



การเตรียมระบบแก้ววิสมัทแบรเรียมบอร์เรทด้วยการเจือยูโรเพียมออกไซด์
สำหรับประยุกต์ใช้เป็นวัสดุวาแสงในย่านที่ตามองเห็น

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รั้งสรรค์ ร่วมนิคม

สนับสนุนงบประมาณโดย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ประจำปีงบประมาณ 2561



การเตรียมระบบแก้วบิสมัทแบรเรียมบอร์เรทด้วยการเจือยูโรเพียมออกไซด์
สำหรับประยุกต์ใช้เป็นวัสดุวาแสงในย่านที่ตามองเห็น

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รังสรรค์ ร่วมนิคม

สนับสนุนงบประมาณโดย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ประจำปีงบประมาณ 2561

Preparation of Bismuth Barium Borate Glass Systems Doped with Eu_2O_3
for the Visible Luminescence Material Application

Asst. Prof. Dr. Rungsan Ruamnikhom

Granted by Rajamangala University of Technology Rattanakosin

Fiscal Year 2018

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ที่ได้สนับสนุนเงินทุนในการดำเนินวิจัยจนแล้วเสร็จ

ขอกราบขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ ลี้มสุวรรณ อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทาง ตลอดจนการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรพงษ์ แก้วขาว หัวหน้าศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีแก้วและวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ห้องปฏิบัติการ และเครื่องมือทดสอบสมบัติต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ตลอดจนให้คำแนะนำในการตีพิมพ์เพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัยลงในวารสารระดับนานาชาติ

ผู้วิจัยหวังว่างานวิจัยฉบับนี้จะมีประโยชน์ต่อองค์กรและผู้เกี่ยวข้องมากที่สุด จึงขอมอบผลความสำเร็จทั้งหมดนี้ให้แก่คณาจารย์ที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาจนทำให้เกิดผลงานวิจัยที่เป็นประโยชน์ต่อผู้เกี่ยวข้องและขอมอบความกตัญญูตเวที แด่บิดา มารดา และผู้มีพระคุณทุกท่าน หากพบข้อบกพร่องใด ๆ ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยขอน้อมรับและยินดีรับฟังคำแนะนำจากทุกท่านที่ได้เข้ามาศึกษาเพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนางานวิจัยต่อไป

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รังสรรค์ ร่วมนิคม

1 กรกฎาคม 2562

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ A 32/2561
ชื่อโครงการ การเตรียมระบบแก้วบิสมัทแบรเรียมบอร์เรทด้วยการเจือยูโรเพียมออกไซด์
สำหรับประยุกต์ใช้เป็นวัสดุคววแสงในย่านที่ตามองเห็น
ชื่อผู้วิจัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ร่วมนิคม

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาระบบแก้ว $B_2O_3-Bi_2O_3-BaO$ ที่เจือ Eu^{3+} ที่ถูกเตรียมขึ้นด้วยเทคนิคการหลอมที่อุณหภูมิสูงและทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ ทางแสง และศักยภาพต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านเลเซอร์ พบว่า โดยที่ปริมาตรเชิงโมลของระบบแก้วมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของ Eu^{3+} ที่เจือลงในแก้ว ทำให้เกิดปรากฏการณ์นี้ว่า non-bridging oxygen (NBOs) เพิ่มขึ้นจากการวิเคราะห์สเปกตรัมของการดูดกลืนแสง พบพีคของการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นในช่วงที่ตามองเห็นไปจนถึงช่วงความยาวคลื่นใกล้อินฟราเรด จำนวน 4 พีค ที่ความยาวคลื่น 526, 585, 2106 และ 2222 นาโนเมตร และเมื่อกระตุ้นแสงที่ความยาวคลื่น 393 นาโนเมตร พบพีคการเปล่งแสง 4 พีคที่สอดคล้องกับการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนคือ ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_1, {}^7F_2, {}^7F_3$ และ 7F_5 โดยมีค่าความเข้มแสงสูงสุด ที่ความเข้มข้นของ Eu_2O_3 ร้อยละ 2.50 โดยโมล สำหรับการวิเคราะห์สีของแก้วโดยเทียบจากแผนภาพสีมาตรฐาน CIE 1931 Chromaticity ทำให้ทราบว่า แก้วที่เจือด้วย Eu^{3+} จะเปล่งแสงสีแดงออกมา สำหรับการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎี Judd-Ofelt นั้น โดยพิจารณาจากค่าสัดส่วนการเปล่งแสงและภาคตัดขวางของการเปล่งแสง โดยค่าจพารามิเตอร์ทั้งสองชี้ให้เห็นว่า แก้วระบบนี้จึงมีศักยภาพสูงต่อการนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุตัวกลางเลเซอร์ เป็นได้หลอดไฟแอลอีดีและหน้าจอแสดงผล

สำคัญ : แก้วบิสมัทแบรเรียมบอร์เรท, ยูโรเพียมออกไซด์, สมบัติเชิงกายภาพ, สมบัติเชิงแสง, การเปล่งแสง

E-mail Address : rungsan.rua@rmutr.ac.th
ระยะเวลาโครงการ : ตุลาคม 2561 – กันยายน 2562

Abstract

Code of project: A 32/2561
Name of project: Preparation of Bismuth Barium Borate Glass Systems Doped with Eu_2O_3 for the Visible Luminescence Material Application
Research name: Asst. Prof. Dr. Rungsan Ruamnikhom

In this study, the $\text{B}_2\text{O}_3\text{-Bi}_2\text{O}_3\text{-BaO}$ glasses doped with Eu^{3+} were prepared by melt-quench technique. For study in physical property, luminescence property and lasing potential. The results show that doping Eu^{3+} in higher concentration make the molar volume of glasses tend to increase. This cause by increasing of NBOs in glass network. The absorption spectra indicate photon absorbing of glass in VIS-NIR region. The intensity of all absorption bands increased with increasing of Eu_2O_3 contents. The absorption spectra consists of four absorption peaks that are located at 526, 585, 2106 and 2222 nm wavelength, respectively, and the luminescence spectra exhibited four emission peaks corresponding to the $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_1, ^7\text{F}_2, ^7\text{F}_3$ and $^7\text{F}_5$, respectively, The optimum concentration of Eu^{3+} with strongest emission in $\text{B}_2\text{O}_3\text{-Bi}_2\text{O}_3\text{-BaO}$ is 2.5 mol%. CIE 1931 chromaticity investigation show that Eu^{3+} doped glasses emit the light with color red. J-O analysis of glass samples result to the final stimulated emission cross-section and branching ratio. Both parameters indicate that Eu^{3+} doped glass has the high potential for using as laser medium in solid-state laser, LED light bulb and display screen.

Keywords : BBBO, Eu_2O_3 , Physical Properties, Optical Properties, Luminescence

E-mail Address : rungsan.rua@rmutr.ac.th

Period of project : October 2561 – September 2562

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันได้มีงานวิจัยจำนวนมากที่มุ่งพัฒนาในการสร้างและพัฒนาวัสดุสังเคราะห์ เพื่อเป็นวัสดุทางเลือกที่มีประสิทธิภาพดี ต้นทุนต่ำ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ดังนั้นแก้วจึงเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีการเตรียมที่ไม่ยุ่งยากและใช้เทคโนโลยีไม่ซับซ้อน นอกจากนี้ยังสามารถขึ้นรูปเพื่อประยุกต์ใช้ในงานที่มีขนาดใหญ่ (Large volume) จนกระทั่งขนาดเล็ก (Small volume) ได้ง่าย เช่น ใช้ในงานก่อสร้าง (Constructions) บรรจุภัณฑ์ (Containers) เครื่องประดับ ตกแต่ง (Ornaments & Figurines) อุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ (Electronics & Electrical Glass) อุปกรณ์ที่ใช้งานทางแสง (Optical glass) ทางด้านรังสีเพื่อทำเป็นวัสดุกำบังรังสี (Radiation Shielding Materials) เป็นต้น ปัจจุบันเทคโนโลยีการผลิตวัสดุอสัณฐานและสารประกอบซิลิกอนซึ่งมีพื้นฐานจากเทคโนโลยีแก้ว ได้พัฒนาเป็นเทคโนโลยีหรืออุตสาหกรรมที่มีบทบาทสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศที่พัฒนาแล้ว เช่น เทคโนโลยีการผลิตใยแก้วนำแสง (Fiber Optics) โซลาร์เซลล์ (Solar Cell) ใยแก้วสำหรับวัสดุเสริมแรงและเลนส์ (Lens) เป็นต้น และได้มีการพัฒนาและปรับปรุงให้แก้วมีคุณสมบัติพื้นฐานที่ดีขึ้น เช่น มีความแข็งแรงขึ้นโดยการอบเทมเปอร์ (Temper) การเติมองค์ประกอบของธาตุหายากลงไปเพื่อปรับปรุงคุณภาพเชิงแสง เป็นต้น แก้วที่มีความบริสุทธิ์สูง จะมีลักษณะโปร่งใส ผิวค่อนข้างแข็ง ยากต่อการกัดกร่อน เฉื่อยต่อปฏิกิริยาทางเคมี และชีวภาพ อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าแก้วจะแข็ง แต่ก็เปราะแตกหักง่าย และมีรอยแตกที่ละเอียดคม ซึ่งคุณสมบัติของแก้วนี้สามารถเปลี่ยนแปลงได้ง่ายด้วยการผสมสารอื่นลงในเนื้อแก้ว หรือการปรับสภาพด้วยการใช้ความร้อน แก้วโดยทั่วไปนั้นหลอมมาจากทรายที่มีซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2 -Silicon Dioxide) เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งอาจอยู่ในรูปของสารประกอบทางเคมีในแร่ควอตซ์ (quartz) หรือในรูป polycrystalline นอกจากนี้การเติมวัตถุดิบอื่น ๆ ลงไปเพื่อเป็นส่วนผสมของเนื้อแก้วจะช่วยให้แก้วมีสมบัติพิเศษเหมาะสมกับการนำไปใช้งานด้านต่าง ๆ เช่น แก้วคริสตัลที่เกิดจากการเติมตะกั่ว และกลายเป็นสารประกอบออกไซด์ (PbO) ในเนื้อแก้ว เพื่อให้แก้วหนักขึ้น เนื้อแก้วหยุ่นเหนียวและแวววาว แต่ตะกั่วมีความเป็นพิษจึงทำให้มีการเติมออกไซด์ของแบเรียมและสังกะสี (BaO , ZnO) เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้ออกไซด์ของตะกั่ว สำหรับการใช้งานทางด้านกำบังรังสี

โครงสร้างแก้ว (Glass former) ที่ได้รับความนิยมและใช้งานกันอย่างกว้างขวางมีโครงสร้างมาจากโบรอนไดรอกไซด์ (B_2O_3) หรือเป็นที่รู้จักกันในชื่อแก้วบอร์เรท (Borate glass) เป็นส่วนประกอบสำคัญชนิดหนึ่งนอกเหนือจากซิลิกอนที่สามารถหลอมเป็นโครงสร้างแก้ว และมีจุดหลอมเหลวต่ำ ทำให้แก้วที่ประกอบด้วย B_2O_3 เมื่อหลอมเหลวแล้วจะมีความหนืดสูง (High Viscosity) และมีแนวโน้มที่จะก่อตัวมี

โครงสร้างเป็นผลึกแก้วได้ [1,2] อย่างไรก็ตามการเตรียมแก้วที่มีองค์ประกอบจาก B_2O_3 เพียงชนิดเดียวนั้นเกิดได้ยากมากและมีคุณสมบัติที่ไม่ดีนัก [3] จึงควรมีการปรับปรุงคุณสมบัติโครงสร้างของแก้ว เพื่อให้มีการก่อตัวเป็นโครงสร้างแก้วที่ง่ายและมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น แก้วชนิดนี้จึงมีคุณสมบัติที่ดีสำหรับเป็นวัสดุที่มีสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นของแสง (Non-Linear Optical Properties) นอกจากนี้แก้วบางสูตรได้มีการเติมผลึกโมโนคลีนิกของบิสมาทโบเรต (BiB_3O_6) จะแสดงคุณสมบัติสัมประสิทธิ์ของความไม่เป็นเชิงเส้นและเป็นเชิงเส้นของแสงที่ดี ซึ่งจากการคำนวณพบว่าสมบัติดังกล่าวเกิดจากการกระจายตัวของไอออนนิกกรูป $[BiO_4]^{5-}$ และสำหรับคุณสมบัติเชิงเส้นของแสง (Linear properties) เช่น ดัชนีหักเห ไอออนนิกกรูปดังกล่าวจะมีพฤติกรรมในทางเดียวกับวัสดุออสซิลโลกราฟ เช่น แก้ว เป็นต้น ดังนั้นแก้วระบบบิสมาทโบเรตจึงเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจทางแสงที่สามารถปรับคุณสมบัติได้ตามองค์ประกอบของแก้วนั้น โดยเฉพาะการประยุกต์ใช้ในทางแสง ด้านตัวกลางทางแสงที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non Linear Optics) เป็นต้น นอกจากนี้แก้วบิสมาทโบเรตยังมีคุณสมบัติที่สำคัญ คือ มีความหนาแน่นสูงอันเนื่องมาจากคุณสมบัติของบิสมาทในเนื้อแก้ว จึงน่าจะเป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับการใช้เป็นวัสดุเพื่อตรวจวัดรังสีเอกซเรย์ เช่น วัสดุซินทิลเลชัน เป็นต้น แต่ต้องมีสัดส่วนที่เหมาะสม

แก้วที่มีส่วนผสมระหว่างบิสมาทออกไซด์ (Bi_2O_3) กับบอริกออกไซด์ เรียกว่า แก้วบิสมาทโบเรต (Bismuth borate glass) สามารถปรับปรุงคุณสมบัติเชิงแสงให้มีหลากหลายขึ้นอยู่กับสารประกอบ และอัตราส่วนของสารประกอบที่ใช้ในการเตรียมแก้ว นอกจากนี้แก้วบิสมาทโบเรตเป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นสูง อุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ ($600-800\text{ }^{\circ}\text{C}$) ดัชนีหักเหสูงตั้งแต่ 1.9-2.3 มีเสถียรภาพทางเคมีและกายภาพสูง [4] ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ดีในการพัฒนาแก้วสำหรับใช้งานในด้านรังสี โดยแก้วที่มีความหนาแน่นสูง ดัชนีหักเหสูงจะเกิดอันตรกิริยาได้ดีต่อรังสีเอกซ์ (X-ray) หรือใช้เป็นวัสดุเรืองแสง รวมทั้งใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ตอบสนองต่อแสง (Optoelectronic) ดังนั้นแก้วระบบ $Bi_2O_3-B_2O_3$ จึงมีคุณสมบัติที่น่าสนใจ และมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย [5]

นอกจากนี้แก้วที่มีคุณสมบัติพิเศษชนิดอื่น ที่เกิดจากการเติมวัตถุดิบอื่นๆ ลงไป เพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของแก้ว เช่น แก้วคริสตัลที่เกิดจากการเติมตะกั่ว และกลายเป็นสารประกอบออกไซด์ (PbO) ในเนื้อแก้ว เพื่อให้แก้วหนักขึ้น เนื้อแก้วหยุ่นเหนียวและแวววาว แต่ตะกั่วมีความเป็นพิษจึงทำให้มีการเติมออกไซด์ของแบเรียมและสังกะสี (BaO , ZnO) เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้ออกไซด์ของตะกั่ว สำหรับการใช้งานทางด้านกำบังรังสี

ในหลายปีที่ผ่านมาได้มีการนำปรับปรุงคุณสมบัติของแก้ว โดยเตรียมแก้วจากระบบบิสมาทโบเรต มาประยุกต์ใช้งานเชิงแสงและงานทางด้านรังสี เช่น ใช้เป็น หน้าต่างกำบังรังสี วัสดุกำบังรังสีแกมมา และหัวนับวัดรังสี [6-7] มีงานวิจัยไม่น้อยที่ทำการศึกษารวบรวมคุณสมบัติต่าง ๆ ของแก้วในระบบ $Bi_2O_3 : BaO : B_2O_3$ [8-12] แต่อย่างไรก็ตามยังมีการศึกษาโครงสร้างและการเปล่งแสงของแก้วยังมีน้อย มีเพียงในปี 2010 Egorysheva และคณะ ที่ได้เจือ Eu^{3+} ลงในระบบแก้วบิสมาทโบเรต และในปี 2014 Rungsan และคณะ ก็ได้เจือ Er^{3+} , Nd^{3+} ลงในระบบแก้วบิสมาทโบเรต ทำให้ได้คุณสมบัติในการเปล่งแสงที่ดี [13-14]

ปัจจุบันสารที่เติมลงในแก้วเพื่อปรับปรุงหรือเพิ่มคุณสมบัติให้แก้วมีความเหมาะสมกับการใช้งาน

ประเภทต่างๆ นั้น นิยมใช้ออกไซด์ของธาตุหายาก (Rare Earth Oxide) [15-16] ซึ่งเกิดการลูมิเนสเซนซ์ที่ดี และมีรูปแบบการเปล่งแสงที่คม (Sharp emission) ซึ่งสอดคล้องกับเปลี่ยนระดับพลังงานสถานะในชั้น 4f-4f และ 4f-5d ของ RE^{n+} สำหรับการลดสถานะของชั้น 4f-4f นั้น จะใช้รูปแบบการลูมิเนสเซนซ์ที่ดีตั้งแต่ช่วงอัลตราไวโอเล็ตถึงอินฟราเรด ซึ่งเป็นผลมาจากอิเล็กตรอนในระดับพลังงาน 5s หรือ 5p ในหลายปีที่ผ่านมา แก้วที่เติมไอออนของธาตุหายากเป็นที่สนใจอย่างมากในการประยุกต์ใช้เป็นตัวกลางในการแสดงผล (Display materials) วัสดุเปล่งแสงของแข็ง เช่น LED ผลิตเลเซอร์จากของแข็ง (Solid State Laser) ตัวขยายเชิงแสง (Optical Amplifier) และวัสดุตรวจจับรังสี เป็นต้น ซึ่งธาตุหายากยูโรเปียม (Europium) มีคุณสมบัติที่มีรูปแบบ (Pattern) การเปล่งแสงสีแดงเข้ม และมีความเสถียร โดยมีรูปแบบการเปล่งแสงที่เสถียร โดยไม่ขึ้นกับชนิดของวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นโฮสต์ เนื่องจากธาตุหายากยูโรเปียมมีประจุเป็น 3+ มีการจัดเรียงของอิเล็กตรอนในระดับพลังงานการกระตุ้นต่ำสุด (5D_0) [17] เมื่อเทียบกับไอออนของธาตุหายากตัวอื่น ๆ และไม่มี การสูญเสียพลังงานจากการเปลี่ยนระดับพลังงาน (Transition) ระหว่างชั้นพลังงาน 7F_0 และ 5D_0 [18] โดยปกติธาตุยูโรเปียมมีประจุเป็น 3+ มีการเปล่งแสงช่วงแคบ (Narrow light) จนเกือบให้เป็นแสงสีเดียว (Monochromatic light) โดยจะมีสีแดง ซึ่งเหมาะกับการนำมาใช้งานทางด้านเทคโนโลยีหลอดแอลอีดี (LEDs) และอุปกรณ์ที่มีส่วนประกอบของตัวเปล่งแสงสีแดง [19]

ในงานวิจัยนี้จะทำการพัฒนาระบบแก้วบิสมีทแบรเรียมบอร์เรทที่เติมออกไซด์ของธาตุหายากคือ Eu^{3+} ที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ เพื่อศึกษาสมบัติต่างๆ เช่น สมบัติการเปล่งแสง และหาจุดเหมาะสม (Optimization) ในแง่ของความเข้มแสง และช่วงความยาวคลื่นที่เปล่งออกมา เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวกลางเลเซอร์ หรือใช้เป็นวัสดุจอแสดงผล (Display materials) ที่มีลักษณะการเปล่งแสงเฉพาะตัว และใส่ของหลอดไฟที่มีประสิทธิภาพสูง กินพลังงานต่ำ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อเตรียมระบบแก้วบิสมีทแบรเรียมบอร์เรทด้วยการเติม Eu_2O_3 ในปริมาณที่ต่างกัน
2. เพื่อวัดสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความหนาแน่นและปริมาตรเชิงโมลของแก้ว
3. เพื่อวัดคุณสมบัติทางแสงของแก้ว ได้แก่ การดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer เพื่ออธิบายการดูดกลืนแสงในโครงสร้างแก้ว
4. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการเปล่งแสงในย่านที่ตามองเห็นเมื่อทำการกระตุ้นด้วยความยาวคลื่นที่เหมาะสม
5. เพื่อพัฒนาศักยภาพของมหาวิทยาลัยให้สามารถตีพิมพ์เผยแพร่ลงในวารสารดั่งนานาชาติได้

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. เตรียมแก้วระบบบิสมัทแบเรียมบอร์เรท และศึกษาหาจุดหลอมเหลวในการหลอมแก้วและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบแก้ว
2. ศึกษาผลของการเติมธาตุหายาก Eu_2O_3 ที่มีปริมาณที่ต่างกันที่ส่งผลต่อระบบแก้วบิสมัทแบเรียมบอร์เรท
3. วัดคุณสมบัติทางกายภาพของระบบแก้ว ได้แก่ ความหนาแน่นและปริมาตรเชิงโมล
4. วัดคุณสมบัติทางแสงของระบบแก้ว ได้แก่ การดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer เพื่อศึกษาการดูดกลืนแสงของธาตุหายากที่มีอยู่ในโครงสร้างแก้วว่ามีลักษณะอย่างไร
5. ทดสอบการวัดทางลูมิเนสเซนซ์ของระบบแก้ว เพื่อศึกษาและอธิบายการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนเมื่อมีการกระตุ้นด้วยพลังงานที่แตกต่างกัน และสามารถหาค่าพลังงานของการกระตุ้นที่เหมาะสม (Excitation energy) และเปรียบเทียบค่าความเข้มของแสงที่เปล่งออกมาที่เป็นผลมาจากการเติมธาตุหายาก Eu_2O_3 ที่มีปริมาณที่ต่างกัน เพื่อได้แก้วที่มีความเข้มแสงสูงสุด
6. ศึกษาสีของการเปล่งแสงโดยการคำนวณและวิเคราะห์ค่าสีจากระบบ CIE 1931
7. สรุปลงความเป็นไปได้ในการนำวัสดุแก้วที่ได้รับการพัฒนาและปรับปรุงแล้วไปใช้งานในด้านอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง
8. เขียนบทความเผยแพร่ลงในวารสารดัดบนาชาติ
9. เขียนรายงานฉบับสมบูรณ์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อให้เกิดองค์ความรู้ต่อบุคคลทั่วไปและขยายตัวไปสู่ภาคอุตสาหกรรม
2. เพื่อให้ภาคอุตสาหกรรมแก้วได้นำสูตรแก้วที่วิจัยได้ไปประยุกต์ใช้งานให้เกิดความเหมาะสมกับสมบัติต่าง ๆ อย่างมีประสิทธิภาพและเกิดประโยชน์สูงสุด
3. เพื่อลดความเสี่ยงจากการใช้แก้วที่มีออกไซด์ของสารตะกั่วเป็นองค์ประกอบ
4. ได้ผลงานวิจัยตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติอย่างน้อย 1 เรื่อง

1.5 การดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
2. เตรียมแก้วระบบบิสมัทแบเรียมบอร์เรท และศึกษาหาจุดหลอมเหลวในการหลอมแก้วและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบแก้ว
3. ศึกษาผลของการเติมธาตุหายาก Eu_2O_3 ที่มีปริมาณที่ต่างกันที่ส่งผลต่อระบบแก้วบิสมัทแบเรียมบอร์เรท
4. วัดคุณสมบัติทางกายภาพของระบบแก้ว ได้แก่ ความหนาแน่นและปริมาตรเชิงโมล

ปี	กิจกรรม	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.
	กำหนดเป็นสูตรที่เหมาะสม												
2561	2. สร้างเข้าลูมินาเทน ความร้อนสูงเพื่อใช้หลอมแก้วที่เตรียมจากเทคนิค slip casting	X	X										
2561	3. สั่งซื้อสารเคมี และวัสดุที่จำเป็นในกระบวนการหลอมแก้ว	X	X										
2561	4. หาอุณหภูมิของการหลอมและอบ(anneal)แก้วที่เหมาะสม เพื่อให้แก้วหลอมเป็นเนื้อเดียวและไม่แตกร้าว			X									
2561	5. เตรียมสัดส่วนมวลสารและทดลองหลอมแก้วสูตรที่กำหนดขึ้นโดยใช้สารที่เป็นโครงสร้างหลักของเนื้อแก้ว คือ Bi_2O_3 , BaO และ B_2O_3			X	X								
2561	6. เติมไอออนออกไซด์ของธาตุหายาก คือ Eu_2O_3 ที่มีสัดส่วนการเติมที่แตกต่างกัน				X	X							
2561	7. ตัดและขัดชิ้นงานแก้วด้วยผงลูมินาเพื่อให้เหมาะสมกับการวัดด้วยหลักการทางฟิสิกส์ ให้มีขนาดเท่ากันทุกชิ้นงาน					X	X						
2561	8. วัดความหนาแน่นของระบบแก้วโดยอาศัยหลักของอาร์คิมิดีสก์						X	X					
2561	9. คำนวณมวลโมเลกุลของแก้ว เพื่อคำนวณหาค่าปริมาตรเชิงโมลของแก้ว							X					
2561	10. วัดช่วงการดูดกลืนแสงโดยเครื่องเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer เพื่อศึกษาระดับพลังงาน(Energy level)ของธาตุหายากที่มีอยู่ในโครงสร้างแก้วเพื่อหาค่าพลังงานการกระตุ้น (excitation energy) ของการเปล่งแสง (luminescence) ที่ถูกต้อง							X	X				
2561	11. ศึกษาสมบัติ โฟ โท ลู มิ เน ส เซ นซ์ (Photoluminescence) โดยเลือกพลังงานกระตุ้นที่เหมาะสม (Excitation energy) และเปรียบเทียบค่าความเข้มของแสงที่เปล่งออกมา เพื่อได้แก้วที่มีความเข้มแสงสูงสุด								X	X			

