

การศึกษาแก้วซิลิเกตที่เจือโลหะไอออน*

Studies on the metal ion-doped silicate glass

รัชฎา บุญเต็ม (Radchada Buntem)**

กมลวรรณ สามกองงาม (Kamolwan Samkongngam)***

บทคัดย่อ

ตัวอย่างแก้วซิลิเกตในงานวิจัยนี้เตรียมโดยใช้แคลบเป็นแหล่งของซิลิกา ส่วนประกอบพื้นฐานของแก้วซิลิเกตประกอบด้วย SiO_2 (จากซีเถ้าแคลบ) Na_2CO_3 , K_2CO_3 , ZnO , H_3BO_3 และ Al_2O_3 ใช้ Nd_2O_3 และ Er_2O_3 ในการทำให้เกิดสีในแก้ว สีของแก้วที่ได้มีสีฟ้า (เจือด้วย Nd_2O_3) และสีชมพู (เจือด้วย Er_2O_3) สัมประสิทธิ์การขยายตัวของ Nd_2O_3 glass มีค่าเท่ากับ $1.30 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ส่วนของ Er_2O_3 glass มีค่าเท่ากับ $1.34 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ข้อมูลการขยายตัวเชิงความร้อนนี้สอดคล้องกับแก้วซิลิเกตอื่นๆ ศึกษาลักษณะจำเพาะของการสั่นของพันธะด้วยอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี ข้อมูลการดูดกลืนแสงของแก้วสีในช่วงวิชิเบิลถูกบันทึกด้วยวิชิเบิลสเปกโตรสโกปี ศึกษาเลขออกซิเดชันและข้อมูลการเกิดโคออร์ดิเนชันของไอออนโลหะในแก้วด้วยสเปกโตรสโกปีการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ จากข้อมูลการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์พบ Nd^{3+} และ Er^{3+} ใน Nd_2O_3 glass และ Er_2O_3 glass ตามลำดับ

* บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโทเรื่อง การศึกษาแก้วซิลิเกตที่เจือโลหะไอออน

This manuscript is a part of the Master thesis entitled studies on the metal ion-doped silicate glass.

** อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.รัชฎา บุญเต็ม อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร e-mail: Buntem_R@su.ac.th

A thesis advisor, Asst. Prof. Dr. Radchada Buntem, Department of Chemistry, Faculty of Science, Silpakorn University, e-mail: Buntem_R@su.ac.th

*** นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาเคมีศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จ.นครปฐม 73000 e-mail : kamolwan1505@gmail.com

A master degree student in chemical education program, Faculty of Science, Silpakorn University, Nakorn Pathom 73000, e-mail: kamolwan1505@gmail.com

Abstract

The silicate glass samples in this research work were prepared using rice husk as the source of silica. The base composition of silicate glass is composed of SiO_2 (from rice husk ash), Na_2CO_3 , K_2CO_3 , ZnO , H_3BO_3 , CaO , and Al_2O_3 . Nd_2O_3 and Er_2O_3 were used for coloring the glass. The color of the glass obtained was blue (doped with Nd_2O_3) and pink (doped with Er_2O_3). The expansion coefficient of Nd_2O_3 -doped glass is $1.30 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ while that of Er_2O_3 -doped glass is $1.34 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. The thermal expansion data corresponds to another silicate glass. The finger prints of the bond vibrations were studied using IR spectroscopy. The visible absorption data of the doped glass were recorded using visible spectrophotometer. While the oxidation states and the coordination information of the metal ions in the glass matrix were investigated using X-ray absorption spectroscopy. From the XAS data, Nd^{3+} and Er^{3+} were found in Nd_2O_3 - and Er_2O_3 -doped glass respectively.

