

รายงานโครงการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาวัสดุเปล่งแสงของแข็งจากแก้วอัลคาไลน์บอเรต

Development of Solid State Lighting Materials From Alkali Borate Glass

โดย

ธนพงศ์ สารีอินทร์
ไพศาล การถาง
ภูมิรัตน์ นวรัตน์

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

เดือน กันยายน ปี พ.ศ. 2566

งบประมาณสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund)
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2566
จากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ประกอบไปด้วย การเตรียมแก้วอัลคาไลน์บอเรตที่เติมไอออนของ Dy^{3+} Tb^{3+} และ Eu^{3+} เพื่อพัฒนาเป็นวัสดุเปล่งแสงสีขาว แสงสีเขียว และแสงสีแดง ตามลำดับ โดยออกแบบสูตรและหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเตรียมตัวอย่างแก้วแก้วอัลไลน์บอเรตด้วยวิธีหลอมและทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว พบว่าแก้วที่เจือ Dy_2O_3 Tb_2O_3 และ Eu_2O_3 มีค่าความหนาแน่น และปริมาตรเชิงโมลของแก้วเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ Dy_2O_3 Tb_2O_3 และ Eu_2O_3 ที่มากขึ้น จากการวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนแสง สเปกตรัมการถูกกระตุ้น และสเปกตรัมการเปล่งแสง โดยแก้วมีการดูดกลืนแสงในช่วงแสงที่ตามองเห็นไปจนถึงช่วงใกล้อินฟราเรด ช่วงความยาวคลื่นแสง 386 นาโนเมตร สามารถไปกระตุ้น Dy^{3+} แล้วทำให้เกิดการเปล่งแสงความยาวคลื่น 574 นาโนเมตร ออกมาได้เข้มที่สุด คือ ร้อยละ 0.5 โดยโมล เมื่อแก้วถูกกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 386 นาโนเมตร แก้วจะเกิดการเปล่งแสงในช่วงสีขาวออกมา ในส่วนช่วงความยาวคลื่นแสง 227 และ 377 นาโนเมตร สามารถไปกระตุ้นแก้วที่เจือด้วย Tb^{3+} แล้วทำให้เกิดการเปล่งแสงความยาวคลื่น 544 นาโนเมตร ออกมาได้เข้มที่สุด คือ ร้อยละ 4 โดยโมล เห็นได้ว่าแก้วเจือด้วย Tb_2O_3 ถูกกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 227 และ 377 นาโนเมตร แก้วจะเกิดการเปล่งแสงในช่วงสีเหลือง-เขียวออกมา ค่าเวลาการสลายตัวของแก้ว มีค่าลดลงตามความเข้มข้นของ Tb_2O_3 ที่เพิ่มขึ้น ในอีกทางหนึ่งช่วงแสงความยาวคลื่น 394 นาโนเมตร สามารถไปกระตุ้นแก้วที่เจือด้วย Eu^{3+} แล้วทำให้เกิดการเปล่งแสงความยาวคลื่น 613 นาโนเมตรได้ พบว่ามีเข้มที่สุด คือร้อยละ 3.0 โดยโมล แก้ว Eu_2O_3 ถูกกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 394 นาโนเมตร แก้วจะเกิดการเปล่งแสงในช่วงสีแดง-ส้มออกมา ทำให้ระบุได้ว่าแก้วชนิดนี้มีศักยภาพที่น่าสนใจต่อการนำไปศึกษาพัฒนา การค้นพบนี้ตอกย้ำศักยภาพที่เป็นไปได้ของสูตรแก้วนี้สำหรับการตรวจสอบและพัฒนาต่อไปในฐานะตัวกลางเลเซอร์ที่เป็นของแข็ง นอกจากนี้ยังมีโอกาสที่จะพัฒนาเป็นวัสดุทดแทนการเปล่งแสงสำหรับแอลอีดีได้

คำสำคัญ: แก้ว, เปล่งแสง, ธาตุหายาก, การดูดกลืนแสง

Abstract

This research project involves preparing alkaline borate glasses filled with Dy^{3+} Tb^{3+} and Eu^{3+} ions to develop white, green and red light-emitting materials, respectively. The designing the formula and finding the optimum conditions for preparing alkaline borate glass samples by melt quenching technique. It was found that the glass doped with Dy_2O_3, Tb_2O_3 and Eu_2O_3 had an increase in the density and molar volume of the glass. When the concentration of Dy_2O_3, Tb_2O_3 and Eu_2O_3 increases. By the analysis of the absorption spectrum, excitation spectrum and light emission spectrum. Glass could absorb light in the visible light to near-infrared range. The light wavelength range of 386 nm can stimulate Dy^{3+} and cause it to emit light with a wavelength of 574 nm, which is the most intense, which is 0.5 mol%. When the glass was excited by a wavelength of 386 nanometers, the glass will emit light in the white range. In the light wavelength range of 227 and 377 nm, glass doped with Tb^{3+} can be stimulated. After that, light with a wavelength of 544 nm will be emitted with the highest intensity, which is 4 mol%. When Tb_2O_3-doped glass is excited with wavelengths of 227 and 377 nm, it emits light in the yellow-green range. The decomposition time of glass decreased with increasing the concentration of Tb_2O_3. On the other hand, light of wavelength 394 nm can stimulate glass doped with Eu^{3+} to emit light of wavelength 613 nm. It was found to be the most intense at 3.0 mol%. Eu_2O_3 glass is excited with a wavelength of 394 nanometers. The glass will emit light in the red-orange range. It was determined that this type of glass has interesting potential for study and development. These findings underscore the promising potential of this glass formulation for further investigation and development as a solid laser medium. There is also the opportunity to develop it as a replacement light-emitting material for LEDs.

Keyword: Glass, Luminescence, Rare earth, Absorption of light

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้มีระยะเวลาการดาเนินการวิจัย 1 ปี ซึ่งได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) ประจาปีงบประมาณ พ.ศ. 2566 ทั้งนี้ยังได้รับความกรุณาจากคณาจารย์และบุคลากร หลายฝ่ายด้วยกัน คณะวิจัยขอขอบคุณ รศ.ดร.จักรพงษ์ แก้วขาว ที่มีบทบาทสำคัญในการให้คำปรึกษา ขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมสำหรับการสนับสนุนทุนวิจัยและมีส่วนช่วยทำให้การดำเนินการสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณสาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์และเครื่องมือวิจัย

อย่างไรก็ตามคณะวิจัยหวังว่างานวิจัยฉบับนี้จะทำให้เกิดคุณประโยชน์และมีคุณูปการต่อการศึกษาการหรืองานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องต่อไป

คณะผู้วิจัย

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญภาพ	ช
สารบัญตาราง	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ/หลักการและเหตุผล	1
1.2 วัตถุประสงค์ของชุดโครงการ	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	3
บทที่ 2 วิธีการดำเนินงาน	4
2.1 ความหมายของแก้ว	4
2.2 หลักการเกิดแก้ว	4
2.3 ชนิดของแก้ว	6
2.3.1. แก้วออกไซด์ (Oxide Glass)	6
2.3.2. แก้วฟลูออไรด์ (Fluoride Glass)	7
2.3.3. แก้วออกซีฟลูออไรด์ (Oxyfluoride Glass)	8
2.4 โครงสร้างของแก้ว	8
2.5 ธาตุแลนทาไนด์	9
2.6 ธาตุแลนทาไนด์ที่ใช้ในงานวิจัย	10
2.7 การเกิดสีของแก้ว	11
2.7.1. สีที่เกิดจากการดูดกลืนแสง	11
2.7.2. สีที่เกิดจากอนุภาคคอลลอยด์ (solid colloid) คอลลอยด์ (colloid)	11
2.7.3. สีที่เกิดจากอนุภาคขนาดเล็กที่มีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคในระดับโมเลกุล	12
2.8 ความหนาแน่นและปริมาตรเชิงโมล	12
2.8.1. การหาค่าความหนาแน่นโดยการชั่งน้ำหนัก	13
2.8.2. การหาปริมาตรเชิงโมล	13
2.9 การหักเหและค่าดรรชนีหักเหของแสง	14
2.9.1. การหักเหของแสง	14

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.9.2. ค่าดรรชนีหักแหของแสง	14
2.10 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของเครื่องยูวี-วิสเนียร์ไออาร์สเปกโทรโฟโตมิเตอร์	15
2.10.1. เครื่องตรวจวัดสำหรับการดูดกลืนแสง (UV-Vis-NIR Spectrophotometer)	15
2.10.2. ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องตรวจวัดสำหรับการดูดกลืนแสง	16
2.10.3. หลักการทำงานของเครื่องตรวจวัดสำหรับการดูดกลืนแสง (UV-Vis-NIR Spectrophotometer)	17
2.10.4. การดูดกลืนแสงของสารในความยาวคลื่นช่วงแสงที่มองเห็นได้	18
2.10.5. กฎการดูดกลืนแสง	19
2.11. ลูมิเนสเซนซ์ (Luminescence)	19
2.12. โฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence)	20
2.13 ทฤษฎี Judd-Ofelt	21
2.14 ทฤษฎีเลเซอร์ (Laser)	25
2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	29
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	33
3.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย	33
3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์	33
3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	33
3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย	34
3.2.1. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	34
3.2.2 การเตรียมแก้วตัวอย่าง	34
3.3 การวิเคราะห์ข้อมูลการวิจัย	36
3.3.1. แผนผังการวิเคราะห์ข้อมูล	36
3.3.2. ความหนาแน่นและปริมาตรเชิงโมล	37
3.3.3. วิธีการวัดค่าดรรชนีหักเหแสง	38
3.3.4. การดูดกลืนแสง	39
3.3.5. การเปล่งแสงของแก้ว	40
3.3.6. การวิเคราะห์ Judd-Ofelt	40
บทที่ 4 ผลการวิจัย	41
4.1 แก้วลิเธียมโซเดียมโพแทสเซียมบอเรตที่เจือด้วย Dy_2O_3	41
4.2 แก้วลิเธียมโซเดียมโพแทสเซียมบอเรตที่เจือด้วย Tb_2O_3	53
4.3 แก้วลิเธียมโซเดียมโพแทสเซียมบอเรตที่เจือด้วย Eu_2O_3	59
บทที่ 5 สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	70
5.1. แก้วลิเธียมโซเดียมโพแทสเซียมบอเรตที่เจือด้วย Dy_2O_3	70

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
5.2. แก้วลิเธียมโซเดียมโพแทสเซียมบอเรตที่เจือด้วย Tb_2O_3	71
5.3. แก้วลิเธียมโซเดียมโพแทสเซียมบอเรตที่เจือด้วย Eu_2O_3	71
บรรณานุกรม	72
ประวัตินักวิจัย	77

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	โครงสร้างของผลึกซิลิเกตและแก้วซิลิเกต	5
2.2	แผนภาพ V-T diagram	6
2.3	การหักเหและการสะท้อนของแสง	14
2.4	การวัดตรวจสารด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer	16
2.5	ส่วนประกอบของเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer	17
2.6	หลักการทำงานเครื่องตรวจวัดสารด้วยการดูดกลืนแสง	18
2.7	แถบสเปกตรัมของแสงที่อยู่ในช่วงของแสงที่มองเห็นได้	18
2.8	แผนภาพ Jablonski Diagram	21
2.9	การเปลี่ยนชั้นพลังงานของอะตอมแบบดูดกลืนแสง (ก) และเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง (ข)	26
2.10	โครงสร้างพื้นฐานของเครื่องกำเนิดเลเซอร์	28
3.1	แผนผังแสดงวิธีการดำเนินงานวิจัย	34
3.2	แผนภาพการเตรียมแก้วตัวอย่าง	36
3.3	แผนผังการวิเคราะห์ข้อมูล	37
3.4	เครื่องวัดความหนาแน่น (Densitometer) รุ่น AND HR-200 บริษัท Dietheim	38
3.5	เครื่องวัดค่าดรรชนีหักเห รุ่น DR-M2 บริษัท Atago	39
3.6	เครื่อง UV-Vis-NIR Spectrophotometer รุ่น UV-3600 บริษัท Bara Scientific	39
3.7	เครื่อง Fluorescence Spectrophotometer รุ่น Cary Eclipse บริษัท Varian	40
3.8	แผนผังการวิเคราะห์ Judd-Ofelt (JO)	40
4.1	ลักษณะของแก้วตัวอย่าง LNKB ที่เจือด้วย Dy_2O_3	41
4.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของแก้วตัวอย่างกับปริมาณความเข้มข้นของ Dy_2O_3	42
4.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรเชิงโมลกับปริมาณความเข้มข้นของ Dy_2O_3	43
4.4	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของแก้วตัวอย่าง LNKB ที่เจือด้วย Dy_2O_3 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	44

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.5	สเปกตรัมการกระตุ้นแสงของแก้วตัวอย่าง LNKB ที่เจือด้วย Dy_2O_3 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	45
4.6	สเปกตรัมการเปล่งแสงจากการกระตุ้นด้วยแสงของแก้วตัวอย่าง LNKB ที่เจือด้วย Dy_2O_3 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	46
4.7	การเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงานของ Dy^{3+} เติมในแก้ว LNKB ตามสเปกตรัมการเปล่งแสง	47
4.8	สีของการเปล่งแสงในระบบ CIE 1931 ของ Dy^{3+} เติมในแก้ว LNKB	48
4.9	ลักษณะของแก้วตัวอย่าง LNKB ที่เจือด้วย Tb_2O_3	53
4.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น ปริมาตรเชิงโมลและดรรชนีหักเหของแก้วตัวอย่างกับปริมาณความเข้มข้นของ Tb_2O_3	54
4.11	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของแก้วตัวอย่าง LNKB ที่เจือด้วย Tb_2O_3 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	55
4.12	สเปกตรัมการกระตุ้นแสงของแก้วตัวอย่าง LNKB ที่เจือด้วย Tb_2O_3 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	56
4.13	สเปกตรัมการเปล่งแสงของแก้วตัวอย่าง LNKB ที่เจือด้วย Tb_2O_3 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	57
4.14	การเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงานของ Tb^{3+} เติมในแก้ว LNKB ตามสเปกตรัมการเปล่งแสง	57
4.15	สีของการเปล่งแสงในระบบ CIE 1931 ของ Tb^{3+} เติมในแก้ว LNKB	58
4.16	เวลาการสลายตัวของ Tb^{3+} เติมในแก้ว LNKB	59
4.17	ลักษณะของแก้วตัวอย่าง LNKB ที่เจือด้วย Eu_2O_3	59
4.18	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของแก้วตัวอย่างกับปริมาณความเข้มข้นของ Eu_2O_3	60
4.19	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรเชิงโมลกับปริมาณความเข้มข้นของ Eu_2O_3	61
4.20	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของแก้วตัวอย่าง LNKB ที่เจือด้วย Eu_2O_3 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	62
4.21	สเปกตรัมการกระตุ้นแสงของแก้วตัวอย่าง LNKB ที่เจือด้วย Eu_2O_3 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	63

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.22	สเปกตรัมการเปล่งแสงของแก้วตัวอย่าง LNKB ที่เจือด้วย Eu_2O_3 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	64
4.23	สีของการเปล่งแสงในระบบ CIE 1931 ของ Eu^{3+} เติมในแก้ว LNKB	65

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	การเรียงอิเล็กตรอนในธาตุกลุ่มแลนทาไนด์และจำนวนอิเล็กตรอนใน 4f ที่สถานะ ออกซิเดชันต่าง ๆ	10
2.2	ความหมายของตัวแปร J-O	23
3.1	ปริมาณสารเคมีที่ต้องชั่งสำหรับการหลอมแก้ว Li_2O-Na_2O-K_2O-B_2O_3 ที่เจือด้วย Dy_2O_3 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	35
3.2	ปริมาณสารเคมีที่ต้องชั่งสำหรับการหลอมแก้ว Li_2O-Na_2O-K_2O-B_2O_3 ที่เจือด้วย Tb_2O_3 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	35
3.3	ปริมาณสารเคมีที่ต้องชั่งสำหรับการหลอมแก้ว Li_2O-Na_2O-K_2O-B_2O_3 ที่เจือด้วย Eu_2O_3 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	35
4.1	ค่าความแรงของการสั่นที่ได้จากการทดลอง (f_{exp}) และที่คำนวณได้ (f_{cal}) ของการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานเนื่องจากการดูดกลืนแสงในแก้วลิเธียมโซเดียมโพแทสเซียมบอเรตที่เจือด้วย Dy_2O_3 ที่ความเข้มข้น 0.5 mol%	50
4.2	ค่าตัวแปร J-O (Ω_2, Ω_4 และ Ω_6) ของแก้วลิเธียมโซเดียมโพแทสเซียมบอเรตที่เจือด้วยด้วย Dy_2O_3 ที่ความเข้มข้น 0.5 mol% ในงานวิจัยนี้เปรียบเทียบค่าตัวแปร J-O ของแก้วอื่น ๆ ที่มีการเจือด้วย Dy_2O_3	51
4.3	ความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานแล้วทำให้เกิดการเปล่งแสง (A_R) ภาคตัดขวางของการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น ($\sigma(\lambda_p)$) และสัดส่วนการเปล่งแสง (β_R) ของแก้วลิเธียมโซเดียมโพแทสเซียมบอเรตที่เจือด้วยด้วย Dy_2O_3 ที่ความเข้มข้น 0.5 mol%	52
4.4	ค่าความแรงของการสั่นที่ได้จากการทดลอง (f_{exp}) และที่คำนวณได้ (f_{cal}) ของการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานจากการดูดกลืนแสงในแก้วลิเธียมโซเดียมโพแทสเซียมบอเรตเจือด้วย Eu_2O_3 ที่ความเข้มข้น 3.0 mol%	67
4.5	ค่าตัวแปร J-O (Ω_2, Ω_4 และ Ω_6) ของแก้วลิเธียมโซเดียมโพแทสเซียมบอเรตที่เจือด้วยด้วย Eu_2O_3 ที่ความเข้มข้น 3.0 mol% ในงานวิจัยนี้เปรียบเทียบค่าตัวแปร J-O ของแก้วอื่น ๆ ที่มีการเจือด้วย Eu_2O_3	68

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.6	ความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานแล้วทำให้เกิดการเปล่งแสง (A_R) ภาคตัดขวางของการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น ($\sigma(\lambda_p)$) และสัดส่วนการเปล่งแสง (β_R) ของแก้ว ลิเธียมโซเดียมโพแทสเซียมบอเรตที่เจือด้วยด้วย Eu_2O_3 ที่ความเข้มข้น 3.0 mol%	69

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ/หลักการและเหตุผล

แก้วเป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจในทางอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก นอกจากคุณสมบัติพื้นฐาน ได้แก่ มีความโปร่งแสง ทนต่อปฏิกิริยาเคมี ทนอุณหภูมิสูง ทนต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ เป็นฉนวนไฟฟ้า และสามารถทำให้เป็นรูปทรงต่าง ๆ ได้อย่างหลากหลาย แล้วแก้วยังสามารถผลิตขึ้นได้อย่างไม่ยากด้วยเทคโนโลยีที่ไม่ซับซ้อน ทั้งยังสามารถเลือกสารเคมีต่าง ๆ มาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตแก้วเพื่อปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ของแก้วที่ได้ (เช่น สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางโครงสร้าง สมบัติทางแสง รวมถึงคุณสมบัติพิเศษอื่น ๆ) ให้มีความหลากหลาย เหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้งานที่ ต่าง ๆ กันออกไป (กรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2559: ออนไลน์)

แก้วบอเรต (borate glass) เป็นหนึ่งในแก้วที่มีข้อดีหลายประการ เช่น มีจุดหลอมเหลวที่ไม่สูงมากทำให้ง่ายต่อการผลิต แก้วที่ได้มีความโปร่งใส ทนความร้อนสูง มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำ อีกทั้งยังเป็นแก้วที่มีความเหมาะสมในการเติมออกไซด์ของธาตุหายาก (rare earth oxides) เข้าไปในแก้วได้ดีอีกด้วย (ประสิทธิ์ ปุระชาติ, 2559: ออนไลน์) ซึ่งการเติมธาตุหายากบางชนิดลงไปในแก้ว จะทำให้เกิดปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์ (photoluminescence) ที่ดีมาก ซึ่งทำให้แก้วนั้นเหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้ในทำเป็นอุปกรณ์พิเศษต่าง ๆ เช่น วัสดุแสดงผล (display devices) อุปกรณ์เชิงแสง (photonic devices) อุปกรณ์ออปโต้อิเล็กทรอนิกส์ (opto-electronic devices) และ ตัวเปล่งแสงของแข็ง (solid-state lighting) เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม แก้วบอเรตที่ไม่ได้เติมสารอะไรเลยกลับมีสมบัติทางแสงที่ยังไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งานประยุกต์ทางด้านต่าง ๆ ซึ่งการปรับปรุงสมบัติแก้วนั้นทำได้โดยเติมสารที่เหมาะสมลงไป เช่นในกรณีของลิเธียมออกไซด์ (Li_2O) และโพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) ช่วยให้การตกผลึกเป็นไปอย่างช้าๆ ทำให้การเรียงตัวของผลึกออกมาสวยงาม โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ช่วยลดอุณหภูมิการหลอมเหลวของแก้ว แต่ถ้ามีปริมาณโซเดียมออกไซด์สูงมากจนเกินไปจะสามารถละลายน้ำได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสูตรของแก้วแต่ละชนิดด้วย

การเจือธาตุหายากในแก้วส่งผลให้แก้วมีคุณสมบัติการเปล่งแสงเกิดขึ้น การเปล่งแสงของไอออนของธาตุหายากสัมพันธ์กับการทรานซิชันของระดับชั้นพลังงาน 4f-4f และ 4f-5d โดยที่ระดับพลังงาน 4f-4f ให้รูปแบบการเปล่งแสงในช่วงแสงที่ตามองเห็นจนถึงรังสีอินฟราเรดบางส่วนที่ชัดเจนกว่ากลุ่มของธาตุทรานซิชัน (transition group) (Zhang et al., 2010: 777-780) เนื่องจากระดับชั้นพลังงาน 4f ถูกป้องกันผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมด้วยระดับชั้นพลังงาน 5s และ 5p

(Lakshminarayana et al., 2009: 1506-1512) แก้วที่เจือธาตุหายากได้รับความสนใจเนื่องจากสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในวัสดุทางแสงได้หลากหลาย เช่น เลเซอร์ทางการแพทย์ จอแสดงภาพสามมิติ หน่วยความจำแสง และหลอดเรืองแสง เป็นต้น

กลุ่มธาตุแลนทาไนด์ที่เจือในวัสดุแก้วถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง ตั้งแต่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมเป็นโลหะผสมในอุตสาหกรรมเซรามิค ไปจนถึงการนำไปใช้ในการผลิตสารเรืองแสง เนื่องจากการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสงมีความชัด ตัวอย่างเช่น ดิสโพรเซียม (Dysprosium: Dy^{3+}) เหมาะสำหรับประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเปล่งแสงสีขาว เช่น หลอดไฟ LED วัสดุเปล่งแสงสีเหลืองและน้ำเงิน เทอร์เบียม (Terbium: Tb^{3+}) สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุตัวกลางเลเซอร์ในอุปกรณ์เลเซอร์ของแข็งที่เปล่งแสงสีเขียว และวัสดุซินทิลเลเตอร์ในหัววัดรังสีอัลตราไวโอเลตและรังสีเอกซ์โหมดอินทิเกรชัน ยูโรเพียม (Europium: Eu^{3+}) เหมาะสำหรับประยุกต์ใช้เป็นสารเรืองแสงสีแดง สำหรับจอโทรทัศน์ และคอมพิวเตอร์ หลอดไฟฟลูออเรสเซนซ์

จากความสำคัญที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้จึงเป็นการพัฒนาระบบแก้วที่เติมธาตุแลนทา-ไนด์ ได้แก่ Dy^{3+}, Tb^{3+} และ Eu^{3+} เพื่อพัฒนาเป็นวัสดุเปล่งแสง จากระบบแก้วบอเรต ด้วยเทคนิคการหลอมละลายและทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว (melt quenching) สำหรับประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ทางแสง โดยจะพัฒนาสูตรแก้วที่เหมาะสมและเติมธาตุแลนทาไนด์ลงไปในแก้ว จากนั้นทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางแสง และสมบัติการเปล่งแสงของแก้วตัวอย่าง เพื่อเป็นฐานข้อมูลทางวัสดุที่สำคัญในการพัฒนา และประยุกต์ใช้สำหรับเป็นวัสดุตัวกลางเลเซอร์ในระดับสูงต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของชุดโครงการ

1) เพื่อเตรียมแก้วบอเรต ที่เจือด้วย Dy^{3+}, Tb^{3+} และ Eu^{3+} ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

2) เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางแสง และสมบัติการเปล่งแสงของแก้วบอเรต ที่เจือด้วย Dy^{3+}, Tb^{3+} และ Eu^{3+} ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาและเตรียมแก้วจากระบบแก้วทั้งหมด 3 สูตร

สูตรที่ 1: $10Li_2O$-$10Na_2O$-$10K_2O$-$(70-x)B_2O_3$-xDy_2O_3 โดยที่ x เท่ากับ 0.0, 0.1, 0.5, 1.0 และ 2.0 ร้อยละโดยโมล (mol%) ตามลำดับ

สูตรที่ 2: $10Li_2O$-$10Na_2O$-$10K_2O$-$(70-x)B_2O_3$-xTb_2O_3 โดยที่ x เท่ากับ 0, 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 ร้อยละโดยโมล (mol%) ตามลำดับ

สูตรที่ 3: $10Li_2O$-$10Na_2O$-$10K_2O$-$(70-x)B_2O_3$-xEu_2O_3 โดยที่ x เท่ากับ 0, 0.5, 1.0, 3.0 และ 5.0 ร้อยละโดยโมล (mol%) ตามลำดับ โดยนำไปหลอมที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส (°C) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และอบที่อุณหภูมิ 500 °C เวลา 3 ชั่วโมง

2. ศึกษาสมบัติของแก้ว ดังต่อไปนี้

2.1 ความหนาแน่น โดยใช้เครื่องชั่งหาความหนาแน่นโดยใช้หลักการของ Archimedes

2.2 ปริมาตรเชิงโมล จากการคำนวณและการวิเคราะห์โครงสร้างของแก้ว

2.3 ค่าดัชนีหักเหของแสง โดยใช้เครื่อง Abbe Refractrometer

2.4 การดูดกลืนแสง โดยใช้เครื่อง UV-Vis-NIR Spectrophotometer

2.5 การเปล่งแสงโดยการกระตุ้นด้วยแสง โดยใช้เครื่อง Cary-Eclipse Fluorescence Spectrometer

2.6 การศึกษาศักยภาพสำหรับเป็นวัสดุตัวกลางเลเซอร์ โดยใช้ทฤษฎี Judd-Ofelt (JO)

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความหมายของแก้ว

แก้ว คือ วัสดุที่ถูกทำขึ้นจากสารอนินทรีย์ มีความแข็ง มีลักษณะอยู่ตัว และเป็นเนื้อเดียว ส่วนมากจะมีความโปร่งใส ทนทานต่อความร้อนและสภาพารกัดกร่อน จึงมักถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างมากมาย โดยปกติแก้วเกิดจากการเย็นตัวลงอย่างฉับพลันของวัสดุที่หลอมหนืดด้วยความร้อนสูง ซึ่งทำให้การแข็งตัวนั้นไม่ก่อให้เป็นผลึก แก้วจึงจัดเป็นวัสดุอสัณฐานที่มีโครงสร้างไม่แน่นอนและมีโมเลกุลที่เรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ โดยทั่วไปแก้วจะอ่อนตัวที่ช่วงอุณหภูมิค่อนข้างกว้างและพบว่าสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแก้วขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารประกอบต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบในแก้วนั้น (กรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2559: ออนไลน์)

โดยทั่วไปส่วนประกอบทางเคมีของแก้วประกอบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon Dioxide, SiO_2) โบรอนออกไซด์ (Boron Oxide, B_2O_3) โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium Carbonate, Na_2CO_3) แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate, $CaCO_3$) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต (Magnesium Carbonate, $MgCO_3$) มีลักษณะโปร่งแสงและมีความเปราะหากพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพแล้ว แก้วจะหมายถึงวัสดุที่มีความแข็ง (hard) โปร่งใส (transparent) เปราะ (brittle) มีความแววาว (relative) มีจุดหลอมละลายสูง (high softening point) ไม่ละลายในน้ำและในสารละลายใด ๆ (insoluble in water and organic solvents) อีกทั้งไม่ติดไฟ (non inflammable) (ประสิทธิ์ ปุระชาติ, 2559: ออนไลน์)

2.2 หลักการเกิดแก้ว

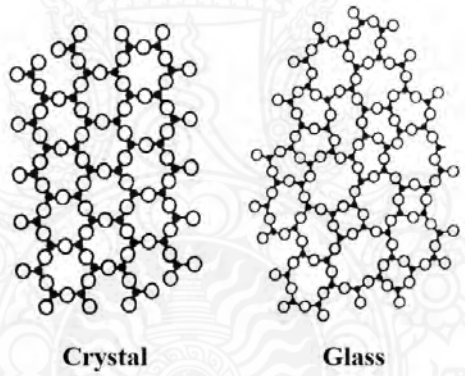
แก้วเป็นวัสดุที่เรียกว่า Vitreous Material ซึ่งเป็นผลมาจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของของเหลว (super-cooled liquid) โดยเกิดการเย็นตัวต่ำกว่าจุดที่มีการตกผลึกแก้วเป็นของเหลวที่มีความหนืดสูงมาก ซึ่งแสดงได้โดยการพิจารณาจากข้อเท็จจริง ดังต่อไปนี้

1. แท่งแก้วเกิดการเสียรูปอย่างมากที่สุดและโค้งงอเมื่อถูกแขวนห้อยอยู่ระหว่างจุดรองรับ 2 จุด

2. ในระหว่างการให้ความร้อนแก้วจะเกิดการอ่อนนิ่มและกลายเป็นของเหลวเมื่อเกินช่วงอุณหภูมิแต่จะไม่แสดงจุดหลอมตัว (melting point) ที่แน่นอน

โดยปกติของแข็งจะเป็นผลึกและมีการจัดเรียงตัวของอะตอมและโมเลกุลที่แน่นอน ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นโดยรูปแบบการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ (x-ray diffraction) อย่างไรก็ตามการเคลือบนั้นจะไม่มีโครงสร้างที่แน่นอนอะตอมถูกเรียงตัวในลักษณะอิสระ ซึ่งอาจจะดูได้จากการเปรียบเทียบโครงสร้างของผลึกแร่ซิลิเกตกับผลึกเคลือบ

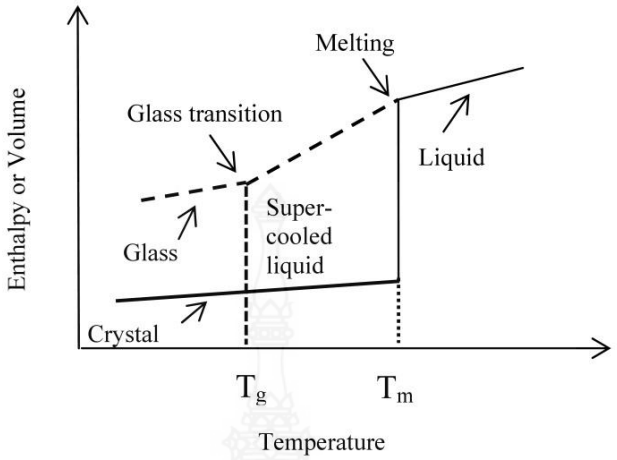
หน่วยของโครงสร้างคือซิลิกอนเตตระฮีดรอนรูปร่างนี้ถูกควบคุมโดยขนาดของอะตอม จากการเปรียบเทียบกันขนาดอะตอมของออกซิเจนเท่ากับ 1.32 และของซิลิกอนเท่ากับ 0.39 ตัวอย่างโครงสร้างของผลึกซิลิเกตและแก้วซิลิกา แสดงไว้ในภาพที่ 2.1 ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงความแตกต่างในโครงสร้างของมัน (ภัทรวรรณ เฉยเจริญ, 2559: ออนไลน์)



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของผลึกซิลิเกตและแก้วซิลิเกต
ที่มา (Rao, 2002)

โครงสร้างของเคลือบและแก้วมีเครือข่ายแบบสามมิติที่ไม่เป็นระเบียบและไม่มีชุดการจัดเรียงอะตอม (unit) ที่ซ้ำ ๆ กันในระหว่างการให้ความร้อนเคลือบจะหลอมตัวเหนือช่วงอุณหภูมิที่ได้รับ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณของพลังงานที่ต้องการให้ส่วนที่แตกต่างกันของโครงสร้างตาข่ายนั้นแยกออกจากกัน ซึ่งไม่เทียบเท่ากับโครงสร้างช่องว่างภายในโครงสร้างตาข่ายอาจจะถูกเติมเต็มด้วยอะตอมของธาตุอื่น ๆ ซึ่งจะช่วยในการปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพอย่างเช่น สี ความสุกใสของการเคลือบ และอื่น ๆ

การเกิดแก้วสามารถอธิบายได้ด้วย แผนภาพระหว่างปริมาตรกับอุณหภูมิ (V-T diagram) ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 แผนภาพ V-T diagram

ที่มา (Yamak, 2013: online)

จากแผนภาพจะเห็นว่า สำหรับการเกิดเป็นผลึก (crystal) เมื่ออุณหภูมิลดลงเรื่อย ๆ จนถึงจุดหนึ่งปริมาตรจะลดลงอย่างรวดเร็ว (ตามเส้นทึบ) นั่นคือเกิดการตกผลึกกลายเป็นของแข็งที่จุดหลอมเหลว (T_m) แต่สำหรับการเกิดแก้ว (glass) เมื่ออุณหภูมิลดลงเรื่อย ๆ จนต่ำกว่าจุด T_m ก็จะไม่เกิดการตกผลึก แต่จะเปลี่ยนสภาพไปอยู่ในสถานะที่เรียกว่า Super-cooled Liquid ซึ่งทำให้ปริมาตรค่อย ๆ ลดลง (ตามเส้นประ) จนกระทั่งอุณหภูมิลดมาถึงจุดที่เรียกว่า Glass Transition Temperature (T_g) จึงเกิดการเปลี่ยนสภาพเป็นแก้วในที่สุด โดยคุณสมบัติของแก้วนั้นจะขึ้นอยู่กับสารชนิดต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบในแก้ว ทำให้ลักษณะพันธะในแก้วเปลี่ยนแปลงไปซึ่งจะส่งผลไปยังลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของแก้วนั้นด้วย (Varshneya, 1994: online)