ปี	กิจกรรม	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.
2561	12. ศึกษาสีของการเปล่งแสงโดยการคำนวณและวิเคราะห์ค่าสีจากระบบ CIE 1931									X	X		
2561	13. สรุปลงความเป็นไปได้ในการนำวัสดุแก้วที่ได้รับการพัฒนาและปรับปรุงแล้วไปใช้งานในด้านอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง										X	X	
2561	14. เขียนบทความเผยแพร่ลงในวารสารระดับนานาชาติ									X	X	X	X
2561	15. เขียนและส่งรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์										X	X	X

หมายเหตุ : แผนการดำเนินงาน อาจมีการเปลี่ยนแปลงตามความเหมาะสม



บทที่ 2

ทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

แก้ววิทยาศาสตร์ (science glasses) โครงสร้างแก้ว (structure of glass) และสมบัติแก้ว (properties of glass)

เมื่อจินตนาการภาพการทดลองทางวิทยาศาสตร์ คนส่วนมากจะจินตนาการถึงนักวิทยาศาสตร์ผมยุงทำการทดลองวิทยาศาสตร์โดยใช้อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ (laboratory equipment) และเครื่องแก้วทางวิทยาศาสตร์ (laboratory glassware) ใส่สารเคมีวางเรียงรายอยู่เต็มไปหมดและมีควันสีขาวลอยออกมาจากการทดลองนั้น เครื่องแก้วที่พบเห็นได้ เช่น หลอดทดลอง (test tube) ปีกเกอร์ (beaker) ขวดก้นกลม (round bottom flask) เป็นต้น ซึ่งเครื่องแก้วนี้ไม่รวมอยู่ในกลุ่มของสารเคมี (chemicals) และกลุ่มของเครื่องมือ แต่จะแยกออกมาเป็นกลุ่มของเครื่องแก้วต่างหาก แน่แน่นอนว่าเครื่องแก้วมีสำคัญอย่างมากในการทำปฏิบัติการเพราะมีความจำเป็น 3 ประการดังนี้

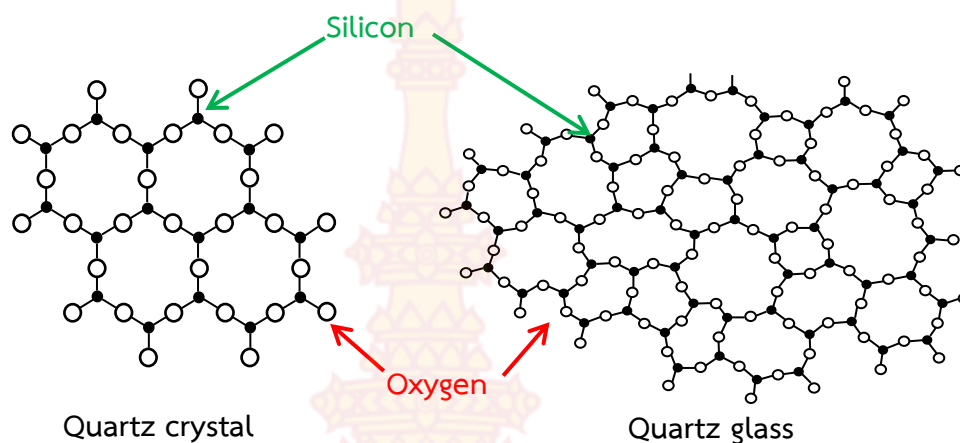
1. แก้วมีความใส ทำให้สังเกตเห็นปฏิกิริยาภายในได้อย่างชัดเจน
2. เป็นวัสดุที่มีความเสถียรมาก ไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมีอื่นได้ง่าย
3. ง่ายต่อการออกแบบเป็นรูปร่างต่าง ๆ เพื่อใช้สร้างอุปกรณ์ที่มีรูปร่างเหมาะสมกับการทดลอง

นอกจากนี้ยังสามารถซ่อมแซมได้หากชำรุด

2.1.1 สมบัติและโครงสร้างของแก้ว (structure and properties of glass)

คำจำกัดความที่เป็นมาตรฐานของแก้วเมื่อปี ค.ศ. 1985 คือ “ของแข็งที่ไม่เป็นผลึก” (“noncrystalline solid”) ส่วน ASTM (American Society for Testing Material) ให้คำจำกัดความว่า “เป็นสารอนินทรีย์ที่เกิดจากการหลอมและเย็นตัวลงจนได้สถานะที่มีความคงตัวโดยไม่เกิดเป็นผลึก” แต่หลังจากปีค.ศ. 1985 มีการคิดค้นแก้วที่เกิดจากวัสดุที่เป็นสารอินทรีย์ และโลหะขึ้นมา ทำให้เกิดคำจำกัดความที่มีความถูกต้องมากกว่าคือ “วัสดุใด ๆ ที่มีการเย็นตัวลงเร็วเพียงพอที่ทำให้ไม่เกิดโครงสร้างที่เป็นผลึก”

ทำไมแก้วจึงมีคุณสมบัติแตกต่างกัน พิจารณาได้จากโครงสร้างของผลึกควอตซ์ (quartz crystal) และแก้วควอตซ์ (quartz glass) โดยการเปรียบเทียบโครงสร้างในระดับโมเลกุล



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของผลึกควอตซ์ (quartz crystal) และแก้วควอตซ์ (quartz glass)

ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของผลึกควอตซ์ คือ ซิลิคอน (Si) และ ออกซิเจน (O) โดยมีสูตรเคมีเป็น SiO_2 ไม่มีธาตุอื่นปนอยู่ ซึ่ง SiO_2 จะเป็นส่วนประกอบหลักของแก้วทั่ว ๆ ไป โครงสร้างของผลึกควอตซ์จะมีการจัดเรียงเป็นรูปทรงแบบเตตระฮีดรอน (tetrahedral) ที่เกิดจากอะตอมออกซิเจน และมีอะตอมของซิลิคอนอยู่ในช่องว่างแบบเตตระฮีดรอน (tetrahedral hole) ซึ่งอะตอมออกซิเจน 2 อะตอมจะเชื่อมต่อกับออกซิเจนอะตอมอื่นในลักษณะ 3 มิติ (ดังภาพซ้าย) และมีความเป็นระเบียบของโครงสร้าง(เป็นผลึก) เมื่อเราหลอมผลึกควอตซ์ และทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว การเชื่อมต่อแบบผลึกจะเปลี่ยนเป็นการเชื่อมต่อแบบไม่เป็นระเบียบ (ภาพด้านขวา) เรียกชื่อใหม่ว่า “fused quartz” “fused silica” หรือ “quartz glass” จะเห็นได้ว่าโครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงไป ทำให้คุณสมบัติทางกายภาพเปลี่ยนไป นอกจากนั้นเรายังสามารถเติมสารเคมีอื่นๆ ลงไปเพื่อปรับเปลี่ยนโครงสร้างและคุณสมบัติทางเคมี เช่นเติมโลหะสีมีสีลงไปเพื่อให้มีสีสันต่าง ๆ ตามความต้องการในการใช้งาน

2.1.2 สมมติฐานการเกิดแก้วในระดับอะตอม (Atomic Hypothesis of Glass Formation)

โดยทั่วไปแล้วธาตุในหมู่ที่ 5 และ 6 สามารถเกิดเป็นแก้วได้ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม เช่น ฟอสฟอรัส (Phosphorus) ออกซิเจน (Oxygen) ซัลเฟอร์ (Sulphur) เซเลเนียม (Selenium) และเทลลูเรียม (Tellurium) นอกจากธาตุที่กล่าวมาแล้วนั้น สารประกอบออกไซด์บางชนิดสามารถเกิดเป็นแก้วได้ด้วย ตัวอย่างเช่น โบรอนออกไซด์ (B_2O_3) ซิลิกอนออกไซด์ (SiO_2) เจอมนเนียมไดออกไซด์ (GeO_2) และฟอสฟอรัสออกไซด์ (P_2O_5) และด้วยเหตุที่ว่าสารประกอบออกไซด์บางชนิด เมื่อนำมาผสมเข้าด้วยกันสามารถทำให้เกิดเป็นแก้วได้ จึงมีการแบ่งส่วนประกอบพื้นฐานในการเกิดเป็นแก้วออกเป็น 3 ประเภท โดยจำแนกตามหน้าที่คือ โครงข่ายแก้ว หรือการก่อตัวเป็นแก้ว (Network Former หรือ Glass Former)

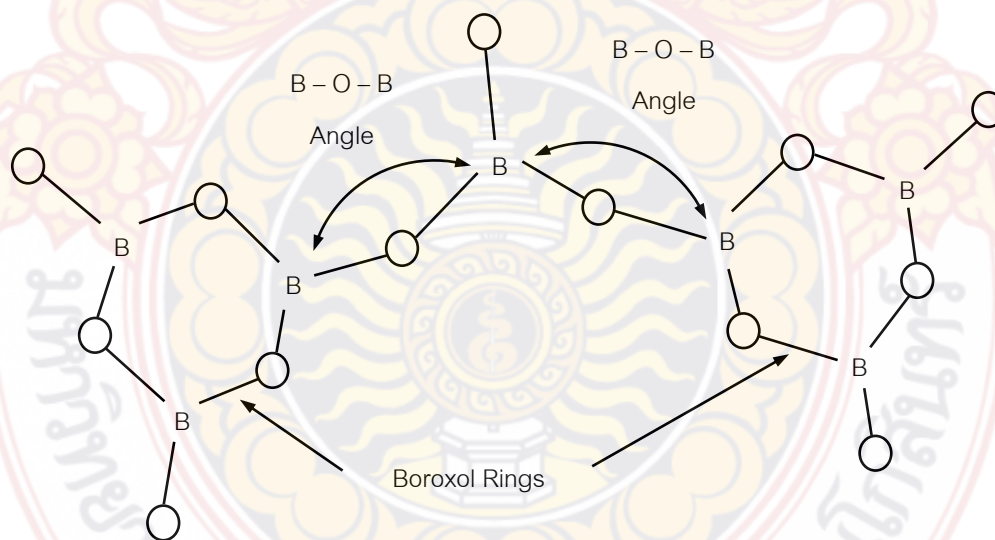
โครงข่ายแก้ว (Network Former) เป็นกลุ่มของการประกอบออกไซด์ที่สามารถเกิดเป็นแก้วได้ด้วยตัวเองภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม เช่น SiO_2 , GeO_2 , As_2O_3 , P_2O_5 และ B_2O_3 กลุ่มของสารประกอบออกไซด์ที่

ทำหน้าที่เป็นโครงข่ายแก้ว มักมีโครงสร้างที่เป็น Tetrahedral และจะมี Bond strength สูง (Single bond strength > 80 kcal/mol)

Network Modifier เป็นกลุ่มของสารประกอบออกไซด์ที่ทำหน้าที่ทำลายความต่อเนื่องของโครงสร้างที่เกิดจากพวกโครงข่ายแก้ว สารประกอบออกไซด์ในกลุ่มนี้จะมีค่า Bond strength ต่ำ (Single bond strength < 60 kcal/mol) มักเป็นสารประกอบออกไซด์ที่อยู่ในกลุ่มของ Alkali metal oxide เช่น Li_2O , Na_2O , K_2O หรือกลุ่มของ Alkali earth oxide เช่น CaO และ MgO เป็นต้น

Intermediate จะเป็นกลุ่มของสารประกอบออกไซด์ ที่ทำหน้าที่เชื่อมโครงสร้างสารประกอบออกไซด์ที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ เช่น Al_2O_3 , BeO , TiO_2 , ZrO_2 เป็นต้น ซึ่งมักจะเป็นกลุ่มที่มีเวเลนซ์ (valence) ต่ำ แต่เลขที่มีโคออดิเนต (coordination number) สูงกว่าส่วนประกอบพื้นฐาน 2 ประเภทแรก ตัวอย่างของสารประกอบออกไซด์ที่จำแนกเป็น Network Former, Network Modifier และ Intermediate

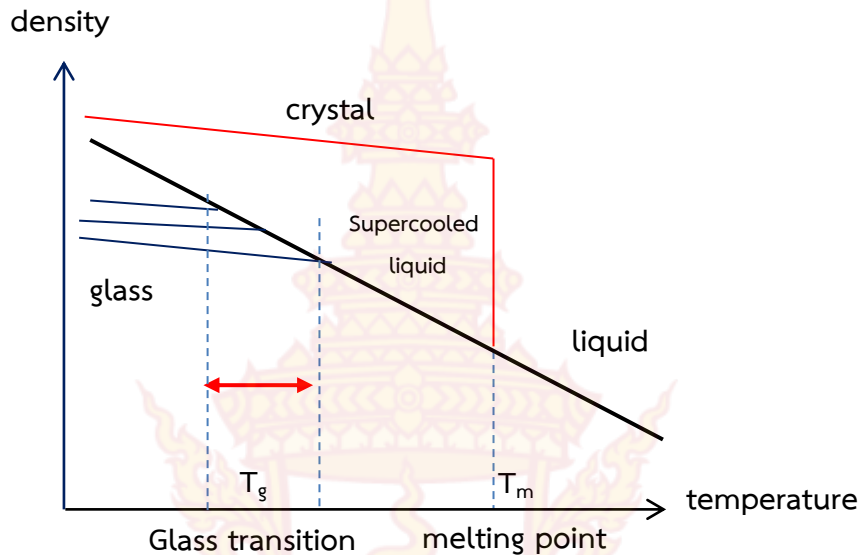
โบรอนออกไซด์ หากมีอยู่ในเนื้อแก้วโดยประมาณน้อยกว่าร้อยละ 28 โดยน้ำหนัก จะทำหน้าที่เป็นตัวสร้างโครงข่าย แต่หากมีปริมาณมากกว่านั้นจะเป็นตัวช่วยให้แก้วหลอม (Fluxing agent) ย่างขึ้นออกไซด์ชนิดนี้มีผลทำให้แก้วทนความร้อนและทนต่อการกร่อนของสารเคมีได้ดีทำให้แก้วมีความแวววาว แต่อย่างไรก็ตาม โบรอนออกไซด์จะมีผลต่อเนื้อแก้วในการลดค่าความหนืดของแก้วหลอม เพิ่มค่าการขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนได้มากกว่ากรณีที่ใช้โซเดียมออกไซด์เป็นตัวช่วยหลอม วัตถุประสงค์ให้ B_2O_3 ได้แก่ กรดบอริก (boric acid) และบอแรกซ์ (borax) เป็นต้น



รูปที่ 2.2 โครงสร้างวงแหวนของสารประกอบโบรอนออกไซด์

2.1.3 สมบัติของวัสดุแก้ว

สมบัติพื้นฐานของวัสดุอสัณฐานหรือแก้วคือ Glass transition temperature หรือ T_g จึงเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอันหนึ่งที่จะบอกว่าวัสดุนั้นเป็นวัสดุอสัณฐานหรือแก้วหรือไม่



รูปที่ 2.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น เปรียบเทียบกันระหว่างวัสดุแก้วกับผลึก สำหรับผลึกนั้นเมื่อเราเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นจนถึงจุดหนึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของมันอย่างรวดเร็ว นั่นคือเกิดการหลอมละลายกลายเป็นของเหลวที่จุดหลอมเหลว หรือ T_m แต่สำหรับแก้วแล้วจะเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นเพียงเล็กน้อยที่ Glass transition temperature หรือ T_g กลายเป็นของเหลวที่มีความหนืดสูงมาก เรียกว่า supercooled liquid ก่อนที่จะหลอมเหลวเป็นของเหลวต่อไป เนื่องจากแก้วเกิดจากของเหลวที่ถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยไม่มีการตกผลึก แก้วจึงมีพฤติกรรมเหมือนของเหลวที่หนืดมากสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปตามแรงกระทำจากภายนอกได้ แต่ในความเป็นจริงการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยและจะเกิดขึ้นช้ามากจนไม่อาจสังเกตได้

สมบัติของวัสดุแก้วนั้นมักจะขึ้นอยู่กับสารชนิดต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบในแก้ว ทำให้ลักษณะพันธะในแก้วเปลี่ยนแปลงไปซึ่งจะส่งผลไปยังลักษณะทางเคมีและกายภาพของแก้วนั้น

2.1.4 สมบัติทางกลของวัสดุแก้ว

2.1.4.1 Elasticity

แก้วเป็น elastic material ที่สมบูรณ์แบบ คือมันจะไม่เปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร แต่มันมีความเปราะ ซึ่งหมายถึงมันจะแตกเมื่อได้รับความเค้น (stress) เพิ่มขึ้น

a. Young's modulus, E เป็นค่าที่แสดงถึงแรงดึงตามทฤษฎีที่ใช้ในการทำให้แก้วยืดออกให้ยาวขึ้นเท่ากับความยาวเดิมของมัน หน่วยมีค่าเป็นแรงต่อพื้นที่ สำหรับแก้วตามมาตรฐานยุโรปจะมีค่า $E = 7 \times 10^{10} \text{ Pa} = 70 \text{ GPa}$

b. Poisson's ratio : μ (lateral contraction coefficient) เมื่อวัสดุถูกดึงด้วยแรงขนาดตามขวางของมันจะลดลง ค่า μ คือความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยที่ลดลงตามทิศทางที่ตั้งฉากกับแรง กับหน่วยของความเครียด (strain) ตามทิศทางของแรง สำหรับแก้วในงานก่อสร้างค่า $\mu = 0.22$

2.1.4.2 Compressive strength

แก้วมีค่า compressive strength สูงมาก คือ 1000 N/mm^2 หรือ 1000 MPa หมายถึงในการทำให้แก้วขนาด 1 cm^3 แตกละเอียดลงได้ต้องให้น้ำหนักถึง 10 ตัน

2.1.4.3. Tensile strength

แก้วตามปกติจะมี tensile strength ประมาณ $40 \text{ MPa} (\text{N/mm}^2)$ และอาจทำให้เพิ่มสูงขึ้นถึง $120\text{-}200 \text{ MPa}$ เมื่อผ่านกระบวนการเพิ่มความแข็งแรงต่าง ๆ

2.1.5 สมบัติทางกายภาพอื่น ๆ ของวัสดุแก้ว

ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่นของแก้วธรรมดาประมาณ 2.5 ซึ่งทำให้กระจกที่มีความหนา 1 มม. และขนาด 1 m^2 มีน้ำหนัก 2.5 กก.

Lead silicate	2.85-3.12
Soda-lime	2.48-2.60
Aluminosilicate	2.47-2.65
Borosilicate	2.24-2.41
96%Silica (Vycor)	2.20

2.1.6 สมบัติทางความร้อนของวัสดุแก้ว

2.1.6.1 การขยายตัวเชิงเส้น (Linear expansion)

ค่า Linear expansion จะแสดงด้วยค่าสัมประสิทธิ์ซึ่งวัดจากการยืดออกต่อหน่วยความยาว เมื่อมีการเปลี่ยนอุณหภูมิทุก $1 \text{ }^\circ\text{C}$ โดยทั่วไปค่านี้จะวัดที่อุณหภูมิในช่วง $20 - 300 \text{ }^\circ\text{C}$ ค่าสัมประสิทธิ์ของ linear expansion ของแก้วคือ $9 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ เช่น แก้วความยาว 2 เมตร เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น $30 \text{ }^\circ\text{C}$ จะยาวเพิ่มขึ้น $= (2000 \text{ mm.}) \times (9 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}) \times (30 \text{ }^\circ\text{C}) = 0.54 \text{ mm.}$

2.1.6.2 ความเค้นเชิงความร้อน (Thermal stress)

เนื่องจากแก้วมีการนำความร้อนที่ต่ำ การทำให้แผ่นแก้วร้อนหรือเย็นเฉพาะที่จะทำให้เกิดความเค้นที่ทำให้แผ่นแก้วแตกได้ เช่นกระจกที่ใส่กรอบและทิ้งไว้ในที่มีแสงแดดจัด อุณหภูมิของขอบกระจกที่อยู่ในกรอบจะเพิ่มขึ้นช้ากว่าส่วนอื่น จึงเป็นเรื่องจำเป็นในการคำนึงถึงคุณสมบัติข้อนี้ในการใช้งานกระจก การทำ heat treatment จะทำให้แก้วทนความต่างของอุณหภูมิได้ประมาณ 150 – 200 °C

2.1.7 สมบัติทางแสงของวัสดุแก้ว

2.1.7.1 Spectrophotometric characteristics

การแผ่รังสี (Radiation)

เมื่อแสง (solar) ตกกระทบแก้วจะมีส่วนหนึ่งที่สะท้อนกลับ(reflected) ส่วนหนึ่งถูกดูดกลืน(adsorbed) และส่องผ่านไป (re-transmitted) อัตราส่วนระหว่างความเข้มของแสงเหล่านี้กับแสงเริ่มต้น (incident solar radiation) จะบ่งบอกถึงสมบัติของแก้ว 3 ตัว คือ reflectance factor, absorptance factor และ transmittance factor ซึ่งเมื่อพล็อตสมบัติแต่ละชนิดที่ความยาวคลื่นต่างๆ กัน ก็จะได้กราฟในลักษณะของสเปกตรัมของแก้ว ซึ่งปัจจัยที่มีผลกระทบต่ออัตราส่วนเหล่านี้ ได้แก่ สีของแก้ว ความหนา และสารเคลือบในกรณีที่แก้วนั้นมีการเคลือบด้วย

Solar factor

solar factor หรือค่า g ของแก้ว คือ เปอร์เซนต์ของพลังงานความร้อนรวมที่เกิดจากแสงที่ผ่านเข้ามาในห้องทางแก้วหรือกระจกนั้น ค่าพลังงานรวมได้จากแสงที่ผ่านเข้ามา โดยตรงกับพลังงานส่วนที่แก้วดูดกลืนไว้ และส่องผ่านออกมาด้านในของห้อง

Light transmittance and reflectance factors

คือ อัตราส่วนของแสงในช่วงคลื่นที่มองเห็น (light) ที่ถูกส่องผ่านหรือสะท้อนกลับกับแสงเริ่มต้น สำหรับกระจกที่หนามากหรือมีการเคลือบหรือ laminated ถึงแม้จะไม่มีสี แต่อาจทำให้แสงที่ส่องผ่านมามีสีเขียวหรือสีฟ้าได้

2.1.7.1 Natural light, daylight factor

สำหรับกระจกหนึ่ง ๆ daylight factor คืออัตราส่วนของแสงภายใน ณ จุดหนึ่ง เทียบกับแสงภายนอก วัดในแนวระนาบจะมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับช่วงเวลาในแต่ละวัน เช่น ในห้องที่มี daylight factor = 0.10 ณ ตำแหน่งที่ใกล้กับหน้าต่าง และ = 0.01 ณ ด้านหลังของห้อง (เป็นค่าเฉลี่ยของห้องปกติ), ที่ระดับความเข้มแสงภายนอก 5000 lux (วันที่ท้องฟ้ามีเมฆมาก) จะทำให้ทราบว่าภายในห้องบริเวณใกล้หน้าต่างจะมีแสงสว่าง 500 lux และด้านหลังห้อง 50 lux และถ้าความเข้มแสงภายนอก 20000 lux (วันที่ท้องฟ้าโปร่ง) จะมีแสงสว่างที่หน้าต่างและด้านหลังห้องเป็น 2000 และ 200 lux ตามลำดับ ซึ่ง factor เหล่านี้จะทำให้สามารถคำนวณเพื่อให้ทราบปริมาณแสงตามธรรมชาติและปริมาณแสงที่ต้องการในห้องหนึ่ง ๆ ได้

2.1.7.2 การเปล่งแสง (Luminescence)

การเปล่งแสงเป็นกระบวนการเปล่งแสงในรูปของพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า(ที่ไม่ใช่พลังงานความร้อน) โดยการกระตุ้นให้วัตถุเปล่งแสงออกมา ซึ่งแบ่งการเปล่งแสง ออกเป็น 2 ประเภท คือ การวาวแสง หรือ ฟลูออเรสเซนซ์ (fluorescence) และ การเรืองแสง หรือ ฟอสฟอเรสเซนซ์ (phosphorescence)

การวาวแสง (Fluorescence) การที่พลังงาน (ที่ไม่ใช่พลังงานความร้อน) กระตุ้นให้วัตถุเปล่งแสงออกมาในช่วงที่มีการให้พลังงานเท่านั้นโมเลกุลของวัตถุดูดกลืนโฟตอนพลังงานสูง (แสงอัลตราไวโอเล็ต : UV) และปล่อยโฟตอนพลังงานต่ำ (แสงที่ตามองเห็น : VIS) กลับออกมา พลังงานที่เปลี่ยนแปลงไปจะกลายเป็นพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในวัตถุ ซึ่งเมื่ออะตอมที่อยู่ในวัตถุดูดกลืนพลังงานจากแสงที่ได้รับการกระตุ้น จะมีการย้ายระดับพลังงานไปในระดับพลังงานที่สูงขึ้นจากนั้นจะคายพลังงานออกมาทันทีในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ

การเรืองแสง (Phosphorescence) การที่พลังงาน (ที่ไม่ใช่พลังงานความร้อน) กระตุ้นให้วัตถุเปล่งแสงออกมา ในช่วงหลังการให้พลังงานวัตถุดูดกลืนพลังงานจากแสงของต้นกำเนิดก่อน แล้วปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสงในเวลาต่อมา เมื่อหยุดการกระตุ้นแล้ว การเปล่งแสงจะยังมีอยู่ต่อไปชั่วระยะเวลาหนึ่ง การเปล่งแสงก็จะหยุดลง การเปล่งแสงแบบ Luminescence ซึ่งเกิดจากการที่อะตอมหรืออิเล็กตรอนเปลี่ยนสถานะจากระดับพลังงานสูงลงมาระดับที่มีพลังงานต่ำกว่า วิธีการกระตุ้นให้พลังงานกับวัสดุที่มีหลายวิธี เช่น การส่องแสง การยิงอิเล็กตรอน การยิงไอออน การเพิ่มความดันและความร้อน ซึ่งเรียก การเปล่งแสง โดยแบ่งตามวิธีการกระตุ้นดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ชื่อเรียกของการลูมิเนสเซนซ์โดยแบ่งตามวิธีการกระตุ้น

ชนิดของการลูมิเนสเซนซ์	วิธีการกระตุ้น
โฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence) - ชนิดสโตกส์ (Stoke Type) - ชนิดแอนติสโตกส์ (Anti-Stoke Type)	แสง
อิเล็กโตรลูมิเนสเซนซ์ (Electroluminescence) - อินทรีนอิเล็กโตรลูมิเนสเซนซ์ - ไดโอดเปล่งแสง	ไฟฟ้า
แคโทดลูมิเนสเซนซ์ (Cathodeluminescence)	อิเล็กตรอน
เทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ (Thermoluminescence)	ความร้อน
ไตรโบลูมิเนสเซนซ์ (Triboluminescence)	การเสียดสี
เคมีคัลลูมิเนสเซนซ์ (Chemiluminescence)	ปฏิกิริยาเคมี

2.1.7 สมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุแก้ว

1. Dielectric constant ที่ความถี่ 1MHz, 20 °C

Glass Ceramic	7.730
Soda-lime	7.200
Potash Soda Lead Silicate	6.700
Borosilicate (Pyrex)	4.600
96% Silica (Vycor)	3.300

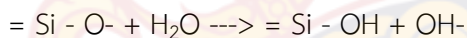
2.1.8 สมบัติทางเคมีของวัสดุแก้ว

เมื่อเทียบกับวัสดุประเภทอื่น ๆ เช่น โลหะ และโพลีเมอร์ แก้วนั้นมีความทนทานต่อสารเคมีมากกว่า จึงนิยมนำมาใช้เป็นภาชนะบรรจุต่าง ๆ แต่อย่างไรก็ตามแก้วก็สามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้

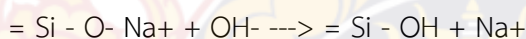
1. ปฏิกิริยาของโครงสร้างแก้วกับความชื้น แก้วที่ทิ้งไว้นานอาจเกิดปฏิกิริยาเคมีกับความชื้นได้ดังต่อไปนี้



สำหรับในสภาพที่เป็นต่าง จะทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับความชื้น



ปฏิกิริยาในสภาพที่เป็นกรด

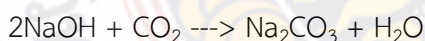


จะเห็นว่าในสภาพที่เป็นต่างจะเกิดปฏิกิริยาที่ต่อเนื่อง ซึ่งทำลายโครงสร้างของแก้วได้มากกว่าสภาพที่เป็นกรด

2. ปฏิกิริยาของ Na_2O กับความชื้น ชั้นของแก้วที่มีปริมาณ Na_2O มากอาจเกิดปฏิกิริยากับความชื้นได้ง่าย ดังต่อไปนี้



NaOH ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับ CO_2 ในอากาศ



เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Blooming โดย Na_2CO_3 มีลักษณะเป็นฝ้าขาวและจะหนาขึ้นเรื่อยๆ และ NaOH ซึ่งเป็นด่างจะกัดกร่อนชั้นซิลิกาด้วย การนำขวดเก่าไปล้างฝ้าขาวนี้ออกและนำไปบรรจุน้ำ อาจพบตะกอนของซิลิกาที่ก้นขวดหรือขวดที่ล้างแล้วเก็บไว้ ก็อาจพบว่ามีสารตกสะเก็ดเป็นแผ่น ๆ ขึ้น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Flaking

2.1.9 การผลิตแก้วและวัสดุสังเคราะห์

1. Melting and Quenching

คือการหลอมแล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในการผลิตแก้วโดยทั่วไป อย่างไรก็ตาม เทคนิคต่างๆ ในการขึ้นรูปแก้วในอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ นั้น จะแตกต่างกันออกไป

2. Sol-gel method

คือ การใช้สารละลายของสารอนินทรีย์และตัวเร่ง ทำให้เกิดปฏิกิริยา polymerization ขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ โดยวิธีนี้สามารถใช้ในการ coat ผิววัสดุ การดึงเป็นเส้นใย และการผลิตฟิล์มบาง

3. Sputtering method

คือ การทำให้เกิดความต่างศักย์สูงในสุญญากาศ ทำให้เกิดไอของสารขึ้นไปทำปฏิกิริยาหรือเกาะตัวบน target ซึ่งวิธีการนี้มักจะใช้ในการผลิตฟิล์มบางต่าง ๆ

4. วิธีการอื่นๆ ได้แก่ วิธีการสำหรับผลิตแก้วพิเศษบางประเภท เช่น

- แท่งแก้ว preform สำหรับผลิตใยแก้วนำแสง
- แผ่นโซล่าเซลล์

2.1.10 การใช้งานวัสดุแก้ว

วัสดุศาสตร์จะแบ่งชนิดของแก้วตามประเภทของการใช้งานดังต่อไปนี้

1. แก้วในงานก่อสร้าง (Constructions) เช่น กระจกแผ่น กระจกฉนวน อิฐแก้ว (Glass brick) เป็นต้น ต้องมีความแข็งแรง ความโปร่งใสสูง สามารถผลิตในปริมาณมากเพื่อให้คุ้มกับการลงทุน



ที่มา : <https://talk.mthai.com/inbox/432784.html>

รูปที่ 2.4 แก้วในงานก่อสร้าง (Constructions) : โบสถ์รองเท้าแก้วสันสูง ตั้งอยู่ชายฝั่งทะเลมณฑลเจียงอี ทางตะวันตกเฉียงใต้ของไต้หวัน

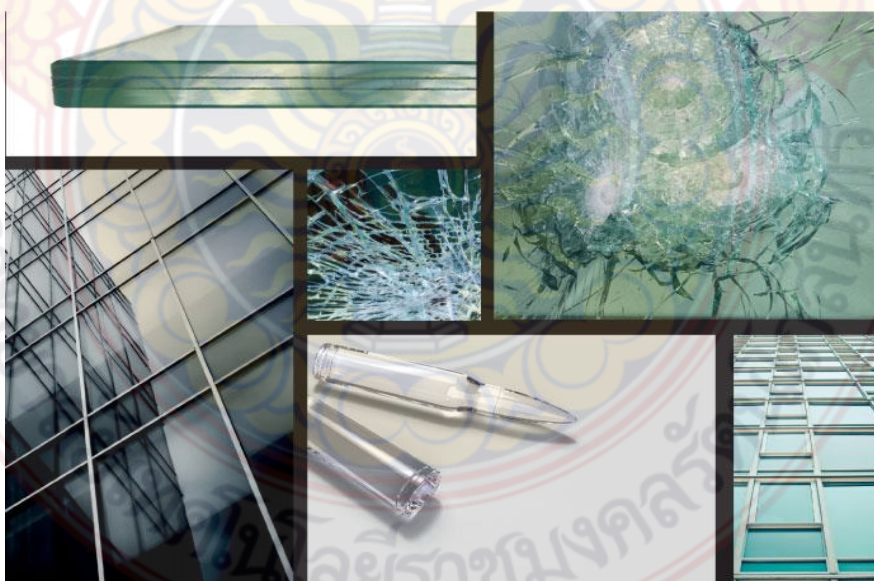
2. แก้วบรรจุภัณฑ์ (Containers) เช่น ขวด แก้วน้ำ และภาชนะต่างๆ ควรจะมีความทนทานทางกายภาพและทางเคมีระดับในระดับหนึ่ง และควรสามารถนำกลับมาล้างใช้ใหม่อย่างน้อย 50 ครั้ง



ที่มา : <https://www.thaipng.com/png-fad0pz/>

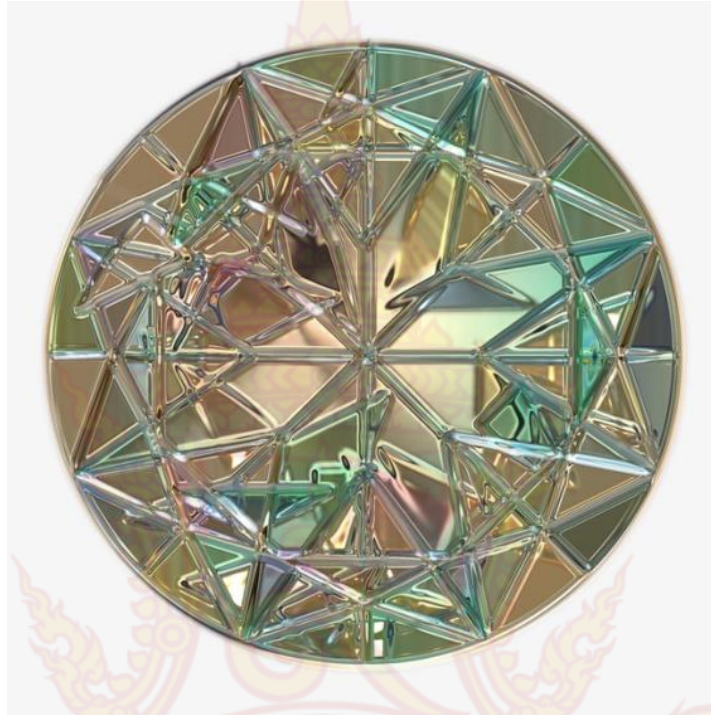
รูปที่ 2.5 แก้วบรรจุภัณฑ์ (Containers)

3. แก้วที่ผ่านการแปรรูป (Specialty glass) เช่น กระจกนิรภัยชนิดต่างๆ กระจกฉนวน กระจกเสริมลวด เป็นการนำกระจกแผ่นแบบ float มาอบ ดัด ตัดแต่ง ซึ่งจะทำให้ได้กระจกที่มีรูปร่างตามที่ต้องการ มีความทนทานมากขึ้น กระจกนิรภัยจะช่วยป้องกันอันตรายที่เกิดจากการแตกได้



รูปที่ 2.6 แก้วที่ผ่านการแปรรูป (Specialty glass)

4. แก้วเครื่องประดับ ตกแต่ง (Ornaments & Figurines) เช่น แก้วคริสตัล ของชำร่วยต่างๆ แก้วสลัก เจียรไน มักเป็นแก้วพวก borosilicate ซึ่งสามารถนำมาเป่าขึ้นรูปได้ง่าย หรือแก้วผสมตะกั่ว ซึ่งจะทำให้แกะสลักและเจียรไนได้ง่าย



ที่มา : https://th.pngtree.com/freepng/multicolored-glass-decoration_2765733.html

รูปที่ 2.7 แก้วเครื่องประดับตกแต่ง (Ornaments & Figurines)

5. แก้วในอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ (Electronics & Electrical Glass) เช่น Cathode-ray tubes, capacitors, resistors, computer components และ print circuits เป็นต้น แก้วที่ใช้จะต้องมีค่า dielectric ที่ดี มีการสูญเสียทางไฟฟ้าน้อยในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกันสูง หน้าจอทีวี แก้วสำหรับการป้องกันการแผ่รังสี ก็ควรมีปริมาณตะกั่วที่สูง



ที่มา : <https://pxhere.com/en/photo/1002611>

รูปที่ 2.8 แก้วในอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ (Electronics & Electrical Glass)

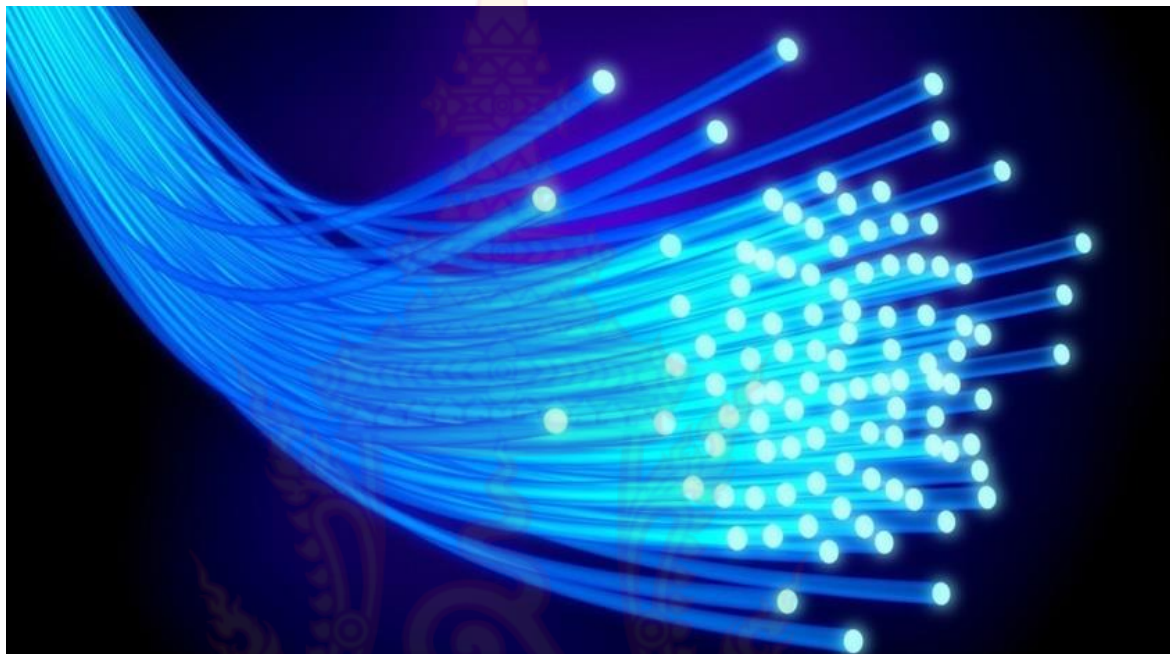
6. แก้วในงานทางแสง (Optical glass) เช่น หลอดไฟ ต้องมีทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศ ส่วนเลนส์ ใยแก้วนำแสง ต้องใช้วัตถุดิบที่มีความบริสุทธิ์สูง



ที่มา : <https://www.youtube.com/watch?v=PeMGRMwarKI>

รูปที่ 2.9 แก้วในงานทางแสง (Optical glass)

7. แก้วในงานอื่น ๆ (Other Glass) เช่น ใยแก้ว โฟมแก้ว วัสดุคอมโพสิต ต้องสามารถใช้ในการที่ ต้องการความแข็งแรง ทนต่อการกัดกร่อน ทนความร้อน และมีความต้านทานไฟฟ้าที่ดี ขึ้นอยู่กับประเภทของงานที่จะนำไปใช้



ที่มา : <https://www.pcgamer.com/fiber-vs-cable-gaming-which-is-best/>

รูปที่ 2.10 แก้วในงานอื่น ๆ (Other Glass)

2.1.11 อุตสาหกรรมแก้วและกระจก

อุตสาหกรรมกระจกแผ่นในประเทศไทย

เริ่มต้นครั้งแรกจากการก่อตั้ง บริษัท กระจกไทย จำกัด ด้วยทุนจดทะเบียน 6 ล้านบาท ในปี 2506 ต่อมาบริษัท อาซาฮิกลาส จำกัดของญี่ปุ่น ได้เข้ามาถือหุ้น 50% จึงได้เปลี่ยนชื่อเป็น บริษัท กระจกไทย-อาซาฮิ จำกัด และมีบริษัทในเครือ บริษัท บางกอกโพลตกลาส จำกัด ก่อตั้งขึ้นในปี 2534 ในช่วงแรกนี้ กลุ่มบริษัทกระจกไทย-อาซาฮิ เป็นกลุ่มบริษัทที่มีส่วนแบ่งตลาดมากกว่า 90%

นอกจากนี้รัฐบาลได้ดำเนินนโยบายจำกัดกำลังการผลิตของอุตสาหกรรมกระจกในไทย ทำให้ไม่เกิดคู่แข่งรายใหม่ และยังมีมาตรการคุ้มครองด้านภาษี คือ เก็บภาษีสรรพสามิตนำเข้ากระจกสูงถึง 50% ทำให้ไม่มีการแข่งขันจากการนำเข้ามากนัก

ต่อมาได้มีการร่วมลงทุนระหว่างเครือซีเมนต์ไทย กับ Gardian industries ของสหรัฐอเมริกา ก่อตั้งบริษัท กระจกสยามการ์เดียน จำกัด ในปี 2535 ทำให้มีการแข่งขันในประเทศขึ้น นอกจากนี้ยังมีบริษัท กระจกสยาม จำกัด ซึ่งผลิตกระจกแผ่นสีชา กระจกลอยลายในราคาต่ำ ทำให้ในปี 2539 ทำให้บริษัทกระจกไทย-อาซาฮิ มี

ส่วนแบ่งตลาดลดลงเหลือประมาณ 32% บริษัทบางกอกโพลติกลาส 18% บริษัทกระจกสยามการ์เดียน 22% บริษัทกระจกสยาม 8% และกระจกนำเข้า 20%

หลังจากที่ทั้งบริษัทกระจกไทย-อาซาฮี และกระจกสยามการ์เดียน ได้ขยายกำลังผลิตโดยตั้งโรงงานใหม่ที่ระยองทำให้ในปี 2540 ประเทศไทยมีกำลังผลิตกระจกรวมประมาณ 834,500 ตัน/ปี ซึ่งเกินปริมาณความต้องการภายในประเทศ ทำให้เริ่มมีการส่งออกกระจกที่เกินความต้องการไปต่างประเทศ และยังก่อให้เกิดการพัฒนาผลิตภัณฑ์ การเพิ่มประสิทธิภาพการแข่งขันด้วยกลยุทธ์ทางการค้า และการลดต้นทุนต่างๆ เช่น บริษัทกระจกไทย-อาซาฮี เริ่มผลิตกระจกแปรรูปต่างๆ ในปี 2538 พร้อมกับสามารถลดต้นทุนการบริหารงานได้ถึง 8-10% ลดอัตราการสูญเสียจากการขนย้ายได้ไม่เกิน 1% จากเดิม 5-7% และได้รับการรับรองระบบคุณภาพ ISO9002 ในปี 2539 ส่วนบริษัทกระจกสยามการ์เดียน ได้ใช้ระบบ QCS (Quality, Cleanliness, Safety) เพื่อสร้างความพอใจสูงสุดให้แก่ลูกค้า การใช้อุปกรณ์และเครื่องจักรที่ทันสมัยในการผลิตและการให้บริการ เช่น ใช้ระบบ Bar code และระบบคอมพิวเตอร์ในการควบคุมการผลิต การควบคุม stock และการขาย

ในปี 2536 ประเทศไทยได้ลดภาษีนำเข้ากระจกตามข้อตกลงการจัดตั้งเขตการค้าเสรีอาเซียน (AFTA) ทำให้มีการนำเข้ากระจกจากอินโดนีเซียและมาเลเซียมากขึ้น และเนื่องจากภาษีนำเข้ากระจกจะต้องลดลงไปเรื่อย ๆ ผู้ประกอบการเรียกร้องให้รัฐบาลปรับโครงสร้างภาษี โดยเฉพาะภาษีการนำเข้าเครื่องจักรและวัตถุดิบ แต่เนื่องจากการนำเข้ากระจกคุณภาพสูงที่ไม่ได้ผลิตในกลุ่มอาเซียนก็ยังมีปริมาณไม่ลดลง จึงเชื่อว่าผู้ผลิตกระจกไทยจำเป็นต้องมีการปรับตัวในแนวทางที่จะเน้นการผลิตกระจกที่มีคุณภาพสูงขึ้น การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ พร้อมกับควบคุมการสูญเสียให้น้อยลง ซึ่งน่าจะเป็นแนวทางที่จะทำให้อุตสาหกรรมกระจกไทยสามารถมีศักยภาพแข่งขันได้อย่างยั่งยืนในอนาคต

2.1.12 ธาตุหายาก (rare earths)

ธาตุหายาก หรือ “rare earths” เป็นกลุ่มโลหะธาตุที่อยู่ในอนุกรมธาตุแลนทาไนด์ (lanthanide series) บางครั้งอาจเรียกว่า กลุ่มแลนทานันส (lanthanous) หรือ กลุ่มแลนทานอยด์ (lanthanoids) ซึ่งประกอบด้วยธาตุ 15 ธาตุ มีเลขอะตอมตั้งแต่ 57 ถึง 71 ธาตุ ทั้งหมดนี้มีตำแหน่งตามตารางธาตุจัดอยู่ในกลุ่ม III B (รูปที่ 1) นอกจากนี้ อิตเทรียม (Y) เลขอะตอม 39 และสแกนเดียม (Sc) เลขอะตอม 21 มักนับรวมไว้ในกลุ่มของธาตุหายากด้วย เพราะมีคุณสมบัติทางเคมีที่คล้ายคลึงมาก

PERIODIC TABLE OF DEVOPS TOOLS (V2) (V1) EMBED DOWNLOAD ADD

OS	Open Source	SCM	Database Mgmt	Build
OS	Open Source	SCM	Database Mgmt	Build
Fr	Free	CI	Repo Mgmt	Testing
Fm	Freemium	Deployment	Config / Provisioning	Containerization
Pd	Paid	Cloud / Iaas / Paas	Release Mgmt	Collaboration
En	Enterprise	BI / Monitoring	Logging	Security

Gh	Gt	Dm	Bb	Lb	Gd	Pu	An	Sl	Dk	Az	Aws
GitLab	Git	Docker	Bitbucket	Liquibase	Deployment Manager	Puppet	Anable	Salt	Docker	Azure	Amazon Web Services
Gf	Rg	Mv	Gr	At	Fn	Se	Ga	Dh	Jn	Ba	Tr
Gradle	Redgate	Maven	Gradle	ANT	Ansible	Selenium	Getling	Docker Hub	Jenkins	Bamboo	Travis CI
Gt	Dt	Gt	Gp	Br	Cu	Cj	Qu	Npm	Cs	Vs	Cr
TestNG	Delphix	Subversion	Grunt	Broccoli	Cucumber	Cucumber	JUnit	npm	CodeShip	Visual Studio	CircleCI
Hx	Dp	Sb	Mk	Ck	Jt	Jm	Tn	Ay	Tc	Sh	Cc
Helix	Delphix	Subversion	Make	CMake	JUnit	JMeter	TestNG	Artifactory	TeamCity	Shippable	CruiseControl
Cw	Id	Msb	Rk	Pk	Mc	Xltv	Jm	Nx	Co	Ca	So
SPW	Idera	MSBuild	Rake	Pecker	Mocha	XL TestView	Jasmine	Nexus	Continuum	Continuum CI	Solano CI
Xl	Ur	Bm	Hp	Au	Pl	Sr	Tfs	Tr	Jr	Rf	Sl
XL Release	UrbanCode Release	BMC Release Process	HP Codar	Automic	Pultrona Release	Serena Release	Team Foundation	Trello	Jira	HipChat	Slack
Ki	Nr	Ni	Zb	Dd	El	Ss	Sp	Le	Sl	Ls	Gr
Kibana	New Relic	Nagios	Zabbix	Datadog	Elasticsearch	StackState	Splunk	Logentries	Sumo Logic	Logstash	Graylog
Fd	Pv	Sn	Ff	Os	Flowdock	Phabot Teacher	ServiceNow	Flowdock	Phabot Teacher	ServiceNow	Flowdock
Ki	Nr	Ni	Zb	Dd	El	Ss	Sp	Le	Sl	Ls	Gr
Kibana	New Relic	Nagios	Zabbix	Datadog	Elasticsearch	StackState	Splunk	Logentries	Sumo Logic	Logstash	Graylog
Fd	Pv	Sn	Ff	Os	Flowdock	Phabot Teacher	ServiceNow	Flowdock	Phabot Teacher	ServiceNow	Flowdock

รูปที่ 2.11 แสดงธาตุหายาก หรือ “rare earths” ในอนุกรมธาตุแลนทาไนด์ประกอบด้วยธาตุ 15 ธาตุ

กลุ่มธาตุหายากมีการแบ่งจัดจำแนกเป็นกลุ่มย่อยตามระบบที่ USGS ใช้โดยยึดหลักตามที่ International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) ได้กำหนดไว้ออกเป็น 2 กลุ่มย่อย คือ

กลุ่มธาตุหายากเบา (light rare earth elements: LREE) หรือกลุ่มซีเรียม (Cerium group) และกลุ่มธาตุหายากหนัก (heavy rare earth elements: HREE) หรือกลุ่มอิตเทรียม (Yttrium Group)

-กลุ่มธาตุหายากเบาซึ่งประกอบด้วย 8 ชนิดธาตุที่มีเลขอะตอม 57 ถึง 64 ได้แก่ แลนทานัม (La) ซีเรียม (Ce) พรซีโอดิเมียม (Pr) นีโอดิเมียม (Nd) โพรมิเทียม (Pm) ซาแมเรียม (Sm) ยูโรเพียม (Eu) และ แกโดลิเนียม (Gd)

