



รายงานโครงการวิจัยฉบับสมบูรณ์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

การพัฒนาวัสดุเปล่งแสงความยาวคลื่น 1064 นาโนเมตร จากแก้วบอเรตสำหรับ
เป็นวัสดุตัวกลางเลเซอร์

Development of 1064 nm wavelength emission material from borate
glass for laser medium material

รหัสโครงการ 4708618

โดย

ธนพงศ์ สารอินทร์

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

เดือน มีนาคม พ.ศ. 2568

งบประมาณสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2567

จากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มุ่งพัฒนาวัสดุเปล่งแสงจากการเตรียมแก้วบอเรต ที่เจือด้วย Nd^{3+} ความเข้มข้นต่าง ๆ โดยออกแบบสูตรและหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเตรียมตัวอย่างแก้ว ด้วยวิธีหลอมแก้วและทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว พร้อมทั้งศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางแสง และสมบัติการเปล่งแสงของแก้วบอเรตที่เจือด้วย Nd^{3+} ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ พบว่าแก้วมีค่าความหนาแน่น ปริมาตรเชิงโมลและดรชนีหักเหของแก้วเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ Nd_2O_3 ที่มากขึ้น นอกจากนี้ จากผลการทดลอง สเปกตรัมการดูดกลืนแสง สเปกตรัมการถูกกระตุ้น และสเปกตรัมการเปล่งแสง พบว่าแก้วมีการดูดกลืนแสงในช่วงแสงที่ตามองเห็นไปจนถึงช่วงใกล้อินฟราเรด โดยแสงความยาวคลื่น 808 นาโนเมตร สามารถไปกระตุ้น Nd^{3+} แล้วทำให้เกิดการเปล่งแสงความยาวคลื่น 1061 นาโนเมตร ออกมาได้เข้มที่สุด และความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดในการเจือ Nd_2O_3 ลงไปในแก้ว $\text{Li}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3$ คือ 0.5 mol% การวิเคราะห์สมบัติการเปล่งแสงด้วยทฤษฎี J-O สามารถหาค่าสัดส่วนการเปล่งแสง และภาคตัดขวางของการเปล่งแสงที่ความยาวคลื่น 1061 นาโนเมตร ได้เท่ากับ 0.808 และ 9.75×10^{-22} ตารางเซนติเมตร ตามลำดับทำให้ระบุได้ว่าแก้วชนิดนี้มีศักยภาพที่น่าสนใจต่อการนำไปพัฒนาเพื่อใช้เป็นตัวกลางเลเซอร์ในเลเซอร์ของแข็งที่มีการเปล่งแสงความยาวคลื่น 1061 นาโนเมตร

คำสำคัญ: แก้ว, เปล่งแสง, ธาตุหายาก, ตัวตรวจจับ

Abstract

This research project aims to develop luminescent materials through the preparation of borate glass doped with Nd^{3+} at various concentrations. The study involves designing glass compositions and optimizing the conditions for synthesizing borate glass via the melt-quenching method. The physical, optical, and luminescent properties of the Nd^{3+} -doped borate glass were systematically investigated. The results indicate that the density, molar volume, and refractive index of the glass increase with higher Nd_2O_3 concentrations. Furthermore, absorption spectra, excitation spectra, and emission spectra analyses reveal that the glass exhibits absorption in the visible to near-infrared regions. Notably, an excitation wavelength of 808 nm effectively stimulates Nd^{3+} , leading to intense emission at 1061 nm. The optimal Nd_2O_3 doping concentration for the $\text{Li}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3$ glass system was determined to be 0.5 mol%. The Judd–Ofelt (J-O) theory was employed to analyze the luminescence properties, yielding the branching ratio and emission cross-section at 1061 nm as 0.808 and $9.75 \times 10^{-22} \text{ cm}^2$, respectively. These findings suggest that this glass composition holds significant potential for further development as a solid-state laser gain medium emitting at 1061 nm.

Keyword: Glass, Luminescence, Rare earth, Sensor

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้มีระยะเวลาการดำเนินการวิจัย 1 ปี ซึ่งได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2567 ทั้งนี้ยังได้รับความกรุณาจากคณาจารย์และบุคลากร หลายฝ่ายด้วยกัน ขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมสำหรับการสนับสนุนทุนวิจัยและมีส่วนช่วยทำให้การดำเนินการสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์และเครื่องมือวิจัย

อย่างไรก็ตามคณะวิจัยหวังว่างานวิจัยฉบับนี้จะทำให้เกิดคุณประโยชน์และมีคุณูปการต่อการศึกษารองานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องต่อไป

ผู้วิจัย



สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญภาพ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ความหมายของแก้ว	4
2.2 ชนิดของแก้ว	6
2.3 โครงสร้างของแก้ว	8
2.4 ธาตุแลนทาไนด์	9
2.5 การเกิดสีของแก้ว	11
2.6 ความหนาแน่นและปริมาตรเชิงโมล	12
2.7 การหักเหและค่าดัชนีหักเหของแสง	13
2.8 หลักการและทฤษฎีของเครื่องยูวี-วิสเนียร์ไออาร์สเปกโทรโฟโตมิเตอร์	15
2.9 ลูมิเนสเซนซ์ (Luminescence)	19
2.10 โฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence)	20
2.11 ทฤษฎี (Judd-Ofelt (J-O) theory)	21
2.12 ทฤษฎีเลเซอร์ (Laser theory)	24
2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	28
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	32
3.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย	32

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย	33
3.3 การวิเคราะห์ข้อมูลการวิจัย	35
บทที่ 4 ผลการวิจัย	39
4.1 ลักษณะของแก้วตัวอย่างที่ได้จากการหลอม	39
4.2 ผลความหนาแน่น ปริมาตรเชิงโมล และดรรชนีหักเหของแสง	39
4.3 ผลการดูดกลืนแสง	40
4.4 ผลการกระตุ้นแสงของ Nd^{3+}	41
4.5 ผลการเปล่งแสง	41
บทที่ 5 สรุป อภิปรายผล	43
5.1 สรุปผล	43
5.2 อภิปรายผล	43
บรรณานุกรม	51
ประวัตินักวิจัย	56

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	โครงสร้างของฟลักซ์ลิเกตและแกวซ์ลิเกต	5
2.2	แผนภาพ V-T diagram	6
2.3	การหักเหและการสะท้อนของแสง	14
2.4	การวัดตรวจสอบด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer	15
2.5	ส่วนประกอบของเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer	16
2.6	หลักการทำงานของเครื่องตรวจสอบด้วยเครื่องดูดกลืนแสง	17
2.7	แถบสเปกตรัมของแสงที่อยู่ในช่วงของแสงที่มองเห็นได้	18
2.8	แผนภาพ Jablonski Diagram	20
2.9	การเปลี่ยนชั้นพลังงานของอะตอมแบบดูดกลืนแสง (ก) และเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง (ข)	25
2.10	โครงสร้างพื้นฐานของเครื่องกำเนิดเลเซอร์	27
3.1	แผนผังแสดงวิธีการดำเนินงานวิจัย	33
3.2	แผนภาพกระบวนการเตรียมแก้วตัวอย่าง	34
3.3	แผนผังการวิเคราะห์ข้อมูล	35
3.4	เครื่องวัดความหนาแน่น (Densitometer) รุ่น AND HR-200	36
3.5	เครื่องวัดค่าดัชนีหักเห รุ่น DR-M2	37
3.6	เครื่อง UV-Vis-NIR Spectrophotometer รุ่น UV-3600	37
3.7	เครื่อง Fluorescence Spectrophotometer รุ่น Cary Eclipse	38
4.1	ลักษณะของแก้วตัวอย่าง LNKB ที่เจือด้วย Nd_2O_3	39
4.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น ปริมาตรเชิงโมลและดัชนีหักเหของแก้วตัวอย่างกับปริมาณความเข้มข้นของ Nd_2O_3	40
4.3	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของแก้วตัวอย่าง LNKB ที่เจือด้วย Nd_2O_3 แต่ละความเข้มข้น	40
4.4	สเปกตรัมการกระตุ้นแสงของแก้วตัวอย่าง LNKB ที่เจือด้วย Nd_2O_3 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	41

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.5	สเปกตรัมการเปล่งแสงจากการกระตุ้นด้วยแสงของแก้วตัวอย่าง LNKB ที่เจือด้วย Nd_2O_3 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	42
5.1	การเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงานของ Nd^{3+} เติมในแก้ว LNKB ตามสเปกตรัมการเปล่งแสง	46



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	การเรียงอิเล็กตรอนในธาตุกลุ่มแลนทาไนด์และจำนวนอิเล็กตรอนใน 4f ที่สถานะออกซิเดชันต่าง ๆ	10
2.2	ความหมายของตัวแปร J-O	22
3.1	ปริมาณสารเคมีที่ต้องใช้ในการหลอมแก้ว $\text{Li}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3$ ที่เจือด้วย Nd_2O_3 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	34
5.1	ค่าความแรงของการสั่นที่ได้จากการทดลอง (f_{exp}) และที่คำนวณได้ (f_{cal}) ของการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานเนื่องจากการดูดกลืนแสงในแก้วลิเทียมโซเดียมโพแทสเซียมบอเรตที่เจือด้วย Nd_2O_3 ที่ความเข้มข้น 0.5 mol%	48
5.2	ค่าตัวแปร J-O (Ω_2 , Ω_4 และ Ω_6) ของแก้วลิเทียมโซเดียมโพแทสเซียมบอเรตที่เจือด้วย Nd_2O_3 ที่ความเข้มข้น 0.5 mol% ในงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับค่าตัวแปร J-O ของแก้วอื่น ๆ ที่มีการเจือด้วย Nd_2O_3	49
5.3	ความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานแล้วทำให้เกิดการเปล่งแสง (A_R) ภาคตัดขวางของการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น ($\sigma(\lambda_p)$) และสัดส่วนการเปล่งแสง (β_R) ของแก้วลิเทียมโซเดียมโพแทสเซียมบอเรตที่เจือด้วย Nd_2O_3 ที่ความเข้มข้น 0.5 mol%	50

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

แก้วเป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจในทางอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก นอกจากคุณสมบัติพื้นฐานได้แก่ มีความโปร่งแสง ทนต่อปฏิกิริยาเคมี ทนอุณหภูมิสูง ทนต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ เป็นฉนวนไฟฟ้า และสามารถทำให้เป็นรูปทรงต่าง ๆ ได้อย่างหลากหลาย แล้วแก้วยังสามารถผลิตขึ้นได้โดยไม่ต้องอาศัยเทคโนโลยีที่ไม่ซับซ้อน ทั้งยังสามารถเลือกสารเคมีต่าง ๆ มาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตแก้วเพื่อปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ของแก้วที่ได้ (เช่น สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางโครงสร้าง สมบัติทางแสง รวมถึงคุณสมบัติพิเศษอื่น ๆ) ให้มีความหลากหลาย เหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้งานที่ต่าง 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 ซึ่งทำให้แก้วนั้นเหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานเป็นอุปกรณ์พิเศษต่าง ๆ เช่น วัสดุแสดงผล (display devices) อุปกรณ์เชิงแสง (photonic devices) อุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ (optoelectronic devices) และ ตัวเปล่งแสงของแข็ง (solid-state lighting) เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม แก้วบอเรตที่ไม่ได้เติมสารอะไรเลยกลับมีสมบัติทางแสงที่ยังไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งานประยุกต์ทางด้านต่าง ๆ ซึ่งการปรับปรุงสมบัติแก้วนั้นทำได้โดยเติมสารที่เหมาะสมลงไป เช่น ในกรณีของลิเทียมออกไซด์ (Li_2O) และโพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) ช่วยให้การตกผลึกเป็นไปได้ง่ายขึ้น 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 นีโอไดเมียม (Neodymium: Nd^{3+}) เหมาะสำหรับประยุกต์ใช้เป็นเลเซอร์ในช่วงใกล้อินฟราเรด ด้วยขยายสัญญาณแสง และอุปกรณ์การสื่อสารโทรคมนาคม

จากความสำคัญที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้จึงเป็นการพัฒนาระบบแก้วที่เติมธาตุแลนทาไนด์ ได้แก่ Nd^{3+} เพื่อพัฒนาเป็นวัสดุเปล่งแสงจากระบบแก้วบอเร็ต ด้วยเทคนิคการหลอมละลายและทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว (melt quenching) สำหรับประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ทางแสง โดยจะพัฒนาสูตรแก้วที่เหมาะสมและเติมธาตุแลนทาไนด์ลงไปในแก้ว จากนั้นทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางแสง และสมบัติการเปล่งแสงของแก้วตัวอย่าง เพื่อเป็นฐานข้อมูลทางวัสดุที่สำคัญในการพัฒนา และประยุกต์ใช้สำหรับเป็นวัสดุตัวกลางเลเซอร์ในระดับสูงต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อเตรียมแก้วบอเร็ต ที่เจือด้วย Nd^{3+} ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ
2. เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางแสง และสมบัติการเปล่งแสงของแก้วบอเร็ตที่เจือด้วย Nd^{3+} ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาและเตรียมแก้วจากระบบแก้ว $10\text{Li}_2\text{O}-10\text{Na}_2\text{O}-10\text{K}_2\text{O}-(70-x)\text{B}_2\text{O}_3-x\text{Nd}_2\text{O}_3$ โดยที่ x เท่ากับ 0.0, 0.1, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 ร้อยละโดยโมล (mol%) ตามลำดับ โดยนำไปหลอมที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และอบที่อุณหภูมิ 500 $^{\circ}\text{C}$ 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 NIR Luminassance spectrometer

2.6 การศึกษาศักยภาพสำหรับเป็นวัสดุตัวกลางเลเซอร์ โดยใช้ทฤษฎี Judd-Ofelt (J-O)



บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความหมายของแก้ว

แก้ว คือ วัสดุที่ถูกทำขึ้นจากสารอนินทรีย์ มีความแข็ง มีลักษณะอยู่ตัว และเป็นเนื้อเดียว ส่วนมากจะมีความโปร่งใส ทนทานต่อความร้อนและสภาพการกัดกร่อน จึงมักถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างมากมาย โดยปกติแก้วเกิดจากการเย็นตัวลงอย่างฉับพลันของวัสดุที่หลอมหนืดด้วยความร้อนสูง ซึ่งทำให้การแข็งตัวนั้นไม่ก่อให้เกิดเป็นผลึก แก้วจึงจัดเป็นวัสดุอสัณฐานที่มีโครงสร้างไม่แน่นอนและมีโมเลกุลที่เรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ โดยทั่วไปแก้วจะอ่อนตัวในช่วงอุณหภูมิค่อนข้างกว้างและพบว่าสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแก้วขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารประกอบต่าง 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) มีลักษณะโปร่งแสงและความเปราะ หากพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพแล้ว แก้วจะหมายถึงวัสดุที่มีความแข็ง (hard) โปร่งใส (transparent) เปราะ (brittle) มีความแวววาว (relative) มีจุดหลอมละลายสูง (high softening point) ไม่ละลายในน้ำและในสารละลายใด ๆ (insoluble in water and organic solvents) อีกทั้งไม่ติดไฟ (non inflammable) (ประสิทธิ์ประชาดี, 2559: ออนไลน์)

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

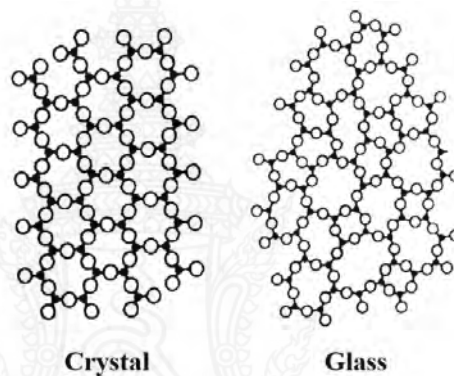
1. แท่งแก้วเกิดการเสียรูปอย่างมากที่สุดและโค้งงอเมื่อถูกแขวนห้อยอยู่ระหว่างจุดรองรับ 2 จุด

2. ในระหว่างการให้ความร้อนแก้วจะเกิดการอ่อนนิ่มและกลายเป็นของเหลวเมื่อเกินช่วงอุณหภูมิแต่จะไม่แสดงจุดหลอมตัว (melting point) ที่แน่นอน

โดยปกติของแข็งจะเป็นผลึกและมีการจัดเรียงตัวของอะตอมและโมเลกุลที่แน่นอน ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นโดยรูปแบบการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ (x-ray diffraction) อย่างไรก็ตามการ

เคลือบนั้นจะไม่มีโครงสร้างที่แน่นอนอะตอมถูกเรียงตัวในลักษณะอิสระ ซึ่งอาจจะดูได้จากการเปรียบเทียบโครงสร้างของผลึกแอสลิตกับผลึกเคลือบ

หน่วยของโครงสร้างคือซิลิกอนเตตระไฮดรอนรูปร่างนี้ถูกควบคุมโดยขนาดของอะตอมจากการเปรียบเทียบกันขนาดอะตอมของออกซิเจนเท่ากับ 1.32 และของซิลิกอนเท่ากับ 0.39 ตัวอย่างโครงสร้างของผลึกซิลิตและแก้วซิลิกา แสดงไว้ในภาพที่ 2.1 ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงความแตกต่างในโครงสร้างของมัน (ภัทรวรรณ เณยเจริญ, 2559: ออนไลน์)

