสีน้ำเงินเป็นแถบกว้าง 2 แถบซ้อนกันที่มีความยาวคลื่น 365 และ 425 นาโนเมตร เนื่องมาจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนจาก $D_{3/2} \rightarrow F_{7/2}$ และ $D_{3/2} \rightarrow F_{5/2}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับสารเรืองแสงที่เจือด้วยไอออนของธาตุ Tb^{3+} ร่วมกับ Eu^{3+} จะมีลักษณะพิเศษ คือสามารถเปล่งแสงสีเขียว และ แสงสีแดงออกมาพร้อมกันได้ โดยการกระตุ้นด้วยแสงที่สอดคล้องกับสเปกตรัมการกระตุ้นของไอออนของธาตุ Tb^{3+} เพียงอย่างเดียว เนื่องมาจากกลไกการเปล่งแสงจะมีการถ่ายโอนพลังงานจากไอออนของธาตุ Tb^{3+} ไปยังไอออนของธาตุ Eu^{3+} (Wang et al., 2015) ดังนั้นสเปกตรัมการเปล่งแสงสามารถปรับแต่งได้ โดยการแปรเปลี่ยนปริมาณความเข้มข้นของไอออนของธาตุ Tb^{3+} และ Eu^{3+} ดังนั้นในโครงการพิเศษนี้จึงน่าสนใจที่จะศึกษาสมบัติการเรืองแสงของไอออนของธาตุ Tb^{3+} และ Eu^{3+} ในเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $In_{6(1-x)}Tb_{6x}WO_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และ $In_{6(1-x)}Eu_xWO_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ซึ่งเตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ In_2O_3 , WO_3 , $TbCl_3 \cdot 6H_2O$ และ $EuCl_3 \cdot 6H_2O$ เพื่อประโยชน์ในการประยุกต์เป็นสารเรืองแสงสำหรับแอลอีดีที่เปล่งแสงสีขาว อีกทั้งยังอาจประยุกต์เป็นตัวตรวจจับนิวตริโนจากดวงอาทิตย์ได้ในอนาคตโดยอาศัยสมบัติการเรืองแสงของไอออนของสารเจือดังกล่าวนี้

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $In_{6(1-x)}Tb_{6x}WO_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และ $In_{6(1-x)}Eu_xWO_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ In_2O_3 , WO_3 , $TbCl_3 \cdot 6H_2O$ และ $EuCl_3 \cdot 6H_2O$ ด้วยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งเมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ภายใต้ของอากาศ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
2. ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค และ เชิงมหภาค ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ และโดยการถ่ายภาพผิวหน้าผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $In_{6(1-x)}Tb_{6x}WO_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และ $In_{6(1-x)}Eu_xWO_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$)
3. ศึกษาการเรืองแสงของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $In_{6(1-x)}Tb_{6x}WO_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และ $In_{6(1-x)}Eu_xWO_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และ ศึกษาอิทธิพลของปริมาณของเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของไอออนของธาตุ Tb^{3+} และ Eu^{3+} ที่มีต่อการเรืองแสง
4. ศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $In_{6(1-x)}Tb_{6x}WO_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และ $In_{6(1-x)}Eu_xWO_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ และในช่วงอุณหภูมิ 30 - 70 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. เตรียมเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ In_2O_3 , WO_3 , $\text{TbCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{EuCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ด้วยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งเมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
2. ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค และ มหภาค ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance และ โดยการถ่ายภาพผิวหน้าผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ LEO รุ่น LEO 1455VPP ของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$)
3. ศึกษาการเรืองแสงด้วยเครื่องสเปกโทรฟลูออโรโฟโตมิเตอร์ของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$)
4. ศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ - 1 เมกะเฮิร์ตซ์ และในช่วงอุณหภูมิ 30 - 70 องศาเซลเซียส
5. วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

1. ค้นคว้าหาข้อมูลจากฐานข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์เพื่อเป็นแนวทางในทำการวิจัย
2. จัดเตรียมอุปกรณ์ที่ต้องใช้ในงานวิจัย เช่น
 - เตาเผาที่มีอุณหภูมิสูงถึง 1200 องศาเซลเซียส
 - เครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์
 - เครื่องสเปกโทรฟลูออโรโฟโตมิเตอร์
3. ทำการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ In_2O_3 , WO_3 , $\text{TbCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{EuCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ด้วยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งเมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
4. ทำการตรวจสอบสมบัติทางฟิสิกส์ของเม็ดเซรามิกของสารประกอบสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่ได้ดังต่อไปนี้
 - ตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค และ เชิงมหภาค ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และโดยการถ่ายภาพผิวหน้าผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ตรวจสอบสมบัติเรืองแสงด้วยเครื่องสเปกโทรฟลูออโรโฟโตมิเตอร์ของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$)
- ตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับด้วยการวัดอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ - 1 เมกะเฮิร์ตซ์ และในช่วงอุณหภูมิ 30 - 70 องศาเซลเซียส

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงหลักการทำงานและวิธีการใช้อุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในงานวิจัย เช่น เตาอุณหภูมิสูง เครื่องเอกเรย์ดีทีแอฟโฟโตมิเตอร์ เครื่องสเปกโทรฟลูออโรโฟโตมิเตอร์ เป็นต้น
2. ทราบถึงวิธีการและขั้นตอนในการเตรียมเม็ดเซรามิก
3. ทราบถึงผลของการเรืองแสงของไอออนของธาตุ Tb^{3+} และ Eu^{3+} ที่เจือในเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$)
4. ทราบถึงผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$)
5. ใช้เป็นพื้นฐานเพื่อนำไปใช้ในการศึกษาสารเรืองแสงอื่นต่อไป

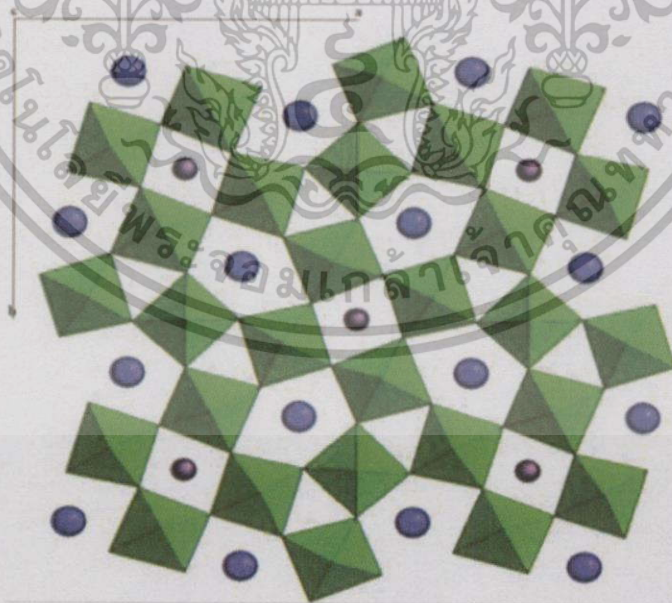
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โครงสร้างผลึกของเม็ดเซรามิกของสารประกอบอินเดียมทังสเตนบรอนซ์ (ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550)

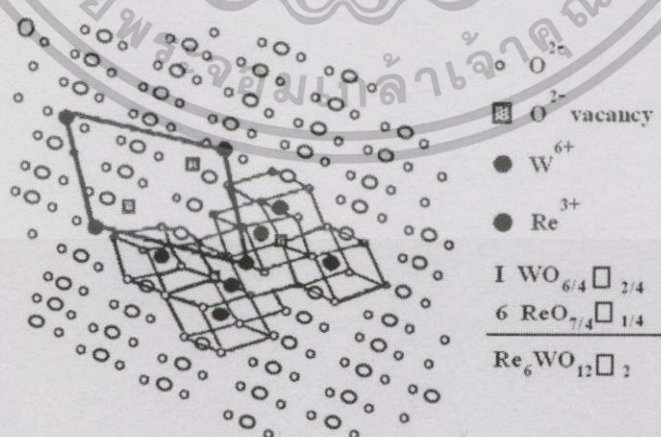
จากการที่แต่ละออกตะไฮดรอลของสารประกอบ WO_3 ใช้มุมเชื่อมต่อกันจนกลายเป็นโครงข่าย อูโมงค์ในรูปร่างต่างๆ ที่วางภายในอูโมงค์สามารถที่จะใส่อะตอมธาตุโลหะต่างๆ เข้าไปได้ทำให้เกิด เป็นสารประกอบที่เรียกว่าทังสเตนบรอนซ์มีสูตรเคมีคือ M_xWO_3 การแทรกอะตอมโลหะเข้าไปใน อูโมงค์ทำให้อูโมงค์มีขนาดต่างออกไปจากเดิมกลายเป็นสมมาตรแบบเตตระโกนัลกับเฮกซะโกนัล เม็ดเซรามิกของสารประกอบ $In_{0.02}WO_3$ และ $In_{0.03}WO_3$ มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ เตตระโกนัล ทังสเตนบรอนซ์ ลักษณะพิเศษของเตตระโกนัลทังสเตนบรอนซ์ คือ อูโมงค์จะมี 3 แบบคือ สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม และ ห้าเหลี่ยมผสมผสานกันดังรูปที่ 2-1 แต่เมื่อปริมาณของโลหะ In เพิ่มขึ้น สารประกอบจะมีสีแฉวาวคล้ายโลหะและโครงสร้างผลึกจะเปลี่ยนไปเป็นเฮกซะโกนัลทังสเตน บรอนซ์บูชาร์ดและกิลสัน (Bouchard and Gillson, 1968) พบว่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) สูงถึง 0.33 โครงสร้างผลึกยังคงเป็นเฮกซะโกนัลทังสเตนบรอนซ์ เอกลักษณะของเฮกซะโกนัลทังสเตนบรอนซ์ คือ อูโมงค์จะเป็นรูปร่างสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม และ หกเหลี่ยมผสมผสานกัน แต่ละอะตอมของธาตุ In จะ เข้าไปอยู่ในอูโมงค์รูปหกเหลี่ยม



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนัลของเม็ดเซรามิกของสารประกอบอินเดียมทังสเตนบรอนซ์

2.2 โครงสร้างผลึกของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_6\text{WO}_{12}$ (งามนิตย์, 2556; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2556; Diot, 2001)

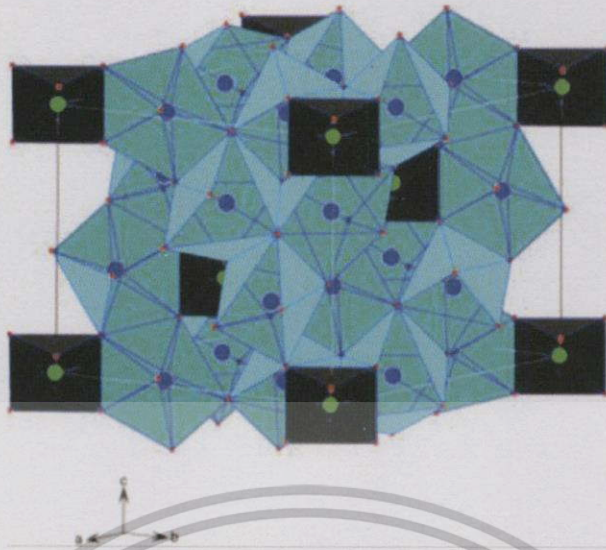
เม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_6\text{WO}_{12}$ มีโครงสร้างผลึกสัมพันธ์กับสารประกอบเชิงสอง (binary compounds) ที่อะตอมของโลหะมีวาเลนซ์ผสมผสานหลายค่า (mixed valency) ตัวอย่างเช่น สารประกอบที่มีสูตรเคมีว่า M_7O_{12} เมื่อ M คือ อะตอมโลหะ โครงสร้างผลึกของสารประกอบ M_7O_{12} อาจเขียนให้สัมพันธ์กับโครงสร้างผลึกแบบฟลูออไรท์ที่มีข้อบกพร่องผลึก (defect fluorite structure) ได้เป็น $\text{M}_7\text{O}_{12}\text{V}_2$ เมื่อ V คือ แวแคนซีของอะตอมของธาตุออกซิเจน นั่นคือ หนึ่งหน่วยเซลล์ (unit cell) จะมีแวแคนซี 2 แวแคนซี โครงสร้างผลึกของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_6\text{WO}_{12}$ จะแสดงใน รูปที่ 2.2 ซึ่งหนึ่งหน่วยเซลล์ จะประกอบไปด้วยลูกบาศก์ย่อย (cubic) จำนวน 7 ลูกบาศก์ที่มีขอบของลูกบาศก์ร่วมกัน (edge sharing) ลูกบาศก์ตรงกลางจะมีอะตอมของธาตุ W ปรากฏอยู่และมีแวแคนซีของอะตอมของธาตุออกซิเจนจำนวน 2 แวแคนซี อยู่ที่มุมของลูกบาศก์ในแนวทแยงมุม (ในทิศทาง $\langle 111 \rangle$) ซึ่งในลูกบาศก์ศูนย์กลางนี้ สามารถเขียนเป็นสูตรเคมีว่า WO_2V_2 ส่วนลูกบาศก์ย่อยอีก 6 อัน ที่ล้อมรอบลูกบาศก์ศูนย์กลาง WO_2V_2 จะมีอะตอมของธาตุ In ปรากฏอยู่ ซึ่งแต่ละลูกบาศก์ย่อย 6 อัน นี้จะมีแวแคนซีของอะตอมของธาตุออกซิเจนอยู่ที่มุมอันละ 1 แวแคนซี (Diot et al., 2001) และ หนึ่งหน่วยเซลล์จะอยู่ในระบบบรอมโบอีดริล (rhombohedral) ซึ่งจะแสดงด้วยเส้นที่บิดรูปที่ 2.2 โดยที่พันธะของอะตอมของธาตุ In จะมี 7 แขน ส่วนอะตอมของธาตุ W จะมี 6 แขน โครงสร้างผลึกของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_6\text{WO}_{12}$ จะเหมือนกับเม็ดเซรามิกของสารประกอบ Y_6WO_{12} และ $\text{Ho}_6\text{WO}_{12}$ สำหรับโครงสร้างผลึกของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_6\text{WO}_{12}$ ยังสามารถแสดงได้ในระบบเฮกซะโกนัล ซึ่งในรูปที่ 2.3 จะเห็นว่าไอออนของธาตุ In^{3+} สร้างพันธะกับไอออนของธาตุ O^{2-} จำนวน 7 พันธะ ส่วนไอออนของธาตุ W^{6+} สร้างพันธะกับไอออนของธาตุ O^{2-} จำนวน 6 พันธะเรียกว่า “พันธะออกตะฮีดริล”



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างผลึกของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_6\text{WO}_{12}$ ในระบบบรอมโบอีดริล

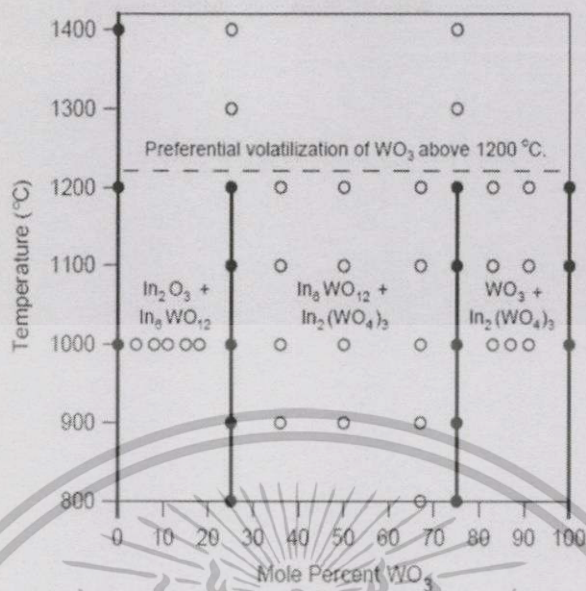
(Diot et al., 2001)



รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเอกซิกโซโนัลของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_6\text{WO}_{12}$

2.3 เฟลไดอะแกรมของระบบของเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_2\text{O}_3 - \text{WO}_3$ (งามนิตย์, 2556; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2556)

ริชาร์ดและเอ็ดเวิร์ด (Richard and Edwards, 2004) ได้ทำการศึกษาเฟลไดอะแกรมของระบบของเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_2\text{O}_3 - \text{WO}_3$ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 พบว่ามีเม็ดเซรามิกของสารประกอบที่เสถียร คือ $\text{In}_2(\text{WO}_4)_3$ และ $\text{In}_6\text{WO}_{12}$ เม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_2(\text{WO}_4)_3$ สามารถนำไปเป็นตัวนำไฟฟ้าชนิดแคตไอออนประจุ +3 ส่วนสารประกอบ $\text{In}_6\text{WO}_{12}$ มีศักยภาพที่จะนำไปประดิษฐ์เป็นตัวตรวจวัดนิวตริโนจากดวงอาทิตย์ ฟิล์มบางของสารประกอบ $\text{In}_6\text{WO}_{12}$ สามารถเตรียมไว้โดยวิธีโซล-เจล (Dabney et al., 2002) เม็ดเซรามิกของสารประกอบ In_2O_3 เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) เนื่องจากแวนเดอวาล์วของอะตอมของธาตุออกซิเจน แต่ถ้ามมีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Sn จะทำให้นำไฟฟ้าได้เป็นอย่างมาก ปัจจุบันมีการผลิตเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ เม็ดเซรามิกของสารประกอบอินเดียมทั้งสแตโนบรอนซ์ (In_xWO_3) รู้จักกันมานานแล้ว (Bouchard and Gillson, 1968) ฟิล์มบางของสารประกอบ WO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ In มีศักยภาพที่จะนำไปประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับแก๊สหลายชนิด เช่น NH_3 , CH_4 และ CO เป็นต้น เม็ดเซรามิกของสารประกอบ WO_3 ในรูปของฟิล์มบางสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นหน้าต่างอัจฉริยะ จอแบนแสดงผล ตัวตรวจจับแก๊สชนิดต่างเพื่อประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อม และเม็ดเซรามิกของสารประกอบ WO_3 สามารถนำมาประดิษฐ์เป็นวาริสเตอร์แรงดันไฟต่ำ (Makarov and Trontelj, 2000) มีลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าสูง ได้มีการศึกษาความเป็นวาริสเตอร์ของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ WO_3 โดยการเจือด้วยอะตอมหลายชนิดเช่น Al_2O_3 , Co_3O_4 , MnO_2 และ Pr_6O_{12} เป็นต้น (Wang et al., 2010; Yang et al., 2004; Makarov and Trontelj, 1996)



รูปที่ 2.4 แสดงเฟสไดอะแกรมของระบบของเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_2\text{O}_3 - \text{WO}_3$ ในช่วงอุณหภูมิ 700 - 1400 องศาเซลเซียสจุดวงกลมทึบแสดงเฟสเดี่ยว ส่วนจุดวงกลมโปร่งแสดงเฟสผสม

2.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (งามนิตย, 2543; งามนิตย, 2545; งามนิตย, 2551; จูตินัย, 2546; จูตินัย, 2550)

การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดยวิธี $\theta - 2\theta$ ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ เป็นวิธีที่ใช้ในการจำแนก ลักษณะโครงสร้างของผลึก ซึ่งอาศัยรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นค่าเดียวจากแหล่งกำเนิดตกกระทบกับ สารตัวอย่างซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้ ซึ่งสารตัวอย่างจะหมุนเป็น θ ในขณะที่ อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรังสีเอกซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม 2θ และเมื่อรังสีเอกซ์ผ่าน โครงสร้างของ ผลึกออกมาจะเกิดการแทรกสอดแบบหักล้างและแบบเสริมโดย แบรกก์ ได้เสนอว่าผลึกมีการจัดเรียง ตัวเป็นระนาบของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยมีมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ทั้งนี้รังสีเอกซ์จะแทรกสอดกันแบบเสริมมากที่สุด เมื่อมีการกระเจิงออกจากแต่ละระนาบด้วยความ แตกต่างของทางเดินคลื่น (path difference) เป็นจำนวนเท่าระนาบของความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ ซึ่งเรียกว่ากฎของแบรกก์ ดังสมการ (2.1)

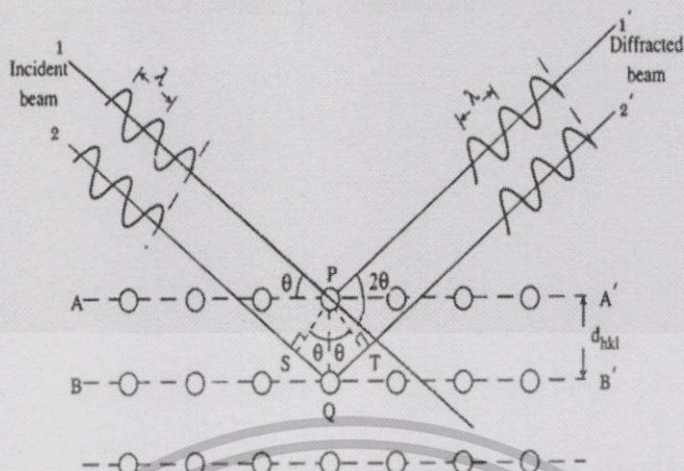
$$n\lambda = 2d_{hk} \sin \theta \quad (2.1)$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

n คือ ลำดับของการเลี้ยวเบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ d_{hk} คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น θ นี้ก็คือ มุมตกกระทบและมุมสะท้อนของรังสีเอกซ์เมื่อเทียบกับระนาบของผลึก



รูปที่ 2.5 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์

โดยในระนาบที่รังสีเอกซ์ตกกระทบ แล้วกระเจิงออกมาโดยสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ จะเรียกว่า “ระนาบของแบรกก์” และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับระนาบที่ขนานกับรังสีตกกระทบ เรียกว่า “มุมเลี้ยวเบน (2θ)” ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมสะท้อน

รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์กับมุมเลี้ยวเบน ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของธาตุหรือสารแต่ละประเภท จากการเลี้ยวเบนและการแทรกสอดแบบเสริม จะทำให้ความเข้มของรังสีเอกซ์มีค่ามาก ซึ่งจะสังเกตได้จากตำแหน่งพิกัดในรูปแบบการเลี้ยวเบน และพิกัดเหล่านี้จะปรากฏที่มุมเลี้ยวเบนเดิมสำหรับธาตุหรือสารประกอบชนิดเดียวกัน และจะมีตำแหน่งของพิกัดที่มุมของการเลี้ยวเบนต่างกันสำหรับธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกัน การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกทำได้โดยการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของสารตัวอย่างกับไฟล์มาตรฐานของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผลึก ซึ่งเป็นฐานข้อมูลเกี่ยวกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของธาตุหรือสารประกอบต่างๆ โดยการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนที่ได้กับรูปแบบการเลี้ยวเบนจากไฟล์มาตรฐานนั้น ทำได้โดยการเปรียบเทียบตำแหน่งของระนาบที่ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนออกมา โดยการระบุระนาบจะใช้สัญลักษณ์ (hkl) ซึ่งมีชื่อเรียกว่า “ดัชนีมิลเลอร์” ซึ่งดัชนีมิลเลอร์จะเป็นส่วนกลับของจุดที่ระนาบตัดแกนผลึก

2.5 ปรากฏการณ์ลูมิเนสเซนซ์ (ฐิตินัย, 2545; ฐิตินัย, 2547; ฐิตินัย, 2551; ดุสิต, 2542; Kittel, 1971)

ปรากฏการณ์ลูมิเนสเซนซ์ (luminescence) เป็นชื่อเรียกปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการเรืองแสงทั้งหมด นอกเหนือจากการเรืองแสงชนิดการแผ่รังสีความร้อน (thermal radiation) และชนิดการแผ่รังสีเชอเรนคอฟ (Cerenkov radiation) การเรืองแสงแบบลูมิเนสเซนซ์เกิดจากการที่อะตอมหรืออิเล็กตรอนเปลี่ยนสถานะจากระดับพลังงานสูงลงมาสู่สถานะระดับพลังงานที่ต่ำกว่า ลูมิเนสเซนซ์

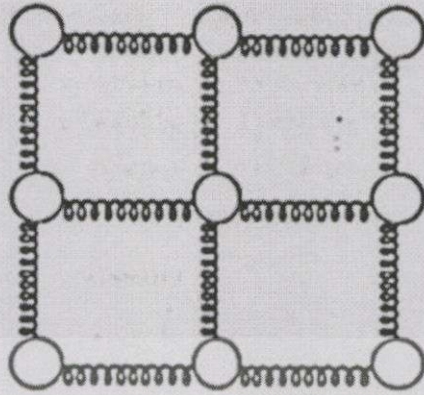
สังเกตได้ทั้งในวัสดุประเภทก๊าซ ของเหลว และของแข็งและทั้งวัสดุชนิดอินทรีย์และอนินทรีย์วิธีการกระตุ้นให้พลังงานแก่วัสดุมีหลายวิธี เช่น การฉายพลังงานโฟตอน การระดมยิงด้วยลำอิเล็กตรอน การระดมยิงด้วยลำไอออน การจ่ายแรงดันไฟฟ้า การให้ความร้อน การทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี การป้อนสนามไฟฟ้า และการจ่ายกระแสไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งแสดงชนิดของปรากฏการณ์ลูมิเนสเซนซ์โดยแบ่งตามวิธีการกระตุ้นดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงชนิดของปรากฏการณ์ลูมิเนสเซนซ์ตามวิธีการกระตุ้นแบบต่างๆ

ชนิดของปรากฏการณ์ลูมิเนสเซนซ์	วิธีการกระตุ้น
โฟโตลูมิเนสเซนซ์ (photoluminescence : PL) - ชนิดของสโตกส์ (stokes type) - ชนิดแอนติสโตกส์ (anti-stokes type)	แสง
อิเล็กโทรลูมิเนสเซนซ์ (electroluminescence : EL) - อินทรินซิกอิเล็กโทรลูมิเนสเซนซ์ (intrinsic EL) - ไดโอดเรืองแสง (carrier Injunction-EL : LED)	ไฟฟ้า
คาโทดลูมิเนสเซนซ์ (cathode-luminescence)	อิเล็กตรอน
เทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ (thermo-luminescence)	ความร้อน
ไตรโบลูมิเนสเซนซ์ (tribo-luminescence)	การเสียดสี
เคมีคัลลูมิเนสเซนซ์ (chemical-luminescence)	ปฏิกิริยาเคมี
เอกซเรย์ลูมิเนสเซนซ์ (x-ray-luminescence)	รังสีเอกซ์

ในกรณีหลอดฟลูออเรสเซนต์จะทำงานโดยเริ่มจากปรอทที่บรรจุอยู่ในหลอดจะถูกกระตุ้นโดยสนามไฟฟ้าให้เกิดการดีสชาร์จ (discharge) ทำให้เกิดรังสีอัลตราไวโอเล็ต จากนั้นรังสีอัลตราไวโอเล็ต จะไปกระตุ้นสารเรืองแสงที่เคลือบอยู่บริเวณผิวด้านในของหลอด ทำให้เกิดแสงสว่างในย่านความถี่ของแสงสีขาวที่ตามนุษย์มองเห็นได้ เช่นกรณีโทรทัศน์ชนิด CRT (cathode ray tube) สว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

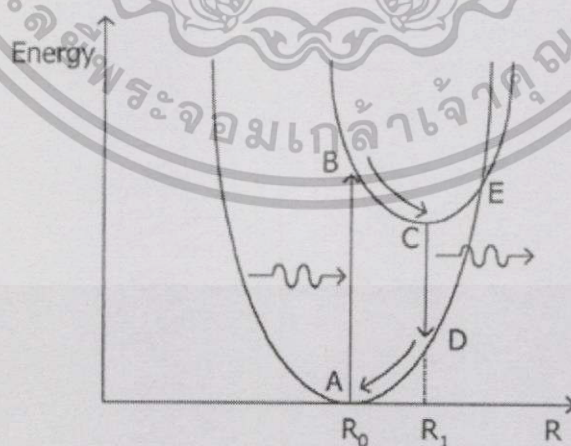


รูปที่ 2.6 แสดงภาพโครงสร้างของพันธะเคมีระหว่างอะตอม ที่มีลักษณะของการจับกันของอะตอมที่คล้ายกับการการมีสปริงยึดอยู่ระหว่างอะตอม

2.5.1 ปฏิกิริยาการแผ่รังสีโฟโตลูมิเนสเซนซ์

ปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์ (photoluminescence) แบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ

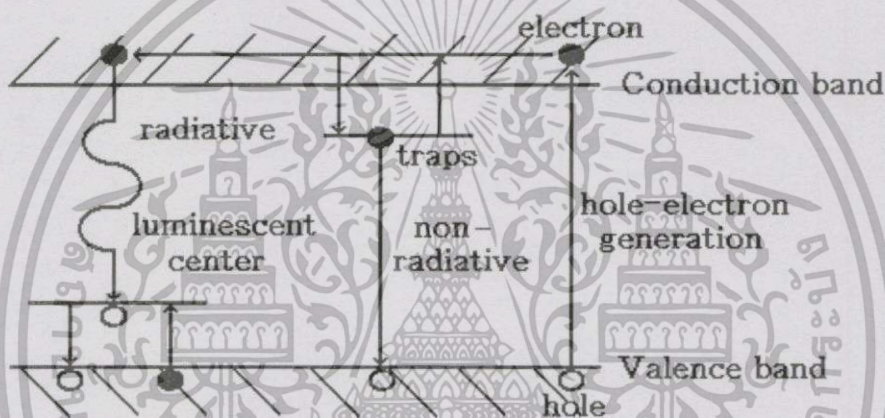
1. ปรากฏการณ์ฟลูออเรสเซนซ์ (fluorescence) จะเกิดการเรืองแสงขณะที่มีการกระตุ้นกลไกคือจะมีค่าชีวิตของพาหะ (life time) สั้นๆ น้อยกว่าหรือเท่ากับ 10^{-8} วินาที
2. ปรากฏการณ์ฟอสฟอเรสเซนซ์ (phosphorescence) จะเกิดการเรืองแสงภายหลังที่มีการกระตุ้นจึงมีค่าชีวิตของพาหะนานกว่าฟลูออเรสเซนซ์ คืออาจมีค่าประมาณ 10^3 วินาที หรือ อาจเป็นชั่วโมง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 2.7 แสดงแผนภาพการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนในปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทางสิ้น ออกทั้งหมดให้เด็ดขาดเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.7 อิเล็กตรอนที่อยู่ตำแหน่ง A เมื่อดูดกลืนพลังงานโฟตอนจะถูกกระตุ้นจนไปอยู่ที่ตำแหน่ง B และหลังจากนั้นอิเล็กตรอนจะย้ายสถานะพลังงานไปอยู่ที่ตำแหน่งใหม่ (R_1) และอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากตำแหน่ง B ไปยัง C ได้ปล่อยโฟนอนไม่เกิดการเรืองแสง (non-radiative) ออกไป หลังจากนั้นอิเล็กตรอนจะย้ายสถานะพลังงานจากจุด C ไปยัง D และเรืองแสง (radiative) โดยจะมีโฟตอนเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง D ไอออนรอบๆ จะรีแลกเซชันเพื่อกลับไปยังตำแหน่ง R_0 ที่ตำแหน่ง C เมื่อให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่ทำให้การเรืองแสงหายไป (quenching temperature) อิเล็กตรอนจะไปอยู่ที่ตำแหน่ง E ซึ่งจะทำให้อิเล็กตรอนในสถานะกระตุ้น (excited state) สามารถกลับมาที่สถานะพื้น (ground state) ได้เลย โดยพลังงานค่าเดิมจะไม่มีการเรืองแสงออกมา (non-radiative)

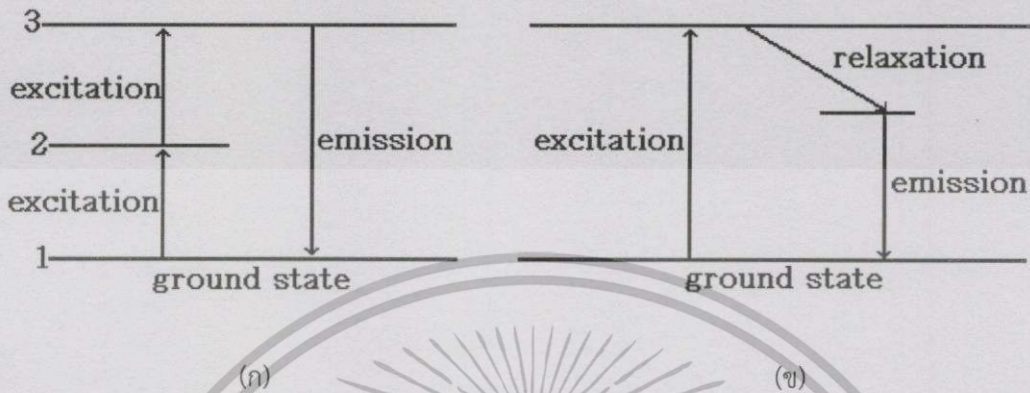


รูปที่ 2.8 แสดงกระบวนการการรวมตัวของพาหะที่ทำให้เกิดการเรืองแสง และไม่เรืองแสงในปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์

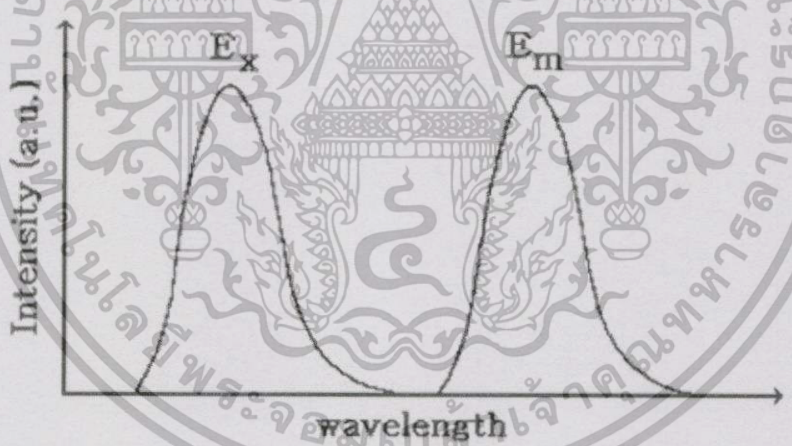
จากรูปที่ 2.8 เมื่ออิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ถูกกระตุ้น อิเล็กตรอนจะเกิดการเคลื่อนไปจากตำแหน่งเดิม หากอิเล็กตรอนนี้ถูกจับไว้ในกับดักอิเล็กตรอน (trap) และ ย้ายสถานะพลังงานไปยังแถบวาเลนซ์จะเป็นกระบวนการที่ไม่เกิดการเรืองแสง แต่ถ้าอิเล็กตรอนนี้ย้ายสถานะพลังงานผ่านที่ศูนย์กลางเรืองแสง (luminescent center) จะเกิดการเรืองแสงออกมาแต่โดยทั่วไปในสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนมักจะถูกจับไว้ในกับดักอิเล็กตรอนมากกว่าจึงทำให้สารกึ่งตัวนำไม่ค่อยเกิดการเรืองแสง

จากปรากฏการณ์การเรืองแสงแบบปกติ พลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมาในการเรืองแสงจะมีค่าน้อยกว่าพลังงานกระตุ้น แต่ในปรากฏการณ์ แอนติ-สโตกส์ พลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมาจะมีค่าสูงกว่าพลังงานกระตุ้น เนื่องจากอะตอมของธาตุบางชนิดมีระดับพลังงานที่ตรงกึ่งกลางพอดีเมื่อใช้พลังงานกระตุ้นที่มีค่าเท่ากับระดับพลังงาน 1 ไป 2 นั้นเปรียบเสมือนว่าให้พลังงานกระตุ้นจากระดับพลังงาน 2 ไป 3 ด้วยดังนั้นในที่สุดอิเล็กตรอนจะย้ายสถานะพลังงานจากระดับพลังงาน 1 ไป 3 เมื่อให้พลังงานกระตุ้นภายในครั้งเดียวและจากนั้นจะย้ายสถานะพลังงานจากระดับพลังงาน 3 มายัง

ระดับพลังงาน 1 โดยปลดปล่อยพลังงานออกมาดังนั้นพลังงานโฟตอนที่ปลดปล่อยออกมาจึงมีค่ามากกว่าพลังงานโฟตอนกระตุ้นที่ใส่เข้าไปดังรูปที่ 2.9 (ก)



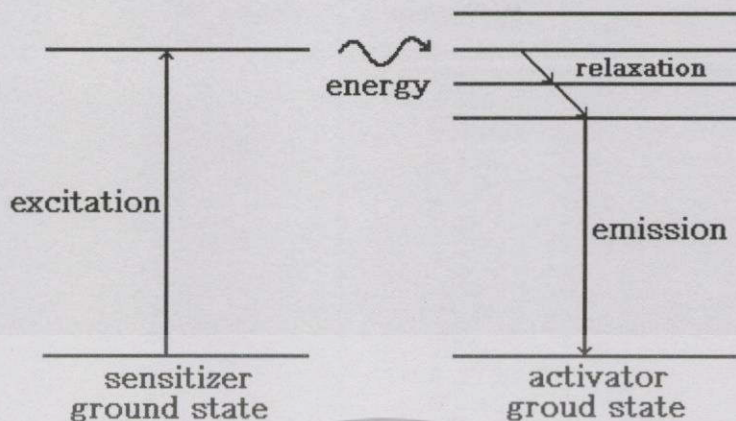
รูปที่ 2.9 แสดงแผนภาพการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนในปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์
 ก. แอนติ-สโตกส์ (anti-stokes)
 ข. ปรากฏการณ์การเรืองแสงแบบปกติ