- กลุ่มธาตุหายากหนัก ซึ่งประกอบด้วย 8 ชนิดธาตุที่มีเลขอะตอม 65 ถึง 71 ได้แก่ เทอเบียม (Tb) ดิสโพรเซียม (Dy) โฮลเมียม (Ho) เออร์เบียม (Er) ทูเลียม (Tm) อิตเทอโรเบียม (Yb) ลูทีเทียม (Lu) และ อิตเทรียม (Y) ทั้งนี้ธาตุสแกนเดียม (Sc) นั้นไม่สามารถจัดเข้ากลุ่มย่อยกลุ่มใดได้ เนื่องจากลักษณะของอะตอมที่มีขนาดเล็กกว่าธาตุตัวอื่น ๆ ในกลุ่มในธรรมชาตินั้นมีมากกว่า 200 ชนิดที่มีธาตุหายากเป็นส่วนประกอบในปริมาณมากน้อยแตกต่างกันไป

การจำแนกธาตุหายาก การกำเนิดแรหหายาก-ธาตุหายาก ใหธาตุหายาก(rare earth minerals)” หรือในบางครั้งอาจเรียกสั้น ๆ ว่า“แรหายาก” คือแร่ที่มีกลุ่มธาตุหายากเป็นองค์ประกอบหลักอยู่ในโครงสร้างผลึกโดยมีเพียงแรหลัก 4 ชนิดคือแบสแตเนสไซต์ (bastnaesite: (Ce, La)(CO₃)F) โมนาไซต์(monazite: (Ce, La, Th)PO₄) ซีโนไทม(xenotime: YPO₄) และอะพาไทต์ที่ใหธาตุหายาก (REE-bearing apatite: (Ca, Ce)₅(PO₄)₃(F,OH,Cl)₃) ในธรรมชาติแหล่งแร่สำหรับธาตุหายากสามารถเกิดสัมพันธ์กับหินหลายประเภท หลากชนิดทั้งหินอัคนี หินตะกอน และหินแปรซึ่งสามารถจำแนกและจัดรวมกลุ่มแหล่งธาตุหายากตามลักษณะ

ความสัมพันธ์ของกระบวนการก่อกำเนิดและสะสมตัว (genetic deposit types) ไตเปิน 2 กลุ่มใหญ่ คือ กลุ่มที่เป็นแหล่งแบบปฐมภูมิ และ กลุ่มที่เป็นแหล่งแบบทุติยภูมิ แหล่งธาตุหายากปฐมภูมิ โดยทั่วไปแมกมาที่เกิดจากการหลอมละลายบางส่วนของเนื้อโลกสวบนบน (upper mantle) และแมกมาที่เกิดจากการหลอมตัวของหินหรือตะกอนจากเปลือกโลกมักมีความสมบูรณ์ของธาตุหายากสูงซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะอะตอมขนาดใหญ่ของธาตุหายาก และภายใต้สภาวะแวดล้อมที่สัมพันธ์กับแมกมาและน้ำแร่อ่อนสำหรับแหล่งธาตุหายากในกลุ่มนี้อาจจำแนกออกได้เป็น 2 กลุ่มย่อย คือ (1) แหล่งที่เกิดสัมพันธ์กับหินคาร์บอเนไทต์และ/หรือหินอัคนีเนื้ออัลคาไลต์ (2) แหล่งที่เกิดไม่สัมพันธ์กับหินคาร์บอเนไทต์หรือหินอัคนีเนื้ออัลคาไลต์ แหล่งที่เกิดสัมพันธ์กับหินคาร์บอเนไทต์และ/หรือหินอัคนีเนื้ออัลคาไลต์ (Carbonatite associated and/or alkaline igneous rock-associated deposits) หินคาร์บอเนไทต์ (carbonatite) คือหินอัคนีชนิดพิเศษที่มีต้นกำเนิดมาจากการหลอมตัวของเนื้อโลกสวบนบน (upper mantle) เป็นแมกมาที่อุดมไปด้วยคาร์บอนไดออกไซด์แต่มีปริมาณซิลิกา และเมื่อแข็งตัวจะให้เนื้อหินประกอบขึ้นด้วยแร่คาร์บอเนตมากกว่าร้อยละ 50 ซึ่งมวลหินคาร์บอเนไทต์ส่วนใหญ่ที่พบมักเกิดร่วมกับมณฑลหินอัคนีซับซ้อนเนื้ออัลคาไลต์ (alkaline igneous rock complexes) ภายในแผ่นทวีปที่ค่อนข้างมีความเสถียร (relatively stable crustal region) โดยเฉพาะในบริเวณที่มีระบบรอยเลื่อนขนาดใหญ่ หรือที่มีร่องทรุดตัวกลางแผ่นทวีป (rifting) เกิดขึ้นแหล่งธาตุหายากประเภทนี้มีแร่อัลคาไล (alkali minerals) ชนิดต่างๆเป็นแร่บ่งชี้ที่สำคัญเช่นแรโซดาไลต์ (sodalite: สีนํ้าเงินเข้ม) ยูเดียไลต์ (eudialyte: สีชมพู/แดง) แอ็คไมต์ (acmite: สีนํ้าตาล/เขียว) อัลคาไลแอมฟิโบล (alkali-amphiboles: สีนํ้าเงิน/ดำ) รินโคไลต์ (rinkolite: นํ้าตาลแดง/นํ้าตาลเหลือง) และแกดโกลินิต (gadolinite: สีเขียว/นํ้าตาล-ดำ) เป็นต้น แหล่งที่เกิดไม่สัมพันธ์กับหินคาร์บอเนไทต์หรือหินอัคนีเนื้ออัลคาไลต์ (Carbonatite or alkaline igneous rock-unrelated deposits) แหล่งปฐมภูมิกลุ่มย่อยนี้ไม่สัมพันธ์กับมวลหินอัคนีเนื้ออัลคาไลต์ แต่เกิดร่วมกับหินอัคนีเนื้ออื่น ๆ โดยมีหลากหลายชนิดรูปแบบย่อยขึ้นอยู่กับกระบวนการก่อตัวของแร่ ที่เกิดจากไอหรือสายน้ำแร่อ่อนผ่านกระบวนการแทนที่แบบฝ่งประ (disseminated) หรือแบบมวล (massive) หรือการเกิดโซนขึ้นหินเหลี่ยมรูปแบบการกำเนิดแหล่งธาตุหายาก

(hydrothermal breccia) รวมไปถึงกระบวนการแปรสภาพ โดยชนิดที่มีความสำคัญที่สุดในกลุ่ม คือแหล่งธาตุหายากที่เกิดร่วมกับแร่เหล็ก (iron-REE deposits) หรือ “iron-oxide-copper-gold (IOCG)” deposit ที่เรียกทั่วไปว่า “Olympic Dam” type

แหล่งธาตุหายากทุติยภูมิ โดยทั่วไป แหล่งธาตุหายากกลุ่มจะเกิดสัมพันธ์กับกระบวนการทางตะกอนวิทยา (Sedimentary process-related Deposits) ที่เกี่ยวข้องกับการผุพังทางกายภาพและการผุสลายทางเคมีของเนื้อหินต้นกำเนิดซึ่งจะทำให้แร่ธาตุหายาก หรืออนุภาคของธาตุหายากหลุดออกมาจากจุดกำเนิดเดิม แล้วมีการเคลื่อนย้ายหรือพัดพามาสะสมรวมตัวกันใหม่เป็นแหล่งแบบทุติยภูมิที่สามารถจำแนกเป็น 2 กลุ่มย่อย คือ แหล่งแบบลานแร่ (Placer Deposits) แหล่งธาตุหายากแบบลานแร่นี้เป็นแหล่งที่เกิดจากการที่แร่ธาตุหายากที่คงทนต่อการผุสลายตัว มักมีความถ่วงจำเพาะสูง (ถ.พ.) และยังคงหลงเหลือจากการผุพังของหินต้นกำเนิด อาทิ โมนาไซต์ ซีโนไทม์ และซามาสไกต์ ถูกเคลื่อนย้ายหรือพัดพามาสะสมตัวใหม่ปะปนกับแร่หนักที่มีความถ่วงจำเพาะสูงชนิดอื่น ๆ เช่น ดีบุก อิลเมไนต์เซอร์คอน รูไทล์การเนต และ/หรือ ทองคำซึ่งสะสม

ตัวในสภาพแวดล้อมภายใต้อิทธิพลของระบบทางน้ำบนบก (fluvialite, lacustrine และ deltaic) เกิดเป็นแหล่งแร่แบบลานแร่ (placer deposits) และ/หรือผสมผสานกับอิทธิพลของกระแสคลื่นลม กระแสคลื่นขนานชายฝั่ง (long-shore currents) และน้ำขึ้น-น้ำลง เกิดเป็นแหล่งแร่แบบตะกอนชายหาดและเนินทราย (beach and dune sand deposits) เป็นต้น ซึ่งประเทศไทยเคยมีการผลิตแร่หายากประเภทนี้เป็นแร่พลอยไต่จากการทำเหมืองแร่ดีบุกในอดีตแหล่งแบบตกค้างสะสม (Residual Accumulation Deposits) แหล่งธาตุหายากแบบตกค้างสะสมนี้เป็นแหล่งที่เกิดจากอิทธิพลของกระบวนการผุพังทางเคมีอยู่กับที่ระดับสูง (in-situ deep chemical weathering) ของหินต้นกำเนิดซึ่งจะช่วยเพิ่มปริมาณความสมบูรณ์ของแร่ธาตุหายากในชั้นดิน/หินผุบางตัวเป็นชั้นหนาปิดทับเหนือมวลหินสดและสำหรับพื้นที่หินแกรนิตที่มีความสมบูรณ์ของธาตุหายาก (REE-rich host rocks) ที่อยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่มีความชุ่มชื้นสูง และมีลักษณะธรณีแปรสัณฐานที่เสถียรเป็นระยะเวลานานซึ่งจะมีระดับการผุพังทางเคมีสูงส่งผลให้แร่ธาตุหายากตกค้างในชั้นดิน/หินผุบาง สวนไม่สามารถคงสภาพความเป็นแร่ไว้ได้จะปลดปล่อยอะตอมของธาตุหายากออกมาและถูกจับยึดไว้ที่ผิวผลึกของแร่ดินที่เป็นผลมาจากการผุพังของแร่เฟลคสปาร์และแร่ประกอบหินชนิดอื่นในเนื้อหินต้นกำเนิด ในรูปแบบของการดูดซับไอออน (Ion-adsorption type) (วัชชัย เชื้อเหลาวานิช, 2558)

ในปัจจุบันแหล่งธาตุหายากที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ มี 3 รูปแบบหลัก ได้แก่แหล่งที่สัมพันธ์กับหินคาร์บอนาตและหินอัลคาไล (โดยมีแร่แบสเทนไซต์ โมนาไซต์และอะพาไทต์ เป็นแร่หลัก) แหล่งแร่แบบลานแร่ (โดยพบแร่โมนาไซต์และซีโนไทม์สะสมตัวร่วมกับแร่หนักอื่น ๆ) และแหล่งแร่แบบตกค้างสะสมแบบดูดซับปะจุ (โดยไอออนของธาตุหายากถูกดูดซับไว้ด้วยผลึกแร่ดินที่ตกค้างในชั้นดิน/หินผุเหนือมวลหินแกรนิต) สำหรับประเทศไทยนั้นมีศักยภาพสูงที่จะสามารถพบแหล่งธาตุหายากทุกัญญัติสัมพันธ์กับมวลหินแกรนิตได้ทั้ง 2 แบบ คือ แหล่งแร่แบบลานแร่

สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการพัฒนาสูตรแก้วที่เจือด้วยธาตุหายาก ยูโรเพียม (Europium) คือธาตุเคมีที่มีหมายเลขอะตอม 63 และสัญลักษณ์คือ Eu ยูโรเพียมเป็นธาตุที่ตั้งชื่อตามทวีปยุโรปมีความไวต่อปฏิกิริยาเคมีมาก มันออกซิไดซ์อย่างรวดเร็วในอากาศ มันทำปฏิกิริยากับน้ำเหมือนแคลเซียม ยูโรเพียมติดไฟได้เองในอากาศที่อุณหภูมิ 150 °C ถึง 180 °C ยูโรเพียมมีความแข็งเท่าตะกั่วและตีเป็นแผ่นได้ โดยมีคุณสมบัติทั่วไปสรุปไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทั่วไปของธาตุยูโรเพียม (Europium)

ชื่อ, สัญลักษณ์, เลขอะตอม	ยูโรเพียม, Eu, 63
อนุกรมเคมี	แลนทาไนด์
ลักษณะ	สีขาวเงิน 
มวลอะตอม	151.964(1) กรัม/โมล
การจัดเรียงอิเล็กตรอน	[Xe] 4f ⁷ 6s ²
อิเล็กตรอนต่อระดับพลังงาน	2, 8, 18, 25, 8, 2
คุณสมบัติทางกายภาพ	
สถานะ	ของแข็ง
ความหนาแน่น (ใกล้ r.t.)	5.244 ก./ซม. ³
ความหนาแน่นของของเหลวที่ m.p.	5.13 ก./ซม. ³
จุดหลอมเหลว	1099 K (826 °C)
จุดเดือด	1802 K(1529 °C)
ความร้อนของการหลอมเหลว	9.21 กิโลจูล/โมล
ความร้อนของการกลายเป็นไอ	176 กิโลจูล/โมล
ความร้อนจำเพาะ	(25 °C) 27.66 J/(mol·K)
ลักษณะ	สีเงิน มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีมาก
การนำไปประยุกต์ใช้งาน	-ใช้เป็นสารเรืองแสงสีแดงใจจอโทรทัศน์ จอคอมพิวเตอร์ และเป็นสารกระตุ้น (Activator) - หลอดประหยัดพลังงาน หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ - พลาสติกที่เจือด้วย EU ใช้เป็นวัสดุทางด้านเลเซอร์ได้

2.1.13 ทฤษฎี Judd-Ofelt

ทฤษฎี Judd-Ofelt เป็นทฤษฎีที่ใช้ในการอธิบายการเปล่งแสงที่เกิดจากการเปลี่ยนระดับของพลังงานของไอออนของธาตุหายาก (Rare earth) ที่ถูกค้นคิดโดย Brian R. Judd (University of California) และ George S. Ofelt, Berkeley (Johns Hopkins University) ซึ่งมีการตีพิมพ์ผลงานเผยแพร่ในช่วงเวลาเดียวกัน และพัฒนามาเป็นทฤษฎีที่สำคัญในการศึกษาการเปล่งแสงที่เกิดจากการเปลี่ยนระดับของพลังงานของไอออนของธาตุหายากในเวลาต่อมา

ก่อนหน้าที่มีการนำเสนอทฤษฎีดังกล่าว ได้มีคำถามเกิดขึ้นมากมาย J.H. Van Vleck เป็นนักวิทยาศาสตร์คนแรก ๆ ที่พยายามศึกษาเรื่องดังกล่าวอย่างจริงจัง โดยในปี ค.ศ. 1973 โดยอธิบายว่าสเปกตรัมที่ได้จากการเปล่งแสงของธาตุหายากนั้นมีลักษณะเป็นพีคที่มีความแหลมคม ทำให้ลำแสงที่ปลดปล่อยออกมามีความเข้มแสงสูง ที่เกิดจากการเปลี่ยนระดับพลังงานย่อยในชั้นการจัดเรียงตัว 4f แต่พิจารณาโดยใช้ทฤษฎีควอนตัมฟิสิกส์ การเปลี่ยนของระดับพลังงานในระดับชั้น 4f-4f แบบคู่ควบไฟฟ้า (Electric Dipole Transition ; ED) ที่ทำให้เกิดการเปล่งแสงที่คมชัด มีความขัดแย้งกับกฎการเลือกของลาพอร์ท (Laporte Selection Rule) ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 กฎการเลือกของลาพอร์ท

	S	L	$J (No 0 \leftrightarrow 0)$	Parity
Electric Dipole	$\Delta S = 0$	$\Delta L = 0, \pm 1$	$\Delta J = 0, \pm 1$	Opposite
Magnetic Dipole	$\Delta S = 0$	$\Delta L = 0$	$\Delta J = 0, \pm 1$	Same
Electric Quadrupole	$\Delta S = 0$	$\Delta L = 0, \pm 1, \pm 2$	$\Delta J = 0, \pm 1, \pm 2$	Same

ซึ่งกล่าวว่า การเปลี่ยนระดับพลังงานแบบ ED จะเกิดขึ้นระหว่าง 2 ชั้นระดับพลังงานเริ่มต้นและระดับพลังงานปลายที่อยู่ในสถานะ Parity (คู่, คี่) ตรงข้ามกันเท่านั้น ซึ่งระดับชั้นพลังงานย่อยในชั้น 4f ต่างก็อยู่ในสถานะ Parity เหมือนกัน ซึ่งในทางทฤษฎีการเปล่งแสงที่เด่นชัดของธาตุหายากไม่น่าจะปรากฏขึ้นได้ สำหรับการเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงานของอะตอมหรือไอออนนั้นมีอยู่ 3 ชนิดหลัก คือ

1. การเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงานแบบคู่ควบไฟฟ้า หรือ ED ซึ่งเกิดขึ้นกับการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานโดยส่วนใหญ่ซึ่งทำให้เกิดการเปล่งแสงอย่างเด่นชัดออกมา

2. การเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานแบบคู่ควบแม่เหล็ก (Magnetic dipole transition ; MD) สามารถเกิดขึ้นได้กับบางการเปลี่ยนแปลงของระดับชั้นพลังงานเท่านั้น ซึ่งทำให้เกิดการเปล่งแสงอย่างเด่นชัดออกมาเช่นกัน

3. การเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานแบบสี่ขั้วไฟฟ้า (Electric quadrupole transition ; EQD) สามารถเกิดขึ้นได้ทุกการเปลี่ยนแปลงของระดับชั้นพลังงาน แต่จะมีการเปล่งแสงที่มีความเข้มแสงต่ำ จากที่กล่าวมาจะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงานแบบคู่ควบไฟฟ้า เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปล่งแสง ดังนั้น

จึงได้มีการพยายามหาเหตุผลหรือคำอธิบายที่ว่า ทำไมเกิดการเปล่งแสงที่มีความเข้มสูงที่ขึ้นกับธาตุหายากทั้งที่มีความขัดแย้งกับกฎการเลือกของลาพอร์ท

Judd และ Ofelt จึงได้พยายามค้นหาคำตอบ โดยพบว่าผลของสนามผลึก (Crystal field) หรือ สนามของลิแกนด์ (Ligand field) ที่ไม่มีศูนย์กลางความสมมาตร (Noncentrosymmetric) ซึ่งแผ่ออกมาจากไอออนต่าง ๆ ที่กระจายตัวอยู่ภายในวัสดุของแข็ง หรือ กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ เป็นสนามไฟฟ้าที่แผ่ออกมาจากไอออนบริเวรรอบ ๆ ที่จัดเรียงตัวกันอย่างไม่สมมาตรสนามไฟฟ้างดังกล่าว จะทำให้ระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนในไอออนธาตุหายากโดนรบกวน และเปลี่ยนสภาวะ Parity ของระดับชั้นพลังงานย่อยในชั้น 4f ไปจากเดิม ทำให้การเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานแบบ ED เกิดขึ้นในไอออนของธาตุกลุ่มหายากได้ โดยไม่ขัดแย้งกับกฎการเลือกของลาพอร์ทส่งผลให้การเปล่งแสงที่มีความชัดเจนสูงปรากฏขึ้นมาดังกล่าสำหรับรายละเอียดของทฤษฎี J-O นั้นจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

2.5.2 หลักสำคัญของทฤษฎี Juddofelt (B. Di Bartolo and O. Forte, 2006; K Linganna, Ch. Srinivasa Rao and C.K. Jayasankar, 2013)

ทฤษฎี J-O มีพื้นฐานมาจากแบบจำลองทางฟิสิกส์ 3 แบบจำลองด้วยกัน ได้แก่ แบบจำลองสนามไฟฟ้าสถิตย์ (Static model) ซึ่งกล่าวว่า ไอออนตรงกลางจะได้รับผลกระทบจากสนามไฟฟ้าสถิตย์ของไอออนของโฮสต์ (Host) ที่อยู่ล้อมรอบ แบบจำลองไอออนอิสระ (Free Ion model) กล่าวว่า โฮสต์เป็นสภาพแวดล้อมของไอออนอิสระ จะสร้างสนามไฟฟ้าสถิตมารบกวนฮาร์มีโตเนียนของไอออนอิสระนั้น และแบบจำลองการจัดเรียงอิเล็กตรอนแบบเดี่ยว (Single configuration model) กล่าวว่า อิเล็กตรอนที่อยู่ถูกจัดอยู่ในต่างระดับชั้นพลังงานจะเกิดอันตรกิริยาต่อกันเพียงเล็กน้อย และไม่ต้องนำมาพิจารณาในการวิเคราะห์การเปล่งแสงที่เกิดขึ้น ทฤษฎี J-O ได้อธิบายเกี่ยวกับ ความเข้มของการเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงานธาตุกลุมนแลนาทานด์ และแอกติไนด์ของแข็งและในสารละลาย โดยมีจุดเริ่มต้นมาจากค่าความแรงของการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานแบบ ED (Line strength; SED) ตามความสัมพันธ์

$$S_{ED}(J;J') = e^2 \sum_{\lambda=2,4,6} \Omega_{\lambda} |\langle \varphi J || U^{(\lambda)} || \varphi' J' \rangle|^2 \quad (2.1)$$

เมื่อ e คือ ประจุของอิเล็กตรอน

Ω_{λ} เป็นตั้งแปรของ Judd-Ofelt

φ และ φ' คือ ฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนที่ระดับชั้นพลังงานเริ่มต้นและที่ระดับชั้นพลังงานปลาย ตามลำดับ

J และ J' คือเลขโมเมนตัมเชิงมุมรวมของอิเล็กตรอนที่ระดับชั้นพลังงานเริ่มต้นและที่ระดับชั้นพลังงานปลายตามลำดับ

$U^{(\lambda)}$ คือ เมทริกซ์ลดรูป (Reduced matrix) ซึ่งเป็นเทนเซอร์ของตัวดำเนินการคู่ขั้วไฟฟ้า ซึ่งทางฟิสิกส์เบื้องต้น เราสามารถพิจารณาการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานของอะตอมแบบ ED ว่าเป็นการสั่นที่เกิดจากคู่

ขั้วไฟฟ้า (Electric dipole oscillating) ที่มีความถี่ค่าหนึ่ง โดยสนามไฟฟ้าจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอกที่เข้ามายังอะตอมจะเหนี่ยวนำให้เกิดความเป็นคู่ขั้วไฟฟ้าในอะตอมและเนื่องจากสนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีการสั่นกลับไป-มาจึงทำให้ความเป็นคู่ขั้วไฟฟ้าของอะตอมเกิดการสลับขั้วตามไปด้วยการสลับขั้วไฟฟ้าดังกล่าวทำให้ประจุไฟฟ้าในอะตอม (อิเล็กตรอนและนิวเคลียส) เกิดการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งและเป็นผลทำให้เกิดการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาจากอะตอม สำหรับการอธิบายในเชิงควอนตัมนั้นได้กล่าวไว้ว่าอิเล็กตรอนในอะตอมเป็นตัวกลางในการดูดกลืนพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เข้ามาในอะตอมและเกิดการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนตามกฎการเลือก ก่อนที่จะคายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากลับคืนออกไปแต่การอธิบายนี้มีความซับซ้อนมากกว่ามากในการอธิบายการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในธาตุกลุ่มแลนทาไนด์เนื่องจากในกฎการเลือกมีการกำหนดสถานะ Parity ของระดับชั้นพลังงานอิเล็กตรอน โดยระบุว่า การเปลี่ยนระดับของชั้นพลังงานแบบ ED ของอิเล็กตรอนระหว่างระดับชั้นพลังงานที่มี Parity เหมือนกันเป็นสิ่งที่ต้องห้าม(มีความน่าจะเป็นในการเกิดน้อยมาก) อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานดังกล่าว สามารถถูกทำให้เกิดขึ้นมาได้ และมีสถานะ Parity ตรงกันข้ามกับชั้นพลังงาน $4f$ เกิดการทับซ้อนและผสมกับระดับชั้นพลังงาน $4f$ ปรากฏการณ์ดังกล่าวจะทำให้สถานะ Parity ของระดับชั้นพลังงานย่อยเริ่มต้นและระดับชั้นพลังงานย่อยปลายทางในชั้น $4f$ แตกต่างกัน จึงทำให้การเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานแบบ ED ในกลุ่มธาตุแลนทาไนด์ เกิดขึ้นมาได้ โดยเมื่อนำแนวความคิดของทฤษฎี J-O มาผนวกเข้ากับกฎการเลือกของลาพอร์ทที่ได้กล่าวไปก่อนหน้านี้ จะได้กฎการเลือกใหม่ ที่ใช้กำหนดการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานในไอออนของธาตุกลุ่มแลนทาไนด์ ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 กฎการเลือกตามทฤษฎี Judd-Ofelt

	S	L	$J (No 0 \leftrightarrow 0)$	Parity
Electric Dipole	$\Delta S = 0$	$\Delta L \leq 6$	$\Delta J \leq 6$ $\Delta J = 2, 4, 6 (J \text{ or } J' = 0)$	Opposite
Magnetic Dipole	$\Delta S = 0$	$\Delta L = 0$	$\Delta J = 0, \pm 1$	Same
Electric Quadrupole	$\Delta S = 0$	$\Delta L = 0, \pm 1, \pm 2$	$\Delta J = 0, \pm 1, \pm 2$	Same

เมื่อนำค่า SED จากสมการ (2.1) ในทฤษฎี J-O มาผนวกเข้ากับแนวคิดในทฤษฎีของรัทเทอร์ฟอร์ด ทำให้สามารถหาค่าตัวแปรที่ใช้ในการบอกข้อมูลเชิงปริมาณชั้นพลังงานที่เกิดขึ้นในอะตอม ซึ่งเป็นสาเหตุของการเปล่งแสงได้ นั่นคือ ค่าความแรงของการสั่น (Oscillator strength; f) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์อยู่ในรูปของสมการ (2.2)

$$f = \frac{8\pi^2 mc}{3h\lambda e^2 (2J+1)} n \left(\frac{n^2+2}{3n} \right)^2 S_{ED} \quad (2.2)$$