2.3 ชนิดของแก้ว

การแบ่งชนิดหรือประเภทของแก้ว แบ่งได้หลายรูปแบบ เช่น แบ่งตามกรรมวิธีการผลิตองค์ประกอบทางเคมีหรือตามวัตถุประสงค์ของการใช้งานเป็นต้น

2.3.1. แก้วออกไซด์ (Oxide Glass)

แก้วออกไซด์คือแก้วที่เกิดจากสารประกอบออกซิเจนรวมกับธาตุอื่น ๆ เช่น B_2O_3, SiO_2, Na_2O, BaO, Al_2O_3 โดยแก้วออกไซด์จะถูกแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ ประเภทที่สามารถเกิดเป็นแก้วได้โดยเอง ประเภทที่สองคือใส่ไปเพื่อทำลายพันธะ ประเภทที่สาม คือ สามารถเกิดเป็นแก้วได้ด้วยตัวเองและสามารถทำลายพันธะได้ ขึ้นอยู่กับสารประกอบออกไซด์ที่ใส่ลงไปซึ่งแก้วออกไซด์จะมีความแข็งและทนต่อสารเคมี

แต่มีประสิทธิภาพในการเปล่งแสงน้อยกว่าแก้วฟลูออไรด์ (สมิต อินทร์ศิริพงษ์ และคณะ, 2559: 45) โดยงานวิจัยนี้มีแก้วออกไซด์คือ

1 บอเรต (B_2O_3) เนื่องเป็นสารประกอบออกไซด์ที่ทำหน้าที่เป็นโครงข่ายของแก้วและแก้วบอเรตยังมีความแข็ง ความโปร่งใสสูง ใช้อุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ มีเสถียรภาพทางความร้อนสูง มีความคงทนต่อกรดด่าง โครงสร้างของบอเรตสามารถเกิดได้ 2 แบบ คือ แบบสามเหลี่ยมแบนราบ (triangles) แต่ถ้าเติมไอออนบวกลงไป เช่น ธาตุหมู่อัลคาไลน์และหมู่อัลคาไลน์เอริ์ทจะทำให้โครงสร้างเปลี่ยนเป็นแบบทรงสี่หน้า (tetrahedral) (Yan et al., 2007: 105-112)

2 โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) เนื่องจากเป็นสารประกอบออกไซด์ประเภททำลายพันธะดังนั้นจึงมีการใส่โซเดียมออกไซด์ไปเพื่อทำลายพันธะของแก้วหลัก เนื่องจากการเติมโซเดียมออกไซด์ซึ่งมีขนาดใหญ่ลงไปในแก้วหลัก จะทำให้โครงข่ายของแก้วเกิดการแตกออก จึงส่งผลให้อุณหภูมิในการหลอมแก้วลดลง (Sugawara et al., 2013: 371-372)

3 แบเรียมออกไซด์ (BaO) เป็นสารประกอบออกไซด์อีกตัวหนึ่งที่ทำหน้าที่ทำลายพันธะจะช่วยในการขึ้นรูป ทำให้แก้วคงตัวเร็วขึ้นเมื่อเย็นลง และเพิ่มความทนต่อสารเคมี และแบเรียมออกไซด์ยังมีสมบัติในการลดพลังงานโฟนอน ส่งผลให้ประสิทธิภาพการเปล่งแสงในแก้วเพิ่มขึ้น (Delgado et al., 2019: 268-275)

2.3.2. แก้วฟลูออไรด์ (Fluoride Glass)

แก้วฟลูออไรด์ คือ แก้วที่เกิดจากสารประกอบฟลูออไรด์รวมกับธาตุอื่น ๆ เช่น NaF, BeF_2 โดยแก้วฟลูออไรด์จะมีศักยภาพเป็นโฮสต์สำหรับการเติมธาตุหายากที่ดีและแก้วฟลูออไรด์ยังมีพลังงานโฟนอนต่ำ โดยพลังงานโฟนอน คือ การสูญเสียพลังงานเนื่องจากการสั่นหรือเรียกว่าพลังงานความร้อนที่ไม่เกิดแสง จึงส่งผลให้แก้วฟลูออไรด์มีประสิทธิ์การเปล่งแสงสูงกว่าแก้วออกไซด์ (สมิต อินทร์ศิริพงษ์ และคณะ, 2559: 45) โดยงานวิจัยนี้มีสารประกอบฟลูออไรด์คือ โซเดียมฟลูออไรด์ (NaF) เนื่องจากฟลูออไรด์ไอออนทำปฏิกิริยากับกลุ่มไฮดรอกซิล (OH group) จนกระทั่งเกิดเป็นไฮโดรเจนฟลูออไรด์ (HF) การลดลงของกลุ่มไฮดรอกซิล จะเพิ่มประสิทธิภาพในการเปล่งแสงของแก้วอีกด้วย นอกจากนี้ NaF ยังมีหน้าที่ทำลายพันธะส่งผลให้อุณหภูมิในการหลอมลดลงและลดฟองอากาศของแก้ว (Li et al., 2016: 87-94)

2.3.3. แก้วออกซีฟลูออไรด์ (Oxyfluoride Glass)

แก้วที่มีองค์ประกอบของสารประกอบออกไซด์และสารประกอบฟลูออไรด์ โดยการแทนที่สารประกอบออกไซด์บางตัวด้วยสารประกอบฟลูออไรด์ลงไป สารฟลูออไรด์ช่วยทำให้แก้วโปร่งแสงในช่วงที่ตามองเห็นรวมไปถึงการมีสมบัติต้านความชื้นและลดพลังงานโฟนอนส่งผลให้ประสิทธิภาพการเปล่งแสงของแก้วเพิ่มขึ้น และยังมีค่าดัชนีหักเหสูงเพราะสามารถเติมธาตุหายากลงไปในสารประกอบออกซีฟลูออไรด์ได้มากถึง 60% และยังพบว่าฟลูออไรด์ไอออนทำปฏิกิริยากับกลุ่มไฮดรอกซิล (OH group) จนกระทั่งเกิดเป็นไฮโดรเจนฟลูออไรด์ (HF) การลดลงของกลุ่มการลดลงของกลุ่มไฮดรอกซิล ยังเพิ่มประสิทธิภาพในการเปล่งแสงของแก้วอีกด้วย (สมิต อินทร์ศิริพงษ์ และคณะ, 2559: 45)

2.4 โครงสร้างของแก้ว

โครงสร้างของแก้วอาจแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม ตามชนิดของแก้ว (จิราพันธ์ ดรรชนีเพชร, 2554)ดังนี้

1. Glass Formers

มีหน้าที่สร้างโครงข่ายหลักให้กับแก้ว เช่น ซิลิกา (SiO_2) ซึ่งเป็นหน่วยย่อยพื้นฐานของแก้วซิลิกา มีไอออนของซิลิกอนอยู่ตรงกลางของรูปทรงเตตระฮีดรอน (tetrahedron) เกิดพันธะโคเวเลนต์ไอออนิกกับไอออนของออกซิเจนอีก 4 ไอออน เป็นพันธะโครงข่ายอย่างหลวม ๆและไม่เป็นระเบียบ โบรอนออกไซด์ (B_2O_3) และฟอสฟอรัสออกไซด์ (P_2O_5) ก็จัดเป็น Glass Formers เช่นกัน

2. Intermediates

ออกไซด์ของสารประกอบบางชนิดไม่สามารถเกิดโครงสร้างโครงข่ายของแก้วได้ด้วยตัวเอง แต่สามารถเข้าไปร่วมกับโครงสร้างโครงข่ายที่มีอยู่ ออกไซด์ของสารประกอบเหล่านี้ถูกเรียกว่า Intermediate Oxides เช่น อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) สามารถเข้าไปร่วมกับโครงสร้างโครงข่ายของแก้วได้ ทำให้แก้วมีสมบัติพิเศษ เช่น แก้ว Aluminoborosilicate นี้จะทนต่ออุณหภูมิที่สูงได้ดีกว่าแก้วธรรมดา

3. Modifiers

เมื่อเติมสารบางชนิดลงไปในแก้ว จะทำให้โครงสร้างโครงข่ายของแก้วบางส่วนถูกทำลาย เรียกสารเหล่านี้ว่า Network Modifier เช่น โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) โพแทสเซียมออกไซด์ (K2O) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) เป็นต้น เมื่อโครงสร้างโครงข่ายของแก้วบางส่วนแตกออกจะทำ

ให้ความหนืดของแก้วลดลง และสามารถนำไปขึ้นรูปได้ง่าย อะตอมของออกซิเจนจากออกไซด์เหล่านี้จะเข้าสู่โครงสร้างโครงข่ายที่จุดเชื่อมต่อระหว่าง เตตระฮีดรอน และทำลายโครงสร้างโครงข่ายนั้นทำให้เกิดอะตอมของออกซิเจนที่มีอิเล็กตรอนไม่มีคู่ขึ้น ส่วนไอออน เช่น Na^+ จาก Na_2O และ K^+ จาก K_2O จะไม่สามารถเข้าไปในโครงสร้างโครงข่ายนี้ได้ แต่จะยังคงอยู่ในรูปของไอออนและเกิดพันธะไอออนิกภายในโครงสร้างโครงข่ายนั้น โดยไอออนเหล่านี้จะส่งเสริมให้แก้วเกิดผลึกภายในโครงสร้างได้

2.5 ธาตุแลนทาไนด์

ธาตุหายากประกอบไปด้วย ธาตุ 14 ชนิดในตารางธาตุ โดยการที่เรียกธาตุเหล่านี้ว่าเป็นธาตุหายากนั้นเนื่องจากการที่จะค้นพบธาตุบนโลกเป็นไปได้ยาก และธาตุเหล่านี้มีปริมาณน้อยกว่าธาตุทั่วไปในธรรมชาติ นอกจากนี้ธาตุหายากยังมีสมบัติทางแสงที่มีลักษณะเฉพาะจึงถูกนำไปใช้ในอุปกรณ์ทางแสงที่หลากหลาย โดยธาตุหายากจะมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าธาตุแลนทาไนด์ ซึ่งอยู่คาบที่ 6 ของตารางธาตุ ตั้งแต่ธาตุแลนทานัมจนถึงอิตเทอร์เบียม โดยธาตุกลุ่มแลนทาไนด์จะอยู่ในกลุ่ม f ดังนั้นจึงมีการจัดเรียงอิเล็กตรอนในระดับชั้นพลังงาน 4f และพบว่าที่ชั้นพลังงาน 4f และ 5d มีระดับพลังงานที่เท่ากันทำให้มีการสับสนในการจัดเรียงอิเล็กตรอน จึงได้มีการศึกษาสเปกตรัมการเปล่งแสงแล้วพบว่าธาตุกลุ่มแลนทาไนด์จะมีการจัดเรียงอิเล็กตรอน 2 แบบ คือลักษณะแรกจะมีการจัดเรียงอิเล็กตรอนแบบ $4f^n\ 5d^1\ 6s^2$ ลักษณะที่สองจะมีการจัดเรียงอิเล็กตรอนแบบ $4f^{n+1}\ 6s^2$ เมื่อพิจารณาจากข้อมูลการจัดเรียงอิเล็กตรอนในตารางที่ 2.1 พบว่าธาตุส่วนใหญ่จะใช้การจัดเรียงอิเล็กตรอนแบบ $4f^{n+1}\ 6s^2$ ส่วนธาตุ Ce Gd และ Lu จะมีการจัดเรียงแบบ $4f^n\ 5d^1\ 6s^2$ เนื่องจาก Gd มีการจัดเรียงอิเล็กตรอนคือ [Rn] $4f^7\ 5d^1\ 6s^2$ การที่ Gd ไม่จัดเรียงอิเล็กตรอนแบบ $4f^8\ 6s^2$ เพราะว่าการจัดเรียงอิเล็กตรอนถ้าจะให้มีความเสถียรจะต้องบรรจุอิเล็กตรอนแบบเติมเต็มครึ่งหรือแบบเติมเต็มซึ่งจะเป็นไปตามกฎของฮุนด์ ดังนั้น $4f^7$ จึงมีความเสถียรกว่า $4f^8$ (Munhoz et al., 2019: 379-389)

ตารางที่ 2.1 การเรียงอิเล็กตรอนในธาตุกลุ่มแลนทาไนด์และจำนวนอิเล็กตรอนใน 4f ที่สถานะ ออกซิเดชันต่าง ๆ

ธาตุ	เลขอะตอม (z)	การจัดเรียงอิเล็กตรอน	เลขออกซิเดชัน 3+
Ce	58	$4f^1\ 5d^1\ 6s^2$	4f
Pr	59	$4f^3\ 6s^2$	$4f^2$
Nd	60	$4f^4\ 6s^2$	$4f^3$
Pm	61	$4f^5\ 6s^2$	$4f^4$
Sm	62	$4f^6\ 6s^2$	$4f^5$
Eu	63	$4f^7\ 6s^2$	$4f^6$
Gd	64	$4f^7\ 5d^1\ 6s^2$	4f7
Tb	65	$4f^9\ 6s^2$	$4f^8$
Dy	66	$4f^{10}\ 6s^2$	$4f^9$
Ho	67	$4f^{11}\ 6s^2$	$4f^{10}$
Er	68	$4f^{12}\ 6s^2$	$4f^{11}$
Tm	69	$4f^{13}\ 6s^2$	$4f^{12}$
Yb	70	$4f^{14}\ 6s^2$	$4f^{13}$
Lu	71	$4f^{14}\ 5d^1\ 6s^2$	$4f^{14}$

ที่มา (Munhoz et al., 2019: 379-389)

2.6 ธาตุแลนทาไนด์ที่ใช้ในงานวิจัย

ดิสโพรเซียมออกไซด์ (dysprosium oxide) เป็นธาตุหายากที่มีคุณสมบัติทางแสงที่ดี คือมีการเปล่งแสงในช่วง Vis และช่วง NIR โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านแสงต่าง ๆ เช่น จอแสดงผล และเลเซอร์ทางแสง ไอออนของ Dy^{3+} มีการเปล่งแสงของสัญญาณที่เข้มสูงสุด ที่ช่วงความยาวคลื่น 480 นาโนเมตร (แสงสีน้ำเงิน) และช่วงความยาวคลื่น 575 นาโนเมตร (แสงสีเหลือง) โดยผลรวมของแสงสีน้ำเงินและสีเหลืองจะให้แสงสีขาว ซึ่งแสงสีขาวนี้ได้รับความนิยมในช่วงการเปล่งแสงช่วง VUV/UV และ NIR โดยปรากฏการณ์การเปล่งแสงของ Dy^{3+} มีการศึกษาทั้งในผลึกและแก้ว มีความต้องการผลิตเป็น LED ชนิดแสง

ขาวเพื่อพัฒนามาแทนการใช้งานหลอดไฟฟลูออเรสเซนซ์แบบเดิม เนื่องจากมีข้อดีในเรื่องของพลังงานและคุณประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อม (Jayasankar et al., 2004: 22-26)

เทอร์เบียมออกไซด์ (terbium oxide) เป็นธาตุหายากที่มีความน่าสนใจ คือ เมื่อเติม Tb^{3+} ลงไปในแก้วจะทำให้คุณสมบัติในการเปล่งแสงสีเขียวสูงสุดในช่วงความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร อีกทั้งยังสามารถถ่ายโอนพลังงานให้กับ Eu^{3+} เพราะสามารถเปลี่ยนจากแสงสีเขียวไปเป็นแสงสีแดง โดยเติมสัดส่วนที่แตกต่างกันของ Eu^{3+} และ Tb^{3+} สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการเรืองแสง และเป็นวัสดุตัวกลางเลเซอร์ในการให้แสงสีเขียว เป็นต้น (Vemasevana et al., 2011: 81-97)

ยูโรเพียมออกไซด์ (europium oxide) เป็นสารประกอบของธาตุหายากชนิดหนึ่งที่นิยมนำมาเป็นองค์ประกอบของแก้วร่วมกับสารประกอบออกไซด์อื่น ๆ ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานของ $^5D_0$ ไปยัง $^7F_2$ จึงทำให้สามารถประยุกต์ใช้งานได้อย่างหลากหลายโดยเฉพาะงานด้านการสื่อสาร เป็นวัสดุตัวกลางเลเซอร์สีแดง และสารเรืองแสงสีแดง เป็นต้น (Stambouli, Elhouichet & Gelloz, 2013: 201-208)

2.7 การเกิดสีของแก้ว

แก้วสามารถทำให้เกิดสีได้ การเกิดสีของแก้วสามารถจำแนกได้ตามกระบวนการผลิตได้ 2 ประเภท คือ สีที่เกิดในเนื้อแก้วและสีที่เกิดจากการเคลือบสีลงไปบนผิวแก้ว ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะสีที่เกิดในเนื้อแก้ว ซึ่งเกิดขึ้นได้จาก

2.7.1. สีที่เกิดจากการดูดกลืนแสง

แสงที่ถูกดูดกลืนจะเป็นช่วงคลื่นใดช่วงคลื่นหนึ่งโดยสารเคมีที่อยู่ในเนื้อแก้วทำหน้าที่เป็นสารที่ทำให้เกิดสีซึ่งสารเหล่านี้จะเป็นออกไซด์ของโลหะทรานซิชัน (transitionmetal oxide) เช่น Ti, V, Cr, Mn, Fe และ Co โดยสีที่เกิดขึ้นจากออกไซด์เหล่านี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การเกิดสีเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทางเคมีในโครงสร้างของเนื้อแก้ว เช่น NiO ในแก้วโซเดียม-ตะกั่ว จะให้สีน้ำตาลแต่ในแก้วโปแตส-ตะกั่ว จะให้สีม่วงแดง เป็นต้น และการเกิดสีจากออกซิเดชันสเตทของโลหะไอออน เช่น ออกไซด์ของโครเมียมจะให้สีที่แตกต่างกัน โครเมียมที่มีเลขออกซิเดชันเป็น +3 ให้สีเขียว แต่ +6 ให้สีส้ม เป็นต้น

2.7.2. สีที่เกิดจากอนุภาคคอลลอยด์ (solid colloid) คอลลอยด์ (colloid)

เป็นสารผสมที่ดูเหมือนจะเป็นเนื้อเดียวกันโดยแบ่งเป็นส่วนเนื้อเดียว (continuous phase) และอนุภาคคอลลอยด์ (dispersed phase) ซึ่งตัวอนุภาคคอนลอยด์จะมีขนาดระหว่าง 10^4-10^7 เซนติเมตร หรือมากกว่าขนาดรูกระดาษเซลโลเฟนแต่น้อยกว่ารูกระดาษกรอง อนุภาคคอลลอยด์จะเกาะตัวใหญ่กว่าโมเลกุลแต่ไม่ใหญ่มากและแยกชั้นกันชัดเจน เช่น นม ควัน เป็นต้น โดยปกติแล้วคอลลอยด์ที่ตกค้างอยู่ใน

เนื้อแก้วจะไม่มีสีแต่เมื่อผ่านกระบวนการทางความร้อนจะทำให้เกิดสีขึ้นได้ เช่น คอลลอยด์ของทองคำทำให้เกิดสีแดงทับทิม เป็นต้น

2.7.3. สีที่เกิดจากอนุภาคขนาดเล็กที่มีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคในระดับโมเลกุล

สีที่เกิดจากอนุภาคขนาดเล็กที่มีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคในระดับโมเลกุล เช่น สีแดงที่เกิดจากอนุภาคเล็ก ๆ ของซิลิเนียมออกไซด์จะไม่มีสีแต่สามารถหักเหหรือสะท้อนแสงในช่วงคลื่นหนึ่งได้ดีเป็นพิเศษ เช่น ทำให้เกิดสีคล้ายโอปอลซึ่งเป็น Hydrate Amorphous Silica ($SiO_2 \cdot nH_2O$) ซึ่งเดิมมีสีขาวขุ่นเมื่อหักเหหรือสะท้อนแสงจะทำให้มีสีที่เปลี่ยนแปลงไป ผลของสีที่ได้จากการเติมสารอนินทรีย์แต่ละชนิด ดังนี้ เงิน (Ag) ให้สีเหลือง ทองแดงออกไซด์ (CuO) ให้สีเขียวและน้ำเงิน ผงทองคำ (Au) ให้สีแดงทับทิม แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) ให้สีเหลือง ซิลิเนียม (Se) ให้สีชมพู แดง และ แดงน้ำตาล ไททาเนียมและซิลิเนียมออกไซด์ (Ti และ SiO) ให้สีเหลือง กำมะถัน (S) ให้สีเหลืองอำพัน ตะกั่ว (Pb) หรือเหล็ก (Fe) ให้สีดำเข้ม นิกเกิล (Ni) และโคบอลต์ (Co) ให้สีดำ เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ให้สีน้ำเงิน เขียว และ เหลือง แมงกานีสออกไซด์ (Mn_2O_3) ให้สีม่วงและเหลืองอำพัน โครเมียมออกไซด์ (CrO) ให้สีเขียวและส้ม นิกเกิลออกไซด์ (NiO) และโคบอลต์ (Co) ให้สีน้ำตาล ม่วง และ น้ำเงินเข้ม แมงกานีส (Mn) ให้สีชมพู ยูเรเนียม (U) ให้ สีเหลือง และโคบอลต์ออกไซด์ (CoO) ให้สีน้ำเงินเข้ม (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุแก้ว, 2540: ออนไลน์)

2.8 ความหนาแน่นและปริมาตรเชิงโมล

ความหนาแน่น เป็นสมบัติเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิด ที่อาจแปรผันได้ตามปัจจัยต่างๆ เช่น ของไหลจะมีความหนาแน่นเปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิ และความดันเปลี่ยนแปลง ส่วนของแข็งชนิดเดียวกัน จะมีความหนาแน่นต่างกันได้ตามสภาพของโครงสร้างมลทิน และรูพรุนในเนื้อของวัสดุนั้นๆ ในงานเซรามิกจำเป็นต้องศึกษาเรื่องความหนาแน่นของวัตถุดิบ เนื่องจากความหนาแน่นของวัตถุดิบ ไม่ว่าจะเป็นวัสดุเซรามิก เช่น ดิน หิน แร่ แก้วต่าง ๆ หรือวัตถุดิบเพื่อการขึ้นรูป ได้แก่ น้ำ ดิน รวมถึงความหนาแน่นของน้ำเคลือบที่ใช้ตกแต่งผลิตภัณฑ์ ล้วนมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์และวิธีการปฏิบัติงานซึ่งมีข้อกำหนดเฉพาะของแต่ละผลิตภัณฑ์ผู้ปฏิบัติจำเป็นต้องศึกษา ทดลองและทดสอบในการปฏิบัติงานต่อไป

ความหนาแน่น (Density, ρ) คือ ค่ามวลของสารต่อปริมาตรหนึ่งหน่วยของสาร ซึ่งปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหนาแน่น เช่น ขนาดและน้ำหนักขององค์ประกอบ การจัดเรียงตัวของอะตอมในระบบผลึกและปริมาณรูพรุนในโครงสร้างของวัสดุ (Zaman et al., 2017: 275-285)

2.8.1. การหาค่าความหนาแน่นโดยการชั่งน้ำหนัก

$$\rho = \frac{w_a}{w_a - w_b} \times \rho_w \qquad (2.1)$$

เมื่อ

w_a แทน น้ำหนักในอากาศ (g)

w_b แทน น้ำหนักในน้ำ (g)

$w_a - w_b$ แทน น้ำหนักที่หายไปในน้ำ (g)

ρ แทน ความหนาแน่นของวัตถุ (g /cm^3)

ρ_w แทน ความหนาแน่นของน้ำมีค่าเท่ากับ 1 g /cm^3

2.8.2. การหาปริมาตรเชิงโมล

นอกจากนี้ค่าความหนาแน่นมีความสอดคล้องกันกับค่าปริมาตรเชิงโมล (V_m) โดยสามารถคำนวณได้จากสมาการ

$$V_m = \frac{M_T}{\rho} \qquad (cm^3 / mol) \qquad (2.2)$$

โดย M_T เป็นผลรวมทั้งหมดของน้ำหนักโมเลกุลของแก้วโดยใช้หลักการดังนี้

$$M_T = X_{TeO_2} Z_{TeO_2} + X_{ZnO} Z_{ZnO} + X_{BaO} Z_{BaO} + X_{Sm_2O_3} Z_{Sm_2O_3} + X_{Dy_2O_3} Z_{Dy_2O_3} + X_{Ag} Z_{Ag} \qquad (2.3)$$

เมื่อ

M_T แทน ผลรวมของน้ำหนักโมเลกุล

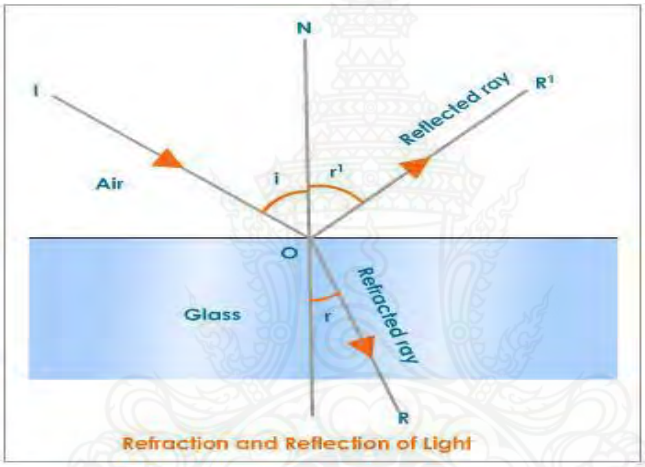
$M_T = X_{TeO_2}, X_{ZnO}, X_{BaO}, X_{Sm_2O_3}, X_{Dy_2O_3}, X_{Ag}$ แทน ปริมาณความเข้มข้นของสาร

$Z_{SiO_2}, Z_{K_2O}, Z_{CaO}, Z_{Sm_2O_3}, Z_{Dy_2O_3}, Z_{Ag}$ แทน น้ำหนักโมเลกุลของสาร

2.9 การหักเหและค่าดรรชนีหักเหของแสง

2.9.1. การหักเหของแสง

การหักเหของแสง (refraction) เกิดจากการที่แสงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกัน เป็นผลทำให้ทิศทางของแสงเปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งในขณะที่แสงเกิดการหักเหก็จะเกิดการสะท้อนของแสงขึ้นพร้อม ๆ กันด้วย ดังภาพ 2.3



ภาพที่ 2.3 การหักเหและการสะท้อนของแสง
ที่มา (วีทิต วรรณเลิศลักษณ์, 2559: ออนไลน์)

เมื่อแสงเดินทางผ่านวัตถุหรือตัวกลางโปร่งใส เช่น อากาศ แก้ว น้ำ พลาสติกใส แสงจะสามารถเดินทางผ่านได้เกือบหมดเมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลางชนิดเดียวกัน แสงจะเดินทางเป็นเส้นตรงเสมอแต่ถ้าแสงเดินทางผ่านตัวกลางหลายตัวกลาง แสงจะหักเห

2.9.2. ค่าดรรชนีหักแหของแสง

ค่าดรรชนีหักเห (refractive index) สามารถหาได้โดยการใช้เครื่องมือทั่วไปที่ เรียกว่า Rayner Refractometer หลักการทำงานของเครื่อง Rayner Refractometer ที่ใช้อยู่นี้เป็นการวัดค่าเปรียบเทียบกับค่าดรรชนีหักเหมาตรฐานของแผ่นแก้วปริซึมที่ติดอยู่กับเครื่อง ซึ่งมีค่าดรรชนีหักเหเป็น 1.86 มีแหล่งกำเนิดแสงเป็น Yellow Light-emitting สามารถวัดค่าดรรชนีหักเหได้ตั้งแต่ 1.410 ถึง 1.810 ในการวัดดรรชนีหักเหจะเลื่อน Ribbon Like Cursor มายังรอยต่อของแถบมืดแถบสว่าง

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.4)$$

เมื่อ n คือ ค่าดรรชนีหักเหของตัวกลางใด

c คือ ความเร็วแสงในสุญญากาศ

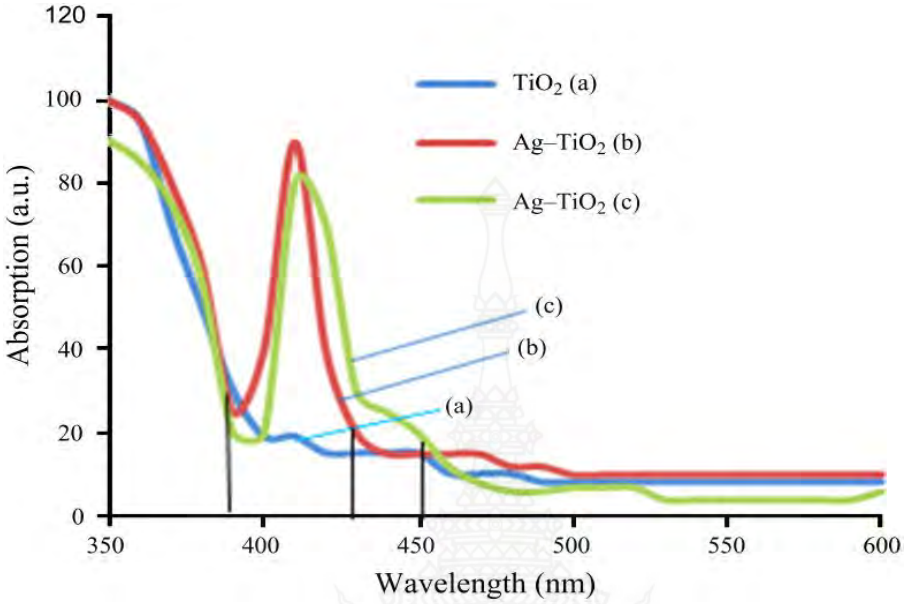
v คือ ความเร็วแสงในตัวกลางใด ๆ

2.10 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของเครื่องยูวี-วิสเนียร์ไออาร์สเปกโทรโฟโตมิเตอร์

2.10.1. เครื่องตรวจวัดสำหรับการดูดกลืนแสง (UV-Vis-NIR Spectrophotometer)

UV-Vis-NIR Spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัด ปริมาณแสงในช่วงรังสียูวี และช่วงแสงขาว ที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืน โดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณ และชนิดของสาร ที่มีอยู่ในตัวอย่าง ดังแสดงในภาพที่ 2.4 ซึ่งโดย ส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์สารประกอบ เชิงซ้อน และสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสง ในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้

การดูดกลืนแสงหรือรังสีที่อยู่ในช่วงอัตราไวโอเลตและวิสิเบิล ซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 190-800 นาโนเมตร ของสารเคมี สมบัติของสารดังกล่าวนี้ได้นำมาใช้เป็นวิธีวิเคราะห์ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณอย่างกว้างขวาง เพราะวิธีนี้ให้ความถูกต้องแม่นยำและมีสภาพไวสูง (sensitivity) โดยอาจทำการวิเคราะห์อยู่ในรูปของธาตุหรือโมเลกุลก็ได้ แต่การที่จะพิสูจน์ว่าสารตัวอย่างเป็นสารอะไร มีโครงสร้างอย่างไร จำเป็นต้องใช้เทคนิคอื่นเข้าช่วยเพื่อให้เกิดความถูกต้องแม่นยำ



ภาพที่ 2.4 การวัดตรวจสารด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer

ที่มา (Gupta, 2013: online)

2.10.2. ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องตรวจวัดสำหรับการดูดกลืนแสง

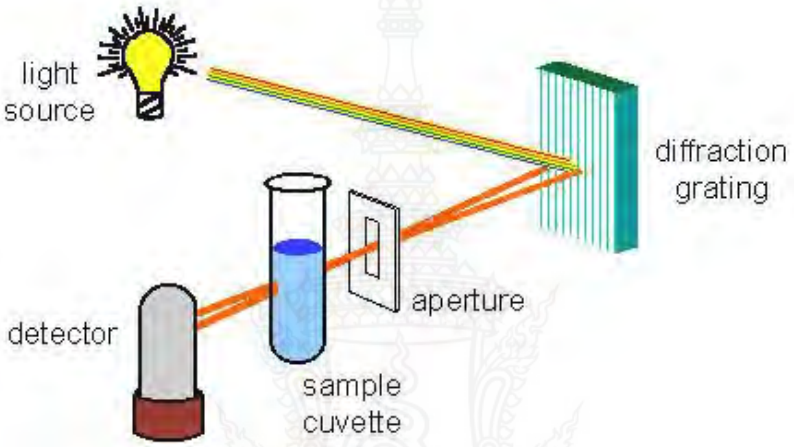
เครื่องตรวจวัดสำหรับการดูดกลืนแสง เครื่องยูวี-วิสเนียร์ไออาร์สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis-NIR Spectrophotometer) โดยทั่วไปจะประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ โดยใช้ภาพที่ 2.5 ประกอบดังนี้

1 แหล่งกำเนิดแสง (light source) แหล่งกำเนิดแสงในเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์จะต้องให้รังสีในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการอย่างต่อเนื่องและคงที่ตลอดเวลา รวมทั้งมีความเข้มแสงที่มากพอด้วย หลอดกำเนิดแสง มีหลายชนิดตามความยาวคลื่นแสงที่เปล่งออกมา ซึ่งต้องเลือกใช้ให้ถูกต้องเหมาะสมกับของเหลวที่นำมาวัดค่าดูดกลืนแสง