บทนำ

แก้วซิลิเกตเป็นแก้วออกไซด์ที่รู้จักกันมานาน และนำไปใช้งานต่างๆเช่น บรรจุภัณฑ์ วัสดุฉนวน อุปกรณ์ไฟฟ้าหรือวัสดุที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพ เนื่องจากแก้วไม่มีการก่อตัวเป็นผลึก มีความโปร่งใส และทนต่อความร้อนสูง (Du Jincheng, and Corrales., 2006) ซิลิกาเป็นวัตถุดิบหลักในการเตรียมแก้ว ซึ่งโดยทั่วไปผลิตจากทราย แต่จากการศึกษาพบว่าแคลสเป็นของเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีซิลิกาในปริมาณที่น่าสนใจ และซิลิกาที่ผลิตจากแคลสจะมีสารเจือปนที่มาไอออนของโลหะในปริมาณน้อย ในอดีตแคลสจะถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ในขณะที่ซีเมนต์แคลสซึ่งมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบสูงกว่า 90 % โดยมวลไม่ถูกนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ แต่ในระยะต่อมามีการนำมาใช้ทำแก้ว (Chindaprasit et al., 2007) สำหรับประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศเกษตรกรรมการทำแก้วจากแคลสมีข้อได้เปรียบหลายประการทั้งในแง่ปริมาณและราคาของวัตถุดิบ

การเจือธาตุในกลุ่มแลนทาไนด์จะทำให้เกิดสีในแก้ว เนื่องจากเกิด f-f transition ของอิเล็กตรอนในไอออนโลหะที่ถูกล้อมรอบด้วยออกซิเจนในเมทริกซ์ของแก้ว (Tregouet et al., 2014) ในการหลอมแก้วไอออนของโลหะจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชัน ซึ่งศึกษาการเปลี่ยนแปลงนี้โดยใช้สเปกโตรสโกปีการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ วัดสเปกตรัมในช่วง X-ray Absorption Near Edge Structure (XANES) สำหรับธาตุในกลุ่ม f-block นั้นมักวัดในช่วง L3 absorption edge (Cicconi et al., 2013)

ในงานวิจัยนี้ได้เตรียมแก้วที่มีการเจือออกไซด์ของโลหะในกลุ่ม f-block 2 ตัวคือ Nd_2O_3 และ Er_2O_3 โดยใช้ซิลิกาจากแคลสเป็นวัตถุดิบในการหลอมแก้ว และมีการเติมสารประกอบที่ช่วยหลอมอื่นๆ แก้วสีที่ได้จะนำมาศึกษาสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อน (Coefficient of thermal Expansion, COE) เพื่อเปรียบเทียบกับแก้วซิลิเกตที่ได้จากงานวิจัยอื่น นอกจากนี้ยังมีการศึกษาด้วยเทคนิคทางสเปกโตรสโกปีต่างๆ เช่น อินฟราเรดสเปกโตรสโกปีใช้ในการศึกษาหมู่ฟังก์ชัน วิซิเบิลสเปกโตรสโกปี ใช้ในการศึกษาการเกิด f-f transition และการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ในช่วง L3 absorption edge ของ Nd และ Er ใช้ศึกษาเลขออกซิเดชันของไอออนทั้งสองชนิดในเนื้อแก้ว

วิธีการศึกษา

1. สารเคมี

ซิลิกา (SiO_2) ได้จากการเผาแคลสที่อุณหภูมิ 500 °C และสารเคมีอื่นๆที่เป็นสารประกอบออกไซด์มีความบริสุทธิ์ในระดับ AR grade

2. การเตรียมตัวอย่างแก้ว

เตรียมตัวอย่างแก้วซิลิกา 2 ชนิด คือ Nd_2O_3 glass และ Er_2O_3 glass โดยใช้สารเคมีดังในตารางที่ 1 นำองค์ประกอบแก้วที่ชั่งได้ใส่ลงใน Ball mill แล้วหมุนเหวี่ยงให้ของผสมเข้ากันเป็นเวลา 10 นาที แล้วนำส่วนผสมเข้าเตาหลอมไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วเทน้ำแก้วลงบนแม่พิมพ์ จากนั้นนำชิ้นงานแก้วที่ได้เข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 550 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำชิ้นงานแก้วมาวิเคราะห์ค่าการขยายตัวเชิงความร้อน อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี วิชชีเบลสเปกโตรสโกปี และสเปกโตรสโกปีการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์