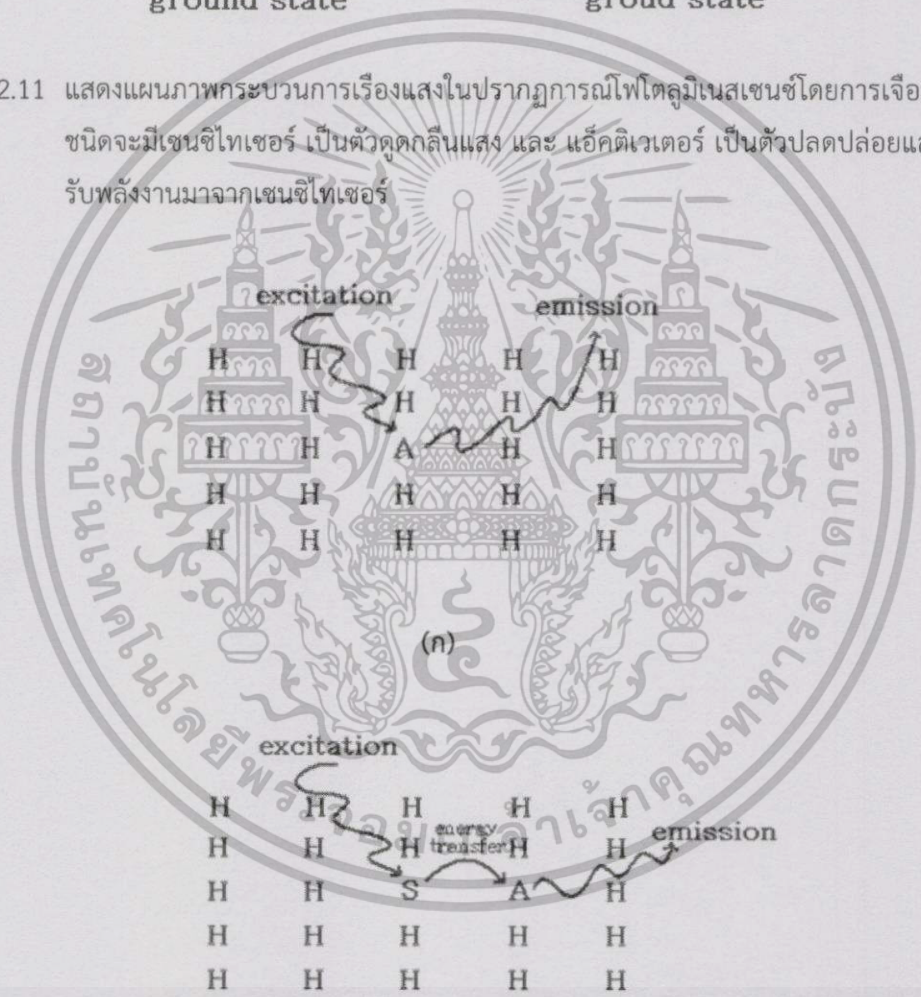
รูปที่ 2.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความเข้มแสงที่เปล่งออกมา กับ ความยาวคลื่นในปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์

จากรูปที่ 2.10 จะเห็นว่าพลังงานของการเรืองแสงจะมีค่าน้อยกว่าพลังงานกระตุ้นโดยเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “การเคลื่อนไปของสโตกส์ (stokes shift)” พลังงานที่หายไปจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนให้กับโครงผลึก (lattice) โดยที่ E_x และ E_m คือแถบพลังงานกระตุ้นและแถบพลังงานเรืองแสง ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

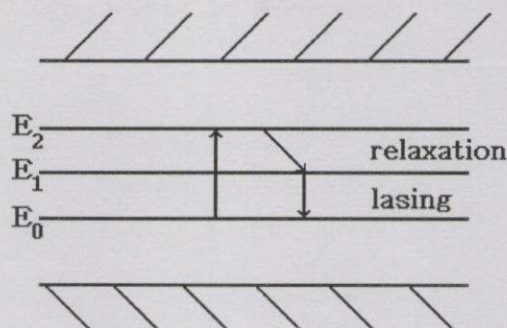


รูปที่ 2.11 แสดงแผนภาพกระบวนการเรืองแสงในปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์โดยการเจือสาร 2 ชนิดจะมีเซนซีไทเซอร์ เป็นตัวดูดกลืนแสง และ แอ็คติเวเตอร์ เป็นตัวปลดปล่อยแสงโดยรับพลังงานมาจากเซนซีไทเซอร์



(ข)

รูปที่ 2.12 แสดงแผนภาพกระบวนการเรืองแสงในปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพาหะเอกสารนี้เป็นเอกสาร ก แสดงถึงตัวแอ็คติเวเตอร์ (A) ในโครงผลึกเจ้าบ้าน (H) อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ข แสดงทั้ง เซนซีไทเซอร์ (S) และ แอ็คติเวเตอร์ (A) ในโครงผลึกเจ้าบ้าน (H) ที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 แผนภาพแสดงการเรืองแสงในปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์ภายในระดับพลังงานของอะตอมของสารเจือที่มีระดับพลังงานอยู่ในช่องว่างแถบพลังงานหลายค่า

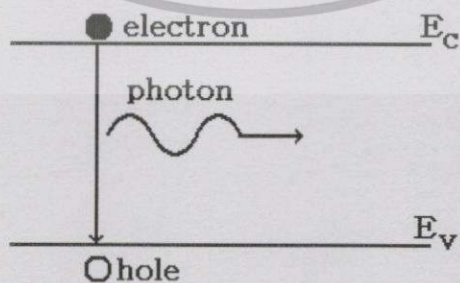
เมื่อไอออนถูกกระตุ้นจะย้ายสถานะพลังงานขึ้นไประดับพลังงานสูงสุดของสารเจือจากนั้นจะเกิดการผ่อนคลาย (relaxation) หลังจากนั้นจะเกิดการเรืองแสง (lasing) ตกกลับลงมาที่ระดับพลังงานต่ำที่สุดของสารเจือ และ จะเรืองแสงในตัวของมันออกมา

2.5.2 กลไกการเรืองแสงของปรากฏการณ์ลูมิเนสเซนซ์

กลไกการเรืองแสงของปรากฏการณ์ลูมิเนสเซนซ์เกิดจากการย้ายสถานะของอิเล็กตรอนจากระดับพลังงานสูงลงมาสู่ระดับพลังงานต่ำ โดยสามารถแบ่งออกเป็นชนิดต่างๆ ดังนี้

1. กลไกการเรืองแสงที่เกิดเนื่องจากอิเล็กตรอนในแถบนำรวมตัวโดยตรงกับโฮลในแถบวาเลนซ์

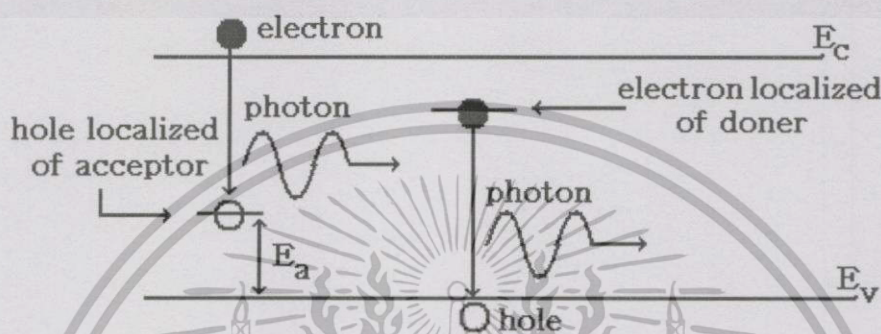
การเรืองแสงที่เกิดจากการย้ายสถานะระหว่างแถบพลังงานของอิเล็กตรอน (band-to-band transition) กล่าวคือเป็นการรวมตัวกันโดยตรงระหว่างอิเล็กตรอนและโฮล โดยอิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบนำตกลงมารวมตัวกับโฮลที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ถ้าสารกึ่งตัวนำมีลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบตรง (direct band gap) แสงที่เปล่งออกมาจะมีพลังงานโฟตอนเท่ากับขนาดช่องว่างพลังงาน (E_g)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีรูปที่ 2.14 แสดงการย้ายสถานะพลังงานแบบมีการเรืองแสงของพาหะอิสระ ระหว่างแถบนำและแถบวาเลนซ์

2. กลไกการเรืองแสงที่เกิดเนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮลที่อยู่ในระดับพลังงานย่อยที่อยู่ภายในช่องว่างแถบพลังงานรวมตัวกัน

เกิดจากอิเล็กตรอนในแถบนำรวมตัวกับโฮลที่ถูกจับอยู่ที่ระดับพลังงานของอะตอมผู้รับหรืออิเล็กตรอนที่ถูกจับอยู่ในระดับพลังงานของอะตอมผู้ให้รวมตัวกับโฮลที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ โดยการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนดังกล่าวได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.15



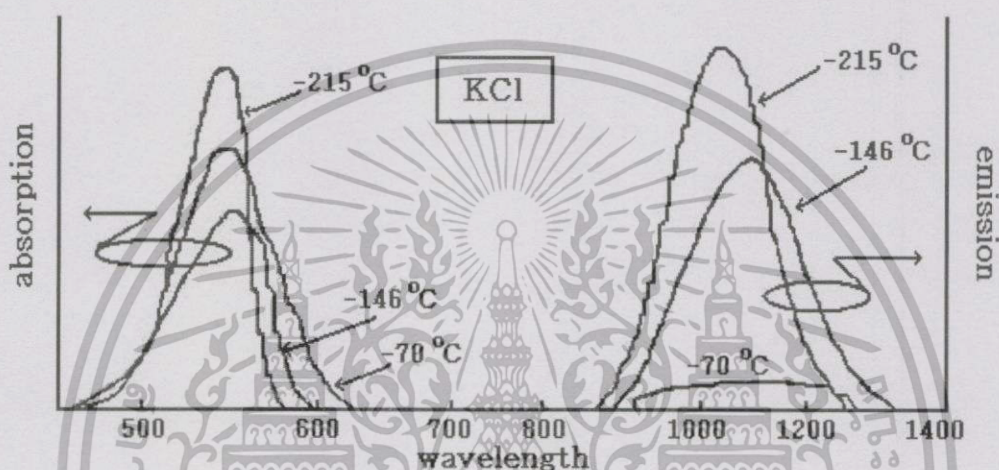
รูปที่ 2.15 แสดงการเรืองแสงที่เกิดจากการรวมตัวของอิเล็กตรอนอิสระและโฮลที่ถูกจับอยู่ที่ระดับพลังงานของอะตอมผู้รับ (กรณีซ่าย) และการเรืองแสงที่เกิดจากการรวมตัวของอิเล็กตรอนที่ถูกจับอยู่ที่ระดับพลังงานของอะตอมผู้ให้และโฮลอิสระ (กรณีซาว)

3. กลไกการเรืองแสงที่เกิดเนื่องจากการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนระหว่างระดับพลังงานโลคอ์ไลซ์

เกิดจากการย้ายสถานะของอิเล็กตรอนที่มีสถานะพลังงานแบบโลคอ์ไลซ์ (Localized states-to-localized states) ตัวอย่างเช่น การเรืองแสงจากศูนย์กลาง เอฟ (F center) ในวัสดุชนิดอัลคาไลน์แฮไลด์ ซึ่งผลึกของวัสดุชนิดนี้เมื่อถูกอบให้ร้อนภายในบรรยากาศของโลหะหมู่อัลคาไลน์ (เช่น Li, Na, K, Rb, Cs และ Fr) จะทำให้อะตอมของโลหะอัลคาไลน์แพร่ซึมเข้าไปในเนื้อผลึกอัลคาไลน์แฮไลด์และทำให้ในเนื้อผลึกนั้นมีจำนวนอะตอมชนิดแฮไลด์ (เช่น F, Cl, Br, I และ At) ที่ไม่สมดุลกับอะตอมอัลคาไลน์ นั่นคือเปรียบเสมือนกับเกิดแวนแคนซีของไอออนของธาตุแฮไลด์ที่หลุดหายไป จากนั้นเพื่อให้สภาพทางไฟฟ้าเป็นกลางอิเล็กตรอนจะวิ่งไปถูกจับอยู่ที่แวนแคนซีของไอออนของธาตุแฮไลด์ที่หลุดหายไปซึ่งเป็นแวนแคนซีของไอออนลบที่มีสภาพทางไฟฟ้าเป็นบวกเรียกว่า “ศูนย์กลาง เอฟ (F center)” และอิเล็กตรอนจะถูกแรงคูลอมบ์ดึงดูดไว้คล้ายกับแบบจำลองของอะตอมไฮโดรเจน และอิเล็กตรอนเหล่านั้นมีสถานะพลังงานอยู่ที่สถานะพื้น ต่อจากนั้นเมื่อฉายพลังงานโฟตอนตกกระทบผลึก พลังงานโฟตอนจะไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนย้ายสถานะจากสถานะพื้นสู่สถานะกระตุ้นจึงเกิดการดูดกลืนพลังงานโฟตอนขึ้น หลังจากนั้นเมื่ออิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงานกลับคืนสู่สถานะพื้นจะมีการเรืองแสงที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงที่ตามองเห็นออกมา จึงทำให้ผลึกนั้นมีสีตามความยาวคลื่นของแสงที่ถูกเปล่งออกมา เราเรียกการเกิดข้อบกพร่องของโครงผลึกเช่นนี้ว่า

เป็นการเกิด “ศูนย์กลางสี (color center) หรือ ศูนย์กลาง เอฟ” ซึ่งย่อมาจากผู้ค้นพบคือ ฟาร์บี-เซนเทอม

รูปที่ 2.16 แสดงตัวอย่างสเปกตรัมของการดูดกลืนแสง และการเรืองแสงของผลึกของสารประกอบ KCl จากรูปพบว่าพลังงานโฟตอนของการเรืองแสงจะมีค่าน้อยกว่าพลังงานโฟตอนของการดูดกลืนพลังงานโฟตอน เราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “การเลื่อนไปของสโตกส์” พลังงานโฟตอนส่วนที่ขาดไปนั้นถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อนให้กับโครงผลึกตามกฎของแฟรง-คอนดอน



รูปที่ 2.16 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสง และการเรืองแสงของศูนย์กลาง เอฟ (F center) ในผลึกของสารประกอบ KCl

4. กลไกการเรืองแสงจากเอ็กซิตอน

เอ็กซิตอนและโฮลที่ถูกกระตุ้นด้วยพลังงาน แต่พลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นนั้นยังมีค่ามากพอที่จะทำให้พาหะทั้งคู่แยกออกจากกันเป็นอิสระได้ กล่าวคือ ยังมีแรงดึงดูดคูมบ์ดึงดูดให้อิเล็กตรอนและโฮลจับกันอยู่เป็นคู่ๆ และระดับพลังงานของอิเล็กตรอนและโฮลยังอยู่ภายในช่องว่างพลังงานเมื่ออิเล็กตรอนและโฮลดังกล่าวเกิดการรวมกันจะปลดปล่อยพลังงานโฟตอนออกมาโดยเอ็กซิตอนมี 2 ชนิดคือ

1. เอ็กซิตอนชนิดที่เป็นอิสระ (free exciton) หรือ มอตต์ แอนด์ แวนเนียร์เอ็กซิตอน (Mott and Wannier exciton) เนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮลจะอยู่ห่างกันมากกว่าหรือเท่ากับขนาดของค่าคงที่โครงผลึก (lattice constant) จึงมีแรงยึดเหนี่ยวคูมบ์ (Weakly bound) การเรืองแสงจากเอ็กซิตอนชนิดอิสระนี้มีค่าพลังงานโฟตอนน้อยกว่าขนาดของช่องว่างพลังงานเล็กน้อย
2. เอ็กซิตอนชนิดที่มีแรงยึดเหนี่ยวคูมบ์ (bound exciton) หรือเฟรนเคิล (Frenkel exciton) เนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮลอยู่ใกล้กันมาก คือ น้อยกว่า

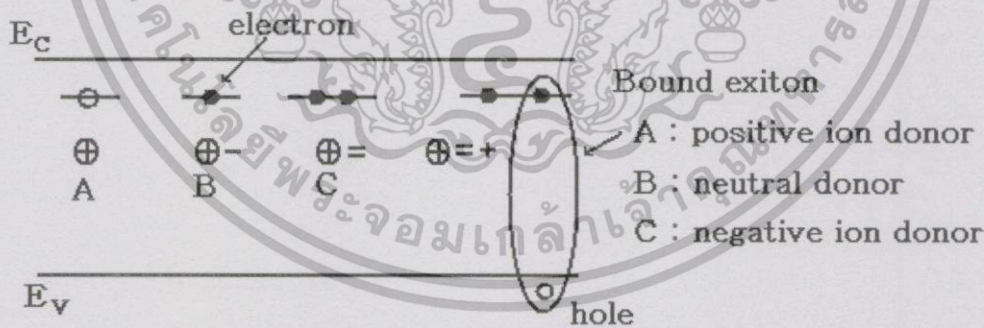
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยทางวิชาการเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ทุกกรณี

ขนาดของค่าคงที่โครงสร้างผลึก ดังนั้นพลังงานโฟตอนของแสงที่ถูกเปล่งออกมาจากการรวมตัวของคู่อิเล็กตรอนและโฮลจึงมีค่าน้อยกว่าขนาดของค่าช่องว่างพลังงานมาก

2.5.3 การเรืองแสงจากเอ็กซิตอนในปรากฏการณ์ต่างๆ

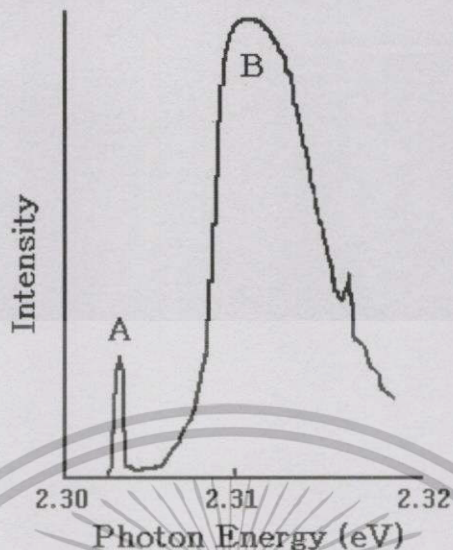
1. การเรืองแสงจากเอ็กซิตอนที่ถูกจับโดยอะตอมผู้ให้

การเรืองแสงจากเอ็กซิตอนที่ถูกจับโดยอะตอมผู้ให้ ตัวอย่างเช่น การเจือผลึกของสารประกอบกึ่งตัวนำ GaP ด้วยอะตอมของธาตุ S จะทำให้อะตอมของธาตุ S เข้าไปแทนที่อะตอมของธาตุ P และอะตอมของธาตุ S จะทำหน้าที่เป็นอะตอมผู้ให้ ในสภาพที่อะตอมของธาตุ S จับอิเล็กตรอนไว้นั้นอะตอมของธาตุ S ยังมีสภาพไฟฟ้าเป็นกลาง แต่ถ้าอะตอมของธาตุ S ปลปล่อยให้อิเล็กตรอนกระโดดขึ้นไปอยู่ในแถบนำ อะตอมของธาตุ S จะเปลี่ยนสภาพกลายเป็นไอออนบวก ถ้ากำหนดให้สัญลักษณ์ “+” แทนไอออนบวกและสัญลักษณ์ “-” แทนสภาพอะตอมของธาตุ S ที่เป็นกลาง ดังนั้นถ้ามีอิเล็กตรอนอีกหนึ่งตัวมาจับที่อะตอมผู้ให้ที่เป็นกลางนี้ จะทำให้อะตอมผู้ให้ที่เป็นกลางเปลี่ยนสภาพไปเป็นไอออนลบ ซึ่งสามารถแทนไอออนลบได้ด้วยสัญลักษณ์ “+=” รูปที่ 2.17 แสดงลักษณะของการเกิดเอ็กซิตอนลักษณะดังกล่าวในสภาพเช่นนี้ ถ้าบังเอิญมีโฮลวิ่งเข้ามาใกล้ ไอออนลบนี้โฮลจะถูกแรงดึงดูดคู่สมกับจากไอออนลบดึงดูดไว้ และทำให้เกิดเป็นเอ็กซิตอนชนิดที่มีแรงยึดเหนี่ยวด้านริมหวา และถ้าคู่อิเล็กตรอนและโฮลนี้มีการรวมตัวกันก็จะเกิดการเรืองแสงออกมา โดยรูปที่ 2.18 แสดงตัวอย่างสเปกตรัมการเรืองแสงจากเอ็กซิตอนชนิดที่มีแรงยึดเหนี่ยวคู่อิเล็กตรอนในสารประกอบกึ่งตัวนำ GaP : S



รูปที่ 2.17 แสดงแผนภาพเอ็กซิตอนที่ถูกจับที่ระดับพลังงานของอะตอมผู้ให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะในรูปแบบใดก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 แสดงสเปกตรัมการเรืองแสงของเอ็กซิตอนชนิดที่มีแรงยึดเหนี่ยวโคลอมบ์ของผลึกของสารประกอบกึ่งตัวนำ GaP : S

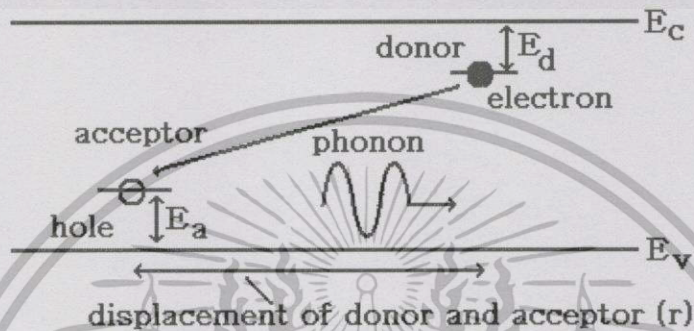
2. การเรืองแสงของเอ็กซิตอนที่ถูกจับด้วยกับดักไอโซอิเล็กทรอนิกส์ (isoelectronic trap)

พิจารณาตัวอย่างการเติมอะตอมของธาตุ N เข้าสู่ผลึกของสารประกอบกึ่งตัวนำ GaP ในกรณีนี้อะตอมของธาตุ N จะเข้าไปแทนที่อะตอมของธาตุ P แต่เนื่องจากทั้งอะตอมของธาตุ N และอะตอมของธาตุ P เป็นธาตุในหมู่ 5 เหมือนกันเพราะฉะนั้นสภาพไฟฟ้าจึงเป็นกลางเหมือนเดิม กล่าวคืออะตอมของธาตุ N ไม่ได้ทำหน้าที่เป็นอะตอมผู้ให้หรืออะตอมผู้รับแต่อย่างใด แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากอะตอมของธาตุ N มีสมบัติในการดึงดูดอิเล็กตรอนได้ดีกว่าอะตอมของธาตุ P ดังนั้นถ้ามีอิเล็กตรอนในผลึกวิ่งมาใกล้อะตอมของธาตุ N ก็จะทำให้อะตอมของธาตุ N จับอิเล็กตรอนไว้ได้ดี ในสภาพเช่นนี้กล่าวได้ว่าอะตอมของธาตุ N นั้นกำลังสร้างกับดักไอโซอิเล็กทรอนิกส์ กับดักชนิดนี้มีสภาพประจุไฟฟ้าเป็นลบ ดังนั้นจึงสามารถมีแรงดึงดูดโฮลซึ่งมีประจุบวกให้เข้ามาใกล้ได้ดี จึงส่งผลให้เกิดเป็นเอ็กซิตอนขึ้นมา อิเล็กตรอนและโฮลในเอ็กซิตอนชนิดนี้สามารถรวมตัวกันได้ง่าย จึงทำให้ประสิทธิภาพของการเรืองแสงมีค่าสูงมาก ตัวอย่างเช่น ในกรณีผลึกสารประกอบกึ่งตัวนำ GaP ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดที่มีแถบพลังงานช่องว่างแบบเฉียง จึงมีประสิทธิภาพของการเรืองแสงไม่ดี่นัก แต่ถ้าเติมอะตอมของธาตุ N เข้าไปในผลึกของสารประกอบกึ่งตัวนำ GaP นี้จะสร้างกับดักไอโซอิเล็กทรอนิกส์ขึ้นในผลึกได้และเกิดเอ็กซิตอน และทำให้การรวมตัวของพาหะมีประสิทธิภาพสูงขึ้นมา เปรียบเสมือนว่าผลึกของสารประกอบกึ่งตัวนำ GaP กลายสภาพเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดที่มีแถบพลังงานแบบตรง จึงมีการนำผลึกของสารประกอบกึ่งตัวนำ GaP ไปประดิษฐ์เป็นไดโอดเรืองแสงอย่างแพร่หลายและสามารถเรืองแสงสีแดงที่สว่างมากก็ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้ใช้ในเชิงพาณิชย์ การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

3. การเรืองแสงจากคู่ของอะตอมผู้ให้และอะตอมผู้รับ (DA pair)

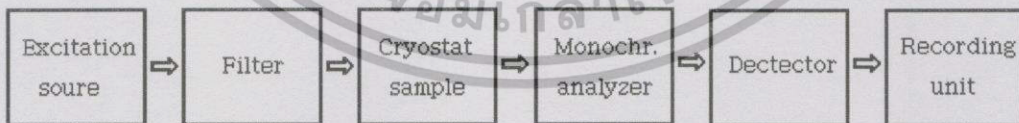
การเรืองแสงที่เกิดจากการรวมตัวของอิเล็กตรอนที่ถูกจับอยู่ที่ระดับพลังงานผู้ให้และโฮลที่ถูกจับอยู่ที่ระดับพลังงานผู้รับโดยทั่วไปมีประสิทธิภาพพดิมมาก รูปที่ 2.19 แสดงกลไกการรวมตัวของพาหะชนิดนี้ ตัวอย่างได้แก่การเจือผลึกของสารประกอบกึ่งตัวนำ GaP ด้วยอะตอมของธาตุ S ที่เป็นอะตอมผู้ให้ และอะตอมของธาตุ C ที่เป็นอะตอมผู้รับพร้อมๆกัน



รูปที่ 2.19 แสดงแผนภาพการเรืองแสงที่เกิดจากการย้ายสถานะพลังงานระหว่าง คู่ของอะตอมผู้ให้และ อะตอมผู้รับ

2.5.4 การติดตั้งโฟโตลูมิเนสเซนซ์

พื้นฐานการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์จะเป็นไปตามโคะแกรมที่แสดงดังรูป 2.20 แหล่งกำเนิดโฟโตที่ใช้กระตุ้นการเกิดลูมิเนสเซนซ์อาจเป็นเลเซอร์ หรือหลอดไฟโดยที่อาจจะเป็นสเปกตรัมต่อเนื่องหรือพัลส์ก็ได้ ก่อนที่จะใช้โฟโตเหล่านี้ไปกระตุ้นสารตัวอย่างต้องใช้ฟิลเตอร์กรองแสงเพื่อเลือกความยาวคลื่นที่ต้องการก่อน ปกติชิ้นสารตัวอย่างมักจะเก็บในที่ที่มีอุณหภูมิต่ำ ขณะทำการวัดเพื่อลดปัญหาการเกิดโฟนอน



รูปที่ 2.20 แสดงแผนภาพการติดตั้งระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์

แสงที่เปล่งออกมาจากชิ้นตัวอย่างจะถูกแยกสเปกตรัมโดยโมนโครเมเตอร์ (monochrometer) ก่อนที่จะวัดโดยหัววัดสัญญาณแล้วแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าและส่งต่อไปยังภาคแสดงการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์แบ่งออกเป็น 3 รูปแบบคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. กำหนดค่าความยาวคลื่นของโฟตอนที่ใช้ในการกระตุ้นครั้งที่แล้วทำการสแกนช่วงความยาวคลื่นโฟตอนที่สารตัวอย่างเปล่งออกมา โดยปกติพลังงานโฟตอนที่ถูกปลดปล่อยออกมาจะมีพลังงานน้อยกว่าพลังงานโฟตอนกระตุ้นซึ่งเป็นไปตามกฎของสโตกส์
2. กำหนดให้หัววัดเลือกวัดความยาวคลื่นโฟตอนครั้งที่ค่าหนึ่งแล้วทำการสแกนความยาวคลื่นโฟตอนที่ใช้กระตุ้น
3. กำหนดให้ความยาวคลื่นของโฟตอนที่ใช้กระตุ้นและที่ปลดปล่อยออกมาครั้งที่ และทำการวัดสเปกตรัมการเกิดลูมิเนสเซนซ์ เทียบกับเวลาเมื่อโฟตอนที่ใช้กระตุ้นเป็นพัลส์เดี่ยวโดยปกติสเปกตรัมในแบบที่ 1 และ 2 ที่ทำการบันทึกจะเป็นค่าระหว่างความยาวคลื่นมีหน่วยเป็นนาโนเมตรกับความเข้มของโฟตอนที่ปลดปล่อยออกมามีหน่วยเป็นหน่วยใดๆ

2.5.5 พลังงานกระตุ้น

การเลือกแหล่งกำเนิดโฟตอนเพื่อใช้เป็นพลังงานกระตุ้นนั้นขึ้นกับว่าเราต้องการวัดลูมิเนสเซนซ์ในรูปแบบไหน เช่น เลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดโฟตอนอาพันธ์มีลำแสงขนานและเลเซอร์บางชนิดเป็นพัลส์สัญญาณค่อนข้างสั้น เหมาะกับการวัดในรูปแบบที่ 1 และ 3 ในการใช้เลเซอร์ ทำให้มีสัญญาณรบกวนต่ำแต่มีข้อเสียคือการเลือกช่วงความยาวคลื่นทำได้ยากการใช้หลอดฟลูออโรภาคาก็จะทำให้แก้ปัญหาดังนี้ได้เนื่องจากมีช่วงความยาวคลื่นกว้าง (broadband) จึงเหมาะกับการวัดในรูปแบบที่ 2 ซึ่งหลอดไฟมีให้เลือกใช้หลายชนิดและหลายความเข้ม

2.5.6 การแตกตัวเป็นไอออนเนื่องจากแสง (photoionization)

เป็นกระบวนการทางกายภาพที่เกิดจากโฟตอนเคลื่อนที่เข้าชนกับอะตอม ไอออน หรือโมเลกุล ผลที่ได้คือ การหลุดออกมาของอิเล็กตรอนหนึ่งตัวซึ่งการหลุดออกมาของอิเล็กตรอนเป็นที่รู้จักกันในปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตรอน และมีพลังงานจลน์เท่ากับค่าของพลังงานโฟตอนลบด้วยพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน โฟตอนที่มีพลังงานน้อยกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนจะเกิดการกระตุ้นแต่ไม่เกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตรอนเมื่อเคลื่อนที่เข้าชนกับอะตอมหรือไอออน ตัวอย่างเช่น การทำให้อะตอมของไฮโดรเจนแตกตัวเป็นไอออนโฟตอนต้องมีพลังงานมากกว่า 13.6 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งสอดคล้องกับความยาวคลื่น 91 นาโนเมตร สำหรับโฟตอนที่มีพลังงานมากกว่านี้พลังงานของการปล่อยโฟโตอิเล็กตรอนสามารถหาได้ดังสมการที่ (2.2)

$$\frac{1}{2}mv^2 = hv - 13.6 \text{ eV} \quad (2.2)$$

โดย h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ = 6.625×10^{-34} จูล-วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ v คือ เป็นค่าความถี่ของโฟตอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่ใช่ทุกโฟตอนที่เคลื่อนที่เข้าชนกับอะตอมหรือไอออนแล้วจะเกิดการแตกตัวเป็นไอออน เนื่องจากแสง ความน่าจะเป็นที่จะเกิดการแตกตัวเป็นไอออนเนื่องจากแสง นั้นเกี่ยวข้องกับภาคตัดขวางของการแตกตัวเป็นไอออนเนื่องจากแสง ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าพลังงานของโฟตอนและไอออนหรืออะตอมที่เราสนใจ สำหรับพลังงานโฟตอนที่ต่ำกว่าค่าที่ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน จะได้ว่าภาคตัดขวางของการแตกตัวเป็นไอออนมีค่าเป็นศูนย์และถ้ามีค่ามากกว่าพลังงานกระตุ้นภาคตัดขวางจะลดแบบผกผันกับค่าพลังงานโฟตอนยกกำลังสาม

2.5.7 รัสเซลส์-ซอนเดอร์คัปปลิง (Russell-Saunders coupling)

รัสเซลส์ และ ซอนเดอร์พบวิธีหาผลรวมของ ค่าโมเมนตัมเชิงมุมของออร์บิทัล และของสปินของอิเล็กตรอนในอะตอมของธาตุเบา (ที่มีเลขอะตอม Z ต่ำกว่า 40) อันตรกิริยาระหว่างโมเมนตัมเชิงมุมของออร์บิทัลค่าต่างๆ (l_i) จะมีค่าแรงกว่าอันตรกิริยาระหว่างโมเมนตัมเชิงมุมของสปินค่าต่างๆ (s_i) ดังนั้นผลรวมของโมเมนตัมเชิงมุมของออร์บิทัล คือ L และผลรวมของโมเมนตัมเชิงมุมของสปิน คือ S โดยที่

$$L = \sum_{i=1}^p l_i ; S = \sum_{i=1}^p s_i \quad (2.3)$$

ผลรวมนี้เป็นของอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรชั้นพี (p-shell) ที่มีอิเล็กตรอนไม่เต็มแต่สำหรับวงโคจรชั้นพี ที่มีอิเล็กตรอนครอบครองอยู่เต็ม แล้วค่า L และ S จะมีค่าเป็นศูนย์ ยิ่งกว่านั้นค่า L และ S จะมียันตรกิริยาต่อกันอย่างอ่อนๆ ซึ่งเรียกว่า อันตรกิริยาระหว่างค่าโมเมนตัมเชิงมุมของออร์บิทัลกับของสปิน $L \cdot S$ ของอะตอมที่มีอิเล็กตรอนสองตัวซึ่งจะทำให้เกิดการแตกออกของระดับพลังงานที่แสดงด้วยค่าแฟกเตอร์ของการแตกออก (splitting factor ; g_j เมื่อ $\mu_m = -g_j \mu_B J$) ของระดับพลังงาน โดยจะสร้างตัวดำเนินการโมเมนตัมเชิงมุมรวมให้เป็น $\hbar J$ ซึ่งเลขควอนตัมของโมเมนตัมเชิงมุมรวม คือ J โดยที่

$$J = (L+S), (L+S-1), \dots, |L-S+1|, |L-S| \quad (2.3n)$$

การคัปปลิงระหว่างโมเมนตัมเชิงมุมของออร์บิทัลกับโมเมนตัมเชิงมุมของสปิน เรียกว่า รัสเซลส์-ซอนเดอร์คัปปลิง รูปที่ 2.21 แสดงผลรวมของโมเมนตัมเชิงมุมของอะตอมที่มีอิเล็กตรอนสองตัว แต่เนื่องจากสมการดังกล่าวนี้เป็นผลรวมทางเวกเตอร์ ดังนั้นผลลัพธ์จึงมีได้หลายแบบ ยกตัวอย่างเช่น ถ้า $s_1 = \frac{1}{2}$ และ $s_2 = \frac{1}{2}$ แล้ว $S=1$ หรือ 0 และถ้า $l_1=2$ และ $l_2=2$ (d -ออร์บิทัล) แล้ว $L=4,3,2,1$ หรือ 0

เอกสารนี้เป็นเอกสาร ระดับพลังงานที่เป็นไปได้ตามสมการที่ (2.3n) เรียกว่า มัลติเพลต (multiplet) และนิยามจำนวนของมัลติพลีซิตี (multiplicity) ของระบบคือ $2S+1$ ในกรณีที่ว่า $L \geq S$ แล้ว จะได้มัลติเพลตจำนวน $2S+1$ ค่า แต่ในกรณีที่ค่า $L < S$ แล้วจะได้มัลติเพลตจำนวน $2L+1$ ค่าระยะห่าง

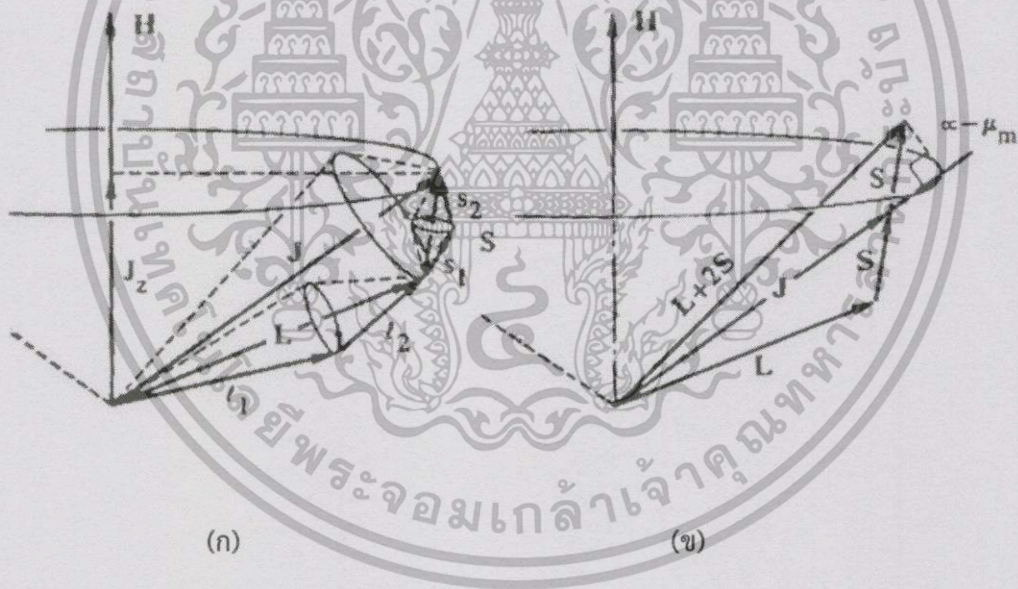
ระหว่างมัลติเพลตจะกำหนดโดยค่าคงที่ของสปิน-ออร์บิตคัปปลิง (spin-orbit coupling constant : λ) จะได้ว่าพลังงานของอันตรกิริยาค่าโมเมนตัมเชิงมุมรวมของสปิน คือ

$$V_{so} = \lambda L \cdot S \quad (2.4)$$

ดังนั้นระดับพลังงานของเลขควอนตัมของโมเมนตัมเชิงมุมรวม J คือ

$$\left(\frac{\lambda}{2}\right)[J(J+1) - L(L+1) - S(S+1)] \quad (2.5)$$

ซึ่งสมการที่ (2.5) ได้มาจากตัวดำเนินการ คือ $J^2 = L^2 + S^2 + 2L \cdot S$ และค่าไอเกน (eigen values) คือ $J \cdot J = J(J+1)$, $L \cdot L = L(L+1)$ และ $S \cdot S = S(S+1)$ ก่อนอื่นจะกล่าวถึงการกำหนดสถานะพื้น (ground state) และจะกล่าวถึงพฤติกรรมของระดับพลังงานเหล่านี้เมื่ออะตอมอยู่ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กต่อไป



รูปที่ 2.21 แสดงปรากฏการณ์คัปปลิงของอันตรกิริยาระหว่างโมเมนตัมเชิงมุมของออร์บิตกับสปินของอะตอมที่มีอิเล็กตรอนสองตัว

ก. แสดงรัสเซลล์-ชอนเดอร์คัปปลิงของอะตอมที่มีอิเล็กตรอนสองตัว

ข. แสดงวิธีการคำนวณค่าแฟกเตอร์ของการแตกออกของระดับพลังงาน g_J เมื่อ

$$\mu_m = -g_J \mu_B J$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.8 กฎของฮุนด์

กฎของฮุนด์ได้ประยุกต์ใช้สำหรับอิเล็กตรอนที่ให้ลักษณะพิเศษของค่า S , L และ J ที่สถานะพื้น (ground state) ของอะตอม