2 ตัวแยกแสง (monochromator) ส่วนประกอบนี้เป็นส่วนที่ใช้ควบคุมแสงโดยจะทำให้แสงที่ออกมาจากต้นกำเนิดแสง ซึ่งเป็นพอลิโครเมติก ให้เป็นแสงโมโนโครเมติก ซึ่งเป็นแถบแสงแคบ ๆ หรือมีความยาวคลื่นเดียว ใช้ฟิลเตอร์ (กระจกสี) ปริซึม (prism) หรือ เกรตติ้ง (grating)

3 เซลล์ที่ใช้บรรจุสารละลายตัวอย่าง เซลล์ที่ใส่สารตัวอย่าง (cell sample) บางครั้งอาจเรียกว่า คิวเวทท์ (cuvettes) รูปแบบที่ใช้กันทั่วไปได้แก่เซลล์ที่ทำด้วยแก้วธรรมดา จะใช้ได้เฉพาะช่วงวิสิเบิล เพราะเนื้อแก้วธรรมดาถูกดูดกลืนแสงในช่วงยูวีได้ และเซลล์ที่ทำด้วยซิลิกา และควอร์ตซ์ (quartz) ใช้ได้ทั้งช่วงยูวีและวิสิเบิล

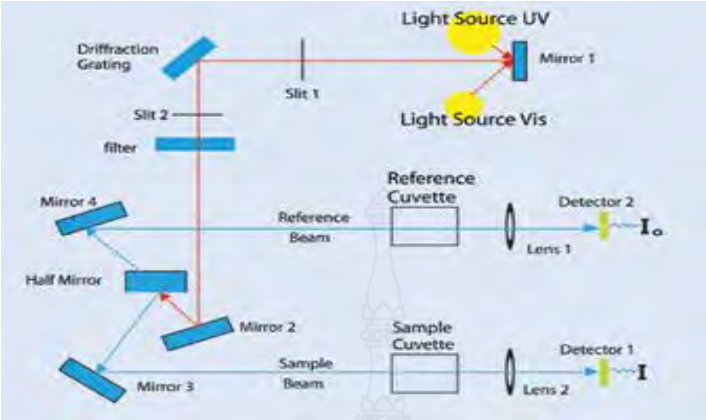
4 ตัวตรวจจับ (detector) ทำหน้าที่ในการวัดความเข้มของรังสีที่ถูกดูดกลืนโดยการแปลงพลังงานคลื่นรังสีเป็นพลังงานไฟฟ้าเครื่องตรวจจับสัญญาณที่ดีต้องมีสภาพไวสูง คือแม้ปริมาณแสงจะเปลี่ยนไปเล็กน้อย ก็สามารถตรวจจับสัญญาณความแตกต่างได้ เครื่องวัดแสงที่ยังนิยมกันอยู่ในปัจจุบัน คือ หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (Photomultiplier Tube, PMT) และเครื่องวัดแสงชนิดซิลิกอนไดโอด (silicon diode detector)



ภาพที่ 2.5 ส่วนประกอบของเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer
ที่มา (Kantakapun, 2017: online)

2.10.3. หลักการทำงานของเครื่องตรวจวัดสำหรับการดูดกลืนแสง (UV-Vis-NIR Spectrophotometer)

เครื่อง UV-Vis-NIR Spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่นำเทคนิค UV-Vis Spectroscopy ไปใช้งานเครื่องมือตัวนี้ทำหน้าที่ในการตรวจวัดความเข้มแสงที่ผ่านหรือสะท้อนจากตัวอย่างเปรียบเทียบความเข้มแสงจากแหล่งกำเนิด โดยมีหลักการทำงานดังแสดงในภาพที่ 2.6 เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง (light source) เกรตติ้ง (grating) หรือโมโนโครเมเตอร์ (monocromator) เซลล์ที่บรรจุสารตัวอย่าง (cuvette) และเครื่องตรวจวัดแหล่งกำเนิดแสงจะต้องให้แสงที่คงที่อย่างต่อเนื่อง ตัวที่นิยมใช้ คือ หลอดทังสเตนฮาโลเจนซึ่งให้แสงที่มีความยาวคลื่นในช่วง 320-2,500 นาโนเมตร

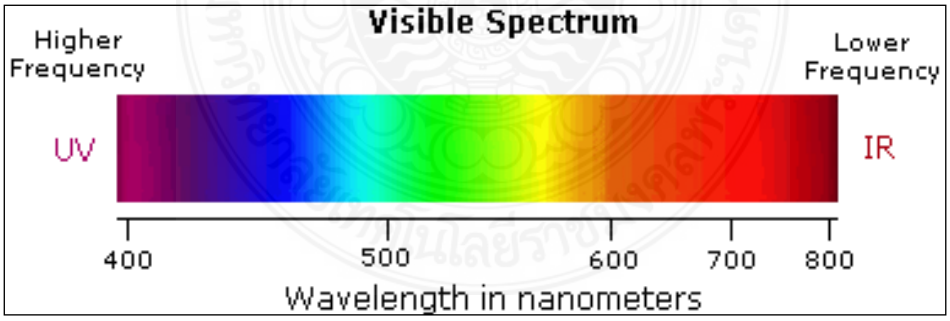


ภาพที่ 2.6 หลักการทำงานเครื่องตรวจวัดสารด้วยการดูดกลืนแสง

ที่มา (มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม, 2559: ออนไลน์)

2.10.4. การดูดกลืนแสงของสารในความยาวคลื่นช่วงแสงที่มองเห็นได้

แสงที่มองเห็นได้ประกอบด้วยช่วงคลื่นแคบ ๆ ของสเปกตรัมช่วงแสงดังแสดงในภาพที่ 2.7 มีสมบัติเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งแต่ละช่วงคลื่นจะมีสีเฉพาะตัวสามารถมองเห็นด้วยตา เช่น สารละลายตัวอย่างเป็นสีม่วงดูดกลืนแสงสีเขียวซึ่งมีความยาวคลื่นในช่วง 502-560 นาโนเมตร ซึ่งช่วงคลื่นวิสิเบิลจะมีช่วงคลื่นตั้งแต่ 380 นาโนเมตร (แสงสีม่วง) ถึง 780 นาโนเมตร (แสงสีแดง)



ภาพที่ 2.7 แถบสเปกตรัมของแสงที่อยู่ในช่วงของแสงที่มองเห็นได้

ที่มา (แม้น อมรสิทธิ์ และอมร เพชรสม, 2539: 33-107)

2.10.5. กฎการดูดกลืนแสง

กฎการดูดกลืนแสงที่สำคัญในทางวิชาสเปกโตรสโกปี ได้แก่ กฎของแลมเบิร์ต (Lamber's law) และกฎของเบียร์ (Beer's law)

กฎของแลมเบิร์ตมีความหมายว่า "เมื่อมีลำแสงเดี่ยวซึ่งเป็นลำแสงที่มีความยาวคลื่นเดียวผ่านตัวกลางเนื้อเดียวสัดส่วนของความเข้มข้นของแสงที่ถูกตัวกลางนั้นดูดกลืนไว้ไม่ให้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของแสงที่กระทบตัวกลางนั้น และความเข้มข้นของแสงจะถูกแต่ละชั้นของตัวกลางดูดกลืนไว้ในสัดส่วนที่เท่ากัน"

กฎของเบียร์มีความหมายว่า "เมื่อแสงที่มีความยาวคลื่นผ่านตัวกลางเนื้อเดียวสัดส่วนของความเข้มข้นของแสงที่ถูกตัวกลางนั้นดูดกลืนไว้จะแปรผันตรงกับปริมาณของตัวกลางที่ถูกดูกลืนแสงนั้น"

เมื่อทำการวัดการดูดกลืนของแสงของสารละลายปริมาณความเข้มข้นของแสงที่ถูกดูดกลืนจะขึ้นอยู่กับความเข้มของสารละลายและความหนาแน่นของสารละลายที่ลำแสงต้องผ่านจึงจำเป็นต้องรวมกฎของเบียร์และกฎของแลมเบิร์ตเข้าด้วยกันเรียกเป็นกฎของเบียร์แลมเบิร์ตและเขียนในรูปสมาการได้ดังนี้

$$A = \log\left[\frac{I_0}{I}\right] = \varepsilon lc \qquad (2.5)$$

เมื่อ

A	แทน	การดูดกลืนแสง (Absorbance)
I_0	แทน	ความเข้มของแสงที่กระทบ (Intensity of Incident Light)
I	แทน	ความเข้มของแสงที่ผ่านออกมา (Intensity of Transmitted Light)
ε	แทน	ค่าสภาพดูดกลืนโมลาร์ (Molar Absorptivity)
l	แทน	ความยาวของสารละลายที่แสงผ่าน มีหน่วยเป็น cm
c	แทน	ความเข้มข้นของสารละลาย มีหน่วยเป็น mol/L

2.11. ลูมิเนสเซนซ์ (Luminescence)

ปรากฏการณ์ลูมิเนสเซนซ์ คือ ปรากฏการณ์ที่วัตถุสามารถเรืองแสงออกมาได้โดยไม่ใช่การเปล่งแสงเนื่องจากการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งการเรืองแสงนี้เกิดขึ้นเนื่องจากการที่อิเล็กตรอนในระดับชั้นพลังงานถูกกระตุ้นขึ้นไปอยู่ในสถานะกระตุ้น (excited state) และเกิดการกลับสู่สถานะพื้นโดยการปลดปล่อยคลื่น

แม่เหล็กไฟฟ้าในย่านของแสงที่มองเห็นได้ (visible light) ออกมา ซึ่งปรากฏการณ์ลูมิเนสเซนซ์นี้สามารถแบ่งได้เป็นหลายประเภท ขึ้นอยู่กับแหล่งของพลังงานที่ไปกระตุ้นอิเล็กตรอนให้ขึ้นไปอยู่ที่สถานะกระตุ้น (Ronda et al., 1998: 669-676) เช่น

- แคโทดลูมิเนสเซนซ์ (cathodeluminescence) เป็นผลมาจากการกระตุ้นด้วยอิเล็กตรอน
- เคมิคัลลูมิเนสเซนซ์ (chemiluminescence) เป็นผลมาจากการกระตุ้นด้วยปฏิกิริยาเคมี
- อิเลกโตรลูมิเนสเซนซ์ (electroluminescence) เป็นผลมาจากการกระตุ้นด้วยไฟฟ้า
- แมคคาโนลูมิเนสเซนซ์ (mechanoluminescence) เป็นผลมาจากการกระตุ้นด้วยการกระทำเชิงกลที่กระทำต่อของแข็ง
- โฟโตลูมิเนสเซนซ์ (photoluminescence) เกิดจากการที่อิเล็กตรอนในระดับชั้นพลังงานดูดกลืนโฟตอน (photon) เข้าไปจึงถูกกระตุ้นขึ้นไปอยู่ในสถานะกระตุ้น
- เรดิโอลูมิเนสเซนซ์ (radioluminescence) เป็นผลมาจากการกระตุ้นด้วยการยิงรังสีไอออ-ไนซ์ (ionizing radiation)
- เทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ (thermoluminescence) เกิดจากการคายพลังงานในย่านของแสงกลับออกมาเมื่อให้ความร้อนแก่วัตถุ

2.12. โฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence)

โฟโตลูมิเนสเซนซ์ เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนในระดับชั้นพลังงานดูดกลืนโฟ-ตอนเข้าไปจึงเกิดการถูกกระตุ้นขึ้นไปอยู่ในสถานะกระตุ้น และเกิดการกลับสู่สถานะพื้นโดยการปลดปล่อยพลังงานในย่านของแสงที่มองเห็นได้ออกมา โดยปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท (Valeur et al., 2011: 731-738) ได้แก่

1. ฟลูออเรสเซนซ์ (fluorescence)

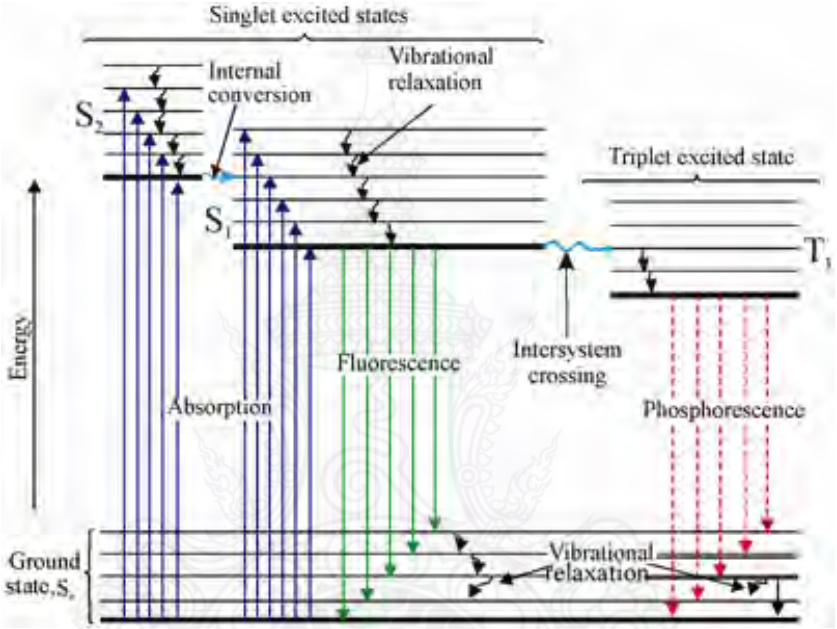
เป็นการเรืองแสงชนิดหนึ่งที่สามารถเรืองแสงออกมาได้ในช่วงเวลาสั้น ๆ (ระดับ นาโนวินาที) และการเรืองแสงจะหยุดลง เกิดขึ้นเมื่อ อิเล็กตรอนซึ่งอยู่ในสถานะพื้น (ground state) ที่เป็นซิงเกล็ตสเตต (singlet state) ได้รับพลังงานก็จะถูกกระตุ้นไปสู่สถานะกระตุ้นที่เป็นซิงเกล็ตสเตตเช่นกัน และจะกลับสู่สถานะพื้นทันที โดยจะทำการคายพลังงานออกมาในรูปของแสง

2. ฟอสฟอเรสเซนซ์ (phosphorescence)

เป็นการเรืองแสงชนิดหนึ่งที่จะเรืองแสงหลังจากได้รับแสงไปแล้วช่วงระยะเวลาหนึ่ง (ระดับมิลลิวินาที ถึง ชั่วโมง) และจะเรืองแสงได้อย่างต่อเนื่องยาวนาน เกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนที่กระโดดไปสู่สถานะกระตุ้นไม่ได้กลับสู่สภาวะพื้นในทันที แต่จะย้ายไปสู่ระดับพลังงานที่ต่ำกว่า แต่มีค่าสปินมัลติพลิซิตี (spin

multiplicity) สูงขึ้น ที่เรียกว่าทริปเล็ตสเตต (triplet state) แล้วจึงกลับสู่สถานะพื้นโดยคายพลังงานในรูปของแสงออกมา ซึ่งทำให้ใช้เวลาในการตกกลับสู้สถานะพื้นนานขึ้น

ซึ่งกลไกการเกิด ฟลูออเรสเซนต์ และฟอสฟอเรสเซนซ์ นั้นสามารถอธิบายได้จาก Jablonski Diagram ตามภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 แผนภาพ Jablonski Diagram

ที่มา (Bett, 2014: online)

2.13 ทฤษฎี Judd-Ofelt

ทฤษฎีสำหรับการวิเคราะห์การดูดกลืนแสง (absorption) ของสารละลายและของแข็งที่เติมธาตุหายาก (rare earth) ถูกพัฒนาโดย Judd และ Ofelt ตั้งแต่ปี 1960 และต่อมาเป็นที่รู้จักในชื่อทฤษฎี Judd-Ofelt (JO) theory เริ่มแรกนั้น Judd ได้ใช้ทฤษฎีนี้กับธาตุหายากในสารละลาย จนกระทั่งต่อมาทฤษฎีนี้ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับผลึกและแก้วที่เติมธาตุหายากเพื่อใช้ทำนายหาประสิทธิภาพของการประยุกต์ใช้เป็นเลเซอร์ (laser) (Huy et al., 2012: 262-265)

การดูดกลืนแสงประกอบด้วยส่วนหลักๆของการเปลี่ยนแปลงคู่ขั้วไฟฟ้า (electric-dipole) ภายใน 4f เชลล์ (4f-shell) ของไอออนธาตุหายาก ปกติแล้วอิเล็กตรอนชั้น 4f จะถูกกำบังจาก ลิแกนด์ (ligand)

ในสนามผลึกเนื่องจากขั้วของอิเล็กตรอนชั้นนอก ยิ่งไปกว่านั้นอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนชั้น 5d กับ การเปลี่ยนแปลงความแรงของพันธะของการกระตุ้นอิเล็กตรอนบนชั้น 4f-5d ส่งผลให้เกิดการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสง (emission) เกิดขึ้นด้วย สำหรับทฤษฎี JO นั้นมีความสำคัญในการใช้หาค่าความแรงของการสั่น (oscillator strength) ภายในคู่ขั้ว โดยใช้ตัวแปรของความเข้มแสง 3 ความยาวคลื่น ($\Omega\lambda$) ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามไอออนของธาตุหายาก จากทฤษฎี JO การเปลี่ยนแปลงสถานะพื้น (ground state) สู่สถานะกระตุ้น (excited state) ของความแรงของอิเล็กตรอนขั้วคู่นิยามได้จากสมการ

$$f_{cal} = \frac{8\pi^2 mc\nu}{3h(2J+1)} \frac{(n^2+2)^2}{9n} \sum_{\lambda=2,4,6} \Omega_\lambda \left\langle \Psi J \left\| U^{(\lambda)} \right\| \Psi' J' \right\rangle^2 \qquad (2.6)$$

โดยที่ n คือ ดรรชนีหักเหของวัสดุ $(n^2+2)^2/9n$ คือ สนามลอเรนซ์ (Lorentz local field) และ จำนวนอิเล็กตรอนระหว่างคู่ขั้วกับคู่ขั้ว (dipole-dipole), J คือ โมเมนตัมเชิงมุมของสถานะพื้น, 2J+1 คือ ดีเจนเนอเรซี (degeneracy) ของสถานะพื้น $^{2S+1}L_J$, ν คือ เลขคลื่น, $\left\| U^{(\lambda)} \right\|^2$ คือ 2 เท่าของการลดเมตริกซ์ (metrix) ของธาตุที่ถูกวิเคราะห์ระหว่างการเปลี่ยนแปลง $\Psi J \rightarrow \Psi' J'$ และ $\Omega\lambda$ (λ=2, 4, 6) คือ ตัวแปรความเข้มแสงในทฤษฎี JO ซึ่งแต่ละตัวแปรมีความหมายดังในตาราง 2.2 ต่อไปนี้

ตารางที่ 2.2 ความหมายของตัวแปร J-O

Ω_2	- มีความไวต่อความไม่สมมาตร (asymmetry) และความเป็นเป็นโควาเลนต์ (covalency) ของตำแหน่งของธาตุหายาก - มีผลกระทบต่อความไม่สมมาตรของสนามผลึก และการเปลี่ยนแปลงพลังงานระหว่างอิเล็กตรอนชั้น $4f^N$ และ $4f^{N-1}5d$ - ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของรัศมีไอออนิกของตัวทำลายพันธะ (network modifier) ซึ่งส่งผลต่อค่าความเป็นขึ้นของออกซิเจนรอบธาตุหายาก
Ω_4	- มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเป็นโควาเลนซ์ของพันธะซิกมา (σ) ระหว่างไอออนธาตุหายากกับลิแกนด์ของประจุลบ (anions) - ไม่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสมมาตรของวัสดุ - สัมพันธ์กับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนของธาตุหายาก โดย Ω_4 มีค่าลดลงเมื่อความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมีค่าสูงขึ้น
Ω_6	- แสดงความแตกต่างชนิดของวัสดุโดยสัมพันธ์กับความแข็งของตัวกลางและการเพิ่มขึ้นของความเป็นผลึก - ไม่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสมมาตรของวัสดุ - มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนเช่นเดียวกับ Ω_4 - สัมพันธ์กับจำนวนออกซิเจนที่เพิ่มมากขึ้น - มีความไวมากกับการเหลื่อมล้ำ (overlap) ของพลังงานระดับชั้น 4f และ 5d - มีค่าเพิ่มขึ้นกับการลดลงของอันตรกิริยาแรงคูลอมบ์ ซึ่งสามารถวัดความแรงของสนามผลึกได้

ที่มา (Huy et al., 2012: 262-265)

สำหรับความแรงของการสั่นจากการทดลอง (f_{exp}) ของแถบการดูดกลืน นิยามได้จากสมการ

$$f_{exp} = 4.318x10^{-9} \int \alpha(v)dv \qquad (2.7)$$

โดยที่ α คือ สัมประสิทธิเอกซ์ทิงชั่นเชิงโมลาร์ที่พลังงาน v (cm^{-1}) สำหรับค่า α(v) สามารถคำนวณได้จากการดูดกลืน A โดยใช้กฎของแลมเบิร์ต-เบียร์ (Lambert-Beer's law)

$$A = \alpha(v)\, cd \tag{2.8}$$

โดยที่ c คือ ความเข้มข้น หน่วยโมลต่อลิตร (mol/L) และ d คือ ระยะที่แสงผ่าน หน่วยเซนติเมตร (cm)

นอกจากนี้ตัวแปร JO ยังถูกใช้ในการทำนายคุณสมบัติการแผ่รังสี (radiation) ของสถานการณ์กระตุ้นของไอออนของธาตุหายาก เช่น ความน่าจะเป็นในการเกิดการแผ่รังสี (radiation transition probability; A_R), เวลาชีวิตของการแผ่รังสี (radiation lifetime; τ_R), อัตราการแบรนชิ่ง (branching ratios; β_R) และภาคตัดขวางของการกระตุ้นให้เปล่งแสง (stimulated emission cross-sections; $\sigma(\lambda_p)$)

ดรรชนีหักเหเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ทำนายคุณสมบัติการแผ่รังสี (radiation) ของสถานการณ์กระตุ้นของไอออนของธาตุหายาก โดยความน่าจะเป็นในการเกิดการแผ่รังสีสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$A_R(\Psi J, \Psi' J') = \frac{64\pi^4 \nu^3}{3h(2J+1)} \frac{\left[n(n^2+2)^2\right]}{9} S_{ed} + n^3 S_{md} \tag{2.9}$$

โดยที่ $(n^2+2)^2/9n$ และ n^3 มีเกี่ยวข้องกับผลกระทบของการเป็นตัวกลางไดอิเล็กทริค (dielectric) ไอออนของธาตุหายากในตัวกลางไดอิเล็กทริคไม่เพียงแต่เกิดสนามการแผ่รังสีของแสงที่ตกกระทบเท่านั้น ยังเกิดสนามจากอิเล็กตรอนคู่ขั้วในตัวกลางอีกด้วย สนามทั้งหมดประกอบด้วยสนามไฟฟ้า E ของแสงที่ตกกระทบและสนามไฟฟ้าของคู่ขั้วซึ่งถูกเรียกว่า สนามยังผล (effective field; E_{eff}) ตัวดำเนินการกำลังสองของธาตุเมทริกซ์ในอิเล็กตรอนคู่ขั้วไฟฟ้าถูกนำมาคูณกันได้เป็น $(E_{eff}/E)^2$ ซึ่งประมาณได้เท่ากับ $(n^2+2)^2/9n$ เช่นเดียวกับสเปกตรัมการเปล่งแสงซึ่งสัมพันธ์กับ n^3

$$S_{ed} = e^2 \sum_{\lambda=2,4,6} \Omega_\lambda \left| \left\langle \Psi J \left\| U^\lambda \right\| \Psi' J' \right\rangle \right|^2 \tag{2.10}$$

$$S_{md} = \left(e^2 h^2 / 16\pi^2 m^2 c^2\right) \left| \left\langle \Psi J \left| L + 2S \right| \Psi' J' \right\rangle \right|^2 \tag{2.11}$$

โดยที่ S_{ed} และ S_{md} คือ คู่ขั้วของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ซึ่งค่าคู่ขั้วของสนามไฟฟ้าไม่ขึ้นอยู่กับวัสดุโฮสต์ ความน่าจะเป็นในการเกิดการแผ่รังสี, เวลาชีวิตของการแผ่รังสี และอัตราการแบรนชิ่งของการกระตุ้นนิยามได้จากสมการ

$$A_T(\Psi, J) = \sum_{\Psi' J'} A(\Psi J, \Psi' J') \tag{2.12}$$

$$\tau_R(\Psi J) = \left[A_T(\Psi J)\right]^{-1} \tag{2.13}$$

$$\beta_R(\Psi J \rightarrow \Psi' J') = \frac{A(\Psi J \rightarrow \Psi' J')}{A_T(\Psi J)} \tag{2.14}$$

อัตราการแบรนชิ่งสามารถใช้ในการทำนายความสัมพันธ์ของความเข้มแสงที่เกิดจากการเปล่งแสงจากการกระตุ้นได้ทั้งหมด โดยอัตราการแบรนชิ่งจากการทดลองสามารถหาได้จากแถบการเปล่งแสง การกระตุ้นจากการแผ่รังสีในภาคตัดขวางสัมพันธ์กับ ความน่าจะเป็นในการเกิดการแผ่รังสี ซึ่งสามารถนิยามสมการได้จาก

$$\sigma(\lambda_p) = \frac{\lambda_p^4}{\left(8\pi c n^2 \Delta\lambda_{eff}\right)} A(\Psi J, \Psi' J') \tag{2.15}$$

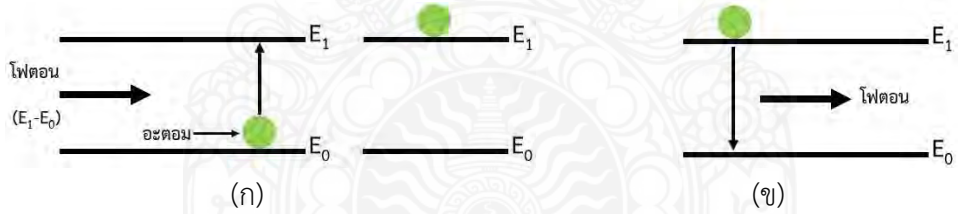
โดยที่ λ_p คือ ความยาวคลื่นของพีคที่เกิดการทรานซิชั่น และ $\Delta\lambda_{eff}$ คือ ความกว้างของเส้นยังผล ซึ่งหาได้จากการหารพื้นที่แถบสเปกตรัมการเปล่งแสงด้วยความสูงเฉลี่ยของพีค

2.14 ทฤษฎีเลเซอร์ (Laser)

เลเซอร์ หรือ Laser เป็นคำทับศัพท์ภาษาอังกฤษที่ย่อมาจากคำว่า “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” ซึ่งผู้ที่คิดค้นเลเซอร์ได้คือ ซี.เอช.ทาวน์ส (C.H. Townes) ในปี ค.ศ. 1954 อย่างไรก็ดีแนวคิดพื้นฐานที่นำพาให้เขาค้นพบหลักการการผลิตแสงเลเซอร์นั้น มาจากทฤษฎีโฟตอนของอัลเบิร์ต ไอน์สไตน์ (Albert Einstein) ที่ได้อธิบายถึงหลักการปล่อยโฟตอนโดยการกระตุ้นอะตอม

เลเซอร์ คือ อุปกรณ์ที่เป็นแหล่งกำเนิดแสง มีลักษณะเฉพาะ โดยการขยายแสงด้วยการกระตุ้นให้แผ่รังสีซึ่งเป็นการอธิบายถึงกระบวนการผลิตแสงเลเซอร์ที่เกิดจากสองกระบวนการหลัก ๆ คือ การเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น (stimulated emission) และการขยายสัญญาณแสง (light amplification)

อะตอมหรือโมเลกุล ที่ใช้ทำเลเซอร์จะมีชั้นพลังงานต่างกัน มีพลังงานที่แตกต่างกัน ตามค่าพลังงานของอะตอม โดยปกติอะตอมหรือโมเลกุลจะอยู่ที่ชั้นพลังงานต่ำเสมอ เพราะมีความเสถียรภาพกว่า และเมื่อใดที่มีการให้พลังงานแก่อะตอมที่เหมาะสม เช่น การกระตุ้นโดยโฟตอนแสง (อนุภาคของแสง) อิเล็กตรอนในอะตอมที่อยู่สถานะพื้น (ground state) หรือ E_0 จะถูกกระตุ้นให้กระโดดจากวงโคจรที่มีพลังงานต่ำสู่วงโคจรที่มีพลังงานสูงกว่า หรือ ไปสู่สถานะกระตุ้น (excited state) หรือ E_1 การเปลี่ยนชั้นพลังงานของอะตอมที่เกิดขึ้นโดยการดูดกลืนโฟตอนแสง เป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่าการดูดกลืนแสง (light absorption) แต่อะตอมที่อยู่ในชั้นพลังงาน E_1 จะไม่เสถียร เมื่อเวลาผ่านไปอย่างรวดเร็วอะตอมนั้นจะกลับมาอยู่ในชั้นพลังงาน E_0 เช่นเดิม โดยปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมา ซึ่งพลังงานเหล่านี้มักอยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือ โฟตอน ที่มีพลังงานเท่ากับ $E_1–E_0$ ปรากฏการณ์ปลดปล่อยโฟตอนโดยลักษณะเช่นนี้เรียกว่าเป็นการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้น-เอง (spontaneous emission) แสดงดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 การเปลี่ยนชั้นพลังงานของอะตอมแบบดูดกลืนแสง (ก) และเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง (ข)

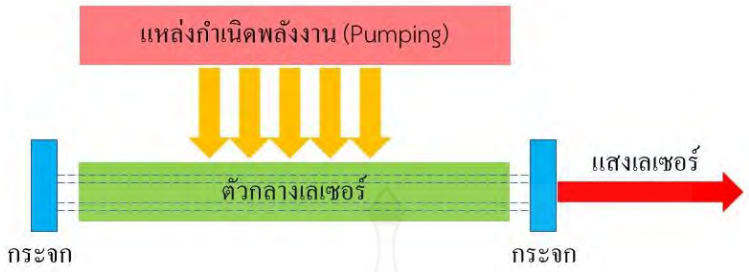
แต่การเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น (stimulated emission) ซึ่งเป็นกลไกหลักของเลเซอร์ เริ่มต้นจากการดูดกลืนแสง เพื่อให้อะตอมขึ้นไปอยู่ที่ชั้นพลังงานสูงเช่นกันแต่แทนที่จะให้อะตอมตกลงมาเอง เมื่อเวลาผ่านไปจะมีการฉายแสง หรือยิงโฟตอนเข้าไปในอะตอมที่มีพลังงานเท่ากับผลต่างของชั้นพลังงานทั้งสอง ($E_1–E_0$) เพื่อให้อิเล็กตรอนคายพลังงานเร็วกว่าปกติ และพลังงานที่ปล่อยออกมามีค่าเท่ากับ $E_1–E_0$ พลังงานโฟตอนที่ถูกยิงเข้าไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนคายพลังงาน กับพลังงานที่อิเล็กตรอนคายออกมาจึงมีค่าพลังงานเท่ากัน (พลังงานโฟตอนที่ฉายเข้าไปไม่ถูกดูดกลืน เมื่อกระทบกับอิเล็กตรอน) มีความถี่เดียวกัน เคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกัน สามารถที่จะรวมกันในลักษณะที่เสริมกันได้ ทำให้ได้คลื่นรวมที่มีขนาดโตขึ้น เกิดเป็น

ปรากฏการณ์ที่เรียกว่า การขยายสัญญาณแสง (light amplification) ขึ้น ถ้าสามารถทำให้เกิดการขยายสัญญาณแสงในลักษณะนี้กับอะตอมเป็นจำนวนมาก ๆ ได้ก็จะทำให้ได้สัญญาณแสงที่มีความเข้มสูงออกมา

ปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งในการที่จะทำให้เกิดการขยายแสงโดยการกระตุ้นได้มาก ๆ คือการทำให้มีประชากรอะตอมในสถานะกระตุ้นมาก ๆ ซึ่งในธรรมชาติเป็นไปไม่ได้ จึงต้องมีการหาวิธีการที่จะทำให้ประชากรอะตอมในสถานะกระตุ้น E_1 มากกว่าสถานะพื้น E_0 ปรากฏการณ์ที่ทำให้จำนวนประชากรอะตอมในชั้นพลังงานสูงมีมากกว่าประชากรในชั้นพลังงานต่ำ เรียกว่า ประชากรผกผัน (population inversion) ในทางปฏิบัติสามารถทำให้เกิดประชากรผกผันได้โดยการใช้พลังงานจากภายนอกปริมาณหนึ่งที่เพียงพอจะทำให้ประชากรอะตอมมีสถานะเปลี่ยนไปจากสถานะพื้น E_0 ไปยังสถานะกระตุ้น E_1 และทำให้การกระตุ้นประชากรอะตอมในสถานะกระตุ้นให้ตกกลับมายังสถานะพื้น เพื่อให้ประชากรอะตอมปลดปล่อยโฟตอนแสงเป็นจำนวนมากออกมา อย่างไรก็ตามการกระตุ้นประชากรอะตอมเพื่อให้มีการปล่อยแสงเพียงครั้งเดียวยังไม่สามารถทำให้ได้แสงเลเซอร์ออกมา เนื่องจากในความเป็นจริงในขณะเดียวกับที่เกิดการปล่อยแสงโดยการถูกกระตุ้นก็จะมีการดูดกลืนแสงเกิดขึ้นด้วย โดยประชากรอะตอมในสถานะพื้น ทำให้ความเข้มแสงที่ได้มีปริมาณลดลง ดังนั้น เพื่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของความเข้มของสัญญาณแสง จึงต้องทำให้เกิดปรากฏการณ์ปล่อยแสง โดยการถูกกระตุ้นอย่างต่อเนื่อง โดยการทำให้โฟตอนแสงที่ได้จากการปลดปล่อยของประชากรอะตอมมากระตุ้นให้เกิดการปลดปล่อยแบบถูกกระตุ้นซ้ำแล้วซ้ำอีก จนกระทั่งสัญญาณแสงมีความเข้มสูงขึ้นจนถึงจุด เลสซิง (lasing point) หรือจุดออสซิลเลตของเลเซอร์ (laser oscillating point) แสงที่ได้ออกมาจึงมีสมบัติเป็นแสงเลเซอร์