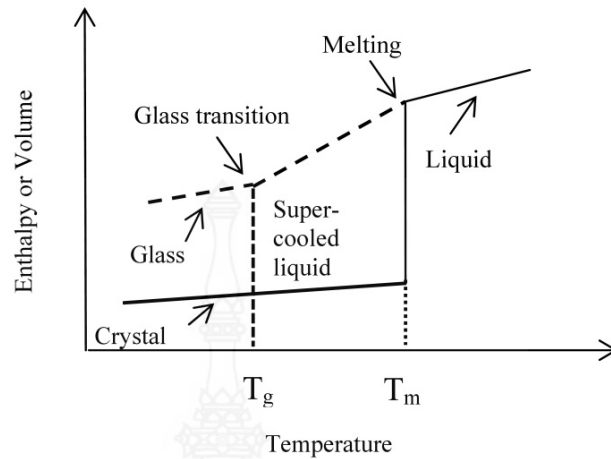


ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของผลึกซิลิตและแก้วซิลิต

ที่มา (Rao, 2002)

โครงสร้างของเคลือบและแก้วมีเครือข่ายแบบสามมิติที่ไม่เป็นระเบียบและไม่มีชุดการจัดเรียงอะตอม (unit) ที่ซ้ำ ๆ กันในระหว่างการให้ความร้อนเคลือบจะหลอมตัวเหนือช่วงอุณหภูมิที่ได้รับเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณของพลังงานที่ต้องการให้ส่วนที่แตกต่างกันของโครงสร้างตาข่ายนั้นแยกออกจากกัน ซึ่งไม่เทียบเท่ากับโครงสร้างช่องว่างภายในโครงสร้างตาข่ายอาจจะถูกเติมเต็มด้วยอะตอมของธาตุอื่น ๆ ซึ่งจะช่วยในการปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพ อย่างเช่น สี ความสุกใสของการเคลือบ และอื่น ๆ

การเกิดแก้วสามารถอธิบายได้ด้วย แผนภาพระหว่างปริมาตรกับอุณหภูมิ (V-T diagram) ดังภาพที่ 2.2 จากแผนภาพจะเห็นว่า สำหรับการเกิดเป็นผลึก (crystal) เมื่ออุณหภูมิลดลงเรื่อย ๆ จนถึงจุดหนึ่งปริมาตรจะลดลงอย่างรวดเร็ว (ตามเส้นที่ป) นั่นคือเกิดการตกผลึกกลายเป็นของแข็งที่จุดหลอมเหลว (T_m) แต่สำหรับการเกิดแก้ว (glass) เมื่ออุณหภูมิลดลงเรื่อย ๆ จนต่ำกว่าจุด T_m ก็จะไม่เกิดการตกผลึก



ภาพที่ 0.1

ภาพที่ 2.2 แผนภาพ V-T diagram

ที่มา (Yamak, 2013: online)

แต่จะเปลี่ยนสภาพไปอยู่ในสถานะที่เรียกว่า Super-cooled Liquid ซึ่งทำให้ปริมาตรค่อย ๆ ลดลง (ตามเส้นประ) จนกระทั่งอุณหภูมิลดมาถึงจุดที่เรียกว่า Glass Transition Temperature (T_g) จึงเกิดการเปลี่ยนสภาพเป็นแก้วในที่สุด โดยคุณสมบัติของแก้วนั้นจะขึ้นอยู่กับสารชนิดต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบในแก้ว ทำให้ลักษณะพันธะในแก้วเปลี่ยนแปลงไปซึ่งจะส่งผลไปยังลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของแก้วนั้นด้วย (Varshneya, 1994: online)

2.2 ชนิดของแก้ว

การแบ่งชนิดหรือประเภทของแก้ว แบ่งได้หลายรูปแบบ เช่น แบ่งตามกรรมวิธีการผลิต องค์ประกอบทางเคมีหรือตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน เป็นต้น

2.2.1 แก้วออกไซด์ (Oxide Glass)

แก้วออกไซด์ คือ แก้วที่เกิดจากสารประกอบออกซิเจนรวมกับธาตุอื่น ๆ เช่น B_2O_3 , SiO_2 , Na_2O , BaO , Al_2O_3 โดยแก้วออกไซด์จะถูกแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ ประเภทที่สามารถเกิดเป็นแก้วได้โดยเอง ประเภทที่สอง คือ ใส่ไปเพื่อทำลายพันธะ ประเภทที่สาม คือ สามารถเกิดเป็นแก้วได้ด้วยตัวเองและสามารถทำลายพันธะได้ ขึ้นอยู่กับสารประกอบออกไซด์ที่ใส่ลงไปซึ่งแก้วออกไซด์จะมีความแข็งแรงและทนต่อสารเคมี แต่มีประสิทธิภาพในการเปล่งแสงน้อยกว่าแก้วฟลูออไรด์ (สมิต อินทร์ศิริพงษ์ และคณะ, 2559: 45) โดยงานวิจัยนี้มีแก้วออกไซด์ คือ

1.1 บอเรต (B_2O_3) เนื่องจากเป็นสารประกอบออกไซด์ที่ทำหน้าที่เป็นโครงข่ายของแก้ว และแก้วบอเรตยังมีความแข็งแรง ความโปร่งใสสูง ใช้คุณสมบัติหลอมเหลวต่ำ มีเสถียรภาพทางความร้อนสูง มีความคงทนต่อกรดต่าง โครงสร้างของบอเรตสามารถเกิดได้ 2 แบบ คือ แบบสามเหลี่ยมแบบราบ (triangles) แต่ถ้าเติมไอออนบวกลงไป เช่น ธาตุหมู่แอลคาไลน์และหมู่แอลคาไลน์เอิร์ทจะทำให้โครงสร้างเปลี่ยนเป็นแบบทรงสี่หน้า (tetrahedral) (Yan et al., 2007: 105-112)

1.2 โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) เนื่องจากเป็นสารประกอบออกไซด์ประเภททำลายพันธะ ดังนั้นจึงมีการใส่โซเดียมออกไซด์ไปเพื่อทำลายพันธะของแก้วหลัก ด้วยการเติมโซเดียมออกไซด์ซึ่งมีขนาดใหญ่ลงไปแก้วหลัก จะทำให้โครงข่ายของแก้วเกิดการแตกออก จึงส่งผลให้คุณสมบัติในการหลอมแก้วลดลง (Sugawara et al., 2013: 371-372)

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

2.2.2 แก้วฟลูออไรด์ (Fluoride Glass)

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

2.2.3 แก้วออกซิฟลูออไรด์ (Oxyfluoride Glass)

แก้วที่มีองค์ประกอบของสารประกอบออกไซด์และสารประกอบฟลูออไรด์ โดยการแทนที่สารประกอบออกไซด์บางตัวด้วยสารประกอบฟลูออไรด์ลงไป สารฟลูออไรด์ช่วยทำให้แก้วโปร่งแสงในช่วงที่ตามองเห็น รวมไปถึงการมีสมบัติด้านความชื้นและลดพลังงานโฟนอน ส่งผลให้

ประสิทธิภาพการเปล่งแสงของแก้วเพิ่มขึ้น และยังมีค่าดัชนีหักเหสูง เพราะสามารถเติมธาตุหายากลงไปในสารประกอบออกซิฟลูออไรด์ได้มากถึง 60% และยังพบว่าฟลูออไรด์ไอออนทำปฏิกิริยากับกลุ่มไฮดรอกซิล (OH group) จนกระทั่งเกิดเป็นไฮโดรเจนฟลูออไรด์ (HF) การลดลงของกลุ่มไฮดรอกซิล ยังเพิ่มประสิทธิภาพในการเปล่งแสงของแก้วอีกด้วย (สมิตอินทร์ศิริพงษ์ และคณะ, 2559: 45)

2.3 โครงสร้างของแก้ว

โครงสร้างของแก้วอาจแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม ตามชนิดของแก้ว (จิราพันธ์ ธรรมณีเพชร, 2554) ดังนี้

2.3.1 Glass Formers

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

2.3.2 Intermediates

ออกไซด์ของสารประกอบบางชนิดไม่สามารถเกิดโครงข่ายโครงข่ายของแก้วได้ด้วยตัวเอง แต่สามารถเข้าไปร่วมกับโครงข่ายโครงข่ายที่มีอยู่ ออกไซด์ของสารประกอบเหล่านี้ถูกเรียกว่า Intermediate Oxides เช่น อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) สามารถเข้าไปร่วมกับโครงข่ายโครงข่ายของแก้วได้ ทำให้แก้วมีสมบัติพิเศษ เช่น แก้ว Aluminoborosilicate นี้จะทนต่ออุณหภูมิที่สูงได้ดีกว่าแก้วธรรมดา

2.3.3 Modifiers

เมื่อเติมสารบางชนิดลงไปในแก้ว จะทำให้โครงข่ายโครงข่ายของแก้วบางส่วนถูกทำลาย เรียกว่า Network Modifier เช่น โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) เป็นต้น เมื่อโครงข่ายโครงข่ายของแก้วบางส่วนแตกออกจะทำให้ความหนืดของแก้วลดลง และสามารถนำไปขึ้นรูปได้ง่าย อะตอมของออกซิเจนจากออกไซด์เหล่านี้จะเข้าสู่โครงข่ายโครงข่ายที่จุดเชื่อมต่อระหว่าง เตตระฮีดรอน

และทำลายโครงสร้างโครงข่ายนั้นทำให้เกิดอะตอมของออกซิเจนที่มีอิเล็กตรอนไม่มีคู่ขึ้น ส่วนไอออน เช่น Na^+ จาก Na_2O และ K^+ จาก K_2O จะไม่สามารถเข้าไปในโครงสร้างโครงข่ายนี้ได้ แต่จะยังคงอยู่ในรูปของไอออนและเกิดพันธะไอออนิกภายในโครงสร้างโครงข่ายนั้น โดยไอออนเหล่านี้จะส่งเสริมให้แก้วเกิดผลึกภายในโครงสร้างได้

2.4 ธาตุแลนทาไนด์

ธาตุหายากประกอบไปด้วย ธาตุ 14 ชนิดในตารางธาตุ โดยการที่เรียกธาตุเหล่านี้ว่าเป็นธาตุหายากนั้นเนื่องจากการที่จะค้นพบธาตุบนโลกเป็นไปได้ยาก และธาตุเหล่านี้มีปริมาณน้อยกว่าธาตุทั่วไปในธรรมชาติ นอกจากนี้ธาตุหายากยังมีสมบัติทางแสงที่มีลักษณะเฉพาะ จึงถูกนำไปใช้ในอุปกรณ์ทางแสงที่หลากหลาย โดยธาตุหายากจะมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าธาตุแลนทาไนด์ ซึ่งอยู่คาบที่ 6 ของตารางธาตุ ตั้งแต่ธาตุแลนทานัมจนถึงอิตเทอร์เบียม โดยธาตุกลุ่มแลนทาไนด์จะอยู่ในกลุ่ม f ดังนั้นจึงมีการจัดเรียงอิเล็กตรอนในระดับชั้นพลังงาน 4f และพบว่าที่ชั้นพลังงาน 4f และ 5d มีระดับพลังงานที่เท่ากันทำให้มีการสับสนในการจัดเรียงอิเล็กตรอน จึงได้มีการศึกษาสเปกตรัมการเปล่งแสง แล้วพบว่าธาตุกลุ่มแลนทาไนด์จะมีการจัดเรียงอิเล็กตรอน 2 แบบ คือ ลักษณะแรกจะมีการจัดเรียงอิเล็กตรอนแบบ $4f^n 5d^1 6s^2$ ลักษณะที่สองจะมีการจัดเรียงอิเล็กตรอนแบบ $4f^{n+1} 6s^2$ เมื่อพิจารณาจากข้อมูลการจัดเรียงอิเล็กตรอนในตารางที่ 1 พบว่าธาตุส่วนใหญ่จะใช้อัตราการจัดเรียงอิเล็กตรอนแบบ $4f^{n+1} 6s^2$ ส่วนธาตุ Ce Gd และ Lu จะมีการจัดเรียงแบบ $4f^n 5d^1 6s^2$ เนื่องจาก Gd มีการจัดเรียงอิเล็กตรอน คือ $[\text{Rn}] 4f^7 5d^1 6s^2$ การที่ Gd ไม่จัดเรียงอิเล็กตรอนแบบ $4f^8 6s^2$ เพราะว่าการจัดเรียงอิเล็กตรอนถ้าจะให้ความเสถียรจะต้องบรรจุอิเล็กตรอนแบบเต็มเต็มครึ่งหรือแบบเต็มเต็ม ซึ่งจะนำไปตามกฎของฮุนด์ ดังนั้น $4f^7$ จึงมีความเสถียรมากกว่า $4f^8$ (Munhoz et al., 2019: 379-389)

ตารางที่ 2.1 การเรียงอิเล็กตรอนในธาตุกลุ่มแลนทาไนด์และจำนวนอิเล็กตรอนใน 4f ที่สถานะออกซิเดชันต่าง 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	$4f^7 5d^1 6s^2$	$4f^7$
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)

ธาตุแลนทาไนด์ที่ใช้ในงานวิจัย

นีโอดิเมียมออกไซด์ (neodymium oxide) เติมลงไปในแก้วเพื่อต้องการนำมาใช้งานทางด้านเลเซอร์ อุปกรณ์ทางการแพทย์ และอุปกรณ์แสดงผล เนื่องจากนีโอดิเมียมออกไซด์ที่เติมลงไป ในแก้ว จะสามารถเปล่งแสงในช่วงความยาวคลื่น NIR ที่ 1060 นาโนเมตร (Pal, I. et al., 2013: 18-25) อีกทั้งนีโอดิเมียมออกไซด์ที่เติมลงไปในแก้วอีกวัตถุประสงค์หนึ่งก็คือ เพื่อต้องการนำมาทำเป็นหลอดไฟฮาโลเจน (halogen lamp) เพื่อจะดูดกลืนแสงในช่วงยูวี อีกทั้งนีโอดิเมียมยังมีคุณสมบัติความแข็งแรงที่สูง มีเสถียรภาพทางเคมีที่ดี คือไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับสารเคมีชนิดอื่น ๆ โดยนีโอดิเมียมจะมีการถ่ายโอนอิเล็กตรอนในชั้น 4f ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัวของธาตุนี้ (Blasse & Grabmaier, 1994)

2.5 การเกิดสีของแก้ว

แก้วสามารถทำให้เกิดสีได้ การเกิดสีของแก้วสามารถจำแนกได้ตามกระบวนการผลิตได้ 2 ประเภท คือ สีที่เกิดในเนื้อแก้วและสีที่เกิดจากการเคลือบสีลงไปบนผิวแก้ว ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะสีที่เกิดในเนื้อแก้ว ซึ่งเกิดขึ้นได้จากปัจจัยดังนี้

1. สีที่เกิดจากการดูดกลืนแสง

แสงที่ถูกดูดกลืนจะเป็นช่วงคลื่นใดช่วงคลื่นหนึ่ง โดยสารเคมีที่อยู่ในเนื้อแก้วทำหน้าที่เป็นสารที่ทำให้เกิดสีซึ่งสารเหล่านี้จะเป็นออกไซด์ของโลหะทรานซิชัน (transition metal oxide) เช่น Ti, V, Cr, Mn, Fe และ Co โดยสีที่เกิดขึ้นจากออกไซด์เหล่านี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การเกิดสีเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทางเคมีในโครงสร้างของเนื้อแก้ว เช่น NiO ในแก้วโซเดียม-ตะกั่ว จะให้น้ำตาล แต่ในแก้วโปแตส-ตะกั่ว จะให้สีม่วงแดง เป็นต้น และการเกิดสีจากออกซิเดชันสเททของโลหะไอออน เช่น ออกไซด์ของโครเมียมจะให้สีที่แตกต่างกัน โครเมียมที่มีเลขออกซิเดชันเป็น +3 ให้สีเขียว แต่ +6 ให้สีส้ม เป็นต้น

2. สีที่เกิดจากอนุภาคคอลลอยด์ (solid colloid) และคอลลอยด์ (colloid)

เป็นสารผสมที่ดูเหมือนจะเป็นเนื้อเดียวกันโดยแบ่งเป็นส่วนเนื้อเดียว (continuous phase) และอนุภาคคอลลอยด์ (dispersed phase) ซึ่งตัวอนุภาคคอลลอยด์จะมีขนาดระหว่าง 10^4 - 10^7 เซนติเมตร หรือมากกว่าขนาดรูกระดาดเซลล์โอฟแต่น้อยกว่ารูกระดาดกรอง อนุภาคคอลลอยด์จะเกาะตัวใหญ่กว่าโมเลกุลแต่ไม่ใหญ่มากและแยกชั้นกันชัดเจน เช่น นม ควัน เป็นต้น โดยปกติแล้วคอลลอยด์ที่ตกค้างอยู่ในเนื้อแก้วจะไม่มีสี แต่เมื่อผ่านกระบวนการทางความร้อนจะทำให้เกิดสีขึ้นได้ เช่น คอลลอยด์ของทองคำทำให้เกิดสีแดงทับทิม เป็นต้น

3. สีที่เกิดจากอนุภาคขนาดเล็กที่มีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคในระดับโมเลกุล

สีที่เกิดจากอนุภาคขนาดเล็กที่มีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคในระดับโมเลกุล เช่น สีแดงที่เกิดจากอนุภาคเล็ก ๆ ของซิลิเนียมออกไซด์จะไม่มีสี แต่สามารถหักเหหรือสะท้อนแสงในช่วงคลื่นหนึ่งได้ดีเป็นพิเศษ เช่น ทำให้เกิดสีคล้ายโอปอลซึ่งเป็น Hydrate Amorphous Silica ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งเดิมมีสีขาวขุ่นเมื่อหักเหหรือสะท้อนแสงจะทำให้มีสีที่เปลี่ยนแปลงไป ผลของสีที่ได้จากการเติมสารอนินทรีย์ แต่ละชนิด ดังนี้ เงิน (Ag) ให้สีเหลือง ทองแดงออกไซด์ (CuO) ให้สีเขียวและน้ำเงิน ทองคำ (Au) ให้สีแดงทับทิม แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) ให้สีเหลือง ซีลีเนียม (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) ให้สีเหลือง และโคบอลต์ออกไซด์ (CoO) ให้สีน้ำเงินเข้ม (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุแก้ว, 2540: ออนไลน์)