1. ค่า S ที่ใหญ่ที่สุดสอดคล้องกับหลักการการกีดกันของเพาลีที่จะอธิบายที่สถานะพื้นนั้น ถ้าอิเล็กตรอนสองตัวในอะตอมมีสถานะออร์บิทัลเดียวกัน อิเล็กตรอนต้องมีสปินที่ตรงข้ามกัน อย่างไรก็ตามแรงผลึกคูลอมบ์ของอิเล็กตรอนทั้งสองตัวจะมีค่าต่ำลงถ้าอิเล็กตรอนทั้งสองอยู่ในออร์บิทัลที่ต่างกัน อิเล็กตรอนทั้งสองตัวสามารถมีสปินแบบขนานหรือทิศทางตรงข้าม แต่ในการแลกเปลี่ยนนั้นจะเป็นจำนวนเต็ม สำหรับวงโคจรที่ตั้งฉากกันจะเป็นบวกเสมอ พลังงานที่ต่ำกว่าของเหตุการณ์สปินที่ขนานกันกับเหตุการณ์ที่สปินตรงข้ามกัน
2. ค่า L สูงตรงกับค่า S ในกฎข้อแรกจะอธิบายที่สถานะพื้น กฎข้อนี้จะยากกว่าที่จะอธิบายทางคุณภาพ โดยการคำนวณทางปริมาณนั้นเป็นที่ต้องการ
3. ค่า $J = |L - S|$ เมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจร (shell) นั้นมีจำนวนอิเล็กตรอนน้อยกว่าหรือเท่ากับครึ่งหนึ่ง และจะเท่ากับ $|L + S|$ เมื่ออิเล็กตรอนมีค่ามากกว่าครึ่งหนึ่ง

ดังจะเห็นได้จากตัวอย่างในกรณีของ Ce^{3+} เมื่อ $4f^1$ ที่ค่า $S = 1/2$ และ $l = 3$ (สำหรับอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรนี้ เอฟ (f-shell) ดังนั้นสำหรับสถานะพื้น : ค่า $S = 1/2$; $L = 3$; $J = 5/2$ ทำให้ได้สเปกโทรสโกปีโนเทซัน $^2F_{5/2}$ ทางซ้ายบนบอกถึงมีลทิฟลิซิติ เป็นสปินดีเจเนอเรซี $2S + 1$ ทางขวาล่าง เป็นค่า J และอักษร เป็น ระบุค่า L

$$L = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$$

$$S, P, D, F, G, \dots$$

ดังนั้นสัญลักษณ์เป็น $^{2S+1}L_J$ ในกรณีที่มีอิเล็กตรอนสองตัว $4f^2 (\text{Pr}^{3+})$ จากกฎของฮุนด์จะได้ว่า $S = 1$ เนื่องจากสปินของอิเล็กตรอนทั้งสองเหมือนกัน เฉพาะอิเล็กตรอนตัวแรกสามารถมี $m_l = 3$ ดังนั้นอิเล็กตรอนตัวที่ 2 จึงมี $m_l = 2$ และได้ $L = 5$; $J = 4$ ดังนั้นจึงได้สถานะเป็น 3H_4 ตารางที่ 2.2 และตารางที่ 2.3 ซึ่งแสดงถึงผลลัพธ์สำหรับอะตอมที่มีอิเล็กตรอนอยู่ในวงโคจรชั้น เอฟ (f-shell) และ ชั้น ดี (d-shell)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 แสดงค่า S , L และ J ของอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรชั้น ดี (d - shell : $l = 2$) และวงโคจรชั้น เอฟ (f - shell : $l = 3$)

n	$m_l = 2, 1, 0, -1, -2$					S	$L = \Sigma m_l $	J	
1	↓					1/2	2	3/2	${}^2D_{3/2}$ Ti^{3+}
2	↓	↓				1	3	2	3F_2 V^{3+}
3	↓	↓	↓			3/2	3	3/2	${}^4F_{3/2}$ Cr^{3+}
4	↓	↓	↓	↓		2	2	0	5D_0 Cr^{2+}
5	↓	↓	↓	↓	↓	5/2	0	5/2	${}^6S_{5/2}$ Fe^{3+}, Mn^{2+}
6	↓↑	↑	↑	↑	↑	2	2	4	6D_4 Fe^{2+}
7	↓↑	↓↑	↑	↑	↑	3/2	3	9/2	${}^4F_{9/2}$ Co^{2+}
8	↓↑	↓↑	↓↑	↑	↑	1	3	4	3F_4 Ni^{2+}
9	↓↑	↓↑	↓↑	↓↑	↑	1/2	2	5/2	${}^2D_{5/2}$ Cu^{2+}
10	↓↑	↓↑	↓↑	↓↑	↓↑	0	0	0	1S_0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 แสดงค่า S , L , J และ g_l ของอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรชั้น ดี (d - shell : $l = 2$) และวงโคจรชั้น เอฟ (f - shell : $l = 3$)

n	$m_l = 3, 2, 1, 0, -1, -2, -3$							S	$L = \Sigma m_l $	J	g_l		
0								0	0	0	1S_0	0	La ³⁺
1	↓							1/2	3	5/2	$^2F_{5/2}$	6/7	Ce ³⁺
2	↓	↓						1	5	4	3H_4	4/5	Pr ³⁺
3	↓	↓	↓					3/2	6	9/2	$^4I_{9/2}$	8/11	Nd ³⁺
4	↓	↓	↓	↓				2	6	4	5I_4	3/5	Pm ³⁺
5	↓	↓	↓	↓	↓			5/2	5	5/2	$^6H_{5/2}$	2/7	Sm ³⁺
6	↓	↓	↓	↓	↓	↓		3	3	0	7F_0	-	Eu ³⁺
7	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	7/2	0	7/2	$^8S_{7/2}$	2	Gb ³⁺
8	↓↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	3	3	6	7F_6	3/2	Tb ³⁺
9	↓↑	↓↑	↑	↑	↑	↑	↑	5/2	5	15/2	$^6H_{15/2}$	4/3	Dg ³⁺
10	↓↑	↓↑	↓↑	↑	↑	↑	↑	2	6	8	5I_8	5/4	Ho ³⁺
11	↓↑	↓↑	↓↑	↓↑	↑	↑	↑	3/2	6	16/2	$^4I_{15/2}$	6/5	Er ³⁺
12	↓↑	↓↑	↓↑	↓↑	↓↑	↑	↑	1	5	6	3H_6	7/6	Tm ³⁺
13	↓↑	↓↑	↓↑	↓↑	↓↑	↓↑	↑	1/2	3	7/2	$^2F_{7/2}$	8/7	Yb ³⁺
14	↓↑	↓↑	↓↑	↓↑	↓↑	↓↑	↓↑	0	0	0	1S_0	0	Lu ³⁺

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.9 การบวกของสปินสองตัว

โดยปกติฟังก์ชันเจาะจงที่สมบูรณ์ (complete eigenfunction) มักจะแสดงอยู่ในรูปของ ผลคูณระหว่างฟังก์ชันเจาะจงสเปเชียล (spatial eigenfunction) กับฟังก์ชันเจาะจงสปิน (spin eigenfunction) ถ้าประมาณว่า ขณะนี้ยังไม่คิดอันตรกิริยาระหว่างโมเมนต์เชิงมุมของสปินกับ โมเมนต์เชิงมุมของวงโคจร (spin-orbit interaction) ดังนั้น m_s ในแนวแกน z ยังไม่เปลี่ยนแปลง ฟังก์ชันเจาะจงของอะตอมที่มีอิเล็กตรอนหนึ่งตัว ψ_{nlm_s} มักจะแสดงได้ดังสมการที่ (2.6) ดังนี้ คือ

$$\psi_{nlm_s} = \psi_{nlm_s} \sigma_{m_s} \quad (2.6)$$

ถ้าระบบประกอบด้วยอิเล็กตรอน 2 ตัว สำหรับฟังก์ชันเจาะจงของอิเล็กตรอนตัวที่ 1 จะแสดงได้ดังนี้ คือ

$$\psi_\alpha(1) = \psi_\alpha(1) \sigma_{m_s}(1) \quad (2.7)$$

โดยที่เลขควอนตัม α แทนเลขควอนตัม n, l, m_s, m_s และฟังก์ชันเจาะจงที่ใช้แสดง ความสัมพันธ์ระหว่างอิเล็กตรอนตัวที่ 1 และตัวที่ 2 จะเขียนได้ดังนี้ คือ

$$\begin{aligned} \psi_{\alpha\beta} &= \psi_\alpha(1) \psi_\beta(2) \\ &= \psi_\alpha(1) \psi_\beta(2) \sigma_{m_{s\alpha}}(1) \sigma_{m_{s\beta}}(2) \end{aligned} \quad (2.8)$$

เพื่อความสะดวกมักจะเขียนอยู่ในรูปที่กระชับดังต่อไปนี้ คือ

$$\psi_{\alpha\beta} = \psi_{ab} \sigma_{m_s, m_{s_b}} \quad (2.9)$$

แต่สมการที่ (2.9) ยังไม่เป็นฟังก์ชันเจาะจงแบบปฏิสมมาตร (anti-symmetric eigen function) อย่างไรก็ตามเราสามารถที่จะสร้างฟังก์ชันเจาะจงแบบปฏิสมมาตร โดยการนำผลบวกของฟังก์ชันเจาะจงสเปเชียลแบบสมมาตร หรือ แบบปฏิสมมาตร (symmetric or antisymmetric linear combination of spatial eigenfunctions) คูณกับผลบวกของฟังก์ชันเจาะจงสปินที่มีสมมาตรต่าง กับฟังก์ชันเจาะจงสเปเชียล ซึ่งฟังก์ชันเจาะจงสเปเชียลแบบสมมาตรจะเขียนได้ดังนี้ คือ

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (\psi_{ab} + \psi_{ba}) \quad (2.10)$$

ส่วนฟังก์ชันเจาะจงสเปเชียลแบบปฏิสมมาตร คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาหรือข้อมูลของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (\psi_{ab} - \psi_{ba}) \quad (2.11)$$

สำหรับฟังก์ชันเงาของสปินของระบบที่ประกอบไปด้วยอิเล็กตรอน 2 ตัว ซึ่ง m_s จะมีค่าได้เป็น $-1/2$ และ $1/2$ ดังนั้นลักษณะของสปินที่เป็นไปได้มี 4 แบบ คือ

$$\sigma_{+\frac{1}{2}+\frac{1}{2}}, \sigma_{+\frac{1}{2}-\frac{1}{2}}, \sigma_{-\frac{1}{2}+\frac{1}{2}}, \sigma_{-\frac{1}{2}-\frac{1}{2}}$$

และฟังก์ชันเงาของสปินจะเป็นแบบสถานะซิงเกิล (singlet) และสถานะซูดสาม (triplet) ดังนี้ คือ

สถานะซิงเกิล

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(\sigma_{+\frac{1}{2}-\frac{1}{2}} - \sigma_{-\frac{1}{2}+\frac{1}{2}})$$

สถานะซูดสาม

$$\begin{cases} \sigma_{+\frac{1}{2}+\frac{1}{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(\sigma_{+\frac{1}{2}-\frac{1}{2}} - \sigma_{-\frac{1}{2}+\frac{1}{2}}) \\ \sigma_{-\frac{1}{2}-\frac{1}{2}} \end{cases}$$

(2.12)

ฟังก์ชันเงาของสปินแบบสถานะซิงเกิลจะมีลักษณะไม่สมมาตรเนื่องจากการสลับสัญลักษณ์ 1 และ 2 จะให้ผลต่างไปจากเดิม ส่วนฟังก์ชันเงาที่แสดงสถานะซูดสามจะเป็นฟังก์ชันเงาของสปินแบบสมมาตร เนื่องจากการสลับสัญลักษณ์ 1 และ 2 ไม่ทำให้สมการทั้งสามต่างไปจากเดิม ฟังก์ชันเงาของระบบที่มีอิเล็กตรอน 2 ตัวจะแสดงไว้ในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แสดงฟังก์ชันเงาของระบบที่ประกอบด้วยอิเล็กตรอน 2 ตัว

สถานะเงา	การปรับแนวสปิน	ฟังก์ชันเงาของสปิน	S	M_s	S_1	S_2
ซิงเกิล	$\uparrow\downarrow - \downarrow\uparrow$	$\frac{1}{\sqrt{2}}(\sigma_{+\frac{1}{2}-\frac{1}{2}} - \sigma_{-\frac{1}{2}+\frac{1}{2}})$	0	0	1/2	1/2
ซูดสาม	$\uparrow\uparrow$	$\sigma_{+\frac{1}{2}+\frac{1}{2}}$	1	1	1/2	1/2
	$\uparrow\downarrow + \downarrow\uparrow$	$\frac{1}{\sqrt{2}}(\sigma_{+\frac{1}{2}-\frac{1}{2}} + \sigma_{-\frac{1}{2}+\frac{1}{2}})$	1	0	1/2	1/2
	$\downarrow\downarrow$	$\sigma_{-\frac{1}{2}-\frac{1}{2}}$	1	-1	1/2	1/2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟังก์ชันเจาะจงสมบูรณ์ที่เป็นแบบปฏิสมมาตร ทั้ง 4 ฟังก์ชันของระบบที่ยังไม่พิจารณาอันตรกิริยาระหว่างโมเมนต์วงโคจรและโมเมนต์เชิงมุมจะแสดงได้ดังนี้ คือ

$$\psi_A = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}(\psi_{ab} + \psi_{ba})\frac{1}{\sqrt{2}}\left(\sigma_{+\frac{1}{2}\frac{1}{2}} - \sigma_{-\frac{1}{2}\frac{1}{2}}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(\psi_{ab} - \psi_{ba})\sigma_{+\frac{1}{2}\frac{1}{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(\psi_{ab} - \psi_{ba})\frac{1}{\sqrt{2}}\left(\sigma_{+\frac{1}{2}\frac{1}{2}} + \sigma_{-\frac{1}{2}\frac{1}{2}}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(\psi_{ab} - \psi_{ba})\sigma_{-\frac{1}{2}\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (2.13)$$

สมการทั้ง 4 นี้มีสมบัติเป็นสภาพปกติ (normalized) เป็นสภาวะเชิงตั้งฉาก (orthogonality) และมีสภาพซ้อนสถานะ (degeneracy)

สำหรับระบบที่ประกอบไปด้วยอิเล็กตรอน 2 ตัว เวกเตอร์ของโมเมนต์เชิงมุมสปินรวมจะแสดงได้ดังนี้ คือ

$$\vec{S} = \vec{S}_1 + \vec{S}_2$$

ซึ่งขนาดของโมเมนต์เชิงมุมสปินรวมจะมีค่าดังนี้ คือ

$$S = \sqrt{s(s+1)}\hbar$$

$$S_z = m_s \hbar$$

เมื่อ $m_s = -s, \dots, +s$

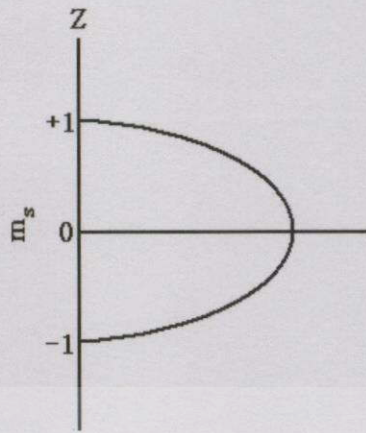
โดยที่ $s = 0, 1$

ถ้ากำหนดให้อิเล็กตรอนทั้งสองตัวมีเวกเตอร์สปินเท่ากับ $s_1 = 1/2$ และ $s_2 = 1/2$ เวกเตอร์สปินของสปินทั้งสองในแนวแกน z จะเป็น $s = 0$ และ 1 ตามลำดับดังรูปที่ 2.22 ซึ่งฟังก์ชันเจาะจงสปินของสถานะชุดเดี่ยวจะสอดคล้องกับ $s = 0$ ส่วนฟังก์ชันเจาะจงสปินแบบชุดสามจะสอดคล้องกับ $s = 1$

$$s_1 = 1/2 \quad \uparrow\downarrow \quad s_2 = 1/2 \\ s = 0$$

$$s_1 = 1/2 \quad \uparrow \quad \uparrow \quad s = 1 \\ s_2 = 1/2 \quad \uparrow$$

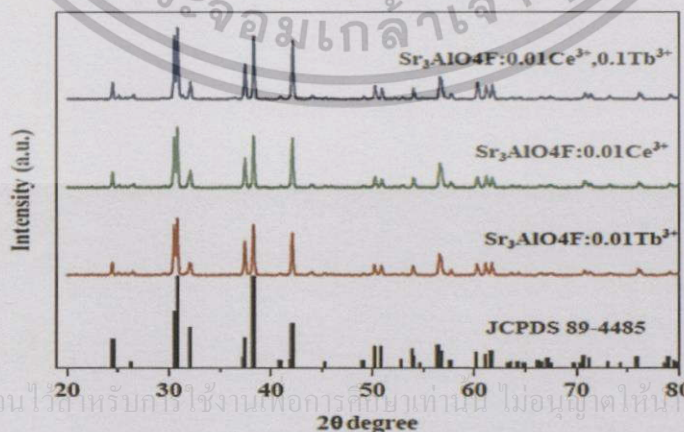
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 แสดงแผนภาพการรวมเวกเตอร์สปินของอะตอมที่มีอิเล็กตรอน 2 ตัว

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Jiayve Sun, 2013)

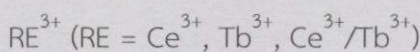
ซันและผู้ร่วมงาน (Sun, 2014) ได้ทำการศึกษาสมบัติการเรืองแสงและการถ่ายโอนพลังงานแสงภายในเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{Sr}_3\text{AlO}_4\text{F}$ ที่เจือด้วยไอออนของธาตุ Ce^{3+} และ Tb^{3+} ซึ่งเตรียมโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ SrF_2 , SrCO_3 , Al_2O_3 , CeO_2 และ Tb_4O_7 ซึ่งทำการเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียสเม็ดเซรามิกของบรรยากาศของก๊าซ CO เป็นเวลา 4 ชั่วโมง รูปที่ 2.23 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารประกอบ $\text{Sr}_3\text{AlO}_4\text{F} : \text{RE}^{3+}$ เมื่อ RE^{3+} คือไอออนของธาตุ Tb^{3+} หรือไอออนของธาตุ Ce^{3+} พบว่าโครงสร้างผลึกของสารเรืองแสง $\text{Sr}_3\text{AlO}_4\text{F} : \text{RE}^{3+}$ อยู่ในระบบเตตระโกนัล สเปซกรุ๊ป $I4/mcm$ สอดคล้องดีกับไฟล์ JCPDS (89-4485) โดยที่ไอออนของธาตุ Tb^{3+} และไอออนของธาตุ Ce^{3+} สามารถแทนที่ในตำแหน่งของไอออนของธาตุ Sr^{2+} เพราะว่ามีไอออนของธาตุ Ce^{3+} (0.114 นาโนเมตร), Tb^{3+} (0.104 นาโนเมตร) และ Sr^{2+} (0.126 นาโนเมตร) มีความใกล้เคียงกันมาก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตั้งอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.23 แสดงสเปกตรัมของฟังก์ชันการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารเรืองแสง $\text{Sr}_3\text{AlO}_4\text{F} :$

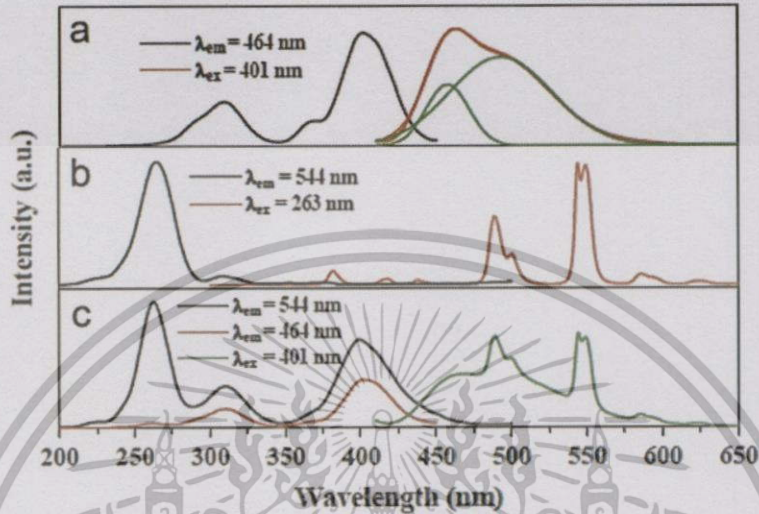


รูปที่ 2.24 (ก) แสดงแถบกระตุ้นและแถบเรืองแสงของสารเรืองแสง $\text{Sr}_3\text{AlO}_4\text{F} : \text{RE}^{3+}$ โดยที่แถบกระตุ้นจะถูกบันทึกโดยพิจารณาการเรืองแสงที่ความยาวคลื่น 464 นาโนเมตร พบว่าพีคที่มีความเข้มสูงสุดของแถบกระตุ้นจะอยู่ที่ความยาวคลื่น 401 นาโนเมตร ซึ่งสอดคล้องดีกับการทรานซิชันของอิเล็กตรอนระหว่างระดับพลังงาน $4f \rightarrow 5d$ ของไอออนของธาตุ Ce^{3+} ส่วนแถบเรืองแสงของสารเรืองแสง $\text{Sr}_3\text{AlO}_4\text{F} : \text{Ce}^{3+}$ มีลักษณะเป็นแถบที่ไม่สมมาตรแบบกราฟระฆังคว่ำโดยมีพีคสูงสุดที่ความยาวคลื่น 464 นาโนเมตร แต่จากการฟิตกราฟด้วยสมการเกาส์เซียน (Gaussian fit) พบว่าแถบเรืองแสงแยกออกเป็น 2 พีคที่ซ้อนทับกันอยู่โดยพีคแรกจะอยู่ที่ความยาวคลื่น 475 นาโนเมตร ซึ่งเกิดจากการทรานซิชันระหว่างระดับพลังงาน $5d \rightarrow {}^2F_{5/2}$ ส่วนพีคที่สองจะอยู่ที่ความยาวคลื่น 493 นาโนเมตรซึ่งเกิดจากการทรานซิชันระหว่างระดับพลังงาน $5d \rightarrow {}^2F_{7/2}$

แถบกระตุ้นและแถบเรืองแสงของสารเรืองแสง $\text{Sr}_3\text{AlO}_4\text{F} : 1\%\text{Tb}^{3+}$ จะแสดงดังรูปที่ 2.24 (ข) โดยที่แถบกระตุ้นจะถูกบันทึกโดยพิจารณาการเรืองแสงที่ความยาวคลื่น 544 นาโนเมตร พบว่าเกิดพีคการกระตุ้นสองพีคซึ่งพีคที่มีความเข้มมากจะอยู่ที่ความยาวคลื่น 263 นาโนเมตร ส่วนพีคที่มีความเข้มน้อยจะอยู่ที่ความยาวคลื่น 308 นาโนเมตร ซึ่งสอดคล้องกับ สปิน-อินยอมน ($\Delta s = 0$) และ สปิน-ต้องห้าม ($\Delta s = 0$) ของการทรานซิชันระหว่างระดับพลังงาน $4f^8 \rightarrow 4f^7 5d^1$ ส่วนแถบการเปล่งแสงจะมีพีคอยู่ที่ 623, 585, 544 และ 489 นาโนเมตร ซึ่งเป็นการทรานซิชันระหว่างระดับพลังงาน ${}^5D_4 \rightarrow {}^7F_J$ ($J = 3, 4, 5, 6$) และยังมีพีคเล็กๆที่ความยาวคลื่น 437, 417 และ 381 นาโนเมตร ซึ่งเป็นการทรานซิชันระหว่างระดับพลังงาน ${}^5D_3 \rightarrow {}^7F_J$ ($J = 3, 4, 5$) สรุปว่าแถบการเปล่งแสงจะให้สีเขียวความเข้มสูงสุดอยู่ที่ความยาวคลื่น 544 นาโนเมตร จากรูปที่ 2.24 (ก) และ 2.24 (ข) จะเห็นได้ชัดว่า ตำแหน่งของแถบเรืองแสงของไอออนของธาตุ Ce^{3+} ซ้อนทับกับตำแหน่งของแถบกระตุ้นของไอออน Tb^{3+} ซึ่งบ่งบอกว่าพลังงานแสงสามารถส่งผ่านจากไอออนของธาตุ Ce^{3+} ไปยังไอออนของธาตุ Tb^{3+} ได้

รูปที่ 2.24 (ค) แสดงแถบกระตุ้นและแถบเปล่งแสงของสารเรืองแสง $\text{Sr}_3\text{AlO}_4\text{F} : 1\%\text{Ce}^{3+}, 1\%\text{Tb}^{3+}$ โดยที่แถบกระตุ้นจะถูกบันทึกโดยพิจารณาการเรืองแสงที่ความยาวคลื่น 544 นาโนเมตร (ซึ่งเป็นแถบเรืองแสงเนื่องจากการทรานซิชันระหว่างระดับพลังงาน ${}^5D_4 \rightarrow {}^7F_5$) พบว่าแถบกระตุ้นมี 3 พีคซึ่งพีคที่มีความเข้มสูงจำนวนสองพีคจะอยู่ที่ความยาวคลื่น 264 และ 401 นาโนเมตร ส่วนพีคที่มีความเข้มต่ำจะอยู่ที่ความยาวคลื่น 308 นาโนเมตร จากการเปรียบเทียบกับรูปที่ 2.24 (ก) และ 2.24 (ข) พบว่าพีคของแถบกระตุ้นของสารเรืองแสง $\text{Sr}_3\text{AlO}_4\text{F} : 1\%\text{Ce}^{3+}, 1\%\text{Tb}^{3+}$ ที่ความยาวคลื่น 264 นาโนเมตร เป็นการทรานซิชันระหว่างระดับพลังงาน $4f^8 \rightarrow 4f^7 5d^1$ ของไอออน Tb^{3+} ส่วนพีคของแถบกระตุ้นที่ความยาวคลื่น 308 และ 401 นาโนเมตร เป็นการทรานซิชันระหว่างระดับพลังงาน $4f^8 \rightarrow 5d$ ของไอออนของธาตุ Ce^{3+} ซึ่งบ่งชี้ว่าเกิดการถ่ายโอนพลังงานแสงจากไอออนของธาตุ Ce^{3+} ไปยังไอออนของธาตุ Tb^{3+} ในการเรืองแสง $\text{Sr}_3\text{AlO}_4\text{F} : 1\%\text{Ce}^{3+}, 1\%\text{Tb}^{3+}$ ถ้าเรากระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 401 นาโนเมตร (ซึ่งตรงกับแถบกระตุ้นของไอออนของธาตุ Ce^{3+}) จะเกิดแถบเรืองแสงของทั้งไอออนของธาตุ Ce^{3+} (ที่ความยาวคลื่น 430 นาโนเมตร) และของไอออนของธาตุ Tb^{3+} (การทราน

ซีชั้นระหว่างระดับพลังงาน $^5D_4 \rightarrow ^7F_J$ ที่ความยาวคลื่น 489, 544, 585 และ 623 นาโนเมตร) ซึ่งเป็นการยืนยันว่าเกิดการถ่ายโอนพลังงานแสงจากไอออนของธาตุ Ce^{3+} ไปยังไอออนของธาตุ Tb^{3+} จริง



รูปที่ 2.24 แสดงแถบการกระตุ้นด้วยพลังงานโฟตอนและแถบการเปล่งแสงของสารเรืองแสง
 ก. $Sr_3AlO_4F : 1\%Ce^{3+}$
 ข. $Sr_3AlO_4F : 1\%Tb^{3+}$
 ค. $Sr_3AlO_4F : 1\%Ce^{3+}, 1\%Tb^{3+}$

รูปที่ 2.25 แสดงเส้นโค้งของการสลายตัวของการเรืองแสง (decay curve) ที่ความยาวคลื่น 464 นาโนเมตร ของสารเรืองแสง $Sr_3AlO_4F : 1\%Ce^{3+}, xTb^{3+}$ ที่เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของไอออนของธาตุ Tb^{3+} ตั้งแต่ 1 - 20 เปอร์เซ็นต์ พบว่าค่าชีวิต (life time) ของไอออนของธาตุ Ce^{3+} จะสั้นลงเมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของไอออนของธาตุ Tb^{3+} เพิ่มขึ้น เส้นโค้งของการสลายตัวของการเรืองแสงสามารถฟิตได้ด้วยดับเบิล-เอ็กซ์โพเนนเชียลฟังก์ชันดังสมการ

$$I = A_1 \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right)$$

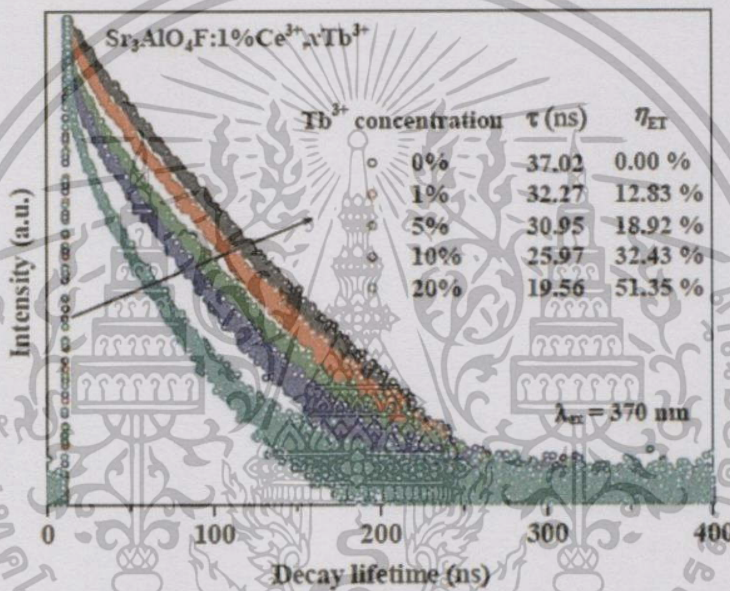
เมื่อ I คือความเข้มของการเรืองแสง, A_1 และ A_2 เป็นค่าคงที่, τ_1 และ τ_2 คือเวลาของการสลายตัว (decay time) ค่าชีวิตของการเรืองแสงของไอออนของธาตุ Ce^{3+} ที่เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของไอออนของธาตุ Tb^{3+} ค่าต่างๆสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกแปลง $\tau = \frac{A_1\tau_1^2 + A_2\tau_2^2}{A_1\tau_1 + A_2\tau_2}$ อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของไอออนของธาตุ Tb³⁺ เพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 20 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้ค่าชีวิตของการเรืองแสงของไอออนของธาตุ Ce³⁺ ลดลงจาก 37.02 เป็น 19.05 นาโนวินาที ประสิทธิภาพของการถ่ายโอนพลังงานแสง (η_T) จากไอออนของธาตุ Ce³⁺ ไปยังไอออนของธาตุ Tb³⁺ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\eta_T = 1 - \tau_{so} / \tau_s$$

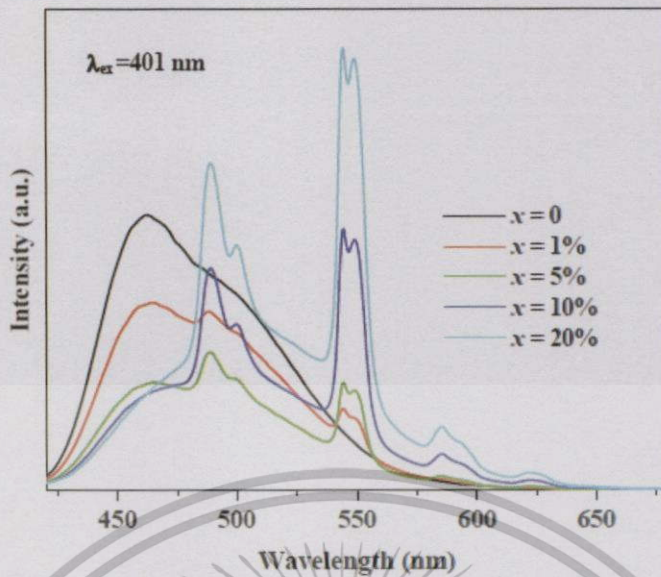
เมื่อ τ_s คือ ค่าชีวิตของเซนซีไทเซอร์ (Ce³⁺) เมื่อมีแอคทีเวเตอร์ (Tb³⁺) ส่วน τ_{so} คือ ค่าชีวิตของเซนซีไทเซอร์ในกรณีไม่มีแอคทีเวเตอร์ พบว่าค่าสูงสุดของ η_T เท่ากับ 51.4 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.25 แสดงค่าชีวิตของการสลายตัวของ การเรืองแสงเมื่อกระตุ้นด้วยแสงความยาวคลื่น 370 นาโนเมตรของไอออนของธาตุ Ce³⁺ ในสารเรืองแสง Sr₃AlO₄F : 1%Ce³⁺, xTb³⁺

รูปที่ 2.26 แสดงแถบการเปล่งของสารเรืองแสง Sr₃AlO₄F : 1%Ce³⁺, xTb³⁺ (x = 0%, 1%, 5%, 10%, 20%) เมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของไอออนของธาตุ Tb³⁺ เพิ่มขึ้นตามความเข้มของแถบเรืองแสงของไอออนของธาตุ Ce³⁺ (เมื่อกระตุ้นด้วยแสงความยาวคลื่น 401 นาโนเมตร) จะลดลงอย่างช้าๆ ในขณะที่เดียวกันแถบเรืองแสงสีเขียวจนถึงสีเหลืองของไอออนของธาตุ Tb³⁺ จะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ซึ่งยืนยันถึงการถ่ายโอนพลังงานแสงจากไอออนของธาตุ Ce³⁺ ไปยังไอออนของธาตุ Tb³⁺ ในสารเรืองแสง Sr₃AlO₄F เป็นไปได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 แสดงแถบการเรืองแสงของสารเรืองแสง $\text{Sr}_3\text{AlO}_4\text{F} : 1\% \text{Ce}^{3+}, x\text{Tb}^{3+}$ เมื่อ $x = 0\%, 1\%, 5\%, 10\%, 20\%$

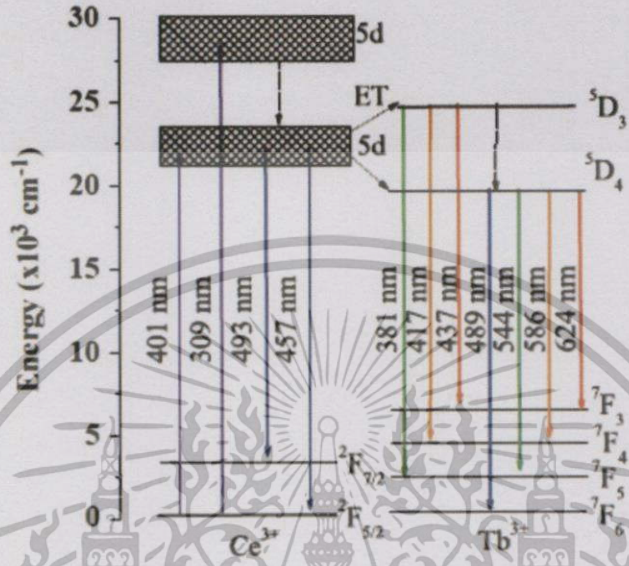
รูปที่ 2.27 แสดงระดับพลังงานของไอออนของธาตุ Ce^{3+} และไอออนของธาตุ Tb^{3+} ของสารเรืองแสง $\text{Sr}_3\text{AlO}_4\text{F} : \text{Ce}^{3+}, \text{Tb}^{3+}$ ที่แสดงถึงกระบวนการถ่ายโอนพลังงานแสงจากไอออนของธาตุ Ce^{3+} ไปยังไอออนของธาตุ Tb^{3+} เมื่อกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตให้กับไอออนของธาตุ Ce^{3+} อิเล็กตรอนในระดับพลังงานของไอออนของธาตุ Ce^{3+} จะถูกปั๊มขึ้นไปยังระดับพลังงาน $5d$ จากนั้นจึงเคลื่อนย้ายลงสู่ระดับพลังงานต่ำแล้วเรืองแสงที่ความยาวคลื่น 457 และ 493 นาโนเมตร แต่เนื่องจากระดับพลังงาน $5d$ ของไอออนของธาตุ Ce^{3+} ใกล้เคียงกับระดับพลังงาน $5D_3$ และ $5D_4$ ของไอออนของธาตุ Tb^{3+} ซึ่งถ่ายโอนพลังงานแสงจากไอออนของธาตุ Ce^{3+} ไปยังไอออนของธาตุ Tb^{3+} จะเกิดขึ้นได้อย่างง่ายดาย จากนั้นไอออนของธาตุ Tb^{3+} จะเปล่งแสงออกมาเนื่องจากการทรานซิชันจากระดับพลังงาน $5D_3 \rightarrow 7F_1$ และ $5D_4 \rightarrow 7F_1$

จากสูตรของการถ่ายโอนพลังงานแสงของเด็กเตอร์ (Dexter's energy transfer formula) สำหรับอันตรกิริยาแบบมัลติโพลาร์ และการประมาณแบบไรส์เฟล (Risfeld's approximation) ดังความสัมพันธ์

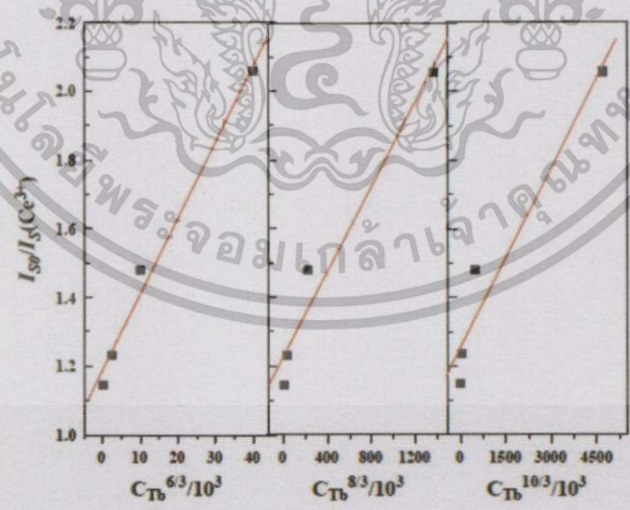
$$\frac{\eta_0}{\eta} \propto C^{n/3}$$

เมื่อ η_0 คือประสิทธิภาพเชิงควอนตัมของการเรืองแสงจากไอออนของธาตุ Ce^{3+} เมื่อไม่มีไอออนของธาตุ Tb^{3+} ส่วน η คือประสิทธิภาพเชิงควอนตัมของการเรืองแสงจากไอออนของธาตุ Ce^{3+} เมื่อมีไอออนของธาตุ Tb^{3+} ค่า η_0/η สามารถคำนวณได้จากความเข้มข้นของการเรืองแสง (I_{so}/I_s) ส่วน C คือความเข้มข้นของไอออนของธาตุ Tb^{3+} และ $n = 6, 8, 10$ จะสอดคล้องกับอันตรกิริยาแบบ