1. องค์ประกอบของเลเซอร์

จำนวนโฟตอนที่เกิดขึ้นจากการเปล่งแสงแบบกระตุ้นนี้ จะต้องมีมากพอจึงจำเป็นต้องมีการขยายสัญญาณแสง โดยให้แสงวิ่งกลับไปกลับมา ผ่านเนื้อวัสดุเลเซอร์หลาย ๆ ครั้ง โดยใช้กระจก 2 ชิ้น ที่วางขนานกันที่ปลายทั้งสอง เพื่อสะท้อนแสงกลับไปมา กระจก 2 ชิ้น ที่ขนานกันนี้เรียกว่า แคว้ติ้แสง (optical cavity) ซึ่งทำหน้าที่ขยายสัญญาณแสง เพื่อให้มีความเข้มสูง จนเกิดเกน (gain) เอาชนะความสูญเสีย (loss) ของระบบ และได้ลำแสงเลเซอร์พุ่งออกทางด้านกระจก ที่มีการสะท้อนแสงไม่ถึง 100% เลเซอร์โดยทั่วไปประกอบด้วยองค์ประกอบสำคัญ 3 ส่วน แสดงดังภาพที่ 2.10 ได้แก่



ภาพที่ 2.10 โครงสร้างพื้นฐานของเครื่องกำเนิดเลเซอร์

1.1 ตัวกลางเลเซอร์ (laser medium) เป็นวัสดุที่ถูกกระตุ้นแล้วให้แสงเลเซอร์ออกมา ซึ่งอาจเป็นแก๊ส ของแข็ง ของเหลวหรือสารกึ่งตัวนำ

1.2 แควิตี้แสง (optical cavity) เป็นส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดเลเซอร์ที่ทำให้เกิดการปล่อยแสงแบบถูกกระตุ้นซ้ำ ๆ จนถึงจุดเลสซิง

1.3 แหล่งกำเนิดพลังงาน (energy source) เป็นตัวกระตุ้นให้อะตอมอยู่ในสภาวะที่เป็นประชากรผกผัน (population inversion)

คุณสมบัติหลัก ๆ ของแสงเลเซอร์ที่แตกต่างจากแสงสว่างทั่วไปคือ แสงเลเซอร์มีการปล่อยพลังงานที่มีค่าท่ากัน มีความถี่เดียวกัน จึงเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกัน อีกทั้งแสงจากเลเซอร์ยังมีลักษณะเป็นลำแสง การกระจายของลำแสงน้อย แสงเลเซอร์จึงเคลื่อนที่ได้ไกลมาก ที่สำคัญแสงเลเซอร์เป็นพลังงานที่มีความเข้มสูงมาก สามารถเจาะทะลุแผ่นโลหะได้ ขณะที่แสงสว่างทั่วไป เช่น แสงสว่างจากหลอดไฟ มีค่าความถี่ที่ไม่เท่ากัน เคลื่อนที่ไม่พร้อมเพรียงกัน ลำแสงจึงมีการกระจายตัวกว้าง ส่องสว่างได้ไม่ไกลมาก

2. ชนิดของเลเซอร์

เลเซอร์แบ่งตามลักษณะของตัวกลางเลเซอร์ได้ 4 ประเภท คือ

2.1 Gas Laser: สารตัวกลางเลเซอร์มีลักษณะเป็นก๊าซ เช่น CO_2 Laser, Argon Laser, Xenon Laser, He-Ne Laser

2.2 Solid State Laser: ใช้สารตัวกลางเลเซอร์ที่เป็นแท่งผลึกแข็ง เช่น Nd:YAG Laser, Ruby Laser

2.3 Dye Laser: สารตัวกลางมีลักษณะเป็นของเหลว เช่น Rhodamin 6G Laser

2.4 Semiconductor Laser: เป็นเลเซอร์ที่ใช้สารตัวกลางเลเซอร์เป็นสารกึ่งตัวนำ เช่น Diode Laser ชนิดต่าง ๆ

3. ประโยชน์ของแสงเลเซอร์

ด้วยคุณสมบัติเฉพาะตัวที่หลากหลายของเลเซอร์จึงทำให้มีการนำมาใช้ประโยชน์ได้มากมายหลายด้าน (เทคโนโลยีแห่งแสง, 2563: ออนไลน์) เช่น

3.1 ด้านการแพทย์ แพทย์นำเอาเลเซอร์ไปใช้ในกระบวนการผ่าตัดมากขึ้น ดังที่เราเริ่มเห็นได้จากโรงพยาบาลที่มีชื่อเสียงต่าง ๆ เนื่องจากมีความแม่นยำในการทำงานสูง ดีกว่าการผ่าตัดแบบธรรมดา และยังใช้สำหรับการผ่าตัดในจุดเล็ก ๆ ที่เข้าถึงได้ยาก เช่น ดวงตา สมอง และการผ่าตัดเกี่ยวกับเส้นประสาท ช่วยให้ผู้ป่วยไม่ได้รับผลข้างเคียงภายหลังจากการใช้เลเซอร์ การผ่าตัดเป็นไปด้วยดี แผลมีขนาดเล็ก ระยะพักฟื้นสั้นลง

3.2 ด้านอุตสาหกรรม เลเซอร์จะถูกนำไปใช้ประโยชน์สำหรับการ ตัด เชื่อม และเจาะ ชิ้นงานต่าง ๆ ที่เน้นความละเอียดแม่นยำสูง โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จะมีความสำคัญเป็นอย่างมากในการผลิตไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมีขนาดเล็ก

3.3 ด้านการทหาร ในด้านการทหารเลเซอร์ถูกนำไปใช้สำหรับชี้เป้าหมายของจรวดนำวิถี เครื่องบิน หรือรถถัง เพื่อการโจมตีเป้าหมายให้เกิดความแม่นยำมากขึ้น โดยลดความเสียหายที่จะเกิดกับบริเวณข้างเคียงอีกทางหนึ่ง

3.4 ด้านโทรคมนาคม นำเอาเลเซอร์มาใช้ได้อย่างมีประโยชน์เป็นอย่างมาก ซึ่งจะทำหน้าที่ในการส่งสัญญาณผ่านใยแก้วนำแสง ถ่ายทอดสัญญาณโทรทัศน์และโทรศัพท์ได้ดี รวมถึงการส่งข้อมูลข่าวสารต่าง ๆ ที่มีจำนวนมาก โดยไม่ก่อให้เกิดสัญญาณรบกวน แถมใยแก้วนำแสงเพียง 1 เส้น สามารถบรรจุคูสายได้นับพันคู่เลยทีเดียว เรียกได้ว่าสามารถจุข้อมูลในปริมาณมาก ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.5 ด้านดาราศาสตร์ แสงเลเซอร์จะช่วยทำให้เกิดความเขาใจในสภาพอากาศที่มีความแปรปรวนได้ดี ซึ่งจะช่วยปรับโฟกัสของกล้องโทรทัศน์ที่ใช้ดูดาวให้มองเห็นได้ชัดเจนมมากขึ้น

2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Zhou et al. (2010: 2896-2899) ได้ศึกษาเรื่องการศึกษาปรากฏการณ์เควนชิ่ง ที่ถูกเจือด้วยไอออนของ Tb^{3+} และ Yb^{3+} ลงในแก้วเทลลูไรท์ โดยวิเคราะห์ได้จากโครงสร้างของทรงหลายหน้าของตำแหน่งช่องว่างของการเปล่งแสงที่ความยาวคลื่น 539 นาโนเมตร เกิดการทรานซิชันของการเปล่งแสงจาก $^5D_4 \longrightarrow {}^7F_5$ ที่เจือด้วยไอออน Tb^{3+} ในการกระตุ้นของแสงที่ถูกเจือด้วยไอออน Yb^{3+} ที่ความยาวคลื่น 976 นาโนเมตร ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพความเข้มข้นของอัตราส่วน Tb^{3+}/Yb^{3+} ในแก้วเทลลูไรท์ ตามสูตรทางเคมี $80TeO_2$-$10ZnO$-$10Na_2O$ (เปอร์เซ็นต์โมล) + 1.0 wt% Tb_2O_3+3.0 wt% Yb_2O_3 ที่แสดงให้เห็นถึงความเข้มของแสงสีเขียวที่เพิ่มขึ้น จึงเหมาะอย่างยิ่งสำหรับการพัฒนาเส้นใยเลเซอร์สีเขียวที่ให้ประสิทธิภาพ

Ruvalcaba et al. (2010: 213-216) ได้ศึกษาแก้ว ZnO-CdO-TeO_2 ถูกเจือด้วยไอออน Tb^{3+} กับการเจือด้วย Yb^{3+} โดยวิเคราะห์จากโครงสร้างผลึก/โครงสร้างอสัณฐาน การวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสง ที่ใช้วิธีโฟโตอะคูสติก (PA) สเปกโทรสโกปี และค่าการวัดแถบช่องว่างของพลังงานในช่วง 3.47-3.60 อิเล็คตรอนโวลต์ของโฮตต์แก้ว ZnO-CdO-TeO_2 ที่เจือด้วยไอออน Tb^{3+} กับการเจือด้วย Yb^{3+} สำหรับการเจือ Tb^{3+} ของการเปล่งแสงที่ช่วงความยาวคลื่น 548, 586 และ 622 ตามลำดับ สำหรับการเจือ Yb^{3+} ของการเปล่งแสงที่ช่วงความยาวคลื่น 1,000 นาโนเมตร

Kaewnuam et al. (2018) ได้ศึกษาแก้วแคลเซียมแกโลดิเนียมซิลิกาบอเรต ที่เจือด้วย Tb^{3+} (CaGdSiB:Tb^{3+}) สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวกลางเลเซอร์ในอุปกรณ์เลเซอร์และวัสดุซินทิลเลเตอร์ในหัวตรวจวัดรังสี โดยมุ่งเน้นไปที่การศึกษาความเข้มข้นของ Gd_2O_3 ที่ทำให้แก้วเกิดการเปล่งแสงที่มีความเข้มชัดเจนมากที่สุด แก้วตัวอย่างทั้งหมดถูกเตรียมขึ้นด้วยวิธีการหลอมและทำให้เย็นตัว ความหนาแน่นและปริมาตรเชิงโมลของแก้วที่เตรียมได้สูงขึ้นตามความเข้มข้นของ Gd_2O_3 ที่เพิ่มขึ้น ผลจากการวิเคราะห์ด้วย FTIR แสดงให้เห็นว่า บอเรต BO_4 แบบทรงสี่หน้า และ BO_3 แบบไตรโกนอล รวมทั้งหมู่ทางเคมี Si-O-Si และ Si-O-B เป็นองค์ประกอบหลักของโครงข่ายแก้ว ขณะที่ Gd^{3+} ประพฤติตัวเป็นตัวปรับโครงสร้างแก้ว แก้วตัวอย่างดูดกลืนแสงที่ตามองเห็นได้เพียงเล็กน้อยส่งผลให้แก้วมีลักษณะโปร่งแสงและไม่มีสี และดูดกลืนรังสีอินฟราเรดใกล้ได้ดี แก้ว CaGdSiB:Tb^{3+} ที่มี Gd_2O_3 เป็นองค์ประกอบ 22.5 mol% เปล่งแสงความยาวคลื่น 542 และ 541 nm ออกมาได้เข้มชัดเจนที่สุด ภายใต้การกระตุ้นแก้วด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต 275 nm และการเหนี่ยวนำด้วยรังเอกซ์ ตามลำดับ โดยเกิดจากการถ่ายเทพลังงานจาก Gd^{3+} ไปยัง Tb^{3+} และการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานภายในของ Tb^{3+} สีของแสงที่เปล่งออกมาจากแก้วตามมาตรฐานสี CIE 1931 เป็นสีเขียวแกมเหลือง เวลาในการเปล่งแสงของ Tb^{3+} อยู่ในระดับมิลลิวินาทีซึ่งลดลงตามความเข้มข้นของ Gd_2O_3 ที่เพิ่มขึ้น จากผลการศึกษาทำให้ระบุได้ว่า แก้ว CaGdSiB:Tb^{3+} ที่มี Gd_2O_3 เป็นองค์ประกอบ 22.5 mol% มีศักยภาพที่ดีเหมาะต่อการนำไปพัฒนาใช้เป็นวัสดุตัวกลางเลเซอร์ในอุปกรณ์เลเซอร์ของแข็งที่เปล่งแสงสีเขียวและวัสดุซินทิลเลเตอร์ในหัววัดรังสีอัลตราไวโอเลตและรังสีเอกซ์โหมดอินทิเกรชัน

Ivankov et al. (2006) การเปล่งแสง การดูดกลืน และสเปกตรัมการกระตุ้นของการไม่เจือ Eu^{3+} และการเจือ Eu^{3+} ของแก้วสองระบบ ซิงค์บอเรตที่เปลี่ยนแปลงตามสูตรโครงสร้างโดยวิธีการทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วในสภาพบรรยากาศปกติ จากการวัดการเปล่งแสงพบพีคการเปล่งแสงของ Eu^{3+} ในช่วงแสงยูวี ซึ่งการเปล่งแสงจะให้แสงสีแดง ที่ช่วงความยาวคลื่น 613 นาโนเมตร และผลของสเปกตรัมการกระตุ้นของ Eu^{3+} จะถูกกระตุ้นและถ่ายโอนพลังงานจากกระตุ้นไปยังโฮสต์ของแก้ว จากสูตรโครงสร้างของแก้วนี้ส่งผลต่อตำแหน่งการกระตุ้นสูงสุดในช่วงพลังงานยูวี

Mohan et al. (2011) แก้วเรดทังสเตนเทลลูไรท์ที่เจือด้วยความเข้มข้นต่าง ๆ ของ Dy^{3+} โดยทำการศึกษาคุณสมบัติการดูดกลืน โฟโต้ลูมิเนเซนซ์ และอัตราการสลายตัวของแสง โครงสร้างอสัณฐานของแก้ววิเคราะห์ได้จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) จากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่ได้จาก Juuu-Ofelt พารามิเตอร์ $\boldsymbol{\Omega_{\lambda}}$ เมื่อ ($\boldsymbol{\lambda}$ = 2, 4 และ 6) ที่สเปกตรัมการดูดกลืน $\boldsymbol{\Omega}_2$ เกิดการทรานซิชัน $^6H_{15/2}$ ไปยัง $^6F_{11}$ ซึ่งทำนายคุณสมบัติของรังสีต่าง ๆ คือ ความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงาน (A_R) สัดส่วนการเปล่งแสง (β_R) และระยะเวลาการสลายตัวของการทรานซิชันจากระดับชั้น $^4F_{9/2}$ ไปยัง ^6H_J เมื่อ (J = 15/2, 13/2, 11/2 และ 9/2) ที่เจือด้วยความเข้มข้นของ Dy^{3+}

Sasikla & Moorthy (2014) คุณสมบัติทางการดูดกลืนแสง ทางโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ และการสลายตัวของไอออน Dy^{3+} ที่ร่วมกับไอออนของ Dy^{3+}/Tm^{3+} ในสูตรโครงสร้างแก้ว TeO_2+ZnO+K_2O+CaO (TZKC) โดยวิธีการหลอมที่อุณหภูมิสูงทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว โดยใช้หลักการวิเคราะห์ การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ XRD การวิเคราะห์ JO ใช้ในการคำนวณหา อัตราการเปลี่ยนแปลงของการแผ่รังสี สัดส่วนการเปล่งแสง และค่าไล้ทามของสภาวะการเปลี่ยนแปลงที่ $^4F_{9/2}$ และผลของการเจือร่วมกันของความเข้มข้นที่ต่างกันของไอออน Tm^{3+} คุณสมบัติการเปล่งแสงของไอออน Dy^{3+} เป็นการสลายตัวของระดับพลังงาน $^4F_{9/2}$ แสดงให้เห็นถึง 2 ระบบของ Inokuti-Hirayama (IH) ที่ได้จากอัตราการถ่ายโอนพลังงานระหว่างไอออน Dy^{3+} กับ Tm^{3+} อัตราการถ่ายโอนพลังงานจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของไอออน Tm^{3+} ค่าพิกัดโครมาติซิตีและค่าความบริสุทธิของการเปล่งแสงของแก้วทั้งหมด

Wantana et al. (2018) ได้เตรียมแก้วในระบบ 10CaO-25Gd_2O_3-10SiO_2-(55-x)B_2O_3-xEu_2O_3 โดยที่ x เท่ากับ 0.05, 0.1, 0.2, 0.3 และ 0.4 ร้อยละโดยโมล และศึกษาสมบัติการเปล่งแสง, การตรวจจับสัญญาณทางด้านรังสี และสมบัติทางด้านเลเซอร์ จากการศึกษาความหนาแน่นของตัวอย่างแก้วพบว่า ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ Eu^{3+} ตัวอย่างแก้วสามารถดูดกลืนแสงในช่วง UV-Vis-NIR ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานจากสถานะพื้น $^8S_{7/2}$ ของ Gd^{3+} และจากสถานะพื้น $^7F_0$ และ $^7F_1$ ของ Eu^{3+} เมื่อกระตุ้นการเปล่งแสงของตัวอย่างแก้วในช่วงความยาวคลื่น 275 นาโนเมตร พบว่าการส่งผ่านพลังงานของ Gd^{3+} ไปยัง Eu^{3+} ทำให้เกิดการเปล่งแสงสีแดงที่มีความเข้มแสงมาก ซึ่งการส่งผ่านพลังงานนี้ยังทำให้การเปล่งแสงสีแดงมีความเข้มแสงมากเช่นเดียวกัน เมื่อกระตุ้นการเปล่งแสงของตัวอย่างแก้วด้วยรังสีเอกซ์ความเข้มข้นของ Eu^{3+} ที่เหมาะสมที่สุดในการเจือเข้าไปในระบบแก้ว แล้วทำให้มีการเปล่งแสงได้ดีที่สุด ไม่ว่าจะกระตุ้นการเปล่งแสงของตัวอย่างแก้วด้วยแสงหรือรังสี คือที่ความเข้มข้น 0.30 ร้อยละโดยโมล ช่วงระยะเวลาการเปล่งแสงที่คสามยาวคลื่น 614 นาโนเมตร ที่กระตุ้นด้วยแสงที่ความยาวคลื่น 275 นาโนเมตร (Gd^{3+}) มีค่าอยู่ระหว่าง 1.726 ถึง 1.763 มิลลิวินาที โดยไม่มีการส่งผ่านพลังงานที่ชัดเจนระหว่าง Eu^{3+} นอกจากนี้การศึกษาทฤษฎี JO พบว่าตัวอย่างแก้วนี้มีศักยภาพสูงในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวกลางเลเซอร์

สำหรับอุปกรณ์เลเซอร์สีแดง และในการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางด้าน scintillation ของตัวอย่างแก้วเจือ Eu^{3+} ที่ 0.30 ร้อยละโดยโมล กับผลึกบิสมัทเจอร์เมเนียม (BGO) ประสิทธิภาพของตัวอย่างแก้วที่วัดได้คือ 13% เมื่อเทียบกับผลึกของ BGO

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเตรียมแก้วตัวอย่างบอเรตที่เจือด้วย Dy^{3+}, Tb^{3+} และ Eu^{3+} ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ วิธีการหลอมและทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็ว (melt quenching technique) และศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางแสง และสมบัติการเปล่งแสง โดยวิธีการดำเนินงานวิจัยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์

1.1 เตาไฟฟ้าสำหรับหลอมแก้ว 1,200 °C

1.2 เตาไฟฟ้าสำหรับอบแก้ว 500 °C

1.3 เบ้าหลอมพอร์ซเลนที่ทนอุณหภูมิสูง สำหรับใส่สารเคมี

1.4 แม่พิมพ์แกรไฟต์

1.5 ช้อนตักสารเคมี

1.6 หน้ากากป้องกันสารเคมี

1.7 ถุงมือสำหรับชั่งสารเคมี

1.8 อะลูมิเนียมฟอยล์

1.9 เครื่องชั่งความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยจากบริษัท Catalite co, Ltd.

2.1 Lithium Carbonate (Li_2CO_3) ความบริสุทธิ์ 99.00%

2.2 Boric Acid (H_3BO_3) ความบริสุทธิ์ 99.50%

2.3 Sodium Carbonate (Na_2CO_3) ความบริสุทธิ์ 99.80%

2.4 Potassium Carbonate (K_2CO_3) ความบริสุทธิ์ 99.99%

2.5 Dysprosium Oxide (Dy_2O_3) ความบริสุทธิ์ 99.50%

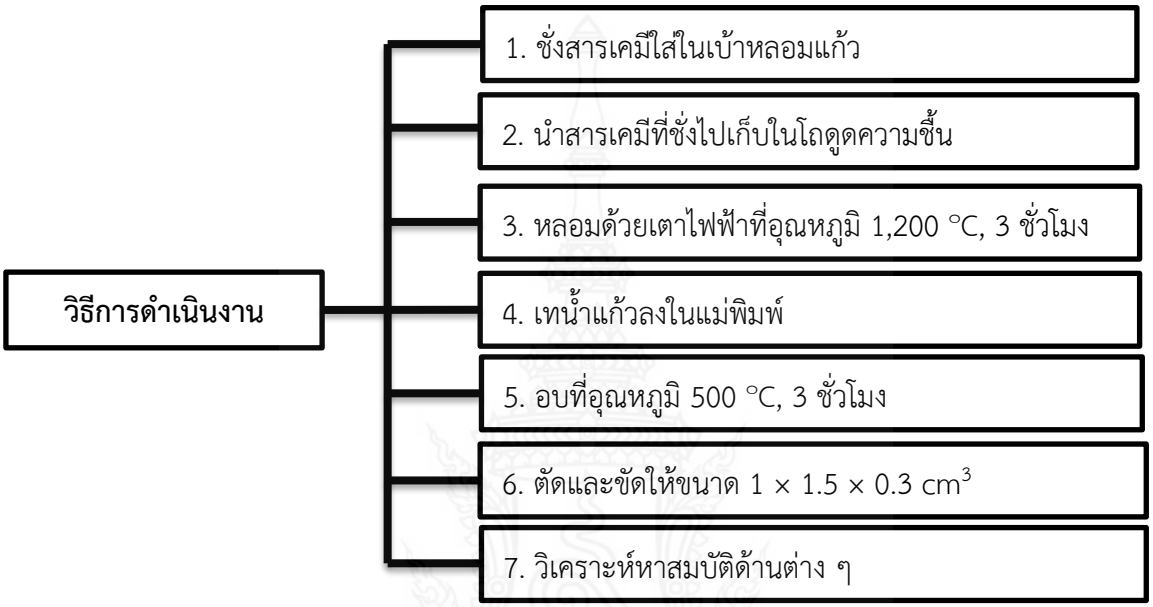
2.6 Terbium Oxide (Tb_2O_3) ความบริสุทธิ์ 99.95%

2.7 Europium Oxide (Eu_2O_3) ความบริสุทธิ์ 99.99%

3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.2.1. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การเตรียมแก้วตัวอย่างมีวิธีการดำเนินงานวิจัย แสดงดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 3.1 แผนผังแสดงวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.2.2 การเตรียมแก้วตัวอย่าง

3.2.2.1 การออกแบบสูตรองค์ประกอบทางเคมีของแก้ว

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบสูตรแก้วออกเป็น 3 ชุดการทดลอง ประกอบด้วย

ชุดที่ 1 $10Li_2O$-$10Na_2O$-$10K_2O$-$(70-x)B_2O_3$-xDy_2O_3 ร้อยละโดยโมล

โดยที่ x มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.0, 0.1, 0.5, 1.0 และ 2.0 mol%

ชุดที่ 2 $10Li_2O$-$10Na_2O$-$10K_2O$-$(70-x)B_2O_3$-xTb_2O_3 ร้อยละโดยโมล

โดยที่ x มีค่าเท่ากับร้อยละ 0, 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 mol%

ชุดที่ 3 $10Li_2O$-$10Na_2O$-$10K_2O$-$(70-x)B_2O_3$-xEu_2O_3 ร้อยละโดยโมล

โดยที่ x มีค่าเท่ากับร้อยละ 0, 0.5, 1.0, 3.0 และ 5.0 mol%

ในการเตรียมสารผู้วิจัยได้ใช้ H_3BO_3 แทน B_2O_3 เนื่องจากหาได้ง่ายและมีราคาที่ถูกกว่า โดยอาศัยการคำนวณตัวแปร Gravimetric และเมื่อถูกความร้อนจะเกิด ปฏิกิริยาทางเคมีในสมการที่ (3.1) ดังต่อไปนี้

$$2H_3BO_3 \longrightarrow B_2O_3 + 3H_2O \qquad (3.1)$$

ตารางที่ 3.1 ปริมาณสารเคมีที่ต้องชั่งสำหรับการหลอมแก้ว Li_2O-Na_2O-K_2O-B_2O_3 ที่เจือด้วย Dy_2O_3 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

สัญลักษณ์	x mol%	$10Li_2O$-$10Na_2O$-$10K_2O$-$(70-x)B_2O_3$-xDy_2O_3				
		Li_2O	Na_2O	K_2O	B_2O_3	Dy_2O_3
0.0LNKBDy	0.0	0.4437	0.9204	1.3988	7.2370	0.0000
0.1LNKBDy	0.1	0.4418	0.9163	1.3925	7.1943	0.0551
0.5LNKBDy	0.5	0.4340	0.9001	1.3680	7.0270	0.2709
1.0LNKBDy	1.0	0.4246	0.8807	1.3385	6.8261	0.5300
2.0LNKBDy	2.0	0.4157	0.8621	1.3103	6.6337	0.7783

ตารางที่ 3.2 ปริมาณสารเคมีที่ต้องชั่งสำหรับการหลอมแก้ว Li_2O-Na_2O-K_2O-B_2O_3 ที่เจือด้วย Tb_2O_3 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

สัญลักษณ์	x mol%	$10Li_2O$-$10Na_2O$-$10K_2O$-$(70-x)B_2O_3$-xTb_2O_3				
		Li_2O	Na_2O	K_2O	B_2O_3	Tb_2O_3
0LNKBTb	0	0.4437	0.9204	1.3988	7.2370	0.0000
1LNKBTb	1	0.4251	0.8816	1.3399	6.8331	0.5204
2LNKBTb	2	0.4079	0.8460	1.2857	6.4618	0.9987
3LNKBTb	3	0.3920	0.8131	1.2357	6.1193	1.4398
4LNKBTb	4	0.3774	0.7827	1.1895	5.8025	1.8479
5LNKBTb	5	0.3637	0.7545	1.1466	5.5085	2.2266
6LNKBTb	6	0.3511	0.7282	1.1067	5.2350	2.5790

ตารางที่ 3.3 ปริมาณสารเคมีที่ต้องชั่งสำหรับการหลอมแก้ว Li_2O-Na_2O-K_2O-B_2O_3 ที่เจือด้วย Eu_2O_3 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

สัญลักษณ์	x mol%	$10Li_2O$-$10Na_2O$-$10K_2O$-$(70-x)B_2O_3$-xEu_2O_3				
		Li_2O	Na_2O	K_2O	B_2O_3	Eu_2O_3
0.0LNKBEu	0.0	0.4437	0.9204	1.3988	7.2370	0.0000
0.5LNKBEu	0.5	0.4346	0.9015	1.3701	7.0378	0.2559
1.0LNKBEu	1.0	0.4259	0.8834	1.3425	6.8466	0.5016
3.0LNKBEu	3.0	0.3942	0.8176	1.2425	6.1530	1.3927
5.0LNKBEu	5.0	0.3669	0.7609	1.1564	5.5556	2.1602

3.2.2.2 การชั่งสารและการหลอมแก้ว

โดยกระบวนการจะแสดงดังภาพที่ 3.2 ซึ่งจะอธิบายเป็นขั้นตอนดังนี้

1 คำนวณสารเคมีจากสูตรที่กล่าวไปในข้างต้น โดยกำหนดให้สารเคมีทั้งหมดมีมวล รวม 10 กรัม

2 ชั่งสารเคมีต่าง ๆ ตามปริมาณที่คำนวณได้ใส่ลงในเบ้าพอร์ซเลน ผสมสารเคมีให้เป็น เนื้อเดียวกัน ปิดฝาด้วยแผ่นฟอยล์ และนำไปไว้ในโถดูดความชื้น

3 นำสารเคมีที่เตรียมได้มาหลอมด้วยวิธีการหลอมแล้วทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว (melt quenching technique) ในเตาหลอมไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 1,200 ℃ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ต่อมา นำแก้วที่หลอมได้เทลงในแม่พิมพ์แกรไฟต์รูปทรงสี่เหลี่ยมที่อุณหภูมิห้อง

4 หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปอบในเตาไฟฟ้าทันที ที่อุณหภูมิ 500 ℃ เป็น เวลา 3 ชั่วโมง เพื่อลดความเครียดที่เกิดขึ้นในเนื้อแก้ว และทิ้งให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง

5 นำแก้วตัวอย่างที่เตรียมได้ไปตัดและขัด เพื่อให้เหมาะสมต่อการวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ต่อไป

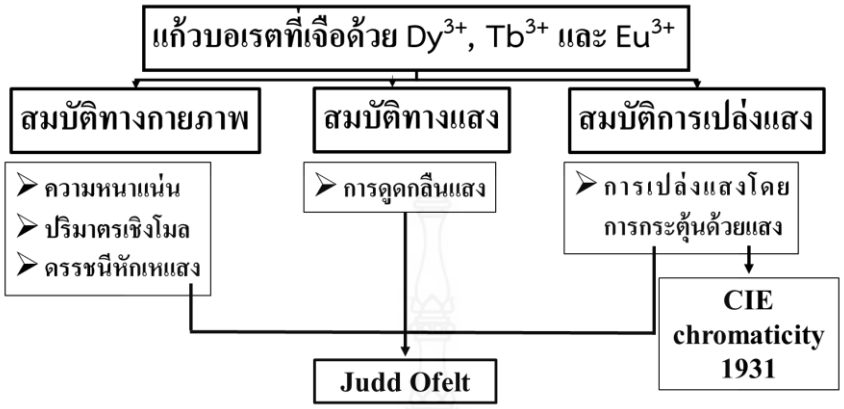


ภาพที่ 3.2 แผนภาพการเตรียมแก้วตัวอย่าง

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูลการวิจัย

3.3.1. แผนผังการวิเคราะห์ข้อมูล

กระบวนการวิเคราะห์ที่เกี่ยวข้องแสดงดังแผนผังในภาพที่ 2.3



ภาพที่ 3.3 แผนผังการวิเคราะห์ข้อมูล

3.3.2. ความหนาแน่นและปริมาตรเชิงโมล

การวิเคราะห์ความหนาแน่น (ρ) ของแก้วตัวอย่างที่เตรียมได้นั้น ผู้วิจัยได้ใช้หลักการของ อาร์คิมิดีส (Archimedes principle) โดยนำชิ้นงานตัวอย่างมาชั่งน้ำหนักในอากาศ (w_a) และชั่งน้ำหนักในน้ำ (w_b) ซึ่งอาศัยชุดอุปกรณ์ในภาพที่ 2.4 หลังจากนั้น คำนวณหาค่าความหนาแน่นของแก้วได้จากสมการที่ (3.2)

$$\rho = \frac{w_a}{w_a - w_b} \times \rho_w \qquad (3.2)$$

เมื่อ

w_a แทน น้ำหนักในอากาศ (g)

w_b แทน น้ำหนักในน้ำ (g)

$w_a - w_b$ แทน น้ำหนักที่หายไปในน้ำ (g)

ρ แทน ความหนาแน่นของวัตถุ (g /cm^3)

ρ_w แทน ความหนาแน่นของน้ำมีค่าเท่ากับ 1 g /cm^3



ภาพที่ 3.4 เครื่องวัดความหนาแน่น (Densitometer) รุ่น AND HR-200 บริษัท Dietheim

สำหรับค่าปริมาตรเชิงโมล (V_M) นั้น สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของแก้วกับปริมาตรของโมล ดังสมการที่ (3.3)

$$V_M = \frac{M_T}{\rho} \qquad (3.3)$$

เมื่อ V_M = ปริมาตรเชิงโมลของแก้วตัวอย่าง หน่วยเป็น cm^3/mol

M_T = น้ำหนักโมเลกุลรวมของแก้วตัวอย่าง หน่วยเป็น g/mol

ρ = ความหนาแน่นของแก้วตัวอย่าง หน่วยเป็น g/cm^3

3.3.3. วิธีการวัดค่าดรรชนีหักเหแสง

การวิเคราะห์ค่าดรรชนีหักเหแสงของแก้วตัวอย่างโดยใช้เครื่องวัดดรรชนีหักเหแสง ในภาพที่ 3.5 โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงโซเดียมที่ความยาวคลื่น 589.3 nm อุณหภูมิ 24.5 °C จากนั้นหยดสารละลายโมโนโบรโมแนพทาลีน (1-bromonaphthalene $C_{10}H_7Br$) ประมาณ 1-2 หยดลงบนแท่นกระจกวางตัวอย่างเพื่อป้องกันการเกิดช่องว่างระหว่างชิ้นตัวอย่างกับปริซึม หลังจากนั้นวางแก้วตัวอย่างลงบนแท่นกระจกและส่องดูแก้วผ่านเลนส์สำหรับอ่านค่าแล้วจะเห็นเป็นแถบมืดและแถบสว่าง ปรับให้แถบสว่างอยู่ด้านบนแถบมืดอยู่ด้านล่างแล้วบันทึกค่าดรรชนีหักเห นำค่าดรรชนีหักเหที่บันทึกได้มาสร้างตารางและกราฟ