2.6 ความหนาแน่นและปริมาตรเชิงโมล

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

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

2.6.1 การหาค่าความหนาแน่นโดยการชั่งน้ำหนัก

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

เมื่อ

w_a	คือ น้ำหนักในอากาศ (g)
w_b	คือ น้ำหนักในน้ำ (g)
$w_a - w_b$	คือ น้ำหนักที่หายไปในน้ำ (g)
ρ	คือ ความหนาแน่นของวัตถุ (g /cm ³)
ρ_w	คือ ความหนาแน่นของน้ำมีค่าเท่ากับ 1 g /cm ³

2.6.2 การหาปริมาตรเชิงโมล

นอกจากนี้ค่าความหนาแน่นมีความสอดคล้องกันกับค่าปริมาตรเชิงโมล (V_m) มีหน่วยเป็น (cm^3/mol) โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.2

$$V_m = \frac{M_T}{\rho} \quad (2.2)$$

เมื่อ

V_m คือ ปริมาตรเชิงโมลของแก้วตัวอย่าง หน่วยเป็น cm^3/mol

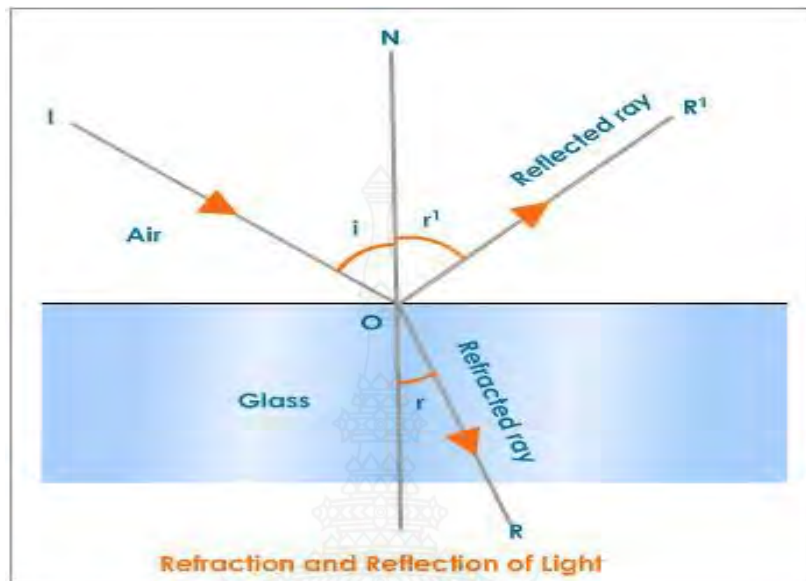
M_T คือ น้ำหนักโมเลกุลรวมของแก้วตัวอย่าง หน่วยเป็น g/mol

ρ คือ ความหนาแน่นของแก้วตัวอย่าง หน่วยเป็น g/cm^3

2.7 การหักเหและค่าดัชนีหักเหของแสง

2.7.1 การหักเหของแสง

การหักเหของแสง (refraction) เกิดจากการที่แสงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกัน เป็นผลทำให้ทิศทางของแสงเปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งในขณะที่แสงเกิดการหักเหก็จะเกิดการสะท้อนของแสงขึ้นพร้อม ๆ กันด้วย ดังภาพที่ 2.3 เมื่อแสงเดินทางผ่านวัตถุหรือตัวกลางโปร่งใส เช่น อากาศ แก้ว น้ำ พลาสติกใส แสงจะสามารถเดินทางผ่านได้เกือบหมดเมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลางชนิดเดียวกัน แสงจะเดินทางเป็นเส้นตรงเสมอถ้าแสงเดินทางผ่านตัวกลางหลายตัวกลาง แสงจะหักเห



ภาพที่ 2.3 การหักเหและการสะท้อนของแสง

ที่มา (วิฑิต วรรณเลิศลักษณ์, 2559: ออนไลน์)

2.7.2 ค่าดัชนีหักเหของแสง

ค่าดัชนีหักเห (refractive index) สามารถหาได้โดยการใช้เครื่องมือทั่วไปที่ เรียกว่า Rayner Refractometer หลักการทำงานของเครื่อง Rayner Refractometer ที่ใช้อยู่นี้เป็นการวัดค่าเปรียบเทียบกับค่าดัชนีหักเหมาตรฐานของแผ่นแก้วปริซึมที่ติดอยู่กับเครื่อง ซึ่งมีค่าดัชนีหักเหเป็น 1.86 มีแหล่งกำเนิดแสงเป็น Yellow Light-emitting สามารถวัดค่าดัชนีหักเหได้ตั้งแต่ 1.410 ถึง 1.810 ในการวัดดัชนีหักเหจะเลื่อน Ribbon Like Cursor มายังรอยต่อของแถบมืดแถบสว่าง

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.3)$$

เมื่อ

n คือ ค่าดัชนีหักเหของตัวกลางใด

c คือ ความเร็วแสงในสุญญากาศ

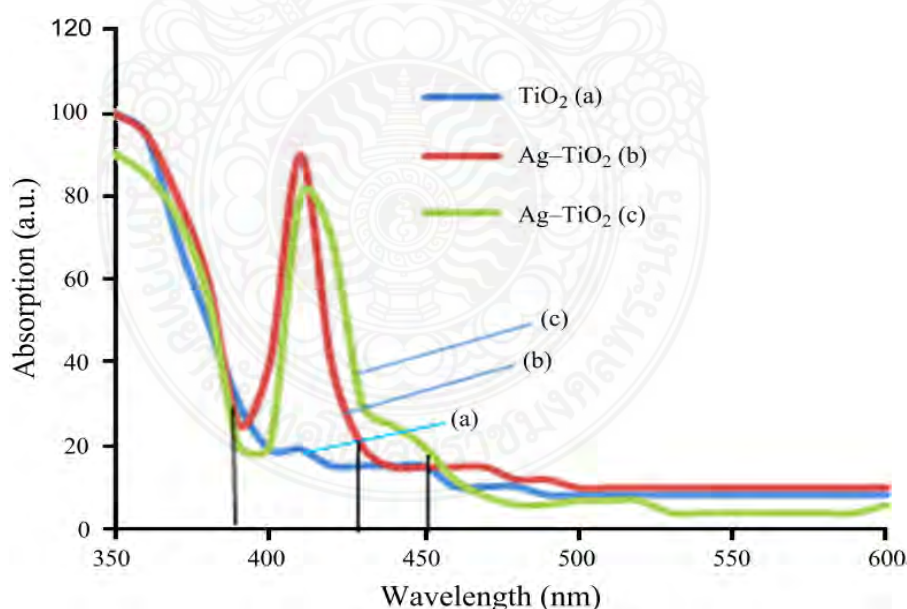
v คือ ความเร็วแสงในตัวกลางใด ๆ

2.8 หลักการและทฤษฎีของเครื่องยูวี-วิสเนียร์ไออาร์สเปกโทรโฟโตมิเตอร์

2.8.1 เครื่องตรวจวัดสำหรับการดูดกลืนแสง (UV-Vis-NIR Spectrophotometer)

UV-Vis-NIR Spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัด ปริมาณแสงในช่วงรังสียูวี และช่วงแสงขาว ที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืน โดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณ และชนิดของสารที่มีอยู่ในตัวอย่าง ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์สารประกอบเชิงซ้อน และสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสง ในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้

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



ภาพที่ 2.4 การวัดตรวจสอบสารด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer

ที่มา (Gupta, 2013: online)

2.8.2 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องตรวจวัดสำหรับการดูดกลืนแสง

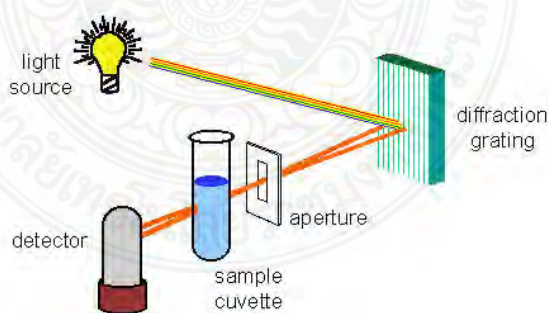
โดยทั่วไปจะประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

1. แหล่งกำเนิดแสง (light source) แหล่งกำเนิดแสงในเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์จะต้องให้รังสีในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการอย่างต่อเนื่องและคงที่ตลอดเวลา รวมทั้งมีความเข้มแสงที่มากพอด้วย หลอดกำเนิดแสง มีหลายชนิดตามความยาวคลื่นแสงที่เปล่งออกมา ซึ่งต้องเลือกใช้ให้ถูกต้องเหมาะสมกับของเหลวที่นำมาวัดค่าดูดกลืนแสง

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

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

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

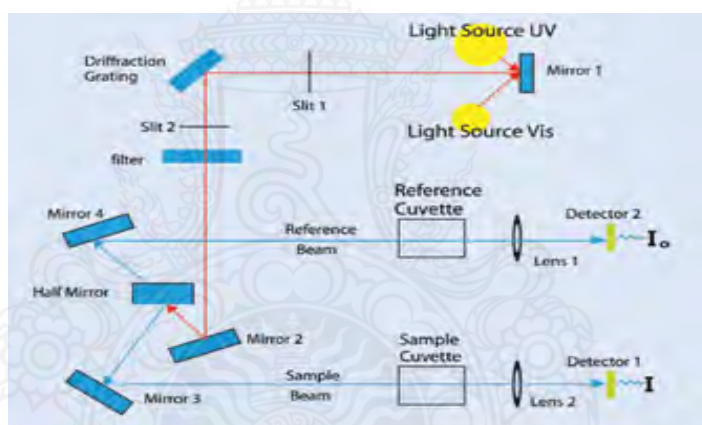


ภาพที่ 2.5 ส่วนประกอบของเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer

ที่มา (Kantakapun, 2017: online)

2.8.3 หลักการทำงานของเครื่องตรวจวัดสำหรับการดูดกลืนแสง (UV-Vis-NIR Spectrophotometer)

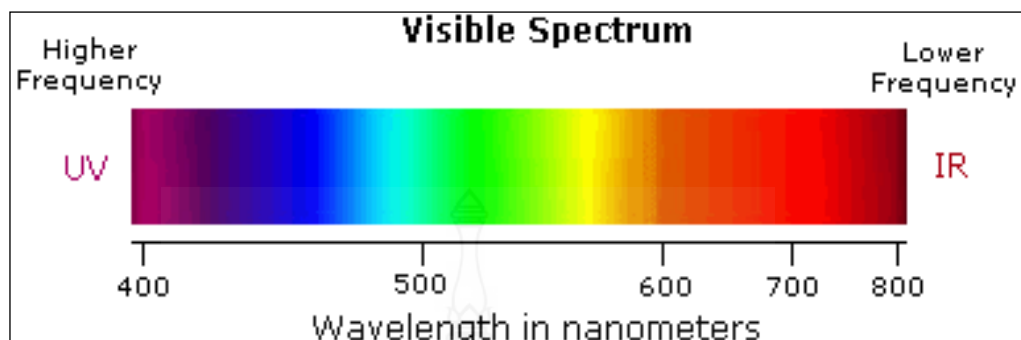
เครื่อง UV-Vis-NIR Spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่นำเทคนิค UV-Vis Spectroscopy ไปใช้งานเครื่องมือตัวนี้ ทำหน้าที่ในการตรวจวัดความเข้มแสงที่ผ่านหรือสะท้อนจากตัวอย่างเปรียบเทียบกับความเข้มแสงจากแหล่งกำเนิดเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง (light source) เกรตติง (grating) หรือโมนโครเมเตอร์ (monochromator) เซลล์ที่บรรจุสารตัวอย่าง (cuvette) และเครื่องตรวจวัดแหล่งกำเนิดแสงจะต้องให้แสงที่คงที่อย่างต่อเนื่อง ตัวที่นิยมใช้ คือ หลอดทังสเตนฮาโลเจนซึ่งให้แสงที่มีความยาวคลื่นในช่วง 320-2,500 นาโนเมตร



ภาพที่ 2.6 หลักการทำงานของเครื่องตรวจวัดสารด้วยการดูดกลืนแสง
ที่มา (มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม, 2559: ออนไลน์)

2.8.4 การดูดกลืนแสงของสารในความยาวคลื่นช่วงแสงที่มองเห็นได้

แสงวิสิเบิลประกอบด้วยช่วงคลื่นแคบ ๆ ของสเปกตรัมช่วงแสงที่มีสมบัติเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งแต่ละช่วงคลื่นจะมีสีเฉพาะตัวสามารถมองเห็นด้วยตา 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)

2.8.5 กฎการดูดกลืนแสง

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

กฎของแลมเบิร์ตมีความหมายว่า “เมื่อมีลำแสงเดี่ยวซึ่งเป็นลำแสงที่มีความยาวคลื่นเดียวผ่านตัวกลางเนื้อเดียวสัดส่วนของความเข้มข้นของแสงที่ถูกตัวกลางนั้นดูดกลืนไว้ไม่ให้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของแสงที่กระทบตัวกลางนั้น และความเข้มข้นของแสงจะถูกแต่ละชั้นของตัวกลางดูดกลืนไว้ในสัดส่วนที่เท่ากัน”

กฎของเบียร์มีความหมายว่า “เมื่อแสงที่มีความยาวคลื่นผ่านตัวกลางเนื้อเดียวสัดส่วนของความเข้มข้นของแสงที่ถูกตัวกลางนั้นดูดกลืนไว้จะแปรผันตรงกับปริมาณของตัวกลางที่ถูกดูดกลืนแสงนั้น”

เมื่อทำการวัดการดูดกลืนของแสงของสารละลายปริมาณความเข้มข้นของแสงที่ถูกดูดกลืนจะขึ้นอยู่กับความเข้มของสารละลายและความหนาแน่นของสารละลายที่ลำแสงต้องผ่านจึงจำเป็นต้องรวมกฎของเบียร์และกฎของแลมเบิร์ตเข้าด้วยกันเรียกเป็นกฎของเบียร์แลมเบิร์ตและเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$A = \log \left[\frac{I_0}{I} \right] = \epsilon lc \quad (2.4)$$

เมื่อ

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

2.9 ลูมิเนสเซนซ์ (Luminescence)

ปรากฏการณ์ลูมิเนสเซนซ์ คือ ปรากฏการณ์ที่วัตถุสามารถเรืองแสงออกมาได้โดยไม่ใช้การเปล่งแสง เนื่องจากการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งการเรืองแสงนี้เกิดขึ้นเนื่องจากการที่อิเล็กตรอนในระดับชั้นพลังงานถูกกระตุ้นขึ้นไปอยู่ในสถานะกระตุ้น (excited state) และเกิดการกลับสู่สถานะพื้น โดยการปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านของแสงที่มองเห็นได้ (visible light) ออกมา ซึ่งปรากฏการณ์ลูมิเนสเซนซ์นี้สามารถแบ่งได้เป็นหลายประเภท ขึ้นอยู่กับแหล่งของพลังงานที่ไปกระตุ้นอิเล็กตรอนให้ขึ้นไปอยู่ในสถานะกระตุ้น (Ronda et al., 1998: 669-676) เช่น

- แคโทดลูมิเนสเซนซ์ (cathodoluminescence) เป็นผลมาจากการกระตุ้นด้วยอิเล็กตรอน
- เคมีลูมิเนสเซนซ์ (chemiluminescence) เป็นผลมาจากการกระตุ้นด้วยปฏิกิริยาเคมี
- อิเล็กโตรลูมิเนสเซนซ์ (electroluminescence) เป็นผลมาจากการกระตุ้นด้วยไฟฟ้า
- แมคคาโนลูมิเนสเซนซ์ (mechanoluminescence) เป็นผลมาจากการกระตุ้นด้วยการกระทำเชิงกลที่กระทำต่อของแข็ง
- โฟโตลูมิเนสเซนซ์ (photoluminescence) เกิดจากการที่อิเล็กตรอนในระดับชั้นพลังงานดูดกลืนโฟตอน (photon) เข้าไปจึงถูกกระตุ้นขึ้นไปอยู่ในสถานะกระตุ้น
- เรดิโอลูมิเนสเซนซ์ (radioluminescence) เป็นผลมาจากการกระตุ้นด้วยการยิงรังสีไอออไนซ์ (ionizing radiation)
- เทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ (thermoluminescence) เกิดจากการคายพลังงานในย่านของแสงกลับออกมาเมื่อให้ความร้อนแก่วัตถุ

2.10 โฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence)

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

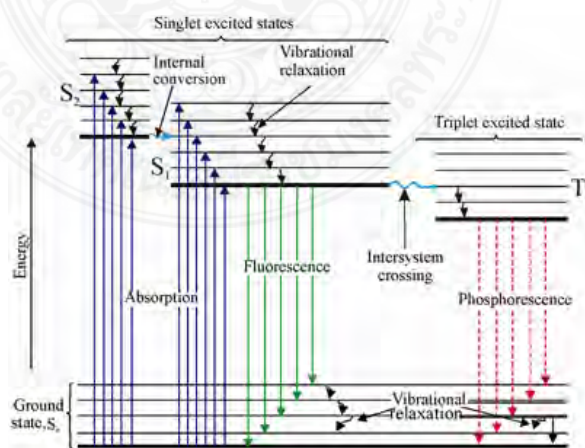
1. ฟลูออเรสเซนซ์ (fluorescence)