ตารางที่ 1 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างแก้ว Nd_2O_3 glass และ Er_2O_3 glass (% โดยโมล)

ตัวอย่างแก้ว	เปอร์เซ็นต์โดยโมล
Nd_2O_3 glass	62.6 SiO_2 -24.8 Na_2CO_3 -2.7 K_2CO_3 -4.6 ZnO -2.4 H_3BO_3 -1.5 CaO -1.3 Al_2O_3 -0.1 Nd_2O_3
Er_2O_3 glass	62.0 SiO_2 -24.6 Na_2CO_3 -2.6 K_2CO_3 -4.6 ZnO -2.4 H_3BO_3 -1.5 CaO -1.3 Al_2O_3 -1.0 Er_2O_3

3. การวิเคราะห์ตัวอย่างแก้ว

3.1 ค่าการขยายตัวเชิงความร้อน

นำตัวอย่างแก้วไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Dilatometer ยี่ห้อ NETZSCH รุ่น DIL 402 PC

3.2 เทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี

เตรียมตัวอย่างในลักษณะ KBr disc แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Spectrum 100 โดยวัดสัญญาณในช่วง 400 ถึง 4000 cm^{-1} ใช้ resolution 4 cm^{-1}

3.3 เทคนิควิชีเบลสเปกโตรสโกปี

วิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer ยี่ห้อ Agilent Technologies รุ่น HP-8453 ในช่วงความยาวคลื่น 400-900 nm เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในไอออนของนีโอติเมียมและเออร์เปียม

3.4 วิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์

โดยนำตัวอย่างแก้ว Nd_2O_3 glass และ Er_2O_3 glass มาบดให้เป็นผงละเอียด แล้วนำมาติดกับ Kapton tape นำไปศึกษาด้วยแสงซินโครตรอนจากระบบลำเลียงแสงของ beamline 8 สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ประเทศไทย โดยใช้ผลึกคู่ของ Ge (220) เป็นโมโนโครเมเตอร์เพื่อคัดเลือกพลังงานแสง วัดสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ในช่วง X-ray Absorption Near Edge Structure (XANES) ของ L3 absorption edge ของ Nd (ใช้โฟตอนที่มีพลังงาน 8979 ± 0.2 eV) และ L3 absorption edge ของ

Er (ใช้โฟตอนที่ มีพลังงาน 8359.06 ± 0.2 eV) โดยวัดในโหมดทะลุผ่าน (Transmission mode) แล้วนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ATHENA (Ravel *et al.*, 2015)

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

1. ตัวอย่างแก้ว Nd_2O_3 glass และ Er_2O_3 glass

แก้ว Nd_2O_3 glass ที่เตรียมได้มีสีฟ้า และ Er_2O_3 glass มีสีชมพู โดยลักษณะของแก้วทั้งสองชนิดแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 a) Nd_2O_3 glass b) Er_2O_3 glass

2. การวิเคราะห์ตัวอย่างแก้ว

แก้วแต่ละชนิดจะมีการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนแตกต่างกัน นำตัวอย่างแก้วไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Dilatometer โดยเครื่องจะทำการเพิ่มอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องจนถึงอุณหภูมิสูงสุดที่กำหนดไว้ ในขณะที่เพิ่มอุณหภูมิแก้วจะมีการขยายตัว เครื่องจะคำนวณค่าของความแตกต่างของความยาวของชิ้นงานที่เปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยน เทียบกับความยาวเริ่มต้น เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของแก้วเมื่อได้รับความร้อน ดังสมการ :

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \alpha \Delta T$$

โดยที่ α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของแก้วเมื่อได้รับความร้อน