ภาพที่ 3.5 เครื่องวัดค่าดรรชนีหักเห รุ่น DR-M2 บริษัท Atago

3.3.4. การดูดกลืนแสง

สำหรับการวิเคราะห์การดูดกลืนแสงของแก้วตัวอย่างนั้น ได้มีการศึกษาสเปกตรัมการ ดูดกลืนแสงในช่วงอัลตราไวโอเลต (ultraviolet) แสงที่ตามองเห็น (visible light) และช่วงอินฟราเรดใกล้ (near infrared) แสดงในภาพที่ 3.6 โดยเครื่อง UV-VIS-NIR Spectrophotometer รุ่น UV-3600 บริษัท Bara Scientific ที่สามารถใช้งานได้กว้างในช่วงความยาวคลื่น 200-2500 นาโนเมตร เป็นลำแสงคู่ (double beam) ที่มีระบบ Optical แบบพิเศษโดยใช้ Double Blazed Grating และ Double Monochromator ทำให้มีค่าการรบกวนแสง (stray light) ต่ำ โดยสามารถควบคุมระบบการทำงานของตัวเครื่องด้วยคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 3.6 เครื่อง UV-Vis-NIR Spectrophotometer รุ่น UV-3600 บริษัท Bara Scientific

3.3.5. การเปล่งแสงของแก้ว

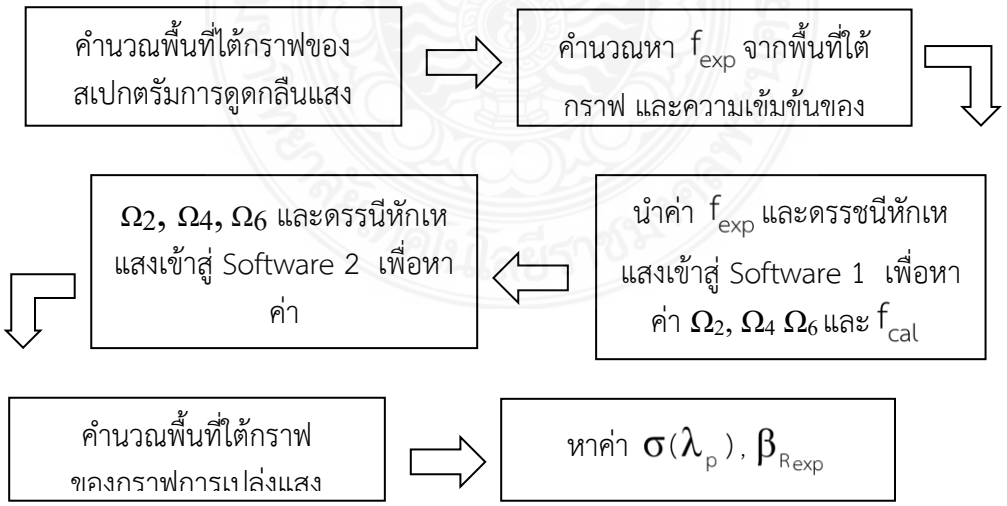
ในส่วนของการวิเคราะห์สมบัติการเปล่งแสง ผู้วิจัยได้ศึกษาสเปกตรัมของการเปล่งแสง และสเปกตรัมของการกระตุ้น แสดงในภาพที่ 3.7 โดยใช้เครื่อง Fluorescence Spectrophotometer รุ่น Cary Eclipse บริษัท Varian โดยมีหลอดซีนอนเป็นแหล่งกำเนิดแสง หลังจากนั้น ได้มีการนำสเปกตรัมการเปล่งแสงไปวิเคราะห์สีของแสงที่เปล่งออกมาโดยใช้มาตรฐาน CIE 1931 Chromaticity



ภาพที่ 3.7 เครื่อง Fluorescence Spectrophotometer รุ่น Cary Eclipse บริษัท Varian

3.3.6. การวิเคราะห์ Judd-Ofelt

การวิเคราะห์ Judd-Ofelt (J-O) แสดงได้ดังแผนผังการวิเคราะห์ Judd-Ofelt ในภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 แผนผังการวิเคราะห์ Judd-Ofelt (JO)

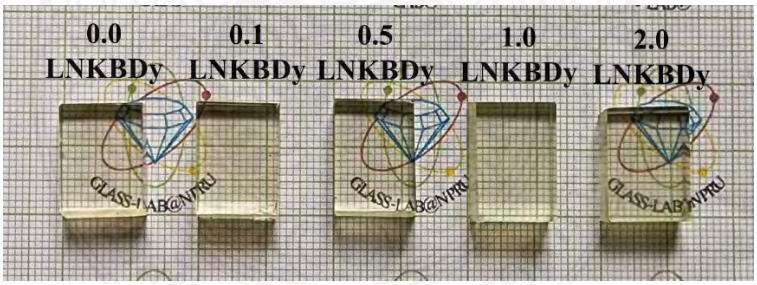
บทที่ 4 ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมแก้วตัวอย่างบอเรตที่เจือด้วย Dy^{3+}, Tb^{3+} และ Eu^{3+} ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เพื่อหาระบบแก้วที่เหมาะสำหรับการเจือธาตุแลนทาไนด์ สำหรับเป็นตัวกลางเลเซอร์ โดยศึกษาสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความหนาแน่น ปริมาตรเชิงโมล ศึกษาสมบัติทางแสง ได้แก่ ดรรชนีหักเหของแสง การดูดกลืนแสง การเปล่งแสง สีของแสงตามมาตรฐาน CIE 1931 และศึกษาศักยภาพสำหรับเป็นตัวกลางเลเซอร์ของตัวอย่างแก้วโดยทฤษฎีของ Judd-Ofelt (JO) ซึ่งผลการวิจัยมีดังนี้

4.1 แก้วลิเธียมโซเดียมโพแทสเซียมบอเรตที่เจือด้วย Dy_2O_3

1. ลักษณะของแก้วตัวอย่างที่ได้จากการหลอม

แก้วตัวอย่างบอเรตที่เจือด้วย Dy^{3+} ที่ได้จากการหลอมโดยใช้สูตร $10Li_2O$-$10Na_2O$-$10K_2O$-$(70-x)B_2O_3$-xDy_2O_3 โดยที่ x เท่ากับ 0.0, 0.1, 0.5, 1.0 และ 2.0 mol% ตามลำดับ (LNKBDy) หลอมด้วยเทคนิคการหลอมแก้วที่อุณหภูมิสูงและทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว หลังจากได้แก้วตัวอย่างจากการหลอมแล้วนำไปตัดและขัด พบว่าแก้วตัวอย่างมีความโปร่งแสงและมีสีเหลือง โดยสีของแก้วจะเข้มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของ Dy_2O_3 ที่เพิ่มขึ้น แสดงดังภาพที่ 4.1

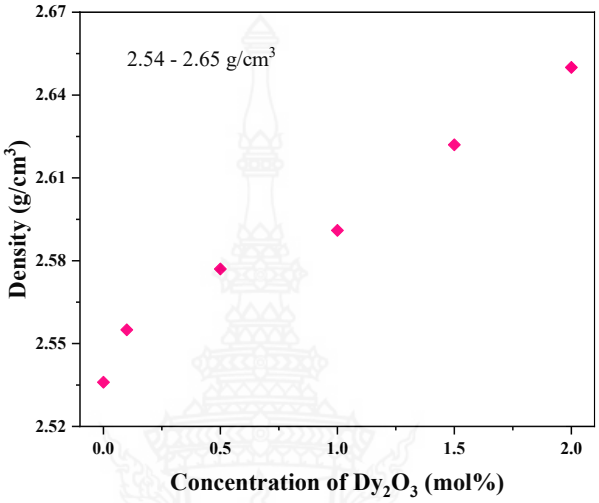


ภาพที่ 4.1 ลักษณะของแก้วตัวอย่าง LNKB ที่เจือด้วย Dy_2O_3

2. ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่น และปริมาตรเชิงโมล

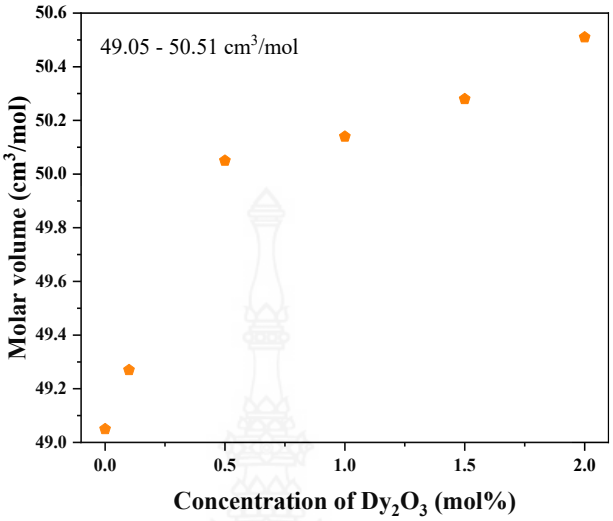
ค่าความหนาแน่นของแก้วตัวอย่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ Dy_2O_3 ที่เพิ่มขึ้น โดยค่าความหนาแน่นมีค่าอยู่ในช่วง 2.54 g/cm^3 ถึง 2.65 g/cm^3 ดังแสดงในภาพ 4.2 ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าความ

หนาแน่นนั้นเกิดจากการแทนที่อะตอมของ B_2O_3 ในโครงสร้างแก้วด้วยอะตอมของ Dy_2O_3 ซึ่งมีมวลโมเลกุลมากกว่า จึงทำให้ค่าความหนาแน่นของแก้วเพิ่มสูงขึ้น



ภาพที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของแก้วตัวอย่างกับปริมาณความเข้มข้นของ Dy_2O_3

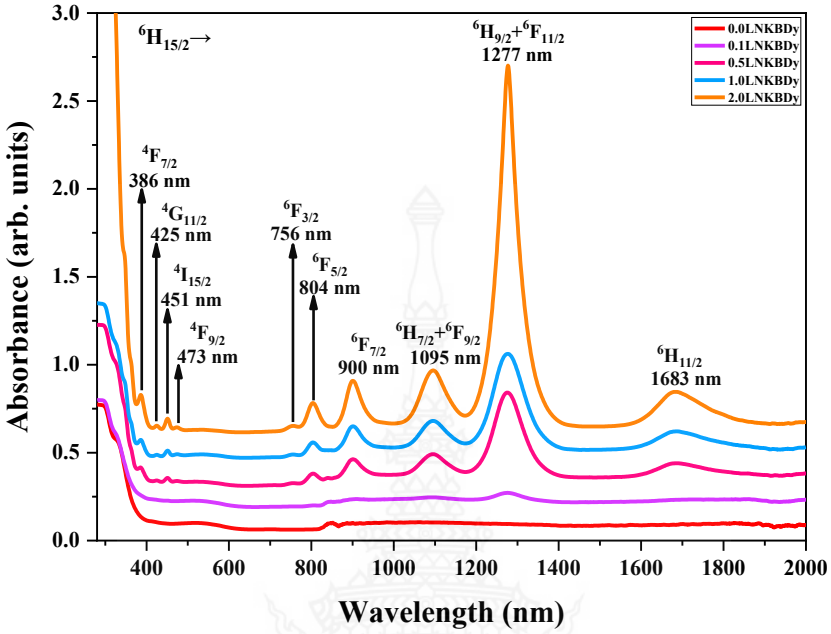
สำหรับค่าปริมาตรเชิงโมลของแก้วตัวอย่างสามารถคำนวณได้โดยนำค่าความหนาแน่นที่วัดได้แทนลงในสมการที่ (17) ผลการวิเคราะห์ค่าปริมาตรเชิงโมลพบว่า เมื่อปริมาณของ Dy_2O_3 เพิ่มสูงขึ้น ค่าปริมาตรเชิงโมลจะเพิ่มสูงขึ้นตาม เนื่องจากขนาดอะตอมของ Dy_2O_3 มีขนาดที่ใหญ่กว่าขนาดอะตอมของ B_2O_3 ซึ่งการเติม Dy_2O_3 จะทำให้โครงสร้างของแก้วเกิดการขยายตัวใหญ่ขึ้น ดังนั้นเมื่อเติม Dy_2O_3 ลงในโครงสร้างแก้วจะประพฤติตัวเป็น Network Modifier ที่ทำหน้าที่สร้างออกซิเจนที่ไม่มีพันธะกับอะตอมของธาตุอื่น ๆ (non-briding oxygen; NBOs) ให้มีปริมาณมากขึ้นจึงส่งผลให้ปริมาตรเชิงโมลของแก้วตัวอย่างขยายตัวจึงมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อนำค่าปริมาตรเชิงโมลของแก้วตัวอย่างมาเขียนกราฟความสัมพันธ์กับปริมาณของ Dy_2O_3 ที่เติมลงในโครงสร้างแก้วจะแสดงได้ดังภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรเชิงโมลกับปริมาณความเข้มข้นของ Dy_2O_3

3. ผลการวิเคราะห์การดูดกลืนแสง

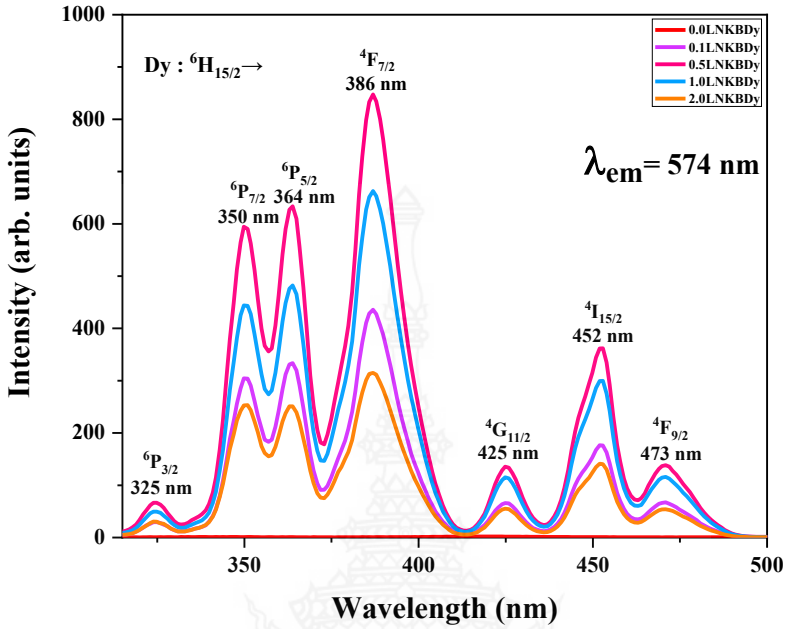
สเปกตรัมการดูดกลืนแสง (absorption spectra) ของแก้ว LNKB ที่เจือด้วยความเข้มข้นของ Dy_2O_3 ที่มีปริมาณความเข้มข้น 0.0, 0.1, 0.5, 1.0 และ 2.0 mol% ดังแสดงในภาพที่ 4.4 พบว่าแก้วตัวอย่างมีการดูดกลืนแสงตั้งแต่ความยาวคลื่นในช่วงแสงที่ตามองเห็นไปจนถึงช่วงอินฟราเรดใกล้ ซึ่งประกอบไปด้วยแสงที่ความยาวคลื่น 386, 425, 451, 473, 756, 804, 900, 1095, 1277 และ 1683 นาโนเมตรการดูดกลืนแสงดังกล่าวทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงานของ Dy^{3+} จากสถานะพื้น $^6H_{15/2}$ ขึ้นไปยังสถานะที่สูงกว่า ได้แก่ $^4F_{7/2}$ (386 นาโนเมตร), $^4G_{11/2}$ (425 นาโนเมตร), $^4I_{15/2}$ (451 นาโนเมตร), $^4F_{9/2}$ (473 นาโนเมตร), $^6F_{3/2}$ (756 นาโนเมตร), $^6F_{5/2}$ (804 นาโนเมตร), $^6F_{7/2}$ (900 นาโนเมตร), $^6H_{7/2}$+$^6F_{9/2}$ (1,095 นาโนเมตร), $^6H_{9/2}$+$^6F_{11/2}$ (1,277 นาโนเมตร) และ $^6H_{11/2}$ (1,683 นาโนเมตร) ตามลำดับ โดยแสงความยาวคลื่น 386 และ 1,277 นาโนเมตร ดูดกลืนได้ดีที่สุดในช่วงแสงที่ตามองเห็นและช่วงอินฟราเรดใกล้ ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่า แก้วสามารถดูดกลืนแสงเหล่านี้ได้มากขึ้นเมื่อปริมาณของ Dy_2O_3 ที่เติมลงไปในแก้วเพิ่มสูงขึ้น



ภาพที่ 4.4 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของแก้วตัวอย่าง LNKB ที่เจือด้วย Dy_2O_3 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

4. ผลการวิเคราะห์การกระตุ้นแสงของ Dy^{3+}

จากสเปกตรัมการกระตุ้นแสง (excitation spectra) ของแก้ว LNKB ที่เจือด้วยความเข้มข้นของ Dy_2O_3 ที่มีปริมาณความเข้มข้น 0.0, 0.1, 0.5, 1.0 และ 2.0 mol% ที่สามารถเปล่งแสงความยาวคลื่น 574 นาโนเมตรได้ โดยการวัดสเปกตรัมการกระตุ้นแสดงดังภาพที่ 4.5 พบพีคที่เกิดจากการดูดกลืนแสงของ Dy^{3+} ที่ความยาวคลื่น 325, 350, 364, 386, 425, 452, 473 นาโนเมตร ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานจากสถานะพื้นไป $^6H_{15/2}$ ไปยังสถานะกระตุ้นที่สูงกว่า ซึ่งได้แก่ $^6P_{3/2}$, $^6P_{7/2}$, $^6P_{5/2}$, $^4F_{7/2}$, $^4G_{11/2}$, $^4I_{15/2}$ และ $^4F_{9/2}$ ตามลำดับ โดยแสงความยาวคลื่น 386 นาโนเมตร สามารถกระตุ้นแก้วให้เปล่งแสงความยาวคลื่น 574 นาโนเมตร ออกมาได้ดีที่สุด ผู้วิจัยจึงนำความยาวคลื่นดังกล่าวไปกระตุ้นแก้วที่เจือ Dy^{3+} เพื่อศึกษาสเปกตรัมการเปล่งแสงต่อไป

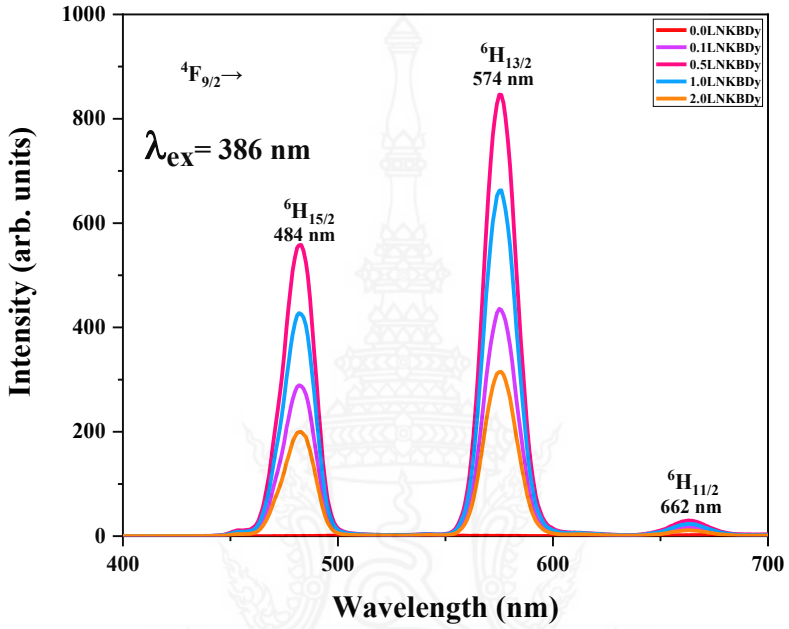


ภาพที่ 4.5 สเปกตรัมการกระตุ้นแสงของแก้วตัวอย่าง LNKB ที่เจือด้วย Dy_2O_3 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

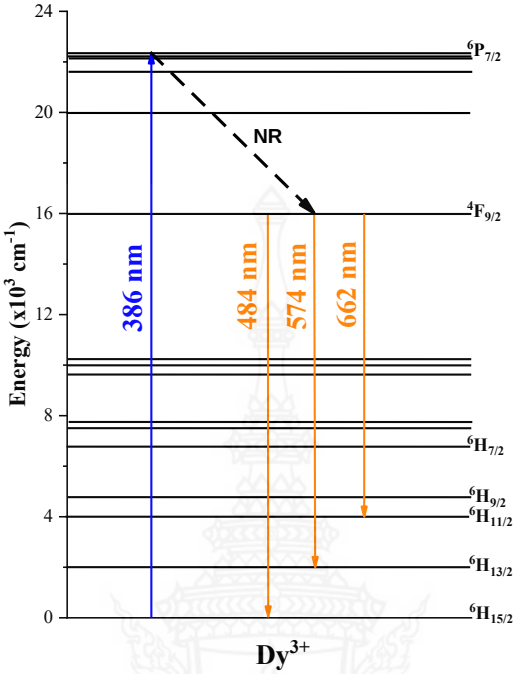
5. ผลการวิเคราะห์การเปล่งแสง

จากการศึกษาสเปกตรัมการเปล่งแสงของ Dy^{3+} เติมในแก้ว LNKB มีการดูดกลืนแสงความยาวคลื่น 386 นาโนเมตร ได้ดีที่สุด ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำแสงความยาวคลื่นดังกล่าวไปกระตุ้นแก้วตัวอย่าง เพื่อศึกษาสเปกตรัมการเปล่งแสง ซึ่งแสดงผลในภาพที่ 4.6 พบว่าแก้วตัวอย่างมีการเปล่งแสงกลับออกมาทั้งหมด 3 ความยาวคลื่น ได้แก่ 484, 574 และ 662 นาโนเมตร โดยแสงความยาวคลื่น 574 นาโนเมตร มีความเข้มมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลของสเปกตรัมการกระตุ้นในหัวข้อ 4 โดยแก้วมีการเปล่งแสงด้วยความเข้มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของ Dy_2O_3 ลงไปในแก้วจนกระทั่งถึงความเข้มข้น 0.5 mol% หลังจากนั้นความเข้มแสงที่เปล่งออกมาจะลดลงซึ่งเกิดจากปรากฏการณ์ Concentration Quenching Effect โดยความเข้มข้นของ Dy_2O_3 มากเกินจนทำให้ไอออนของ Dy เข้าใกล้กันมากเกินไป และเพิ่มโอกาสความน่าจะเป็นในการดูดกลืนแสงของ Dy ตัวข้างเคียงที่กำลังเปล่งออกมากลับเข้าไปอีก และสามารถอธิบายควบคู่ไปกับแผนภาพการเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงานของ Dy^{3+} ในภาพที่ 4.7 ได้ว่า เมื่อแก้วตัวอย่างถูกกระตุ้นด้วยแสงความยาวคลื่น 386 นาโนเมตร จะทำให้เกิดการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงาน $^6H_{15/2} \rightarrow {}^6P_{7/2}$ หลังจากนั้น Dy^{3+} จะลดระดับชั้นพลังงานลงมาที่สถานะ $^4F_{9/2}$ โดยที่ไม่เกิดการเปล่งแสง NR เนื่องจากมีการสูญเสียพลังงานไปในรูปของการสั่นของโฟนอน ต่อมาจึงลดระดับชั้นพลังงานอีกครั้ง โดยมีการเปล่งแสงทั้ง 3 ความ

ยาวคลื่น ออกมาโดยเกิดจากเปลี่ยนระดับชั้นพลังงาน $^4F_{9/2} \rightarrow {}^6H_{15/2}$ (484 นาโนเมตร), $^4F_{9/2} \rightarrow {}^6H_{13/2}$ (574 นาโนเมตร) และ $^4F_{9/2} \rightarrow {}^6H_{11/2}$ (662 นาโนเมตร) ตามลำดับ



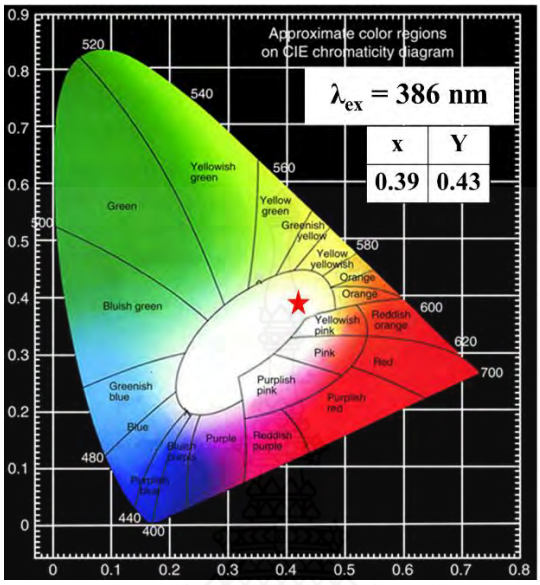
ภาพที่ 4.6 สเปกตรัมการเปล่งแสงจากการกระตุ้นด้วยแสงของแก้วตัวอย่าง LNKB ที่เจือด้วย Dy_2O_3 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ



ภาพที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงานของ Dy^{3+} เติมในแก้ว LNKB ตามสเปกตรัมการเปล่งแสง

6. สีของการเปล่งแสงในระบบ CIE 1931 ของ Dy^{3+} เติมในแก้ว

ผู้วิจัยได้นำสเปกตรัมการเปล่งแสงที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสงความยาวคลื่น 386 นาโนเมตร ของแก้ว LNKB ที่มีความเข้มข้นของ Dy_2O_3 ทุกความเข้มข้น มาวิเคราะห์คู่อันดับสี (x, y) ตามมาตรฐาน CIE 1931 Chromaticity พบว่า คู่อันดับสีของแสงที่เปล่งออกมาประมาณ (0.39, 0.43) และเมื่อนำไประบุพิกัดลงในแผนภาพสีตามมาตรฐาน CIE 1931 ดังภาพที่ 4.8 ทำให้สามารถระบุได้ว่า หากกระตุ้นแก้วดังกล่าวด้วยแสงความยาวคลื่น 386 นาโนเมตร จะทำให้แก้วเปล่งแสงสีขาว ออกมา



ภาพที่ 4.8 สีของการเปล่งแสงในระบบ CIE 1931 ของ Dy^{3+} เติมในแก้ว LNKB

7. ศึกษาศักยภาพสำหรับเป็นวัสดุตัวกลางเลเซอร์ โดยการวิเคราะห์ตามทฤษฎี J-O

การศึกษาศักยภาพสำหรับเป็นวัสดุตัวกลางเลเซอร์ของตัวอย่างแก้วที่เจือ Dy_2O_3 จากการศึกษาแก้ว LNKB ที่เจือความเข้มข้น 0.5 mol% เป็นตัวอย่างแก้วที่สามารถเปล่งแสงที่มีความเข้มสูงสุด จึงได้นำตัวอย่างแก้วดังกล่าวมาศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติการเปล่งแสงด้วยทฤษฎี J-O โดยพิจารณาจากกราฟการดูดกลืนแสงที่ช่วงความยาวคลื่นประมาณ 1277 นาโนเมตร ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่าความแรงของการสั่นที่ได้จากการทดลอง (f_{exp}) และค่าที่ได้จากการคำนวณ (f_{cal}) ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการเปลี่ยนระดับพลังงาน $^6H_{15/2} \rightarrow {}^6H_{9/2}+{}^6F_{11/2}$ มีค่าความแรงในการสั่นมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับระดับชั้นพลังงานอื่น ๆ โดยมีค่าเท่ากับ 3.80×10^{-6} และ 3.84×10^{-6} ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 เมื่อพิจารณาค่า Ω_2, Ω_4 และ Ω_6 ของแก้ว 0.5LNKBDy ในตารางที่ 4.2 มีค่าเท่ากับ 6.52×10^{-20} 3.69×10^{-20} และ 2.45×10^{-20} ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งพบว่าค่า Ω_2 ในแก้ว 0.5LNKBDy มีค่าเท่ากับ 6.52×10^{-20} ตารางเซนติเมตร ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าของแก้ว BaFBDy (Dwivedi, Y. et al., 2009: 1472-1477) มีค่าเท่ากับ 2.90×10^{-20} ตารางเซนติเมตร SLBiBDy (Rajesh, D. et al., 2012: 841-849) มีค่าเท่ากับ 4.69×10^{-20} ตารางเซนติเมตร Fluoroborate (Dwivedi, Y. et al. 2009: 1472-1477) มีค่าเท่ากับ 2.90×10^{-20} ตารางเซนติเมตร Oxyfluoroborate (Mahato, K. K. et al. 2005: 431-436) มีค่าเท่ากับ 2.68×10^{-20} ตารางเซนติเมตร และ SZP (Tripathi, G. et al. 2005: 1120-1124) มีค่าเท่ากับ 2.69×10^{-20} ตารางเซนติเมตร แต่น้อยกว่าค่าของแก้ว ZPDy (Lira, A. et al. 2014: 188-192) มีค่าเท่ากับ 7.30×10^{-20} ตารางเซนติเมตร

BPBDy (Saleem, S. A. et al. 2011: 78-84) มีค่าเท่ากับ 6.99×10^{-20} ตารางเซนติเมตร และ LiTBDy (Saleem, S. A. et al. 2011: 78-84) มีค่าเท่ากับ 8.75×10^{-20} ตารางเซนติเมตร จึงกล่าวได้ว่าลิแกนด์ที่ล้อมรอบ Dy^{3+} ของแก้ว 0.5LNKBDy มีความไม่สมมาตรสูงและพันธะระหว่าง Dy^{3+} กับลิแกนด์มีความเป็นโควาเลนต์สูงกว่าแก้ว BaFBDy SLBiBDy Fluoroborate Oxyfluoroborate และ SZP แต่น้อยกว่าในแก้ว ZPDy BPBDy และ LiTBDy และค่า Ω_4 และ Ω_6 ของแก้ว 0.5LNKBDy บอกถึงความหนืดและความแข็งของเนื้อแก้ว

จากการศึกษาการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงาน $^4F_{9/2} \longrightarrow {}^6H_{13/2}$ ที่ช่วงความยาวคลื่นประมาณ 574 นาโนเมตร มีค่าความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานแล้วทำให้เกิดการเปล่งแสง (A_R) ภาคตัดขวางของการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น ($\sigma(\lambda_p)$) และสัดส่วนการเปล่งแสง (β_R) ของแก้ว LNKB ที่เจือด้วย Dy_2O_3 ของตัวอย่างแก้วมีค่าสูงโดย ($\sigma(\lambda_p)$) มีค่าเท่ากับ 1.48×10^{-22} ตารางเซนติเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแก้วสามารถทำให้เกิดการเปล่งแสงเลเซอร์ได้โดยใช้พลังงานต่ำ และสามารถให้กำเนิดแสงเลเซอร์ออกมาในปริมาณที่มาก เมื่อพิจารณาสัดส่วนของการเปล่งแสงที่ได้ (β_R) มีค่าเกิน 0.50 ทำให้ทราบได้ว่าแก้ว 0.5LNKBDy จะให้กำเนิดแสงเลเซอร์ความยาวคลื่น 574 นาโนเมตร จึงสามารถสรุปได้ว่า แก้ว LNKB ที่เจือด้วยความเข้มข้น 0.5 mol% เป็นวัสดุที่มีศักยภาพที่น่าสนใจ เหมาะต่อการนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุตัวกลางเลเซอร์ ที่ช่วงการเปล่งแสงความยาวคลื่น 574 นาโนเมตร

ตารางที่ 4.1 ค่าความแรงของการสั่นที่ได้จากการทดลอง (f_{exp}) และที่คำนวณได้ (f_{cal}) ของการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานเนื่องจากการดูดกลืนแสงในแก้วลิเธียมโซเดียมโพแทสเซียมบอเรตที่เจือด้วย Dy_2O_3 ที่ความเข้มข้น 0.5 mol%

สถานะ $^6H_{15/2} \longrightarrow$	ตำแหน่งสูงสุด		Oscillator Strengths	
	ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	พลังงาน (ต่อเซนติเมตร)	f_{exp} ($\times 10^{-6}$)	f_{cal} ($\times 10^{-6}$)
$^4F_{7/2}$	386	25772	0.36	0.41
$^4I_{15/2}$	451	22177	0.95	0.92
$^6F_{3/2}$	756	13315	0.40	0.38
$^6F_{5/2}$	804	12452	0.83	0.77
$^6F_{7/2}$	900	11191	1.44	1.35
$^6H_{7/2}+^6F_{9/2}$	1095	9153	1.70	1.68
$^6H_{9/2}+^6F_{11/2}$	1277	7866	3.80	3.84
$^6H_{11/2}$	1683	5997	0.69	0.72

δ_{rms} = ±0.845

ตารางที่ 4.2 ค่าตัวแปร J-O (Ω_2, Ω_4 และ Ω_6) ของแก้วลิเธียมโซเดียมโพแทสเซียมบอเรตที่เจือด้วยด้วย Dy_2O_3 ที่ความเข้มข้น 0.5 mol% ในงานวิจัยนี้ เปรียบเทียบค่าตัวแปร J-O ของแก้วอื่น ๆ ที่มีการเจือด้วย Dy_2O_3

ระบบแก้ว	Ω_2 ($\times 10^{-20}$)	Ω_4 ($\times 10^{-20}$)	Ω_6 ($\times 10^{-20}$)	แนวโน้ม
0.5LNKBDy [งานวิจัย]	6.52	3.69	2.45	$\Omega_2>\Omega_4>\Omega_6$
BaFBDy (Dwivedi, Y. et al., 2009: 1472-1477)	2.90	1.09	0.98	$\Omega_2>\Omega_4>\Omega_6$
SLBiBDy (Rajesh, D. et al., 2012: 841-849)	4.69	1.46	1.19	$\Omega_2>\Omega_4>\Omega_6$
ZPDy (Lira, A. et al. 2014: 188-192)	7.30	1.14	0.86	$\Omega_2>\Omega_4>\Omega_6$
BPBDy (Saleem, S. A. et al. 2011: 78-84)	6.99	2.00	1.44	$\Omega_2>\Omega_4>\Omega_6$
Fluoroborate (Dwivedi, Y. et al. 2009: 1472-1477)	2.90	1.09	0.98	$\Omega_2>\Omega_4>\Omega_6$
LiTBDy (Saleem, S. A. et al. 2011: 78-84)	8.75	2.62	2.07	$\Omega_2>\Omega_4>\Omega_6$
Oxyfluoroborate (Mahato, K. K. et al. 2005: 431-436)	2.68	2.56	0.89	$\Omega_2>\Omega_4>\Omega_6$
SZP (Tripathi, G. et al. 2005: 1120-1124)	2.69	0.29	0.12	$\Omega_2>\Omega_4>\Omega_6$