เป็นการเรืองแสงชนิดหนึ่งที่สามารถเรืองแสงออกมาได้ในเวลาสั้น ๆ (ระดับ นาโนวินาที) และการเรืองแสงจะหยุดลง เกิดขึ้นเมื่อ อิเล็กตรอนซึ่งอยู่ในสถานะพื้น (ground state) ที่เป็นซิงเกิลต์สเตต (singlet state) ได้รับพลังงานก็จะถูกกระตุ้นไปสู่สถานะกระตุ้นที่เป็นซิงเกิลต์สเตตเช่นกัน และจะกลับสู่สถานะพื้นทันที โดยจะทำการคายพลังงานออกมาในรูปของแสง

2. ฟอสฟอเรสเซนซ์ (phosphorescence)

เป็นการเรืองแสงชนิดหนึ่งที่จะเรืองแสงหลังจากได้รับแสงไปแล้วช่วงระยะเวลาหนึ่ง (ระดับ มิลลิวินาที ถึง ชั่วโมง) และจะเรืองแสงได้อย่างต่อเนื่องยาวนาน เกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนที่กระโดดไปสู่สถานะกระตุ้นไม่ได้กลับสู่สถานะพื้นในทันที แต่จะย้ายไปสู่ระดับพลังงานที่ต่ำกว่า แต่มีค่าสปินมัลติพลีซิตี (spin multiplicity) สูงขึ้น ที่เรียกว่าทริปเลตสเตต (triplet state) แล้วจึงกลับสู่สถานะพื้นโดยคายพลังงานในรูปของแสงออกมา ซึ่งทำให้ใช้เวลาในการตกกลับสู่สถานะพื้นนานขึ้น

ซึ่งกลไกการเกิด ฟลูออเรสเซนซ์ และฟอสฟอเรสเซนซ์ นั้นสามารถอธิบายได้จาก Jablonski Diagram ตามภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 แผนภาพ Jablonski Diagram

ที่มา (Bett, 2014: online)

2.11 ทฤษฎี (Judd-Ofelt (J-O) theory)

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

การดูดกลืนแสงประกอบด้วยส่วนหลัก ๆ ของการเปลี่ยนแปลงคู่ขั้วไฟฟ้า (electric-dipole) ภายใน 4f เซลล์ (4f-shell) ของไอออนธาตุหายาก ปกติแล้วอิเล็กตรอนชั้น 4f จะถูกกำบังจากลิแกนด์ (ligand) ในสนามผลึกเนื่องจากขั้วของอิเล็กตรอนชั้นนอก ยิ่งไปกว่านั้นอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนชั้น 5d กับ การเปลี่ยนแปลงความแรงของพันธะของการกระตุ้นอิเล็กตรอนบนชั้น 4f-5d ส่งผลให้เกิดการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสง (emission) เกิดขึ้นด้วย สำหรับทฤษฎี J-O นั้นมีความสำคัญในการใช้หาค่าความแรงของการสั่น (oscillator strength) ภายในคู่ขั้ว โดยใช้ตัวแปรของความเข้มแสง 3 ความยาวคลื่น (Ω_λ) ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามไอออนของธาตุหายาก จากทฤษฎี J-O การเปลี่ยนแปลงสถานะพื้น (ground state) สู่สถานะกระตุ้น (excited state) ของความแรงของอิเล็กตรอนคู่ขั้วนี้สามารถได้จากสมการ

$$f_{cal} = \frac{8\pi^2 m c v}{3h(2J+1)} \frac{(n^2+2)^2}{9n} \sum_{\lambda=2,4,6} \Omega_\lambda \langle \Psi_J \| U^{(\lambda)} \| \Psi'_{J'} \rangle^2 \quad (2.5)$$

โดยที่ n คือ ดรรชนีหักเหของวัสดุ $(n^2+2)^2/9n$ คือ สนามลอเรนซ์ (Lorentz local field) และจำนวนอิเล็กตรอนระหว่างคู่ขั้วกับคู่ขั้ว (dipole-dipole), J คือ โมเมนตัมเชิงมุมของสถานะพื้น, $2J+1$ คือ ดีเจนเนอเรซี (degeneracy) ของสถานะพื้น $^{2S+1}L_J$, v คือ เลขคลื่น, $\|U^{(\lambda)}\|^2$ คือ 2 เท่าของการลดเมตริกซ์ (metrix) ของธาตุที่ถูกวิเคราะห์ระหว่างการเปลี่ยนแปลง $\Psi_J \rightarrow \Psi'_{J'}$ และ Ω_λ ($\lambda=2, 4, 6$) คือ ตัวแปรความเข้มแสงในทฤษฎี J-O ซึ่งแต่ละตัวแปรมีความหมายดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.2 ความหมายของตัวแปร J-O

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

ที่มา (Huy et al., 2012: 262-265)

สำหรับความแรงของการสั่นจากการทดลอง (f_{exp}) ของแถบการดูดกลืน นิยามได้จากสมการ

$$f_{exp} = 4.318 \times 10^{-9} \int \alpha(v) dv \quad (2.6)$$

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

$$A = \alpha(\nu) cd \quad (2.7)$$

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

นอกจากนี้ตัวแปร J-O ยังถูกใช้ในการทำนายคุณสมบัติการแผ่รังสี (radiation) ของ สถานการณ์กระตุ้นของไอออนของธาตุหายาก เช่น ความน่าจะเป็นในการเกิดการแผ่รังสี (radiation transition probability; A_R), เวลาชีวิตของการแผ่รังสี (radiation lifetime; τ_R), อัตราการแบรนชิง (branching ratios; β_R) และภาคตัดขวางของการกระตุ้นให้เปล่งแสง (stimulated emission cross-sections; $\sigma(\lambda_p)$)

ดรอนนิทท์เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ทำนายคุณสมบัติการแผ่รังสี (radiation) ของ สถานการณ์กระตุ้นของไอออนของธาตุหายาก โดยความน่าจะเป็นในการเกิดการแผ่รังสีสามารถ คำนวณได้จากสมการ

$$A_R(\Psi J, \Psi' J') = \frac{64\pi^4 \nu^3}{3h(2J+1)} \left[\frac{n(n^2+2)^2}{9} S_{ed} + n^3 S_{md} \right] \quad (2.8)$$

โดยที่ $(n^2+2)/9n$ และ n^3 มีความเกี่ยวข้องกับผลกระทบของการเป็นตัวกลางไดอิเล็กทริก (dielectric) ไอออนของธาตุหายากในตัวกลางไดอิเล็กทริกไม่เพียงแต่เกิดสนามการแผ่รังสีของแสงที่ ตกกระทบเท่านั้น ยังเกิดสนามจากอิเล็กตรอนคู่ขั้วในตัวกลางอีกด้วย สนามทั้งหมดประกอบด้วย สนามไฟฟ้า E ของแสงที่ตกกระทบ และสนามไฟฟ้าของคู่ขั้วซึ่งถูกเรียกว่า สนามยังผล (effective field; E_{eff}) ตัวดำเนินการกำลังสองของธาตุ เมทริกซ์ในอิเล็กตรอนคู่ขั้วไฟฟ้าถูกนำมาคูณกันได้เป็น $(E_{eff}/E)^2$ ซึ่งประมาณได้เท่ากับ $(n^2+2)^2/9n$ เช่นเดียวกับสเปกตรัมการเปล่งแสงซึ่งสัมพันธ์กับ n^3

$$S_{ed} = e^2 \sum_{\lambda=2,4,6} \Omega_\lambda \left| \langle \Psi J | U^\lambda | \Psi' J' \rangle \right|^2 \quad (2.9)$$

$$S_{md} = (e^2 h^2 / 16\pi^2 m^2 c^2) \left| \langle \Psi J | L + 2S | \Psi' J' \rangle \right|^2 \quad (2.10)$$

โดยที่ S_{ed} และ S_{md} คือ คู่ชั่วของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ซึ่งค่าคู่ชั่วของสนามไฟฟ้าไม่ขึ้นอยู่กับวัสดุโฮสต์ ความน่าจะเป็นในการเกิดการแผ่รังสี, เวลาชีวิตของการแผ่รังสี และอัตราการแบรนชิงของการกระตุ้นนิยามได้จากสมการ (2.11-2.13)

$$A_T(\Psi, J) = \sum_{\Psi'J'} A(\Psi J, \Psi'J') \quad (2.11)$$

$$\tau_R(\Psi J) = [A_T(\Psi J)]^{-1} \quad (2.12)$$

$$\beta_R(\Psi J \rightarrow \Psi'J') = \frac{A(\Psi J \rightarrow \Psi'J')}{A_T(\Psi J)} \quad (2.13)$$

อัตราการแบรนชิงสามารถใช้ในการทำนายความสัมพันธ์ของความเข้มแสงที่เกิดจากการเปล่งแสงจากการกระตุ้นได้ทั้งหมด โดยอัตราการแบรนชิงจากการทดลองสามารถหาได้จากแถบการเปล่งแสง การกระตุ้นจากการแผ่รังสีในภาคตัดขวางสัมพันธ์กับ ความน่าจะเป็นในการเกิดการแผ่รังสี ซึ่งสามารถนิยามสมการได้จาก (2.14)

$$\sigma(\lambda_p) = \left(\frac{\lambda_p^4}{8\pi c n^2 \Delta\lambda_{eff}} \right) A(\Psi J, \Psi'J') \quad (2.14)$$

โดยที่ λ_p คือ ความยาวคลื่นของฟิสิกส์ที่เกิดการทรานซิชัน และ $\Delta\lambda_{eff}$ คือ ความกว้างของเส้นยังผลหาได้จากการหาพื้นที่แถบสเปกตรัมการเปล่งแสงด้วยความสูงเฉลี่ยของฟิสิกส์

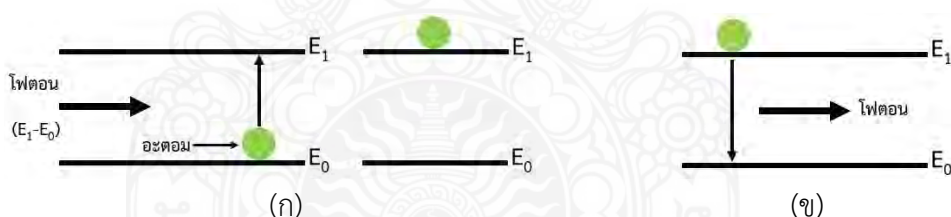
2.12 ทฤษฎีเลเซอร์ (Laser theory)

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

เลเซอร์ คือ อุปกรณ์ที่เป็นแหล่งกำเนิดแสง มีลักษณะเฉพาะ โดยการขยายแสงด้วยการกระตุ้นให้แผ่รังสีซึ่งเป็นการอธิบายถึงกระบวนการผลิตแสงเลเซอร์ที่เกิดจากสองกระบวนการหลัก ๆ

คือ การเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น (stimulated emission) และการขยายสัญญาณแสง (light amplification)

อะตอมหรือโมเลกุล ที่ใช้ทำเลเซอร์จะมีชั้นพลังงานต่างกัน มีพลังงานที่แตกต่างกัน ตามค่าพลังงานของอะตอม โดยปกติอะตอมหรือโมเลกุลจะอยู่ที่ชั้นพลังงานต่ำเสมอ เพราะมีความเสถียรมากกว่า และเมื่อใดที่มีการให้พลังงานแก่อะตอมที่เหมาะสม เช่น การกระตุ้นโดยโฟตอนแสง (อนุภาคของแสง) อิเล็กตรอนในอะตอมที่อยู่สถานะพื้น (ground state) หรือ E_0 จะถูกกระตุ้นให้กระโดดจากวงโคจรที่มีพลังงานต่ำสู่วงโคจรที่มีพลังงานสูงกว่า หรือ ไปสู่สถานะกระตุ้น (excited state) หรือ E_1 การเปลี่ยนชั้นพลังงานของอะตอมที่เกิดขึ้นโดยการดูดกลืนโฟตอนแสงเป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่าการดูดกลืนแสง (light absorption) แต่อะตอมที่อยู่ในชั้นพลังงาน E_1 จะไม่เสถียร เมื่อเวลาผ่านไปอย่างรวดเร็วอะตอมนั้นจะกลับมามีอยู่ในชั้นพลังงาน E_0 เช่นเดิม โดยปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมา ซึ่งพลังงานเหล่านี้มักอยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือ โฟตอน ที่มีพลังงานเท่ากับ $E_1 - E_0$ ปรากฏการณ์ปลดปล่อยโฟตอนโดยลักษณะเช่นนี้เรียกว่าเป็นการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง (spontaneous emission) แสดงดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 การเปลี่ยนชั้นพลังงานของอะตอมแบบดูดกลืนแสง (ก) และเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง (ข)

แต่การเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น (stimulated emission) ซึ่งเป็นกลไกหลักของเลเซอร์ เริ่มต้นจากการดูดกลืนแสง เพื่อให้อะตอมขึ้นไปอยู่ที่ชั้นพลังงานสูงเช่นกัน แต่แทนที่จะให้อะตอมตกลงมาเอง เมื่อเวลาผ่านไปจะมีการฉายแสง หรือยิงโฟตอนเข้าไปในอะตอมที่มีพลังงานเท่ากับ ผลต่างของชั้นพลังงานทั้งสอง ($E_1 - E_0$) เพื่อให้อิเล็กตรอนคายพลังงานเร็วกว่าปกติ และพลังงานที่ปล่อยออกมามีค่าเท่ากับ $E_1 - E_0$ พลังงานโฟตอนที่ถูกยิงเข้าไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนคายพลังงานกับพลังงานที่ให้อิเล็กตรอนคายออกมาจึงมีค่าพลังงานเท่ากัน (พลังงานโฟตอนที่ฉายเข้าไปไม่ถูกดูดกลืน เมื่อกระทบกับอิเล็กตรอน) มีความถี่เดียวกัน เคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกัน สามารถที่จะรวมกันในลักษณะที่เสริมกันได้ ทำให้ได้คลื่นรวมที่มีขนาดโตขึ้น เกิดเป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่า การขยาย

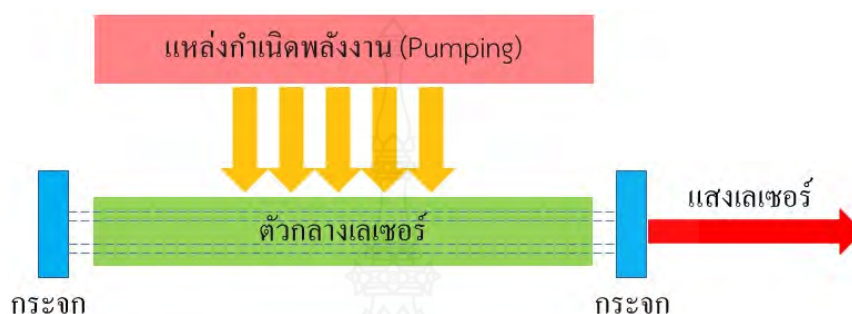
สัญญาณแสง (light amplification) ถ้าสามารถทำให้เกิดการขยายสัญญาณแสงในลักษณะนี้กับอะตอมเป็นจำนวนมาก ๆ ได้ก็จะทำให้ได้สัญญาณแสงที่มีความเข้มสูงออกมา

ปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งในการที่จะทำให้เกิดการขยายแสงโดยการกระตุ้นได้มาก ๆ คือการทำให้มีประชากรอะตอมในสถานะกระตุ้นมาก ๆ ซึ่งในธรรมชาติเป็นไปได้ จึงต้องมีการหาวิธีการที่จะทำให้ประชากรอะตอมในสถานะกระตุ้น E_1 มากกว่าสถานะพื้น E_0 ปรากฏการณ์ที่ทำให้จำนวนประชากรอะตอมในชั้นพลังงานสูงมีมากกว่าประชากรในชั้นพลังงานต่ำ เรียกว่า ประชากรผกผัน (population inversion) ในทางปฏิบัติสามารถทำให้เกิดประชากรผกผันได้โดยการใช้พลังงานจากภายนอกปริมาณหนึ่งทีเพียงพอจะทำให้ประชากรอะตอมมีสถานะเปลี่ยนไปจากสถานะพื้น E_0 ไปยังสถานะกระตุ้น E_1 และทำให้การกระตุ้นประชากรอะตอมในสถานะกระตุ้นให้ตกกลับมายังสถานะพื้นเพื่อให้ประชากรอะตอมปลดปล่อยโฟตอนแสงเป็นจำนวนมากออกมา อย่างไรก็ตามการกระตุ้นประชากรอะตอมเพื่อให้มีการปล่อยแสงเพียงครั้งเดียวยังไม่สามารถทำได้แสงเลเซอร์ออกมาเนื่องจากในความเป็นจริงในขณะที่เกิดการปล่อยแสงโดยการถูกกระตุ้นก็จะมีเกิดการดูดกลืนแสงเกิดขึ้นด้วย โดยประชากรอะตอมในสถานะพื้น ทำให้ความเข้มแสงที่ได้มีปริมาณลดลง ดังนั้น เพื่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของความเข้มของสัญญาณแสง จึงต้องทำให้เกิดปรากฏการณ์ปล่อยแสง โดยการถูกกระตุ้นอย่างต่อเนื่อง โดยการทำให้โฟตอนแสงที่ได้จากการปลดปล่อยของประชากรอะตอมมากระตุ้นให้เกิดการปลดปล่อยแบบถูกกระตุ้นซ้ำแล้วซ้ำอีก จนกระทั่งสัญญาณแสงมีความเข้มสูงขึ้นจนถึง จุดเลสซิง (lasing point) หรือจุดออสซิลเลตของเลเซอร์ (laser oscillating point) แสงที่ได้ออกมาจึงมีสมบัติเป็นแสงเลเซอร์