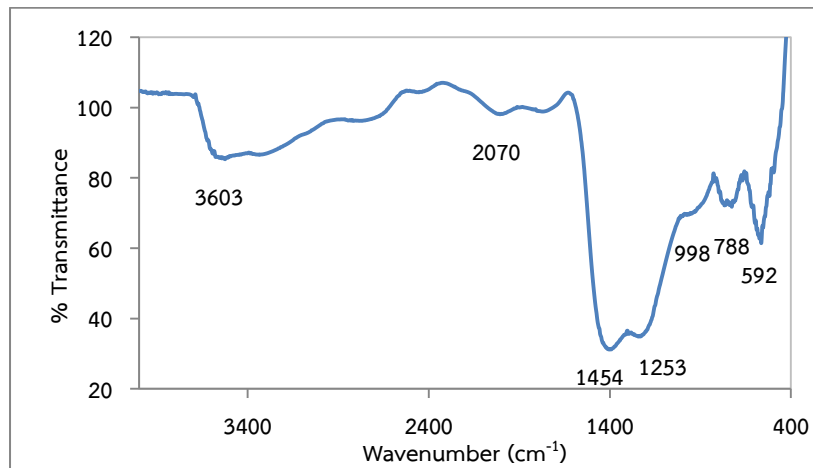
L คือ ความยาวชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงสุด

L_0 คือ ความยาวของชิ้นงานที่อุณหภูมิเริ่มต้น

ΔT คือ ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิสูงสุดกับอุณหภูมิเริ่มต้น

พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อนของตัวอย่าง Nd_2O_3 glass เท่ากับ $1.30 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ และตัวอย่าง Er_2O_3 glass เท่ากับ $1.34 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ซึ่งสอดคล้องกับแก้วซิลิเกตในงานวิจัยของ Wang และ Cheng (Wang M., and Cheng, 2010)

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี โดยนำตัวอย่างที่เตรียมได้ไปวัดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดในช่วงความถี่ 400 ถึง 4000 cm^{-1} เมื่อโมเลกุลของสารดูดกลืนพลังงานที่มีความถี่เดียวกับความถี่ในการสั่นของพันธะในโมเลกุลของสารนั้น จะทำให้พันธะเกิดการสั่นหรือการหมุน ซึ่งสารแต่ละชนิดจะมีความถี่จำเพาะในการสั่นแตกต่างกัน ดังนั้นจากตำแหน่งของความถี่ของแสงอินฟราเรดที่ถูกดูดกลืนจะนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันในสารนั้นได้ จากการวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของตัวอย่างแก้ว Nd_2O_3 glass และ Er_2O_3 glass ปรากฏสเปกตรัมที่มีลักษณะคล้ายคลึงกันดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของตัวอย่างแก้ว

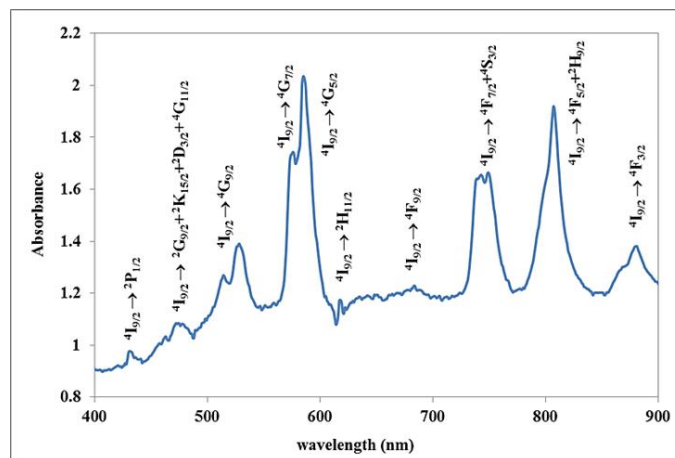
และสามารถสรุปข้อมูลตำแหน่งเลขคลื่นและหมู่ฟังก์ชันของตัวอย่างแก้วได้ดังตารางที่ 2 ซึ่งพบตำแหน่งที่สอดคล้องกับการยืดแบบไม่สมมาตรของหมู่ Si-O-Si ในช่วง $1050\text{-}1095\text{ cm}^{-1}$ การยืดแบบสมมาตรของหมู่ Si-O-Si ที่ 788 cm^{-1} การยืดและงอของ O-Si-O ที่ 760 cm^{-1} และ 592 cm^{-1} ตามลำดับ ซึ่งตำแหน่งและหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสอดคล้องกับแก้วซิลิเกตในงานวิจัยอื่น (ElBatal *et al.*, 2014)