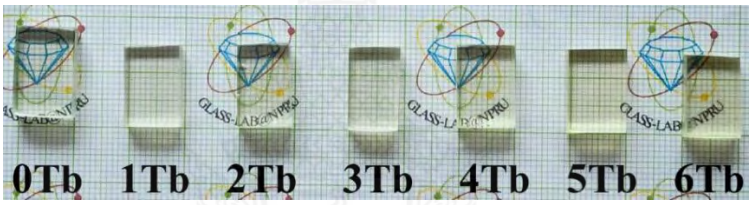
ตารางที่ 4.3 ความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานแล้วทำให้เกิดการเปล่งแสง (A_R) ภาคตัดขวางของการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น ($\sigma(\lambda_p)$) และสัดส่วนการเปล่งแสง (β_R) ของแก้วลิเธียมโซเดียมโพแทสเซียมบอเรตที่เจือด้วยด้วย Dy_2O_3 ที่ความเข้มข้น 0.5 mol%

ระดับชั้นพลังงาน $^4F_{9/2} \longrightarrow$	λ_p (นาโนเมตร)	A_R (วินาที)	β_R	$(\sigma(\lambda_p)) \times 10^{-22}$ (ตารางเซนติเมตร)
$^6H_{15/2}$	484	127.38	0.33	0.21
$^6H_{13/2}$	574	402.25	0.65	1.48
$^6H_{11/2}$	662	49.51	0.04	0.09

4.2 แก้วลิเธียมโซเดียมโพแทสเซียมบอเรตที่เจือด้วย Tb_2O_3

1. ลักษณะของแก้วตัวอย่างที่ได้จากการหลอม

แก้วตัวอย่างบอเรตที่เจือด้วย Tb^{3+} ที่ได้จากการหลอมโดยใช้สูตรแก้ว $10Li_2O$-$10Na_2O$-$10K_2O$-$(70-x)B_2O_3$-xTb_2O_3 โดยที่ x เท่ากับ 0, 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 mol% ตามลำดับ (LNKBTb) หลอมด้วยเทคนิคการหลอมแก้วที่อุณหภูมิสูงและทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว หลังจากได้แก้วตัวอย่างจากการหลอมแล้วนำไปตัดและขัด พบว่าแก้วตัวอย่างมีความโปร่งแสงและมีสีเหลือง โดยสีของแก้วจะเข้มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของ Tb_2O_3 ที่เพิ่มขึ้น แสดงดังภาพที่ 4.9



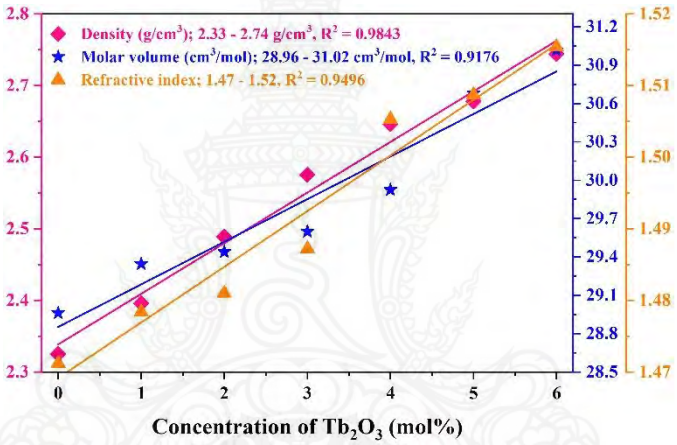
ภาพที่ 4.9 ลักษณะของแก้วตัวอย่าง LNKB ที่เจือด้วย Tb_2O_3

2. ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่น ปริมาตรเชิงโมล และดรรชนีหักเหของแสง

ค่าความหนาแน่นของแก้วตัวอย่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ Tb_2O_3 ที่เพิ่มขึ้น โดยค่าความหนาแน่นมีค่าอยู่ในช่วง 2.33 g/cm^3 ถึง 2.74 g/cm^3 ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าความหนาแน่นนั้นเกิดจากการแทนที่อะตอมของ B_2O_3 ในโครงสร้างแก้วด้วยอะตอมของ Tb_2O_3 ซึ่งมีมวลโมเลกุลมากกว่า จึงทำให้ค่าความหนาแน่นของแก้วเพิ่มสูงขึ้น

สำหรับค่าปริมาตรเชิงโมลของแก้วตัวอย่างสามารถคำนวณได้โดยนำค่าความหนาแน่นที่วัดได้แทนลงในสมการที่ (17) ผลการวิเคราะห์ค่าปริมาตรเชิงโมลพบว่า เมื่อปริมาณของ Tb_2O_3 เพิ่มสูงขึ้น ค่าปริมาตรเชิงโมลจะเพิ่มสูงขึ้นตาม เนื่องจากขนาดอะตอมของ Tb_2O_3 มีขนาดที่ใหญ่กว่าขนาดอะตอมของ B_2O_3 ซึ่งการเติม Tb_2O_3 จะทำให้โครงสร้างของแก้วเกิดการขยายตัวใหญ่ขึ้น ดังนั้นเมื่อเติม Tb_2O_3 ลงในโครงสร้างแก้วจะประพฤติตัวเป็น Network Modifier ที่ทำหน้าที่สร้างออกซิเจนที่ไม่มีพันธะกับอะตอมของธาตุอื่น ๆ (NBOs) ให้มีปริมาณมากขึ้นจึงส่งผลให้ปริมาตรเชิงโมลของแก้วตัวอย่างขยายตัวจึงมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อนำค่าปริมาตรเชิงโมลของแก้วตัวอย่างมาเขียนกราฟความสัมพันธ์กับปริมาณของ Tb_2O_3 ที่เติมลงในโครงสร้างแก้วจะแสดงได้ดังภาพที่ 4.10

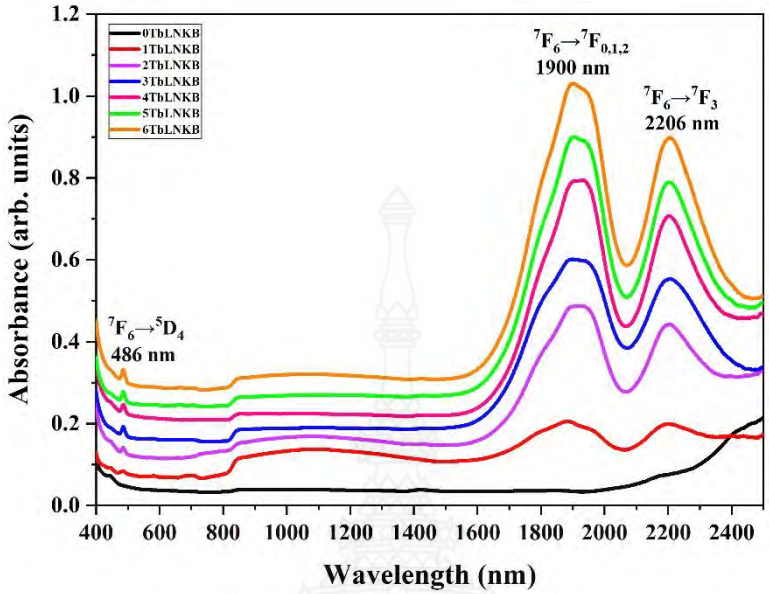
จากการทดลองพบว่า ค่าดรรชนีหักเหของตัวอย่างแก้วมีค่าอยู่ระหว่าง 1.47 ถึง 1.52 โดยค่าดรรชนีหักเหมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของ Tb_2O_3 ดังแสดงในภาพที่ 31 เนื่องจากค่าดรรชนีหักเหขึ้นกับความหนาแน่นของตัวอย่างแก้ว ดังนั้นการแทนที่ของ B_2O_3 ด้วย Tb_2O_3 ส่งผลให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นและดรรชนีหักเหของตัวอย่างแก้วมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีไดอิเล็กตริกแบบดั้งเดิมที่ว่า ค่าดรรชนีหักเหจะขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่น และสภาพการเกิดขั้วได้ของอะตอมในวัสดุ



ภาพที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น ปริมาตรเชิงโมลและดรรชนีหักเหของแก้วตัวอย่างกับปริมาณความเข้มข้นของ Tb_2O_3

3. ผลการวิเคราะห์การดูดกลืนแสง

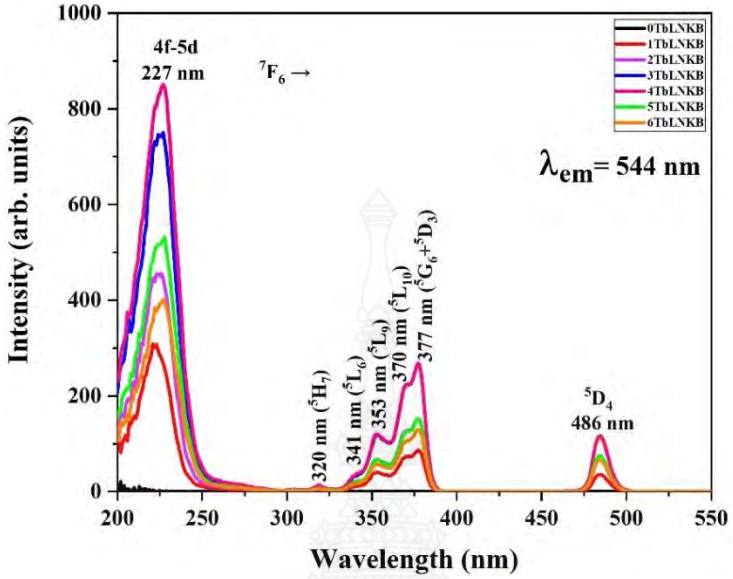
สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของแก้ว LNKB ที่เจือด้วยความเข้มข้นของ Tb_2O_3 ที่มีปริมาณความเข้มข้น 0, 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 mol% พบว่าแก้วมีการดูดกลืนแสงในช่วงแสงที่ตามองเห็นไปจนถึงอินฟราเรดใกล้ โดยในช่วงแสงที่ตามองเห็นพบการดูดกลืนเพียง 1 ความยาวคลื่น คือ ที่ 486 นาโนเมตร ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงานของ Tb^{3+} จากสถานะพื้น $^7F_6$ ไปยังสถานะกระตุ้น $^5D_4$ และสำหรับในช่วงอินฟราเรดใกล้พบการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 1,900 และ 2,206 นาโนเมตร ซึ่งการปรากฏขึ้นอย่างชัดเจนแสดงถึงการเปลี่ยนระดับพลังงาน $^7F_6 \longrightarrow {}^7F_{0,1,2}$ และ $^7F_6 \longrightarrow {}^7F_3$ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเติม Tb_2O_3 มากขึ้น การดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้จะเกิดได้มาก ดังแสดงในภาพที่ 4.11



ภาพที่ 4.11 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของแก้วตัวอย่าง LNKB ที่เจือด้วย Tb_2O_3 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

4. ผลการวิเคราะห์การกระตุ้นแสงของ Tb^{3+}

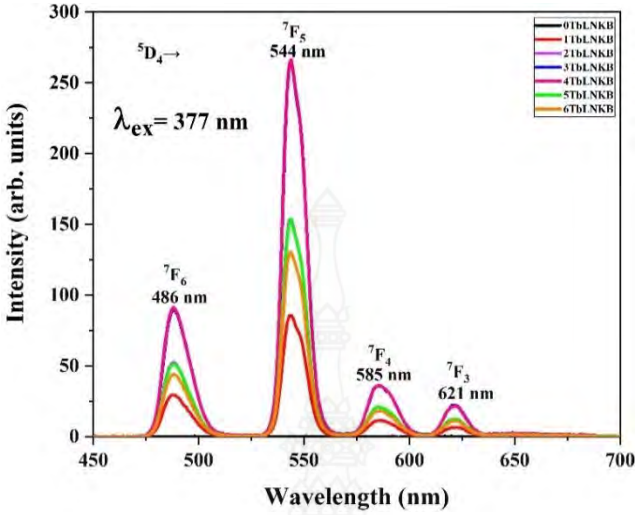
จากสเปกตรัมการกระตุ้นแสงของแก้ว LNKB ที่เจือด้วยความเข้มข้นของ Tb_2O_3 ที่มีปริมาณความเข้มข้น 0, 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 mol% ที่สามารถเปล่งแสงความยาวคลื่น 544 นาโนเมตรได้ โดยการวัดสเปกตรัมการกระตุ้นแสดงดังภาพที่ 4.12 พบพีคที่เกิดจากการดูดกลืนแสงของ Tb^{3+} ที่ความยาวคลื่น 227, 320, 341, 353, 370, 377 และ 486 นาโนเมตร ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานจากสถานะพื้นไป $^7F_6$ ไปยังสถานะกระตุ้นที่สูงกว่า ได้แก่ 4f-5d, $^5H_7$, $^5L_6$, $^5L_9$, $^5L_{10}$, $^5G_6$ +$^5D_3$ และ $^5D_4$ ตามลำดับ โดยแสงความยาวคลื่น 227 (ช่วงอัลตราไวโอเลต) และ 377 (ช่วงแสงที่ตามองเห็น) นาโนเมตร สามารถกระตุ้นแก้วให้เปล่งแสงความยาวคลื่น 544 นาโนเมตร ออกมาได้ดีที่สุด ผู้วิจัยจึงนำความยาวคลื่นดังกล่าวไปกระตุ้นแก้วที่เจือ Tb^{3+} เพื่อศึกษาสเปกตรัมการเปล่งแสงต่อไป



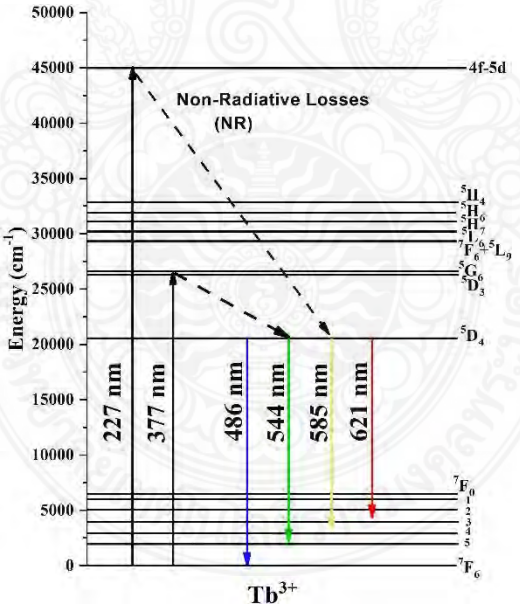
ภาพที่ 4.12 สเปกตรัมการกระตุ้นแสงของแก้วตัวอย่าง LNKB ที่เจือด้วย Tb_2O_3 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

5. ผลการวิเคราะห์การเปล่งแสง

จากการที่แก้ว LNKB ที่เติม Tb^{3+} มีการดูดกลืนแสงความยาวคลื่น 227 และ 377 นาโนเมตร ได้ดีที่สุด ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำแสงความยาวคลื่นดังกล่าวไปกระตุ้นแก้วตัวอย่าง เพื่อศึกษาสเปกตรัมการเปล่งแสง ซึ่งแสดงผลในภาพที่ 4.13 พบว่าแก้วตัวอย่างมีการเปล่งแสงกลับออกมาทั้งหมด 4 ความยาวคลื่น ได้แก่ 486, 544, 585 และ 621 นาโนเมตร โดยแสงความยาวคลื่น 544 นาโนเมตร มีความเข้มมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลของสเปกตรัมการกระตุ้นในหัวข้อ 4 โดยแก้วมีการเปล่งแสงด้วยความเข้มมากขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของ Tb_2O_3 ลงไปในแก้วจนกระทั่งถึงความเข้มข้น 4 mol% หลังจากนั้นความเข้มแสงที่เปล่งออกมาจะลดลงซึ่งเกิดจากปรากฏการณ์ Concentration Quenching Effect โดยความเข้มข้นของ Tb_2O_3 มากเกินจนทำให้ไอออนของ Tb เข้าใกล้กันมากเกินไป และเพิ่มโอกาสความน่าจะเป็นในการดูดกลืนแสงของ Tb ตัวข้างเคียงที่กำลังเปล่งออกมากลับเข้าไปอีก และสามารถอธิบายควบคู่ไปกับแผนภาพการเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงานของ Tb^{3+} ในภาพที่ 4.14 ได้ว่า เมื่อแก้วตัวอย่างถูกกระตุ้นด้วยแสงความยาวคลื่น 227 และ 377 นาโนเมตร จะทำให้เกิดการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงาน $^7F_6 \rightarrow$ 4f-5d และ $^5D_3$ หลังจากนั้น Tb^{3+} จะลดระดับชั้นพลังงานลงมาที่สถานะ $^5D_4$ โดยที่ไม่เกิดการเปล่งแสง NR เนื่องจากมีการสูญเสียพลังงานไปในรูปของการสั่นของโฟนอน ต่อมาจึงลดระดับชั้นพลังงานอีกครั้ง โดยมีการเปล่งแสงทั้ง 4 ความยาวคลื่น ออกมา โดยเกิดจากเปลี่ยนระดับชั้นพลังงาน $^5D_4 \rightarrow {}^7F_6$ (486 นาโนเมตร), $^5D_4 \rightarrow {}^7F_5$ (544 นาโนเมตร), $^5D_4 \rightarrow {}^7F_4$ (585 นาโนเมตร) และ $^5D_4 \rightarrow {}^7F_3$ (621 นาโนเมตร) ตามลำดับ



ภาพที่ 4.13 สเปกตรัมการเปล่งแสงของแก้วตัวอย่าง LNKB ที่เจือด้วย Tb_2O_3 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

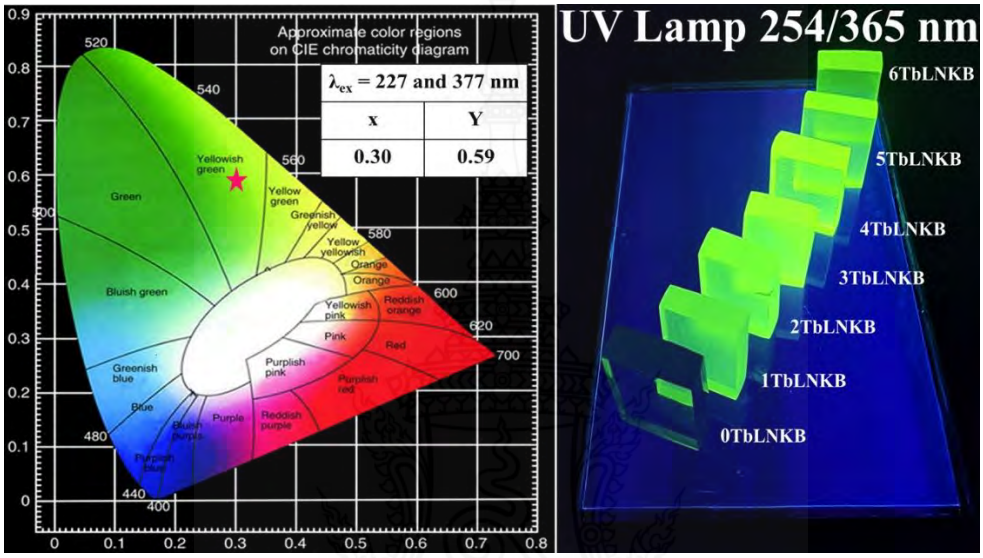


ภาพที่ 4.14 การเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงานของ Tb^{3+} เติมในแก้ว LNKB ตามสเปกตรัมการเปล่งแสง

6. สีของการเปล่งแสงในระบบ CIE 1931 ของ Tb^{3+} เติมในแก้ว

ผู้วิจัยได้นำสเปกตรัมการเปล่งแสงที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสงความยาวคลื่น 227 และ 377 นาโนเมตร ของแก้ว LNKB ที่มีความเข้มข้นของ Tb_2O_3 ทุกความเข้มข้น มาวิเคราะห์คู่อันดับสี (x, y) ตามมาตรฐาน CIE 1931 Chromaticity พบว่า คู่อันดับสีของแสงที่เปล่งออกมาประมาณ (0.30, 0.59)

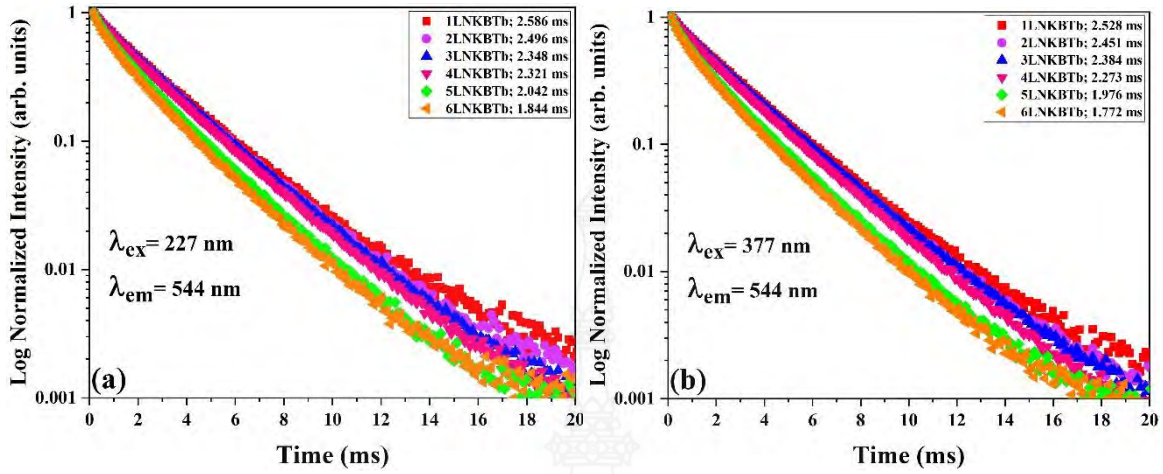
และเมื่อนำไประบุพิกัดลงในแผนภาพสีตามมาตรฐาน CIE 1931 ดังภาพที่ 4.15 ทำให้สามารถระบุได้ว่า หากกระตุ้นแก้วดังกล่าวด้วยแสงความยาวคลื่น 227 และ 377 นาโนเมตร จะทำให้แก้วเปล่งแสงสีเหลือง-เขียวออกมา



ภาพที่ 4.15 สีของการเปล่งแสงในระบบ CIE 1931 ของ Tb^{3+} เติมในแก้ว LNKB

7. เวลาการสลายตัวของ Tb^{3+} เติมในแก้ว

จากการศึกษาเวลาการสลายตัวของ Tb^{3+} เติมในแก้ว จากความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความเข้มแสงความยาวคลื่น 544 นาโนเมตร ที่เปล่งออกมาจากแก้วจากการกระตุ้นที่ความยาวคลื่น 227 และ 377 นาโนเมตร แสดงดังภาพที่ 4.16 (a) และ (b) ซึ่งจากการปรับกราฟดังกล่าวด้วยฟังก์ชันการลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลทำให้ได้ค่าเวลาการสลายตัวของแก้วที่เติมด้วย Tb_2O_3 ความเข้มข้น 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 mol% มีค่าเท่ากับ 2.586, 2.496, 2.348, 2.321, 2.042 และ 1.844 ms (λ_{ex} = 227 nm) และ 2.528, 2.451, 2.384, 2.273, 1.976 และ 1.772 ms (λ_{ex} = 377 nm) ตามลำดับ ซึ่งค่าเวลาการสลายตัวของแก้วมีค่าลดลงตามความเข้มข้นของ Tb_2O_3 ที่เพิ่มขึ้น

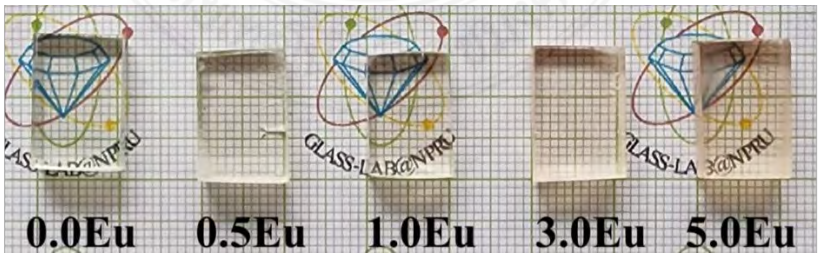


ภาพที่ 4.16 เวลาการสลายตัวของ Tb^{3+} เติมในแก้ว LNKB

4.3 แก้วลิเธียมโซเดียมโพแทสเซียมบอเรตที่เจือด้วย Eu_2O_3

1. ลักษณะของแก้วตัวอย่างที่ได้จากการหลอม

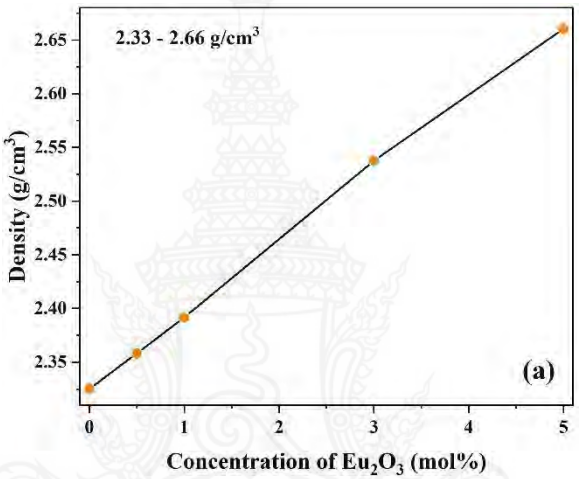
แก้วตัวอย่างบอเรตที่เจือด้วย Eu^{3+} ที่ได้จากการหลอมโดยใช้สูตรแก้ว $10Li_2O$-$10Na_2O$-$10K_2O$-$(70-x)B_2O_3$-xEu_2O_3 โดยที่ x เท่ากับ 0, 0.5, 1.0, 3.0 และ 5.0 mol% ตามลำดับ (LNKBEu) หลอมด้วยเทคนิคการหลอมแก้วที่อุณหภูมิสูงและทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว หลังจากได้แก้วตัวอย่างจากการหลอมและนำไปตัดและขัด พบว่าแก้วตัวอย่างมีความโปร่งแสงและมีสีเหลือง โดยสีของแก้วจะเข้มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของ Eu_2O_3 ที่เพิ่มขึ้น แสดงดังภาพที่ 4.17



ภาพที่ 4.17 ลักษณะของแก้วตัวอย่าง LNKB ที่เจือด้วย Eu_2O_3

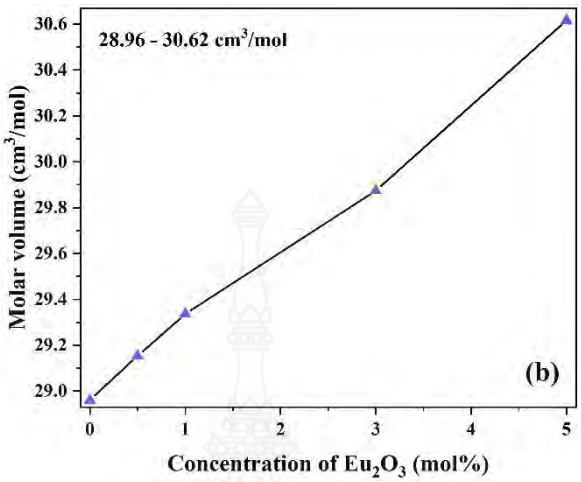
2. ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่น ปริมาตรเชิงโมล และดรรชนีหักเหของแสง

ค่าความหนาแน่นของแก้วตัวอย่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ Eu_2O_3 ที่เพิ่มขึ้น โดย ค่าความหนาแน่นมีค่าอยู่ในช่วง 2.33 g/cm^3 ถึง 2.66 g/cm^3 ดังภาพที่ 4.18 ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าความหนาแน่นนั้นเกิดจากการแทนที่อะตอมของ B_2O_3 ในโครงสร้างแก้วด้วยอะตอมของ Eu_2O_3 ซึ่งมีมวลโมเลกุลมากกว่า จึงทำให้ค่าความหนาแน่นของแก้วเพิ่มสูงขึ้น



ภาพที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของแก้วตัวอย่างกับปริมาณความเข้มข้นของ Eu_2O_3

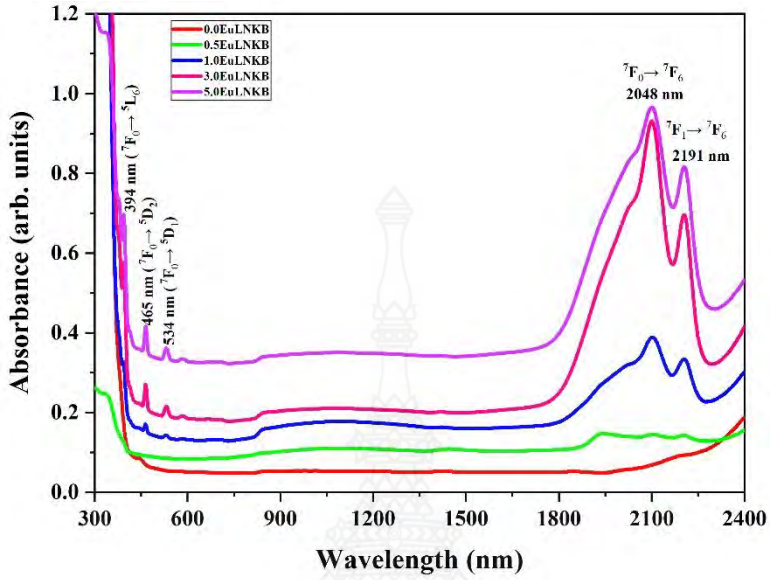
สำหรับค่าปริมาตรเชิงโมลของแก้วตัวอย่างสามารถคำนวณได้โดยนำค่าความหนาแน่นที่วัดได้แทนลงในสมการที่ (17) ผลการวิเคราะห์ค่าปริมาตรเชิงโมลพบว่า เมื่อปริมาณของ Eu_2O_3 เพิ่มสูงขึ้น ค่าปริมาตรเชิงโมลจะเพิ่มสูงขึ้นตาม เนื่องจากขนาดอะตอมของ Eu_2O_3 มีขนาดที่ใหญ่กว่าขนาดอะตอมของ B_2O_3 ซึ่งการเติม Eu_2O_3 จะทำให้โครงสร้างของแก้วเกิดการขยายตัวใหญ่ขึ้น ดังนั้นเมื่อเติม Eu_2O_3 ลงในโครงสร้างแก้วจะประพฤติตัวเป็น Network Modifier ที่ทำหน้าที่สร้างออกซิเจนที่ไม่มีพันธะกับอะตอมของธาตุอื่น ๆ (NBOs) ให้มีปริมาณมากขึ้นจึงส่งผลให้ปริมาตรเชิงโมลของแก้วตัวอย่างขยายตัวจึงมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อนำค่าปริมาตรเชิงโมลของแก้วตัวอย่างมาเขียนกราฟความสัมพันธ์กับปริมาณของ Eu_2O_3 ที่เติมลงในโครงสร้างแก้วจะแสดงได้ดังภาพที่ 4.19



ภาพที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรเชิงโมลกับปริมาณความเข้มข้นของ Eu_2O_3

3. ผลการวิเคราะห์การดูดกลืนแสง

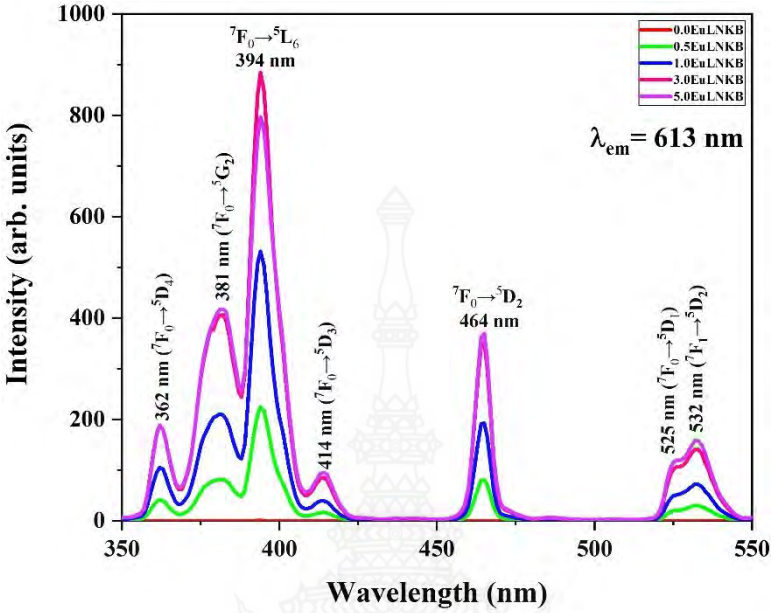
สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของแก้ว LNKB ที่เจือด้วยความเข้มข้นของ Eu_2O_3 ที่มีปริมาณความเข้มข้น 0, 0.5, 1.0, 3.0 และ 5.0 mol% แสดงดังภาพที่ 4.20 พบว่า แก้วดังกล่าวมีการดูดกลืนแสงในช่วงแสงที่ตามองเห็นไปจนถึงช่วงความยาวคลื่นใกล้อินฟราเรด โดยพีคที่ปรากฏในสเปกตรัมการดูดกลืนแสงเหล่านี้แสดงให้เห็นว่า Eu^{3+} มีการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานจากสถานะพื้น $^7F_0$ และ $^7F_1$ ไปสู่ระดับชั้นพลังงานที่สูงกว่า โดยในช่วงแสงที่ตามองเห็นนั้นพบการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 394, 465, 534, 2,048 และ 2,191 นาโนเมตร ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงาน $^7F_0 \longrightarrow {}^5L_6$, $^7F_0 \longrightarrow {}^5D_2$, $^7F_0 \longrightarrow {}^5D_1$, $^7F_0 \longrightarrow {}^7F_6$ และ $^7F_1 \longrightarrow {}^7F_6$ ตามลำดับ โดยแสงความยาวคลื่น 394 นาโนเมตร ถูกดูดกลืนแสงได้ดีที่สุด สำหรับในช่วงอินฟราเรดใกล้การดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 2,048 และ 2,191 นาโนเมตร มีการปรากฏขึ้นอย่างเด่นชัด ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงาน $^7F_0 \longrightarrow {}^7F_6$ และ $^7F_1 \longrightarrow {}^7F_6$ ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่า เมื่อมีการเติม Eu_2O_3 ลงไปในแก้วมากขึ้นการดูดกลืนแสงความยาวคลื่นเหล่านี้จะเกิดได้มากขึ้น โดยสังเกตได้จากการที่พีคของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงดังกล่าวมีความสูงเพิ่มมากขึ้น