2.12.1 องค์ประกอบของเลเซอร์

จำนวนโฟตอนที่เกิดขึ้นจากการเปล่งแสงแบบกระตุ้นนี้ จะต้องมีมากพอจึงจำเป็นต้องมีการขยายสัญญาณแสง โดยให้แสงวิ่งกลับไปกลับมา ผ่านเนื้อวัสดุเลเซอร์หลาย ๆ ครั้ง โดยใช้กระจก 2 ชิ้น ที่วางขนานกันที่ปลายทั้งสอง เพื่อสะท้อนแสงกลับไปมา กระจก 2 ชิ้น ที่ขนานกันนี้เรียกว่า แควิตี้แสง (optical cavity) ซึ่งทำหน้าที่ขยายสัญญาณแสง เพื่อให้มีความเข้มสูง จนเกิดเกน (gain) เอาชนะความสูญเสีย (loss) ของระบบ และได้ลำแสงเลเซอร์พุ่งออกทางด้านกระจก ที่มีการสะท้อนแสงไม่ถึง 100% เลเซอร์โดยทั่วไปประกอบด้วยองค์ประกอบสำคัญ 3 ส่วน แสดงดังภาพที่ 2.10 ซึ่งตัวกลางเลเซอร์ (laser medium) เป็นวัสดุที่ถูกกระตุ้นแล้วให้แสงเลเซอร์ออกมา ซึ่งอาจเป็นแก๊สของแข็ง ของเหลวหรือสารกึ่งตัวนำ ส่วนต่อไปคือแควิตี้แสง (optical cavity) เป็นส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดเลเซอร์ที่ทำให้เกิดการปล่อยแสงแบบถูกกระตุ้นซ้ำ ๆ จนถึงจุดเลสซิง ส่วนสุดท้ายคือ

แหล่งกำเนิดพลังงาน (energy source) เป็นตัวกระตุ้นให้อะตอมอยู่ในสถานะที่เป็นประชากรผกผัน (population inversion)



ภาพที่ 2.10 โครงสร้างพื้นฐานของเครื่องกำเนิดเลเซอร์

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

2.12.2 ชนิดของเลเซอร์

เลเซอร์แบ่งตามลักษณะของตัวกลางเลเซอร์ได้ 4 ประเภท คือ

1. Gas Laser: สารตัวกลางเลเซอร์มีลักษณะเป็นก๊าซ เช่น CO₂ Laser, Argon Laser, Xenon Laser, He-Ne Laser
2. Solid State Laser: ใช้สารตัวกลางเลเซอร์ที่เป็นแท่งผลึกแข็ง เช่น Nd:YAG Laser, Ruby Laser
3. Dye Laser: สารตัวกลางมีลักษณะเป็นของเหลว เช่น Rhodamin 6G Laser
4. Semiconductor Laser: เป็นเลเซอร์ที่ใช้สารตัวกลางเลเซอร์เป็นสารกึ่งตัวนำ เช่น Diode Laser ชนิดต่าง ๆ

2.12.3 ประโยชน์ของแสงเลเซอร์

ด้วยคุณสมบัติเฉพาะตัวที่หลากหลายของเลเซอร์ จึงทำให้มีการนำมาใช้ประโยชน์ได้มากมายหลายด้าน (เทคโนโลยีแห่งแสง, 2563: ออนไลน์) เช่น

1. ด้านการแพทย์ แพทย์นำเอาเลเซอร์ไปใช้ในกระบวนการผ่าตัดมากขึ้น ดังที่เราเริ่มเห็นได้จากโรงพยาบาลที่มีชื่อเสียงต่าง ๆ เนื่องจากมีความแม่นยำในการทำงานสูง ดีกว่าการผ่าตัดแบบธรรมดา และยังใช้สำหรับการผ่าตัดในจุดเล็ก ๆ ที่เข้าถึงได้ยาก เช่น ดวงตา สมอง และการผ่าตัดเกี่ยวกับเส้นประสาท ช่วยให้ผู้ป่วยไม่ได้รับผลข้างเคียงภายหลังจากการใช้เลเซอร์ การผ่าตัดเป็นไปด้วยดี ผลมีขนาดเล็ก ระยะเวลาพักฟื้นสั้นลง
2. ด้านอุตสาหกรรม เลเซอร์จะถูกนำไปใช้ประโยชน์สำหรับการ ตัด เชื่อม และเจาะชิ้นงานต่าง ๆ ที่เน้นความละเอียดแม่นยำสูง โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จะมีความสำคัญเป็นอย่างมากในการผลิตไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมีขนาดเล็ก
3. ด้านการทหาร ในด้านการทหารเลเซอร์ถูกนำไปใช้สำหรับชี้เป้าหมายของจรวดนำวิถี เครื่องบิน หรือรถถัง เพื่อการโจมตีเป้าหมายให้เกิดความแม่นยำมากขึ้น โดยลดความเสียหายที่จะเกิดกับบริเวณข้างเคียงอีกทางหนึ่ง
4. ด้านโทรคมนาคม นำเอาเลเซอร์มาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพเป็นอย่างมาก ซึ่งจะทำให้หน้าทีในการส่งสัญญาณผ่านใยแก้วนำแสง ถ่ายทอดสัญญาณโทรทัศน์และโทรศัพท์ได้ดี รวมถึงการส่งข้อมูลข่าวสารต่าง ๆ ที่มีจำนวนมาก โดยไม่ก่อให้เกิดสัญญาณรบกวน แอมป์ใยแก้วนำแสงเพียง 1 เส้นสามารถบรรจุข้อมูลได้นับพันคู่เลยทีเดียว เรียกได้ว่าสามารถจุข้อมูลในปริมาณมาก ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
5. ด้านดาราศาสตร์ แสงเลเซอร์จะช่วยทำให้เกิดความเข้าใจในสภาพอากาศที่มีความแปรปรวนได้ดี ซึ่งจะช่วยปรับโฟกัสของกล้องโทรทัศน์ที่ใช้ดูดาวให้มองเห็นได้ชัดเจนมากขึ้น

2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Brahmachary et al. (2014: 6-14) ได้ทำการเตรียมแก้ว และตรวจสอบสมบัติทางแสงของ แก้วซิงค์อะลูมิเนียมโซเดียมฟอสเฟต (ZANP) ที่เจือด้วย Nd^{3+} และ Pr^{3+} จากการวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) พบว่าตัวอย่างแก้วเป็นวัสดุอสัณฐาน นอกจากนี้การศึกษาหมู่งักซัน โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงอินฟราเรด (FTIR) และ Raman เผยให้เห็นว่าหน่วยโครงสร้าง PO_4 ที่ส่งผลต่อตัวอย่างแก้ว จากการศึกษาการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-900 นาโนเมตร สำหรับ Nd^{3+} พบการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานจากสถานะพื้น $^4\text{I}_{9/2}$ ไปยังสถานะกระตุ้นต่าง ๆ ดังนี้

$^2P_{1/2}$, $^4G_{11/2}$, $^2K_{5/2}+^2G_{9/2}+^2D_{3/2}$, $^4G_{9/2}$, $^2K_{13/2}+^4G_{7/2}$, $^2H_{11/2}$, $^4F_{9/2}$, $^4S_{3/2}+^4F_{7/2}$, $^4F_{5/2}+^2H_{9/2}$ และ $^4F_{3/2}$ ซึ่งแถบการดูดกลืนแสงอยู่ความยาวคลื่น 430, 460, 475, 512, 524, 582, 627, 683, 746, 801 และ 873 นาโนเมตร ตามลำดับ สำหรับการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-1700 นาโนเมตร ของตัวอย่างแก้วที่เจือด้วย Pr^{3+} พบการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานจากสถานะพื้น 3H_4 ไปยังสถานะกระตุ้น 3P_2 , 3P_1 , 3P_0 , 1D_2 , 3F_4 และ 3F_3 ที่ความยาวคลื่น 443, 467, 481, 591, 1447 และ 1529 นาโนเมตร ตามลำดับ ทฤษฎี Judd-Ofelt (J-O) ได้นำมาใช้เพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ความเข้ม Ω และพารามิเตอร์คุณลักษณะทางเลเซอร์ พบว่าแนวโน้มของพารามิเตอร์เป็นดังนี้ $\Omega_6 > \Omega_2 > \Omega_4$ และ $\Omega_4 > \Omega_6 > \Omega_2$ สำหรับตัวอย่างแก้วที่เจือด้วย Nd^{3+} และ Pr^{3+} ตามลำดับ จากสเปกตรัมการเปล่งแสง Nd^{3+} และ Pr^{3+} พบความเข้มในการเปล่งแสงที่การเปลี่ยนระดับชั้นพลังงาน $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ และ $^3P_0 \rightarrow ^3H_4$ ตามลำดับ โดยเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นจาก 0.5-2.0 ร้อยละโดยโมลและลดลงที่ 2.5 ร้อยละโดยโมล สำหรับทั้งสองตัวอย่างที่เจือด้วย Nd^{3+} และ Pr^{3+} นอกจากนี้ยังพบว่าที่ระดับชั้นพลังงาน $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ (Nd^{3+}) และ $^3P_0 \rightarrow ^3H_4$ (Pr^{3+}) นี้ มีค่าสัดส่วนการเปล่งแสงและภาคตัดขวางของการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นที่สูงสำหรับทุกความเข้มข้นของตัวอย่างแก้ว ดังนั้นช่วงของการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานเหล่านี้อาจเป็นประโยชน์สำหรับการประยุกต์ใช้เป็นเลเซอร์ที่ความยาวคลื่น 1060 และ 493 นาโนเมตร ของ Nd^{3+} และ Pr^{3+} ไอออนตามลำดับ

El-Maaref et al. (2019: 253-259) ได้เตรียมตัวอย่างแก้วจากสูตร $(50-x)P_2O_5-25ZnO-25Na_2O-xNd_2O_3$ โดยที่ x เท่ากับ 0.00, 0.50, 1.00, 2.00 และ 3.00 ร้อยละโดยโมล เพื่อศึกษาโครงสร้างและสมบัติทางแสงของตัวอย่างแก้ว จากการศึกษาการวิเคราะห์ XRD พบว่าตัวอย่างแก้วเป็นวัสดุแบบ amorphous จากการศึกษาความหนาแน่น (density) และปริมาตรเชิงโมล (molar volume) พบว่าความหนาแน่นของตัวอย่างแก้วมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาตรเชิงโมลมีค่าลดลงตามความเข้มข้นของ Nd_2O_3 ที่เพิ่มขึ้น โดยสามารถอธิบายได้ว่า Nd_2O_3 เข้าไปในโครงข่ายแก้วแล้วทำให้เกิดการเชื่อมกันของออกซิเจน (bridging oxygens: BOs) ภายในโครงข่ายของแก้วมากยิ่งขึ้น จึงส่งผลให้โครงข่ายแก้วเกิดการอัดแน่น (compactness) มากขึ้นเช่นกัน จึงทำให้ค่าของปริมาตรเชิงโมลลดลง จากการศึกษาการดูดกลืนแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ต และแสงที่ตามองเห็น (UV-Visible) พบพีกการดูดกลืนทั้งหมด 9 พีก ที่ความยาวคลื่น 330, 355, 430, 475, 525, 580, 630, 685 และ 745 นาโนเมตร สอดคล้องกับการเปลี่ยนชั้นพลังงานจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้นต่าง ๆ ดังนี้ $^4D_{7/2}+^2I_{13/2}+^2L_{15/2}$, $^4D_{1/2}+^2I_{11/2}+^4D_{5/2}+^4D_{3/2}$, $^2D_{5/2}+^2P_{1/2}$, $^4G_{11/2}+^2G_{9/2}+^2D_{3/2}+^2K_{15/2}$, $^4G_{9/2}+^2K_{13/2}$, $^2G_{7/2}+^4G_{5/2}$, $^2H_{11/2}$, $^4F_{9/2}$ และ $^4S_{3/2}+^4F_{7/2}$ ตามลำดับ โดยที่ความยาวคลื่น 580

นาโนเมตร มีความเข้มในการดูดกลืนแสงมากที่สุด และจากการศึกษาวิเคราะห์ Judd-Ofelt (J-O) พบว่าทุกตัวอย่าง มีแนวโน้มของ Ω เป็นดังนี้ $\Omega_6 > \Omega_2 > \Omega_4$ ยกเว้นตัวอย่างแก้วที่เจือความเข้มข้นของ Nd_2O_3 ที่ 0.5 ร้อยละโดยโมล นอกจากนี้จากการศึกษาช่วงเวลาที่ใช้ในการเปล่งแสง (lifetime) พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ Nd_2O_3 จนถึง 2.00 ร้อยละโดยโมล ซึ่งมีค่าระหว่าง 0.838 ถึง 1.598 มิลลิวินาที (ms)

Mahmoud (2010: 4746-4749) ได้ศึกษาสเปกตรัมของ Nd^{3+} ในแก้วแคดเมียมฟอสเฟต โดยทฤษฎีของ J-O ได้ถูกนำมาวิเคราะห์ศักยภาพในการนำแก้วไปประยุกต์ใช้เป็นเลเซอร์ และวัสดุขยายสัญญาณแสง ค่าตัวแปร $\Omega_2, \Omega_4, \Omega_6$ ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 4.80×10^{-20} , 6.18×10^{-20} และ 7.14×10^{-20} เซนติเมตร² (cm^2) ตามลำดับ โดยค่าองค์ประกอบคุณภาพเชิงสเปกตรัม (Quality factor: Ω_4/Ω_6) มีค่าเท่ากับ 0.86 ผลจากการศึกษาพบว่า การเปลี่ยนระดับชั้นพลังงาน $^4\text{F}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{11/2}$ ของ Nd^{3+} ซึ่งทำให้เกิดการเปล่งแสงที่มีความยาวคลื่น 1056 นาโนเมตร มีศักยภาพสูงสุดต่อการไปประยุกต์ใช้ในเลเซอร์ เมื่อทำการกระตุ้นตัวอย่างแก้วด้วยแสงที่มีความยาวคลื่น 488 นาโนเมตร พบว่าทำให้แก้วเกิดการเปล่งแสง ออกมาทั้งหมด 3 ความยาวคลื่น ได้แก่ 541 (เขียว), 601 (ส้ม) และ 677 (แดง) นาโนเมตร ซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงาน $^4\text{G}_{7/2} \rightarrow ^4\text{I}_{9/2}$, $^4\text{G}_{7/2} \rightarrow ^4\text{I}_{11/2}$ และ $^4\text{G}_{7/2} \rightarrow ^4\text{I}_{13/2}$ ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์สมบัติการเปล่งแสงในงานวิจัยนี้สามารถนำไปพัฒนาการใช้ระบบแก้วในงานทางด้านหน้าจอแสดงผล เลเซอร์ และอุปกรณ์บันทึกด้วยแสงได้เป็นอย่างดี

Devarajulu et al. (2022: 24550-24559) ได้ทำการพัฒนาเทคโนโลยีเลเซอร์ ทำให้เกิดความต้องอย่างมากสำหรับวัสดุที่เก็บแสงที่มีประสิทธิภาพสูง ในงานวิจัยนี้คณะที่วิจัยของเขาได้ทำการเตรียมแก้วที่เจือด้วย Yb^{3+} เพียงอย่างเดียวและแก้วออกซิฟลูออไรด์ที่เติม SiO_2 ที่เจือด้วย $\text{Yb}^{3+}/\text{Nd}^{3+}$ ได้ศึกษาการดูดกลืนแสง และอินฟราเรดใกล้ (NIR) และ up-conversion (UC) รวมถึงเวลาการสลายตัว ภายใต้การกระตุ้นด้วยเลเซอร์ไดโอด (LD) 808 นาโนเมตร พบแถบการเปล่งแสง NIR 4 แถบ เช่น ($\text{Nd}^{3+}: ^4\text{F}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{9/2}$, $\text{Yb}^{3+}: ^2\text{F}_{5/2} \rightarrow ^2\text{F}_{7/2}$, $\text{Nd}^{3+}: ^4\text{F}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{11/2}$ และ $\text{Nd}^{3+}: ^4\text{F}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{13/2}$) ในแก้วที่เจือด้วย $\text{Yb}^{3+}/\text{Nd}^{3+}$ ความสามารถในการกระตุ้น เพื่อให้เกิดแสงเลเซอร์ในปริมาณที่มาก โดยใช้พลังงานต่ำในช่วง NIR [NIR emission cross-sections] (σ_{emi}) stimulated, ($\sigma_{\text{emi}}^{\text{M}}$) จากทฤษฎี Mc-cumber ถูกคำนวณจากการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงาน $^2\text{F}_{5/2} \rightarrow ^2\text{F}_{7/2}$ (~ 1030 นาโนเมตร) ของ Yb^{3+} ไอออน พบว่า σ_{emi} สูงที่สุดอยู่ที่ $26.27 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ สำหรับการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานของ $\text{Yb}^{3+}: ^2\text{F}_{5/2} \rightarrow ^2\text{F}_{7/2}$ ในแก้ว N2 สเปกตรัมการเปล่งแสง UC ภายใต้การ

กระตุ้นด้วยเลเซอร์ไดโอด (LD) ที่ 980 นาโนเมตร พบพีคที่ความยาวคลื่น 500, 536, 595, 610 และ 664 นาโนเมตร จากการเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงาน $^4G_{9/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$, $^4G_{7/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$, $^4G_{7/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$, $^4G_{5/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ และ $^4G_{9/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ ตามลำดับ การวิเคราะห์เวลาการสลายตัว สำหรับการเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงานของ Yb^{3+} : $^2F_{5/2} \rightarrow ^2F_{7/2}$ (~ 1030 นาโนเมตร) และ Nd^{3+} : $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ (~ 1057 นาโนเมตร) ที่กระตุ้นด้วย 808 นาโนเมตร ของ LD พบว่ามีการถ่ายโอนพลังงาน (ET) จาก Nd^{3+} ถึง Yb^{3+} ในแก้วปัจจุบัน



บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเตรียมแก้วตัวอย่างบอเร็ตที่เจือด้วย Nd^{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 ซ้อนตักสารเคมี
- 1.6 หน้ากากป้องกันสารเคมี
- 1.7 ถุงมือสำหรับขังสารเคมี
- 1.8 อะลูมิเนียมฟอยล์
- 1.9 เครื่องชั่งความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

- 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 Neodymium Oxide (Nd_2O_3) ความบริสุทธิ์ 99.50%

3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.2.1. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การเตรียมแก้วตัวอย่างมีวิธีการดำเนินงานวิจัย แสดงดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 แผนผังแสดงวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.2.2 การเตรียมแก้วตัวอย่าง

3.2.2.1 การออกแบบสูตรองค์ประกอบทางเคมีของแก้ว

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบสูตรแก้วออกเป็น 1 ชุดการทดลอง ได้แก่ 10Li₂O-10Na₂O-10K₂O-(70-x)B₂O₃-xNd₂O₃ ร้อยละโดยโมล โดยที่ x มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.0, 0.1, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 mol% ในการเตรียมสารผู้วิจัยได้ใช้ H₃BO₃ แทน B₂O₃ เนื่องจากหาได้ง่ายและมีราคาที่ถูกกว่า โดยอาศัยการคำนวณตัวแปร Gravimetric และเมื่อถูกความร้อนจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีในสมการที่ (3.1) ดังต่อไปนี้



ตารางที่ 3.1 ปริมาณสารเคมีที่ต้องชั่งสำหรับการหลอมแก้ว $\text{Li}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3$ ที่เจือด้วย Nd_2O_3 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

สัญลักษณ์	x mol%	$10\text{Li}_2\text{O}-10\text{Na}_2\text{O}-10\text{K}_2\text{O}-(70-x)\text{B}_2\text{O}_3-x\text{Nd}_2\text{O}_3$				
		Li_2O	Na_2O	K_2O	B_2O_3	Nd_2O_3
0.0LNKBND	0.0	0.4437	0.9204	1.3988	7.2370	0.0000
0.1LNKBND	0.1	0.4420	0.9168	1.3933	7.1982	0.0498
0.5LNKBND	0.5	0.4351	0.9025	1.3716	7.0457	0.2450
1.0LNKBND	1.0	0.4268	0.8853	1.3455	6.8617	0.4806
1.5LNKBND	1.5	0.4189	0.8688	1.3203	6.6846	0.7075
2.0LNKBND	2.0	0.4112	0.8528	1.2961	6.5140	0.9260

3.2.2.2 การชั่งสารและการหลอมแก้ว

โดยกระบวนการจะแสดงดังภาพที่ 3.2 ซึ่งจะอธิบายเป็นขั้นตอนดังนี้

1. คำนวณสารเคมีจากสูตรในข้างต้น โดยกำหนดให้สารเคมีทั้งหมดมีมวล รวม 10 กรัม
2. ชั่งสารเคมีต่าง ๆ ตามปริมาณที่คำนวณได้ใส่ลงในเบ้าพอร์ซเลน ผสมสารเคมีให้เป็น เนื้อเดียวกัน ปิดฝาด้วยแผ่นพอยล์ และนำไปไว้ในโถดูดความชื้น
3. นำสารเคมีที่เตรียมได้มาหลอมด้วยวิธีการหลอมแล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (melt quenching technique) ในเตาหลอมไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ $1,200^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ต่อมา นำแก้วที่หลอมได้เทลงในแม่พิมพ์แกรไฟต์รูปทรงสี่เหลี่ยมที่อุณหภูมิห้อง
4. หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปอบในเตาไฟฟ้าทันที ที่อุณหภูมิ 500°C เป็น เวลา 3 ชั่วโมง เพื่อลดความเครียดที่เกิดขึ้นในเนื้อแก้ว และทิ้งให้เย็นตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง
5. เมื่อได้ตัวอย่างชิ้นงานแล้วให้ตัดและขัดให้เหมาะสมต่อการวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ต่อไป

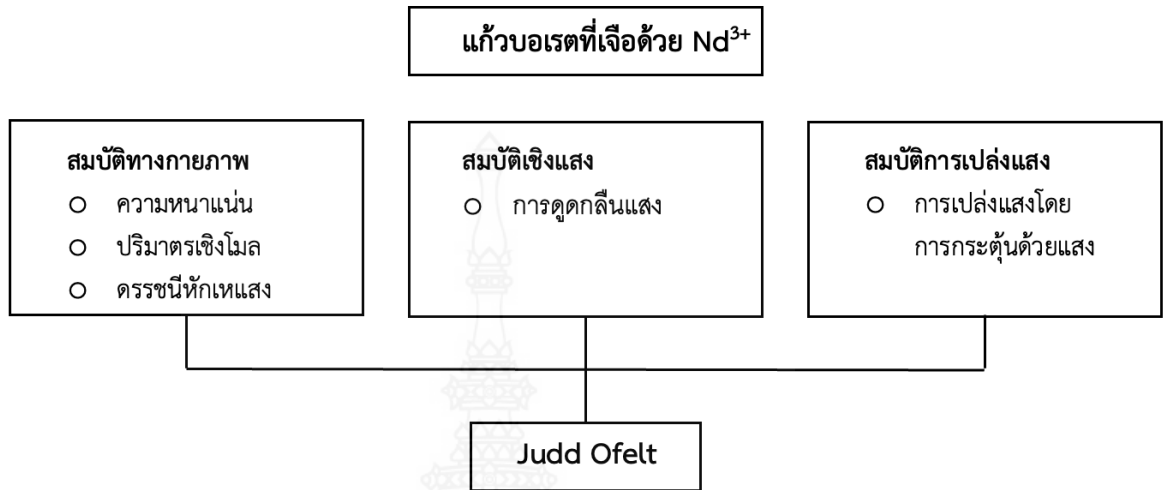


ภาพที่ 3.2 แผนภาพกระบวนการเตรียมแก้วตัวอย่าง

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูลการวิจัย

3.3.1 แผนผังการวิเคราะห์ข้อมูล

กระบวนการวิเคราะห์ที่เกี่ยวข้องของแสดงดังแผนผังในภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 แผนผังการวิเคราะห์ข้อมูล

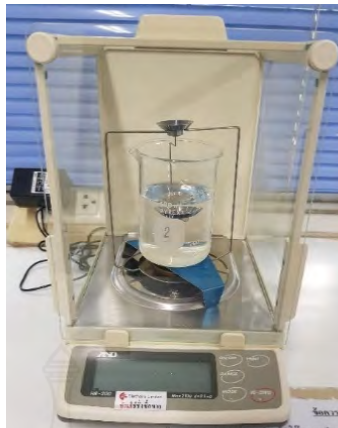
3.3.2 ความหนาแน่นและปริมาตรเชิงโมล

การวิเคราะห์ความหนาแน่น (ρ) ของแก้วตัวอย่างที่เตรียมได้นั้น ผู้วิจัยได้ใช้หลักการของอาร์คิมิดีส (Archimedes principle) โดยนำชิ้นงานตัวอย่างมาชั่งน้ำหนักในอากาศ (w_a) และชั่งน้ำหนักในน้ำ (w_b) ซึ่งอาศัยชุดอุปกรณ์ในภาพที่ 3.4 หลังจากนั้น คำนวณหาค่าความหนาแน่นของแก้วได้จากสมการที่ (3.2)

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

เมื่อ

w_a	คือ	น้ำหนักในอากาศ (g)
w_b	คือ	น้ำหนักในน้ำ (g)
$w_a - w_b$	คือ	น้ำหนักที่หายไปในน้ำ (g)
ρ	คือ	ความหนาแน่นของวัตถุ (g /cm ³)
ρ_w	คือ	ความหนาแน่นของน้ำมีค่าเท่ากับ 1 g /cm ³



ภาพที่ 3.4 เครื่องวัดความหนาแน่น (Densitometer) รุ่น AND HR-200

สำหรับค่าปริมาตรเชิงโมล (V_M) นั้น สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของแก้วกับปริมาตรของโมล ดังสมการที่ (3.3)

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

เมื่อ V_M คือ ปริมาตรเชิงโมลของแก้วตัวอย่าง หน่วยเป็น cm^3/mol
 M_T คือ น้ำหนักโมเลกุลรวมของแก้วตัวอย่าง หน่วยเป็น g/mol
 ρ คือ ความหนาแน่นของแก้วตัวอย่าง หน่วยเป็น g/cm^3

3.3.3 วิธีการวัดค่าดัชนีหักเหแสง

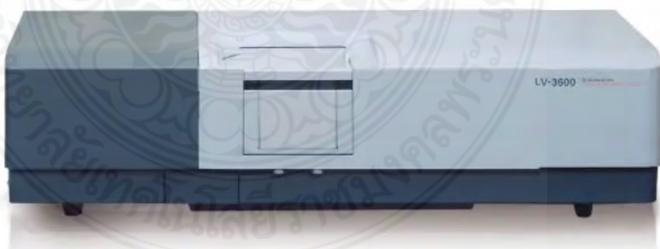
การวิเคราะห์ค่าดัชนีหักเหแสงของแก้วตัวอย่างโดยใช้เครื่องวัดดัชนีหักเหแสง ในภาพที่ 3.5 โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงโซเดียมที่มีความยาวคลื่น 589.3 nm อุณหภูมิ 24.5 °C จากนั้นหยดสารละลายโมโนโบรโมแนพทาเลน (1-bromonaphthalene $\text{C}_{10}\text{H}_7\text{Br}$) ประมาณ 1-2 หยดลงบนแผ่นกระจกวางตัวอย่างเพื่อป้องกันการเกิดช่องว่างระหว่างชิ้นตัวอย่างกับปริซึม หลังจากนั้นวางแก้วตัวอย่างลงบนแผ่นกระจกและส่องดูแก้วผ่านเลนส์สำหรับอ่านค่าแล้วจะเห็นเป็นแถบมืดและแถบสว่าง ปรับให้แถบสว่างอยู่ด้านบนแถบมืดอยู่ด้านล่างแล้วบันทึกค่าดัชนีหักเห นำค่าดัชนีหักเหที่บันทึกได้มาสร้างกราฟ



ภาพที่ 3.5 เครื่องวัดค่าดรรชนีหักเห รุ่น DR-M2

3.3.4 การดูดกลืนแสง

สำหรับการวิเคราะห์การดูดกลืนแสงของแก้วตัวอย่างนั้น ได้มีการศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วงอัลตราไวโอเลต (ultraviolet) แสงที่ตามองเห็น (visible light) และช่วงอินฟราเรด-ใกล้ (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

3.3.5 การเปล่งแสงของแก้ว

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



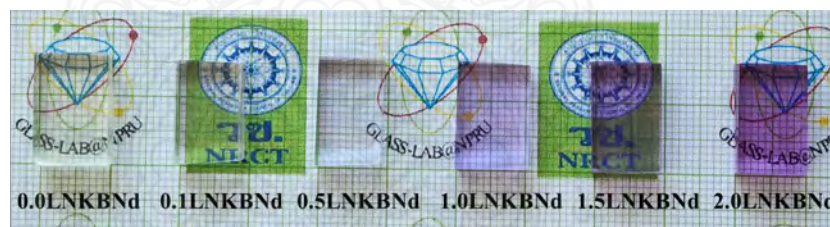
ภาพที่ 3.7 เครื่อง Fluorescence Spectrophotometer รุ่น Cary Eclipse

บทที่ 4 ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมแก้วตัวอย่างบอเร็ตที่เจือด้วย Nd^{3+} ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เพื่อหา ระบบแก้วที่เหมาะสมสำหรับการเจือธาตุแลนทาไนด์ สำหรับเป็นตัวกลางเลเซอร์ โดยศึกษาสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความหนาแน่น ปริมาตรเชิงโมล ศึกษาสมบัติทางแสง ได้แก่ ดรรชนีหักเหของแสง การดูดกลืนแสง การเปล่งแสง และศึกษาศักยภาพสำหรับเป็นตัวกลางเลเซอร์ของตัวอย่างแก้ว โดยทฤษฎีของ Judd-Ofelt (J-O) ซึ่งผลการวิจัยมีดังนี้

4.1 ลักษณะของแก้วตัวอย่างที่ได้จากการหลอม

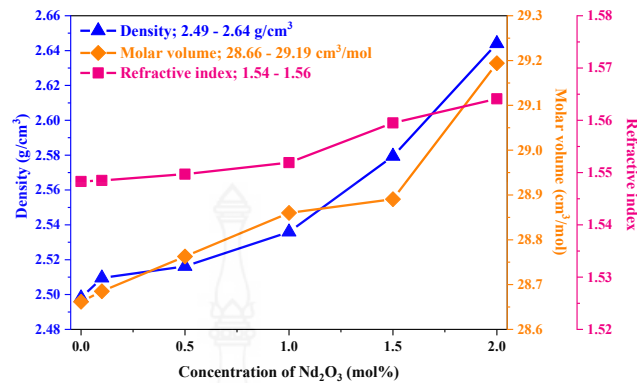
แก้วตัวอย่างบอเร็ตที่เจือด้วย Nd^{3+} ที่ได้จากการหลอมโดยใช้สูตร $10\text{Li}_2\text{O}-10\text{Na}_2\text{O}-10\text{K}_2\text{O}-(70-x)\text{B}_2\text{O}_3-x\text{Nd}_2\text{O}_3$ โดยที่ x เท่ากับ 0.0, 0.1, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 mol% ตามลำดับ (LNKBNd) แสดงดังภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 ลักษณะของแก้วตัวอย่าง LNKB ที่เจือด้วย Nd_2O_3

4.2 ผลความหนาแน่น ปริมาตรเชิงโมล และดรรชนีหักเหของแสง

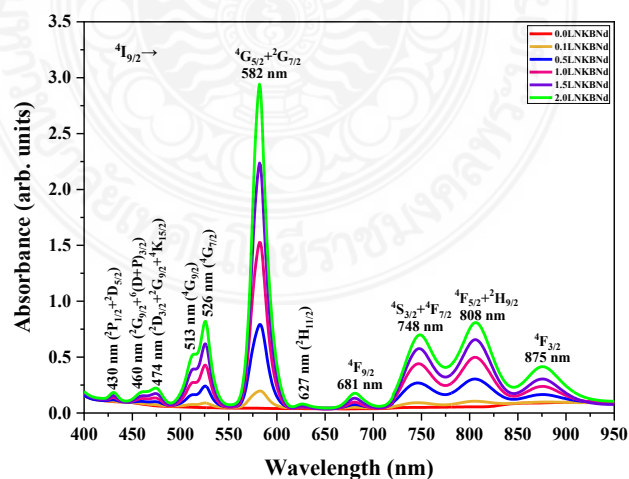
ค่าความหนาแน่นของแก้วตัวอย่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ Nd_2O_3 ที่เพิ่มขึ้น โดยค่าความหนาแน่นมีค่าอยู่ในช่วง 2.49 g/cm^3 ถึง 2.64 g/cm^3 จากการทดลองพบว่า ค่าดรรชนีหักเหของตัวอย่างแก้วมีค่าอยู่ระหว่าง 1.54 ถึง 1.56 โดยค่าดรรชนีหักเหมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของ Nd_2O_3 แสดงดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น ปริมาตรเชิงโมลและดัชนีหักเหของแก้วตัวอย่างกับปริมาณความเข้มข้นของ Nd_2O_3

4.3 ผลการดูดกลืนแสง

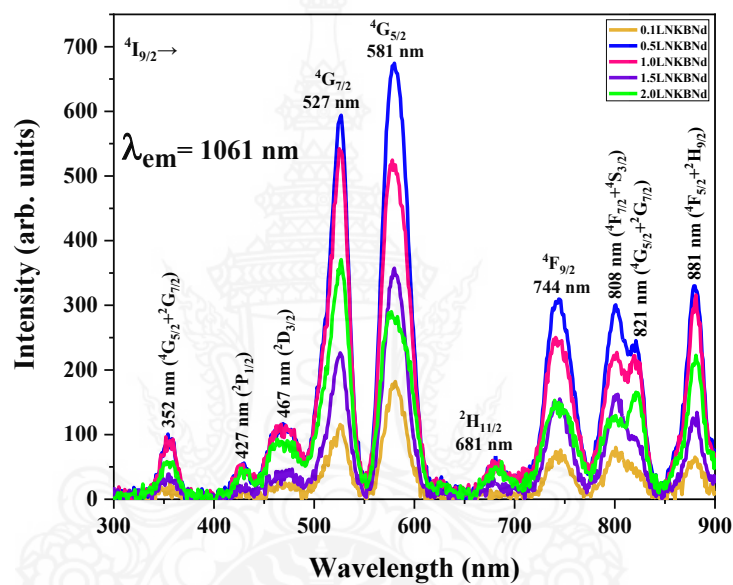
สเปกตรัมการดูดกลืนแสง (absorption spectra) ของแก้ว LNKB ที่เจือด้วยความเข้มข้นของ Nd_2O_3 ที่มีปริมาณความเข้มข้น 0.0, 0.1, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 mol% พบว่าแก้วตัวอย่างมีการดูดกลืนแสงตั้งแต่ความยาวคลื่นในช่วงแสงที่ตามองเห็นไปจนถึงช่วงอินฟราเรดใกล้ ซึ่งประกอบไปด้วยแสงที่ความยาวคลื่น 430, 460, 474, 513, 526, 582, 627, 681, 748, 808 และ 875 นาโนเมตร แสดงดังภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของแก้วตัวอย่าง LNKB ที่เจือด้วย Nd_2O_3 แต่ละความเข้มข้น