ตารางที่ 2 ตำแหน่งเลขคลื่นและหมู่ฟังก์ชันของตัวอย่างแก้ว

หมู่ฟังก์ชัน	เลขคลื่น (cm^{-1})
O-H (การยืด) ของ Si-(OH)	3600-3950
O-H (การยืด) ของ H_2O ในเมทริกซ์ของแก้ว	2800-2980
BO_3 (การยืดแบบสมมาตร)	1454
Si-O-Si (การยืดแบบสมมาตร)	1050-1095
Si-O (การยืด)	998
Si-O-Si (การยืดแบบสมมาตร)	788
O-Si-O (การยืด)	760
O-Si-O (การงอ)	592

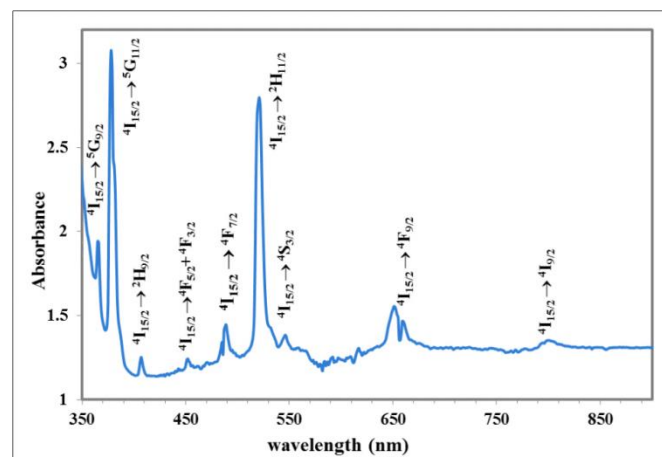
เมื่อนำตัวอย่างแก้วไปวัดการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-900 nm เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในนีโอติเมียมไอออนและเออร์เบียมไอออน สเปกตรัมการดูดกลืนแสง

ของ Nd_2O_3 glass แสดงในรูปที่ 3 ซึ่งพบพีคการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 431 nm เกิดจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจากสถานะพื้น ซึ่งในกรณีของ Nd^{3+} เป็น $^4I_{9/2}$ ไปสู่สถานะกระตุ้นคือ $^2P_{1/2}$ ส่วนพีคอื่นๆ เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานในลักษณะเดียวกัน โดยมีจุดตั้งต้นจากสถานะพื้น $^4I_{9/2}$ ดังนี้ $^4I_{9/2} \rightarrow ^2G_{9/2} + ^2K_{15/2} + ^2D_{3/2} + ^4G_{11/2}$ (472nm), $^4G_{9/2}$ (528), $^4G_{7/2}$ (576nm), $^4G_{5/2}$ (585nm), $^2H_{11/2}$ (618nm), $^4F_{9/2}$ (677nm), $^4F_{7/2} + ^4S_{3/2}$ (743nm), $^4F_{5/2} + ^2H_{9/2}$ (807nm) และ $^4F_{3/2}$ (881nm) ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนใน Nd^{3+} (Serqueira *et al.*, 2006)