ภาพที่ 4.20 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของแก้วตัวอย่าง LNKB ที่เจือด้วย Eu_2O_3 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

4. ผลการวิเคราะห์การกระตุ้นแสงของ Eu^{3+}

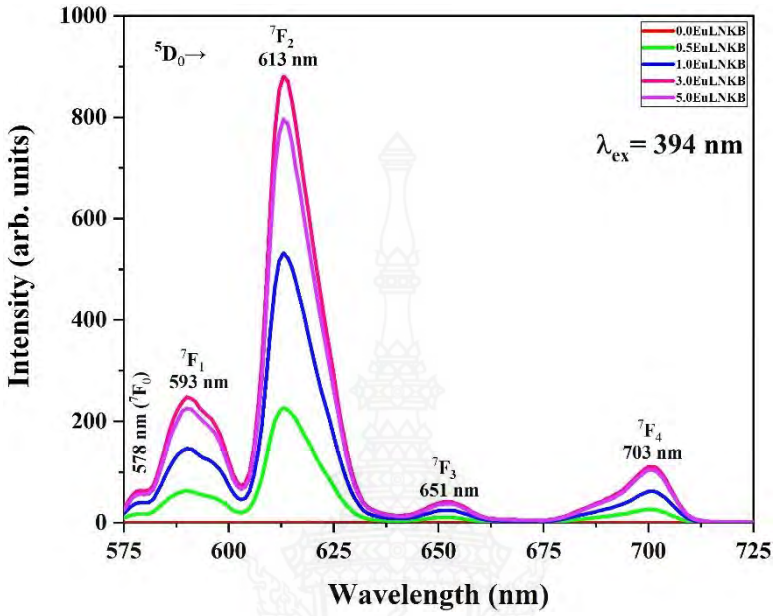
จากสเปกตรัมการกระตุ้นแสงของแก้ว LNKB ที่เจือด้วยความเข้มข้นของ Eu_2O_3 ที่มีปริมาณความเข้มข้น 0, 0.5, 1.0, 3.0 และ 5.0 mol% สำหรับความสามารถในการเปล่งแสงที่ความยาวคลื่น 613 นาโนเมตร แสดงดังภาพที่ 4.21 พบพีคที่เกิดจากการดูดกลืนของ Eu^{3+} ได้แก่ แสงความยาวคลื่น 362, 381, 394, 414, 464, 525 และ 532 นาโนเมตร เกิดการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานจาก $^7F_0 \longrightarrow {}^5D_4$, $^5G_2$, $^5L_6$, $^5D_3$, $^5D_2$, $^5D_1$ และ $^7F_1 \longrightarrow {}^5D_2$ ตามลำดับ โดยแสงความยาวคลื่น 394 นาโน-เมตร สามารถกระตุ้นแก้วให้เปล่งแสงความยาวคลื่น 613 นาโนเมตร ออกมาได้ดีที่สุด จึงนำความ ยาวคลื่นนี้ไปกระตุ้นแก้ว เพื่อศึกษาสเปกตรัมการเปล่งแสงในหัวข้อถัดไป



ภาพที่ 4.21 สเปกตรัมการกระตุ้นแสงของแก้วตัวอย่าง LNKB ที่เจือด้วย Eu_2O_3 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

5. ผลการวิเคราะห์การเปล่งแสง

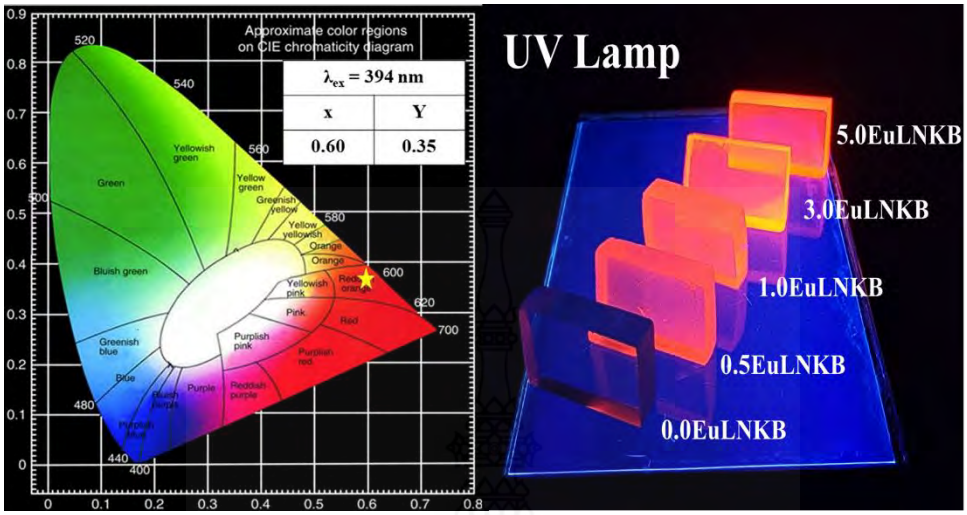
สเปกตรัมการเปล่งแสงของแก้ว LNKB ที่เจือด้วยความเข้มข้นของ Eu_2O_3 ที่มีปริมาณความเข้มข้น 0, 0.5, 1.0, 3.0 และ 5.0 mol% มีการดูดกลืนแสงความยาวคลื่น 394 นาโนเมตร ได้ดีที่สุด ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำแสงความยาวคลื่นดังกล่าวไปกระตุ้นแก้วตัวอย่าง เพื่อศึกษาสเปกตรัมการเปล่งแสง ซึ่งแสดงผลในภาพที่ 4.22 พบว่าแก้วตัวอย่างมีการเปล่งแสงกลับออกมาทั้งหมด 5 ความยาวคลื่น ได้แก่ 578, 593, 613, 651 และ 703 นาโนเมตร โดยแสงความยาวคลื่น 613 นาโนเมตร มีความเข้มมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลของสเปกตรัมการกระตุ้นในหัวข้อ 4 โดยแก้วมีการเปล่งแสงด้วยความเข้มมากขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของ Eu_2O_3 ลงไปในแก้วจนกระทั่งถึงความเข้มข้น 3.0 mol% หลังจากนั้นความเข้มแสงที่เปล่งออกมาจะลดลงซึ่งเกิดจากปรากฏการณ์ Concentration Quenching Effect โดยความเข้มข้นของ Eu_2O_3 มากเกินจนทำให้ไอออนของ Eu เข้าใกล้กันมากเกินไป และเพิ่มโอกาสความน่าจะเป็นในการดูดกลืนแสงของ Eu ตัวข้างเคียงที่กำลังเปล่งออกมากลับเข้าไปอีก เมื่อแก้วตัวอย่างถูกกระตุ้นด้วยแสงความยาวคลื่น 394 นาโนเมตร จะทำให้เกิดการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงาน $^7F_0 \longrightarrow {}^5L_6$ หลังจากนั้น Eu^{3+} จะลดระดับชั้นพลังงานลงมาที่สถานะ $^5D_0$ โดยที่ไม่เกิดการเปล่งแสง NR เนื่องจากมีการสูญเสียพลังงานไปในรูปของการสั่นของโฟนอน ต่อมาจึงลดระดับชั้นพลังงานอีกครั้ง โดยมีการเปล่งแสงทั้ง 5 ความยาวคลื่น ออกมา โดยเกิดจากเปลี่ยนระดับชั้นพลังงาน $^5D_0 \longrightarrow {}^7F_0$ (578 นาโนเมตร), $^5D_0 \longrightarrow {}^7F_1$ (593 นาโนเมตร), $^5D_0 \longrightarrow {}^7F_2$ (613 นาโนเมตร), $^5D_0 \longrightarrow {}^7F_3$ (651 นาโนเมตร), และ $^5D_0 \longrightarrow {}^7F_4$ (703 นาโนเมตร) ตามลำดับ



ภาพที่ 4.22 สเปกตรัมการเปล่งแสงของแก้วตัวอย่าง LNKB ที่เจือด้วย Eu_2O_3 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

6. สีของการเปล่งแสงในระบบ CIE 1931 ของ Eu^{3+} เติมในแก้ว

ผู้วิจัยได้นำสเปกตรัมการเปล่งแสงที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสงความยาวคลื่น 394 นาโนเมตร ของแก้ว LNKB ที่มีความเข้มข้นของ Eu_2O_3 ทุกความเข้มข้น มาวิเคราะห์คู่อันดับสี (x, y) ตามมาตรฐาน CIE 1931 Chromaticity พบว่า คู่อันดับสีของแสงที่เปล่งออกมาประมาณ (0.60, 0.35) และเมื่อนำไประบุพิกัดลงในแผนภาพสีตามมาตรฐาน CIE 1931 ดังภาพที่ 4.23 ทำให้สามารถระบุได้ว่า หากกระตุ้นแก้วดังกล่าวด้วยแสงความยาวคลื่น 394 นาโนเมตร จะทำให้แก้วเปล่งแสงสีแดง-ส้ม ออกมา



ภาพที่ 4.23 สีของการเปล่งแสงในระบบ CIE 1931 ของ Eu^{3+} เติมในแก้ว LNKB

7. ศึกษาศักยภาพสำหรับเป็นวัสดุตัวกลางเลเซอร์ โดยการวิเคราะห์ตามทฤษฎี J-O

การศึกษาศักยภาพสำหรับเป็นวัสดุตัวกลางเลเซอร์ของตัวอย่างแก้วที่เจือ Eu_2O_3 จากการศึกษาแก้ว LNKB ที่เจือความเข้มข้น 3.0 mol% เป็นตัวอย่างแก้วที่สามารถเปล่งแสงที่มีความเข้มสูงสุด จึงได้นำตัวอย่างแก้วดังกล่าวมาศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติการเปล่งแสงด้วยทฤษฎี J-O โดยพิจารณาจากกราฟการดูดกลืนแสงที่ช่วงความยาวคลื่นประมาณ 2048 นาโนเมตร ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่าความแรงของการสั่นที่ได้จากการทดลอง (f_{exp}) และค่าที่ได้จากการคำนวณ (f_{cal}) ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการเปลี่ยนระดับพลังงาน $^7F_0 \rightarrow {}^7F_6$ มีค่าความแรงในการสั่นมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับระดับชั้นพลังงานอื่น ๆ โดยมีค่าเท่ากับ 2.52×10^{-6} และ 1.94×10^{-6} ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 เมื่อพิจารณาค่า Ω_2, Ω_4 และ Ω_6 ของแก้ว 3.0LNKBEu ในตารางที่ 4.5 มีค่าเท่ากับ 11.51×10^{-20} 11.07×10^{-20} และ 2.02×10^{-20} ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งพบว่าค่า Ω_2 ในแก้ว 3.0LNKBEu มีค่าเท่ากับ 11.51×10^{-20} ตารางเซนติเมตร ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าของแก้ว $75NaPO_3$-$24MgF_2$-EuF_3 (Babu, P. & Jayasankar, C.K. 2000: 262-281) มีค่าเท่ากับ 6.5×10^{-20} ตารางเซนติเมตร PKBFAEu (Babu, S.S. et al. 2007: 109-120) มีค่าเท่ากับ 6.15×10^{-20} ตารางเซนติเมตร BGGE1 (Kistaiah, P. et al. 2003: 780-784) มีค่าเท่ากับ 5.54×10^{-20} ตารางเซนติเมตร และ PKBAFEu10 (Gokce, M. et al. 2017: 263-268) มีค่าเท่ากับ 8.12×10^{-20} ตารางเซนติเมตร แต่น้อยกว่าค่าของแก้ว Eu^{3+}: KF-B_2O_3 (Balakrishnaiah, R. et al. 2007: 1397-1401) มีค่าเท่ากับ 40.70×10^{-20} ตารางเซนติเมตร จึงกล่าวได้ว่าลิแกนด์ที่ล้อมรอบ Eu^{3+} ของแก้ว 3.0LNKBEu มีความ

ไม่สมมาตรสูงและพันธะระหว่าง Eu^{3+} กับลิแกนด์มีความเป็นโควาเลนต์สูงกว่าแก้ว $75NaPO_3$-$24MgF_2$-EuF_3 PKBFAEu BGGE1 และ PKBAFEu10 แต่น้อยกว่าในแก้ว Eu^{3+}: KF-B_2O_3 และค่า Ω_4 และ Ω_6 ของแก้ว 3.0LNKBEu บอกถึงความหนืดและความแข็งของเนื้อแก้ว

จากการศึกษาการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงาน $^5D_0 \longrightarrow {}^7F_2$ ที่ช่วงความยาวคลื่นประมาณ 613 นาโนเมตร มีค่าความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานแล้วทำให้เกิดการเปล่งแสง (A_R) ภาคตัดขวางของการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น ($\sigma(\lambda_p)$) และสัดส่วนการเปล่งแสง (β_R) ของแก้ว LNKB ที่เจือด้วย Eu_2O_3 ของตัวอย่างแก้วมีค่าสูงโดย ($\sigma(\lambda_p)$) มีค่าเท่ากับ 24.63×10^{-22} ตารางเซนติเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.6 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแก้วสามารถทำให้เกิดการเปล่งแสงเลเซอร์ได้โดยใช้พลังงานต่ำ และสามารถให้กำเนิดแสงเลเซอร์ออกมาในปริมาณที่มาก เมื่อพิจารณาสัดส่วนของการเปล่งแสงที่ได้ (β_R) มีค่าเกิน 0.50 ทำให้ทราบได้ว่าแก้ว 3.0LNKBEu จะให้กำเนิดแสงเลเซอร์ความยาวคลื่น 613 นาโนเมตร จึงสามารถสรุปได้ว่า แก้ว LNKB ที่เจือด้วยความเข้มข้น 3.0 mol% เป็นวัสดุที่มีศักยภาพที่น่าสนใจ เหมาะต่อการนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุตัวกลางเลเซอร์ ที่ช่วงการเปล่งแสงความยาวคลื่น 613 นาโนเมตร

ตารางที่ 4.4 ค่าความแรงของการสั่นที่ได้จากการทดลอง (f_{exp}) และที่คำนวณได้ (f_{cal}) ของการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานจากการดูดกลืนแสงในแก้วลิเธียมโซเดียมโพแทสเซียมบอเรตเจือด้วย Eu_2O_3 ที่ความเข้มข้น 3.0 mol%

สถานะ	ตำแหน่งสูงสุด		Oscillator Strengths	
	ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	พลังงาน (ต่อเซนติเมตร)	f_{exp} ($\times 10^{-6}$)	f_{cal} ($\times 10^{-6}$)
$^7F_0 \longrightarrow {}^5L_6$	394	25380	1.75	1.11
$^7F_0 \longrightarrow {}^5D_2$	465	21504	0.67	0.41
$^7F_0 \longrightarrow {}^5D_1$	534	18763	0.38	0.39
$^7F_0 \longrightarrow {}^7F_6$	2048	4779	2.52	1.94
$^7F_1 \longrightarrow {}^7F_6$	2204	4536	1.51	1.58
δ_{rms} = ±0.328				

ตารางที่ 4.5 ค่าตัวแปร J-O (Ω_2, Ω_4 และ Ω_6) ของแก้วลิเธียมโซเดียมโพแทสเซียมบอเรตที่เจือด้วยด้วย Eu_2O_3 ที่ความเข้มข้น 3.0 mol% ในงานวิจัยนี้ เปรียบเทียบค่าตัวแปร J-O ของแก้วอื่น ๆ ที่มีการเจือด้วย Eu_2O_3

ระบบแก้ว	Ω_2 ($\times 10^{-20}$)	Ω_4 ($\times 10^{-20}$)	Ω_6 ($\times 10^{-20}$)	แนวโน้ม
3.0LNKBEu [งานวิจัย] 75$NaPO_3$-24MgF_2-EuF_3	11.51	11.07	2.02	$\Omega_2>\Omega_4>\Omega_6$
(Babu, P. & Jayasankar, C.K. 2000: 262-281)	6.5	5.4	3.9	$\Omega_2>\Omega_4>\Omega_6$
PKBFAEu (Babu, S.S. et al. 2007: 109-120)	6.15	3.66	0.45	$\Omega_2>\Omega_4>\Omega_6$
Eu^{3+}: KF-B_2O_3 (Balakrishnaiah, R. et al. 2007: 1397-1401)	40.70	27.19	0.12	$\Omega_2>\Omega_4>\Omega_6$
BGGE1 (Kistaiah, P. et al. 2003: 780-784)	5.54	4.45	0	$\Omega_2>\Omega_4>\Omega_6$
PKBAFEu10 (Gokce, M. et al. 2017: 263-268)	8.12	5.79	0	$\Omega_2>\Omega_4>\Omega_6$

ตารางที่ 4.6 ความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานแล้วทำให้เกิดการเปล่งแสง (A_R) ภาคตัดขวางของการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น ($\sigma(\lambda_p)$) และสัดส่วนการเปล่งแสง (β_R) ของแก้ว ลิเธียมโซเดียมโพแทสเซียมบอเรตที่เจือด้วยด้วย Eu_2O_3 ที่ความเข้มข้น 3.0 mol%

ระดับชั้นพลังงาน $^5D_0 \longrightarrow$	λ_p (นาโนเมตร)	A_R (วินาที)	β_R		$(\sigma(\lambda_p)) \times 10^{-22}$ (ตารางเซนติเมตร)
			β_{Rexp}	β_{Rcal}	
$^7F_1$	593	61.25	0.28	0.32	19.96
$^7F_2$	613	443.50	0.69	0.68	24.63
$^7F_3$	651	0.00	0.04	0	0.00
$^7F_4$	703	26.69	0.10	0.14	2.58

บทที่ 5 สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ ทางแสง ทางลูมิเนสเซนซ์ และ ศักยภาพสำหรับเป็นวัสดุตัวกลางเลเซอร์ของแก้วบอเรตที่เจือด้วย Dy^{3+}, Tb^{3+} และ Eu^{3+} ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาแก้วและนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านอุปกรณ์ทางแสง และทางเลเซอร์ ซึ่งผลที่ได้สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

สรุปผลการวิจัย

5.1. แก้วลิเธียมโซเดียมโพแทสเซียมบอเรตที่เจือด้วย Dy_2O_3

จากการศึกษาแก้ว Li_2O-Na_2O-K_2O-B_2O_3 ที่เจือ Dy_2O_3 ที่เตรียมด้วยวิธีการหลอมแล้วทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว พบว่า ค่าความหนาแน่น และปริมาตรเชิงโมลของแก้วเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ Dy_2O_3 ที่มากขึ้น จากการวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนแสง สเปกตรัมการถูกกระตุ้น และสเปกตรัมการเปล่งแสง พบว่า แก้วมีการดูดกลืนแสงในช่วงแสงที่ตามองเห็นไปจนถึงช่วงใกล้อินฟราเรด โดยแสงความยาวคลื่น 386 นาโนเมตร สามารถไปกระตุ้น Dy^{3+} แล้วทำให้เกิดการเปล่งแสงความยาวคลื่น 574 นาโนเมตรออกมาได้เข้มที่สุด และความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดในการเจือ Dy_2O_3 ลงไปในแก้ว Li_2O-Na_2O-K_2O-B_2O_3 คือ 0.5 mol% จากการวิเคราะห์สีด้วยตามมาตรฐาน CIE 1931 พบว่า เมื่อแก้วถูกกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 386 นาโนเมตร แก้วจะเกิดการเปล่งแสงในช่วงสีขาวออกมา การวิเคราะห์สมบัติการเปล่งแสงด้วยทฤษฎี J-O สามารถหาค่าสัดส่วนการเปล่งแสง และภาคตัดขวางของการเปล่งแสงที่ความยาวคลื่น 574 นาโนเมตร ได้เท่ากับ 0.65 และ 1.48×10^{-22} ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ทำให้ระบุได้ว่าแก้วชนิดนี้มีศักยภาพที่น่าสนใจต่อการนำไปศึกษาพัฒนา เพื่อใช้เป็นตัวกลางเลเซอร์ในเลเซอร์ของแข็งที่มีการเปล่งแสงความยาวคลื่น 574 นาโนเมตร

5.2. แก้วลิเธียมโซเดียมโพแทสเซียมบอเรตที่เจือด้วย Tb_2O_3

จากการศึกษาแก้ว Li_2O-Na_2O-K_2O-B_2O_3 ที่เจือ Tb_2O_3 ที่เตรียมด้วยวิธีการหลอมแล้วทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว พบว่า ค่าความหนาแน่น ปริมาตรเชิงโมล และดรรชนีหักเหของแก้วเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ Tb_2O_3 ที่มากขึ้น จากการวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนแสง สเปกตรัมการถูกกระตุ้น และสเปกตรัมการเปล่งแสง พบว่า แก้วมีการดูดกลืนแสงในช่วงแสงที่ตามองเห็นไปจนถึงช่วงใกล้อินฟราเรด โดยแสงความยาวคลื่น 227 และ 377 นาโนเมตร สามารถไปกระตุ้น Tb^{3+} แล้วทำให้เกิดการเปล่งแสงความยาวคลื่น 544 นาโนเมตร ออกมาได้เข้มที่สุด และความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดในการเจือ Tb_2O_3 ลงไปในแก้ว Li_2O-Na_2O-K_2O-B_2O_3 คือ 4 mol% จากการวิเคราะห์สีด้วยตามมาตรฐาน CIE 1931 พบว่า เมื่อแก้วถูกกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 227 และ 377 นาโนเมตร แก้วจะเกิดการเปล่งแสงในช่วงสีเหลือง-เขียวออกมา ค่าเวลาการสลายตัวของแก้ว มีค่าลดลงตามความเข้มข้นของ Tb_2O_3 ที่เพิ่มขึ้น

5.3. แก้วลิเธียมโซเดียมโพแทสเซียมบอเรตที่เจือด้วย Eu_2O_3

จากการศึกษาแก้ว Li_2O-Na_2O-K_2O-B_2O_3 ที่เจือ Eu_2O_3 ที่เตรียมด้วยวิธีการหลอมแล้วทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว พบว่า ค่าความหนาแน่น และปริมาตรเชิงโมลของแก้วเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ Eu_2O_3 ที่มากขึ้น จากการวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนแสง สเปกตรัมการถูกกระตุ้น และสเปกตรัมการเปล่งแสง พบว่า แก้วมีการดูดกลืนแสงในช่วงแสงที่ตามองเห็นไปจนถึงช่วงใกล้อินฟราเรด โดยแสงความยาวคลื่น 394 นาโนเมตร สามารถไปกระตุ้น Eu^{3+} แล้วทำให้เกิดการเปล่งแสงความยาวคลื่น 613 นาโนเมตร ออกมาได้เข้มที่สุด และความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดในการเจือ Eu_2O_3 ลงไปในแก้ว Li_2O-Na_2O-K_2O-B_2O_3 คือ 3.0 mol% จากการวิเคราะห์สีด้วยตามมาตรฐาน CIE 1931 พบว่า เมื่อแก้วถูกกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 394 นาโนเมตร แก้วจะเกิดการเปล่งแสงในช่วงสีแดง-ส้มออกมา การวิเคราะห์สมบัติการเปล่งแสงด้วยทฤษฎี J-O สามารถหาค่าสัดส่วนการเปล่งแสง และภาคตัดขวางของการเปล่งแสงที่ความยาวคลื่น 613 นาโนเมตร ได้เท่ากับ 0.68 และ 24.63×10^{-22} ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ทำให้ระบุได้ว่าแก้วชนิดนี้มีศักยภาพที่น่าสนใจต่อการนำไปศึกษาพัฒนา เพื่อใช้เป็นตัวกลางเลเซอร์ในเลเซอร์ของแข็งที่มีการเปล่งแสงความยาวคลื่น 613 นาโนเมตร

บรรณานุกรม

[1] กรมวิทยาศาสตร์บริการ. (2559). **ความรู้เบื้องต้นทางด้านแก้ว**. สืบค้นข้อมูลจาก http://otop.dss.go.th/index.php/home/26-interesting-articles/136-2017-05-31-06-33-45

[2] **แก้วบอเรต**. (2559). ค้นเมื่อ 7 เมษายน 2564, จาก http://www.eresearch.ssru.ac.th/bitstream/123456789/473/7/7.

[3] จิราพันธ์ ดรรชนีเพชร. (2554). **สมบัติทางกายภาพและโครงสร้างของแก้วบิสมัทเจือด้วยโครเมียม**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

[4] เทคโนโลยีแห่งแสง. (2563). **เลเซอร์**. ค้นเมื่อ 7 เมษายน 2564, จาก https://www.technicalbiomed.com

[5] ประสิทธิ์ ปุระชาติ. (2559). **สมบัติและชนิดของแก้ว**. ค้นเมื่อ 7 เมษายน 2564, จาก http://library.tru.ac.th/images/academic/book/b45252/05g2-p.pdf

[6] ภัทรวรรณ เฉยเจริญ. (2559). **Ceramic Design and Manufacturing**. ค้นเมื่อ 15 มกราคม 2564, จาก http://www2.mtec.or.th/th/special/cdm/articles5.html

[7] มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม. (2559). **แก้วสีแดงทับทิม**. ค้นเมื่อ 3 มกราคม 2564, จาก http://lib3.dss.go.th/fulltext/glass/WEB/Articles_from_staff/improve.pdf

[8] แม้น อมรสิทธิ์ และอมร เพชรสม. (2539). **หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ**. กรุงเทพมหานคร: ชวนพิมพ์

[9] Arul, R. I. et al. (2013). Structural and luminescence behavior of the Er^{3+} Doped alkali fluoroborate glasses. **Journal of Non-Crystalline Solids, 367** (1), 43-50.

[10] Babu, P. & Jayasankar, C.K. (2000). Optical spectroscopy of Eu^{3+} ions in lithium borate and lithium fluoroborate glasses, **Physica B 279**, 262-281.

[11] Babu, S.S. et al. (2007). Optical absorption and photoluminescence studies of Eu^{3+}-doped phosphate and fluorophosphate glasses, **J. Lumin. 126**, 109-120.

[12] Balakrishnaiah, R. et al. (2007). Characterization of Eu^{3+}-doped fluorophosphate glasses for red emission, **J. Non-Cryst. Solids 353**, 1397-1401.

[13] Bett, S. (2014). **B. Sc. with major in organic chemistry**. Retrieved 2 March 2021, from http://www.quora.com/What-is-the-Jablonski-diagram

[14] Delgado, T. et al. (2019). Spectroscopic properties of Dy^{3+} and Dy^{3+}, B^{3+} doped $SrAl_2O_4$. **Journal of Optica Materials, 89**, 268-275.

[15] Digonnet, M. J. F. (2001). **Rare-earth-doped fiber laser and amplifiers** (2nd ed.). NewYork: Marcel Dekker.

[16] Dwivedi, Y. et al. (2009). Spectroscopic study of Dy^{3+} and Dy^{3+}/Yb^{3+} ions co-doped in barium fluoroborate glass. **Journal of Optica Materials, 31**, 1472-1477.

[17] Gokce, M. et al. (2017). Investigation of europium concentration dependence on the luminescent properties of borogermanate glasses, **J. Lumin. 192**, 263-268.

[18] Gupta, K. et al. (2013). **Photocatalytic antibacterial performance of TiO_2 and Ag-doped TiO_2 against S. aureus. P. aeruginosa and E. coli**. Retrieved 20 February 2021, from https://www.beilstein-journals.org/bjnano/articles/4/40

[19] Huy, B. T. et al. (2012). Judd-Ofelt analysis of spectroscopic properties of Sm^{3+} ions in K_2YF_5 crystal. **Journal of Alloys and Compounds, 520**, 262-265.

[20] Ivankov, A., Seekamp, J. & Bauhofer, W. (2006). Optical properties of Eu^{3+}-doped zinc borate glasses. **Journal of Luminescence, 121**, 123-131.

[21] Jayasankar, C. K. et al. (2014). Luminescence properties of Dy^{3+} ions in a variety of borate and fluoroborate glasses containing lithium, zinc, and lead. **Journal of Alloys and Compounds, 374**, 22-26.

[22] Kaewjaeng, S. et al. (2012). Effect of BaO on optical, physical and radiation shielding properties of SiO_2: B_2O_3: Al_2O_3: CaO: Na_2O glasses system. **Procedia Engineering, 32**, 1080-1086.

[23] Kaewnuam, E. et al. (2018). Study of Tb^{3+} doped calcium gadolinium silicaborate glass for laser medium and scintillator material application. **Journal of Physics Conference Series**, **1120**, 012013.

[24] Kantakapun, K. (2017). **UV-Vis Spectrophotometer**. Retrieved 2 March 2021, from http://www.chem.eng.psu.ac.th/new_chem/upload/labtool/UV-Vis%20Spectrometer.pdf

[25] Kistaiah, P. et al. (2003). Optical absorption and photoluminescence properties of Eu^{3+} doped· KF-B2O3 glasses, **Indian J. Pure Appl. Phys. 41**, 780-784.

[26] Lakshminarayana, G. et al. (2009). Spectral analysis of RE^{3+} (RE = Sm, Dy, and Tm):P_2O_5-Al_2O_3-Na_2O glasses. **Optical materials, 31** (10), 1506-1512.

[27] Lira, A. et al. (2014). Spectroscopic evaluation of $Zn(PO_3)_2$:Dy^{3+} glass as an active medium for solid state yellow laser. **Optical materials, 38**, 188-192.

[28] Li, M. et al. (2019). Spectroscopic properties of Er/Yb co-doped glass ceramics containing nanocrystalline $Bi_2ZnB_2O_7$ for broadband near-infrared emission. **Ceramics International, 45**, 18831-18837.

[29] Li, S. et al. (2016). Effects of barium oxide on structure and properties of calcium iron phosphate glasses. **Journal of Non-Crystalline Solids, 24**, 87-94.

[30] Mahato, K. K. et al. (2005). Optical properties of Dy^{3+} doped in oxyfluoroborate glass. **Spectrochim. Acta Part A. 61**, 431-436.

[31] Mohan, B. A. et al. (2011). Spectroscopic and photoluminescence properties of Dy^{3+}-doped lead tungsten tellurite glasses for laser materials. **Journal of Alloys and Compounds, 509**, 457-462.

[32] Munhoz, J. et al. (2019). Glasses in the $NaPO_3$-WO_3-NaF ternary system: Preparation, physical properties and structural studies. **Journal of Non-Crystalline Solids, 505**, 379-389.

[33] Rajesh, D. et al. (2012). Structural and luminescence properties of Dy^{3+} ion in strontium lithium bismuth borate glasses. **Journal of Luminescence, 132**, 841-849.

[34] Rao, K. J. (2002). **Structural chemistry of glasses**. Amsterdam: Elsevier science.

Ronda, C. et al. (1998). Rare earth phosphors: Fundamentals and applications. **Journal of Alloys and Compounds, 275**, 669-676.

[35] Ruvalcaba, C. et al. (2010). Photoluminescence properties of the ZnO-CdO-TeO_2 system doped with the Tb^{3+} and Yb^{3+} ions. **Journal of Luminescence, 128** (2), 213-216.

[36] Saleem, S. A. et al. (2011). Luminescent studies of Dy^{3+} ion in alkali lead tellurofluoroborate glasses. **J. Quant. Spectrosc. Rad. Transf. 112**, 78-84.

[37] Sasikla, T. & Moorthy, L. R. (2014). Photoluminescence properties of singly doped Tm^{3+} and co-doped Tm^{3+}/Dy^{3+} ions in tellurite glasses. **Journal of Molecular Structure, 1076**, 529-534.

[38] Stambouli, W., Elhouichet, H. & Gelloz, B. (2013). Optical and spectroscopic properties of Eu-doped tellurite glasses and glass ceramics. **Journal of Luminescence, 138**, 201-208.

[39] Subrata, M. et al. (2015). Intense orange emission in Pr^{3+} doped lead phosphate glass.**Journal of Physics and Chemistry of Solids, 85**, 245-253.

[40] Sugawara, T. et al. (2013). Na_2O activity and thermodynamic mixing properties of SiO_2-Na_2O-CaO melt. **Journal of Non-Crystalline Solids, 119**, 371-372.

[41]Tripathi, G. et al. (2005). Spectroscopy and upconversion of Dy^{3+} doped in sodium zinc phosphate glass. **Spectrochim. Acta Part A. 62**, 1120-1124.

[41] Valeur, B. et al. (2011). A brief history of fluorescence and phosphorescence before the emergence of quantum theory. **Journal of Chemical Education, 88** (6), 731-738.

[42] Varshneya, A. K. (1994). **Fundamentals of inorganic glasses**. Boston: Academic Press.

[43] Vemasevana, R. K. et al. (2011). Optical characterization of Eu^{3+} and Tb^{3+} ions doped cadmium lithium alumino fluoro boro tellurite glasses. **Journal of Spectrochimica Acta Part A, 79** (1), 81-97.

[44] Wantana, N. et al. (2018). Energy transfer based emission analysis of Eu^{3+} doped Gd_2O_3-CaO-SiO_2-B_2O_3 glasses for laser and X-rays detection material applications. **Journal of Luminescence, 194**, 75-81.

[45] Yamak, F. (2013). **Polymer science**. Retrieved 19 June 2021, from https://fenix. ciencias.ulisboa.pt/downloadFile/1688987299219879/Polymer_Science.pdf

[46] Yan, Z. et al. (2007). Optical properties of Dy^{3+} doped in boroaluminasilicate glass. **Journal of Rare Earths, 25** (1), 105-112.