4.4 ผลการกระตุ้นแสงของ Nd^{3+}

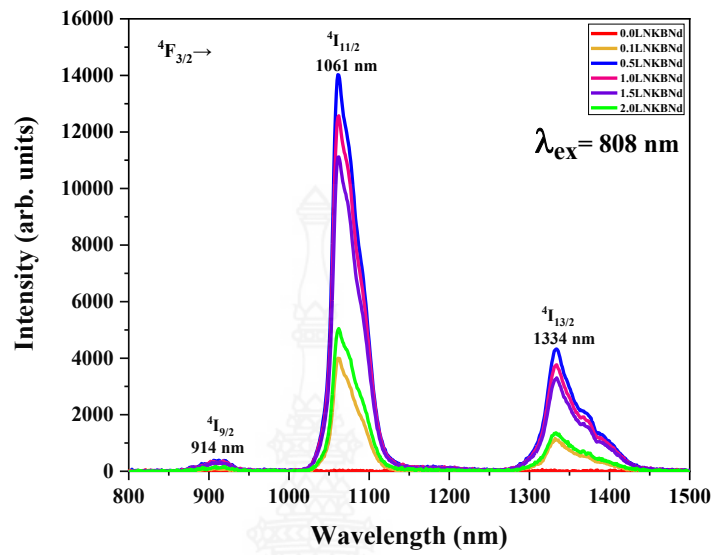
จากสเปกตรัมการกระตุ้นแสง (excitation spectra) ของแก้ว LNKB ที่เจือด้วยความเข้มข้นของ Nd_2O_3 ที่มีปริมาณความเข้มข้น 0.0, 0.1, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 mol% ที่สามารถเปล่งแสงความยาวคลื่น 1061 นาโนเมตรได้โดยการวัดสเปกตรัมการกระตุ้น แสดงดังภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.4 สเปกตรัมการกระตุ้นแสงของแก้วตัวอย่าง LNKB ที่เจือด้วย Nd_2O_3 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

4.5 ผลการเปล่งแสง

จากการศึกษาสเปกตรัมการเปล่งแสงของ Nd^{3+} เติมในแก้ว LNKB มีการดูดกลืนแสงความยาวคลื่น 808 นาโนเมตร ได้ดีที่สุด ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำแสงความยาวคลื่นดังกล่าวไปกระตุ้นแก้วตัวอย่าง เพื่อศึกษาสเปกตรัมการเปล่งแสง ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 สเปกตรัมการเปล่งแสงจากการกระตุ้นด้วยแสงของแกวตัวอย่าง LNKB ที่เจือด้วย Nd_2O_3 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

บทที่ 5 สรุป อภิปรายผล

5.1 สรุปผล

จากการศึกษาแก้ว $\text{Li}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3$ ที่เจือ Nd_2O_3 ด้วยวิธีการหลอมแล้วทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว พบว่า ค่าความหนาแน่น ปริมาตรเชิงโมลและดรรชนีหักเหของแก้วเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ Nd_2O_3 ที่มากขึ้น จากการวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนแสง สเปกตรัมการถูกกระตุ้น และสเปกตรัมการเปล่งแสง พบว่า แก้วมีการดูดกลืนแสงในช่วงแสงที่ตามองเห็นไปจนถึงช่วงใกล้อินฟราเรด โดยแสงความยาวคลื่น 808 นาโนเมตร สามารถไปกระตุ้น Nd^{3+} แล้วทำให้เกิดการเปล่งแสงความยาวคลื่น 1061 นาโนเมตร ออกมาได้เข้มที่สุด และความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดในการเจือ Nd_2O_3 ลงไปในแก้ว $\text{Li}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3$ คือ 0.5 mol% การวิเคราะห์สมบัติการเปล่งแสงด้วยทฤษฎี J-O สามารถหาค่าสัดส่วนการเปล่งแสง และภาคตัดขวางของการเปล่งแสงที่ความยาวคลื่น 1061 นาโนเมตร ได้เท่ากับ 0.808 และ 9.75×10^{-22} ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ทำให้ระบุได้ว่าแก้วชนิดนี้มีศักยภาพที่น่าสนใจต่อการนำไปศึกษาพัฒนา เพื่อใช้เป็นตัวกลางเลเซอร์ในเลเซอร์ของแข็งที่มีการเปล่งแสงความยาวคลื่น 1061 นาโนเมตร

5.2 อภิปรายผล

5.2.1 การอภิปรายลักษณะของแก้วตัวอย่างที่ได้จากการหลอม

แก้วตัวอย่างบอเร็ตที่เจือด้วย Nd^{3+} ที่ได้จากการหลอมโดยใช้สูตร $10\text{Li}_2\text{O}-10\text{Na}_2\text{O}-10\text{K}_2\text{O}-(70-x)\text{B}_2\text{O}_3-x\text{Nd}_2\text{O}_3$ โดยที่ x เท่ากับ 0.0, 0.1, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 mol% ตามลำดับ (LNKBNd) หลอมด้วยเทคนิคการหลอมแก้วที่อุณหภูมิสูงและทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว หลังจากได้แก้วตัวอย่างจากการหลอม แล้วนำไปตัดและขัด พบว่าแก้วตัวอย่างมีความโปร่งแสงและมีสีเหลือง โดยสีของแก้วจะเข้มข้นตามปริมาณความเข้มข้นของ Nd_2O_3 ที่เพิ่มขึ้น (ดูผลที่แสดงดังภาพที่ 4.1 ในบทที่ 4)

5.2.2 ผลการอภิปรายความหนาแน่น และปริมาตรเชิงโมล

ค่าความหนาแน่นของแก้วตัวอย่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ Nd_2O_3 ที่เพิ่มขึ้น โดยค่าความหนาแน่นมีค่าอยู่ในช่วง 2.49 g/cm^3 ถึง 2.64 g/cm^3 ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าความหนาแน่นนั้นเกิดจากการแทนที่อะตอมของ B_2O_3 ในโครงสร้างแก้วด้วยอะตอมของ Nd_2O_3 ซึ่งมีมวลโมเลกุลมากกว่า จึงทำให้ค่าความหนาแน่นของแก้วเพิ่มสูงขึ้น (ดังแสดงในภาพ 4.2 ในบทที่ 4)

สำหรับค่าปริมาตรเชิงโมลของแก้วตัวอย่างสามารถคำนวณได้โดยนำค่าความหนาแน่นที่วัดได้แทนลงในสมการที่ (3.3) ผลการวิเคราะห์ค่าปริมาตรเชิงโมลพบว่า เมื่อปริมาณของ Nd_2O_3 เพิ่มขึ้น ค่าปริมาตรเชิงโมลจะเพิ่มสูงขึ้นตาม เนื่องจากขนาดอะตอมของ Nd_2O_3 มีขนาดใหญ่กว่าขนาดอะตอมของ B_2O_3 ซึ่งการเติม Nd_2O_3 จะทำให้โครงสร้างของแก้วเกิดการขยายตัวใหญ่ขึ้น ดังนั้นเมื่อเติม Nd_2O_3 ลงในโครงสร้างแก้วจะประพฤติตัวเป็น Network Modifier ที่ทำหน้าที่สร้างออกซิเจนที่ไม่มีพันธะกับอะตอมของธาตุอื่น ๆ (NBOs) ให้มีปริมาณมากขึ้นจึงส่งผลให้ปริมาตรเชิงโมลของแก้วตัวอย่างขยายตัวจึงมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อนำค่าปริมาตรเชิงโมลของแก้วตัวอย่างมาเขียนกราฟความสัมพันธ์กับปริมาณของ Nd_2O_3 จากการทดลองพบว่า ค่าตรงชนิกหักเหของตัวอย่างแก้วมีค่าอยู่ระหว่าง 1.54 ถึง 1.56 โดยค่าตรงชนิกหักเหมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของ Nd_2O_3 (ดังแสดงในภาพที่ 4.2 ในบทที่ 4) เนื่องจากค่าตรงชนิกหักเหขึ้นกับความหนาแน่นของตัวอย่างแก้ว ดังนั้นการแทนที่ของ B_2O_3 ด้วย Nd_2O_3 ส่งผลให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นและตรงชนิกหักเหของตัวอย่างแก้วมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีไดอิเล็กตริกแบบดั้งเดิมที่ว่า ค่าตรงชนิกหักเหจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่น และสภาพการเกิดข้อได้ของอะตอมในวัสดุ

5.2.3 ผลการอภิปรายการดูดกลืนแสง

สเปกตรัมการดูดกลืนแสง (absorption spectra) ของแก้ว LNKB ที่เจือด้วยความเข้มข้นของ Nd_2O_3 ที่มีปริมาณความเข้มข้น 0.0, 0.1, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 mol% (ดังแสดงในภาพที่ 4.3 ในบทที่ 4) พบว่าแก้วตัวอย่างมีการดูดกลืนแสงตั้งแต่ความยาวคลื่นในช่วงแสงที่ตามองเห็นไปจนถึงช่วงอินฟราเรดใกล้ ซึ่งประกอบไปด้วยแสงที่ความยาวคลื่น 430, 460, 474, 513, 526, 582, 627, 681, 748, 808 และ 875 นาโนเมตร การดูดกลืนแสงดังกล่าวทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงานของ Nd^{3+} จากสถานะพื้น $^4I_{9/2}$ ขึ้นไปยังสถานะที่สูงกว่า ได้แก่ $^2P_{1/2}+^2D_{5/2}$ (430 นาโนเมตร), $^2G_{9/2}+(^6D+P)_{3/2}$ (460 นาโนเมตร), $^2D_{3/2}+^2G_{9/2}+^4K_{15/2}$ (474 นาโนเมตร), $^4G_{9/2}$ (513 นาโนเมตร), $^4G_{7/2}$ (526 นาโนเมตร), $^4G_{5/2}+^2G_{7/2}$ (582 นาโนเมตร), $^2H_{11/2}$ (627 นาโนเมตร), $^4F_{9/2}$ (681 นาโนเมตร), $^4S_{3/2}+^4F_{7/2}$ (748 นาโนเมตร), $^4F_{5/2}+^2H_{9/2}$ (808 นาโนเมตร) และ $^4F_{3/2}$ (875

นาโนเมตร) ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่า แก้วสามารถดูดกลืนแสงเหล่านี้ได้มากขึ้นเมื่อปริมาณของ Nd_2O_3 ที่เติมลงไปแก้วเพิ่มสูงขึ้น

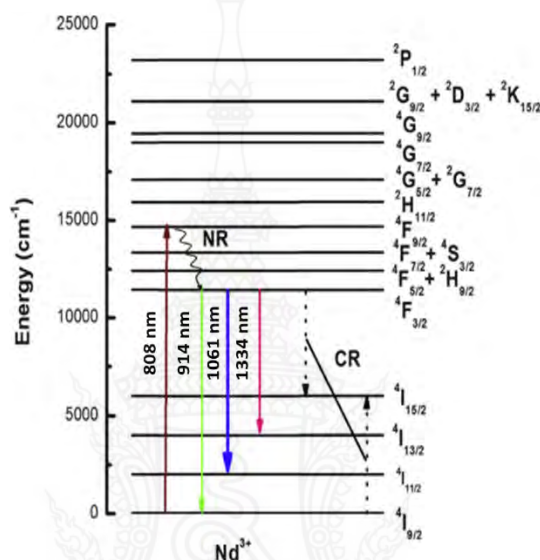
5.2.4 ผลการอภิปรายการกระตุ้นแสงของ Nd^{3+}

จากสเปกตรัมการกระตุ้นแสง (excitation spectra) ของแก้ว LNKB ที่เจือด้วยความเข้มข้นของ Nd_2O_3 ที่มีปริมาณความเข้มข้น 0.0, 0.1, 0.5, 1.0 และ 2.0 mol% ที่สามารถเปล่งแสงความยาวคลื่น 1061 นาโนเมตรได้ โดยการวัดสเปกตรัมการกระตุ้น (ดังแสดงในภาพที่ 4.4 ในบทที่ 4) พบพีคที่เกิดจากการดูดกลืนแสงของ Nd^{3+} ที่ความยาวคลื่น 352, 427, 467, 525, 581, 681, 744, 808, 821 และ 881 นาโนเมตร ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานจากสถานะพื้นไป $^4\text{I}_{9/2}$ ไปยังสถานะกระตุ้นที่สูงกว่า ซึ่งได้แก่ $^4\text{G}_{5/2}+^2\text{G}_{7/2}$, $^2\text{P}_{1/2}$, $^2\text{D}_{3/2}$, $^4\text{G}_{7/2}$, $^4\text{G}_{5/2}$, $^2\text{H}_{11/2}$, $^4\text{F}_{9/2}$, $^4\text{F}_{7/2}+^4\text{S}_{3/2}$, $^4\text{G}_{5/2}+^2\text{G}_{7/2}$, และ $^4\text{F}_{5/2}+^2\text{H}_{9/2}$ ตามลำดับ โดยแสงความยาวคลื่น 808 นาโนเมตร สามารถกระตุ้นแก้วให้เปล่งแสงความยาวคลื่น 1061 นาโนเมตร ออกมาได้ดีที่สุดในช่วงอินฟราเรดใกล้ ผู้วิจัยจึงนำความยาวคลื่นดังกล่าวไปกระตุ้นแก้วที่เจือ Nd^{3+} เพื่อศึกษาสเปกตรัมการเปล่งแสงต่อไป

5.2.5 ผลการอภิปรายการเปล่งแสง

จากการศึกษาสเปกตรัมการเปล่งแสงของ Nd^{3+} เติมในแก้ว LNKB มีการดูดกลืนแสงความยาวคลื่น 808 นาโนเมตร ได้ดีที่สุด ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำแสงความยาวคลื่นดังกล่าวไปกระตุ้นแก้วตัวอย่าง เพื่อศึกษาสเปกตรัมการเปล่งแสง (ดังแสดงในภาพที่ 4.5 ในบทที่ 4) พบว่าแก้วตัวอย่างมีการเปล่งแสงกลับออกมาทั้งหมด 3 ความยาวคลื่น ได้แก่ 914, 1061 และ 1334 นาโนเมตร โดยแสงความยาวคลื่น 1061 นาโนเมตร มีความเข้มมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลของสเปกตรัมการกระตุ้นในหัวข้อ 4 โดยแก้วมีการเปล่งแสงด้วยความเข้มมากขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของ Nd_2O_3 ลงไปในแก้วจนกระทั่งถึงความเข้มข้น 0.5 mol% หลังจากนั้นความเข้มแสงที่เปล่งออกมาจะลดลงซึ่งเกิดจากปรากฏการณ์ Concentration Quenching Effect โดยความเข้มข้นของ Nd_2O_3 มากเกินไปทำให้ไอออนของ Nd เข้าใกล้กันมากเกินไป และเพิ่มโอกาสความน่าจะเป็นในการดูดกลืนแสงของ Nd ตัวข้างเคียงที่กำลังเปล่งออกมาแล้วเข้าไปอีก และสามารถอธิบายควบคู่ไปกับแผนภาพการเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงานของ Nd^{3+} ในภาพที่ 5.1 ได้ว่า เมื่อแก้วตัวอย่างถูกกระตุ้นด้วยแสงความยาวคลื่น 808 นาโนเมตร จะทำให้เกิดการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงาน $^4\text{I}_{9/2} \rightarrow ^4\text{F}_{9/2}$ หลังจากนั้น Nd^{3+} จะลดระดับชั้นพลังงานลงมาถึงสถานะ $^4\text{F}_{3/2}$ โดยที่ไม่เกิดการเปล่งแสง NR เนื่องจากมีการสูญเสียพลังงานไปในรูปของการสั่นของโฟนอน ต่อมาจึงลดระดับชั้นพลังงานอีกครั้ง โดยมีการ

เปล่งแสงทั้ง 3 ความยาวคลื่นออกมา โดยเกิดจากเปลี่ยนระดับชั้นพลังงาน ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ (914 นาโนเมตร), ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ (1061 นาโนเมตร) และ ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ (1334 นาโนเมตร) ตามลำดับ



ภาพที่ 5.1 การเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงานของ Nd³⁺เติมในแก้ว LNKB ตามสเปกตรัมการเปล่งแสง

5.2.6 ผลการอภิปรายศักยภาพสำหรับเป็นวัสดุตัวกลางเลเซอร์ ตามทฤษฎี J-O

การศึกษาศักยภาพสำหรับเป็นวัสดุตัวกลางเลเซอร์ของตัวอย่างแก้วที่เจือ Nd₂O₃ จากการศึกษแก้ว LNKB ที่เจือความเข้มข้น 0.5 mol% เป็นตัวอย่างแก้วที่สามารถเปล่งแสงที่มีความเข้มสูงสุด จึงได้นำตัวอย่างแก้วดังกล่าวมาศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติการเปล่งแสงด้วยทฤษฎี J-O โดยพิจารณาจากกราฟการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 581 นาโนเมตร ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่าความแรงของการสั่นที่ได้จากการทดลอง (f_{exp}) และค่าที่ได้จากการคำนวณ (f_{cal}) ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการเปลี่ยนระดับพลังงาน ${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4G_{5/2} + {}^2G_{7/2}$ มีค่าความแรงในการสั่นมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับระดับชั้นพลังงานอื่น ๆ โดยมีค่าเท่ากับ 53.62×10^{-6} และ 53.69×10^{-6} ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 5.1 เมื่อพิจารณาค่า Ω_2 , Ω_4 และ Ω_6 ของแก้ว 0.5LNKBnd ในตารางที่ 5.2 มีค่าเท่ากับ 5.39×10^{-20} , 6.39×10^{-20} และ 5.62×10^{-20} ตารางเซนติเมตรตามลำดับ ซึ่งพบว่าค่า Ω_2 ในแก้ว 0.5LNKBnd มีค่าเท่ากับ 5.39×10^{-20} ตารางเซนติเมตร ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าของแก้ว PAN (Martins, V.M. et al., 2015: 104-107) มีค่าเท่ากับ 4.70×10^{-20} ตาราง