เมื่อแทนค่า SED จากสมการ (2.1) จะได้ว่า

$$f = \frac{8\pi^2 mc}{3h\lambda e^2 (2J+1)} n \left(\frac{n^2+2}{3n} \right)^2 \sum_{\lambda=2,4,6} \Omega_{\lambda} |\langle \varphi J | U^{(\lambda)} | \varphi' J' \rangle|^2 \quad (2.3)$$

โดย m คือ มวลของอิเล็กตรอน C คือ ความเร็วแสง h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ คือ ความยาวคลื่นของที่เปล่งออกมา และ n คือค่าดัชนีหักเหแสง ค่าที่ได้หาได้จากสมการ (2.3) เรียกว่า ความแรงของการสั่นที่ได้จากการคำนวณ (Calculated oscillator strength; f) จะเห็นได้ว่าค่าความแรงของการสั่นทางทฤษฎีมีความสัมพันธ์กับ Ω_{λ} หรือตัวแปรของ J-O ซึ่งแสดงถึงคุณลักษณะภายในโครงสร้างโฮสต์ที่ไอออนของธาตุกลุ่มแลนทาไนด์ถูกเจือหรือเติมลงไป ดังนั้นทฤษฎี J-O จึงนิยมถูกนำไปใช้วิเคราะห์สมบัติการเปล่งแสงของไอออนกลุ่มแลนทาไนด์ รวมไปถึงอิทธิพลของโฮสต์ที่มีผลต่อการเปล่งแสงดังกล่าว

2.2 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

จากการค้นคว้าพบว่ามึนักวิจัยกลุ่มต่าง ๆ ที่ได้ทำการวิจัยศึกษาคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของแก้วที่มีสูตรต่างกัน ดังนี้

Eun-Sub, Lim., et al. [20] ได้ศึกษาผลกระทบของการใช้ตะกั่วออกไซด์ (PbO) โดยการแทนที่ด้วยแบร์เรียมออกไซด์ (BaO) ของระบบแก้ว BaO-B₂O₃-SiO₂ โดยการหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำ โดยปราศจากตะกั่ว แล้วทำการแปรค่าปริมาณ BaO เพื่อศึกษาพฤติกรรมการตกผลึกระหว่างที่ก่อตัวเป็นแก้ว

Isabella-loana Oprea et al. [21] ได้ศึกษาคุณสมบัติทางแสงของแก้วบิสมัทบอร์เรท โดยมีความเข้มข้นของทั้งบิสมัทและบอเรทอยู่ในช่วง 25 – 65 % โมล พบว่าดัชนีหักเหและขอบของการดูดกลืนแสง UV ได้รับอิทธิพลมาจากความเข้มข้นของบิสมัทออกไซด์เพียงอย่างเดียว

Y.H. Liu et al. [22] ได้เตรียมแก้วบิสมัทบอร์เรทที่เติม Yb³⁺ - Er³⁺ โดยศึกษาผลของ Bi₂O₃ ที่มีต่อคุณสมบัติการดูดกลืนแสง การเปล่งแสง การเปลี่ยนระดับพลังงานของในโครงสร้างแก้ว และคุณสมบัติการขยายสัญญาณของแก้วที่เติม Yb³⁺ - Er³⁺ โดยพบว่า การเพิ่มขึ้นของการเปล่งแสง และเวลาในการเรืองแสงของ Er³⁺ ที่ความยาวคลื่น 1.5 μ m ขึ้นกับความเข้มข้นของ Bi₂O₃ และกำลังขยายสัญญาณในช่วง 1.53 – 1.60 μ m ของแก้วที่มีความเข้มข้นของ Bi₂O₃ มากที่สุดให้ผลดีที่สุด

Duk Nam, K. [23] ได้ศึกษาศัณยภาพของแก้วแบเรียมออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์ โบรอนไตรออกไซด์ ที่ทดแทนการใช้ตะกั่วที่หลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำ (500-600 °C) สำหรับใช้ทำชั้นไดอิเล็กทริกของแผงจอพลาสมา พร้อมทั้งมีการหาอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะของแก้ว ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้น และค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

A. V. Egorysheva et al. [24] ได้ศึกษาเฟสที่สมดุลของระบบแก้วแบเรียมบิสมัทบอร์เรท ด้วยเครื่อง XRF และ DTA พบว่ามีเฟสที่สมดุลอยู่ 4 แบบคือ $Ba_3BiB_3O_9$, $BaBi_2B_4O_{10}$, $BaBiB_{11}O_{19}$ และ $BaBiBO_4$

Anu Bajaj et al. [25] ได้ศึกษาบิสมัทบอร์เรท ในรูปของแก้วและผลึก ที่ความเข้มข้นบิสมัท 20 – 66 % โมล พบว่า molar volume ของแก้วเพิ่มขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะของแก้วมีค่าลดลง ความหนาแน่นของแก้วบางตัวอย่างมีค่าใกล้เคียงกับบิสมัทบอร์เรทในรูปผลึกเชิงเดี่ยว การศึกษาด้วยเทคนิค B^{11} MAS-NMR พบว่าสัดส่วนของ tetrahedrally borons (N_4) มีค่าสูงสุดที่ความเข้มข้นของบิสมัท 42 % โมล ส่วนความเข้มข้นของบิสมัทตั้งแต่ 33 % โมล ขึ้นไปจะมี band gap กว้างกว่าค่าความเข้มข้นของช่วงการดูดกลืนแสง โดยได้เตรียมบิสมัทบอร์เรทในรูปของผลึกอยู่ 2 โครงสร้าง คือ $Bi_3B_5O_{12}$ และ $Bi_4B_2O_9$ ซึ่งทั้งคู่มีค่า N_4 น้อยกว่าแก้วที่ความเข้มข้นเดียวกัน

H. Doweidar et al. [26] ได้ศึกษาคุณสมบัติของแก้วบิสมัทบอร์เรท ที่เติม RO (R = ZnO, BaO) จากการวิเคราะห์ FTIR แสดงให้เห็นว่า RO จะเข้าไปรวมกับโครงสร้างของบอเรตได้ดีกว่า ซึ่งสันนิษฐานว่า Bi_2O_3 เข้าไปรวมในโครงสร้างในรูปของ BiO_6 เท่านั้น การเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่น และ molar volume ที่แปรผันกับความเข้มข้นของ RO แสดงให้เห็นว่าในโครงสร้างแก้ว BO_4 จับเข้ากับประจุ R^{2+} มากกว่าการเข้าร่วมกับประจุบวกของ Bi_2O_3

P.Yasaka, et al. [27] ได้ทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบการเปล่งแสงขาวจากดีสโพรเซียมที่เจือลงแก้วซิงค์บิสมัทบอร์เรทและแก้วบอร์เรท พบว่า แก้วทั้งสองระบบเกิดการเปล่งแสงขาว ซึ่งมีประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุให้แสงสว่าง

A.A.Ali, et al [28] ได้ศึกษาคุณสมบัติของแก้ว CaF_2 - Bi_2O_3 - B_2O_3 ที่เติม Sm^{3+} ซึ่งพบว่าค่าพลังงาน band gap มีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณ Sm_2O_3 เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความหนาแน่น และพลังงาน Urbach กลับมีค่าเพิ่มขึ้น การศึกษาสเปกตรัมของการดูดกลืนและการกระตุ้นชี้ให้เห็นว่าค่าพลังงานที่สามารถกระตุ้นได้อยู่ในช่วงกว้าง คือช่วง UV ถึงช่วง VIS น้ำเงิน ซึ่งสามารถให้แก้วเกิดการเรืองแสงเป็นสีส้มได้

Binnermans K, et al [29] ได้ศึกษาสเปกตรัมของการดูดกลืนและการเปล่งแสงของแก้วระบบฟลูออโรฟอสเฟตสูตร $75NaPO_3$ - $24CaF_2$ - $1LnF_3$ และสูตร $75NaPO_3$ - $20CaF_2$ - $5LnF_3$ ที่เติมธาตุหายากที่มี

ไอออน $3+$ ได้แก่ Ce^{3+} , Pr^{3+} , Nd^{3+} , Sm^{3+} , Eu^{3+} , Gd^{3+} , Tb^{3+} , Dy^{3+} , Ho^{3+} , Er^{3+} , Tm^{3+} และ Yb^{3+} ความแข็งแรงของขั้ว(Dipole strengths) ของการทรานซิชันในการดูดกลืนแสงเป็นตัวพารามิเตอร์ในการหาค่า Judd-Ofelt ซึ่งอยู่ในเทอมของ Ω_λ โดยที่ $\lambda = 2, 4$ และ 6 ซึ่งเป็นตัวแปรที่ใช้ทำนายสมบัติการเปล่งแสงของแก้วได้



บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของการดำเนินงานขั้นตอนต่าง ๆ ที่วางแผนในการศึกษาการเตรียมเตรียมระบบแก้วบิสมัทแบเรียมบอร์เรทจากสูตร $(40-x)B_2O_3 : 40Bi_2O_3 : 20BaO : xEu_2O_3$ (เมื่อ x มีค่าเท่ากับ 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 เปอร์เซ็นต์โมล) เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ ทางโครงสร้าง ทางแสง และทางลูมิเนสเซนซ์ของระบบแก้ว ซึ่งมีเนื้อหาเรียงตามลำดับดังต่อไปนี้

3.1 ศึกษาหาข้อมูล ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องและกำหนดสูตรแก้วในงานวิจัย

ศึกษาข้อมูลต่างๆ เช่น วารสาร สิ่งพิมพ์ สื่ออิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น เพื่อหาแนวทางของการกำหนดสูตรแก้วและปรับปรุงคุณสมบัติของสูตรแก้วพื้นฐาน เพื่อวางแผนงานต่าง ๆ สำหรับการดำเนินงานวิจัยขั้นต่อ ๆ ไป

3.2 การเตรียมสารตัวอย่าง

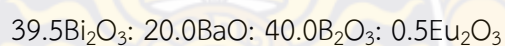
งานวิจัยนี้ได้เตรียมส่วนผสมในการหลอมแก้วจากร้อยละโดยโมลของสารตั้งต้นต่างๆ ดังนี้ $(40-x)B_2O_3 : 40Bi_2O_3 : 20BaO : xEu_2O_3$ โดยที่ x คือจำนวนโมล Eu_2O_3 ที่ใส่ลงไปปริมาณต่างๆ กัน โดยมีปริมาณ 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 เปอร์เซ็นต์โมล ตามลำดับ ที่เตรียมได้จากสารเคมี Bi_2O_3 , H_3BO_3 , BaO และ Eu_2O_3 ที่มีความบริสุทธิ์สูง (LAB GRADE – High purity) ซึ่งได้สูตรแก้วสรุปดัง ตารางที่ 3.1 ซึ่งสารเตรียมส่วนผสมของสารตั้งต้นมวลรวม 20 กรัม จากนั้นนำสารตั้งต้นในการผลิตแก้ว และนำส่วนผสมของสารตั้งต้นมาผสมให้เข้ากัน นำมาใส่ในครุชีเบิล (Crucible) ที่เตรียมไว้ นำเข้าเตาเผาสาร โดยให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องจนถึงอุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส และให้ความร้อนกับชุดตัวอย่างที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อให้สารประกอบหลอมเหลวเป็นเนื้อเดียวกันจะได้น้ำแก้วเหลว เปิดฝาเตา นำเอาครุชีเบิลออกจากเตาเผาและเทน้ำแก้วเหลวลงในแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม ที่จุ่มแก้วเริ่มแข็งตัวจึงนำแก้วออกจากแม่พิมพ์ แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นจึงปิดเตาไฟฟ้ารอจนอุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิห้องจึงนำแก้วออกจากเตา นำตัวอย่างแก้วที่ได้จากการหลอมมาตัดและขัดผิวแก้วให้ได้ตามความขนาด $1.0 \times 1.5 \times 0.3$ เซนติเมตร

ตารางที่ 3.1 แสดงสูตรระบบแก้วบิสมีท์แบเรียมบอร์เรทที่เติม Eu_2O_3 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ตัวอย่างที่	Eu_2O_3 (mol%)	สูตรแก้ว
1	0.00	$40.0\text{Bi}_2\text{O}_3 : 20.0\text{BaO} : 40.0\text{B}_2\text{O}_3$
2	0.50	$39.5\text{Bi}_2\text{O}_3 : 20.0\text{BaO} : 40.0\text{B}_2\text{O}_3 : 0.5\text{Eu}_2\text{O}_3$
3	1.00	$39.0\text{Bi}_2\text{O}_3 : 20.0\text{BaO} : 40.0\text{B}_2\text{O}_3 : 1.0\text{Eu}_2\text{O}_3$
4	1.50	$38.5\text{Bi}_2\text{O}_3 : 20.0\text{BaO} : 40.0\text{B}_2\text{O}_3 : 1.5\text{Eu}_2\text{O}_3$
5	2.00	$38.0\text{Bi}_2\text{O}_3 : 20.0\text{BaO} : 40.0\text{B}_2\text{O}_3 : 2.0\text{Eu}_2\text{O}_3$
6	2.50	$37.5\text{Bi}_2\text{O}_3 : 20.0\text{BaO} : 40.0\text{B}_2\text{O}_3 : 2.5\text{Eu}_2\text{O}_3$

ตัวอย่างการคำนวณสัดส่วนมวลสาร

ต้องการเตรียมแก้วจากสูตร



ตารางที่ 3.2 แสดงมวลอะตอมของธาตุ B Ba Bi O และ Eu

ธาตุ	มวลอะตอม (กรัม/โมล)
B	10.81100
Ba	137.32700

Bi	208.98038
O	15.99940
Eu	151.96400

มวลโมเลกุลของสารประกอบ

$$\begin{aligned}
 \text{B}_2\text{O}_3 &= (10.81100 \times 2) + (15.99940 \times 3) = 69.62 && \text{กรัม/โมล} \\
 \text{BaO} &= (137.32700 \times 1) + (15.99940 \times 1) = 153.33 && \text{กรัม/โมล} \\
 \text{Bi}_2\text{O}_3 &= (208.98038 \times 2) + (15.99940 \times 3) = 465.96 && \text{กรัม/โมล} \\
 \text{Eu}_2\text{O}_3 &= (151.96400 \times 2) + (15.99940 \times 3) = 351.93 && \text{กรัม/โมล}
 \end{aligned}$$

มวลโมเลกุลของสูตรแก้วที่มีความเข้มข้นของ Eu_2O_3 เป็น 0.5 เปอร์เซ็นต์โมล

$$(0.395)(69.62) + (0.400)(465.96) + (0.200)(153.33) + (0.005)(351.93) = 246.31 \text{ กรัม/โมล}$$

สัดส่วนของมวลสารแต่ละองค์ประกอบย่อย

$$\begin{aligned}
 \text{B}_2\text{O}_3 &= (0.395)(69.62)/(246.29) = 0.1117 \\
 \text{BaO} &= (0.200)(153.33)/(246.29) = 0.1245 \\
 \text{Bi}_2\text{O}_3 &= (0.400)(465.96)/(246.29) = 0.7568 \\
 \text{Eu}_2\text{O}_3 &= (0.005)(351.93)/(246.31) = 0.0071
 \end{aligned}$$

สำหรับการเตรียมส่วนผสมเพื่อใช้สำหรับหลอมแก้วตัวอย่างที่มีมวล 20 กรัม

$$\begin{aligned}
 \text{B}_2\text{O}_3 &= (0.1117)(20 \text{ กรัม}) = 2.2340 \text{ กรัม} \\
 \text{BaO} &= (0.1245)(20 \text{ กรัม}) = 2.4900 \text{ กรัม} \\
 \text{Bi}_2\text{O}_3 &= (0.7568)(20 \text{ กรัม}) = 15.1360 \text{ กรัม} \\
 \text{Eu}_2\text{O}_3 &= (0.0071)(20 \text{ กรัม}) = 0.1420 \text{ กรัม}
 \end{aligned}$$

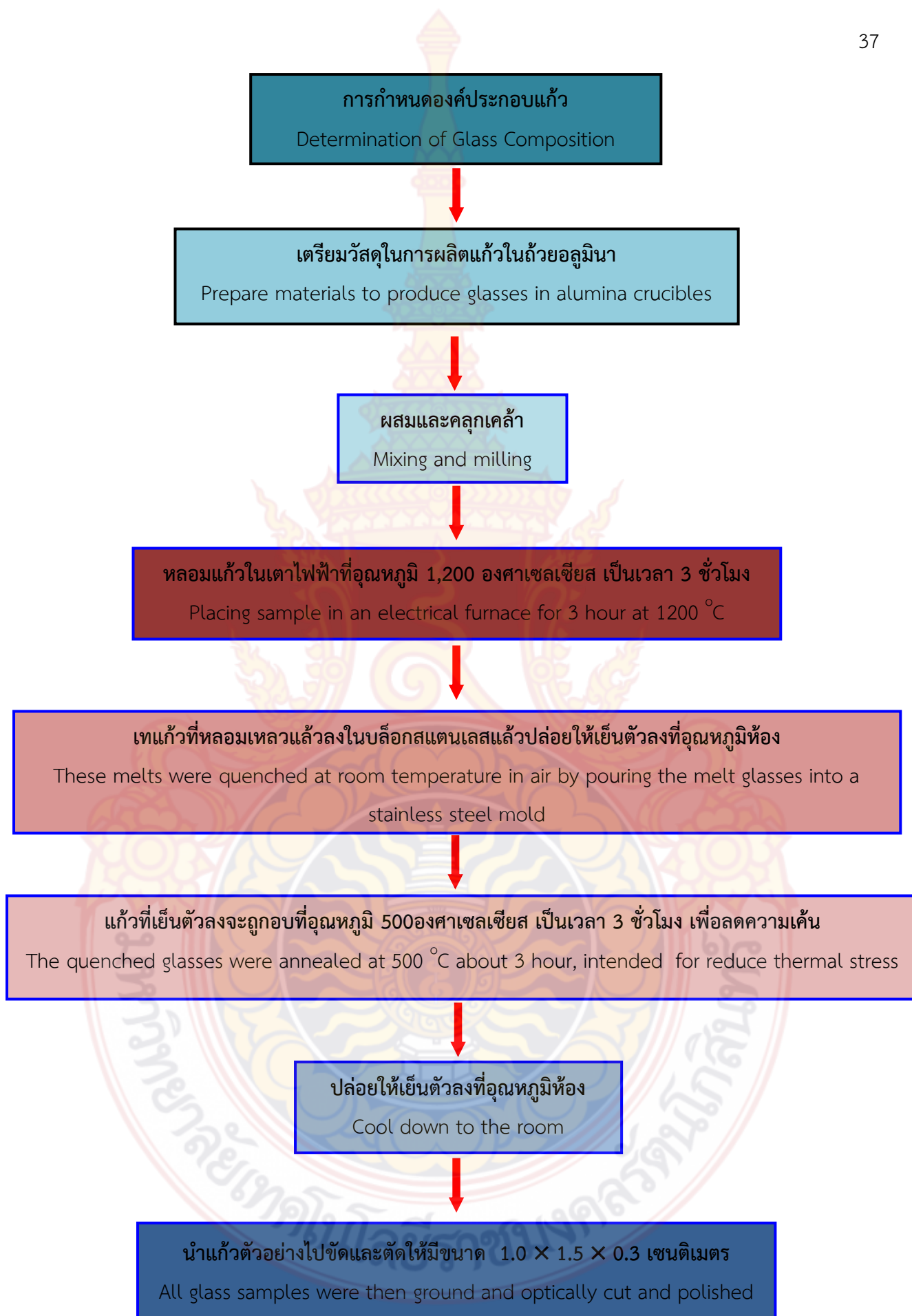
ตารางที่ 3.3 แสดงสัดส่วนมวลสารในการเตรียมแก้วที่มีความเข้มข้นของ Eu_2O_3 ต่าง ๆ

องค์ประกอบสูตรแก้ว	มวล โมเลกุล (กรัม/ โมล)	สัดส่วนของมวลสารแต่ละองค์ประกอบ			
		B_2O_3	BaO	Bi_2O_3	Eu_2O_3
$40.0\text{Bi}_2\text{O}_3 : 20.0\text{BaO} : 40.0\text{B}_2\text{O}_3$	244.8980	0.1137	0.1252	0.7611	0
$39.5\text{Bi}_2\text{O}_3 : 20.0\text{BaO} : 40.0\text{B}_2\text{O}_3 : 0.5\text{Eu}_2\text{O}_3$	246.2935	0.1117	0.1245	0.7568	0.0071
$39.0\text{Bi}_2\text{O}_3 : 20.0\text{BaO} : 40.0\text{B}_2\text{O}_3 : 1.0\text{Eu}_2\text{O}_3$	247.6890	0.1096	0.1238	0.7525	0.0141
$38.5\text{Bi}_2\text{O}_3 : 20.0\text{BaO} : 40.0\text{B}_2\text{O}_3 : 1.5\text{Eu}_2\text{O}_3$	249.0845	0.1076	0.1231	0.7483	0.0210
$38.0\text{Bi}_2\text{O}_3 : 20.0\text{BaO} : 40.0\text{B}_2\text{O}_3 : 2.0\text{Eu}_2\text{O}_3$	250.4800	0.1056	0.1224	0.7441	0.0278
$37.5\text{Bi}_2\text{O}_3 : 20.0\text{BaO} : 40.0\text{B}_2\text{O}_3 : 2.5\text{Eu}_2\text{O}_3$	251.8755	0.1037	0.1218	0.7400	0.0346

องค์ประกอบสูตรแก้ว	มวลส่วนผสมปริมาณ 20 (กรัม)			
	B_2O_3	BaO	Bi_2O_3	Eu_2O_3
$40.0\text{Bi}_2\text{O}_3 : 20.0\text{BaO} : 40.0\text{B}_2\text{O}_3$	2.2740	2.5040	15.2220	0
$39.5\text{Bi}_2\text{O}_3 : 20.0\text{BaO} : 40.0\text{B}_2\text{O}_3 : 0.5\text{Eu}_2\text{O}_3$	2.2340	2.4900	15.1360	0.1420
$39.0\text{Bi}_2\text{O}_3 : 20.0\text{BaO} : 40.0\text{B}_2\text{O}_3 : 1.0\text{Eu}_2\text{O}_3$	2.1920	2.4760	15.0500	0.2820

$38.5\text{Bi}_2\text{O}_3 : 20.0\text{BaO} : 40.0\text{B}_2\text{O}_3 : 1.5\text{Eu}_2\text{O}_3$	2.1520	2.4620	14.9660	0.4200
$38.0\text{Bi}_2\text{O}_3 : 20.0\text{BaO} : 40.0\text{B}_2\text{O}_3 : 2.0\text{Eu}_2\text{O}_3$	2.1120	2.4480	14.8820	0.5560
$37.5\text{Bi}_2\text{O}_3 : 20.0\text{BaO} : 40.0\text{B}_2\text{O}_3 : 2.5\text{Eu}_2\text{O}_3$	2.0740	2.4360	14.8000	0.6920





รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนในการหลอมแก้ว

จากตารางที่ 3.1 เมื่อทำการซังและผสมสารเคมีเรียบร้อยแล้ว จากนั้นนำส่วนผสมที่ได้ดังกล่าวใส่ลงในถ้วยอลูมินา แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ถ้วยอลูมินาที่ใช้หลอมแก้ว

จากนั้นนำสารตั้งต้นที่อยู่ในถ้วยอลูมินาไปหลอมในเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 เตาไฟฟ้าอุณหภูมิสูงที่ใช้สำหรับหลอมแก้ว



รูปที่ 3.4 แก้วหลอมเหลวภายในเตาไฟฟ้าภายใต้อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส

จากนั้นนำแก้วที่หลอมเหลวแล้วเทลงในบล็อกที่ทำจากสแตนเลสที่อบให้มีอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 บล็อกที่ทำจากสแตนเลส



รูปที่ 3.6 เทแก้วหนืดลงในบล็อกสแตนเลสที่อบให้มีอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

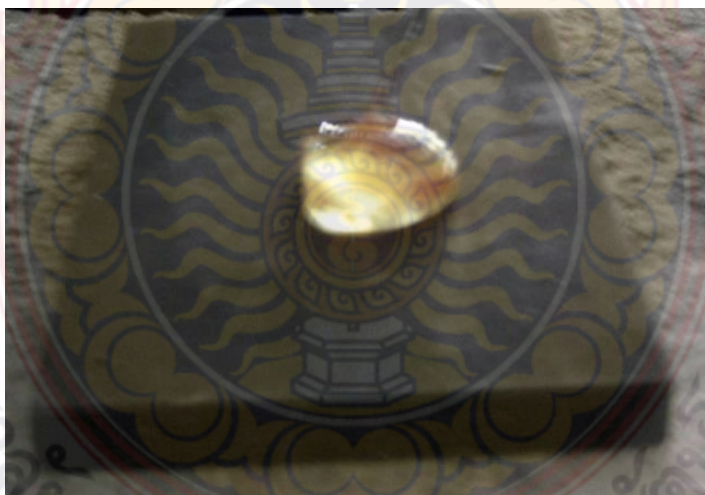
ทิ้งไว้จนแก้วเริ่มแข็งตัวจึงนำแก้วออกจากบล็อกสแตนเลส ดังรูปที่ 3.7 แล้วนำไปอบในเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 3.8 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นจึงปิดเตาไฟฟ้ารอนจนอุณหภูมิลดลงถึงอุณหภูมิห้องจึงนำแก้วออกจากเตา ดังรูปที่ 3.9 จากนั้นนำตัวอย่างแก้วที่ได้จากกระบวนการหลอมมาตัดและขัดผิวแก้วให้ได้ตามความขนาด $1.0 \times 1.5 \times 0.3$ เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.10 เพื่อศึกษาและสมบัติทางฟิสิกส์ต่อไป



รูปที่ 3.7 แก้วที่ถูกเทลงในบล็อกที่ทำจากสแตนเลส



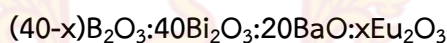
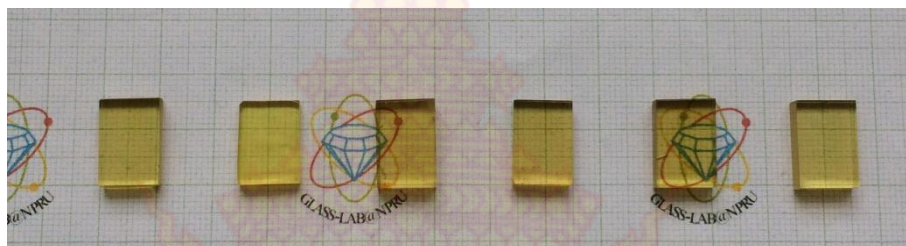
รูปที่ 3.8 เต้าอบไฟฟ้าที่มีอุณหภูมิสูง .