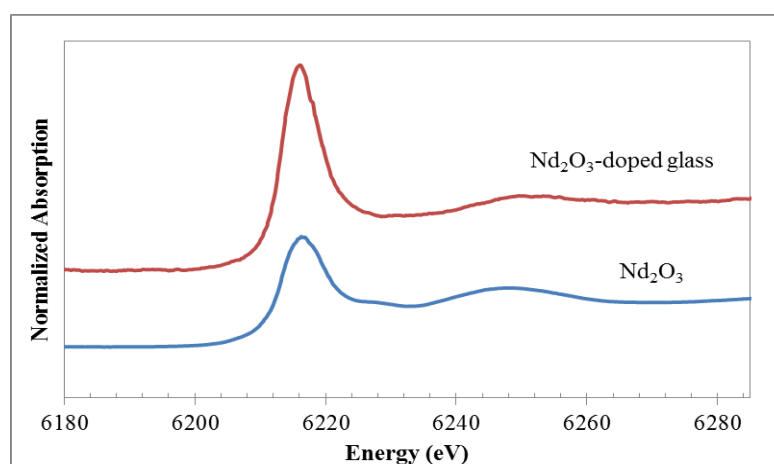
รูปที่ 3 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงช่วงวิสิเบิลของ Nd_2O_3 glass

สเปกตรัมการดูดกลืนแสงช่วงวิสิเบิลของ Er_2O_3 glass แสดงในรูปที่ 4 สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนใน Er^{3+} (Yongsiri *et al.*, 2015) พบพีคการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 365 nm เกิดจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจากสถานะพื้น $^4I_{15/2}$ ไปสู่สถานะกระตุ้น คือ $^5G_{9/2}$ ส่วนพีคอื่นๆเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานในลักษณะเดียวกัน โดยมีจุดตั้งต้นจากสถานะพื้น $^4I_{15/2}$ ดังนี้ $^4I_{15/2} \rightarrow ^5G_{11/2}$ (378 nm), $^2H_{9/2}$ (407 nm), $^4F_{5/2} + ^4F_{3/2}$ (452 nm), $^4F_{7/2}$ (489 nm), $^2H_{11/2}$ (521 nm), $^4S_{3/2}$ (546 nm), $^4F_{9/2}$ (651 nm) และ $^4I_{9/2}$ (800 nm)

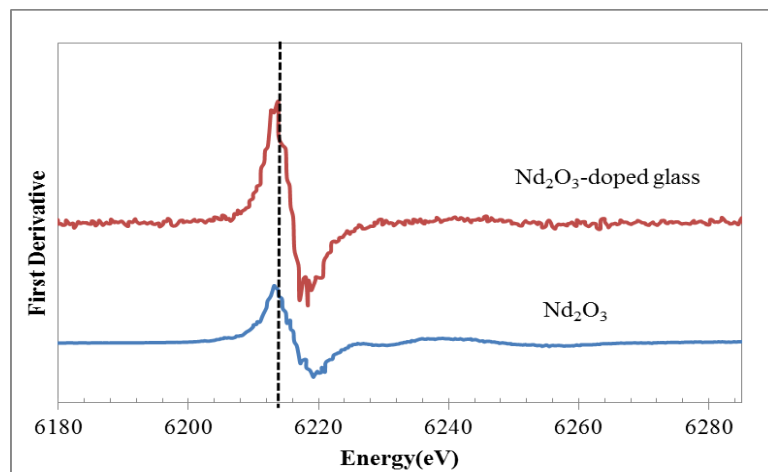


รูปที่ 4 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงช่วงวิสิเบิลของ Er_2O_3 glass

นำตัวอย่างที่เตรียมได้มาวัดสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ในช่วง X-ray Absorption Near Edge Structure (XANES) ของ L3 absorption edge ของ Nd โดยใช้โฟตอนที่มีพลังงาน 8979 ± 0.2 eV และวัดในโหมดทะลุผ่าน (Transmission mode) นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ATHENA จะได้ XANES spectrum 2 รูปแบบ คือ Normalized Spectrum และ First Derivative Spectrum ดังรูปที่ 5 ตำแหน่งยอดพีคของ First Derivative Spectrum คือ ตำแหน่งขอบการดูดกลืน (absorption edge) ของนีโอติเมียมไอออน โดยพบว่าใน Nd_2O_3 glass ตำแหน่งของขอบการดูดกลืนอยู่ที่ 6213.82 eV ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับตำแหน่งขอบการดูดกลืนของสารมาตรฐาน Nd_2O_3 (6213.16 eV) แสดงว่านีโอติเมียมในแก้วปรากฏในรูปของ Nd^{3+} ซึ่งแสดงให้เห็นว่านีโอติเมียมไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชันระหว่างกระบวนการหลอมแก้ว