เซนต์เมตร และ AYFP-N (Huang, F. et al., 2014: 167173) มีค่าเท่ากับ 0.93×10^{-20} ตารางเซนต์เมตร แต่น้อยกว่าค่าของแก้ว 1.0 mol% Nd (Zaman, F. et al., 2016: 307-311) มีค่าเท่ากับ 8.55×10^{-20} ตารางเซนต์เมตร SPbKNLFNd10 (Manasaa, P. et al., 2017: 558-566) มีค่าเท่ากับ 6.89×10^{-20} ตารางเซนต์เมตร SrTP (Murthy, D.V.R. et al., 2011: 603-607) มีค่าเท่ากับ 7.75×10^{-20} ตารางเซนต์เมตร และ NKZLSNd10 (Ramachari, D. et al., 2014: 555-559) มีค่าเท่ากับ 10.26×10^{-20} ตารางเซนต์เมตร จึงกล่าวได้ว่าลิแกนด์ที่ล้อมรอบ Nd^{3+} ของแก้ว 0.5LNKBND มีความไม่สมมาตรสูงและพันธะระหว่าง Nd^{3+} กับลิแกนด์มีความเป็นโควาเลนต์สูงกว่าแก้ว PAN และ AYFP-N แต่น้อยกว่าในแก้ว 1.0 mol% Nd SPbKNLFNd10 SrTP และ NKZLSNd10 และค่า Ω_4 และ Ω_6 ของแก้ว 0.5LNKBND บอกลักษณะความหนืดและความแข็งของเนื้อแก้ว

จากการศึกษาการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงาน $^4\text{F}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{11/2}$ ที่ช่วงความยาวคลื่นประมาณ 1061 นาโนเมตร มีค่าความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานแล้วทำให้เกิดการเปล่งแสง (A_R) ภาคตัดขวางของการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น ($\sigma(\lambda_p)$) และสัดส่วนการเปล่งแสง (β_R) ของแก้ว LNKB ที่เจือด้วย Nd_2O_3 ของตัวอย่างแก้วมีค่าสูงโดย ($\sigma(\lambda_p)$) มีค่าเท่ากับ 9.75×10^{-22} ตารางเซนต์เมตร ดังแสดงในตารางที่ 5.3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแก้วสามารถทำให้เกิดการเปล่งแสงเลเซอร์ได้โดยใช้พลังงานต่ำ และสามารถให้กำเนิดแสงเลเซอร์ออกมาในปริมาณที่มาก เมื่อพิจารณาสัดส่วนของการเปล่งแสงที่ได้จากการทดลอง (β_{Rexp}) และได้จากการคำนวณ (β_{Rcal}) มีค่าเกิน 0.50 ทำให้ทราบได้ว่าแก้ว 0.5LNKBND จะให้กำเนิดแสงเลเซอร์ความยาวคลื่น 1061 นาโนเมตร จึงสามารถสรุปได้ว่า แก้ว LNKB ที่เจือด้วยความเข้มข้น 0.5 mol% เป็นวัสดุที่มีศักยภาพที่น่าสนใจ เหมาะต่อการนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุตัวกลางเลเซอร์ในช่วงการเปล่งแสงความยาวคลื่น 1061 นาโนเมตร

ตารางที่ 5.1 ค่าความแรงของการสั่นที่ได้จากการทดลอง (f_{exp}) และที่คำนวณได้ (f_{cal}) ของการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานเนื่องจากการดูดกลืนแสงในแก้วลิเทียมโซเดียมโพแทสเซียมบอเรตที่เจือด้วย Nd_2O_3 ที่ความเข้มข้น 0.5 mol%

สถานะ	ตำแหน่งสูงสุด		Oscillator Strengths	
	ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	พลังงาน (ต่อเซนติเมตร)	$f_{exp} (\times 10^{-6})$	$f_{cal} (\times 10^{-6})$
$^4I_{9/2} \rightarrow$				
$^2P_{1/2} + ^2D_{5/2}$	432	23148	7.04	6.19
$^2G_{9/2} + ^6(D+P)_{3/2}$	462	21645	16.18	15.98
$^2D_{3/2} + ^2G_{9/2} + ^4K_{15/2}$	475	21053	19.94	20.15
$^4G_{9/2}$	515	19417	1.44	1.56
$^4G_{7/2}$	527	18975	0.50	0.44
$^4G_{5/2} + ^2G_{7/2}$	581	17153	53.62	53.69
$^2H_{11/2}$	628	15924	10.58	9.44
$^4F_{9/2}$	683	14641	2.80	1.51
$^4S_{3/2} + ^4F_{7/2}$	752	13298	3.00	2.58
$^4F_{5/2} + ^2H_{9/2}$	808	12361	1.06	1.44
$^4F_{3/2}$	878	11390	10.53	13.02
$\delta_{rms} = \pm 0.969$				

ตารางที่ 5.2 ค่าตัวแปร J-O (Ω_2 , Ω_4 และ Ω_6) ของแก้วลิเทียมโซเดียมโพแทสเซียมบอเรตที่เจือด้วยด้วย Nd_2O_3 ที่ความเข้มข้น 0.5 mol% ในงานวิจัยนี้ เปรียบเทียบค่าตัวแปร J-O ของแก้วอื่น ๆ ที่มีการเจือด้วย Nd_2O_3

ระบบแก้ว	Ω_2 ($\times 10^{-20}$)	Ω_4 ($\times 10^{-20}$)	Ω_6 ($\times 10^{-20}$)	แนวโน้ม
0.5LNKBnd [งานวิจัย]	5.39	6.39	5.62	$\Omega_4 > \Omega_6 > \Omega_2$
1.0 mol% Nd (Zaman, F. et al., 2016: 307-311)	8.55	11.54	10.25	$\Omega_4 > \Omega_6 > \Omega_2$
SPbKNLFNd10 (Manasaa, P. et al., 2017: 558-566)	6.89	10.09	9.09	$\Omega_4 > \Omega_6 > \Omega_2$
PAN (Martins, V.M. et al., 2015: 104-107)	4.70	6.00	5.40	$\Omega_4 > \Omega_6 > \Omega_2$
SrTP (Murthy, D.V.R. et al., 2011: 603-607)	7.75	4.74	6.05	$\Omega_2 > \Omega_6 > \Omega_4$
NKZLSNd10 (Ramachari, D. et al., 2014: 555-559)	10.26	6.38	6.06	$\Omega_2 > \Omega_4 > \Omega_6$
AYFP-N (Huang, F. et al., 2014: 167173)	0.93	3.34	3.85	$\Omega_6 > \Omega_4 > \Omega_2$

ตารางที่ 5.3 ความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานแล้วทำให้เกิดการเปล่งแสง (A_R) ภาควัดขวางของการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น ($\sigma(\lambda_p)$) และสัดส่วนการเปล่งแสง (β_R) ของแก้วลิเทียม โซเดียมโพแทสเซียมโบเรตที่เจือด้วยด้วย Nd_2O_3 ที่ความเข้มข้น 0.5 mol%

ระดับชั้น พลังงาน ${}^4F_{3/2} \rightarrow$	λ_p (นาโน เมตร)	A_R (วินาที)	β_R		$(\sigma(\lambda_p)) \times 10^{-22}$ (ตาราง เซนติเมตร)
			β_{Rexp}	β_{Rcal}	
${}^4I_{9/2}$	914	3148	0.032	0.085	2.59
${}^4I_{11/2}$	1061	6359	0.808	0.781	9.75
${}^4I_{13/2}$	1334	1479	0.160	0.134	3.58

บรรณานุกรม

- กรมวิทยาศาสตร์บริการ. (2559). *ความรู้เบื้องต้นทางด้านแก้ว*. สืบค้นจาก <http://otop.dss.go.th/index.php/home/26-interesting-articles/136-2017-05-31-06-33-45>
แก้วบอเร็ต. (ไม่ปรากฏปี). สืบค้นจาก <http://www.eresearch.ssru.ac.th/bitstream/123456789/473/7/7>
- จิราพันธ์ ธรรมณีเพชร. (2554). *สมบัติทางกายภาพและโครงสร้างของแก้วบิสมีท์เจือด้วยโครเมียม* (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่).
- เทคโนโลยีแห่งแสง. (2563). *เลเซอร์*. สืบค้นจาก <https://www.technicalbiomed.com>
- ประสิทธิ์ ปุระชาติ. (2559). *สมบัติและชนิดของแก้ว*. สืบค้นจาก <http://library.tru.ac.th/images/academic/book/b45252/05g2-p.pdf>
- ภัทรวรรณ เฉยเจริญ. (2559). *Ceramic Design and Manufacturing*. สืบค้นจาก <http://www2.mtec.or.th/th/special/cdm/articles5.html>
- มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม. (2559). *แก้วสีแดงทับทิม*. สืบค้นจาก http://lib3.dss.go.th/fulltext/glass/WEB/Articles_from_staff/improve.pdf
- แม่น อมรสิทธิ์ & อมร เพชรสม. (2539). *หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ*. กรุงเทพมหานคร: ชวนพิมพ์.
- วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุแก้ว. (2540). *วัตถุดิบในการหลอมแก้ว*. สืบค้นจาก <http://www2.mtec.or.th/th/research/gsat/glassweb/property.html>
- วิฑิต วรรณเลิศลักษณ์. (2559). *การหักเหของแสง*. สืบค้นจาก <https://www.scimath.org/lesson-physics/item/7282-2017-06-14-13-59-29>
- สมิต อินทร์ศิริพงษ์ และคณะ. (2559). *การพัฒนาแก้วระบบออกซิฟลูออไรด์ที่เติมไอออนของ Eu^{3+} , Dy^{3+} และ Sm^{3+} เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงแสงของแก้วในช่วงตามองเห็น สำหรับประยุกต์ใช้เป็นตัวแปลงแสงของแข็ง*. ราชบุรี: มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง.
- 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.
- Bett, S. (2014). B. Sc. with major in organic chemistry. Retrieved 2 March 2021, from <http://www.quora.com/What-is-the-Jablonski-diagram>

Blasse, G., & Grabmaier, B. C. (1994). *A general introduction to luminescent materials* (pp. 1-9). Springer Berlin Heidelberg.

Brahmachary, K. et al. (2014). Investigations on spectroscopic properties of Pr^{3+} and Nd^{3+} doped zinc-alumino-sodium-phosphate (ZANP) glasses. *Journal of Molecular Structure*, 1064, 6-14,

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.

Devarajulu, G. et al. (2022). Sensitization effect of Nd^{3+} ions on $\text{Yb}^{3+}/\text{Nd}^{3+}$ co-doped oxyfluoride glasses and study of their optical, fluorescence, and upconversion abilities for visible laser and NIR amplifier applications. *Ceramics International*, 48 (17), 24550-24559.

Digonet, M. J. F. (2001). Rare-earth-doped fiber laser and amplifiers (2nd ed.). NewYork: Marcel Dekker.

El-Maaref, A. A. et al. (2019). Optical properties and radiative rates of Nd^{3+} doped zinc-sodium phosphate glasses. *Journal of Rare Earths*, 37, 253-259.

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>

Huang, F. et al. (2014). Judd-Ofelt analysis and energy transfer processes of Er^{3+} and Nd^{3+} doped fluoroaluminate glasses with low phosphate content. *Optical Materials*, 38, 167173.

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.

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.

Kaewjaeng, S. et al. (2012). Effect of BaO on optical, physical and radiation shielding properties of SiO₂: B₂O₃: Al₂O₃: CaO: Na₂O glasses system. *Procedia Engineering*, 32, 1080-1086.

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

Lakshminarayana, G. et al. (2009). Spectral analysis of RE³⁺ (RE = Sm, Dy, and Tm): P₂O₅-Al₂O₃-Na₂O glasses. *Optical materials*, 31 (10), 1506-1512.

Li, M. et al. (2019). Spectroscopic properties of Er/Yb co-doped glass ceramics containing nanocrystalline Bi₂ZnB₂O₇ for broadband near-infrared emission. *Ceramics International*, 45, 18831-18837.

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.

Mahmoud, K. H. (2010). Spectroscopic and radiative properties study of Nd³⁺ doped cadmium-phosphate glasses. *Physica B*, 405, 4746-4749.

Manasaa, P. et al. (2017). Studies of radiative and mechanical properties of Nd³⁺-doped lead fluorosilicate glasses for broadband amplification in a chirped pulse amplification based high power laser system. *Journal of Luminescence*, 188, 558-566.

Martins, V.M. et al. (2015). Thermo-optical properties of Nd³⁺ doped phosphate glass determined by thermal lens and lifetime measurements. *Journal of Luminescence*, 162, 104-107.

Munhoz, J. et al. (2019). Glasses in the NaPO₃-WO₃-NaF ternary system: Preparation, physical properties and structural studies. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 505, 379-389.

Murthy, D.V.R. et al. (2011). Investigation on luminescence properties of Nd³⁺ ions in alkaline-earth titanium phosphate glasses. *Optics Communications*, 284, 603-607.

Pal, I. et al. (2013). Spectroscopic and radiative properties of Nd ³⁺ ions doped zinc bismuth borate glasses. *Indian Journal of Pure and Applied Physics*, 51(1), 18-25.

Ramachari, D. et al. (2014). Optical absorption and emission properties of Nd³⁺-doped oxyfluorosilicate glasses for solid state lasers. *Infrared Physics and Technology*, 67, 555-559.

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.

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.

Subrata, M. et al. (2015). Intense orange emission in Pr³⁺ doped lead phosphate glass. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 85, 245-253.

Sugawara, T. et al. (2013). Na₂O activity and thermodynamic mixing properties of SiO₂-Na₂O-CaO melt. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 119, 371-372.

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.

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

Vemasevana, R. K. et al. (2011). Optical characterization of Eu³⁺ and Tb³⁺ ions doped cadmium lithium alumino fluoro boro tellurite glasses. *Journal of Spectrochimica Acta Part A*, 79 (1), 81-97.

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

Yan, Z. et al. (2007). Optical properties of Dy³⁺ doped in boroaluminasilicate glass. *Journal of Rare Earths*, 25 (1), 105-112.

Zaman, F. et al. (2016). Luminescence behavior of Nd³⁺-activated soda-lime-borate glasses for solid-state lasers applications. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 452, 307-311.

Zaman, F. et al. (2017). Optical and luminescence properties of Li₂O-Gd₂O₃-MO-B₂O₃-Sm₂O₃ (MO=Bi₂O₃, BaO) glasses. *Journal of Alloys and Compounds*, 676, 275-285.

Zhang, F. et al. (2010). Visible luminescence properties of Er³⁺-Dy³⁺ codoped tellurite glasses. *Applied Physics A: Material Science & Processing*, 101 (4), 777-780.

ประวัตินักวิจัย

หัวหน้าโครงการ

1. ชื่อ (ภาษาไทย) นายธนพงศ์ สารอินทร์
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. W. Boonpa, K. Kirdsiri, N. Wongdamnern, **T. Sareein**, Y. Sangsawat, J. Kaewkhao, "Development of Reddish-Orange Color Emission Material from Barium Gadolinium Borate Glasses Doped with Eu_2O_3 " *Integrated Ferroelectrics*, Vol.222, pp 273-282 (2022).
<https://doi.org/10.1080/10584587.2021.1961539>
2. N. Jarucha, N. Wantana, H.J. Kim, N. Wongdamnern, **T. Sareein**, J. Kaewkhao "Physical, Optical and Luminescence Properties of Pr^{3+} Doped in Lanthanum

Borate Glasses" *Integrated Ferroelectrics*, Vol.222, pp 253-261 (2022).

<https://doi.org/10.1080/10584587.2021.1961537>

3. A. Prasatkhetragarn, **T. Sareein**, N. Triamnak, R. Yimnirun, "Dielectric and ferroelectric properties of modified-BaTiO₃ lead-free ceramics prepared by solid solution method" *Ferroelectrics*, Vol.586, pp 224-241 (2022).
<https://doi.org/10.1080/00150193.2021.2014274>
4. O. Chaemlek, N. Kiwsakunkran, W. Boonpa, N. Wantana, **T. Sareein**, J. Rajagukguk, P. Limsuwan, J. Kaewkhao, "White Emission from Dy³⁺ Doped in ZnO – CaO – B₂O₃ for WLEDs Material Application" *Integrated Ferroelectrics*, Vol.225, pp 173-185 (2022). <https://doi.org/10.1080/10584587.2021.1964282>
5. Saksorn Limwichean, Natthapong Wongdamnern, **Thanapong Sareein**, Wuttichai Phae-ngam, Hideki Nakajima, Phitsanu Poolcharuansin, Mati Horprathum, Annop Klamchuen, "Spectroscopic study on alternative plasmonic TiN-NRs film prepared by R-HiPIMS with GLAD technique" *Radiation Physics and Chemistry*, Vol.202, 110589 (2023).
<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110589>
6. W. Wongwan, P. Yasaka, K. Boonin, S. Khondara, H.J. Kim, S. Kothan, N. Chanlek, P. Kanjanaboos, N. Phuphathanaphong, **T. Sareein**, N. Sangwaranatee, J. Kaewkhao, A comparative study of microwave assisted and conventional melting techniques to glass properties, *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 224, 112011 (2024).
<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2024.112011>