รูปที่ 3.9 แก้วที่ได้ก่อนตัดและขัด

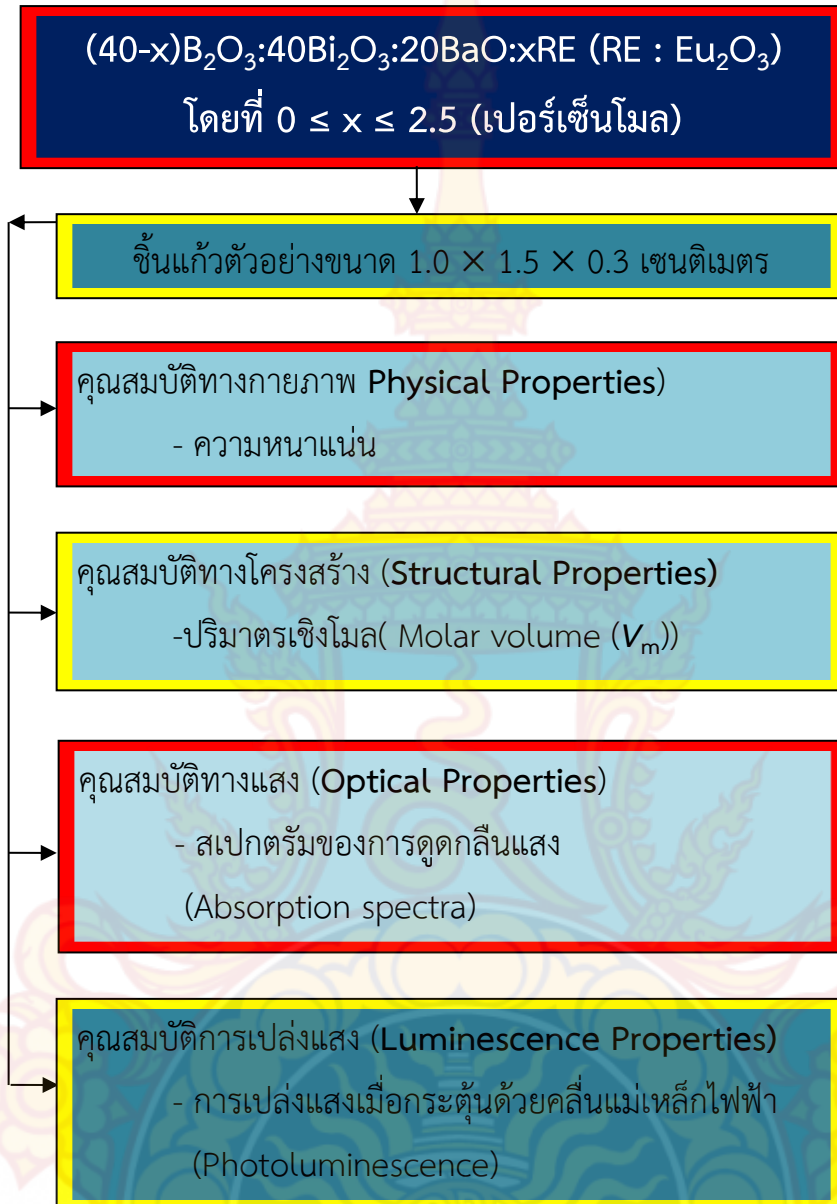
3.3 การศึกษาสมบัติเฉพาะด้านของวัสดุแก้ว

ระบบแก้วบิสมาทแบรเรียมบอร์เรทที่เติมด้วยยูโรเพียมไอออน จากสูตร $(40-x)\text{B}_2\text{O}_3:40\text{Bi}_2\text{O}_3:20\text{BaO}:x\text{Eu}_2\text{O}_3$ โดยที่ $x = 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ และ 2.5 เปอร์เซ็นต์โมล ตามลำดับที่ตัดและขัดผิวแก้วให้ได้ตามความขนาด $1.0 \times 1.5 \times 0.3$ เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.10 เพื่อศึกษาและสมบัติทางฟิสิกส์ต่อไป



รูปที่ 3.10 ระบบแก้วบิสมาทแบรเรียมบอร์เรทที่เติมด้วยยูโรเพียมไอออนความเข้มข้นต่าง ๆ

ระบบแก้วที่ได้จะทำการวัดคุณสมบัติทางกายภาพ ทางโครงสร้าง ทางแสง และทางลูมิเนสเซนซ์ของระบบแก้วด้วยเทคนิคของเครื่องมือที่แตกต่างกันต่าง ๆ เช่น วัดความหนาแน่นของระบบแก้วโดยอาศัยหลักของอาร์คิมิดีสก์ คำนวณมวลโมเลกุลของแก้ว เพื่อคำนวณหาค่าปริมาตรเชิงโมลของแก้ว วัดช่วงการดูดกลืนแสงโดยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer เพื่อศึกษาระดับพลังงาน (Energy level) ของธาตุหายากที่มีอยู่ในโครงสร้างแก้วเพื่อหาค่าพลังงานการกระตุ้น (Excitation energy) ของการเปล่งแสง (luminescence) ที่ถูกต้อง ศึกษาสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence) โดยเลือกพลังงานกระตุ้นที่เหมาะสม (Excitation energy) และเปรียบเทียบค่าความเข้มของแสงที่เปล่งออกมา เพื่อได้แก้วที่มีความเข้มแสงสูงสุด ซึ่งมีกระบวนการวัด ดังรูปที่ 3.11 และเครื่องมือวัดคุณสมบัติต่าง ๆ ที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.12 – 3.14



รูปที่ 3.11 กระบวนการวัดคุณสมบัติต่าง ๆ ของระบบแก้ว

3.3.1 การวัดความหนาแน่น ปริมาตรเชิงโมล (Density and Molar Volume Measurement)

ความหนาแน่น (density : ρ) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างมวล (mass) ต่อปริมาตร (volume) ของสารนั้น และมีหน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3) หรือกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3) โดยการศึกษาความหนาแน่นของสารใด ๆ ได้นั้น ต้องทราบมวลและปริมาตรของสารนั้น ในที่นี้มวลแทนสัญลักษณ์ด้วย m มีหน่วยเป็น กรัม (g) หรือกิโลกรัม (kg) การหามวลทำได้โดยการชั่ง ซึ่งค่ามวลที่วัดได้จะออกมาเป็นตัวเลขทศนิยม 2 หรือ 4 ตำแหน่ง แล้วแต่ความละเอียดของเครื่องชั่งที่ใช้ ส่วนปริมาตรแทนสัญลักษณ์ด้วย V และมีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เซนติเมตร (cm^3) หรือลูกบาศก์เมตร (m^3) ปริมาตรของวัตถุใด ๆ สามารถหาได้หลายวิธี เช่น การใช้กระบอกตวงหรือหลอดจลิตยาดวงหาปริมาตรของของเหลว สำหรับของแข็ง แบ่งการหาปริมาตร

ออกเป็น 2 วิธี คือ วิธีแรกเป็นการใช้สูตรหาปริมาตรของของแข็งที่มีรูปทรงเรขาคณิต และวิธีอาร์คิมิดีสเป็นวิธีที่อาศัยการแทนที่ของของเหลวที่ทราบค่าความหนาแน่นด้วยวัตถุที่เป็นของแข็งและไม่เกิดปฏิกิริยาหรือเปลี่ยนรูป แล้วหาปริมาตรของของเหลวที่ล้นออกมา หรือกล่าวได้ว่า หลักการของอาร์คิมิดีส (Archimedean's principle) คือ ปริมาตรของของเหลวที่ถูกแทนที่จะมีค่าเท่ากับปริมาตรของวัตถุที่แทนที่ลงในของเหลวนั้นเสมอ

เนื่องจากของไหล (fluid) เช่น ของเหลวจะมีปริมาตรคงตัวและมีรูปร่างเปลี่ยนแปลงตามภาชนะที่บรรจุและจะมีปริมาตรลดลงเล็กน้อยเมื่อถูกแรงอัด แต่แก๊สก็เป็นของไหลที่มีรูปร่างและปริมาตรที่ไม่คงตัว โดยปริมาตรมีขนาดเปลี่ยนแปลงตามภาชนะที่บรรจุ และเมื่อมีแรงอัดกระทำต่อแก๊ส ปริมาตรของแก๊สจะเปลี่ยนแปลงอย่างมาก นอกจากนี้ถ้าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง ปริมาตรของแก๊สจะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของเหลวแม้ว่าจะมีรูปร่างไม่แน่นอนตามภาชนะที่บรรจุ แต่จะมีปริมาตรคงที่ค่าหนึ่ง (ที่อาจขึ้นกับอุณหภูมิ) จึงจัดของเหลวเป็นของไหลที่อัดไม่ได้ (Incompressible fluid) แก๊สหรืออากาศมีปริมาตรที่ไม่แน่นอน เมื่อเปลี่ยนไปสู่ภาชนะที่ใหญ่กว่า ก็สามารถกระจายไปเต็มภาชนะใหม่นั้นได้ จึงจัดแก๊สหรืออากาศเป็นของไหลที่อัดได้ (Compressible fluid) ทั้งนี้สารแต่ละชนิดจะมีความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 0 °C และความดัน 1 บรรยากาศ ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ความหนาแน่นของสารบางชนิดที่อุณหภูมิ 0 °C และความดัน 1 บรรยากาศ

สาร	ความหนาแน่น (kg/m ³)	สาร	ความหนาแน่น (kg/m ³)
ออสเมียม	22.5 × 10 ³	ปรอท	13.6 × 10 ³
ทอง	19.3 × 10 ³	น้ำทะเล	1.024 × 10 ³
ยูเรเนียม	18.7 × 10 ³	น้ำ (4 °C)	1.00 × 10 ³
ตะกั่ว	11.3 × 10 ³	เอทิลแอลกอฮอล์	0.79 × 10 ³

ในการหาความหนาแน่นด้วยชุดทดสอบหาความหนาแน่นของ Sartorius จะใช้หลักการของ อาร์คิมิดีสเช่นกัน โดยขณะที่ของแข็งจมอยู่ในของเหลวที่ทราบค่าความหนาแน่นในงานวิจัยนี้ใช้ไซลีน (xylene) จะมีแรงลอยตัว (Buoyancy force) ที่มีค่าเท่ากับ น้ำหนักของของเหลวที่ถูกแทนที่ด้วยปริมาตรของของแข็งนั้น ๆ ทั้งนี้สามารถใช้ชุดทดลองหาความหนาแน่นของวัตถุขณะที่ชั่งในอากาศและที่ชั่งในน้ำ กรณีที่เกิดแรงลอยตัวขณะทำการทดสอบนั้น ความถ่วงจำเพาะของของแข็งจะหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\rho = \left(\frac{W_a}{W_a - W_b} \right) \rho_b \quad (3.1)$$

- เมื่อ W_a คือน้ำหนักของแก้วที่ชั่งในอากาศ (นิวตัน)
 W_b คือน้ำหนักของแก้วที่ชั่งในโซลิน (นิวตัน)
 ρ_b คือความหนาแน่นของโซลิน ($\rho_b = 8.63 \times 10^2$ กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)
 ρ คือความหนาแน่นของแก้ว (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)



รูปที่ 3.12 เครื่องชั่งมวลที่มีค่าความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง

ปริมาตรเชิงมวล (V_m) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$V_m = \frac{\text{molar wt.}}{\text{density}} = \frac{M_T}{\rho} \quad (3.2)$$

เมื่อ M_T คือน้ำหนักโมเลกุลรวมของระบบแก้วที่มีองค์ประกอบของสารหลายชนิด

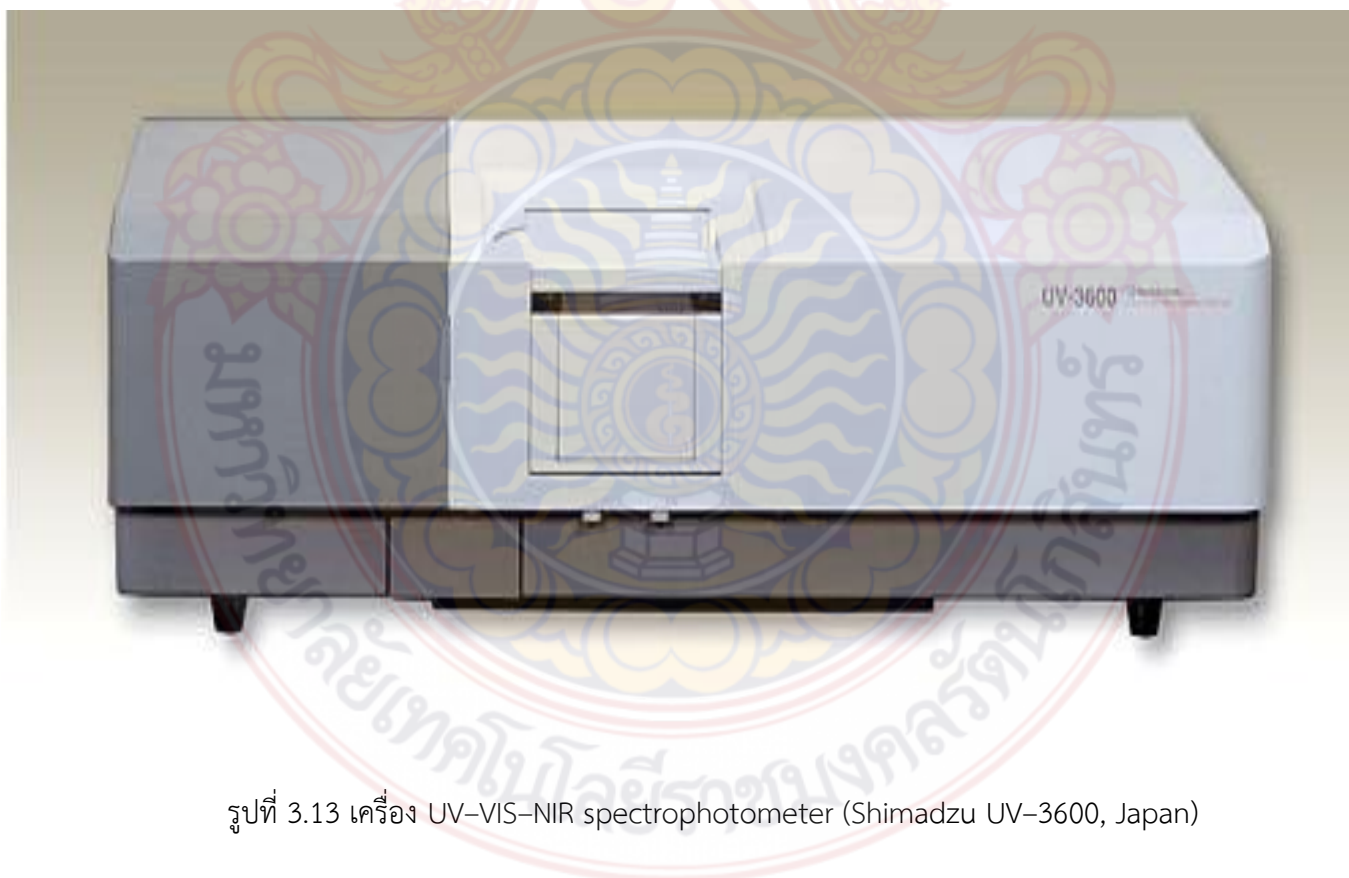
$$M_T = x_{\text{Bi}_2\text{O}_3} Z_{\text{Bi}_2\text{O}_3} + x_{\text{B}_2\text{O}_3} Z_{\text{B}_2\text{O}_3} + x_{\text{Sm}_2\text{O}_3} Z_{\text{Eu}_2\text{O}_3} \quad (3.3)$$

โดยที่ $x_{\text{Bi}_2\text{O}_3}$, $x_{\text{B}_2\text{O}_3}$ และ $x_{\text{Eu}_2\text{O}_3}$ คือปริมาณสัดส่วนของออกไซด์ที่อยู่ในรูปของสารประกอบของบิสมีทบอร์เรท และซาแมเรียม ตามลำดับ ส่วน $Z_{\text{Bi}_2\text{O}_3}$, $Z_{\text{B}_2\text{O}_3}$ และ $Z_{\text{Eu}_2\text{O}_3}$ คือมวลโมเลกุลของสารประกอบออกไซด์ของบิสมีท แบเรียม บอร์เรท และซาแมเรียม ตามลำดับ

3.3.2 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ช่วงรังสีอัลตราไวโอเลตถึงช่วงที่ตามองเห็น

(UV/VIS Spectrophotometer)

UV/VIS Spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่า intensity ในช่วงรังสีอัลตราไวโอเลตและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยชิ้นตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในชิ้นตัวอย่างซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อนและสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้ คุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของสารเมื่อโมเลกุลของชิ้นตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงในช่วงรังสีอัลตราไวโอเลตหรือแสงขาวที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ส่งผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่ความยาวคลื่นค่าต่าง ๆ ตามกฎของ Beer-Lambert ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในระบุชนิดและปริมาณของสารต่างๆ ที่มีอยู่ในตัวอย่างได้ ในงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์สเปกตรัมของการส่งผ่านแสงในช่วงรังสีอัลตราไวโอเลตถึงช่วงที่ตามองเห็นและช่วงใกล้รังสีอินฟราเรดด้วยเครื่อง UV-VIS-NIR spectrophotometer (UV-3600, Shimadzu) ดังรูปที่ 3.13 ทำการวัดที่อุณหภูมิห้องในช่วงความยาวคลื่น 185 – 3,300 นาโนเมตร



รูปที่ 3.13 เครื่อง UV-VIS-NIR spectrophotometer (Shimadzu UV-3600, Japan)

3.3.3 การเปล่งแสง (Photoluminescence)

สำหรับการศึกษาการเปล่งแสงของระบบแก้ว โดยการวัดสเปกตรัมของการส่งผ่านภายใต้อุณหภูมิต่ำด้วยเครื่อง Spectrofluorophotometer (Shimadzu RF-5301PC, Japan) ในการวัดคุณสมบัติของการดูดกลืนและการส่งผ่านแสงจากการกระตุ้นด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ โดยเครื่องวัดดังกล่าวมีหลอดซีนอนเป็นแหล่งกำเนิดแสง



รูปที่ 3.14 เครื่อง Spectrofluorophotometer (Shimadzu RF-5301PC, Japan)

บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้เตรียมส่วนผสมในการหลอมแก้วจากร้อยละโดยโมลของสารตั้งต้นต่าง ๆ ดังนี้ $(40-x)B_2O_3 : 40Bi_2O_3 : 20BaO : xEu_2O_3$ โดยที่ x คือจำนวนโมล Eu_2O_3 ที่ใส่ลงไปปริมาณต่าง ๆ กัน โดยมีปริมาณ 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 เปอร์เซ็นต์โมล ตามลำดับ ที่เตรียมขึ้นจากสารเคมี Bi_2O_3 , H_3BO_3 , BaO และ Eu_2O_3 ที่มีความบริสุทธิ์สูง (LAB GRADE – High purity) ซึ่งได้สูตรแก้วสรุปดังตารางที่ 4.1 ซึ่งสารเตรียมส่วนผสมของสารตั้งต้นมวลรวม 20 กรัม จากนั้นนำสารตั้งต้นในการหลอมแก้ว มาผสมให้เข้ากันในครุชีเบิล (Crucible) ที่เตรียมไว้ จากนั้นนำเข้าเตาเผา สาร โดยให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องจนถึงอุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส และให้ความร้อนในการหลอมแก้วที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อให้สารตั้งต้นหลอมเหลวเป็นเนื้อเดียวกันจะได้น้ำแก้วเหลว เมื่อแก้วหลอมตัวตามเวลาที่กำหนดแล้ว นำแก้วที่หลอมเหลวแล้วเทแก้วเหลวลงในบล็อกที่ทำจากสแตนเลส ที่ตั้งไว้จนแก้วเริ่มแข็งตัวจึงนำแก้วออกจากบล็อก แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นจึงปิดเตาไฟฟ้ารอจนอุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิต้องจึงนำแก้วออกจากเตา นำตัวอย่างแก้วที่ได้จากการหลอมมาตัดและขัดผิวแก้วให้ได้ตามความขนาด $1.0 \times 1.5 \times 0.3$ เซนติเมตร

ตารางที่ 4.1 แสดงสูตรระบบแก้วบิสมีท์แบบเรียบอร์เรทที่เติม Eu_2O_3 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ตัวอย่างที่	Eu_2O_3 (mol%)	สูตรแก้ว
1	0.00	$40.0Bi_2O_3 : 20.0BaO : 40.0B_2O_3$
2	0.50	$39.5Bi_2O_3 : 20.0BaO : 40.0B_2O_3 : 0.5Eu_2O_3$
3	1.00	$39.0Bi_2O_3 : 20.0BaO : 40.0B_2O_3 : 1.0Eu_2O_3$
4	1.50	$38.5Bi_2O_3 : 20.0BaO : 40.0B_2O_3 : 1.5Eu_2O_3$
5	2.00	$38.0Bi_2O_3 : 20.0BaO : 40.0B_2O_3 : 2.0Eu_2O_3$
6	2.50	$37.5Bi_2O_3 : 20.0BaO : 40.0B_2O_3 : 2.5Eu_2O_3$

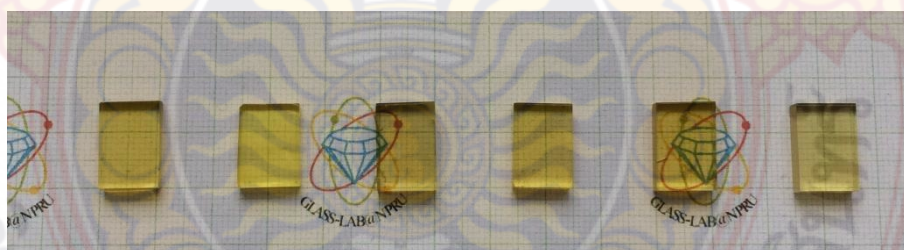
จากรูปที่ 4.1 ระบบแก้วบิสมีทแบรเรียมบอร์เรทที่เติมด้วยซาแมเรียมไอออน จากสูตร $(40-x)\text{B}_2\text{O}_3:40\text{Bi}_2\text{O}_3:20\text{BaO}:x\text{Eu}_2\text{O}_3$ โดยที่ $x = 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ และ 2.5 เปอร์เซ็นต์โมล ตามลำดับ ที่ตัดและขัดผิวแก้วให้ได้ตามความขนาด $1.0 \times 1.5 \times 0.3$ เซนติเมตร จากนั้นนำตัวอย่างแก้วที่ได้ศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางแสงของแก้ว B_2O_3 - Bi_2O_3 - BaO ที่เจือด้วย Eu_2O_3 ซึ่งประกอบไปด้วยผลการวัดและการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- ความหนาแน่นและปริมาตรเชิงโมล
- การดูดกลืนแสง
- การเปล่งแสง
- การวิเคราะห์เชิงควอนตัมฟิสิกส์ตามทฤษฎี J-O
- สีของแสงตามมาตรฐาน CIE 1931
- Life time

4.1 สมบัติแก้ว B_2O_3 - Bi_2O_3 - BaO ที่ถูกเจือด้วย Eu_2O_3

4.1.1 ลักษณะของแก้วที่เตรียมได้

จากการเตรียมแก้ว B_2O_3 - Bi_2O_3 - BaO ที่ถูกเจือด้วย Eu_2O_3 ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 โดยโมล พบว่า แก้วตัวอย่างที่เตรียมได้มีเหลืองอ่อน มีลักษณะโปร่งแสง และจะมีสีเหลืองเข้มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของ Eu_2O_3 ดังแสดงในรูปที่ 4.1



$(40-x)\text{B}_2\text{O}_3:40\text{Bi}_2\text{O}_3:20\text{BaO}:x\text{Eu}_2\text{O}_3$