ไดโพล-ไดโพล, ไดโพล-ควอดรูโพล, ควอดรูโพล-ควอดรูโพล รูปที่ 2.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า (I_{so}/I_s) กับ $C^{n/3}$ พบว่า ความสัมพันธ์นี้เหมาะสมดีเมื่อ $n = 6$ ซึ่งระบุได้ว่าการถ่ายโอนพลังงานแสงเกิดจากอันตรกิริยาแบบไดโพล-ไดโพล



รูปที่ 2.27 แสดงแผนภาพระดับพลังงานของไอออนของธาตุ Ce^{3+} และไอออนของธาตุ Tb^{3+} และกระบวนการถ่ายโอนพลังงานแสงจากไอออนของธาตุ Ce^{3+} ไปยังไอออนของธาตุ Tb^{3+} ในสารเรืองแสง $Sr_3AlO_4F: Ce^{3+}, Tb^{3+}$



รูปที่ 2.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า I_{so}/I_s กับ $C^{n/3}$ ของสารเรืองแสง $Sr_3AlO_4F : Ce^{3+}, Tb^{3+}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยโดยเริ่มจากการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ In_2O_3 , WO_3 , $\text{TbCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{EuCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ด้วยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งเมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นจึงเป็นขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของเม็ดเซรามิกที่เตรียมได้ด้วยวิธีเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ และตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยการถ่ายภาพผิวหน้าของเม็ดเซรามิกโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ทำการตรวจสอบการเรืองแสงของผลึกของเม็ดเซรามิกรวมทั้งศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับของเม็ดเซรามิกโดยการวัดอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิสูงในช่วง 30 - 70 องศาเซลเซียส

3.1 ขั้นตอนการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ด้วยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง (รัตนัย, 2556)

3.1.1 การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$)

สารตั้งต้นที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย In_2O_3 , WO_3 , $\text{TbCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{EuCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ โดยในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ด้วยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง จะใช้สารตั้งต้นคือ In_2O_3 , WO_3 , $\text{TbCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ซึ่งแสดงตัวอย่างการคำนวณดังสมการด้านล่าง

ปฏิกิริยาเคมี คือ $3(1-x)\text{In}_2\text{O}_3 + 6x(\text{TbCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}) + \text{WO}_3 \rightarrow \text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$

เผาเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ในอากาศ

กรณีเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) เมื่อปริมาณ $x = 0$ เปอร์เซ็นต์ของเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x)

มวลโมเลกุลของผลึกของสารประกอบ $\text{In}_6\text{WO}_{12} = 6(114.82) + 183.85 + 12(15.9994)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ถ้าต้องการเตรียมผลึกของสารประกอบ $\text{In}_6\text{WO}_{12}$ จำนวน 3 กรัม

$$\text{ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ } \text{In}_2\text{O}_3 = \frac{3(277.6382)}{1064.7628}$$

$$= 2.3468 \text{ กรัม}$$

$$\text{ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ } \text{WO}_3 = \frac{3(231.8482)}{1064.7628}$$

$$= 0.6532 \text{ กรัม}$$

กรณีเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) เมื่อปริมาณ $x = 1$ เปอร์เซ็นต์ของเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x)

$$\text{มวลโมเลกุลของผงผลึกของสารประกอบ } \text{In}_{5.94}\text{Tb}_{0.06}\text{WO}_{12} = (114.82)(5.94) + (158.924)(0.06)$$

$$+ [(183.85) + (15.9994)(12)]$$

$$= 1067.4090 \text{ กรัม/โมล}$$

$$\text{ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ } \text{In}_2\text{O}_3 = \frac{3(824.5854)}{1067.4090}$$

$$= 2.3175 \text{ กรัม}$$

$$\text{ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ } \text{WO}_3 = \frac{3(231.8482)}{1067.4090}$$

$$= 0.6516 \text{ กรัม}$$

$$\text{ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ } \text{TbCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} = \frac{3(0.06)(373.2794)}{1067.4090}$$

$$= 0.0630 \text{ กรัม}$$

กรณีเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) เมื่อปริมาณ $x = 2$ เปอร์เซ็นต์ของเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x)

$$\text{มวลโมเลกุลของผงผลึกของสารประกอบ } \text{In}_{5.88}\text{Tb}_{0.12}\text{WO}_{12} = (114.82)(5.88) + (158.924)(0.12)$$

$$+ [(183.85) + (15.9994)(12)]$$

$$= 1070.0553 \text{ กรัม/โมล}$$

$$\text{ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ } \text{In}_2\text{O}_3 = \frac{3(816.2563)}{1070.0553}$$

$$= 2.2885 \text{ กรัม}$$

$$\text{ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ } \text{WO}_3 = \frac{3(231.8482)}{1070.0553}$$

$$= 0.6500 \text{ กรัม}$$

$$\text{ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ } \text{TbCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} = \frac{44.8050}{1070.0553}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อการค้า หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยเป็นอย่างสูง และต้องขอขอบคุณเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ขอสงวนสิทธิ์ในข้อมูลและต้องอ้างอิงเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 0.1256 \text{ กรัม}$$

กรณีเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) เมื่อปริมาณ $x = 3$ เปอร์เซ็นต์ของเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x)

มวลโมเลกุลของผงผลึกของสารประกอบ $\text{In}_{5.82}\text{Tb}_{0.18}\text{WO}_{12}$

$$= (114.82)(5.82) + (158.924)(0.18)$$

$$+ [(183.85) + (15.9994)(12)]$$

$$= 1072.7015 \text{ กรัม/โมล}$$

ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ In_2O_3

$$= \frac{3(277.6382)(2.91)}{1072.7015}$$

$$= 2.2595 \text{ กรัม}$$

ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ WO_3

$$= \frac{3(231.8482)}{1072.7015}$$

$$= 0.6484 \text{ กรัม}$$

ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ $\text{TbCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

$$= \frac{67.2075}{1072.7015}$$

$$= 0.1880 \text{ กรัม}$$

กรณีเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) เมื่อปริมาณ $x = 4$ เปอร์เซ็นต์ของเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x)

มวลโมเลกุลของผงผลึกของสารประกอบ $\text{In}_{5.76}\text{Tb}_{0.24}\text{WO}_{12}$

$$= (114.82)(5.76) + (158.924)(0.24)$$

$$+ [(183.85) + (15.9994)(12)]$$

$$= 1075.3478 \text{ กรัม/โมล}$$

ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ In_2O_3

$$= \frac{3(799.5980)}{1075.3478}$$

$$= 2.2595 \text{ กรัม}$$

ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ WO_3

$$= \frac{3(231.8482)}{1075.3478}$$

$$= 0.6468 \text{ กรัม}$$

ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ $\text{TbCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

$$= \frac{89.61}{1075.3478}$$

$$= 0.2500 \text{ กรัม}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) เมื่อปริมาณ $x = 5$ เปอร์เซ็นต์ของเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x)

$$\begin{aligned} \text{มวลโมลเฉลี่ยของผงผลึกของสารประกอบ } \text{In}_{5.70}\text{Tb}_{0.30}\text{WO}_{12} \\ &= (114.82)(5.70) + (158.924)(0.30) \\ &\quad + [(183.85) + (15.9994)(12)] \\ &= 1077.9940 \text{ กรัม/โมล} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ } \text{In}_2\text{O}_3 &= \frac{2373.8505}{1077.9940} \\ &= 2.2021 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ } \text{WO}_3 &= \frac{3(231.8482)}{1077.9940} \\ &= 0.6452 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ } \text{TbCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} &= \frac{112.0125}{1077.9940} \\ &= 0.3117 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

Composition (x)	$\text{In}_2\text{O}_3(\text{g})$	$\text{WO}_3(\text{g})$	$\text{TbCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}(\text{g})$
0.00	2.3468	0.6532	0.0000
0.01	2.3175	0.6516	0.0630
0.02	2.2885	0.6500	0.1256
0.03	2.2595	0.6484	0.1880
0.04	2.2307	0.6468	0.2500
0.05	2.2021	0.6452	0.3117

3.1.2 วิธีการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

- นำผงผลึกของสารประกอบ In_2O_3 , $\text{TbCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ และ WO_3 ตามปริมาณที่ต้องการ นำมาบดรวมกันในครกอาเกตให้เป็นผงละเอียดคล้ายแป้งเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทำการเจือด้วยไอออนของธาตุ Tb^{3+} จากสารประกอบ $TbCl_3 \cdot 6H_2O$ ในปริมาณ 0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 เปอร์เซ็นต์โดยโมล เมื่ออบสารตั้งต้นให้ละเอียดดีแล้วจึงนำไปอบในบรรยากาศที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
3. นำไปอัดเม็ดจะทำการอัดเม็ดโดยใช้แรงอัด 5 ตัน ด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกโดยเพิ่มแรงอัดทีละ 1 ตันแล้วทิ้งไว้ 20 วินาที จากนั้นจึงเพิ่มแรงอัดไปจนถึง 5 ตัน และตอนเอาเม็ดผงผลึกออกจากโม่ลัดอัดเม็ดจะใช้แรงอัดครั้งละประมาณ 0.5 ตัน
4. นำเม็ดของสารที่ได้นำมาใส่ครูซิเบิล ปิดฝาให้มิดชิดแล้วนำเข้าเตาเผา
5. ในการเผาภายใต้บรรยากาศปกตินั้นจะทำการเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 100 องศาเซลเซียส ต่อ 1 ชั่วโมง จนกระทั่งถึง 1100 องศาเซลเซียส จึงทิ้งไว้นาน 48 ชั่วโมง แล้วลดอุณหภูมิด้วยอัตรา 100 องศาเซลเซียส ต่อ 1 ชั่วโมง จนถึงอุณหภูมิห้องจึงปิดเตา นำออกมาทำการศึกษาริเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์ต่อไป

เม็ดเซรามิกของสารประกอบ $In_{6(1-x)}Tb_xWO_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้ขณะยังไม่เผาจะเป็นสีเหลืองอมเขียวอ่อนๆ แต่เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เม็ดเซรามิกของสารประกอบ $In_{6(1-x)}Tb_xWO_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่ยังไม่มีการเจือจะเปลี่ยนสีขาวนวล ส่วนในกรณีที่มีการเติม สารเจือแล้วจะมีสีเหลืองอ่อนดังรูปที่ 3.1

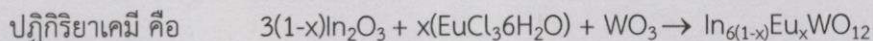


รูปที่ 3.1 แสดงภาพถ่ายของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $In_{6(1-x)}Tb_xWO_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งเมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

3.2 ขั้นตอนการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $In_{6(x-1)}Eu_xWO_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ด้วยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

3.2.1 การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $In_{6(x-1)}Eu_xWO_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ด้วยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

สารตั้งต้นที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยสารประกอบ In_2O_3 , WO_3 , และ $EuCl_3 \cdot 6H_2O$ โดยในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารประกอบของ $In_{6(x-1)}Eu_xWO_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ด้วยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจะใช้สารตั้งต้นคือสารประกอบ In_2O_3 , WO_3 , $EuCl_3 \cdot 6H_2O$ ซึ่งแสดงตัวอย่างการคำนวณดังสมการด้านล่าง



เผาเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

กรณีเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(x-1)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) เมื่อปริมาณ $x = 0$ เปอร์เซ็นต์ของเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x)

$$\begin{aligned} \text{มวลโมเลกุลของผงผลึกของสารประกอบ } \text{In}_6\text{WO}_{12} &= 6(114.82) + 183.85 + 12(15.9994) \\ &= 1064.7628 \text{ กรัม/โมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการเตรียมผงผลึกของสารประกอบ $\text{In}_6\text{WO}_{12}$ จำนวน 3 กรัม

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ } \text{In}_2\text{O}_3 &= \frac{3(277.6382)}{1064.7628} \\ &= 2.3468 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ } \text{WO}_3 &= \frac{3(231.8482)}{1064.7628} \\ &= 0.6532 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

กรณีเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(x-1)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) เมื่อปริมาณ $x = 1$ เปอร์เซ็นต์ของเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x)

$$\begin{aligned} \text{มวลโมเลกุลของผงผลึกของสารประกอบ } \text{In}_{5.94}\text{Eu}_{0.01}\text{WO}_{12} &= 5.94(114.82) + 183.85 + 12(15.9994) \\ &\quad + (1.5196) \\ &= 1059.3632 \text{ กรัม/โมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการเตรียมผงผลึก $\text{In}_6\text{WO}_{12}$ จำนวน 3 กรัม

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ } \text{In}_2\text{O}_3 &= \frac{3(824.5854)}{1059.3632} \\ &= 2.3351 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ } \text{WO}_3 &= \frac{3(231.8482)}{1059.3632} \\ &= 0.6565 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ } \text{EuCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} &= \frac{3(3.6641)}{1059.3632} \\ &= 0.0103 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(x-1)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) เมื่อปริมาณ $x = 2$ เปอร์เซ็นต์
ของเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x)

$$\begin{aligned} \text{มวลโมเลกุลของผงผลึกของสารประกอบ } \text{In}_{5.88}\text{Eu}_{0.02}\text{WO}_{12} \\ &= 5.88(114.82)+183.85+12(15.9994) \\ &\quad + (3.0392) \\ &= 1053.9936 \text{ กรัม/โมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการเตรียมผงผลึก $\text{In}_6\text{WO}_{12}$ จำนวน 3 กรัม

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ } \text{In}_2\text{O}_3 &= \frac{3(816.2563)}{1053.9936} \\ &= 2.3233 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ } \text{WO}_3 &= \frac{3(231.8482)}{1053.9936} \\ &= 0.6599 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ } \text{EuCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} &= \frac{3(7.3282)}{1053.9936} \\ &= 0.0208 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

กรณีเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(x-1)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) เมื่อปริมาณ $x = 3$ เปอร์เซ็นต์
ของเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x)

$$\begin{aligned} \text{มวลโมเลกุลของผงผลึกของสารประกอบ } \text{In}_{5.82}\text{Eu}_{0.03}\text{WO}_{12} \\ &= 5.82(114.82)+183.85+12(15.9994) \\ &\quad + (4.5588) \\ &= 1048.6240 \text{ กรัม/โมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการเตรียมผงผลึกของสารประกอบ $\text{In}_6\text{WO}_{12}$ จำนวน 3 กรัม

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ } \text{In}_2\text{O}_3 &= \frac{3(807.9271)}{1048.6240} \\ &= 2.3113 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ } \text{WO}_3 &= \frac{3(231.8482)}{1048.6240} \\ &= 0.6632 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ } \text{EuCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} &= \frac{3(10.9923)}{1048.6240} \\ &= 0.0314 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่
ไม่ว่าการ
เอกสารนี้
การเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(x-1)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) เมื่อปริมาณ $x = 4$ เปอร์เซ็นต์
ของเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) แปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{มวลโมเลกุลของผงผลึกของสารประกอบ } \text{In}_{5.76}\text{Eu}_{0.04}\text{WO}_{12}$$

$$= 5.76(114.82)+183.85+12(15.9994)$$

$$+(6.0784)$$

$$= 1043.2544 \text{ กรัม/โมล}$$

ถ้าต้องการเตรียมผงผลึกของสารประกอบ $\text{In}_6\text{WO}_{12}$ จำนวน 3 กรัม

ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ In_2O_3

$$= \frac{3(799.5980)}{1043.2544}$$

$$= 2.2993 \text{ กรัม}$$

ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ WO_3

$$= \frac{3(231.8482)}{1043.2544}$$

$$= 0.6667 \text{ กรัม}$$

ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ $\text{EuCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

$$= \frac{3(14.6564)}{1043.2544}$$

$$= 0.0421 \text{ กรัม}$$

กรณีเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(x-1)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) เมื่อปริมาณ $x = 5$ เปอร์เซ็นต์
ของเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x)

มวลโมเลกุลของผงผลึกของสารประกอบ $\text{In}_{5.70}\text{Eu}_{0.05}\text{WO}_{12}$

$$= 5.70(114.82)+183.85+12(15.9994)$$

$$+(7.5980)$$

$$= 1045.8848 \text{ กรัม/โมล}$$

ถ้าต้องการเตรียมผงผลึกของสารประกอบ $\text{In}_6\text{WO}_{12}$ จำนวน 3 กรัม

ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ In_2O_3

$$= \frac{3(791.2688)}{1045.8848}$$

$$= 2.2696 \text{ กรัม}$$

ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ WO_3

$$= \frac{3(231.8482)}{1045.8848}$$

$$= 0.6650 \text{ กรัม}$$

ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ $\text{EuCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

$$= \frac{3(18.32055)}{1045.8848}$$

$$= 0.0525 \text{ กรัม}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 แสดงปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งเมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

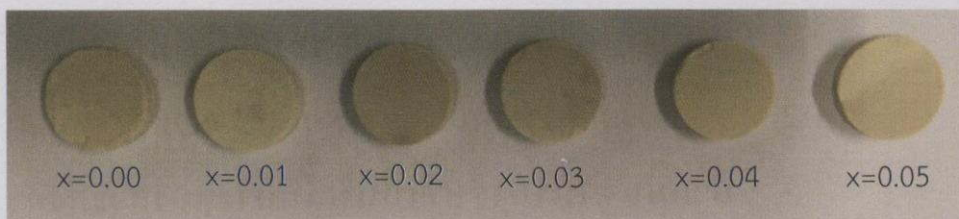
Composition (x)	$\text{In}_2\text{O}_3(\text{g})$	$\text{WO}_3(\text{g})$	$\text{EuCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}(\text{g})$
0.00	2.3468	0.6532	0.0000
0.01	2.3351	0.6565	0.0103
0.02	2.3233	0.6599	0.0208
0.03	2.3113	0.6632	0.0314
0.04	2.2993	0.6667	0.0421
0.05	2.2696	0.6650	0.0525

3.2.2 วิธีการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6-x}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

1. นำผงผลึกของสารประกอบ In_2O_3 , $\text{EuCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ และ WO_3 ตามปริมาณที่ต้องการนำมาบดรวมกันในครกอาเกตให้เป็นผงละเอียดคล้ายแป้งเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
2. ทำการเจือด้วยไอออนของธาตุ Eu^{3+} จากสารประกอบ $\text{EuCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ เจือในปริมาณ 0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 เปอร์เซ็นต์โดยโมลแล้วอบ ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
3. นำไปอัดเม็ดจะทำการอัดเม็ดโดยใช้แรงอัด 5 ตัน ด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกโดยเพิ่มแรงอัดทีละ 1 ตัน แล้วทิ้งไว้ 20 วินาที จากนั้นจึงเพิ่มแรงอัดไปจนถึง 5 ตัน และตอนเอาเม็ดผงผลึกออกจากโมลต์อัดเม็ดจะใช้แรงอัดครั้งละประมาณ 0.5 ตัน
4. นำเม็ดของสารที่ได้นำมาใส่ครูซิเบิล ปิดฝาให้มิดชิดแล้วนำเข้าเตาเผา
5. ในการเผาภายใต้บรรยากาศนั้นจะทำการเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 100 องศาเซลเซียส ต่อ 1 ชั่วโมง จนกระทั่งถึง 1100 องศาเซลเซียส จึงทิ้งไว้นาน 48 ชั่วโมง แล้วลดอุณหภูมิด้วยอัตรา 100 องศาเซลเซียส ต่อ 1 ชั่วโมง จนถึงอุณหภูมิห้อง จึงปิดเตานำออกมาทำการวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์ต่อไป

เม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้ขณะยังไม่เผาสีจะเป็นสีเหลืองนวลอ่อนๆ แต่เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6-x}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) จะมีสีเป็นสีขาวนวลดังรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดงภาพถ่ายของเม็ดเซรามิกสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งเมื่อผ่านการเผาผลึกที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

3.3 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(x-1)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ด้วยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

3.3.1 การศึกษาสมบัติโครงสร้างผลึกทางจุลภาค

ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (XRD) ของ Bruker รุ่น D8 Advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5406 อังสตรอม โดยใช้กระแส 40 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 40 กิโลโวลต์

3.3.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกทางมหภาค

ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ยี่ห้อ LEO รุ่น LEO 1455VP

3.3.3 การศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี

- ด้วยเครื่อง Precision LCR meter ของ Agilent รุ่น E4980A ใช้สัญญาณไฟสลับ (ac signal) เท่ากับ 20 มิลลิโวลต์ ใช้ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ - 2 เมกะเฮิร์ตซ์ และ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิ 30 - 70 องศาเซลเซียส
- กาวเงินนำไฟฟ้าใช้ทำเป็นอิเล็กโทรดโดยอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- สายไฟ

3.3.4 การศึกษาสมบัติการเรืองแสง

- เครื่องสเปกโทรฟลูออโรโฟโตมิเตอร์ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น RF-5031PC ดังแสดงในรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

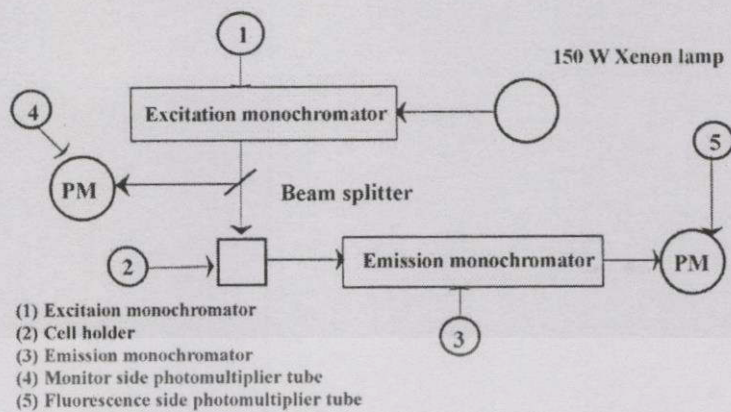


รูปที่ 3.3 แสดงภาพถ่ายเครื่องสเปกโทรฟลูออโรโฟโตมิเตอร์ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น RF-5301PC

ในการวัดการเรืองแสงของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ด้วยเครื่องสเปกโทรฟลูออโรโฟโตมิเตอร์มีขั้นตอนในการดำเนินการดังนี้

- นำผงผลึกของสารตัวอย่างบรรจุลงในภาชนะใส่สารตัวอย่าง
- นำแผ่นแก้วควอทซ์มาวางปิดทับผงผลึกของสารตัวอย่างและยึดให้แน่นด้วยสก็อตเทป
- นำเอาภาชนะใส่สารตัวอย่างเข้าไปติดตั้งในเครื่องสเปกโทรฟลูออโรโฟโตมิเตอร์
- เปิดสวิทช์เครื่องสเปกโทรฟลูออโรโฟโตมิเตอร์เพื่อให้เครื่องเซ็ทตัวเองพร้อมทำงาน
- ในการหาสเปกตรัมการเรืองแสงของสารตัวอย่าง จำเป็นต้องเลือกความยาวคลื่นแสงที่ใช้ในการกระตุ้นให้เหมาะสม ก่อนอื่นควรดูการเรืองแสงด้วยตาเปล่า โดยเลือกความยาวคลื่นของ emission mode ไปที่ 700 นาโนเมตร จากนั้นจึงทำการสแกนความยาวคลื่นแสงกระตุ้นตั้งแต่ 200 - 600 นาโนเมตร ทำซ้ำหลายๆครั้งเพื่อให้ทราบความยาวคลื่นแสงกระตุ้นที่เหมาะสม
- ทำการบันทึกสเปกตรัมการเรืองแสงในช่วงความยาวคลื่นที่มากกว่าความยาวคลื่นของแสงกระตุ้นเนื่องจากโดยธรรมชาติของการเรืองแสง พลังงานของการเรืองแสงจะน้อยกว่าพลังงานของแสงกระตุ้น
- ทำการบันทึกสเปกตรัมการกระตุ้นโดยกำหนดให้ความยาวคลื่นของการเปล่งแสงสอดคล้องกับพีคของการเรืองแสง สเปกตรัมการกระตุ้นต้องอยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่สั้นกว่าความยาวคลื่นของการเรืองแสง

หลักการทำงานของเครื่องสเปกโทรฟลูออโรโฟโตมิเตอร์จะแสดงดังรูปที่ 3.4 แสงจากหลอดไฟซินอน 150 วัตต์ จะส่องเข้าทางโมโนโครเมเตอร์การกระตุ้น (excitation monochromator) เราสามารถเลือกความยาวคลื่นแสงที่ใช้ในการกระตุ้นได้จากโมโนโครเมเตอร์การกระตุ้นนี้ให้แสงที่ใช้ในการกระตุ้นตกกระทบสารตัวอย่างแล้วจะเกิดการเรืองแสงออกมา สเปกตรัมของการเรืองแสงจะถูกบันทึกด้วยหลอดขยายสัญญาณ (photomultiplier tube) ในทำนองเดียวกันเราสามารถบันทึกสเปกตรัมการกระตุ้นได้ด้วยหลอดขยายสัญญาณอีกตัวหนึ่งที่ติดตั้งไว้ที่โมโนโครเมเตอร์การกระตุ้น



รูปที่ 3.4 แสดงแผนภาพหลักการทำงานของเครื่องสเปกโทรฟลูออโรฟโตมิเตอร์ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น RF-5301PC



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

เนื้อหาในบทที่ 4 นี้ จะแบ่งเป็น 3 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนแรกจะทำการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ In_2O_3 , WO_3 , $\text{TbCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{EuCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ด้วยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ในปริมาณ 1 กรัม ส่วนที่สองจะเป็นการศึกษาสมบัติการเรืองแสงของผงผลึกของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ส่วนที่สามเป็นการศึกษาพารามิเตอร์ทางไฟฟ้ากระแสสลับ เช่น ค่าความจุไฟฟ้า ค่าความนำไฟฟ้า และ ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) โดนการวัดค่าอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ และ ในช่วงอุณหภูมิ 30 - 70 องศาเซลเซียส ซึ่งทั้งค่าจำนวนจริงและค่าจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนจะเปลี่ยนตามความถี่และอุณหภูมิ

4.1 ลักษณะของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้นั้นมีลักษณะเป็นเม็ดสีเหลืองอมเขียวอ่อนๆ ขณะที่เม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) จะเป็นสีขาวอมเหลืองนวล



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

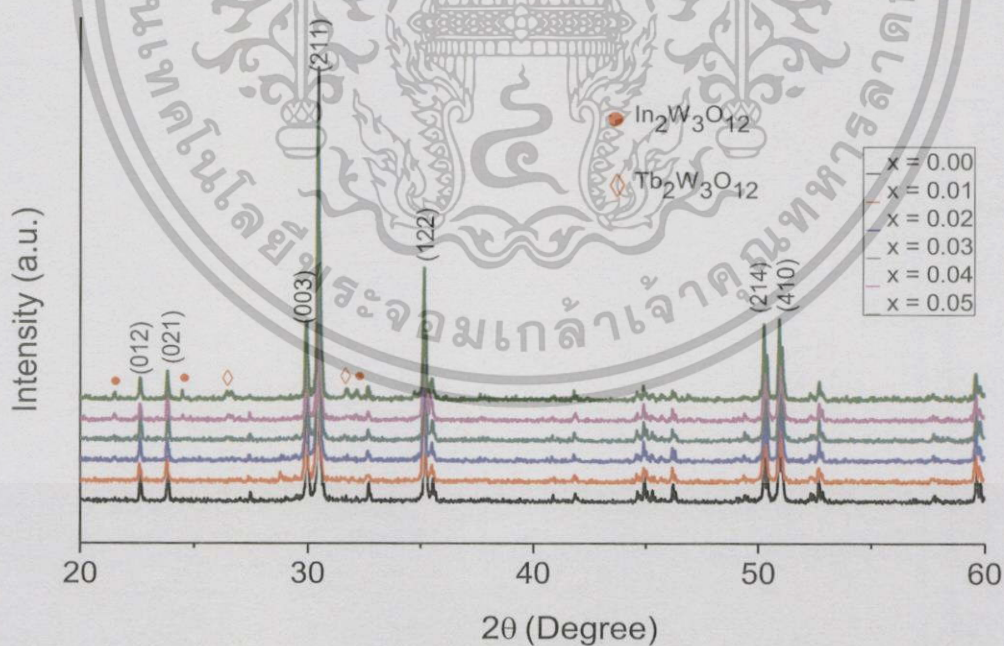
ก. เม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$)
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ออกทั้งหมดให้คิดเปลืองเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. เม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$)

4.2 ผลการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

4.2.1 ผลการศึกษาสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมโดยนำเอาสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกมาอัดเม็ดและเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากนั้นได้นำสารที่ได้มาทำการบดละเอียดจากการศึกษาสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ดังรูปที่ 4.2 พบว่าพีคที่มีความเข้มสูงสุดเกิดจากการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์โดยระนาบ (211) ของโครงสร้างแบบเฮกซะโกนัลที่มีมุม 2θ เท่ากับ 30.47 องศา นอกจากนี้ยังพบพีคของระนาบโครงสร้างผลึกของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ได้แก่ระนาบ (012), (021), (003), (211), (122), (214), และ (410) ที่มีมุม 2θ ในกรณี $x = 0.01$ จะมีค่าเท่ากับ 22.26, 23.82, 29.95, 30.47, 35.17, 50.25, 50.92 องศา ตามลำดับ สำหรับกรณีที่เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) มีค่าตั้งแต่ 0.04 ขึ้นไปจะปรากฏเฟสแฝงของสารประกอบ $\text{In}_2\text{W}_3\text{O}_{12}$ และสารประกอบ $\text{Tb}_2\text{W}_3\text{O}_{12}$ ร่วมกับเฟสหลักของสารประกอบ $\text{In}_6\text{WO}_{12}$ เสมอ



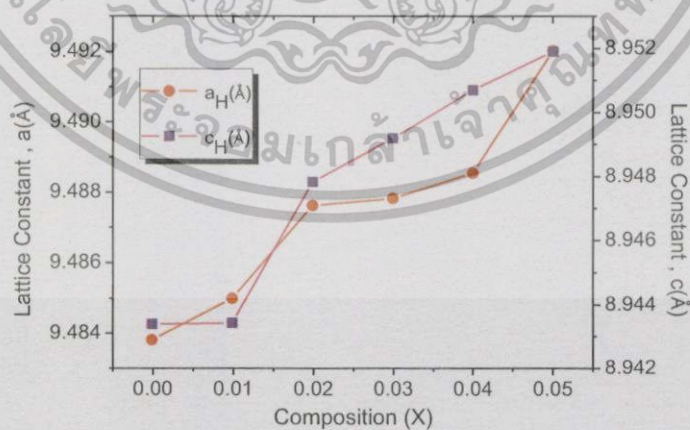
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สมบูรณ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า รูปที่ 4.2 แสดงพีคความเข้มของสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

4.2.2 ผลการศึกษาค่าคงที่โครงผลึก a และ c ของหนึ่งหน่วยเซลล์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล

ค่าคงที่โครงผลึก a และ c ของหนึ่งหน่วยเซลล์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของไอออนของธาตุ Tb^{3+} ที่เพิ่มมากขึ้นดังตารางที่ 4.1 และ รูปที่ 4.3 เนื่องมาจากรัศมีของไอออนของธาตุ Tb^{3+} (0.93 อังสตรอม) ใหญ่กว่ารัศมีของไอออนของธาตุ In^{3+} (0.81 อังสตรอม) การที่ไอออนของธาตุ Tb^{3+} เข้าแทนที่ในตำแหน่งของไอออนของธาตุ In^{3+} ส่งผลให้ค่าคงที่โครงผลึก a และ c ของหนึ่งหน่วยเซลล์มีขนาดเพิ่มขึ้น

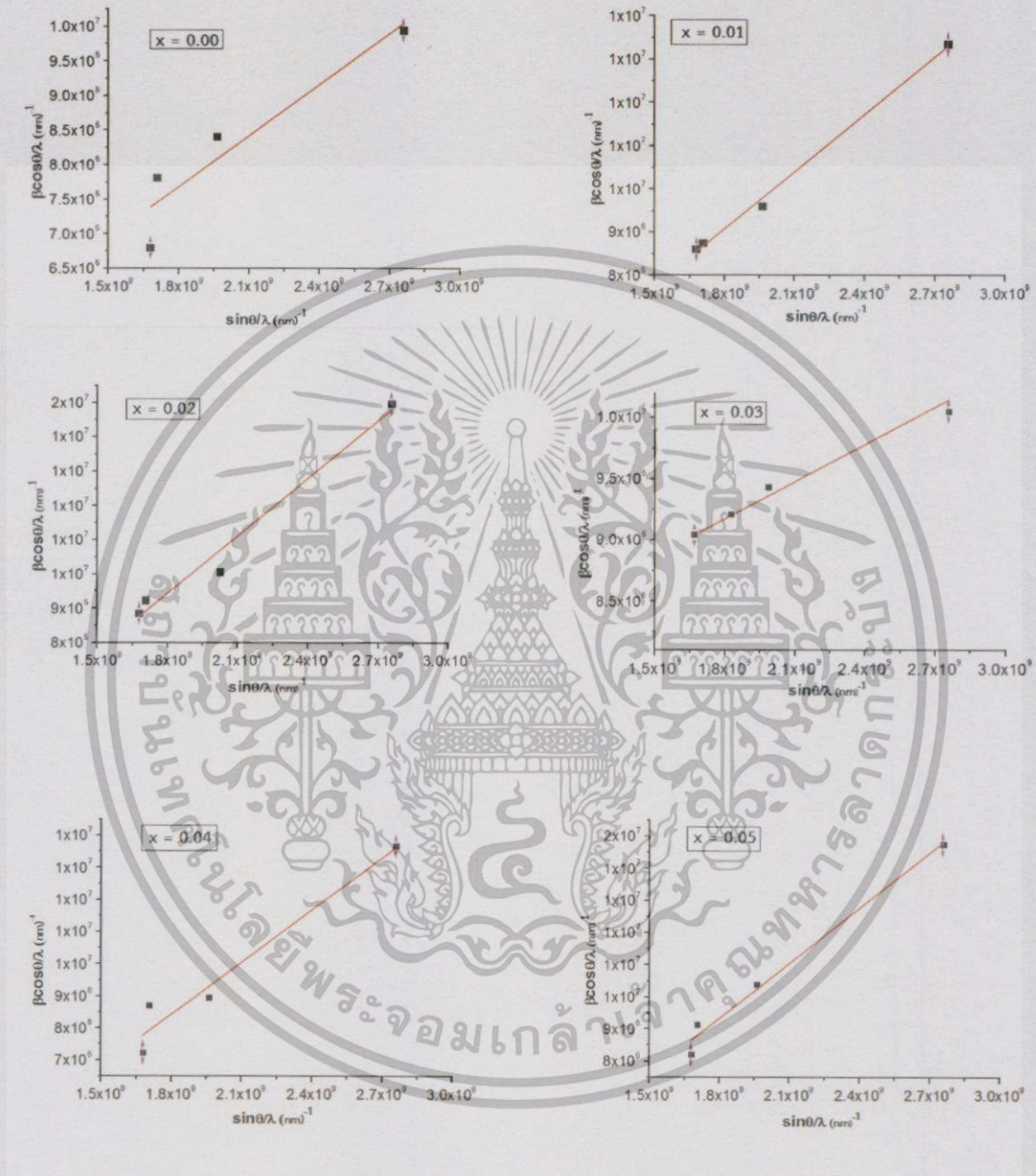
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าคงที่โครงผลึก a และ c ของหนึ่งหน่วยเซลล์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของไอออนของธาตุ Tb^{3+} ของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $In_{6(1-x)}Tb_{6x}WO_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

Composition (x)	Lattice Parameters		Volume (\AA^3)
	$a_H(\text{\AA})$	$c_H(\text{\AA})$	
0.00	9.483	8.943	804.39
0.01	9.485	8.943	804.59
0.02	9.487	8.947	805.44
0.03	9.487	8.949	805.59
0.04	9.488	8.950	805.85
0.05	9.492	8.951	806.55



รูปที่ 4.3 แสดงค่าคงที่โครงผลึก a และ c ของหนึ่งหน่วยเซลล์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของไอออนของธาตุ Tb^{3+} ของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $In_{6(1-x)}Tb_{6x}WO_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

4.2.3 การหาขนาดของเกรนโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



รูปที่ 4.4 แสดงกราฟที่ใช้คำนวณหาขนาดเกรนของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความสัมพันธ์ของ วิลเลียมสัน-ฮอลล์ (Williamson-Hall) สามารถที่จะหาค่าขนาดของเกรนของผลึกได้จากสูตร

$$\frac{\beta \cos \theta}{\lambda} = \frac{k}{D} + \frac{4 \epsilon \sin \theta}{\lambda}$$

เมื่อ D คือขนาดของเกรน (มีหน่วยเป็นนาโนเมตร), β คือความกว้างของพีคที่ครึ่งหนึ่งของความสูง (มีหน่วยเป็นเรเดียน), ϵ คือความเครียดของเกรน, λ คือความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ที่ใช้ในการทดลอง (ซึ่งในที่นี้คือ 0.15406 นาโนเมตร) และ k คือค่าคงที่ (=0.94) ดังนั้นขนาดของเกรนคำนวณได้จากจุดตัดแกน y ของความสัมพันธ์ดังกล่าว จากรูปที่ 4.4 จะได้ว่าจุดตัดแกน y ของกราฟ ของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) เมื่อ $x = 0.00$ ถึง 0.05 มีค่า 6.190×10^{-4} , 1.797×10^{-4} , 5.934×10^{-4} , 7.793×10^{-4} , 8.269×10^{-4} และ 4.575×10^{-4} ตามลำดับ จากนั้นจะได้ว่าขนาดของเกรน = $1/(\text{จุดตัดแกน } y)$ และมีค่าดังปรากฏในตารางที่ 4.2 ซึ่งขนาดของเกรนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของไอออนของธาตุ Tb^{3+} ที่เพิ่มขึ้น