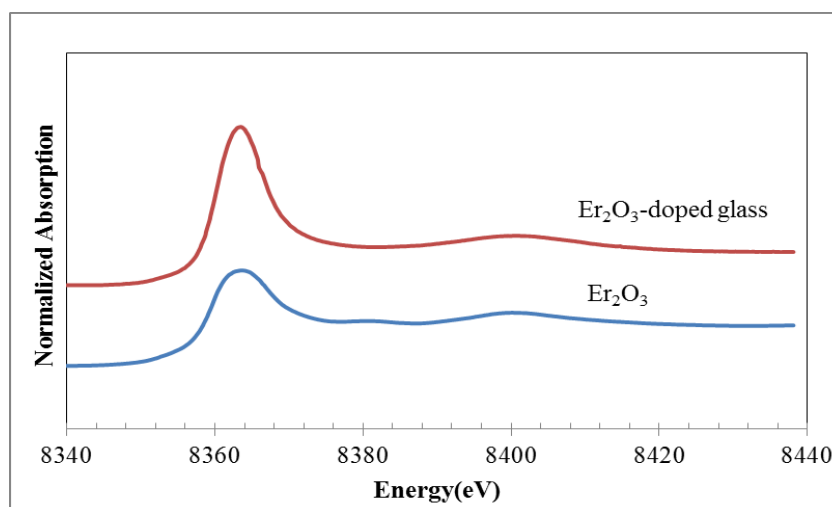
a)



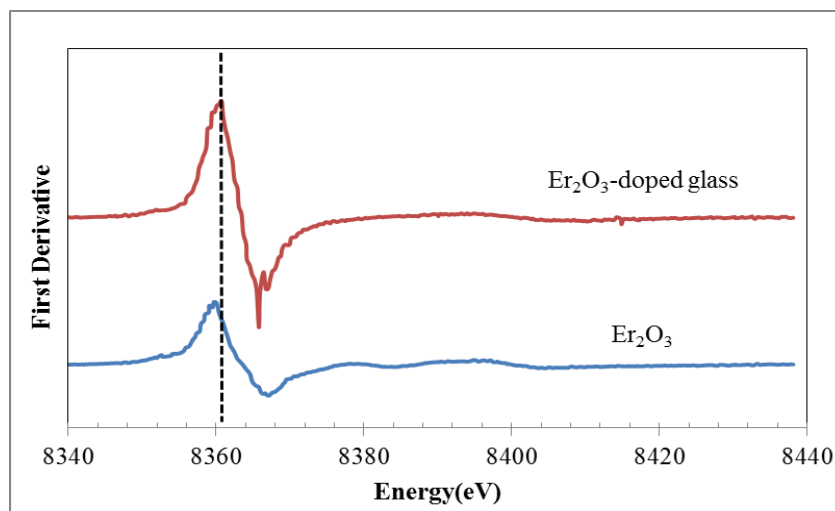
b)

รูปที่ 5 XANES spectrum ของ Nd_2O_3 glass กับสารมาตรฐาน Nd_2O_3 a) Normalized Spectrum
b) First Derivative Spectrum

นำ Er_2O_3 glass มาวัดการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ในช่วง X-ray Absorption Near Edge Structure (XANES) ของ L3 absorption edge ของ Er (ใช้โฟตอนที่มีพลังงาน 8359.060 ± 0.2 eV) โดยวัดในโหมดทะลุผ่าน (Transmission mode) และนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ATHENA เช่นเดียวกัน จะได้ XANES spectrum 2 รูปแบบ คือ Normalized Spectrum และ First Derivative Spectrum ดังรูปที่ 6 โดยพบว่าใน Er_2O_3 glass ตำแหน่งของขอบการดูดกลืนอยู่ที่ 8360.74 eV ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับตำแหน่งขอบการดูดกลืนของสารมาตรฐาน Er_2O_3 (8359.68 eV) แสดงว่าเออร์เบียมในแก้วปรากฏในรูปของ Er^{3+} ซึ่งแสดงว่าเออร์เบียมไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชันระหว่างกระบวนการหลอมแก้ว เช่นเดียวกับนีโอไดเมียม



a)



b)