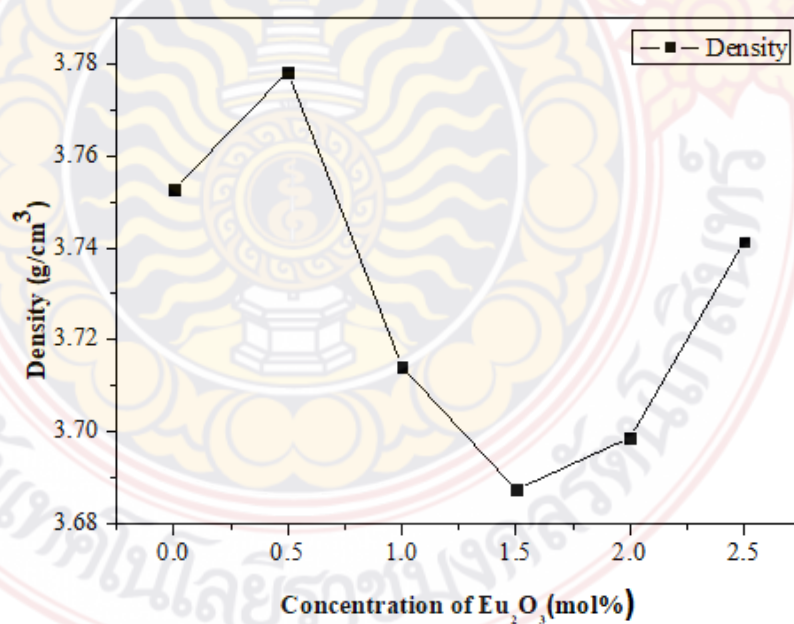
รูปที่ 4.1 แก้ว B_2O_3 - Bi_2O_3 - BaO ที่ถูกเจือด้วย Eu_2O_3 ที่ใช้สำหรับทดสอบสมบัติทางฟิสิกส์

4.1.2 ความหนาแน่นและปริมาตรเชิงโมล

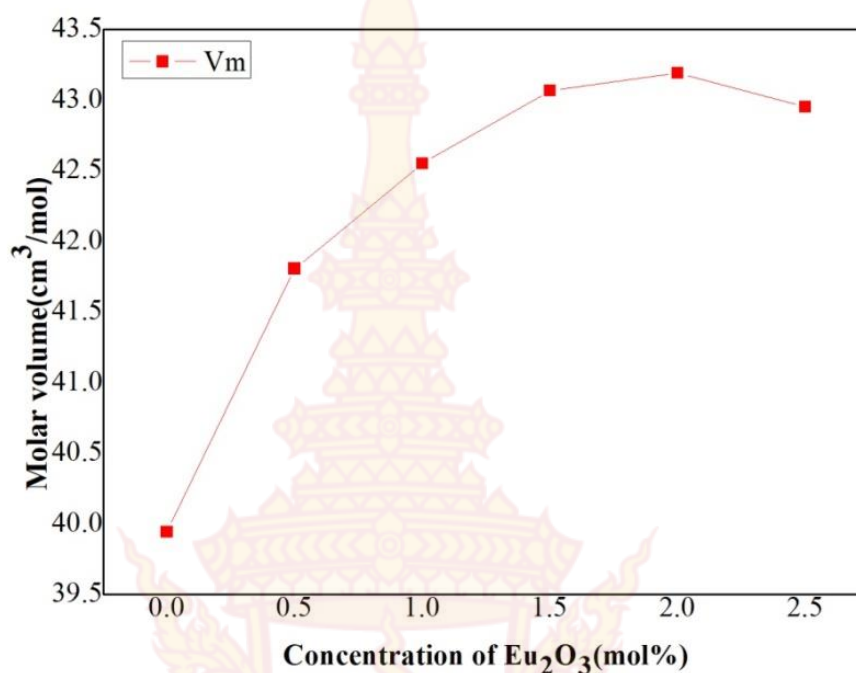
จากการพิจารณาตารางที่ 4.1 พบว่า ความหนาแน่นและปริมาตรเชิงโมลของแก้ว $B_2O_3 - Bi_2O_3 - BaO$ ที่ถูกเจือด้วย Eu_2O_3

ตารางที่ 4.2 แสดงความหนาแน่นและปริมาตรเชิงโมลของระบบแก้วบิสมาท์แบเรียมบอร์เรทที่เติม Eu_2O_3 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ความเข้มข้นของ Eu_2O_3 (ร้อยละโดยมวล)	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	ปริมาตรเชิงโมล (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล)
0.0	3.7526	39.94124
0.5	3.7783	41.80644
1.0	3.7142	42.55293
1.5	3.6874	43.06723
2.0	3.6987	43.19194
2.5	3.7413	42.95287



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกับปริมาณความเข้มข้นของยูโรเพียมไอออน



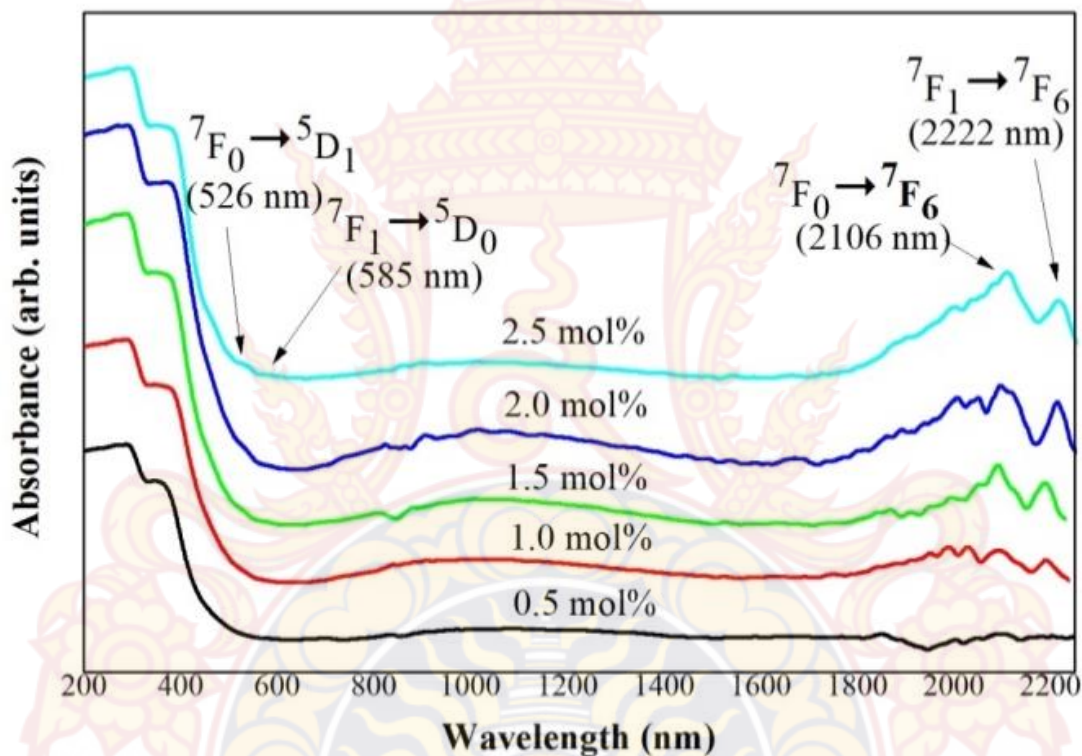
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของปริมาตรเชิงโมลกับปริมาณความเข้มข้นของยูโรเพียมไอออน

จากการพิจารณาค่าความหนาแน่นและปริมาตรเชิงโมลของระบบแก้วในตารางที่ 4.1 พบว่า ความหนาแน่นของแก้ว B_2O_3 - Bi_2O_3 - BaO ที่เจือด้วย Eu_2O_3 และความเข้มข้นของ Eu_2O_3 ไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างชัดเจน ในขณะที่ปริมาตรเชิงโมลมีพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงที่ขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นของ Eu_2O_3 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของ Eu_2O_3 ที่เจือลงในแก้ว ซึ่งเป็นผลมาจาก Eu_2O_3 ที่มีมวลโมเลกุลมากกว่า B_2O_3 เข้าไปแทนที่ B_2O_3 และการที่ Eu^{3+} เข้าไปแทรกในโครงข่ายแก้วส่งผลให้เกิดการทำลายพันธะออกซิเจนที่ทำหน้าที่เชื่อมเป็นสะพานให้ขาดออกจากกัน เรียกว่าปรากฏการณ์นี้ว่า non-bridging oxygen (NBOs) เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นในโครงสร้างแก้ว ดังแสดงผลในกราฟรูปที่ 4.3

4.1.3 สมบัติการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น UV-VIS-NIR

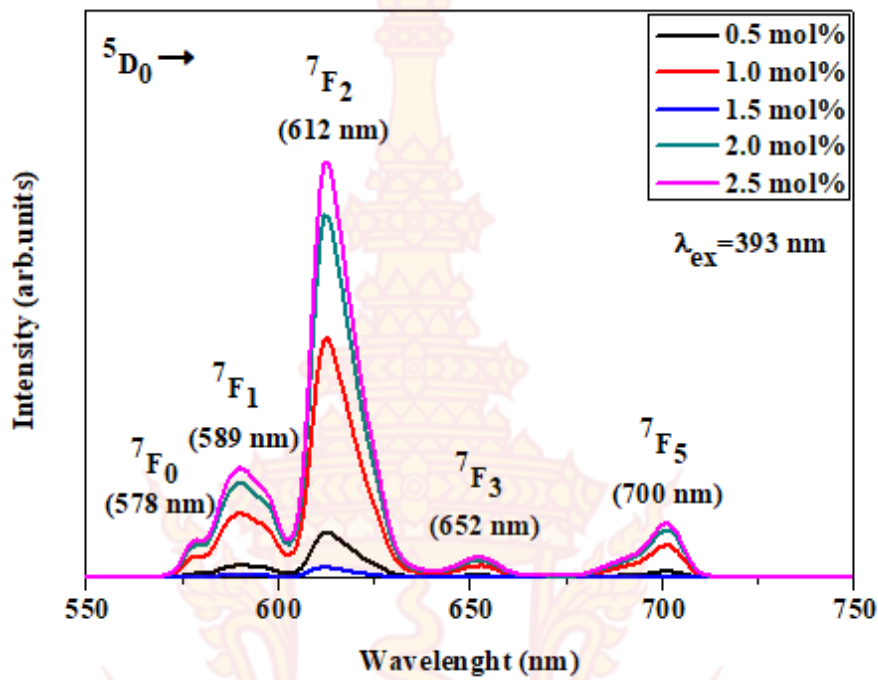
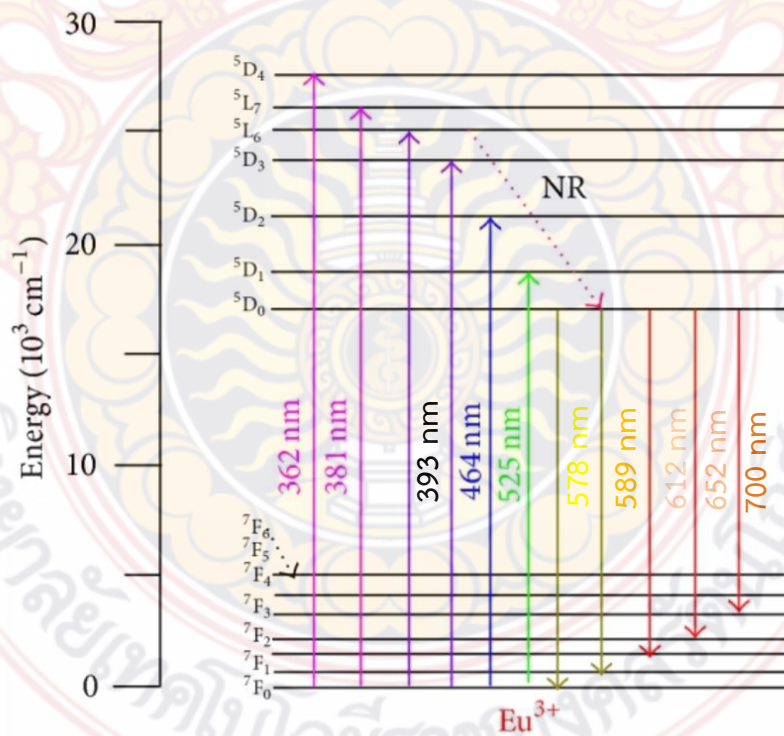
จากการวิเคราะห์สเปกตรัมของการดูดกลืนแสงของระบบแก้ว B_2O_3 - Bi_2O_3 - BaO ที่เจือด้วย Eu_2O_3 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ในช่วงความยาวคลื่นกว้างตั้งแต่ช่วงความยาวคลื่นรังสีอัลตราไวโอเล็ตถึงช่วงใกล้ย่านรังสีอินฟราเรด (UV-VIS-NIR) ในช่วงความยาวคลื่น 300 ถึง 2,000 นาโนเมตร โดยบันทึกผลที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.4 จากผลที่ได้พบว่า สเปกตรัมของการดูดกลืนแสงของระบบแก้วมีลักษณะของการดูดกลืนคล้ายกัน แต่ค่าความเข้มของแต่ละยอดพีคมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของยูโรเพียมไอออน ซึ่งแต่ละกราฟความเข้มแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ พบยอดพีคของการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นในช่วงที่ตามองเห็นไปจนถึงช่วงความยาวคลื่นใกล้อินฟราเรด ซึ่งพบจำนวนพีคของการดูดกลืนแสงจำนวน 4 พีค ที่ความยาวคลื่น 526, 585, 2106 และ 2222 นาโนเมตร ซึ่งมีความสอดคล้องกับการเปลี่ยนของระดับพลังงานสถานะของ

อิเล็กตรอน ${}^7F_0 \rightarrow {}^5D_1$, ${}^7F_1 \rightarrow {}^5D_0$, ${}^7F_0 \rightarrow {}^7F_6$ และ ${}^7F_1 \rightarrow {}^7F_6$ ตามลำดับ โดยมีการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 526 นาโนเมตรได้ดีที่สุด สำหรับในช่วงความยาวคลื่นใกล้อินฟราเรดมีการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 2106 และ 2222 นาโนเมตร ที่ปรากฏค่อนข้างเด่นชัด ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงาน ${}^7F_0 \rightarrow {}^7F_6$ และ ${}^7F_1 \rightarrow {}^7F_6$ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อปริมาณความเข้มข้นของ Eu_2O_3 ที่เจือลงไปแก้วเพิ่มมากขึ้นทำให้แก้วเกิดการดูดกลืนแสงได้มากขึ้น โดยการสังเกตจากความเข้มฟลักซ์ที่มีความแหลมคมเพิ่มมากขึ้น

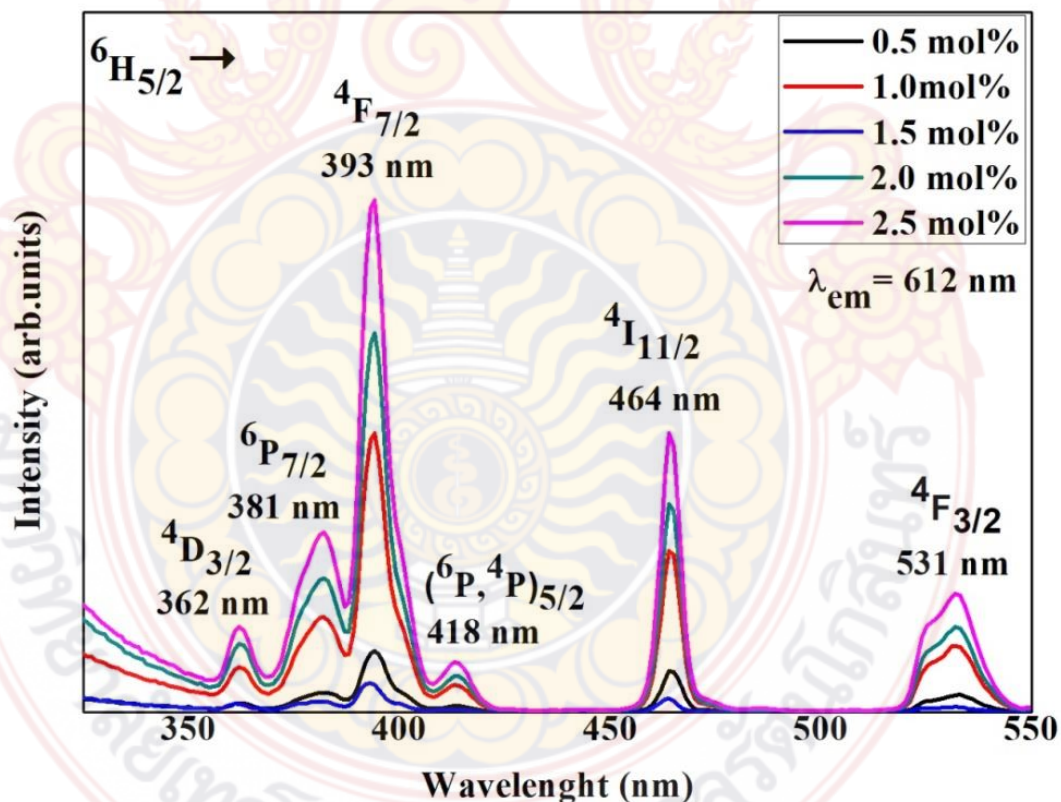


รูปที่ 4.4 สเปกตรัมของการดูดกลืนแสงของระบบแก้ว $\text{B}_2\text{O}_3\text{-Bi}_2\text{O}_3\text{-BaO}$ ที่เจือด้วย Eu_2O_3 ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ

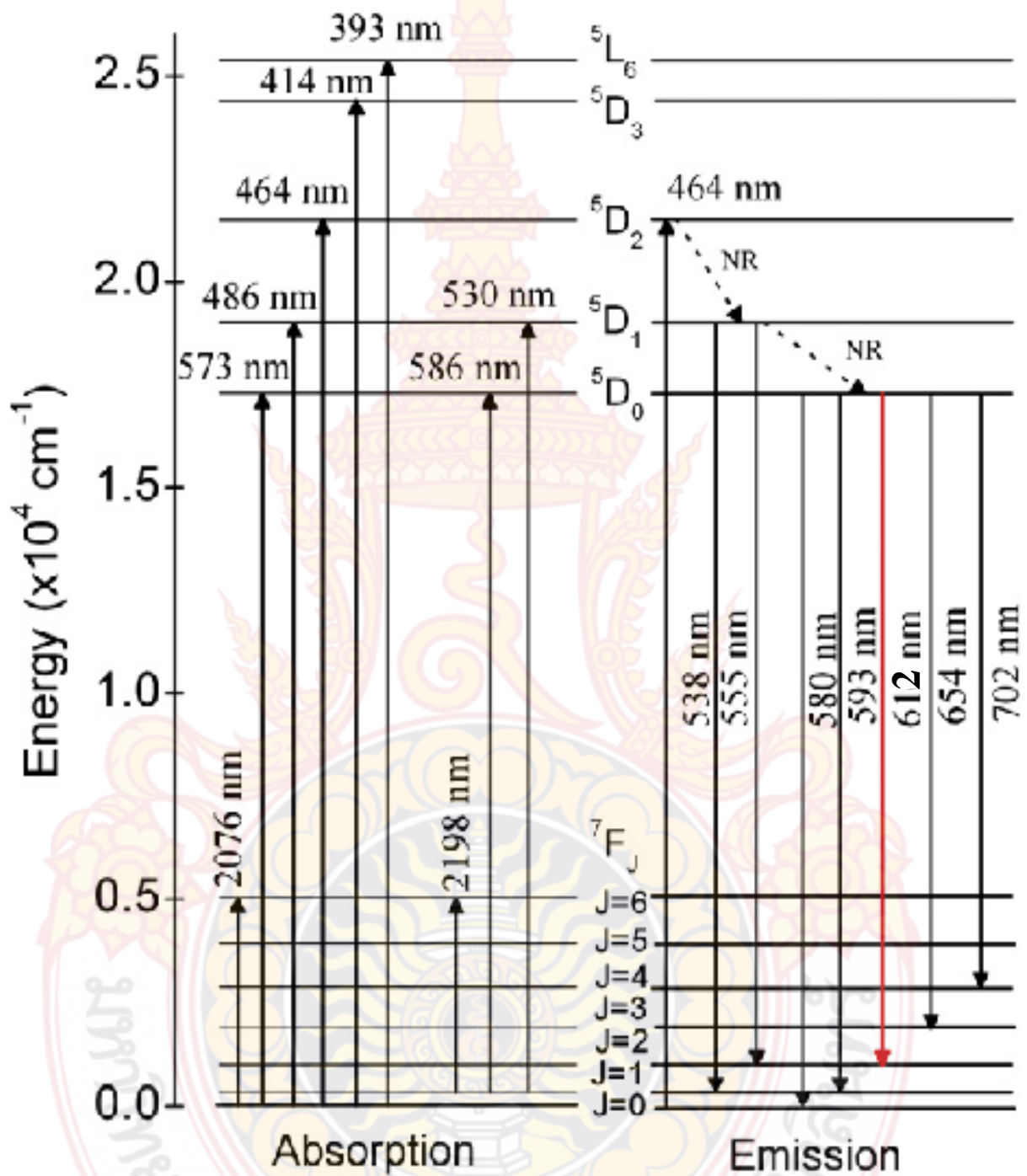
4.1.4 สมบัติการเปล่งแสง (Photoluminescence properties)

รูปที่ 4.5 สเปกตรัมของการเปล่งแสงของระบบแก้ว B_2O_3 - Bi_2O_3 - BaO ที่เจือด้วย Eu_2O_3 ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆรูปที่ 4.6 แผนภาพการเปลี่ยนระดับพลังงานของ Eu^{3+} ของระบบแก้ว B_2O_3 - Bi_2O_3 - BaO ที่เจือด้วย Eu_2O_3 ตามสเปกตรัมของการเปล่งแสง

จากกราฟสเปกตรัมของการเปล่งแสงเมื่อใช้แสงจากหลอดไฟซีนอนที่มีความยาวคลื่น 408 นาโนเมตร กระตุ้นอิเล็กตรอนที่อยู่ในระบบแก้ว แสดงดังรูปที่ 4.6 พบเกิดการเปล่งแสง 4 พีคที่สอดคล้องกับการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนคือ ${}^4G_{7/2} \rightarrow {}^6H_{5/2}$ (564 นาโนเมตร สีเหลืองอ่อน) ${}^4G_{7/2} \rightarrow {}^6H_{7/2}$ (600 นาโนเมตร สีส้มเข้ม) ${}^4G_{7/2} \rightarrow {}^6H_{9/2}$ (645 นาโนเมตร สีแดงเข้ม) และ ${}^4G_{7/2} \rightarrow {}^6H_{11/2}$ (709 นาโนเมตร สีแดงอ่อน) และจากงานวิจัย พบว่าความเข้มข้นของไอออนของธาตุซาแมเรียม 1.00 เปอร์เซ็นต์โมล ที่เจือลงในระบบแก้วบริสุทธิ์แบบเรียบมอร์เรทให้ค่าความเข้มของพีคสูงสุด ที่ความเข้มข้นมากกว่า 1.00 เปอร์เซ็นต์โมล ความเข้มของพีคการเปล่งแสงกลับมีค่าลดลงเนื่องมาจากความเข้มข้นของไอออนที่ใส่เข้าไปมีปริมาณมากเกินไป (concentration quenching) แสดงดังรูปที่ 4.7 จากรูปที่ 4.8 เป็นแผนภาพส่วนหนึ่งที่แสดงกระบวนการคายพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและการคายพลังงานความร้อน (non-radiative (NR)) เมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในซามาเรียมจากชั้นระดับพลังงาน ${}^4F_{7/2}$ และมีการคายพลังงานในรูปของพลังงานความร้อนมายังระดับพลังงานสถานะ ${}^4G_{7/2}$ และคายพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามายังระดับพลังงานสถานะ ${}^4G_{7/2}$ ซึ่งอยู่ในความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านที่ตามองเห็นถึงย่านใกล้รังสีอินฟราเรด (VIS-IR)



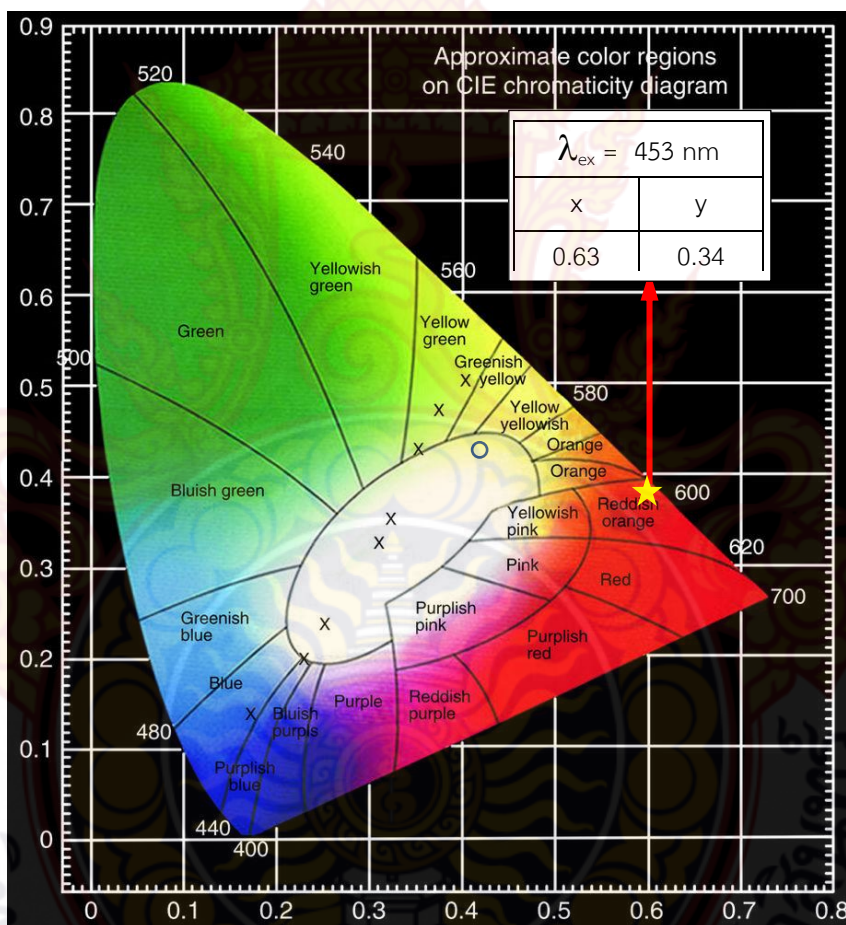
รูปที่ 4.7 สเปกตรัมของการคายพลังงานเมื่อกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 393 นาโนเมตร