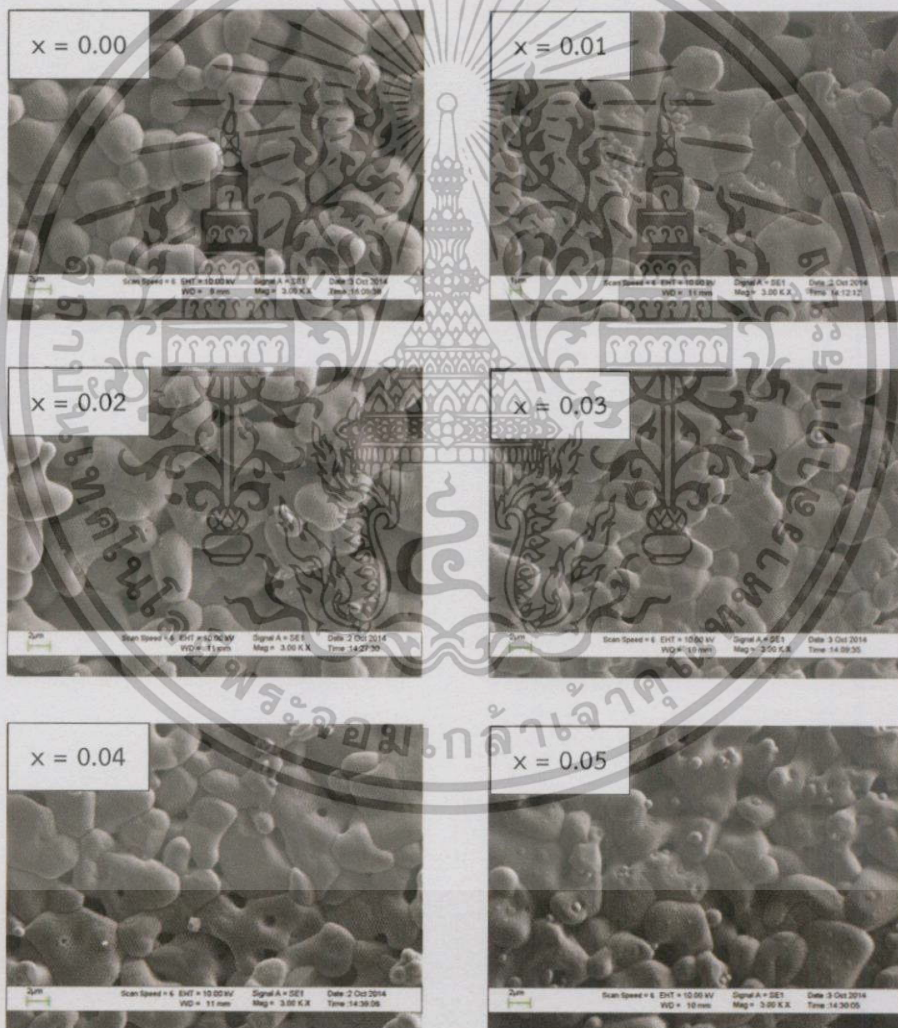
ตารางที่ 4.2 แสดงขนาดของเกรนของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

Composition (x)	Grain Size (nm)
0.00	1209.24
0.01	1283.13
0.02	1615.45
0.03	1685.10
0.04	2185.44
0.05	5564.61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ซึ่งเตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่ผ่านการอัดเม็ดและเผาที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากภาพถ่ายผิวหน้าพบว่าเกรนของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) มีแนวโน้มใหญ่ขึ้นตามปริมาณการเจือสังเกต์ได้จากผนังของเกรนมีการรวมตัวจนเป็นเนื้อเดียวกันทำให้เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้น

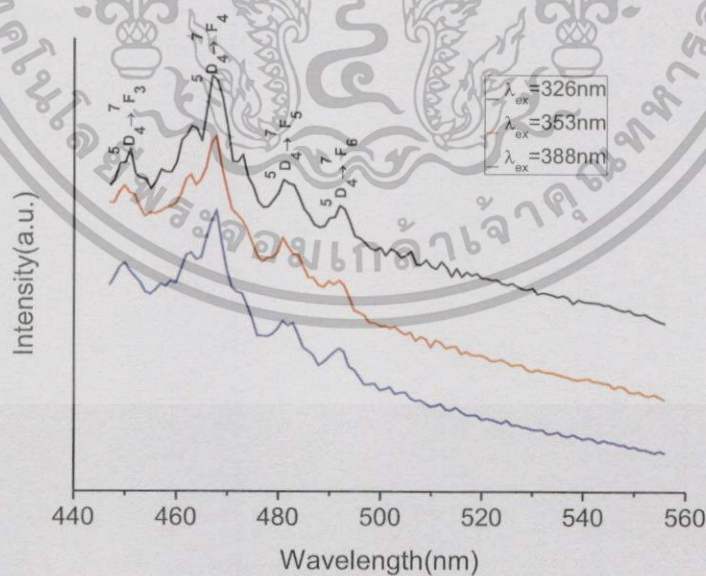


รูปที่ 4.5 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบริเวณผิวหน้าของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

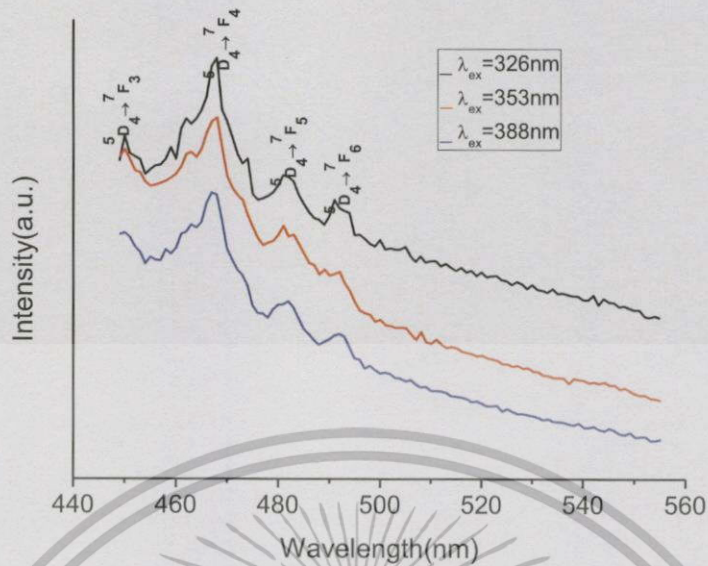
4.4 ผลการศึกษาการเรืองแสงของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

ได้ทำการศึกษาสมบัติการเรืองแสงของผงผลึกของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่อุณหภูมิห้องโดยใช้ความกว้างของช่องเปิดแสงกระตุ้น (excitation slit) เท่ากับ 3 มิลลิเมตร และ ช่องเปิดการเรืองแสง (emission slit) กว้างเท่ากับ 3 มิลลิเมตร ทำการบันทึกแถบเรืองแสงของผงผลึกของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($x = 0.01$) โดยการกระตุ้นด้วยแสงความยาวคลื่น 326 นาโนเมตร ปรากฏว่าได้พีคการเรืองแสง 4 พีค ที่ความยาวคลื่น 450, 467, 481 และ 491 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งระบุได้ว่าเป็นการทรานซิชันของอิเล็กตรอนภายในไอออนของธาตุ Tb^{3+} จากระดับพลังงานสูงลงสู่ระดับพลังงานต่ำ โดยปล่อยโฟตอนออกมาเป็นแสงสีเขียว ซึ่งการทรานซิชันดังกล่าวคือ $^5D_4 \rightarrow ^7D_{3,4,5,6}$

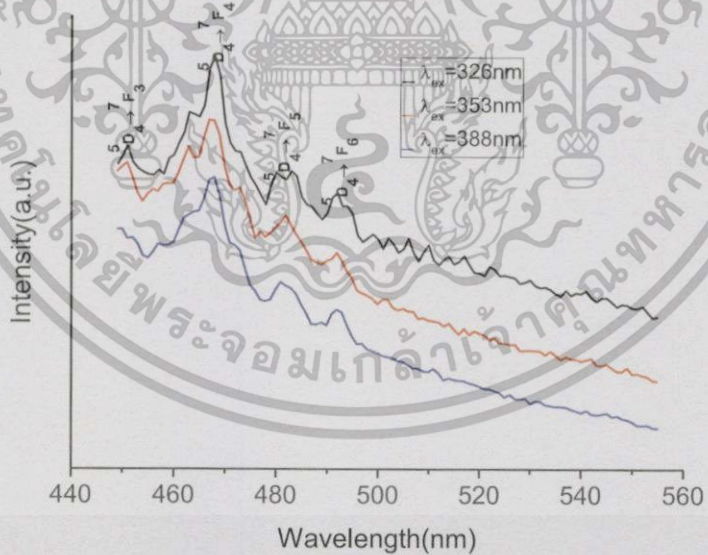
ในทำนองเดียวกันเมื่อกระตุ้นด้วยแสงความยาวคลื่น 353 หรือ 388 นาโนเมตร จะได้แถบการเรืองแสงมี 4 พีค เช่นเดียวกัน (ดังแสดงในรูปที่ 4.7 - 4.10) โดยความเข้มแต่ละพีคจะไม่เปลี่ยนแปลงตามความยาวคลื่นของแสงกระตุ้น แต่เมื่อศึกษาการเรืองแสงของผงผลึกของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ค่าต่างๆ พบว่าตำแหน่งพีคของการเรืองแสงไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของไอออนของธาตุ Tb^{3+} แต่พบว่าความเข้มของพีคการเรืองแสงจะมีค่าสูงสุดที่ $x = 0.03$ และ เมื่อ x มีค่ามากกว่า 0.03 ขึ้นไปความเข้มของพีคการเรืองแสงจะลดลงดังแสดงในรูปที่ 4.11



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.6 แสดงพีคความเข้มของแถบเรืองแสงเมื่อกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 326, 353 และ 388
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้
นาโนเมตร ตามลำดับของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($x = 0.01$) ที่เตรียมได้
จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

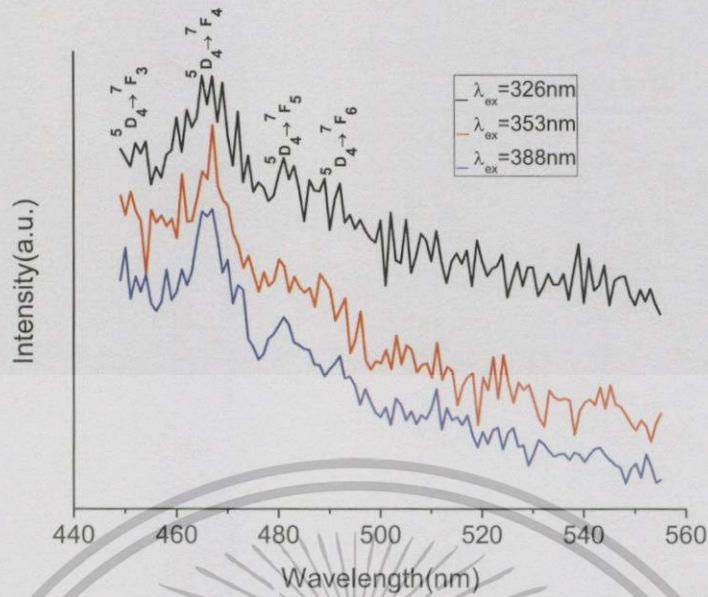


รูปที่ 4.7 แสดงพีคความเข้มของแถบเรืองแสงเมื่อกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 326, 353 และ 388 นาโนเมตร ตามลำดับของผลึกของเมมิตเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($x = 0.02$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

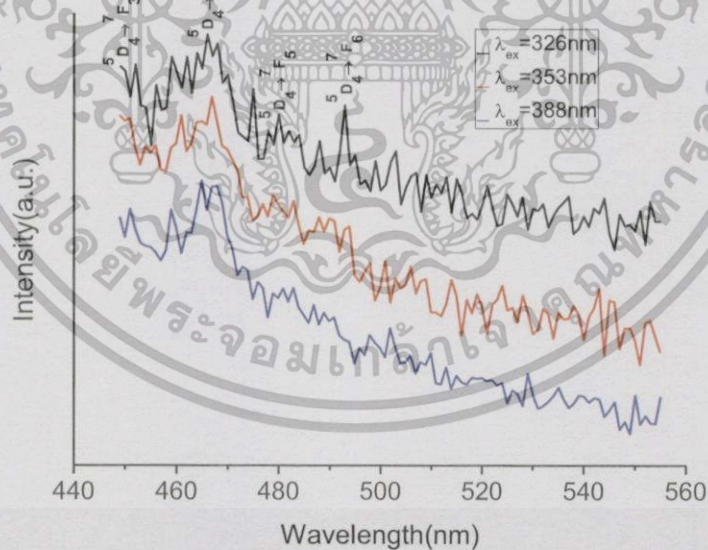


รูปที่ 4.8 แสดงพีคความเข้มของแถบเรืองแสงเมื่อกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 326, 353 และ 388 นาโนเมตร ตามลำดับของผลึกของเมมิตเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($x = 0.03$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

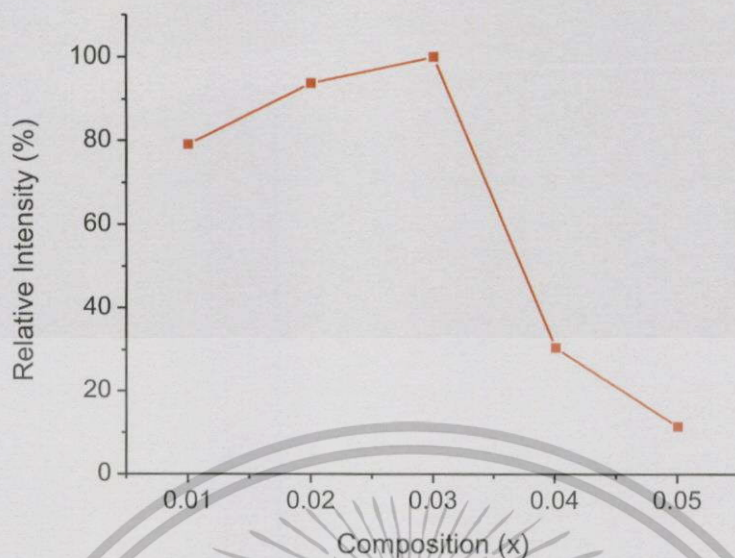


รูปที่ 4.9 แสดงพีคความเข้มของแถบเรืองแสงเมื่อกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 326, 353 และ 388 นาโนเมตร ตามลำดับของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_x\text{WO}_{12}$ ($x = 0.04$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



รูปที่ 4.10 แสดงพีคความเข้มของแถบเรืองแสงเมื่อกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 326, 353 และ 388 นาโนเมตร ตามลำดับของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_x\text{WO}_{12}$ ($x = 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



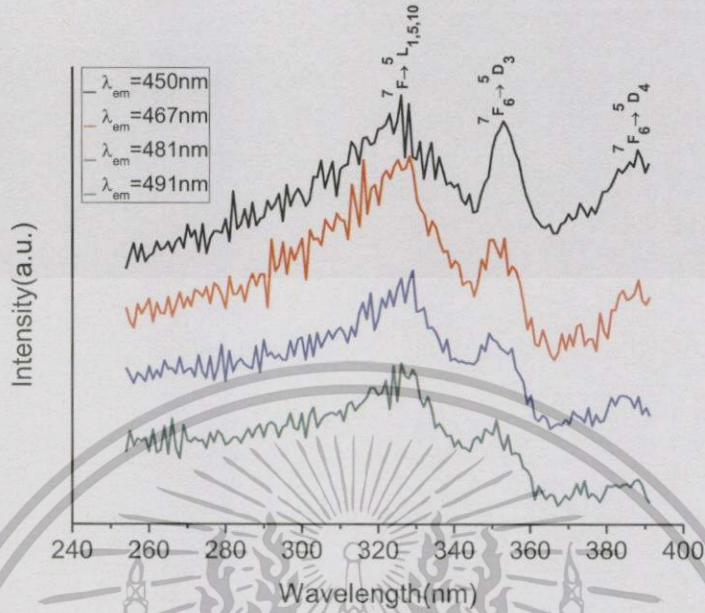
รูปที่ 4.11 แสดงความเข้มสัมพัทธ์ของแถบเรืองแสงที่ความยาวคลื่น 467 นาโนเมตร ที่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณความเข้มข้นของไอออนของธาตุ Tb^{3+} ของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $Ln_{6(1-x)}Tb_{6x}WO_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

ทำการบันทึกแถบพลังงานกระตุ้นของผงผลึกของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $Ln_{6(1-x)}Tb_{6x}WO_{12}$ ($x = 0.01$) โดยพิจารณาการเรืองแสงที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร พบว่าเกิดพีคของพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นจำนวน 3 พีค ที่ความยาวคลื่น 326, 353 และ 381 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ซึ่งระบุได้ว่าเป็นการทรานซิชันของอิเล็กตรอนภายในไอออนของธาตุ Tb^{3+} จากระดับพลังงานต่ำไประดับพลังงานสูงโดยการดูดกลืนโฟตอนที่สุดอดคล้องกับพีคของแถบพลังงานกระตุ้นที่ความยาวคลื่น 326, 353 และ 381 นาโนเมตร ซึ่งการทรานซิชันดังกล่าวคือ ${}^7F_6 \rightarrow {}^5L_{1,5,10}$, ${}^7F_6 \rightarrow {}^5D_4$ และ ${}^7F_6 \rightarrow {}^5D_4$ ตามลำดับ

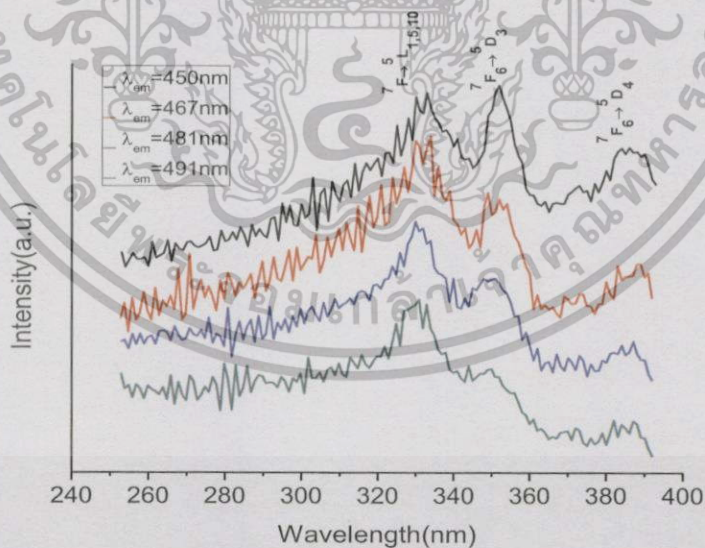
ในทำนองเดียวกันเมื่อบันทึกแถบพลังงานกระตุ้นของผงผลึกของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $Ln_{6(1-x)}Tb_{6x}WO_{12}$ ($x = 0.01$) โดยพิจารณาการเรืองแสงที่ความยาวคลื่น 467 หรือ 481 หรือ 491 นาโนเมตร จะได้แถบพลังงานกระตุ้นมี 3 พีคเช่นเดียวกัน (ดังแสดงในรูปที่ 4.13 - 4.16) แต่มีข้อสังเกตคือแถบพลังงานกระตุ้นจะมีความเข้มสูงสุดเมื่อพิจารณาการเรืองแสงที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร แต่เมื่อพิจารณาการเรืองแสงที่ความยาวคลื่นอื่นๆ เช่น 467, 481 หรือ 491 นาโนเมตร ความเข้มของแถบพลังงานกระตุ้นมีค่าลดลงตามลำดับ ส่วนตำแหน่งพีคของแถบพลังงานกระตุ้นจะอยู่ที่ความยาวคลื่นแสงค่าเดิม แสดงว่าพลังงานของแถบพลังงานกระตุ้นควรมีค่ามากกว่าพลังงานของแถบเรืองแสงแล้วจะได้ความเข้มของการเรืองแสงมาก

แต่เมื่อพิจารณาแถบพลังงานกระตุ้นของผงผลึกของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $Ln_{6(1-x)}Tb_{6x}WO_{12}$ ที่เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของไอออนของธาตุ Tb^{3+} ค่าต่างๆพบว่าความเข้มของ

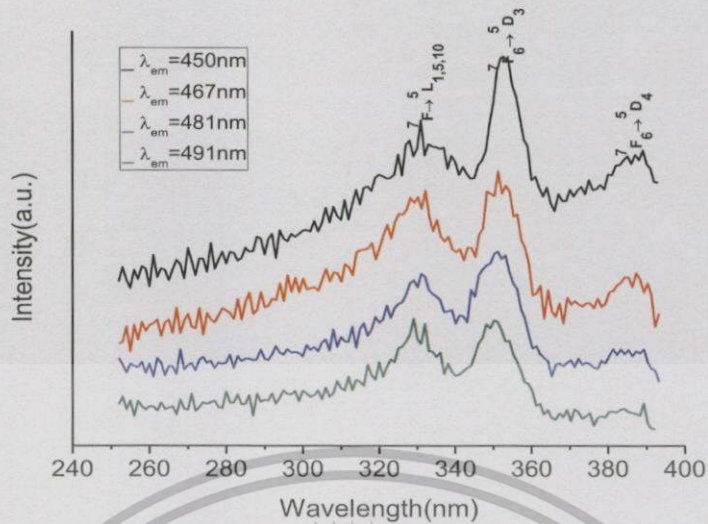
แถบพลังงานกระตุ้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก $x = 0.01$ จนมีค่าสูงสุดที่ $x = 0.03$ จากนั้นจะมีค่าลดลง ซึ่งที่ $x = 0.03$ นี้ แถบเรืองแสงจะมีค่าสูงสุดเช่นเดียวกัน



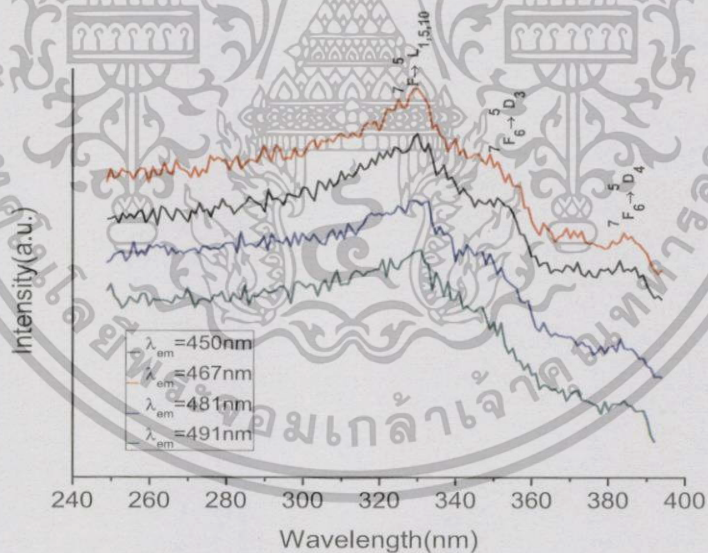
รูปที่ 4.12 แสดงพีคความเข้มของแถบพลังงานกระตุ้นเมื่อพิจารณาการเรืองแสงที่ความยาวคลื่น 450, 467, 481 และ 491 นาโนเมตร ตามลำดับของผงผลึกของเมตเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_x\text{WO}_{12}$ ($x = 0.01$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



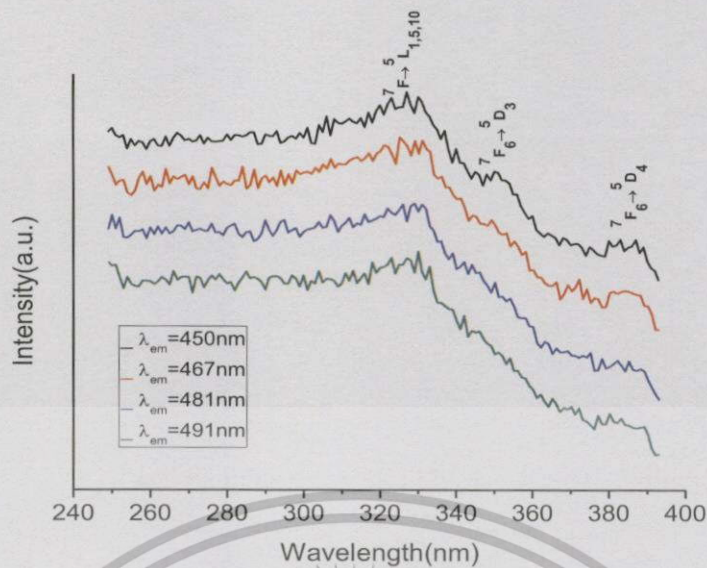
รูปที่ 4.13 แสดงพีคความเข้มของแถบพลังงานกระตุ้นเมื่อพิจารณาการเรืองแสงที่ความยาวคลื่น 450, 467, 481 และ 491 นาโนเมตร ตามลำดับของผงผลึกของเมตเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_x\text{WO}_{12}$ ($x = 0.02$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



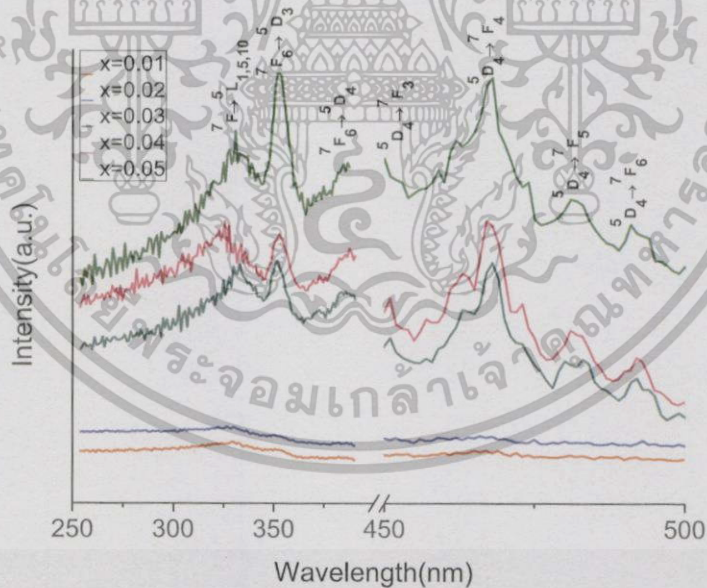
รูปที่ 4.14 แสดงพิศความเข้มของแถบพลังงานกระตุ้นเมื่อพิจารณาการเรืองแสงที่มีความยาวคลื่น 450, 467, 481 และ 491 นาโนเมตร ตามลำดับของผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($x = 0.03$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



รูปที่ 4.15 แสดงพิศความเข้มของแถบพลังงานกระตุ้นเมื่อพิจารณาการเรืองแสงที่มีความยาวคลื่น 450, 467, 481 และ 491 นาโนเมตร ตามลำดับของผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($x = 0.04$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเอกสารนี้เป็นเอกสารเป็นสารละลายของแข็ง ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 แสดงฟลักซ์ความเข้มของแถบพลังงานกระตุ้นเมื่อพิจารณาการเรืองแสงที่มีความยาวคลื่น 450, 467, 481 และ 491 นาโนเมตร ตามลำดับของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($x = 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

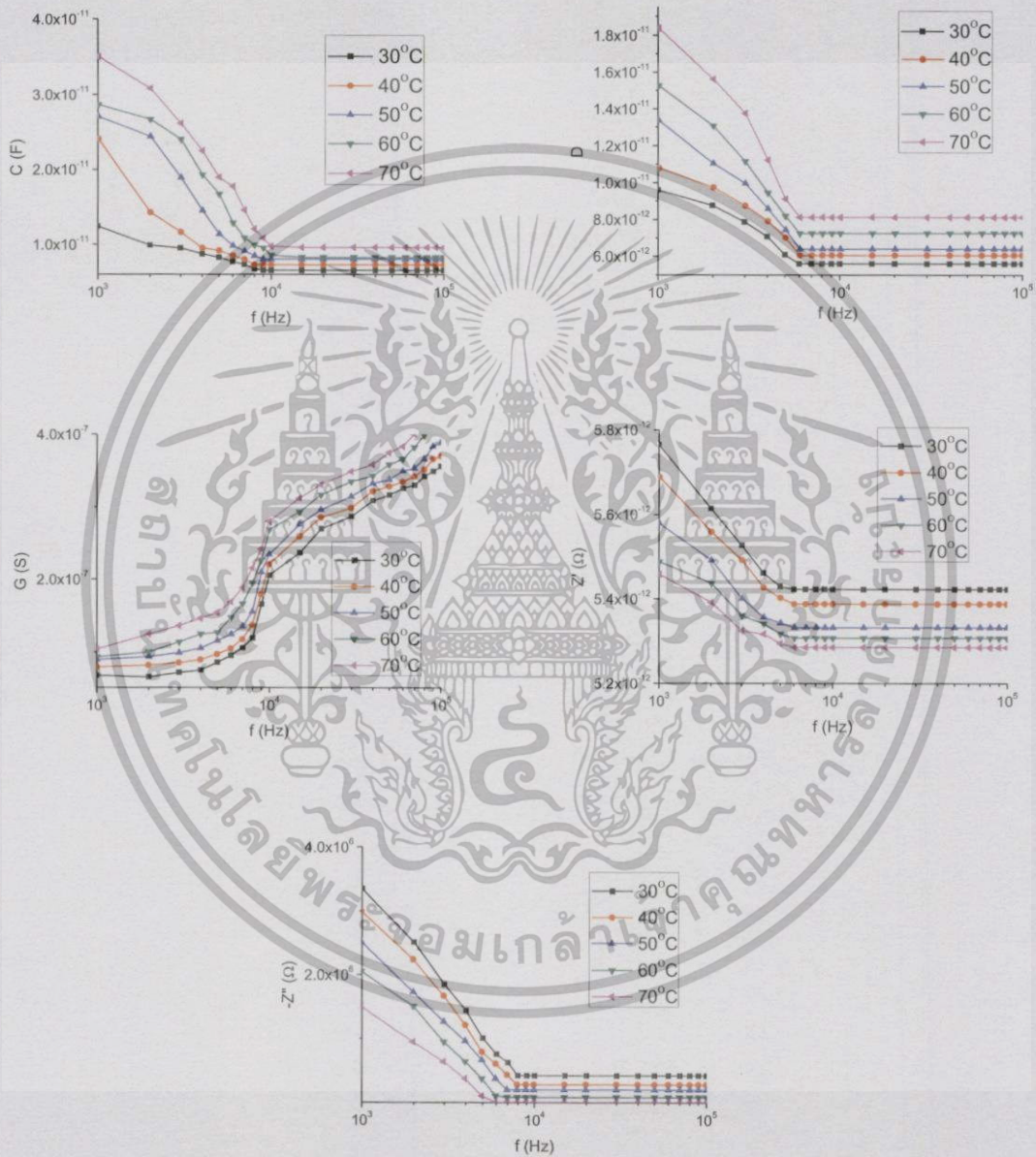


รูปที่ 4.17 แสดงฟลักซ์ความเข้มของแถบพลังงานกระตุ้นและแถบเรืองแสงของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยา

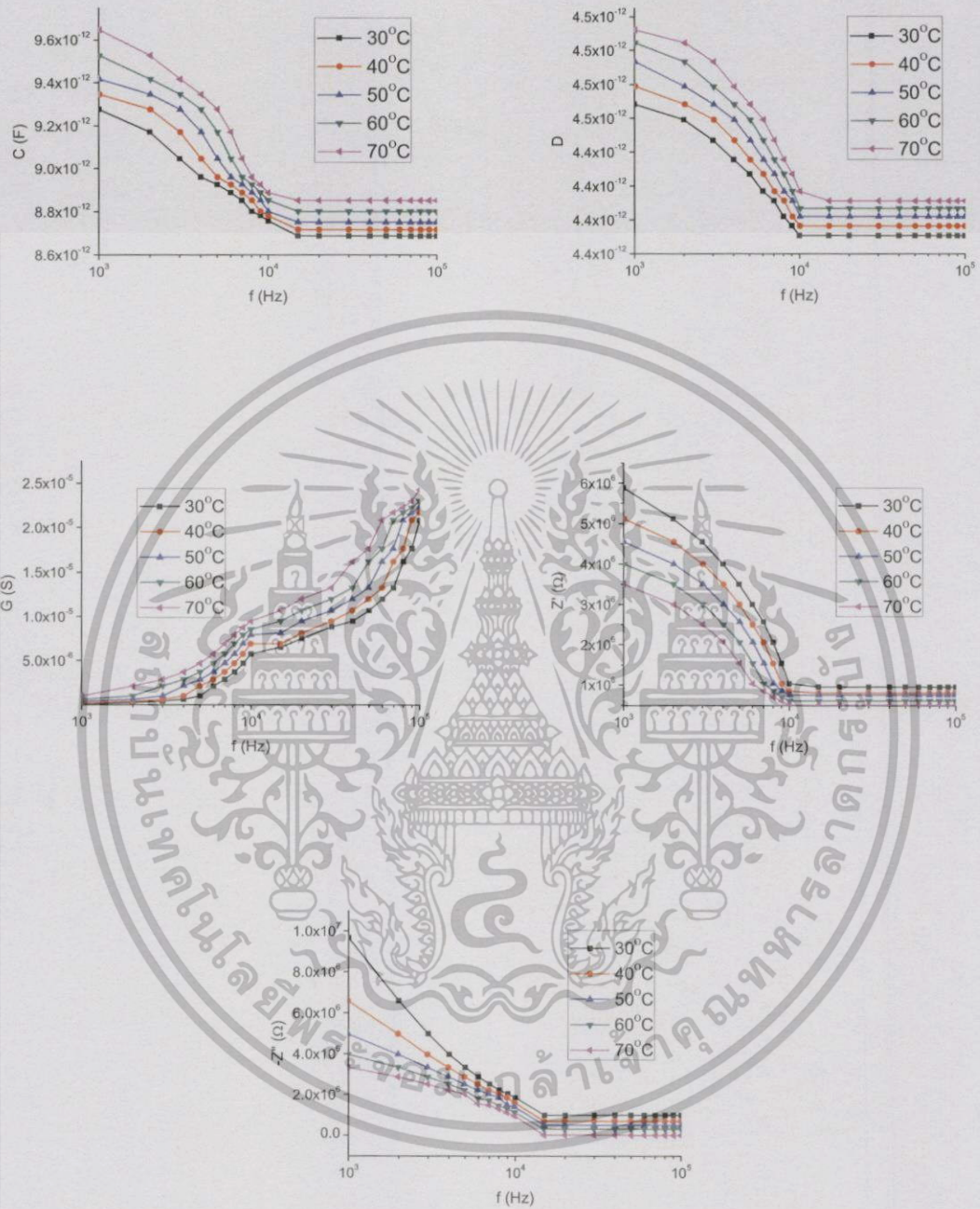
การเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คำปรึกษาแนะนำ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ และ ในช่วงอุณหภูมิ 30 - 70 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



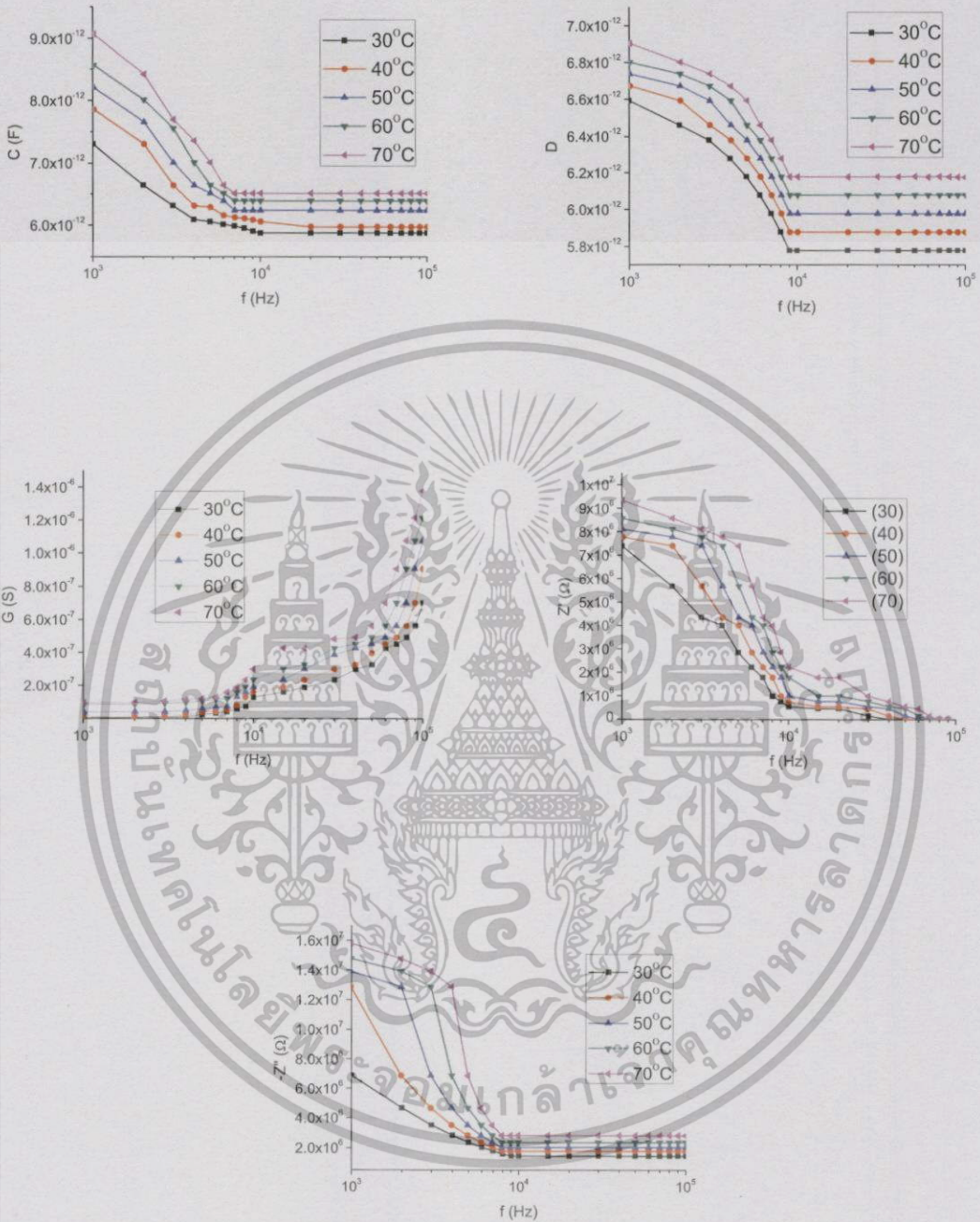
รูปที่ 4.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C-f, D-f, G-f, Z'-f และ Z''-f ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($x =$ การค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น 0.00) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



รูปที่ 4.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C-f, D-f, G-f, Z'-f และ Z''-f ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ทเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($x = 0.01$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลาย

ของแข็ง

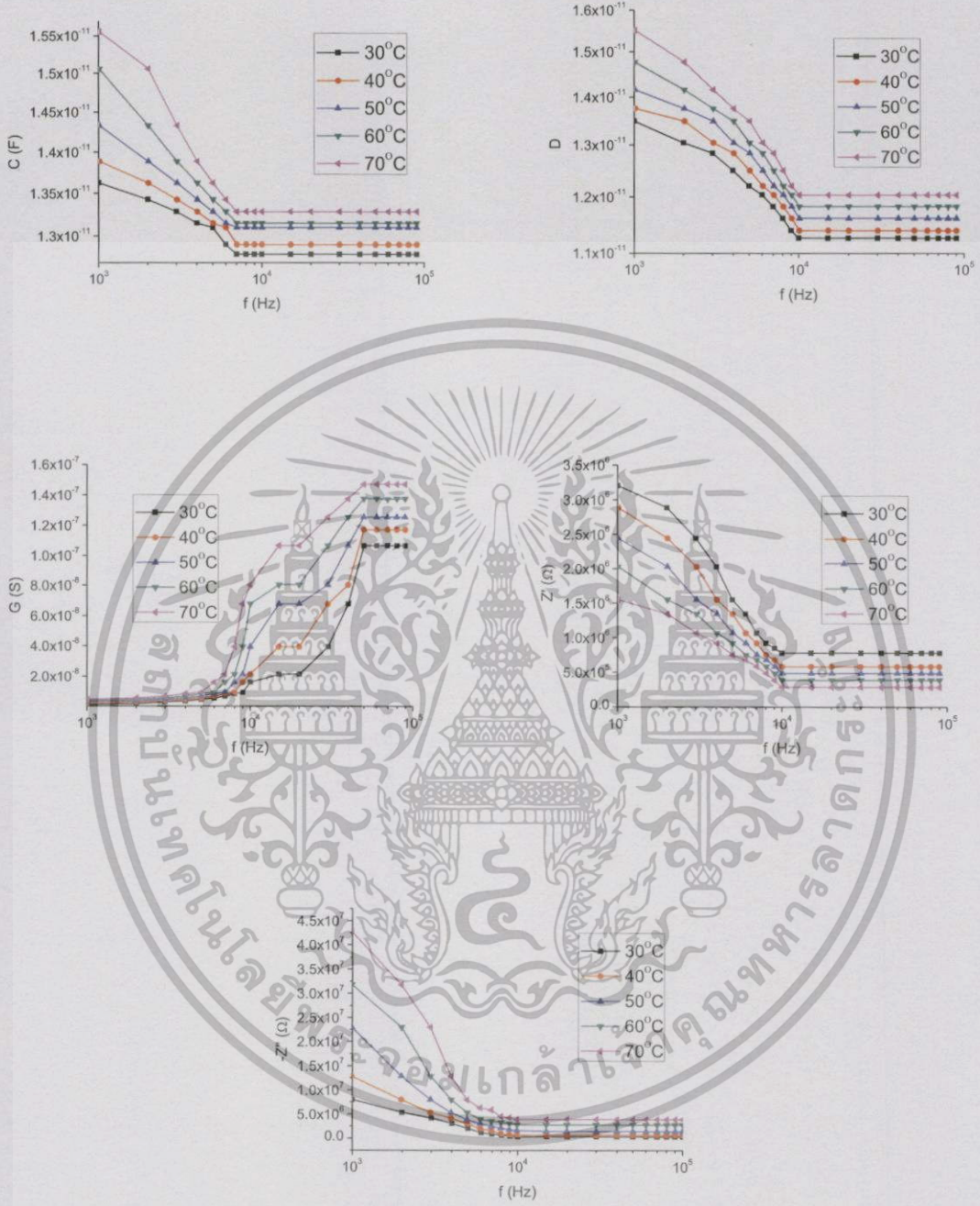
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C-f, D-f, G-f, Z'-f และ Z''-f ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($x = 0.02$)

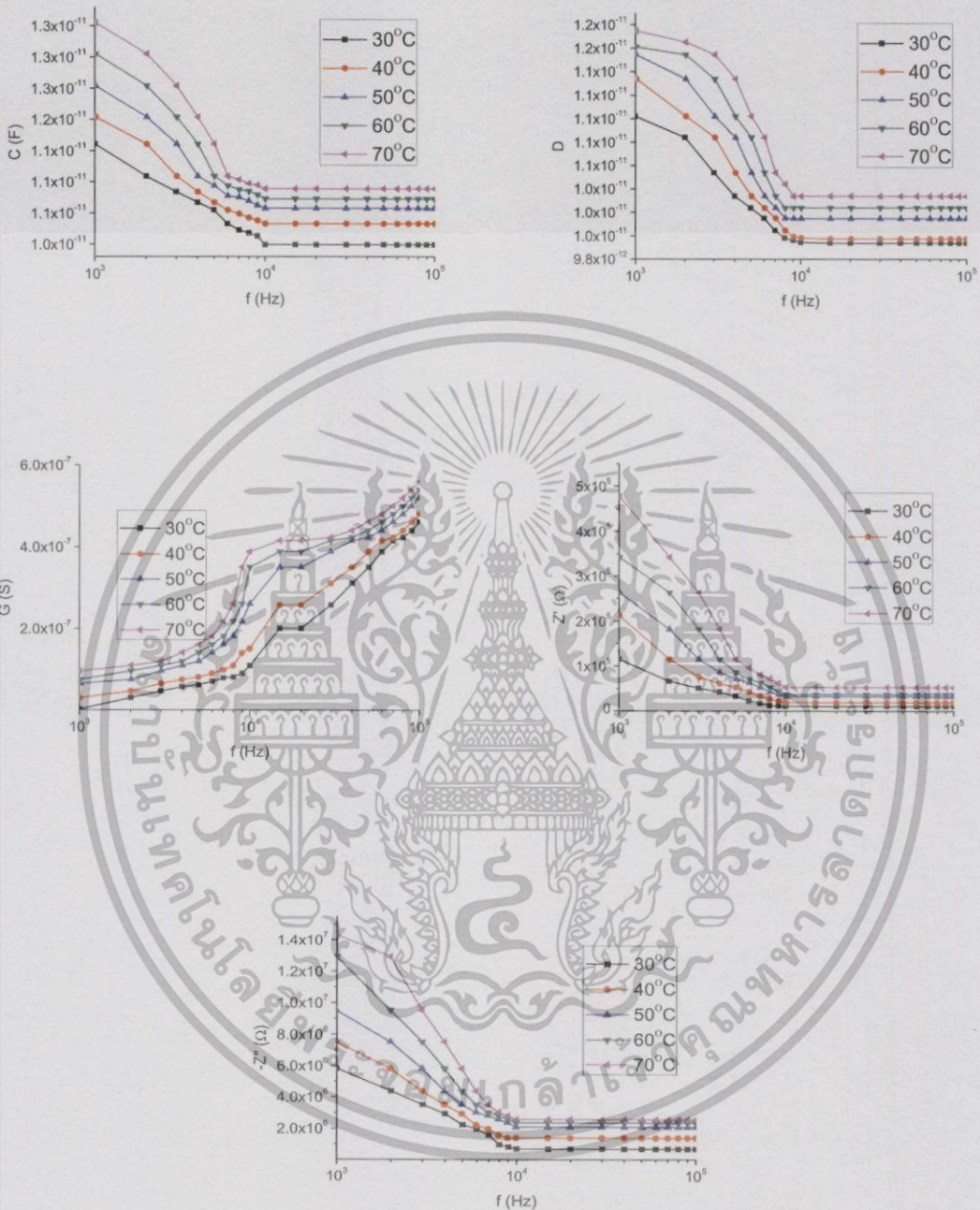
ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลาย เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับกร ใช้งานเพื่อการศึกษาด้าน น โมนูชาติไหนา ไปใช้ประ โยชนด้านกรค้า ของแข็ง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C-f, D-f, G-f, Z'-f และ Z''-f ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิก In_{6(1-x)}Tb_{6x}WO₁₂ (x = 0.03) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

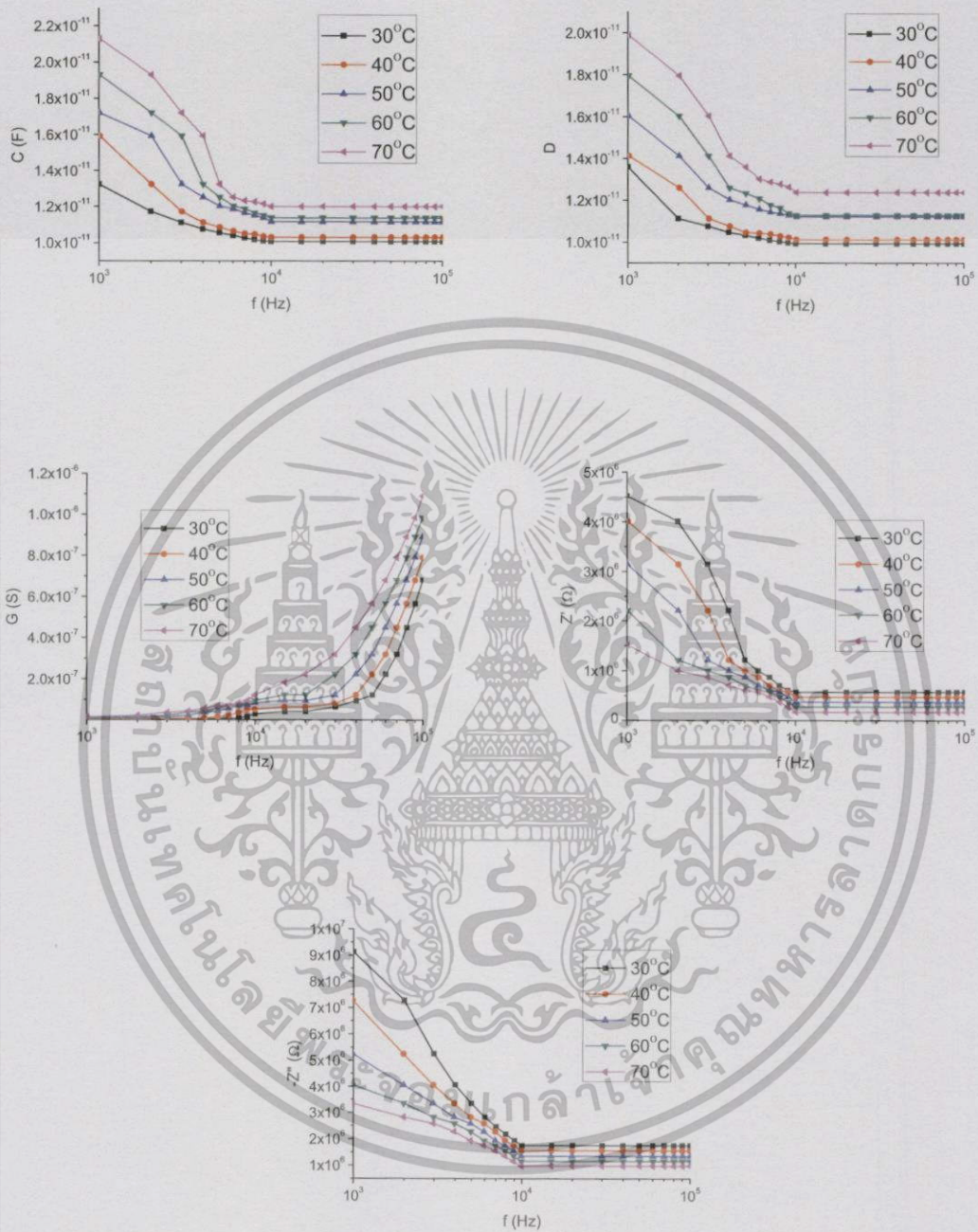


รูปที่ 4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C-f, D-f, G-f, Z'-f และ Z''-f ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($x =$

0.04) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าของแข็ง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

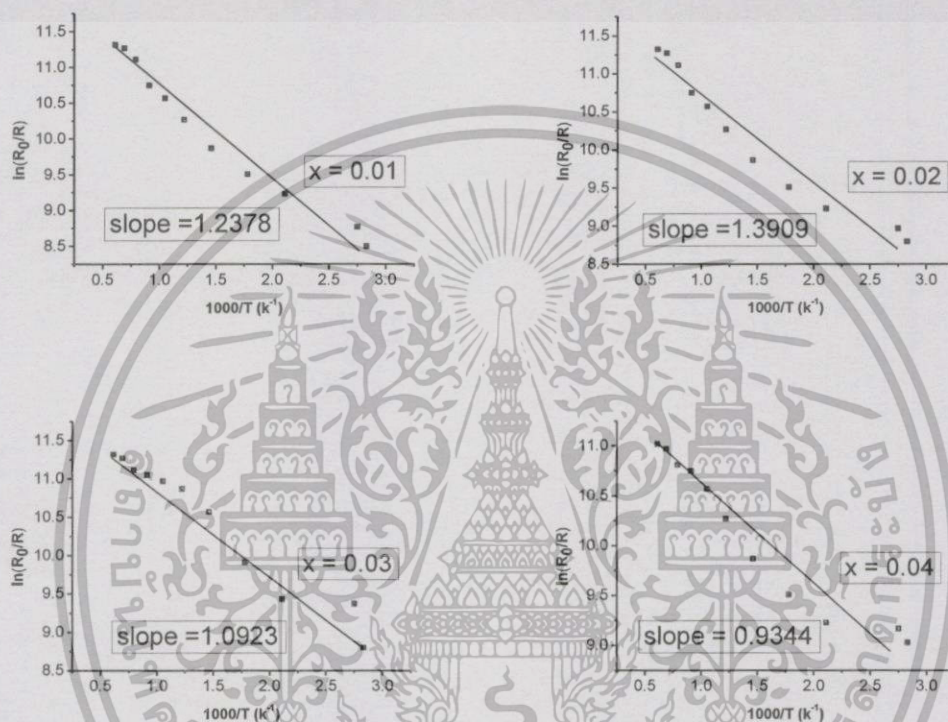


รูปที่ 4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C-f, D-f, G-f, Z'-f และ Z''-f ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($x = 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลาย

ของแข็ง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(R_0/R)$ กับ $(1000/T)$ ที่ได้จากค่าความนำไฟฟ้าของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนในช่วงอุณหภูมิ 80 ถึง 180 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



รูปที่ 4.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(R_0/R)$ กับ $(1000/T)$ ที่ได้จากค่าความนำไฟฟ้าของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนในช่วงอุณหภูมิ 80 ถึง 180 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.01 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

ค่าความต้านทานไฟฟ้า (R) ของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) สามารถหาได้จาก ค่าความนำไฟฟ้า (G) โดยพิจารณาที่ความถี่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งค่าความต้านทานไฟฟ้าจะเป็นส่วนกลับของค่าความนำไฟฟ้านี้คือ

$$R = \frac{1}{G}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ความต้านทานไฟฟ้าของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) จะ
ไม่ว่ากรณีใดๆทางอื่นอีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังความสัมพันธ์

$$R = R_0 \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right)$$

เมื่อ R_0 และ R คือ ค่าความต้านทานที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิใดๆแล้วจะได้ว่า

$$\frac{R}{R_0} = \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right)$$

$$\ln\left(\frac{R_0}{R}\right) = -\left(\frac{E_a}{kT}\right)$$

$$\ln\left(\frac{R_0}{R}\right) = \frac{-E_a}{1,000k} \left(\frac{1,000}{T}\right)$$

$$\text{ความชัน} = \frac{-E_a}{1,000k}$$

แล้วพลังงานกระตุ้น (E_a) จะมีค่าดังนี้ คือ

$$E_a = 1,000(\text{ความชัน}) \text{ หน่วยเป็นจูล}$$

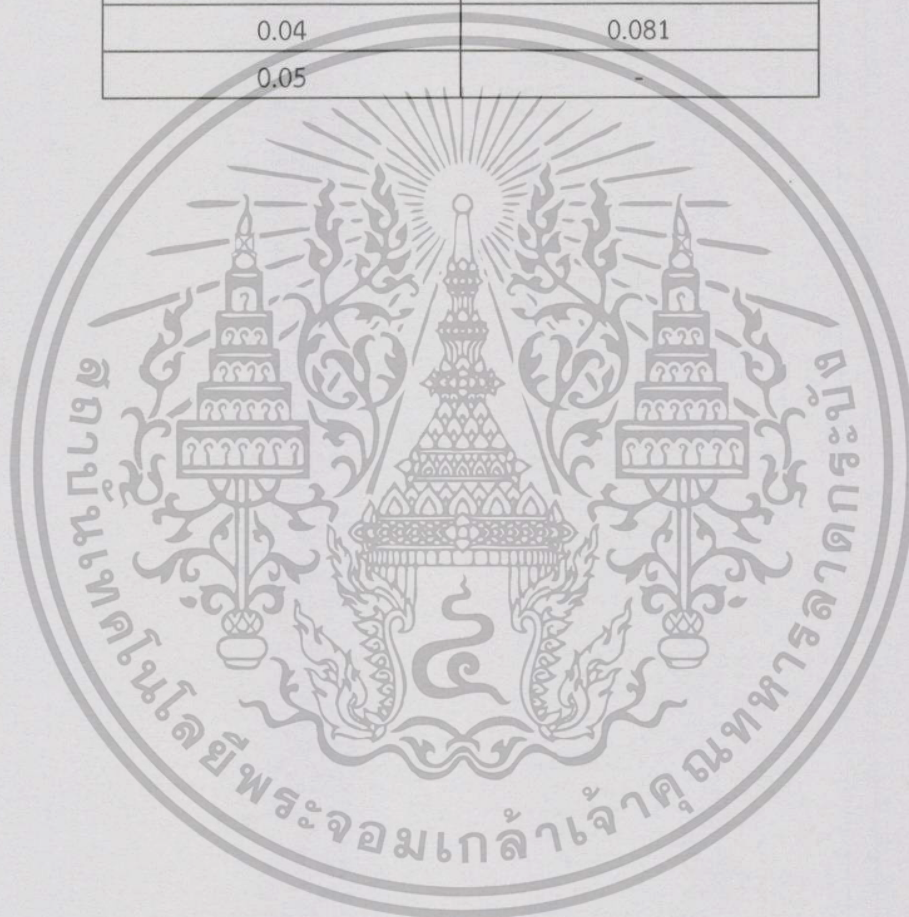
$$= \frac{1,000(1.38 \times 10^{-23})}{(1.6 \times 10^{-19})} (\text{ความชัน}) \text{ หน่วยเป็นอิเล็กตรอนโวลต์}$$

ค่าพลังงานกระตุ้นของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{(1-x)}\text{Tb}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) มีแนวโน้มลดลง เมื่อเศษส่วนโดยโมลของ (x) มีค่าเพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าพลังงานกระตุ้นของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.01 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

Composition (x)	Activation Energy (eV)
	Tb^{3+} -doped
0.00	-
0.01	0.107
0.02	0.098
0.03	0.094
0.04	0.081
0.05	-

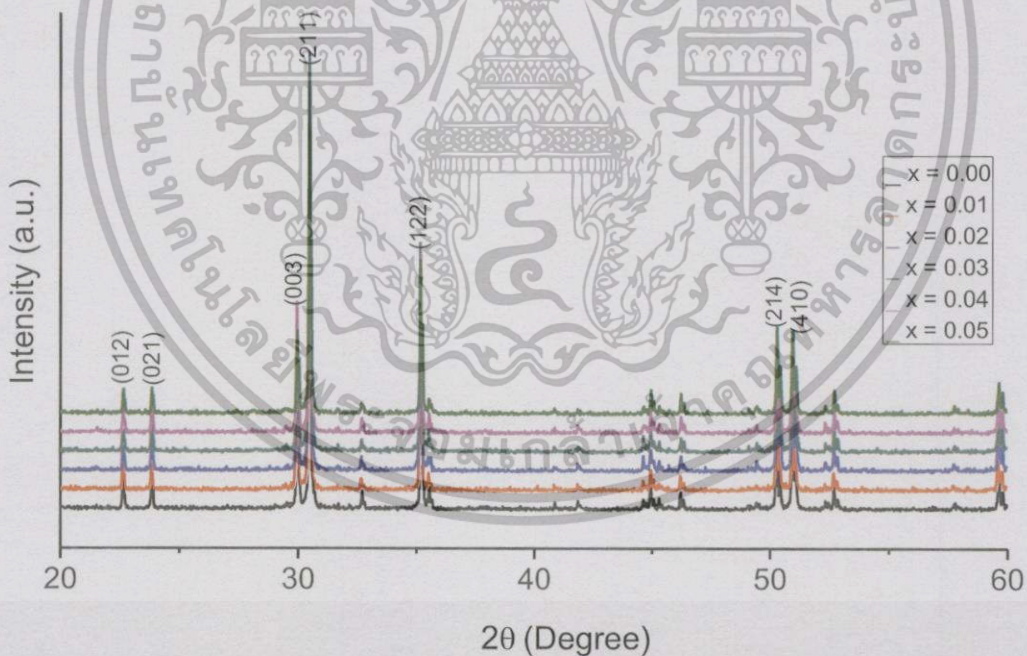


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 ผลการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของเม็ดเซรามิกของ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

4.7.1 ผลการศึกษาสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมโดยนำเอาสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกมาอัดเม็ดและเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากนั้นได้นำสารที่ได้มาทำการบดละเอียดจากการศึกษาสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ดังรูปที่ 4.25 พบว่าพีกที่มีความเข้มสูงสุดเกิดจากการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์โดยระนาบ (211) ของโครงผลึกแบบเฮกซะโกนัลที่มุม 2θ เท่ากับ 30.47 องศา นอกจากนี้ยังพบพีกของระนาบโครงผลึกของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ได้แก่ระนาบ (012), (021), (003), (211), (122), (214), และ (410) ที่มุม 2θ ในกรณี $x = 0.01$ จะมีค่าเท่ากับ 22.63, 23.85, 29.98, 30.48, 35.18, 50.28, 50.93 องศา ตามลำดับ



รูปที่ 4.25 แสดงพีกความเข้มของสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผงผลึกของเม็ดเซรามิก

$\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยา

การเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

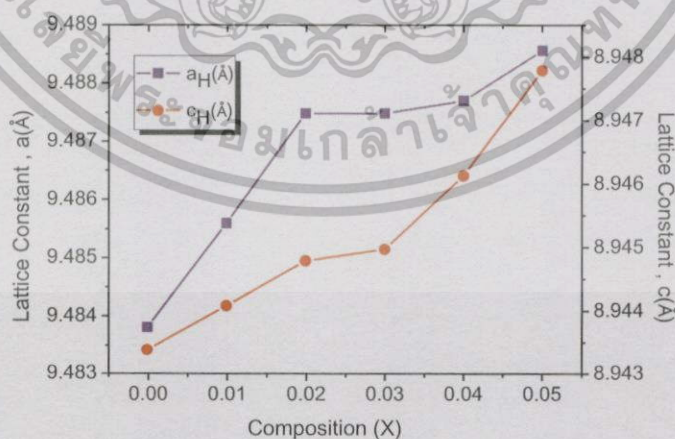
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7.2 ผลการศึกษาค่าคงที่โครงผลึก a และ c ของหนึ่งหน่วยเซลล์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล

ค่าคงที่โครงผลึก a และ c ของหนึ่งหน่วยเซลล์แบบเฮกซะโกนัลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของไอออนของธาตุ Eu^{3+} ที่เพิ่มมากขึ้นดังตารางที่ 4.3 และ รูปที่ 4.26 เนื่องมาจากรัศมีของไอออนของธาตุ Eu^{3+} (0.98 อังสตรอม) ใหญ่กว่ารัศมีของไอออนของธาตุ In^{3+} (0.81 อังสตรอม) การที่ไอออนของธาตุ Eu^{3+} เข้าแทนที่ในตำแหน่งของไอออนของธาตุ In^{3+} ส่งผลให้ค่าคงที่โครงผลึก a และ c ของหนึ่งหน่วยเซลล์มีขนาดเพิ่มขึ้น

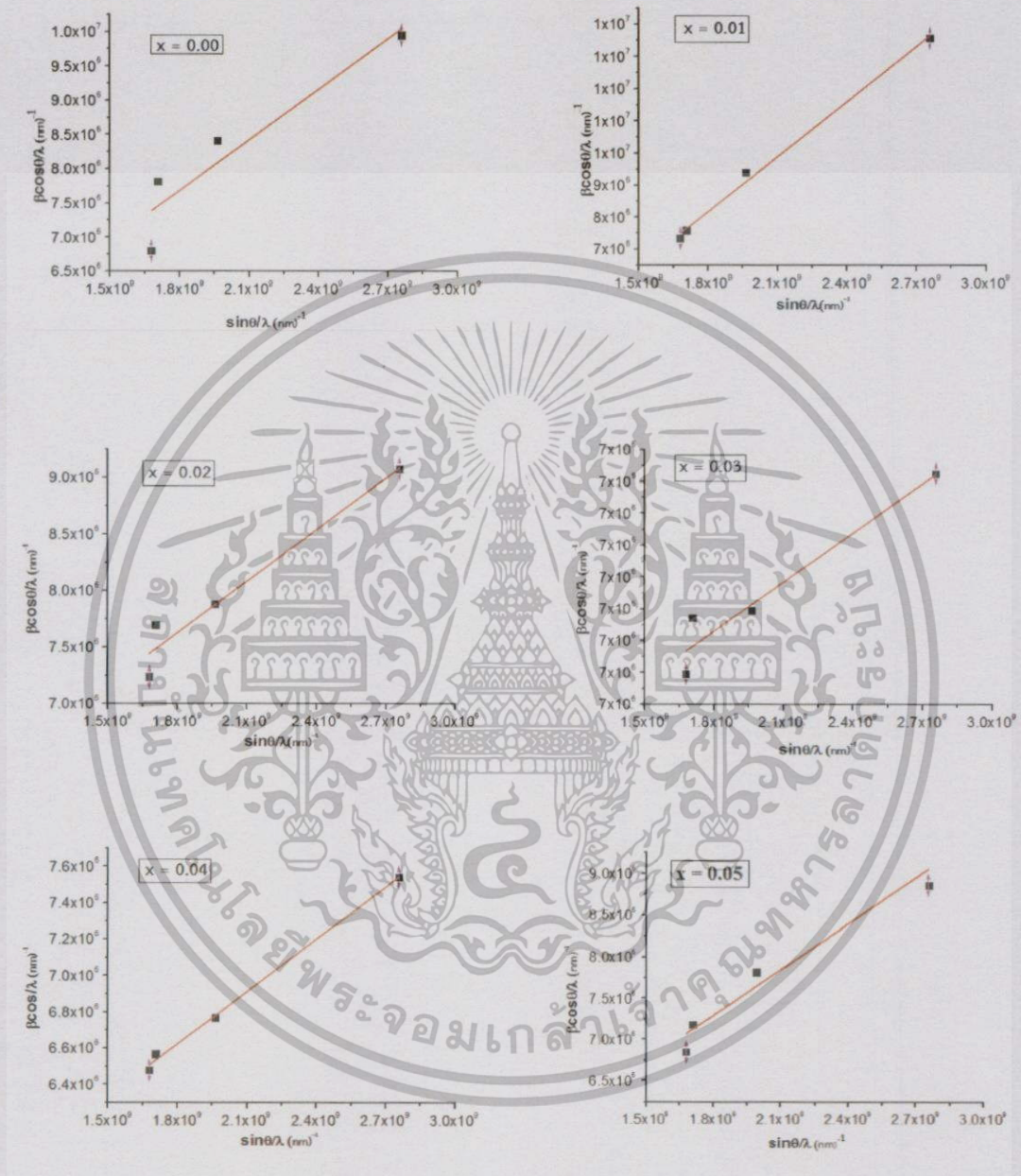
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าคงที่โครงผลึก a และ c ของหนึ่งหน่วยเซลล์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของไอออนของธาตุ Eu^{3+} ของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

Composition (X)	Lattice Parameters		Volume (\AA^3)
	a_H (\AA)	c_H (\AA)	
0.00	9.483	8.943	804.39
0.01	9.485	8.944	804.75
0.02	9.487	8.944	805.14
0.03	9.487	8.944	805.15
0.04	9.487	8.946	805.30
0.05	9.488	8.947	805.59



รูปที่ 4.26 แสดงค่าคงที่โครงผลึก a และ c ของหนึ่งหน่วยเซลล์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของไอออน Eu^{3+} ของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

4.7.3 ผลการหาขนาดของเกรนโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



รูปที่ 4.27 แสดงกราฟที่ใช้คำนวณหาขนาดเกรนของเม็ดเซรามิกของ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารละลายของแข็งการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความสัมพันธ์ของ วิลเลียมสัน-ฮอลล์ (Williamson-Hall) สามารถที่จะหาค่าขนาดของเกรนของผลึกได้จากสูตร

$$\frac{\beta \cos \theta}{\lambda} = \frac{k}{D} + \frac{4 \epsilon \sin \theta}{\lambda}$$

เมื่อ D คือขนาดของเกรน (มีหน่วยเป็นนาโนเมตร), β คือความกว้างของพีคที่ครึ่งหนึ่งของความสูง (มีหน่วยเป็นเรเดียน), ϵ คือความเครียดในเกรน, λ คือความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ที่ใช้ในการทดลอง (ซึ่งในที่นี้คือ 0.15406 นาโนเมตร) และ k คือค่าคงที่ (=0.94) ดังนั้นขนาดของเกรนคำนวณได้จากจุดตัดแกน y ของความสัมพันธ์ดังกล่าว จากรูปที่ 4.27 จะได้ว่าจุดตัดแกน y ของกราฟของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) เมื่อ $x = 0.00$ ถึง 0.05 มีค่า 6.190×10^{-4} , 2.769×10^{-4} , 2.381×10^{-4} , 9.060×10^{-5} , 3.589×10^{-5} และ 7.696×10^{-5} ตามลำดับ จากนั้นจะได้ว่าขนาดของเกรน = $1/(\text{จุดตัดแกน } y)$ และมีค่าดังปรากฏในตารางที่ 4.5 ซึ่งขนาดของเกรนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของไอออน Eu^{3+} ที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.5 แสดงขนาดของเกรนของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

Composition (x)	Grain Size (nm)
0.00	1209.24
0.01	1299.26
0.02	3610.59
0.03	4199.86
0.04	10570.81
0.05	27857.63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8 ผลการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเม็ดเซรามิกของ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ซึ่งเตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่ผ่านการอัดเม็ดและเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากภาพถ่ายผิวหน้าพบว่าเกรนของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) มีแนวโน้มว่าใหญ่ขึ้นตามปริมาณของเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ที่เพิ่มขึ้น

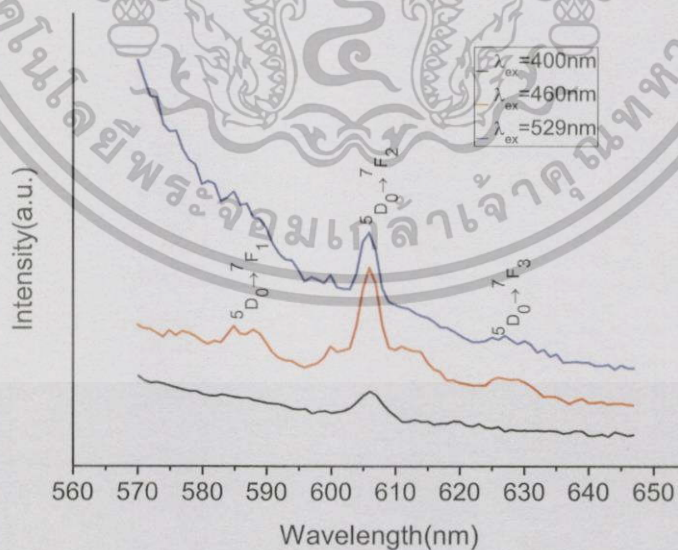


รูปที่ 4.28 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบริเวณผิวหน้าของเม็ดเอกซารันเป็นเอกซารันที่สมบูรณ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำมาใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใดไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น การใช้งานนี้ให้ข้อมูลเบื้องต้นและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

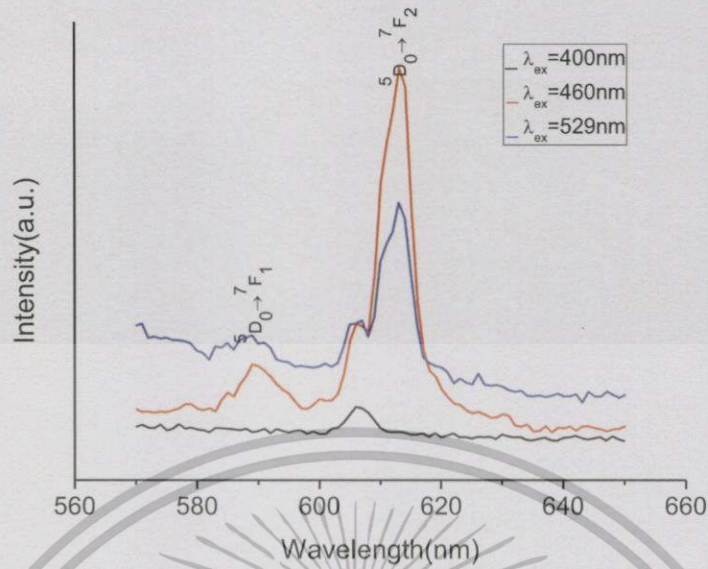
4.9 ผลการศึกษาการเรืองแสงของผงผลึกของเม็ดเซรามิกของ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

ได้ทำการศึกษาสมบัติการเรืองแสงของผงผลึกของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่อุณหภูมิห้องโดยใช้ความกว้างของช่องเปิดแสงกระตุ้น (excitation slit) เท่ากับ 3 มิลลิเมตร และ ช่องเปิดการเรืองแสง (emission slit) กว้างเท่ากับ 3 มิลลิเมตร ทำการบันทึกแถบเรืองแสงของผงผลึกของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($x = 0.01$) โดยการกระตุ้นด้วยแสงความยาวคลื่น 529 นาโนเมตร ปรากฏว่าได้พิกัดการเรืองแสง 3 พิกัด ที่ความยาวคลื่น 587, 606 และ 629 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.29 ซึ่งระบุได้ว่าเป็นการทรานซิชันของอิเล็กตรอนภายในไอออนของธาตุ Eu^{3+} จากระดับพลังงานสูงลงสู่ระดับพลังงานต่ำ โดยปล่อยโฟตอนออกมาเป็นแสงสีแดง ซึ่งการทรานซิชันดังกล่าวคือ ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_{1,2,3}$

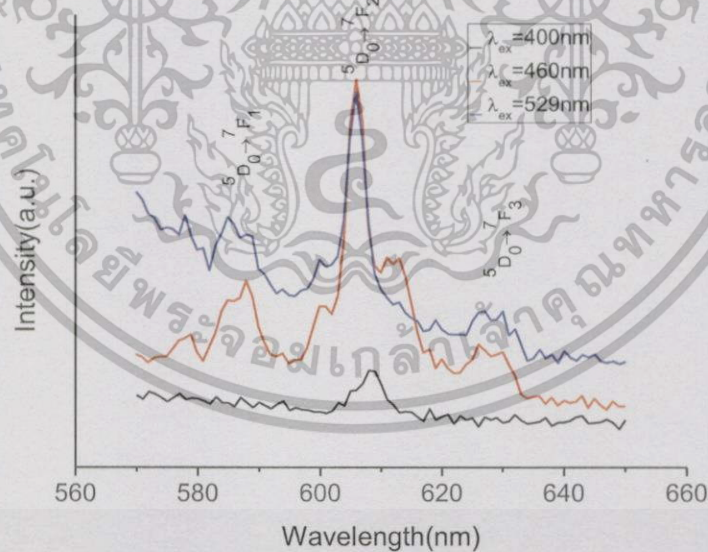
ในทำนองเดียวกันเมื่อกระตุ้นด้วยแสงความยาวคลื่น 400, 460 หรือ 529 นาโนเมตร จะได้แถบการเรืองแสงมี 3 พิกัด เช่นเดียวกัน (ดังแสดงในรูปที่ 4.30 - 4.33) โดยความเข้มแต่ละพิกัดจะไม่เปลี่ยนแปลงตามความยาวคลื่นของแสงกระตุ้น แต่เมื่อศึกษาการเรืองแสงของผงผลึกของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ที่เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ค่าต่างๆพบว่า ตำแหน่งพิกัดของการเรืองแสงไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของไอออนของธาตุ Eu^{3+} แต่พบว่าการเพิ่มความเข้มของพิกัดการเรืองแสงจะเพิ่มขึ้นตามค่า (x) ที่เพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดที่ ($x = 0.05$) ดังแสดงในรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.29 แสดงพิกัดความเข้มของแถบเรืองแสงเมื่อกระตุ้นด้วยแสงความยาวคลื่น 400, 460 และ 529 นาโนเมตร ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามความยาวคลื่นของแสงกระตุ้น แต่เมื่อศึกษาการเรืองแสงของผงผลึกของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($x = 0.01$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

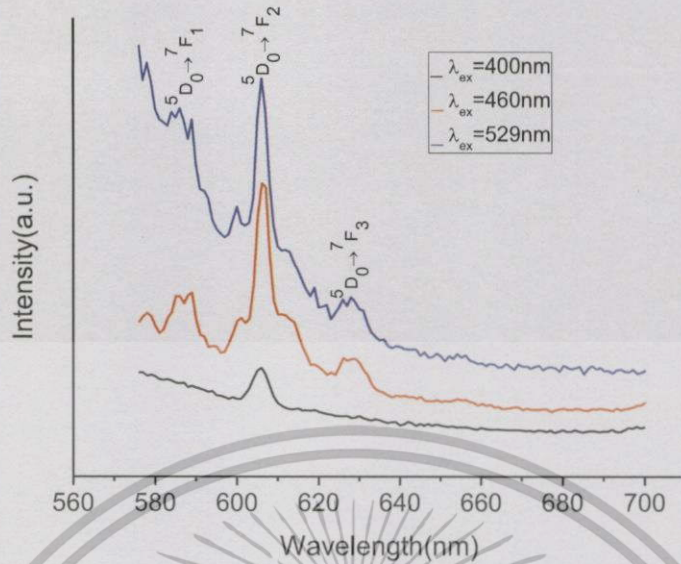


รูปที่ 4.30 แสดงพีคความเข้มของแถบเรืองแสงเมื่อกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 400, 460 และ 529 นาโนเมตร ตามลำดับของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($x = 0.02$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