[47] Zaman, F. et al. (2017). Optical and luminescence properties of Li_2O-Gd_2O_3-MO-B_2O_3-Sm_2O_3 (MO=Bi_2O_3, BaO) glasses. **Journal of Alloys and Compounds, 676**, 275-285.

[48] Zhang, F. et al. (2010). Visible luminescence properties of Er^{3+}-Dy^{3+} codoped tellurite glasses. **Applied Physics A: Material Science & Processing, 101** (4), 777-780.

[49] Zhou, Z. et al. (2010). Tb^{3+}/Yb^{3+} heavily-doped tellurite glaases with efficient green light emission. **Journal of Non-Crystalline Solids, 356** (50), 2896-2899.50] วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุแก้ว. (2540). **วัตถุดิบในการหลอมแก้ว**. ค้นเมื่อ 3 มกราคม 2564,จาก http://www2.mtec.or.th/th/research/gsat/glassweb/property.html

[50] วีทิต วรรณเลิศลักษณ์. (2559). **การหักเหของแสง**. ค้นเมื่อ 1 กุมภาพันธ์ 2564, จาก https://www.scimath.org/lesson-physics/item/7282-2017-06-14-13-59-29

[51] สมิต อินทร์ศิริพงษ์ และคณะ. (2559). **การพัฒนาแก้วระบบออกซีฟลูออไรด์ที่เติมไอออนของ Eu^{3+}, Dy^{3+} และ Sm^{3+} เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเปล่งแสงของแก้วในช่วงตามองเห็น สำหรับประยุกต์ใช้เป็นตัวเปล่งแสงของแข็ง**. ราชบุรี: มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง

ไม่มีเนื้อหาจากต้นฉบับ

ประวัตินักวิจัย

หัวหน้าโครงการ

1. **ชื่อ (ภาษาไทย)** นายธนพงศ์ สารีอินทร์
ชื่อ (ภาษาอังกฤษ) Mr. Thanapong Sareein

2. **ตำแหน่ง** ผู้ช่วยศาสตราจารย์
สาขาวิชา วัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม
คณะ / สถาบัน คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
โทรศัพท์ 0-2913-2424 โทรสาร 0-2913-2424 ต่อ 7510
โทรศัพท์มือถือ 08-96340425
E-mail: thanapong.s@rmutp.ac.th

3. **ประวัติการศึกษาระดับอุดมศึกษา**

Ph.D. (Materials Science)	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
วทม. (วัสดุศาสตร์)	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
วทบ. (วัสดุศาสตร์)	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

4. **ประวัติงานวิจัย**

1. **T. Sareein**, W. Thamjaree, W. Nhuapeng, T. Tunkasiri, **"Fabrication of 0-3 non-lead based piezoceramic/polymer composites using suction technique,"** *Advanced Materials Research* 55-57, pp 141-144, (2008). https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.55-57.141

2. S. Chandarak, **T. Sareein**, A. Ngamjarurojana, S. Maensiri, P. Laoratanakul, S. Ananta, R. Yimnirun, "Effect of Calcination Conditions on Phase Formation and Characterization of BiFeO 3 -BaTiO 3 Powders Synthesized by a Solid-State Reaction," *Advanced Materials Research* 55-57, pp 241-244 (2008). https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.55-57.241

3. M. Unruan, **T. Sareein**, J. Tangsritrakul, S. Prasertpalichatr, A. Ngamjarurojana, S. Ananta, R. Yimnirun, **"Changes in dielectric and ferroelectric properties of Fe^{3+} / Nb^{5+} hybrid-doped barium titanate ceramics under compressive stress,"** *Journal of Applied Physics* 104 (12), pp 124102-4, (2008). https://doi.org/10.1063/1.3042228

4. R. Yimnirun, N. Wongdamnern, N. Triamnak, **T. Sareein**, M. Unruan, A. Ngamjarurojana, S. Ananta, and Y. Laosiritaworn, "Power-law Scaling of Sub-Coercive Field Dynamic Ferroelectric Hysteresis in $0.3Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$-$0.7Pb(Zr_{1/2}Ti_{1/2})O_3$ Ceramic," *Journal of Physics D*, 41, pp 205415-5, (2008). https://doi.org/10.1088/0022-3727/41/20/205415

5. C. Silawongsawat, S. Chandarak, **T. Sareein**, A. Ngamjarurojana, S. Maensiri, P. Laoratanakul, S. Ananta, R. Yimnirun, **"Effect of calcination conditions on phase formation and characterization of $BiFeO_3$ powders synthesized by a solid-state reaction,"** *Advanced Materials Research*, 55-57, pp 237-240, (2008).

6. S. Chandarak, **T. Sareein**, A. Ngamjarurojana, S. Maensiri, P. Laoratanakul, S. Ananta, R. Yimnirun, **"Effect of Calcination Conditions on Phase Formation and Characterization of $BiFeO_3$-$BaTiO_3$ powders synthesized by a solid-state reaction,"** *Advanced Materials Research* 55-57, pp 241-244, (2008).

7. **T. Sareein**, M. Unruan, A. Ngamjarurojana, S. Jiansirisomboon, A. Watcharapasorn, R. Yimnirun, **"Influences of compressive stress and aging on dielectric properties of sodium bismuth titanate ceramics,"** *Physics Letters A*, 373, pp 1583-1587, (2009). https://doi.org/10.1016/j.physleta.2009.02.065

8. Y.L. Wang, X.Y. Wang, L.Z. Chu, Z.C. Deng, W.H. Liang, B.T. Liu, G.S. Fu, N. Wongdamnern, **T. Sareein**, R. Yimnirun, **"Simulation of hysteresis loops for polycrystalline ferroelectrics by an extensive Landau-type model,"** *Physics Letters A*, 373, pp 4282-4286 (2009).

9. S. Chandarak, M. Unruan, **T. Sareein**, A. Ngamjarurojana, S. Maensiri, P. Laoratanakul, S. Ananta, R. Yimnirun, **"Fabrication and characterization of (1-x)$BiFeO_3$-x$BaTiO_3$ ceramics prepared by a solid state reaction method,"** *Journal of Magnetics*, 14, pp 120-123, (2009).

10. S. Prasertpalichatr, M. Unruan, **T. Sareein**, J. Tangsritrakul, T. Dechakupta, A. Ngamjarurojana, Y. Laosiritaworn, S. Ananta, and R. Yimnirun, **"Physical properties and electrical aging effects in Fe^{3+}/Nb^{5+} hybrid-doped barium titanate ceramics,"** *Ferroelectrics*, 384, pp 146-152, (2010). https://doi.org/10.1080/00150190902881314

11. **T. Sareein**, A. Ngamjarurojana, S. Ananta, and R. Yimnirun, **"Effect of Sb_2O_5 addition on phase formation and characterization of $(Bi_{1/2}Na_{1/2})TiO_3$-$(K_{1/2}Na_{1/2})NbO_3$ ceramics,"** *Ferroelectrics*, 382, pp 173-181, (2010). https://doi.org/10.1080/00150190902870234

12. **T. Sareein**, M. Unruan, A. Ngamjarurojana, S. Ananta, R. Yimnirun, **"Effects of compressive stress on dielectric properties of lead-free $(Bi_{1/2}Na_{1/2})TiO_3$-$(K_{1/2}Na_{1/2})NbO_3$ ceramic systems,"** *Key Engineering Materials*, 421-422, pp 54-57, (2010). https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.421-422.54

13. M. Unruan, **T. Sareein**, A. Prasatketrakarn, A. Ngamjarurojana, S. Ananta, R. Yimnirun, **"Ferroelectric properties of $Pb(Zr_{1/2}Ti_{1/2})O_3$-$Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ ceramics under compressive stress applied perpendicular to electric field,"** *Key Engineering Materials*, 421-422, pp 411-414, (2010).

14. S. Prasertpalichat, M. Unruan, **T. Sareein**, J. Tangsritrakul, A. Ngamjarurojana, S. Ananta, R. Yimnirun, **"Effect of compressive stress on ferroelectric aging behavior of hybrid-doped Fe^{3+}/ Nb^{5+} $BaTiO_3$ ceramics,"** *Key Engineering Materials*, 421-422, pp 259-262, (2010).

15. **T. Sareein**, P. Baipaywad, W. Chaiammad, A. Ngamjarurojana, S. Ananta, and R. Yimnirun, "Dielectric Aging Behavior in A-site Hybrid-doped $BaTiO_3$ Ceramics," *Current Applied Physics*, 11, pp S90-94, (2011). https://doi.org/10.1016/j.cap.2011.03.018

16. A. Prasatkhetragarn, R. Saenarpa, B. Yotburut, P. Ketsuwan,**T. Sareein**, S. Ananta, and R. Yimnirun, "Investigations on Morphology and Ferroelectric Properties of NaNbO3–PbTiO3 Composite Ceramics," *Ferroelectrics*, 416, pp 40–46, (2011). https://doi.org/10.1080/00150193.2011.577664

17. **T. Sareein**, W. Hu, X. Tan and R. Yimnirun, "The morphotropic phase boundary in the (1 – *x*)$PbZrO_3$–*x*[0.3Bi($Zn_{1/2}Ti_{1/2}$)O_3–0.7$PbTiO_3$] perovskite solid solution," *Journal of Materials Science*, 47, pp 1774-1779, (2012). https://doi.org/10.1007/s10853-011-5961-2

18. M. Unruan, **T. Sareein**, S. Chandarak, S. Hunpratub, P. Thongbai, S. Maensiri, R. Yimnirun, "Aging and stress-dependent dielectric properties of multiferroic bismuth ferrite ceramics," *Materials Letters*, 70, pp 185-188, (2012).

19. **T. Sareein**, M. Unruan, A. Ngamjarurojana, S. Ananta and R. Yimnirun, "Dielectric Relaxation Time Behavior of B-site Hybrid-doped $BaTiO_3$ Ceramics," *Ferroelectrics,* 458, pp 56-63, (2014). https://doi.org/10.1080/00150193.2013.849987

20. P. Deeyai, **T. Sareein**, B. Putasaeng and N. Chathirat, "Dielectric properties of Y_2NiMnO_6 ceramics at various sintering times and temperatures," *Applied Mechanics and Materials,* 804, pp 16-20 (2015).

21. **T. Sareein**, P. Deeyai, B. Putasaeng and N. Chathirat, "Electrical properties of Y_2NiMnO_6 ceramics sintered at high temperature," *Applied Mechanics and Materials,* 804, pp 55-58, (2015). https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.804.108

22. **T. Sareein**, A. Ngamjarurojana and R. Yimnirun, "Magnetic Field Dependent Dielectric Properties in Ba($Ti_{0.99-x}Mn_{0.01}Tax$)O_3 Ceramics," *Applied Mechanics and Materials,* 804, pp 71-74, (2015)

23. P. Deeyai, **T. Sareein**, B. Putasaeng and N. Chathirat, "Study behavior of XPS spectra of Ni, Mn, Y and O in Y_2NiMnO_6 ceramics," *Applied Mechanics and Materials, 804,* pp 97-103, (2015)

24. **T. Sareein**, P. Deeyai, B. Putasaeng and N. Chathirat, "The dielectric property of Y2NiMnO6 ceramics sintered at high Temperature," *Applied Mechanics and Materials,* 804, pp 108-112 (2015*)*

25. **T. Sareein,** N. Albutt, M. Unruan, N. Funsueb, A. Ngamjarurojana and R. Yimnirun, "Effects of Hybrid-Doped on Dielectric Behavior of Barium Titanate Ceramics," *Integrated Ferroelectrics, 175*, pp 1-6, (2016). https://doi.org/10.1080/10584587.2016.1202063

26. Naphat Albutt, Suejit Pechprasarn, Rukchanok Wanasuk and **Thanapong Sareein**, "Electrical Impedance Properties of Y_2NiMnO_6 Ceramics for DC Bias at Atmosphere", *Applied Mechanics and Materials,* Vol. 866, pp 251-255 (2017)

27. Naphat Albutt, Suejit Pechprasarn and **Thanapong Sareein**, "Influence of Currents and Electric Fields in YNMO Ceramics", *Applied Mechanics and Materials,* Vol. 866, pp 256-258, (2017)

28. Naphat Albutt, Suejit Pechprasarn, Phimonkhae Chobdee and **Thanapong Sareein**, "Studies of Dielectric Permittivity of Y_2NiMnO_6 Ceramics for DC Bias at Various Temperatures", *Applied Mechanics and Materials,* Vol. 866, pp 272-276, (2017)

29. Naphat Albutt, Suejit Pechprasarn, Pattaraporn Damkoengsuntorn and **Thanapong Sareein**, "The Giant Dielectric Constant of Y_2NiMnO_6 Ceramics for DC Bias", *Applied Mechanics and Materials,* Vol. 866, pp 277-281, (2017)

30. Naphat Albutt, Suejit Pechprasarn, Sangwoei Sawekwiharee, Anchana Kuttiyawong, Panakamom Thonglor and **Thanapong Sareein**, "The Grain Structure of Nd Doped Y_2NiMnO_6 Ceramics Sintered at High Temperature", *Applied Mechanics and Materials,* Vol. 879, pp 18-21, (2018). https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.879.18

31. N. Chanthima, **T. Sareein**, Y. Tariwong, J. Kaewkhao and N. Sangwaranatee, "Investigations on Luminescence Properties of Ce^{3+} Ion Doped Bismuth Borophosphate Glasses", *Applied Mechanics and Materials,* Vol. 879, pp 22-26, (2018). https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.879.22

32. N. Chanthima, Y. Tariwong, **T. Sareein**, J. Kaewkhao and N.W. Sangwaranatee, "Investigation of Luminescence Properties of Dy^{3+} Doped Alkaline Earth Oxides Barium Phosphate Glasses", *Applied Mechanics and Materials,* Vol. 879, pp 27-31, (2018). https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.879.27

33. Naphat Albutt, Suejit Pechprasarn, Sangwoei Sawekwiharee, Anchana Kuttiyawong, Panakamom Thonglor and **Thanapong Sareein**, "Complete Phase Change of Y_2NiMnO_6 Ceramics Doped with TiO_2 at High Temperature", *Applied Mechanics and Materials,* Vol. 879, pp 47-50, (2018). https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.879.47

34. Naphat Albutt, Vanussanun Aitviriyaphan, **Thanapong Sareein**, Sudarath Suntaropas, Panakamon Thonglor, Suejit Pechprasarn, Sangwoei Sawekwiharee, Wirote Ritthong and Supree Pinitsoontorn, "Characterization of Antiferromagnetism in Double Perovskites Ba_2FeMoO_6 Prepared by Solid State Method", *Applied Mechanics and Materials,* Vol. 891, pp 224-229, (2019). https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.891.224

35. Vanussanun Aitviriyaphan, **Thanapong Sareein**, Sudarath Suntaropas, Panakamon Thonglor, Sangwoei Sawekwiharee, Suejit Pechprasarn, Wirote Ritthong, Supree Pinitsoontorn and Naphat Albutt, "Study, Magnetic Properties of $BaTiFeO_3$ Perovskite Prepared by Solid State Method", *Applied Mechanics and Materials,* Vol. 891, pp 230-235, (2019). https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.891.230

36. **T. Sareein** and N. Albutt "Magnetic Behaviors of Ca_2FeMoO_6 without Double Mixture Gas Protection under Heat Treatment", *Journal of Physics: Conference Series*, Vol.1259, pp 012018, (2019). https://doi.org/10.1088/1742-6596/1259/1/012018

37. Nawarut Jarucha, Nuanthip Wantana, **Thanapong Sareein**, Jakrapong Kaewkhao "Studying the properties of Gd_2O_3–WO_3–CaO–SiO_2–B_2O_3 glasses doped with Tb^{3+}", *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics,* Vol. 23, No 3. P. 276-281, (2020). https://doi.org/10.15407/spqeo23.03.276

38. Ekwipoo Kalkornsurapranee, Suchart Kothan, Sirilak Intom, Jobish Johns, Siriprapa Kaewjaeng, Chittra Kedkaew, Wuttichai Chaiphaksa, **Thanapong Sareein**, Jakrapong Kaewkhao, "Wearable and flexible radiation shielding natural rubber composites: Effect of different radiation shielding fillers," *Radiation Physics and Chemistry*, Vol.179, 109261 (2021). https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.109261

39. M. Shoaib, G. Rooh, N. Chanthima, **T. Sareein**, H.J. Kim, S. Kothan, J. Kaewkhao, "Luminescence behavior of Nd3+ions doped ZnO-BaO-(Gd2O3/GdF3)- P2O5 glasses for laser material applications," *Journal of Luminescence*, Vol.236, 118139 (2021). https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2021.118139

40. J. Padchasri, N. Triamnak, **T. Sareein**, J. Jutimoosik, S. Tongsaeng, A. Bootchanont, P. Kidkhunthod, S. Rujirawat, P. Manyum, R. Yimnirun, "Crystal structure and XANES study of Fe-substituted Barium Titanate ceramics prepared by conventional solid-state technique," *Radiation Physics and Chemistry*, Vol.188, 109657 (2021). https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109657

ผู้ร่วมวิจัย

1. **ชื่อ (ภาษาไทย)** นายไพศาล การถาง
   ชื่อ (ภาษาอังกฤษ) Mr. Paisan Kanthang

2. **ตำแหน่ง** อาจารย์
   สาขาวิชา เทคโนโลยีสุขภาพ เครื่องสำอางและการชะลอวัย
   คณะ / สถาบัน คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
   โทรศัพท์ 0-2913-2424 โทรสาร 0-2913-2424 ต่อ 105
   โทรศัพท์มือถือ 08-6795-5896, 09-3468-3939
   E-mail: pk_quantum2000@yahoo.com, pkanthang@gmail.com

3. **ประวัติการศึกษาระดับอุดมศึกษา**

ปรด. (ฟิสิกส์)	มหาวิทยาลัยมหิดล
วทม. (ฟิสิกส์)	มหาวิทยาลัยมหิดล
วทบ. (ฟิสิกส์)	มหาวิทยาลัยนเรศวร

4. **ประวัติงานวิจัย**

วารสารวิชาการระดับนานาชาติ (International publications)

1. Wangdi D, Precharattana M, **Kanthang P**. A Guided Inquiry laboratory to enhance students' understanding of the Law of Mechanical Energy Conservation. *International Journal of Innovation in Science and Mathematics Education.* 2020;28(1):29-43.
2. Wangdi D, **Kanthang P**, Precharattana M. Development of a hands-on model embedded with guided inquiry laboratory to enhance students' understanding of law of mechanical energy conservation. *Asia-Pacific Forum on Science Learning and Teaching*. 2017;18: 1-27.
3. Nicomrat D, **Kanthang P**, Chamutpong S. The Relationships among Microorganisms in Paddy Soil of Rice Varieties at Sanamchaikate, Chachoengsao. *Applied Mechanics and Materials*. 2017; 866: 144-147.
4. **Kanthang P.** The Flour Processing Machine for *Musa sapientum Linn*. *Applied Mechanics and Materials*. 2017; 866: 85-87.
5. **Kanthang P.** The Study and Screening of Bacteria for Silver Nanoparticle Biosynthesis. *Applied Mechanics and Materials*. 2017; 866: 45-47.

6. **Kanthang P.** Image Enhancement for Characterization of MinD Protein Oscillation in *Escherichia coli*. *Applied Mechanics and Materials*. 2017; 866: 41-44.
7. Nicomrat D, Tharajak J, **Kanthang P**. Pesticides Contaminated in Rice Paddy Soil Affecting on Cultivated Microorganism Community. *Applied Mechanics and Materials*. 2016; 848:135-138.
8. Nicomrat D, Tharajak J, **Kanthang P**. Microbial Comparison in Synthesizing Gold Nanoparticles for Harvesting Gold in Wastewater System. *Applied Mechanics and Materials*. 2016; 848:52-55.
9. Saengpayab Y., **Kanthang P.**, Schreier S., Modchang C., Nuttavut N., Triampo D., Triampo W. Biophysical approach to investigate temperature effects on protein dynamics. *EPJAP*. 2015; 71: 31201. (Impact Factor 0.774)
10. Vuttivorakulchai K, **Kanthang P**, Saiz Rivera A. The physics aspect of price index changes: Super- diffusive approach. *IJPS*. 2011; 6: 5850–5856. (Impact Factor 0.554)
11. Aroonnual S, Ngamsaad W, **Kanthang P**, Nuttawut N, Triampo W, Triampo D, Krittanai C. Spatial distributions and energy landscape of MinE protein dynamics via the biophysical spot tracking technique. *IJPS*. 2011; 6: 3795–3806. (Impact Factor 0.554)
12. **Kanthang P**, Ngamsaad W, Nuttavut N, Triampo W, Triampo D, Krittanai C. Biophysical approach for studying the MinD protein dynamics and energy landscape: a novel use of the spot tracking technique. *EPJAP*. 2011; 55: 11201. (Impact Factor 0.899)
13. Chadsuthi S., Triampo W., Modchang C., **Kanthang P**., Triampo D., Nuttavut N. Stochastic modeling and combined spatial pattern analysis of epidemic spreading. World Academy of Science, Engineering and Technology 51: 1048-1055.
14. Ngamsaad W, **Kanthang P**, Modchang C, Sriyab S, Triampo W. The effect of boundary conditions on the mesoscopic lattice Boltzmann method: Case study of a reaction–diffusion based model for Min-protein oscillation. *Applied Mathematics and Computation*. 2010; 217:2339-47. (Impact Factor 1.124)
15. Yojina J, Ngamsaad W, Nuttavut N, Triampo D, Lenbury Y, **Kanthang P**, Sriyab S, Triampo W. Investigating flow patterns in a channel with complex obstacles using the lattice Boltzmann method. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2010;24(10):2025-34. (Impact Factor 0.258)

16. Yojina J, Ngamsaad W, Nuttavut N, Triampo D, Lenbury Y, Triampo W, **Kanthang P** and Sriyab S. More Realistic Model for Simulating Min Protein Dynamics: Lattice Boltzmann Method Incorporating the Role of Nucleoids. *International Journal of Computational and Mathematic Sciences.* 2010;4(3): 177-182.
17. Ngamsaad W, Yojina J, **Kanthang P**, Modchang C, Krittanai C, Triampo D, Nuttawut N, Triampo W. Quantitative approach of Min protein researches and applications: Experiments, mathematical modeling and computer simulations. *African Journal of Biotechnology*. 2009;8(25):7350-7362. (Impact Factor 0.547)
18. Sriyab S, Yojina J, Ngamsaad W, **Kanthang P**, Modchang C, Nuttavut N, Lenbury Y, Krittanai C, Triampo W. Mesoscale modeling technique for studying the dynamics oscillation of Min protein: Pattern formation analysis with lattice Boltzmann method. *Computers in biology and medicine* 2009; **39**: 412-424. (Impact factor 1.170)
19. Unai S, **Kanthang P**, Junthon U, Ngamsaad W, Triampo W, Modchang C, Krittanai C. Quantitative analysis of time-series fluorescence microscopy using a spot tracking method: application to Min protein dynamics. *Biologia*2009; **64**: 27-42. (Impact factor 0.207)
20. Junthorn U, Unai S, **Kanthang P**, Ngamsaad W, Modchang C, Triampo W, Krittanai C, Triampo D, Lenbury Y. Single-Particle Tracking Method for Quantitative Tracking and Biophysical Studies of the MinE Protein. ***Journal of the Korean physical society*** 2008; **52**: 639-48. (Impact factor 1.204)
21. Modchang C,Triampo W,**Kanthang P**, Junthorn U, Unai S, Ngamsaad W, Nuttavut N, Triampo D, Lenbury Y. Stochastic Modeling of External Electric Field Effect on *Escherichia coli* Min Protein Dynamics. ***Journal of the Korean physical society*** 2008; **53**: 851-62. (Impact factor 1.204)
22. Ngamsaad W, Triampo W**, Kanthang P**, Modchang C, Nuttavut N, Tang IM, Lenbury Y. A lattice Boltzann method for modeling the dynamic pole-to-pole oscillations of Min proteins for determining the position of the mid-cell division plane. ***Journal of the Korean physical society*** 2005; **46**: 1025-30. (Impact factor 0.828)
23. Modchang C, **Kanthang P**, Triampo W, Ngamsaad W, Nuttavut N, Tang IM, Lenbury Y. Modeling of the Dynamic Pole-to-Pole Oscillations of the Min Proteins in Bacterial Cell Division: The Effect of an External Field. ***Journal of the Korean physical society*** 2005; **46**: 1031-6. (Impact factor 0.828)

การประชุมทางวิชาการ (Conferences)

1. Yodyingyong S., Triampo D., Triampo W., **Kanthang P.** A Cost-Effective Synthesis of Silica Aerogel by Ambient Pressure Drying Route. International Seminar on AEROGELS – 2014 on 6- 7 October 2014, Hamburg, Germany.
2. Yodyingyong S., Triampo D., Triampo W., **Kanthang P.** Rapid synthesis of Silica Aerogel by Ambient Pressure Drying Route, 2014 MRS Spring Meeting & Exhibit, April 21-25, 2014, San Francisco, California, USA.
3. Charoenbhakdi S., **Kanthang P.** Quantitative Spatio-Temporal Dynamics Research Of Gfp-Min Proteins By Using Spot Tracking Technique. 38th Congresson Science and Technology of Thailand (STT.38), October 11-19, 2012, Chiang Mai University, Thailand.
4. Nicomrat D., Chadathorn P., **Kanthang P.**, Ritthong W. A PCR machine prototype using liquid heat transfer system. 38th Congresson Science and Technology of Thailand (STT.38), October 11-19, 2012, Chiang Mai University, Thailand.
5. Seeha P., Rooraksa A., Pramaingam S., Waiyawut W., **Kanthang P.** The pneumatic mechanical tools for classification of five commercial rice varieties. The First ASEAN Plus Three Graduate Research Congress (AGRC). March 1 - 2, 2012, Chiang Mai University, Thailand.
6. Chaiyasitdhi A., Vuttivorakulchai K., **Kanthang P.** The Biophysical Aspects of the Temperature Preferendum Behavior in Field Crickets, *Gryllusassimilis*. Biodiversity 2011, February 2, 2012, BIOTEC, Thailand.
7. Chaiyawong C, Keawlawiang K, Sangkarat C, Niconrat D, Chysiri T, Triampo W,**Kanthang P.**Pneumatic system for the real-time mechanical stress-strain characteristics of short and long rice kernels. 37thCongresson Science and Technology of Thailand (STT.37),October 12, 2011,Mahidol University, Thailand.
8. Keawlawiang K, Chaiyawong C, Sangkarat C, Niconrat D, Chysiri T, Triampo W,**Kanthang P.**The mechanical properties for classification of five commercial rice varieties in Chiangrai province of Thailand. 37thCongresson Science and Technology of Thailand (STT.37),October 12, 2011,Mahidol University, Thailand.
9. Sangkarat C, Chaiyawong C, Keawlawiang K,Thongpang S, Korkeattrakoon P,Eawsakui N, Niconrat D, Chysiri T, Triampo W,**Kanthang P.**The real-time analysis for the mechanical properties of red bean grains.37thCongresson Science and Technology of Thailand (STT.37),October 12, 2011,Mahidol University, Thailand.

10. Chaiyawong C, Winitchat S, Leekrajang P, **Kanthang P**, Nicomrat D. An effective approach for bioethanol detection of grass fermentation by an in-house alcohol detector. 37thCongresson Science and Technology of Thailand (STT.37),October 12, 2011,Mahidol University, Thailand.
11. Winitchat S, Chaiyawong C, Leekrajang P, **Kanthang P**, Nicomrat D. Effectiveness of a disc diffusion method in screening antibacterial substances producing microorganisms on durian peels. 37thCongresson Science and Technology of Thailand (STT.37), October 12, 2011, Mahidol University, Thailand.
12. AroonnualS, **Kanthang P**, and Triampo W.Dynamics and pattern formation of the MinE protein in *E.coli*. The 6th Siam Physics Congress(SPC2011), March 23 –26, 2011,The Ambassador City Jomtien Hotel, Pattaya, Chonburi, Thailand
13. Vuttivorakulchai K, **Kanthang P** and Saiz A. The Behavioral Dynamics of Price Index Changes of Stock Markets: Physics Approach, the 6th Econophysics Colloquium 2010, Asia Pacific Center for Theoretical Physics, National Science Council, International Review of Financial Analysis, November 4-6, Academia Sinica, Taipei, Taiwan.
14. Vuttivorakulchai K, **Kanthang P** and Saiz A. The Study of Behavior of Stock Market Price Change Indices Dynamics by Physics Approach, the 2nd Thailand Research Expo 2010, National Research Council of Thailand, August 26-30, 2010, Bangkok Convention Centre, Bangkok, Thailand.
15. Reunsumrit Jand **Kanthang P**. Lattice Boltzmann method for simulating Min protein dynamics incorporating therole of nucleoids. The First TSME International Conference on Mechanical Engineering20-22 October, 2010, UbonRatchathani, Thailand.
16. AroonnualS, **Kanthang P**, and Triampo W.Fractional diffusion-advection and pattern formations of MinE Protein dynamics in *Escherichia coli*: experiments and theories, International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences, Vol. 13, No. 3, pp. 53-54, 2009
17. **Kanthang P**and Triampo W. Biophysical Study of MinD Protein: Spot Tracking and Pole-to-Pole oscillatory dynamics. 35thCongresson Science and Technology of Thailand (STT.35),October 15, 2009,Burapha University, Thailand.
18. **Kanthang P**, Nattavut N and Triampo W. Image Enhancement for Characterization of Protein Oscillation in Cell Division Process of *E.coli*. The 33rd National Conference on Optics and Applications (NCOA), October 15, 2008, Srinakharinwirot University and King Mongkut's University of Technology (Thonbiri), Thailand.

19. Unai S, **Kanthang P**, Junthorn U, Ngamsaad W, Nattavut N, Triampo W and Krittanai C. Single particle tracking: application to study MinD protein oscillation in live.*Escherichia coli*. 33rd Congress on Science and Technology of Thailand (STT.33), October 18 - 20, 2007, Walailak University, Nakhon Si Thammarat, Thailand.
20. Junthorn U, Unai S, **Kanthang P**, Ngamsaad W, Triampo W, Modchang C, Krittanai C, and Lenbury Y. Howto track MinE protein oscillations in *Escherichia coli*" 33rd Congresson Science and Technology of Thailand (STT.33), October 18 - 20, 2007, Walailak University, Nakhon Si Thammarat, Thailand.
21. Unai S, **Khantang P**, Junthorn U, Ngamsaad W, Nattavut N, Triampo W, and Krittanai C. Biophysical Study of MinD Protein Oscillation in *E.coli*. Siam Physics Congress 2007, March 22 –24, NakornPathom, Thailand.
22. Ngamsaad W, Triampo W, **Kanthang P**, Tang IM, Nuttawut N, and Modjung C. A lattice Boltzmann method for modeling the dynamic pole-to-pole oscillations of min proteins for determining the position of the midcell division plane 2nd International Conference on Mesoscopic Methods in Engineering and Science (ICMMES), July 26-29, 2005, the Hong Kong Polytechnic University (HKPU), Hong Kong, China.

ผู้ร่วมวิจัย

1. **ชื่อ (ภาษาไทย)** นายภูมิรัตน์ นวรัตน์
ชื่อ (ภาษาอังกฤษ) Mr. Poomirat Nawarat

2. **ตำแหน่ง** อาจารย์
สาขาวิชา วัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม
คณะ / สถาบัน คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
โทรศัพท์ 0-2913-2424 โทรสาร 0-2913-2424 ต่อ 7510
โทรศัพท์มือถือ 098-8245755
E-mail: poomirat.n@rmutp.ac.th

3. **ประวัติการศึกษาระดับอุดมศึกษา**

Ph.D. (Physics)	Rensselaer Polytechnics Institute, USA
M.S. (Physics)	Rensselaer Polytechnics Institute, USA
B.A. (Physics)	Middlebury College, USA

4. **ประวัติงานวิจัย**

1. P. Nawarat, K. Beach, V. Meunier, H. Terrones, G.-C. Wang, K. M. Lewis, “Voltage-Dependent Barrier Height of Electron Transport through Iron Porphyrin Molecular Junctions” J. Phys. Chem. C, vol. 125, pp. 7350–7357, Mar. 2021.
2. B. Wang, P. Nawarat, K. M. Lewis, P. Patsalas, and D. Gall, “Tunable Infrared Plasmonic Properties of Epitaxial $Ti_{1-x}Mg_xN$(001) Layers” ACS Appl. Mater. Interfaces, vol. 13, pp. 22738-22748, May 2021.
3. J. Littlejohn , Z. Li, Z. Lu, X. Sun, P. Nawarat, Y. Wang, Y. Li, T. Wang, Y. Chen, L. Zhang, H. Li, K. Kisslinger, S. Shi, J. Shi, A. Raeliarijaona, W. Shi, H. Terrones, K. M. Lewis, M. Washington, T. M. Lu, and G.-C. Wang, “Large metallic vanadium disulfide ultrathin flakes for spintronic circuits and quantum computing devices,” *ACS Appl. Nano Mater.*, vol. 2, no. 6, pp. 3684–3694, Jun. 2019.
4. P. Nawarat (Presenter), K. Beach, H. Terrones, G.-C. Wang, and K. M. Lewis, “Transition of Conduction Mechanism from Direct Tunneling to Fowler-Nordheim Tunneling in Iron Porphyrin (FeP) Molecular Junction”, Howard-Columbia Collaboration Meeting, Columbia University, New York City, NY, USA, May. 2019. (Poster presentation)

5. P. Nawarat (Presenter), Z. Li, D. Frey, G.-C. Wang, and K. M. Lewis, “Characterization of the Metallic Property of Vanadium Disulfide (VS_2)”, American Vacuum Society Spring, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY, USA, Jun. 2017. (Poster presentation)
6. P. Nawarat (Presenter), “15 Degrees Celsius in 15 Minutes: Optimal Temperature for Boost Laser”, Summer symposium, Middlebury College, Middlebury, VT, USA, Aug. 2013. (Poster presentation)