รูปที่ 4.8 แผนภาพการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนเมื่อกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 393 นาโนเมตร

4.1.5 สีของแสงตามระบบมาตรฐาน CIE 1931

สำหรับการวิเคราะห์สีของแก้วโดยใช้ข้อมูลของสเปกตรัมของการเปล่งแสงมาคำนวณหาค่าพิกัด (x,y) พบว่าสเปกตรัมของการเปล่งแสงของ Eu^{3+} ในระบบแก้ว BBBO : Eu^{3+} ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยแสงที่มีความยาวคลื่น 393 นาโนเมตร ที่มีความเข้มข้น Eu_2O_3 ร้อยละ 2.50 โดยโมล มีค่าพิกัดสี คือ (0.64,0.35) และเมื่อนำพิกัดดังกล่าวไปเทียบกับแผนภาพสีมาตรฐาน CIE 1931 Chromaticity พบว่าแสงที่เปล่งออกมาเป็นแสงสีแดง ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แผนภาพสีมาตรฐาน CIE 1931 Chromaticity ของแก้ว BBBO : Eu^{3+} ที่ความเข้มข้น Dy_2O_3 ร้อยละ 2.50 โดยโมล

4.1.6 การศึกษาสมบัติเชิงควอนตัมด้วยทฤษฎี J-O

ตารางที่ 4.3 ค่าความแรงของการสั่นที่ได้จากการคำนวณ (f_{cal}) และค่าที่ได้จากการทดลอง (f_{exp}) ที่เป็นผลมาจากการเปลี่ยนชั้นพลังงานที่เกิดจากการดูดกลืนแสงใน BBBO : Eu^{3+} ที่ความเข้มข้น Eu_2O_3 ร้อยละ 2.50 โดยโมล

ระดับชั้นพลังงาน	พลังงาน(เซนติเมตร ⁻¹)	ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	f_{cal} (10^{-6})	f_{exp} (10^{-6})
$^5D_0 \rightarrow ^7F_0$	17301.03806	578	0	0.03
$^5D_0 \rightarrow ^7F_1$	16977.92869	589	0.10	0.19
$^5D_0 \rightarrow ^7F_2$	16339.86928	612	0.59	0.69
$^5D_0 \rightarrow ^7F_3$	15337.42331	652	0	0.02
$^5D_0 \rightarrow ^7F_5$	14285.71429	700	0.2629	0.07

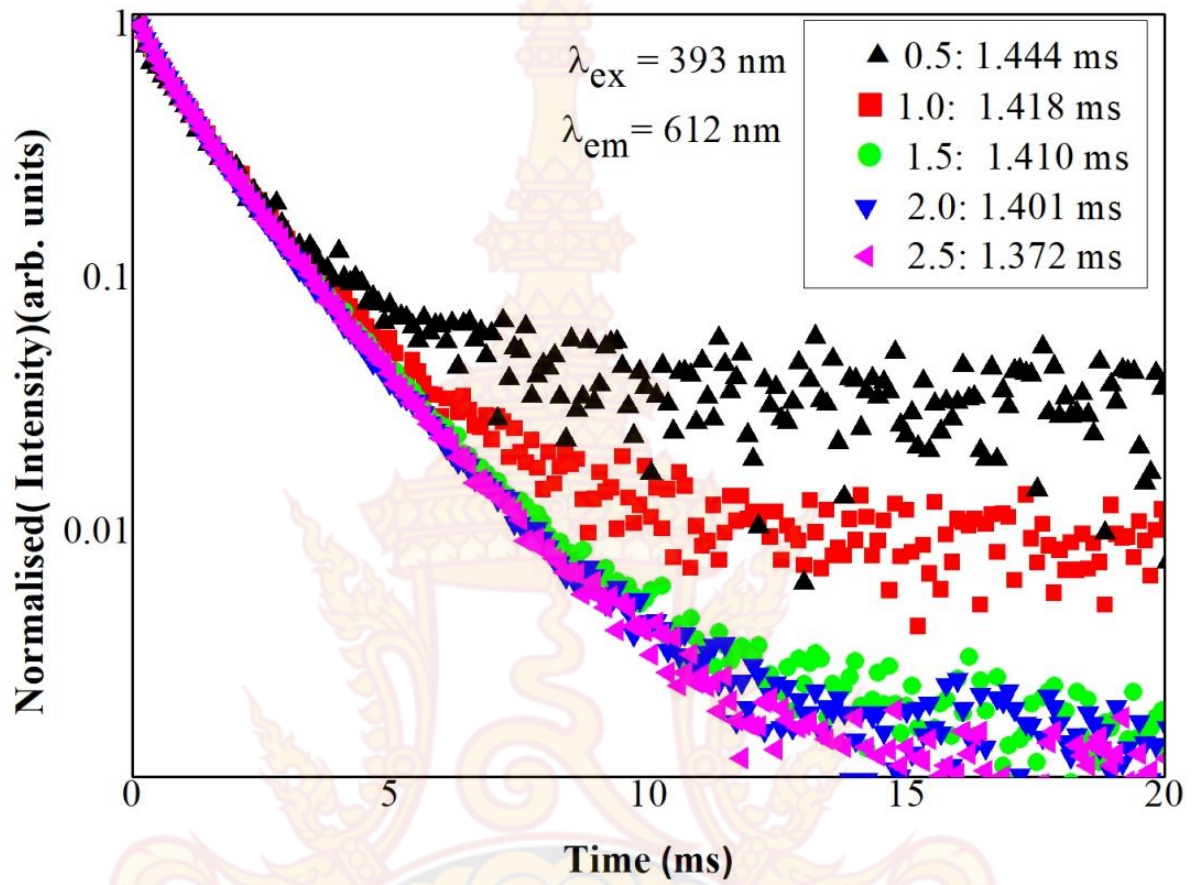
ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ของ J-O (Ω_2, Ω_4 และ Ω_6) ของแก้ว BBBO : Eu^{3+} ในงานวิจัยนี้ เปรียบเทียบกับค่าพารามิเตอร์ของ J-O ของแก้วสูตรอื่น ๆ ที่มีการเจือด้วย Eu^{3+} ในงานวิจัยที่ผ่านมา

ระบบแก้ว	$\Omega_2 \times 10^{-20}$	$\Omega_4 \times 10^{-20}$	$\Omega_6 \times 10^{-20}$
	เซนติเมตร ²		
BBBO : Eu^{3+}	0.10	0.20	1.48
LiLaB : Eu^{3+} (N. Wantana, et al., 2015)	2.34	3.00	0.34
AS : Eu^{3+} (S. Hazarika and S.Rai, 2004)	5.61	3.47	2.91
PNBYF : Eu^{3+} (R. Van Deun, et al., 1998)	4.90	5.20	4.00

จากกราฟสเปกตรัมของการเปล่งแสงของแก้ว BBBO : Eu³⁺ พบว่าแก้ว BBBO : Eu³⁺ ที่ความเข้มข้น Eu₂O₃ ร้อยละ 2.50 โดยโมลให้ค่าความเข้มแสงสูงสุด ผู้วิจัยจึงให้ผู้ช่วยวิจัยและนักคณิตศาสตร์เชิงโปรแกรมเพื่อคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของ J-O โดยสามารถคำนวณหา f_{cal} และค่า f_{exp} เมื่อพิจารณาความแรงของการสั่นทั้งสอง พบว่า การดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 612 นาโนเมตร มีค่า f_{cal} และค่า f_{exp} สูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 0.59×10^{-6} , 0.69×10^{-6} ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของระดับพลังงาน ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$ นั้น มีความแรงในการเกิดขึ้นมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนระดับพลังงานอื่น ๆ ในขณะเดียวกันสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของ J-O ที่เป็นผลมาจากการเปลี่ยนชั้นพลังงานที่เกิดจากการดูดกลืนแสง (Ω_2, Ω_4 และ Ω_6) ของแก้ว BBBO : Eu³⁺ ในงานวิจัยนี้ เปรียบเทียบกับค่าพารามิเตอร์ของ J-O ของแก้วสูตรอื่น ๆ ที่มีการเจือด้วย Eu³⁺ ในงานวิจัยที่ผ่านมา แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 และการการพิจารณาค่าสัดส่วนการเปล่งแสงที่ความยาวคลื่น 612 นาโนเมตร มีค่าสัดส่วนการเปล่งแสงมากกว่า 0.5 ซึ่งทำให้แก้วดังกล่าวสามารถนำไปใช้เป็นแสงเลเซอร์ ออกมาโดยมีกำลังสูงสุดกว่าการปลดปล่อยที่ความยาวคลื่นอื่น ๆ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า แก้ว BBBO : Eu³⁺ ที่ความเข้มข้น Eu₂O₃ ร้อยละ 2.50 โดยโมล เป็นวัสดุที่มีศักยภาพที่น่าสนใจและสามารถนำไปพัฒนาวัสดุตัวกลางเลเซอร์ เป็นไส้หลอดไฟแอลอีดีและหน้าจอแสดงผล

4.1.7 Life time

จากความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความเข้มแสงที่ปลดปล่อยออกมาที่ความยาวคลื่น 612 นาโนเมตร ออกมาจากแก้ว BBBO ที่เจือด้วย Eu³⁺ แสดงดังกราฟรูปที่ 4.9 ซึ่งจากการทำนายแนวโน้มแล้วกราฟที่ได้มีลักษณะกราฟฟังก์ชันลดแบบเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งสามารถหาค่า Life time ของแก้วที่เจือ Eu₂O₃ ร้อยละ 0.50, 1.00, 1.50, 2.00 และ 2.50 โดยโมล มีค่า 1.444, 1.418, 1.410, 1.401 และ 1.372 มิลลิวินาที ตามลำดับ ซึ่งค่า Life time ของแก้ว BBBO ที่เจือด้วย Eu³⁺ มีค่าลดลงตามความเข้มข้นของ Eu₂O₃ ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาตามเส้นกราฟดังกล่าว พบว่า มีการลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลแบบไม่เชิงเดียวนั้น ได้แสดงให้เห็นถึง การเกิดปรากฏการณ์ถ่ายโอนพลังงาน ระหว่าง Eu³⁺ ภายในแก้วโดยเมื่อ Eu³⁺ มีปริมาณอยู่ในแก้วมากขึ้นจะทำให้ระยะห่างระหว่าง Eu³⁺ สั้นลง จนสามารถทำให้เกิดการถ่ายโอนพลังงานระหว่างกันได้ การถ่ายโอนพลังงานระหว่าง Eu³⁺ นี้ จะเหนี่ยวนำ Eu³⁺ เปลี่ยนระดับพลังงานลงมาจากสถานะ 5D_0 ได้ไวขึ้น จึงทำให้มีค่าลดลงตามความเข้มข้นของ Eu₂O₃ ที่เพิ่มขึ้นดังกล่าว



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความเข้มแสงที่ปลดปล่อยออกมาที่ความยาวคลื่น 612 นาโนเมตร ออกมาจากแก้ว BBBO ที่เจือด้วย Eu^{3+}

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากข้อมูลในตารางที่ 5.1 สามารถสรุปผลจากการศึกษาระบบแก้ว $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-BaO-B}_2\text{O}_3$ ที่เจือด้วย Eu_2O_3 ได้ดังนี้

ตารางที่ 5.1 สรุปผลจากการศึกษาระบบแก้ว $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-BaO-B}_2\text{O}_3$ ที่เจือด้วย Eu_2O_3

แก้วที่ถูkJเจือด้วย	สมบัติทางกายภาพ	สมบัติการดูดกลืนแสง	สมบัติการเปล่งแสง		สีของแสง	ค่าสัดส่วนการเปล่งแสง	ภาคตัดขวางของการเปล่งแสง
			ความยาวคลื่นที่ใช้กระตุ้น (นาโนเมตร)	ความยาวคลื่นที่ให้ความเข้มแสงสูงสุด (นาโนเมตร)			
Eu_2O_3	Eu_2O_3 ทำให้เกิด NBOs เพิ่มขึ้น	ช่วง VIS-NIR	393	612	แดงส้ม	0.59	1.99×10^{-23}

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของการเจือไอออนของยูโรเพียมลงในระบบแก้วบิสมัทแบเรียมโบรไรท์ที่เตรียมขึ้นจากสูตร $(50-x)\text{B}_2\text{O}_3:50\text{Bi}_2\text{O}_3:x\text{Eu}_2\text{O}_3$ (เมื่อ $x = 0.50, 1.00, 1.50, 2.00$ และ 2.50 เปอร์เซ็นต์โมล) ด้วยเทคนิคการหลอมที่อุณหภูมิสูงและทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว โดยศึกษาสมบัติทางกายภาพ ทางโครงสร้างทางแสง และทางลูมิเนสเซนซ์ พบว่า ค่าความหนาแน่นและปริมาตรเชิงโมลาร์ของระบบแก้วมีค่า 3.69-3.78 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร 39.94-43.19 ลูกบาศก์เซนติเมตร/โมล ตามลำดับ โดยที่ปริมาตรเชิงโมลของระบบแก้วมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของ Eu_2O_3 ที่เจือลงในแก้ว ซึ่งเป็นผลมาจาก Eu_2O_3 ที่มีมวลโมเลกุลมากกว่า B_2O_3 เข้าไปแทนที่ B_2O_3 และการที่ Eu^{3+} เข้าไปแทรกในโครงข่ายแก้วส่งผลให้เกิดการทำลายพันธะออกซิเจนที่ทำหน้าที่เชื่อมเป็นสะพานให้ขาดออกจากกัน เรียกว่าปรากฏการณ์นี้ว่า non-bridging oxygen (NBOs) เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นในโครงสร้างแก้ว สังเกตจากปริมาตรเชิงโมลที่เพิ่มขึ้น จากการวิเคราะห์สเปกตรัมของการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 300 - 1,800 นาโนเมตร พบพีคของการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นในช่วงที่ตามองเห็นไปจนถึงช่วงความยาวคลื่นใกล้อินฟราเรด ซึ่งพบจำนวนพีคของการดูดกลืนแสงจำนวน 4 พีค ที่ความยาวคลื่น 526 (${}^7\text{F}_0 \rightarrow {}^5\text{D}_1$) , 585 (${}^7\text{F}_1 \rightarrow {}^5\text{D}_0$) , 2106 (${}^7\text{F}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_6$)

และ 2222 (${}^7F_1 \rightarrow {}^7F_6$) นาโนเมตรจากการวิเคราะห์ พบว่า แสงที่ความยาวคลื่น 393 นาโนเมตร ที่ถูกดูดกลืนเข้าไป จะไปกระตุ้น Eu^{3+} ในแก้ว แล้วทำให้เกิดการเปล่งแสงออกมาที่ความยาวคลื่น 612 นาโนเมตร พบพีคการเปล่งแสง 4 พีคที่สอดคล้องกับการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนคือ ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_1$ (589 นาโนเมตร สีเหลืองอ่อน) ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$ (612 นาโนเมตร สีส้มเข้ม) ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_3$ (652 นาโนเมตร สีแดงเข้ม) และ ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_5$ (702 นาโนเมตร สีแดงอ่อน) โดยมีค่าความเข้มแสงสูงสุด ที่ความเข้มข้นร้อยละ 2.50 โดยโมล จึงเป็นความเข้มข้นเหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการเจือ Eu_2O_3 ลงไปในแก้ว BBBO สำหรับการวิเคราะห์สีของแก้วโดยเทียบจากแผนภาพสีมาตรฐาน CIE 1931 Chromaticity พบว่า แสงที่เปล่งออกมาเป็นแสงสีแดง ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยแสงที่ความยาวคลื่น 393 นาโนเมตร ขณะที่การศึกษาสมบัติเชิงควอนตัมด้วยทฤษฎี J-O ทำให้สามารถหาค่าสัดส่วนการเปล่งแสงและภาคตัดขวางของการเปล่งแสงที่มีความยาวคลื่น 612 นาโนเมตร ได้เท่ากับ 0.59 และ 1.99×10^{-23} ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแก้วระบบนี้จึงมีศักยภาพสูงต่อการนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุตัวกลางเลเซอร์ เป็นไส้หลอดไฟแอลอีดีและหน้าจอสถุผล



บรรณานุกรม

- [1] Mohapatra, S.D., 2009, FTIR Analysis of $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$ Glass System Doped with Nd_2O_3 , Sciences Indexed, Vol. 3, No. 5, pp. 11–18.
- [2] Becker, P., 1998, “Borate Materials in Nonlinear Optics”, Advance Materials, Vol. 10, pp. 979–986.
- [3] Robert, H.D., 1994, Glass Science, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [4] Becker, P., 2003, “Thermal and Optical Properties of Glasses of the System $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ ”, Crystal Research and Technology, Vol. 1, pp. 74–81.
- [5] J. Kaewkhao, A. Pokaipisit, and P. Limsuwan, “Study on borate glass system containing with Bi_2O_3 and BaO for gamma-rays shielding materials: comparison with PbO ,” Journal of Nuclear Materials, vol. 399, no. 1, pp. 38–40, 2010.
- [6] K. Boonin, J. Kaewkhao, and P. Limsuwan, “Optical Investigation of $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ Glass System,” Advanced Materials Research, vol. 93-94, pp. 336–339, 2010.
- [7] S. Sindhu, S. Sanghi, A. Agarwal, V. P. Seth, and N. Kishore, “Effect of Bi_2O_3 content on the optical band gap, density and electrical conductivity of $\text{MO}\cdot\text{Bi}_2\text{O}_3\cdot\text{B}_2\text{O}_3$ ($\text{M} = \text{Ba}, \text{Sr}$) glasses,” Materials Chemistry and Physics, vol. 90, no. 1, pp. 83–89, 2005.
- [8] A. V. Egorysheva, V. D. Volodin, and V. M. Skorikov, “Glass formation in the $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-BaO}$ system,” Inorganic Materials, vol. 44, no. 11, pp. 1261–1265, 2008.
- [9] C. Feifei, D. Shixun, N. Qiuhua, X. Tiefeng, S. Xiang, and W. Xunsi, “Glass formation and optical band gap studies on $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-BaO}$ ternary system,” Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition, vol. 24, no. 5, pp. 716–720, 2009.
- [10] H. Doweidar and Y. B. Saddeek, “FTIR and ultrasonic investigations on modified bismuth borate glasses,” Journal of Non-Crystalline Solids, vol. 355, no. 6, pp. 348–354, 2009.
- [11] W. Qiao and P. Chena, “Study on the properties of $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-BaO}$ lead-free glass using in the electronic pastes,” Glass Physics and Chemistry, vol. 36, no. 3, pp. 304–308, 2010.
- [12] A. V. Egorysheva, V. D. Volodin, A. A. Chistyakov, Y. A. Kuzishchin, V. M. Skorikov, and T. D. Dudkina, “Luminescence of europium-doped $\text{BaO-Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ glasses,” Inorganic Materials, vol. 46, no. 12, pp. 1384–1390, 2010.
- [13] Ruamnikhom, R., Limsuwan, P., Horprathum, M., Chanthima, N., Kim, H. J., Ruengsri, S. and Kaewkhao, J., 2014, “Up and Down-Conversion Luminescence Properties of Nd^{3+} Ions Doped in $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-BaO-B}_2\text{O}_3$ Glass System”, Advances in Materials Science and Engineering, Vol. 2014.

- [14] G. Lakshminarayana, Rong Yang, Mengfei Mao, Jianrong Qiu, Spectral analysis of RE³⁺ (RE = Sm, Dy, and Tm): P₂O₅-Al₂O₃-Na₂O glasses, *Optical Materials*. 31 (2009) 1506–1512.
- [15] Tirtha Som, Basudeb Karmakar, Infrared-to-red upconversion luminescence in samarium-doped antimony glasses, *Journal of Luminescence*. 128 (2008) 1989–1996
- [16] Duk-Nam, K., Jae-yeol, L., Jeung-Soo, H. and Hyung-sun, K., 2002, “Thermal and Electrical Properties of BaO-B₂O₃-ZnO Glasses”, *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 306, pp. 70–75.
- [17] Isabella-loana, O., Hartmut, H. and Klaus, B., 2006, “Luminescence of Erbium-Doped Bismuth-Borate Glasses”, *Optical Materials*, Vol. 28, pp. 1136–1142.
- [18] Yousefa, E.S., 2006, “Effect of Rare Earth (Pr₂O₃, Nd₂O₃, Sm₂O₃, Eu₂O₃, Gd₂O₃ and Er₂O₃) on the Acoustic Properties of Glass Belonging to Bismuth-Borate System”, *Solid State Communication*, Vol. 139, pp. 108–113.
- [19] Eun-Sub, L., Byung-Sook, K., Joon-Hyung L. and Jeong-Joo K., 2006, “Effect of BaO Content on the Sintering and Physical Properties of BaO-B₂O₃-SiO₂ Glasses”, *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 352, pp. 821–826.
- [20] Egorysheva, A.V., Volodin, V.D. and Skorikov, V.M., 2008, “Glass Formation in the Bi₂O₃-B₂O₃-BaO System”, *Inorganic Materials*, Vol. 44, No. 11, pp. 1261–1265.
- [21] Sharaf, L.M. and El-Deen, M., 2008, “IR and UV Spectral Studies for Rare Earths-Doped Tellurite Glasses”, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 465, pp. 333–339.
- [22] Doweidar, H. and Yasser, B.S., 2009, “FTIR and Ultrasonic Investigations on Modified Bismuth Borate Glasses”, *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 355, pp. 348–354.
- [23] Ali, A.A., 2009, “Optical Properties of Sm³⁺-Doped CaF₂ Bismuth Borate Glasses”, *Journal of Luminescence*, Vol. 129, pp. 1314–1319.
- [24] Wenjie, Q. and Chen, P., 2010, “Study on the Properties of Bi₂O₃-B₂O₃-BaO Lead Free Glass Using in the Electronic Pastes”, *Glass Physics and Chemistry*, Vol. 36, No. 3, pp. 304–308.

ประวัติผู้วิจัย



ชื่อ-สกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รุ่งสรรค์ ร่มนิคม
Asst. Prof. Dr. Rungsan Ruamnikhom

วัน เดือน ปีเกิด 26 มกราคม พ.ศ. 2528

สถานที่ทำงาน คณะศิลปศาสตร์ พื้นที่ศาลายา สาขาวิชาศึกษาทั่วไป-วิทยาศาสตร์ (ฟิสิกส์)
ตำแหน่ง อาจารย์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ต. ศาลายา อ. พุทธมณฑล จ. นครปฐม 73170
หมายเลขโทรศัพท์ที่ทำงาน 02-8894585-7 ต่อ 2922
โทรศัพท์มือถือ 092-2648466
โทรสาร 02-8894585-7 ต่อ 2920
ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (e-mail) sunny_dpst@hotmail.com

ประวัติการศึกษา

ระดับการศึกษา	สถาบัน	สำเร็จการศึกษา	เกรดเฉลี่ยสะสม
ปริญญาเอก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	พ.ศ. 2557	-
ปริญญาโท	มหาวิทยาลัยศิลปากร	พ.ศ. 2554	3.95
ปริญญาตรี	มหาวิทยาลัยศิลปากร	พ.ศ. 2551	3.44 (เกียรตินิยม)

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

Glass Science and Technology

High T_c Superconductors

ผลงานวิจัยระดับชาติและนานาชาติ

ประเภท	ชื่อผู้เขียน / ชื่อผลงาน / ชื่อวารสาร / วัน เดือน ปี
การตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ	<p>- R. Ruamnikhom, P. Limsuwan, M. Horprathum, N. Chanthima, H. J. Kim, S. Ruengsri and J. Kaewkhao, 2014, "Up and down-conversion luminescence properties of Nd³⁺ ions doped in Bi₂O₃-BaO-B₂O₃ glass system", Advances in Materials Science and Engineering, Vol. 2014, Article ID 751973, 5 pages http://dx.doi.org/10.1155/2014/751973.</p>
การประชุมวิชาการระดับนานาชาติภาคการบรรยายและมีเอกสารฉบับเต็ม	<p>-Rungsan Ruamnikhom, Pichet Limsuwan, Natthakridta Chanthima, Jakrapong Kaewkhao, 2013 "Preparation and Properties of Er³⁺ Doped with Bi₂O₃-BaO-B₂O₃ Glass", Advanced Materials Research, Vol. 770, pp. 54 – 58.</p> <p>-R. Ruamnikhom, M. Horprathum, P. Eiamchai, N. Chanthima, J. Kaewkhao and P. Limsuwan, 2013, "NIR Luminescence properties of Nd³⁺ and Er³⁺ ions doped Bi₂O₃-BaO-B₂O₃ glass system", Burapha University International Conference, pp. 595 – 602.</p> <p>-Wongpoma, K., Ruamnikhom, R., Ruangtawee, Y. and Kaewkhaob, J., 2012, "Electrical Properties of Soda Lime Silica Glass Doped with Iron (III) Oxide at Temperature", Journal of Material Science and Applied Energy, Vol. 2, pp. 14-16.</p> <p>-S. Rattanaveeranon, R. Ruamnikhom, S. Pangmanayon, "Growth of Zinc Oxide Nanoparticles on Graphene Assembly Using to Detect of Acetone Concentrations", Key Engineering Materials, Vols. 675-676, pp. 125-129, 2016</p> <p>-R. Ruamnikhom, J. Kaewkhao, "The Improvement of Bismuth Barium Borate Glasses through the Applications of Sm³⁺ Dopant", Key Engineering Materials, Vols. 675-676, pp. 401-404, 2016</p>