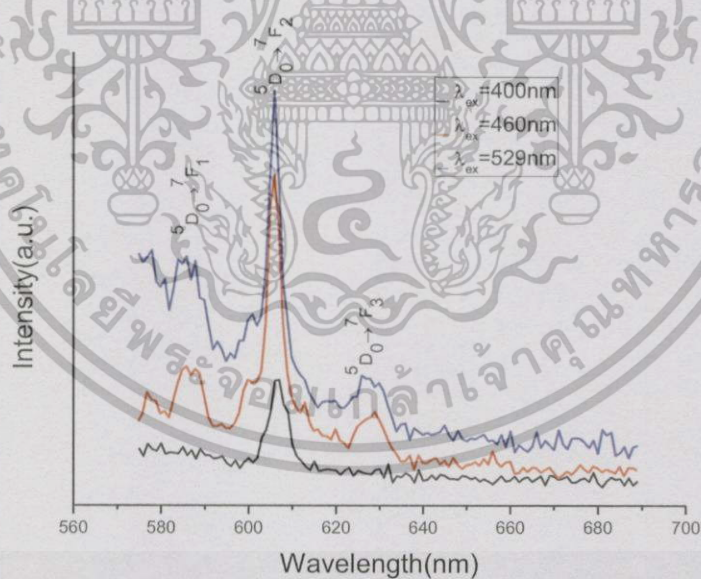


รูปที่ 4.31 แสดงพีคความเข้มของแถบเรืองแสงเมื่อกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 400, 460 และ 529 นาโนเมตร ตามลำดับของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($x = 0.03$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

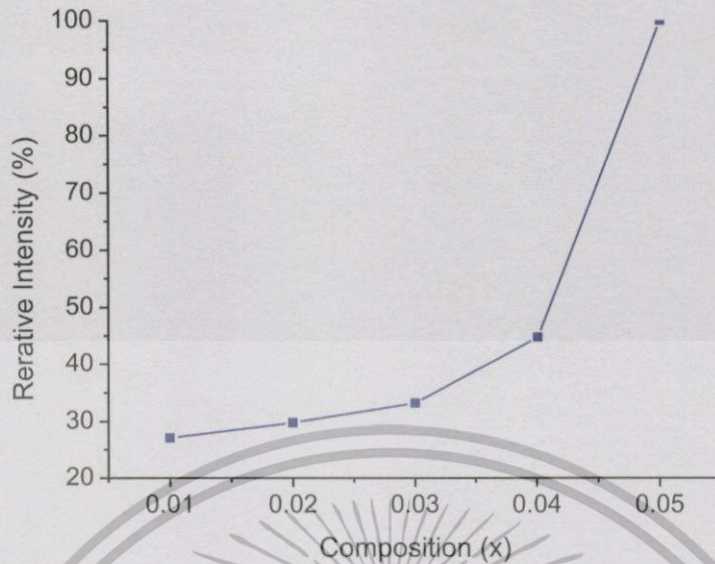


รูปที่ 4.32 แสดงพีคความเข้มของแถบเรืองแสงเมื่อกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 400, 460 และ 529 นาโนเมตร ตามลำดับของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($x = 0.04$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



รูปที่ 4.33 แสดงพีคความเข้มของแถบเรืองแสงเมื่อกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 400, 460 และ 529 นาโนเมตร ตามลำดับของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($x = 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

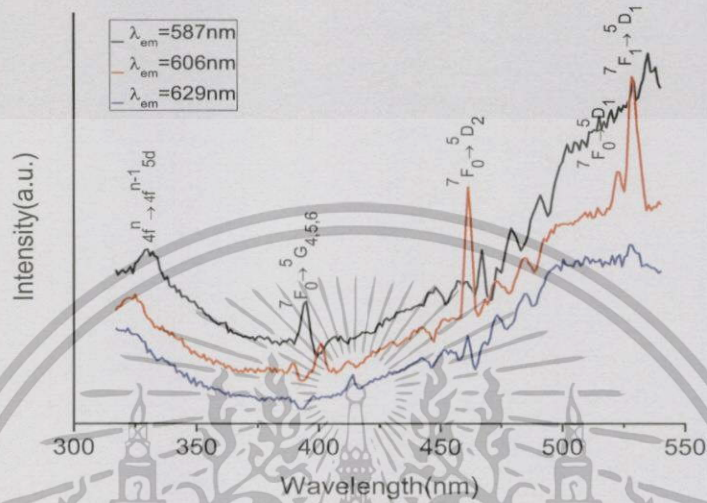


รูปที่ 4.34 แสดงความเข้มสัมพัทธ์ของแถบเรืองแสงที่ความยาวคลื่น 606 นาโนเมตร ที่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณความเข้มข้นของไอออนของธาตุ Eu^{3+} ของผงผลึกเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

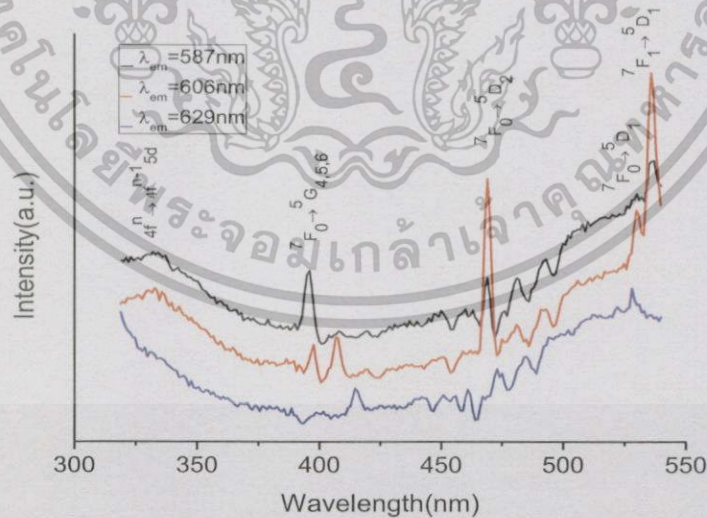
ทำการบันทึกแถบพลังงานกระตุ้นของผลึกของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($x = 0.01$) โดยพิจารณาการเรืองแสงที่ความยาวคลื่น 606 นาโนเมตร พบว่าเกิดพีคของพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นจำนวน 3 พีค ที่ความยาวคลื่น 400, 460 และ 529 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.35 ซึ่งระบุได้ว่าเป็นการทรานซิชันของอิเล็กตรอนภายในไอออนของธาตุ Eu^{3+} จากระดับพลังงานต่ำไประดับพลังงานสูงโดยการดูดกลืนโฟตอนที่สอดคล้องกับพีคของแถบพลังงานกระตุ้นที่ความยาวคลื่น 400, 460 และ 529 นาโนเมตร ซึ่งการทรานซิชันดังกล่าวคือ ${}^7\text{F}_0 \rightarrow {}^5\text{G}_{4,5,6}$, ${}^7\text{F}_0 \rightarrow {}^5\text{D}_2$ และ ${}^7\text{F}_0 \rightarrow {}^5\text{D}_1$ ตามลำดับ

ในทำนองเดียวกันเมื่อบันทึกแถบพลังงานกระตุ้นของผลึกของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($x = 0.01$) โดยพิจารณาการเรืองแสงที่ความยาวคลื่น 587 หรือ 606 หรือ 629 นาโนเมตร จะได้แถบพลังงานกระตุ้นมี 3 พีคเช่นเดียวกัน (ดังแสดงในรูปที่ 4.36 - 4.19) แต่มีข้อสังเกตคือแถบพลังงานกระตุ้นจะมีความเข้มสูงสุดเมื่อพิจารณาการเรืองแสงที่ความยาวคลื่น 606 นาโนเมตร แต่เมื่อพิจารณาการเรืองแสงที่ความยาวคลื่นอื่นๆ เช่น 587 หรือ 629 นาโนเมตร ความเข้มของแถบพลังงานกระตุ้นมีค่าลดลงตามลำดับ ส่วนตำแหน่งพีคของแถบพลังงานกระตุ้นจะอยู่ที่ความยาวคลื่นแสงค่าเดิม แสดงว่าพลังงานของแถบพลังงานกระตุ้นควรมีค่ามากกว่าพลังงานของแถบเรืองแสงแล้วจะได้ความเข้มของการเรืองแสงมาก

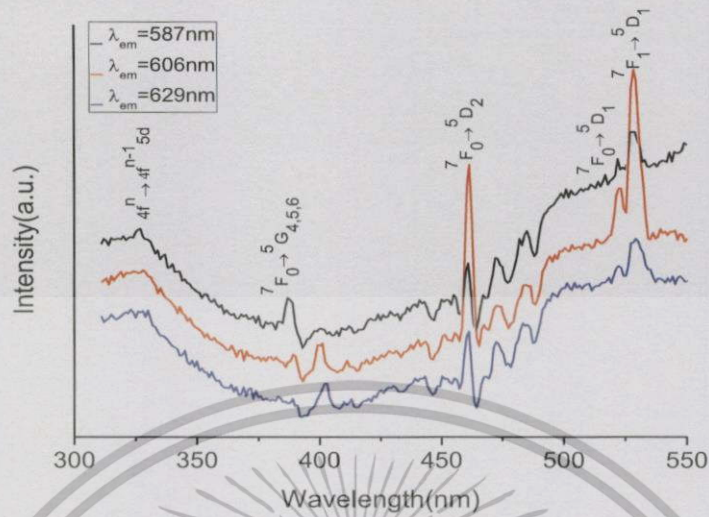
แต่เมื่อพิจารณาแถบพลังงานกระตุ้นของผงผลึกของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เศษส่วนโมลอะตอม (x) ของไอออนของธาตุ Eu^{3+} ค่าต่างๆ พบว่าความเข้มของแถบพลังงานกระตุ้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก $x = 0.01$ จนมีค่าสูงสุดที่ $x = 0.05$ ซึ่ง $x = 0.05$ นี้ แถบเรืองแสงมีค่าสูงสุดเช่นเดียวกัน



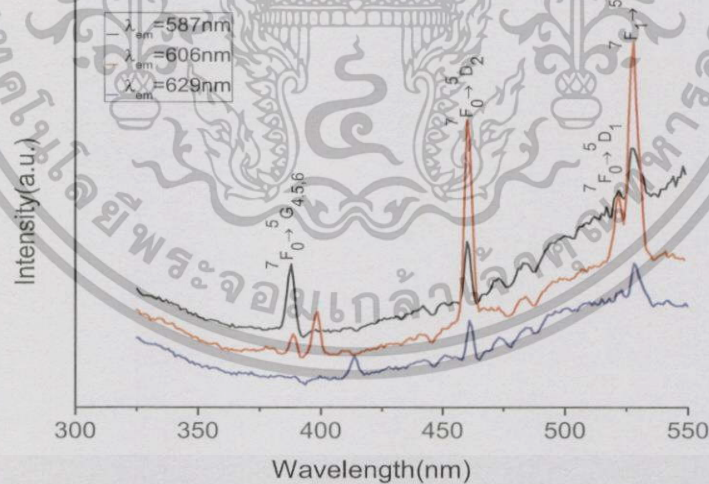
รูปที่ 4.35 แสดงพีคความเข้มของแถบพลังงานกระตุ้นเมื่อพิจารณาการเรืองแสงที่ความยาวคลื่น 587, 606 และ 629 นาโนเมตร ตามลำดับของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($x = 0.01$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



รูปที่ 4.36 แสดงพีคความเข้มของแถบพลังงานกระตุ้นเมื่อพิจารณาการเรืองแสงที่ความยาวคลื่นเอกสารนี้เป็นเอกสว 587, 606 และ 629 นาโนเมตร ตามลำดับของผงผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ (การคำนวณค่า x ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น) ($x = 0.02$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

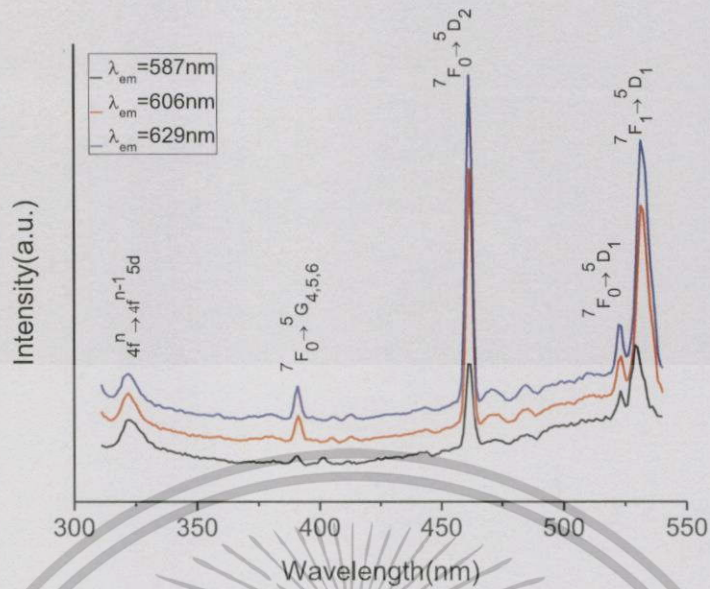


รูปที่ 4.37 แสดงพีคความเข้มของแถบพลังงานกระตุ้นเมื่อพิจารณาการเรืองแสงที่ความยาวคลื่น 587, 606 และ 629 นาโนเมตร ตามลำดับของผงผลึกของเมตเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($x = 0.03$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

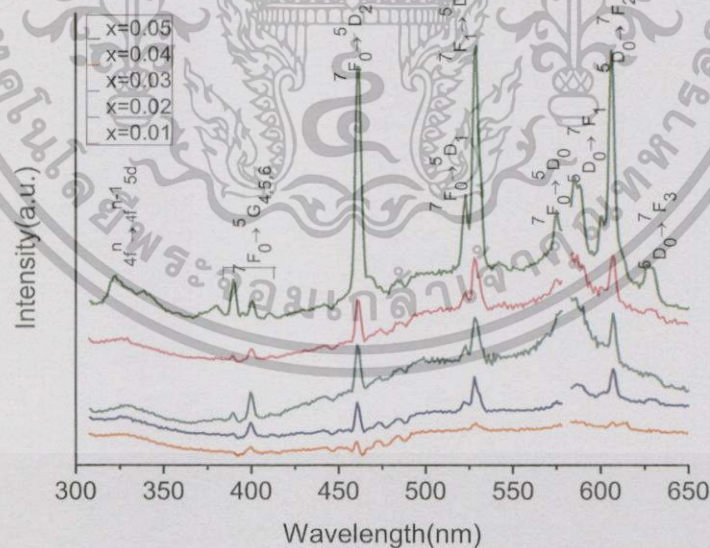


รูปที่ 4.38 แสดงพีคความเข้มของแถบพลังงานกระตุ้นเมื่อพิจารณาการเรืองแสงที่ความยาวคลื่น 587, 606 และ 629 นาโนเมตร ตามลำดับของผงผลึกของเมตเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($x = 0.04$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

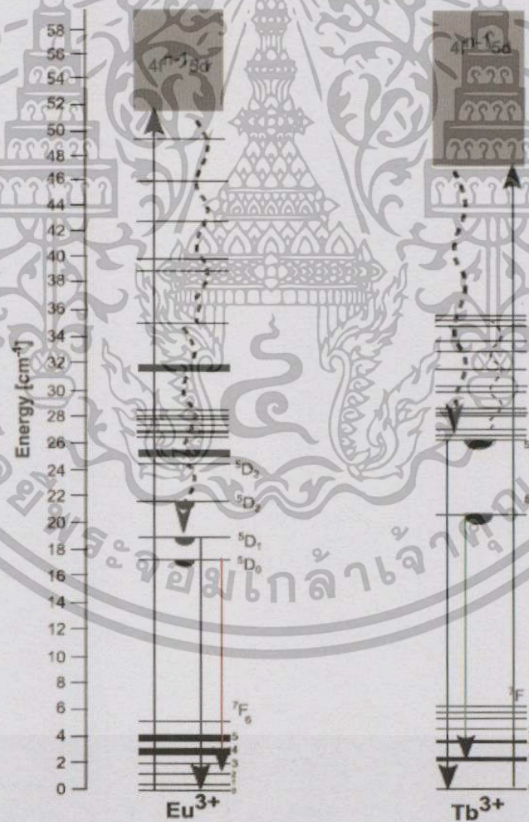


รูปที่ 4.39 แสดงพีคความเข้มของแถบพลังงานกระตุ้นเมื่อพิจารณาการเรืองแสงที่ความยาวคลื่น 587, 606 และ 629 นาโนเมตร ตามลำดับของผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($x = 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



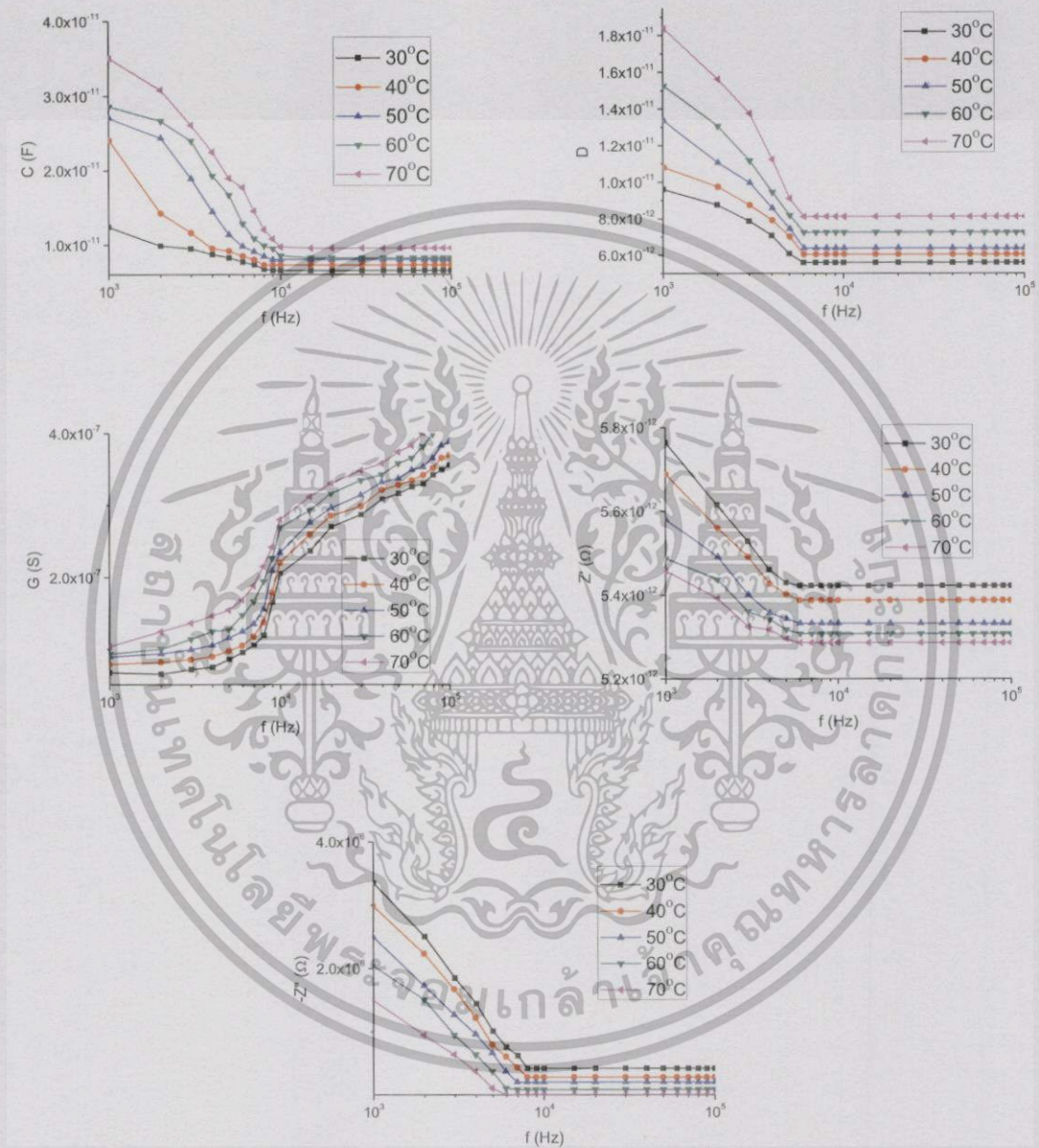
รูปที่ 4.40 แสดงพีคความเข้มของแถบพลังงานกระตุ้นและแถบเรืองแสงของผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

ผลึกของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) จะเรืองแสงสีเขียว เมื่อกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่น 358 นาโนเมตร ส่วนผลึกของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) จะเรืองแสงสีแดงเมื่อกระตุ้นด้วยแสงสีเขียวที่มีความยาวคลื่น 528 นาโนเมตร แสดงว่าถ้าเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ร่วมกัน เมื่อกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตไอออนของธาตุ Tb^{3+} จะถ่ายโอนพลังงาน (energy transfer) ไปยังไอออนของธาตุ Eu^{3+} ส่งผลให้การเปล่งแสงจะให้ทั้งสีเขียว และ สีแดง ออกมาพร้อมๆกัน ส่วนสีใดจะเข้มกว่ากัน ก็ขึ้นอยู่กับความสามารถในการถ่ายโอนพลังงานดังกล่าว นอกจากนี้ในกรณีนี้ที่ผลึกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ยังได้พบแถบกระตุ้นที่เกิดการทรานซิชันของระดับพลังงาน $4f^n \rightarrow 4f^{n-1}5d$ ซึ่งเป็นการกระตุ้นอิเล็กตรอนจากระดับพลังงานระดับลึกของไอออนของธาตุ Eu^{3+} ไปยังระดับพลังงานของพันธะไอออนของธาตุ Eu^{3+} ที่มีต่อไอออนลิแกนด์ (ligand ions) ของธาตุ O^{2-} การทรานซิชันของระดับพลังงาน $4f^n \rightarrow 4f^{n-1}5d$ จะแสดงดังรูปที่ 4.41

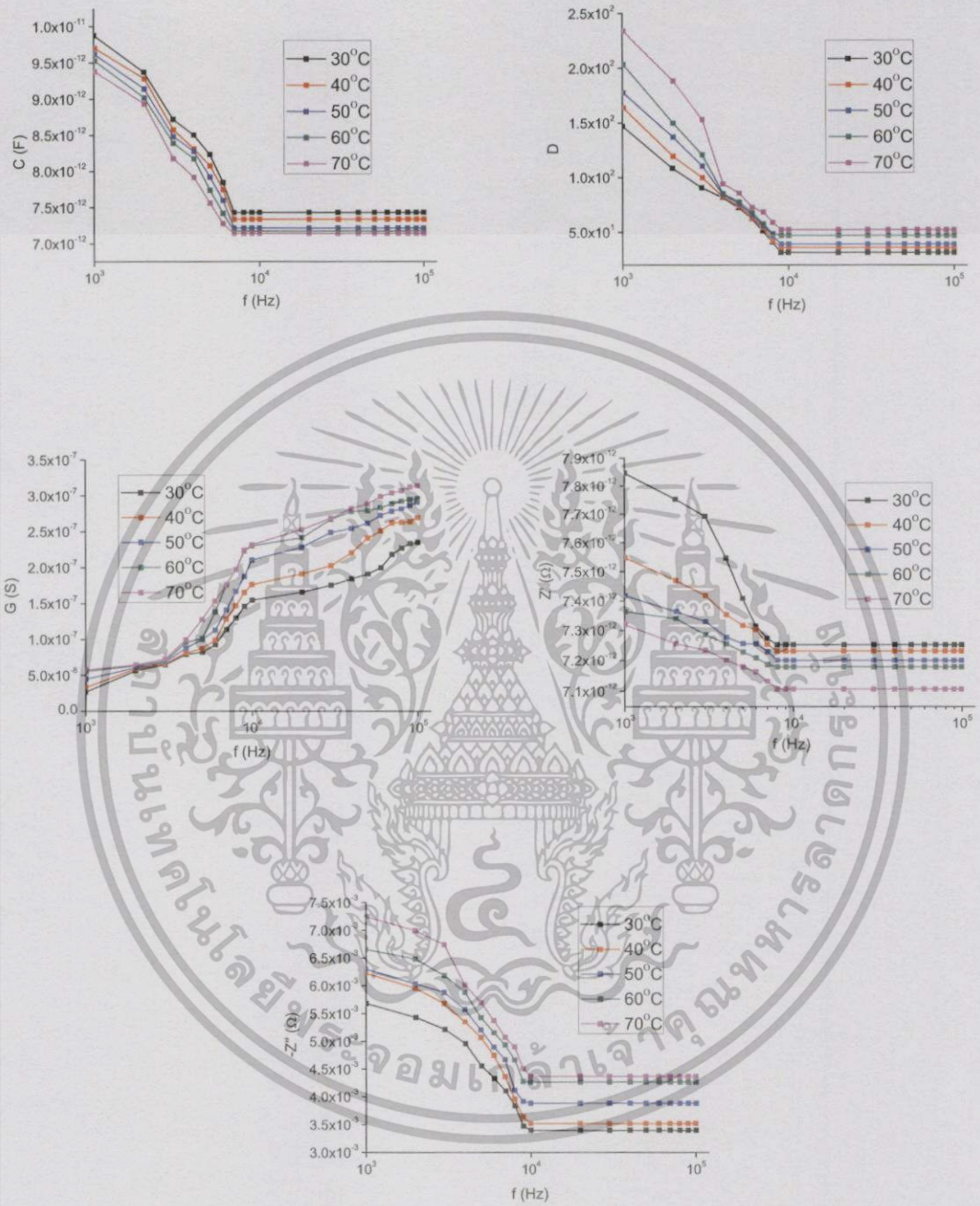


รูปที่ 4.41 แสดงระดับพลังงานภายในไอออนของธาตุ Tb^{3+} และ ไอออนของธาตุ Eu^{3+} ที่เจืออยู่ในผงเอกสารนี้เป็นเอกส ผลึกของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

4.10 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับของเม็ตเซรามิกของ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

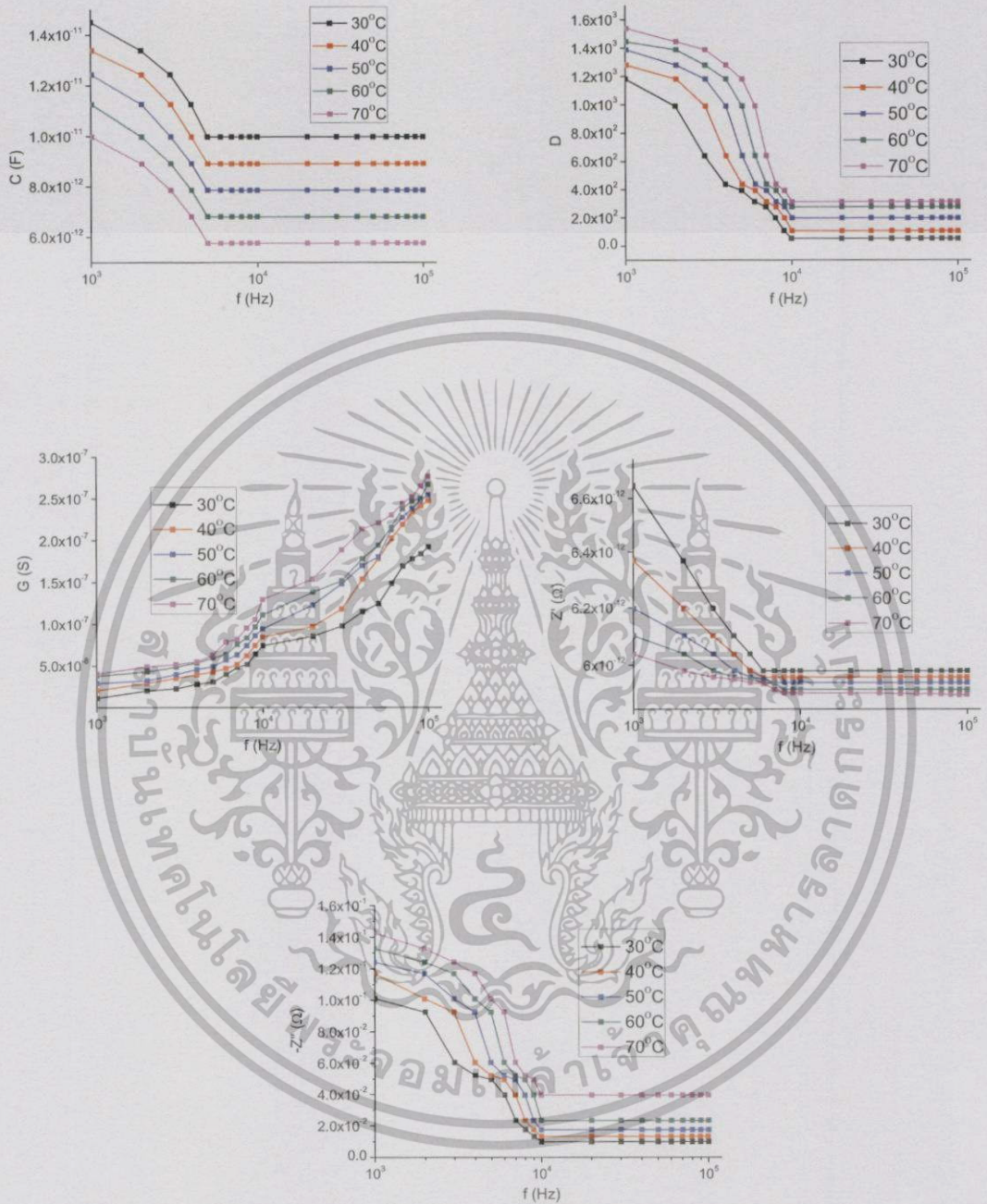


รูปที่ 4.42 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C-f, D-f, G-f และ Z'-f ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ตเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ เอกสารนี้เป็นเอกสาร ($x = 0.00$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายการก้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ของแข็ง ที่มีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำ ไปใช้



รูปที่ 4.43 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C-f, D-f, G-f, Z'-f และ Z''-f ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ตเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($x = 0.01$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น มิอนุญาตให้เผยแพร่ไปบนระบบสารสนเทศใดๆ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



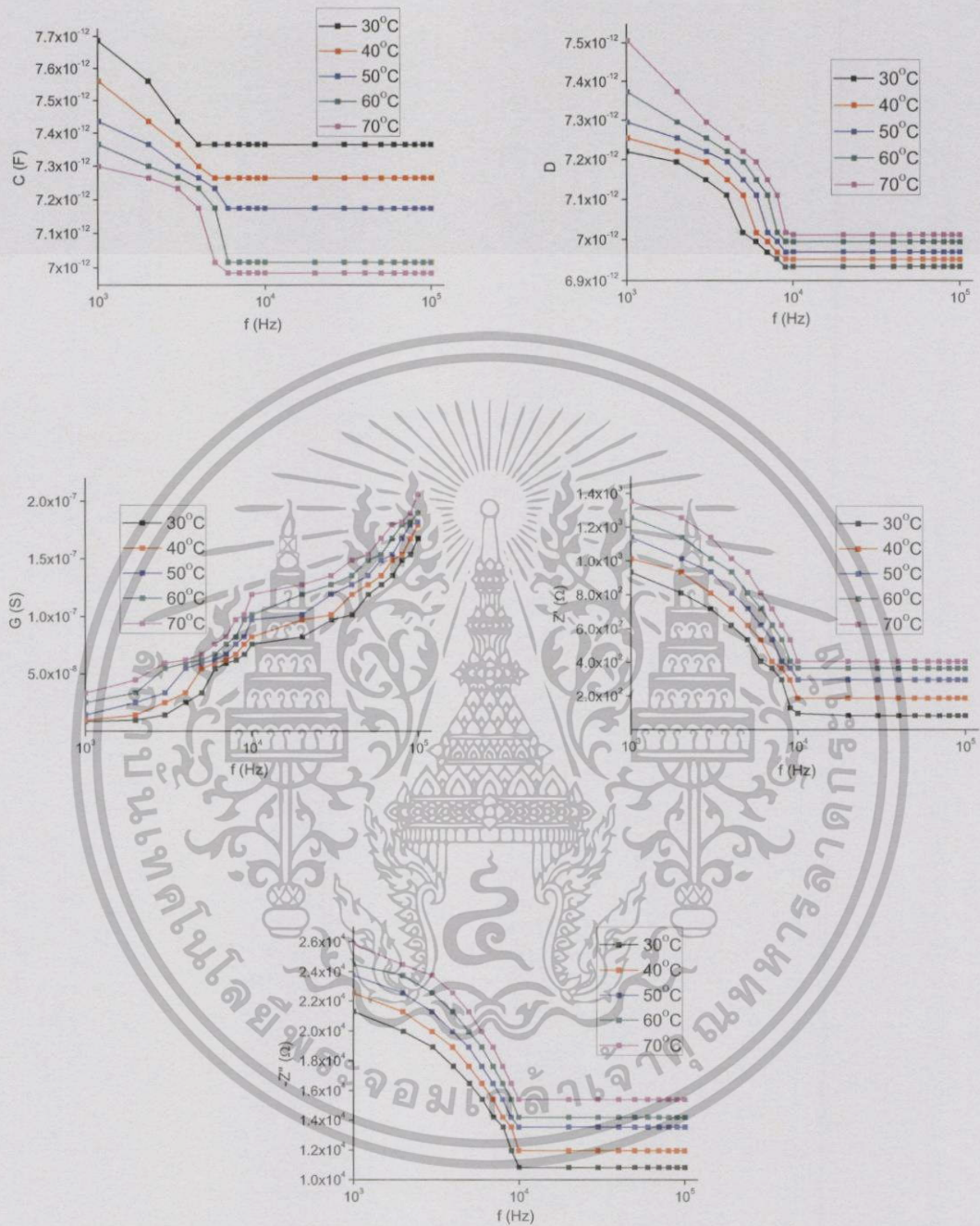
รูปที่ 4.44 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C-f, D-f, G-f, Z'-f และ Z''-f ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$

($x = 0.02$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สว่าง ไวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่น่าเชื่อได้หนาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ของแข็ง

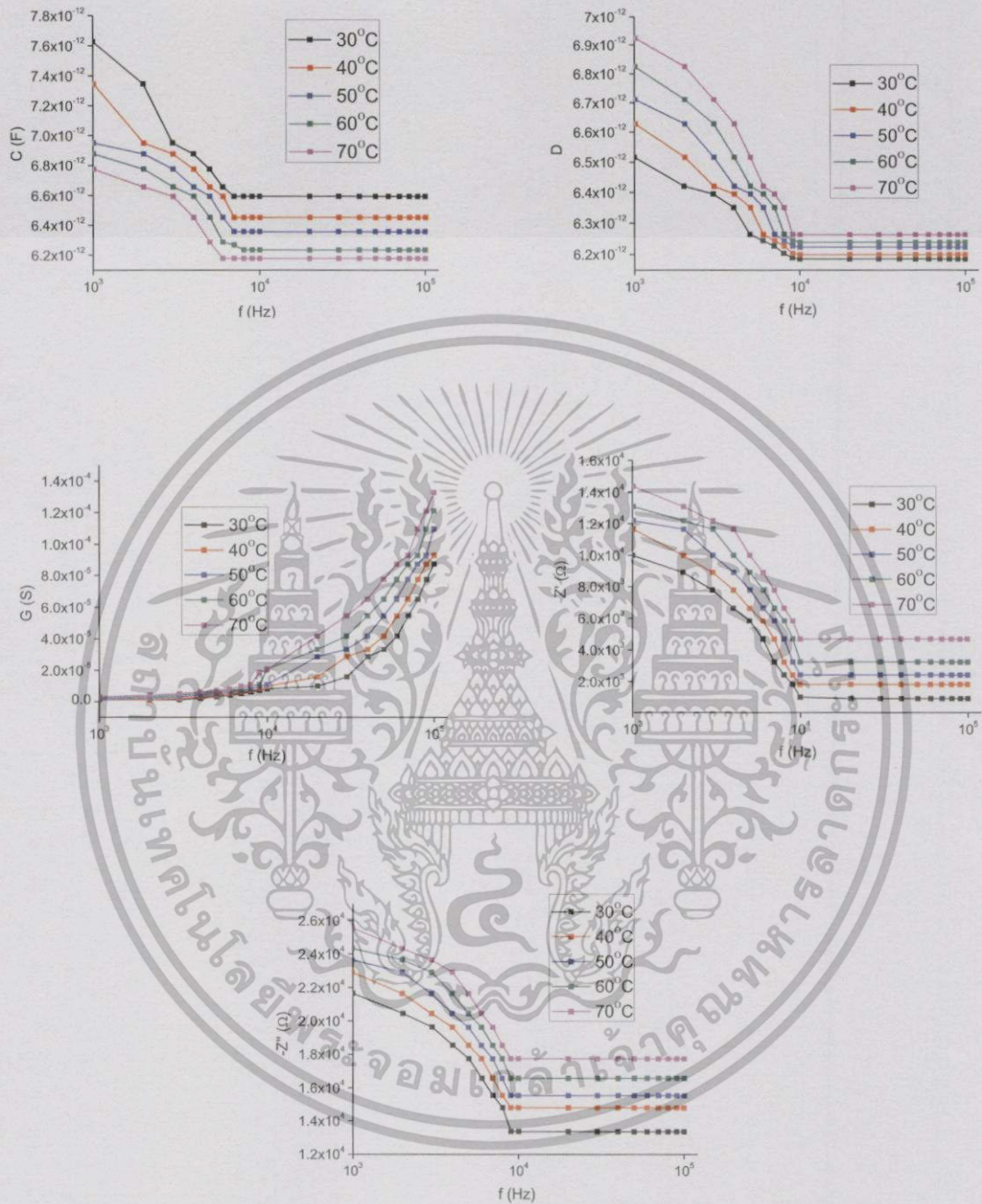
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.45 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C - f , D - f , G - f , Z' - f และ Z'' - f ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($x = 0.03$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลาย

ของแข็ง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

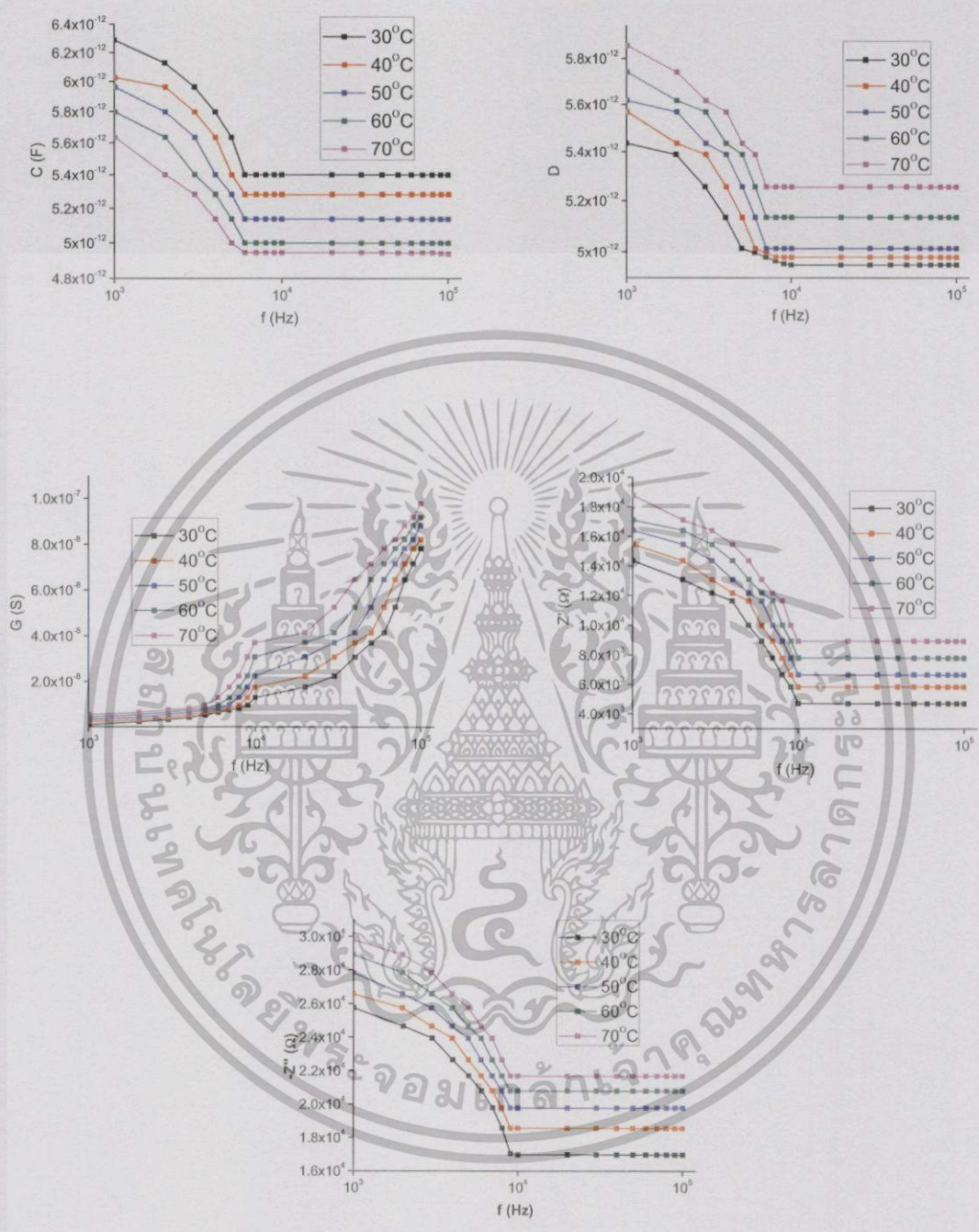


รูปที่ 4.46 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C-f, D-f, G-f และ Z'-f และ Z''-f ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$

($x = 0.04$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลาย

ของแข็ง เอกสารนี้เป็นเอกสารทงสวน วิชาสำหรับการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์

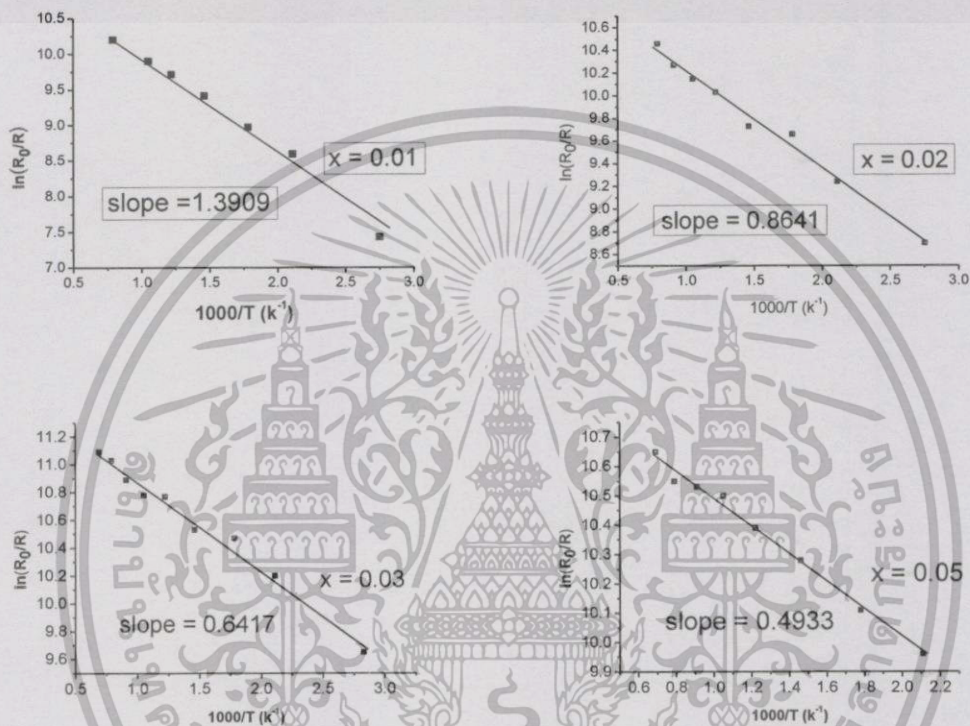
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.47 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C-f, D-f, G-f, Z'-f และ Z''-f ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ทเซอร์ามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($x = 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกริใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น มิอนุญาตให้ใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(R_0/R)$ กับ $(1000/T)$ ที่ได้จากค่าความนำไฟฟ้า ของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนในช่วงอุณหภูมิ 80 ถึง 180 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้น ที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



รูปที่ 4.48 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(R_0/R)$ กับ $(1000/T)$ ที่ได้จากค่าความนำไฟฟ้า ของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนในช่วงอุณหภูมิ 80 ถึง 180 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

ค่าความต้านทานไฟฟ้า (R) ของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) สามารถหาได้จากค่าความนำไฟฟ้า (G) โดยพิจารณาที่ความถี่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งค่าความต้านทานไฟฟ้าจะเป็นส่วนกลับของค่าความนำไฟฟ้าดังนี้คือ

$$R = \frac{1}{G}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ouse

จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังความสัมพันธ์

$$R = R_0 \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right)$$

เมื่อ R_0 และ R คือ ค่าความต้านทานที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิใดๆแล้วจะได้ว่า

$$\frac{R}{R_0} = \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right)$$

$$\ln\left(\frac{R_0}{R}\right) = -\left(\frac{E_a}{kT}\right)$$

$$\ln\left(\frac{R_0}{R}\right) = \frac{-E_a}{1,000k} \left(\frac{1,000}{T}\right)$$

$$\text{ความชัน} = \frac{-E_a}{1,000k}$$

แล้วค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) จะมีค่าดังนี้ คือ

$$E_a = 1,000(\text{ความชัน}) \text{ หน่วยเป็นจูล}$$

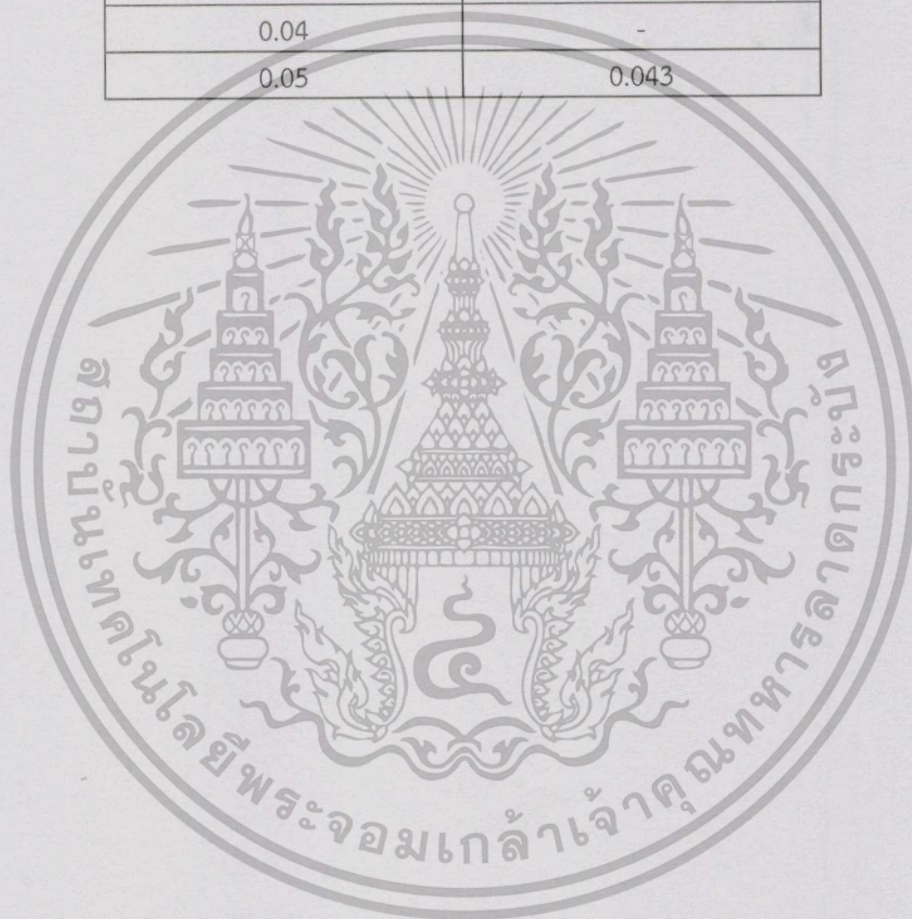
$$= \frac{1,000(1.38 \times 10^{-23})}{(1.6 \times 10^{-19})} (\text{ความชัน}) \text{ หน่วยเป็นอิเล็กตรอนโวลต์}$$

ค่าพลังงานกระตุ้นของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) มีแนวโน้มลดลง เมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) มีค่าเพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าพลังงานกระตุ้นของเม็ดเซรามิก $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.01 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

Composition (x)	Activation Energy (eV)
	Eu ³⁺ -doped
0.00	-
0.01	0.120
0.02	0.075
0.03	0.055
0.04	-
0.05	0.043



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในโครงการพิเศษนี้ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ In_2O_3 , WO_3 , $\text{TbCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{EuCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ด้วยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งเมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ในปริมาณ 1 - 5 เปอร์เซ็นต์โดยโมลละต่อม ส่วนที่สองจะเป็นการศึกษาสมบัติการเรืองแสงของผลึกของ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ส่วนที่สามเป็นการศึกษาพารามิเตอร์ทางไฟฟ้ากระแสสลับ เช่น ค่าความจุไฟฟ้า ค่าความนำไฟฟ้า และ ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ด้วยอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ - 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ในช่วงอุณหภูมิ 30 - 70 องศาเซลเซียส ค่าจำนวนจริง และ ค่าจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนจะเปลี่ยนตามความถี่และอุณหภูมิ ซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัยได้เป็นหัวข้อหลักๆ ดังนี้

5.1 สรุปผลการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคและเชิงมหภาคของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ In_2O_3 , WO_3 , $\text{TbCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{EuCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ด้วยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งเมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) พบว่าโครงสร้างผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนัลพีค การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของระนาบ (211) มีความเข้มสูงสุด เมื่อเศษส่วนโดยโมลละต่อม (x) มีค่าตั้งแต่ 0.04 ขึ้นไปจะปรากฏเฟสแฝงของสารประกอบ $\text{In}_2\text{W}_3\text{O}_{12}$ และ $\text{Tb}_2\text{W}_3\text{O}_{12}$ เกิดร่วมด้วยเสมอ แต่สำหรับเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ก็มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของระนาบ (211) มีความเข้มสูงสุดเช่นเดียวกันกับเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) แต่เม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ไม่เกิดเฟสแฝงของสารประกอบชนิดอื่นๆ เนื่องจากรัศมีไอออนของธาตุ Tb^{3+} (0.93 อังสตรอม) และ ของธาตุ Eu^{3+} (0.98 อังสตรอม) มีค่าใหญ่กว่ารัศมีไอออนของธาตุ In^{3+} (0.81 อังสตรอม) ดังนั้นค่าคงที่โครงสร้างผลึก a และ c จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณเศษส่วนโดยโมลละต่อม (x) ที่เพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ยังพบว่าค่าคงที่โครงสร้างผลึก a และ c จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณเศษส่วนโดยโมลละต่อม (x) ที่เพิ่มขึ้น

ไม่ว่ากรณีใดๆ ก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าการเจือด้วยไอออนของธาตุ Eu^{3+} ส่งผลให้เกรนโตขึ้น และโตมากกว่ากรณีเจือด้วยไอออนของธาตุ Tb^{3+}

5.2 สรุปผลการศึกษสมบัติการเรืองแสงของผงผลึกของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ

$\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$)

จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ In_2O_3 , WO_3 , $\text{TbCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{EuCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ด้วยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งเมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

ผงผลึกของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ In_2O_3 , WO_3 , $\text{TbCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{EuCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ด้วยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งเมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จะเรืองแสงสีเขียวเมื่อกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต แถบเรืองแสงจะประกอบด้วยพีคจำนวน 4 พีคที่ความยาวคลื่น 450, 467, 481 และ 491 นาโนเมตร ตามลำดับ ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนภายในไอออนของธาตุ Tb^{3+} จากระดับพลังงาน $^5\text{D}_4 \rightarrow ^7\text{F}_{3,4,5,6}$ ส่วนแถบพลังงานกระตุ้นจะประกอบด้วยพีคจำนวน 3 พีคที่ความยาวคลื่น 326, 353 และ 388 นาโนเมตร ตามลำดับซึ่งเกิดจากการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนจากระดับพลังงาน $^7\text{F} \rightarrow ^5\text{L}_{1,5,10}$, $^7\text{F}_6 \rightarrow ^5\text{D}_3$ และ $^7\text{F}_6 \rightarrow ^5\text{D}_4$ ตามลำดับ

ผงผลึกของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) จะเรืองแสงสีแดงเมื่อกระตุ้นด้วยแสงสีเขียวความยาวคลื่น 528 นาโนเมตร แถบเรืองแสงจะประกอบด้วยพีคจำนวน 3 พีคที่ความยาวคลื่น 587, 606 และ 629 นาโนเมตร ตามลำดับซึ่งเกิดจากการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนภายในไอออนของธาตุ Eu^{3+} จากระดับพลังงาน $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_{1,2,3}$ ส่วนแถบกระตุ้นจะประกอบด้วยพีคจำนวน 5 พีคที่ความยาวคลื่น 328, 380, 460, 520 และ 525 นาโนเมตร ตามลำดับซึ่งเกิดจากการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนจากระดับพลังงาน $4f^n \rightarrow 4f^{n-1}5d$, $^7\text{F}_0 \rightarrow ^5\text{G}_{4,5,6}$, $^7\text{F}_0 \rightarrow ^5\text{D}_2$, $^7\text{F}_0 \rightarrow ^5\text{D}_1$ และ $^7\text{F}_1 \rightarrow ^5\text{D}_1$ ตามลำดับ

5.3 สรุปผลการศึกษสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ

$\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$)

จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ In_2O_3 , WO_3 , $\text{TbCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{EuCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ด้วยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งเมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

ได้ทำการศึกษสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ In_2O_3 , WO_3 , $\text{TbCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{EuCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ด้วยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าพระยา
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการ

สารละลายของแข็งเมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศ เป็นเวลา 48 ชั่วโมงโดยใช้เครื่อง Precision LCR meter ของ Agilent รุ่น E4980A ที่อุณหภูมิในช่วง 30 - 70 องศาเซลเซียส โดยเริ่มจากการวัด ค่าความจุไฟฟ้า (C), ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริก (D), ค่าความนำไฟฟ้า (G), ค่าจำนวนจริง (Z') และ ค่าจำนวนจินตภาพ (Z'') ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนที่ความถี่ ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ตามลำดับ

ค่าความจุไฟฟ้าของเม็ดเซรามิกทั้งที่เจือด้วยไอออนของธาตุ Tb^{3+} และ Eu^{3+} ที่เศษส่วนโดยโมล ค่าต่างๆ มีลักษณะคล้ายๆกันคือความจุไฟฟ้าจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นจาก 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 10 กิโลเฮิร์ตซ์ จากนั้นความจุไฟฟ้าจะคงที่จากความถี่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ แม้ว่าอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นจาก 30 เป็น 70 องศาเซลเซียส แนวโน้มของความจุไฟฟ้าที่ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1เมกะเฮิร์ตซ์ จะยังคงมีลักษณะเหมือนเดิม แต่ถ้าพิจารณาที่ความถี่ค่าใดค่าหนึ่ง ค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าความจุไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น สามารถอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์ดังนี้คือ (Herberholz, 1998)

$$C^*(\omega) = C_\infty + \frac{C_0 - C_\infty}{1 + (j\omega\tau)^{-\alpha}} \quad (5.1)$$

เมื่อ C_∞ คือ ค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่สูง (high frequency) ส่วน C_0 คือ ค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่ต่ำ (low frequency) ส่วน τ คือเวลาผ่อนคลาย (relaxation time) สำหรับ α มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยปกติในวัสดุทั่วไปมักจะมีกับดักประจุ (trap) เข้ามาเกี่ยวข้องเสมอ สำหรับเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $In_{6(1-x)}Tb_xWO_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และ $In_{6(1-x)}Eu_xWO_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ก็มีกับดักประจุด้วยเช่นกัน ซึ่งเกิดจากข้อบกพร่องผลึกที่มีสาเหตุมาจากการเจือด้วยไอออนของธาตุ Tb^{3+} และ Eu^{3+}

ค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก (D) นิยามมาจาก

$$D = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (5.2)$$

เมื่อ ϵ' และ ϵ'' คือ ค่าจำนวนจริงและค่าจำนวนจินตภาพของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $In_{6(1-x)}Tb_xWO_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และ $In_{6(1-x)}Eu_xWO_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) มีลักษณะคล้ายกันคือ การสูญเสียไดอิเล็กตริกจะมีแนวโน้มลดลง เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นจาก 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 10 กิโลเฮิร์ตซ์ จากนั้นค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกจะคงที่จากความถี่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ แม้ว่าอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นจาก 30 เป็น 70 องศาเซลเซียส แนวโน้มของการสูญเสียไดอิเล็กตริกที่ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง

1 เมกะเฮิร์ตซ์ จะยังคงมีลักษณะเหมือนเดิม แต่ถ้าพิจารณาที่ความถี่ค่าใดค่าหนึ่ง การสูญเสียไดอิเล็กตริกจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และต้องอ้างอิงถึงค่าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความนำไฟฟ้าของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ค่าต่างๆมีลักษณะคล้ายๆกันคือ ในช่วงความถี่ต่ำ (ไม่เกิน 10 กิโลเฮิร์ตซ์) ความนำไฟฟ้าจะมีค่าคงที่ แต่เมื่อความถี่สูงกว่า 10 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยประมาณค่าความนำไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น ค่าความนำไฟฟ้านี้ขึ้นอยู่กับความถี่ของไฟสลับจะแสดงดังความสัมพันธ์

$$G_{ac} = G_{dc} + A\omega^n \quad (5.3)$$

เมื่อ G_{ac} , G_{dc} , ω และ n คือ ค่าความนำไฟฟ้ากระแสสลับ, ค่าความนำไฟฟ้ากระแสตรง, ความถี่เชิงมุม และ เลขยกกำลังซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0 กับ 1 แม้ว่าอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นจาก 30 เป็น 70 องศาเซลเซียส แนวโน้มของค่าความนำไฟฟ้าที่ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 10 กิโลเฮิร์ตซ์ จะยังมีลักษณะเหมือนเดิม และถ้าพิจารณาที่ความถี่ค่าใดค่าหนึ่ง ค่าความนำไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการที่ค่าความนำไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความถี่ แสดงว่าอิเล็กตรอนในกับดักพาหะสามารถถูกกระตุ้นให้หลุดออกจากกับดักได้ด้วยพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ อีกทั้งความร้อนยังช่วยกระตุ้นให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากกับดักได้ง่ายยิ่งขึ้น เมื่อวัดความนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงขึ้น

ค่าจำนวนจริง (Z') และ ค่าจำนวนจินตภาพ (Z'') ของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ค่าต่างๆมีลักษณะคล้ายๆกันคือ ในช่วงความถี่ต่ำ (ไม่เกิน 10 กิโลเฮิร์ตซ์) ค่าจำนวนจริง (Z') และ ค่าจำนวนจินตภาพ (Z'') มีแนวโน้มลดลง จากนั้นจะมีค่าคงที่เมื่อความถี่สูงกว่า 10 กิโลเฮิร์ตซ์ แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 30 เป็น 70 องศาเซลเซียส แนวโน้มของค่าจำนวนจริง (Z') และ ค่าจำนวนจินตภาพ (Z'') ในช่วงความถี่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ จะยังคงมีลักษณะเหมือนเดิม แต่ถ้าพิจารณาที่ความถี่ค่าใดค่าหนึ่ง ค่าจำนวนจริง (Z') และ ค่าจำนวนจินตภาพ (Z'') จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

สำหรับค่าจำนวนจริง (Z') และค่าจำนวนเชิงซ้อน (Z'') ของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน (Z^*) ของเม็ดเซรามิกโดยทั่วไปสามารถอธิบายได้จากวงจรสมมูลที่มีตัวเก็บประจุต่อขนานกับตัวต้านทาน (R_p) จำนวน 2 ชุดต่อกันจะได้ว่า

$$Z' = \frac{R_b}{1 + (\omega_b C_b R_b)^2} + \frac{R_{gb}}{1 + (\omega_{gb} C_{gb} R_{gb})^2} \quad (5.4)$$

และ

$$Z'' = \frac{-R_b^2 \omega_b C_b}{1 + (\omega_b C_b R_b)^2} + \frac{-R_{gb}^2 \omega_{gb} C_{gb}}{1 + (\omega_{gb} C_{gb} R_{gb})^2} \quad (5.5)$$

จากสมการที่ (5.4) และ (5.5) จะเห็นได้ว่า ค่าอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีสามารถแยกผลของค่าความต้านทานของเนื้อวัสดุในเกรน (R_b) และค่าความต้านทานของบริเวณรอยต่อระหว่างเกรน (grain boundary) ของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ $\text{In}_{6(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และ

$\ln_{6(1-x)}\text{Eu}_x\text{WO}_{12}$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ออกจากกันได้จากสมการ (5.4) จะเห็นได้ว่าเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ค่า Z' จะลดลง แต่เมื่ออณูหภูมิเพิ่มขึ้น ค่า Z' จะลดลง จากสมการ (5.5) จะเห็นได้ว่า เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นแล้วค่า Z'' มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงความถี่ค่าหนึ่งที่ทำให้ค่า Z'' มีค่าสูงและมีค่าเท่ากับค่า Z' แล้วจะเรียกความถี่เชิงมุมนี้ว่าความถี่ผ่อนคลาย (ω_{\max}) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออณูหภูมิเพิ่มขึ้น สำหรับในการทดลอง ค่าเวลาผ่อนคลาย τ สามารถคำนวณหาได้จากสมการ

$$\tau_b = \frac{1}{\omega_b} = C_b R_b \quad (5.6)$$

และ

$$\tau_{gb} = \frac{1}{\omega_{bg}} = C_{bg} R_{gb} \quad (5.7)$$

5.4 ข้อเสนอแนะ

1. การวัดค่าต่างๆที่ความถี่ต่ำต้องมีระบบป้องกันสัญญาณรบกวนที่ดี เพราะเวลาวัดค่าไฟสลับที่ความถี่ต่ำมีสัญญาณรบกวนมากเกินไป
2. ในการทำขั้วไฟฟ้าที่เป็นโลหะ ควรเคลือบเม็ดเซรามิกด้วยระบบสเปคโตรริง เนื่องจากการใช้กาวเงิน ตัวอนุภาคเงินจะแพร่เข้าไปยังเนื้อเซรามิกซึ่งจะก่อให้เกิดพฤติกรรมกจรนำไฟฟ้าที่ไม่พึงประสงค์แสดงออกมาขณะทำการวัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

ฐิตินัย แก้วแดง. 2530. “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไคซีลีไนต์.”

วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2542. “การเตรียมฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอม In โดยระเหยในระบบสุญญากาศ.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะ วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2545. “การเตรียมและการศึกษาฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี Zn ในปริมาณสูงเพื่อประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะ วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2549. “การประดิษฐ์ฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะ วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2550. “การประดิษฐ์ฟิล์มหนา $CuAlO_2$ เพื่อเป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะ วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และณัฐพร พรหมรส. 2551. “การเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีออบสารละลายเคมีภายใต้คลื่นไมโครเวฟเพื่อประดิษฐ์เป็นหน้าต่างรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะ วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2557. “การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางรายต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CuO .” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

งามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2531. “การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ ของคอปเปอร์-อินเดียม ซีลีไนต์.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2543. “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะ วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2545. “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะ วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง, ณัฐพร พรหมรส และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2551. “การเตรียมฟิล์มบาง CdTe โดยวิธีระเหิดในระเหยประชิดเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะ วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะในรูปแบบใดก็ตาม อีกทั้งห้ามนำข้อความบางส่วนและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2556. “ความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และการประยุกต์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ณัฐชยา แก้วเรืองฤทธิ์ และสุภาพร สอาดพงษ์. 2549. “โพโตลูมินเนสเซนซ์ของไอออน Si^{4+} และ Ge^{4+} ในสารประกอบ InBO_3 .” โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ปทุมทิพย์ บุญเสริม และปานจรี แจงบำรุง. 2554. “สมบัติทางไฟฟ้าของสารประกอบอินเดียมทั้งสเดน.” โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์-เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ปิยชาติ สดงาม. 2553. “การศึกษาสมบัติเชิงไฟฟ้า ของเม็ดเซรามิกส์ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Cr}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 1$).” โครงการพิเศษนิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- เมธิรา ร่วมสุข. 2555. “สมบัติเชิงแสงของฟิล์มบาง CuInSe_2 ที่เจือด้วย Na ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- อดิสร นพจุจกุล. 2555. “สมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS กับ CuAlO_2 .” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- Bouchard, R.J. and Gillson, J.L. 1968. “Hexagonal Indium Tungsten Bronze.” *Inorganic Chemistry*. 7(5) : 969-972.
- Chaminade, J.P. Garcia, A. Pouchard, M. Fouassier, C. Jacquier, B. Perret-Gallix, D. and Gonzalez-Mestres, E. 1990. “Crystal Growth and Characterization $\text{InBO}_3 : \text{Tb}^{3+}$.” *J. Cryst. Growth*. 99 : 799-801.
- Diot, N. Larcher, O. Marchand, R. Kempf, J.Y. and Macaudiere, P. 2001. “Rare Earth and Tungsten Oxynitrides with a Defect Fluorite-Type Structure as New Pigments.” *J. Alloys Comp.* 323-324 : 45-48.
- Gaewdang, T. Chaminade, J.P. Garcia, A. Fouassier, M. Pouchard, M. and Hagenmuller, P. 1993. “Crystal Growth Properties of and Luminescence $\text{In}_6\text{WO}_{12}$.” *Master. Lett.* 18 : 64-68.
- Gaewdang, T. Chaminade, J.P. Garcia, A. Pouchard, M. Hagenmuller, P. and Jacquier, B. 1994. “Luminescence of Ce^{3+} in the $\text{In}_x\text{Sc}_{1-x}\text{BO}_3$ ($0 \leq x \leq 1$) Solid Solution.” *J. Phy. Chem. Solids*. 55 : 501-504.
- Jiang, F. Shen, H. Liu, B. Lin, h. and Shen, Z. 2011. “Preparation and Properties of SnS Films Grown by Two-Stage Process.” *Appl. Surf Sci.* 257 : 4901-4905.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 Jjiang, F. Shen, H. Liu, B. Lin, h. and Shen, Z. 2011. “Preparation and Properties of SnS Films
 Grown by Two-Stage Process.” *Appl. Surf Sci.* 257 : 4901-4905.
 ไม่ว่าจะตีพิมพ์ที่ไหน อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Khatho, V. Llobet, E. Vilanova, X. Brezmes, J. Hubalek, J. Malysz, K. and Correig, X. 2005. "Gas Sensing Properties of Nanoparticle Indium-Doped WO_3 Thick Films." *Sens. Actuator B.* 101 : 45-51.
- Kittel, C. 1971. *Introduction to Solid State Physics.* 2nd ed. New York : John Wiley & Sons.
- Liu, X. Xiang, W. Chen, F. Zhang, W. and Hu, Z. 2012. "Synthesis and Photoluminescence of Tb^{3+} Activated $\text{NaY}(\text{WO}_4)_2$ Phosphors." *Master. Res. Bull.* 47 : 3417-3421.
- Raghavan, R. S. 1976. "High Mass Indium Detector for Low Energy Solar Neutrinos." *Phys. Res. Lett.* 37 : 259-261.
- Ramana, C. V. Utsunomiya, S. Ewing, C. Julien, G.M. and Becker, U. 2006. "Structural Stability and Phase Transitions in WO_3 Thin Films." *J. Chem. B.* 110 : 10430-10435.
- Richard, A. P. and Edward, D. D. 2001. "Subsolidus Phase Relations and Crystal Structures of the Mixed-Oxide Phases in the In_2O_3 - WO_3 System." *J. Solid State Chem.* 177 : 2740-2748.
- Wang, R. Zhou, D. Qui, J. Yang, Y. and Wang, C. 2015. "Color-Tunable Luminescence in $\text{Eu}^{3+}/\text{Tb}^{3+}$ Co-Doped Oxyfluorides Glass and Transparent Glass-Ceramics." *J. Alloys Comp.* 629 : 310-414.
- Yoon, S.J. Dhoble, S. J. and Park, K. 2014. "Synthesis and Photoluminescence Properties of $\text{La}_{1-x}\text{AlO}_3 : x\text{Tb}^{3+}$ Green Phosphors to White LEDs." *Ceramics International.* 40 : 4340-4350.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

Indexing of X-ray diffraction pattern for $\text{In}_6\text{WO}_{12}$

$2\cdot\theta$ ($^\circ$)	d (\AA)	I (%)	I_{PDF} (%)	Rhombohedral hkl	Hexagonal hkl
22.559	3.9382	8.5	7.9	1 1 0	0 1 2
23.761	3.7416	9.3	8.8	1 1 1	0 2 1
29.441	3.0313	2.3	0.9	2 0 0	2 0 2
29.881	2.9878	31.8	31.3	1 1 1	0 0 3
30.400	2.9379	100	100	0 1 2	2 1 1
32.620	2.7429	3.3	2.9	2 1 1	3 0 0
35.101	2.5544	35.5	40.1	2 1 1	1 2 2
35.441	2.5307	4.9	4.0	0 1 2	1 1 3
44.522	2.0334	54.7	2.3	0 1 3	3 1 2
46.140	1.9657	2.4	3.4	2 2 0	0 2 4
50.198	1.8159	13.9	23.1	3 1 0	2 1 4
50.844	1.7943	17.1	23.6	1 2 3	4 1 0
52.623	1.7378	3.5	4.6	1 2 3	2 3 2
59.541	1.5513	5.7	0.4	0 2 3	1 2 5
59.717	1.5472	3.8	8.9	4 1 1	5 0 2
60.126	1.5376	10.8	-	0 1 4	1 4 3
60.302	1.5336	7.5	18.6	1 3 3	2 4 1
60.580	1.5272	4.9	10.6	4 0 0	4 0 4
63.323	1.4675	4.0	7.1	0 2 4	4 2 2
63.502	1.4638	3.2	-	1 2 4	5 1 1

PDF #74-1410.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 20-1290		Radiation = 1.540600		Quality : Not indexed		
Tb ₂ W ₃ O ₁₂ / Tb ₂ (WO ₄) ₃		2 θ	I	h	k	l
Terbium Tungsten Oxide		14.182	2			
		14.533	10			
		15.004	3			
		16.557	15			
		17.618	5			
		18.705	30			
		22.842	3			
		24.780	2			
Lattice : Not assigned		25.064	25			
Mol. weight = 1061.39		26.507	2			
S.G. : (0)		28.127	100			
		29.063	5			
		29.555	100			
		31.475	30			
		32.766	10			
<p>GENERAL COMMENTS : The author suggested monoclinic for the crystal system.</p>						
<p>*Russ. J. Inorg. Chem. (Engl. Transl.), volume 18, page 1635, (1973) primary reference : Evdokimov, A., Trunov.</p>						
Radiation : CuK α		Filter : Monochromator crystal				
Lambda : 1.54180		d-sp : Not given				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 99-997		Radiation = 1.540600		Quality : Indexed		
In ₂ W ₈ O ₁₂		2 θ	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>
Indium Tungsten Oxide		13.240	20	0	0	2
		14.678	40	1	1	1
		16.404	2	0	2	0
		18.661	30	1	1	2
		*18.661	30	2	0	0
		19.695	50	0	2	1
		20.815	70	2	1	0
		21.697	40	1	2	1
		21.880	20	2	1	1
		21.971	100	0	1	3
		22.062	100	1	0	3
		22.740	20	0	2	2
		23.037	10	2	0	2
		23.891	40	1	1	3
		24.619	70	1	2	2
		26.357	70	2	2	0
		26.662	30	0	0	4
		27.158	20	2	2	1
		28.937	40	2	1	3
		28.549	30	2	2	2
		29.564	5	1	1	4
		30.109	30	1	3	2
		32.352	30	0	2	4
		32.593	60	0	2	2
		32.668	60	3	1	2
		32.922	10	2	0	4
		32.937	10	2	3	0
		33.819	10	3	2	0
Lattice : Orthorhombic		Mol. weight = 973.18				
S.G. : (0)		Volume [CD] = 1220.20				
a = 9.48700		Dx = 1.324				
b = 9.63500						
c = 13.34900						
a/b = 0.98484						
c/b = 1.38547						
SAMPLE PREPARATION : A stoichiometric mixture of In ₂ O ₃ and W ₂ O ₃ was annealed at 1000 C for 50 hours in air.						
UNIT CELL DATA : Reference reports: a=9.501, b=9.654, c=13.36						
GENERAL COMMENTS : Cell parameters generated by least squares refinement.						
*Vestn. Mosk. Univ., Ser. Mat. Mekh. Astron. Fiz. Khim., page 174, (1967) primary reference : Trunov, V., Kovba, L.						
Radiation : CuK α		Filter : Monochromator crystal				
Lambda : 1.54180		d-sp : Guinier				
SS/FOM : F27= 19(0.0250,57)		External standard : Ge				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 74-1410		Radiation = 1.540600		Quality : Calculated		
In ₆ WO ₁₂		2th	l	h	k	l
Indium Tungsten Oxide		14.645	1	0	1	0
		18.722	<1	-1	1	0
		22.637	8	1	1	0
		23.851	9	-1	1	1
		29.536	1	0	2	0
		29.964	31	1	1	1
		30.493	100	-1	2	0
		32.726	3	-2	1	1
		35.200	40	-2	-1	1
		35.567	4	1	2	0
		37.967	<1	-2	2	0
		40.898	1	-2	2	1
		41.862	1	1	2	1
		44.658	2	-1	3	0
		44.959	5	0	3	0
		45.335	2	-3	1	1
		46.224	3	2	2	0
		48.821	<1	-2	2	2
		48.103	1	-1	3	1
		49.454	1	-2	3	0
		50.288	23	1	3	0
		50.677	24	3	2	1
		52.332	2	2	2	1
		52.735	5	2	2	1
		55.070	<1	1	3	1
		57.026	<1	-3	2	2
		57.764	1	-3	-2	1
		58.412	<1	-3	3	0
		59.660	9	2	3	0
		60.066	19	-1	4	0
		60.573	14	-3	3	1
		61.502	2	0	4	0
		62.286	2	2	2	2
		63.463	7	2	-4	0
		64.697	2	-4	2	1
		64.705	1	-1	4	1
		65.641	1	2	3	1
		66.456	1	1	4	0
		66.885	2	-3	3	2
		67.036	1	2	-4	1
		68.697	<1	-4	2	2
		69.724	3	-3	3	1
		70.674	<1	3	-4	0
		71.248	1	3	-3	2
		71.596	<1	-4	3	1
		72.143	1	3	3	0
		72.923	2	-4	-2	4
		74.422	4	-4	-2	2
		75.302	<1	2	4	0
		76.619	<1	-3	3	3
		76.683	1	4	3	2
		77.546	1	-1	5	0
		78.309	1	3	3	1
		79.175	<1	0	5	0
		79.501	1	5	2	1
		79.717	1	-2	5	0
		81.174	1	-4	4	0
		81.440	3	2	4	1
		82.247	2	-1	5	1
		83.053	3	-4	4	1
		83.924	1	2	5	1
		84.349	2	1	5	0
		85.257	4	-3	2	2
		85.618	4	-3	5	0
		85.996	1	5	3	1
		87.594	1	3	4	0
		88.191	1	3	3	2
		88.654	<1	-4	4	2
		88.866	2	-3	5	1
		89.770	1	3	4	3
Radiation : CuKα1		Filter : Not specified				
Lambda : 1.54060		d-sp : Calculated spacings				

ICSD COLLECTION CODE : 027197
 TEMPERATURE FACTOR : ATF
 TEST FROM ICSD : Calc. density unusual but tolerable.

Calculated from ICSD using POWD-12+, (1997) primary reference
 *Acta Crystallogr., Sec. B, volume 38, page 1437, (1982)
 Michel, D., Kahn, A.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน นางสาว จิตา เวชชบุษกร
เกิดเมื่อ วันที่ 20 ตุลาคม พ.ศ. 2535
ภูมิลำเนา จังหวัดสมุทรปราการ
ประวัติการศึกษา ปี พ.ศ. 2553 จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายราชวินิตบางแก้ว
ปี พ.ศ. 2554 เข้ารับการศึกษาอุดมศึกษา หลักสูตรฟิสิกส์ประยุกต์
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ - เครื่องมือทางแสง คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อผู้เขียน นางสาว ชิดชนก ใจคุ้มเก่า
เกิดเมื่อ วันที่ 5 กรกฎาคม พ.ศ. 2535
ภูมิลำเนา จังหวัดสกลนคร
ประวัติการศึกษา ปี พ.ศ. 2553 จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย
ธนบุรีวิเวกพิทยาคาร
ปี พ.ศ. 2554 เข้ารับการศึกษาอุดมศึกษา หลักสูตรฟิสิกส์ประยุกต์
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ - เครื่องมือทางแสง คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อผู้เขียน นางสาว นนทวรรณ วรรณันท์
เกิดเมื่อ วันที่ 16 พฤศจิกายน พ.ศ. 2535
ภูมิลำเนา จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา ปี พ.ศ. 2553 จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย
โรงเรียนพระมารดาภิเษกอนุเคราะห์
ปี พ.ศ. 2554 เข้ารับการศึกษาอุดมศึกษา หลักสูตรฟิสิกส์ประยุกต์
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ - เครื่องมือทางแสง คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้