รูปที่ 6 XANES spectrum ของ Er_2O_3 glass กับสารมาตรฐาน Er_2O_3 a) Normalized Spectrum
b) First Derivative Spectrum

สรุปผลทดลอง

จากการใช้แถบมาเป็นวัตถุดิบในการเตรียมตัวอย่างแก้วซิลิเกต 2 ชนิด คือ Nd_2O_3 glass ที่มีสีฟ้า และ Er_2O_3 glass ที่มีสีชมพู ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันและสมบัติการขยายตัวเชิงความร้อนสอดคล้องกับแก้วซิลิเกต จากงานวิจัยอื่น การเกิดสีในแก้วทั้งสองชนิดสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจากสถานะพื้น $^4I_{9/2}(\text{Nd}^{3+})$ หรือ $^4I_{15/2}(\text{Er}^{3+})$ ไปยังสถานะกระตุ้นต่างๆ ซึ่งจำนวนและตำแหน่งพีคของการดูดกลืนจะสอดคล้องกับแก้วซิลิเกตอื่นที่เจือด้วย Nd^{3+} และ Er^{3+} นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ XANES spectrum ยังช่วยยืนยันว่าใน Nd_2O_3 glass มี Nd^{3+} และ Er_2O_3 glass มี Er^{3+}

เอกสารอ้างอิง

ภาษาต่างประเทศ

- Chindaprasirt, P., P. Kanchanda, A. Sathonsaowaphak, and H.T. Cao. (2007). "Sulfate resistance of blended cements containing fly ash and rice husk ash." **Construction and Building Materials** 21, 6 (June): 1356–1361.
- Cicconi, M.R., G. Giuli, E. Paris, P. Courtial, and D.B. Dingwell. (2013). "XAS investigation of rare earth elements in sodium disilicate glasses." **Journal of Non-Crystalline Solids** 362, (February): 162–168.
- Du, J., and L. R. Corrales. (2006). "Compositional dependence of the first sharp diffraction peaks in alkali silicate glasses: A molecular dynamics study." **Journal of Non Crystalline Solids** 352, 30–31 (September): 3255–3269.

- ElBatal, F.H., A.M. Abdelghany, and H.A. ElBatal (2014). "Characterization by combined optical and FT infrared spectra of 3d-transition metal ions doped-bismuth silicate glasses and effects of gamma irradiation." **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy** 122, (November): 2439–2447.
- Ravel, B., G.L. Carr, C. A. Hauzenberger, and W. Klysubun. (2015). "X-ray and optical spectroscopic study of the coloration of red glass used in 19th century decorative mosaics at the Temple of the Emerald Buddha" **Journal of Cultural Heritage** 16, 3 (May–June): 315–321.
- Serqueira, E.O., N.O. Dantasa, A.F.G., and M.J.V. Bell. (2006). "Judd Ofelt calculation of quantum efficiencies and branching ratios of Nd^{3+} doped glasses" **Journal of Non-Crystalline Solids** 352, 32–35 (September): 3628–3632.
- Tregouet, H., D. Caurant, O. Majérus, Th. Charpentier, L. Cormier, and D. Pytalev. "Spectroscopic investigation and crystallization study of rare earth metaborate glasses. (2014). " **Procedia Materials Science** 7: 131 – 137.
- Wang, M., J. Cheng and M. Li. (2010). "Effect of rare earths on viscosity and thermal expansion of soda-lime-silicate glass" **Journal of rare earths** 28, (December): 308-311.
- Yongsiri, P., S. Sirisoonthorn and K. Pengpatet. (2015). "Effect of Er_2O_3 dopant on electrical and optical properties of potassium sodium niobate silicate glass-ceramics" **Materials Research Bulletin** 69, (September): 84–91.