

การศึกษาสมบัติทางกายภาพและการดูดกลืนแสงของแก้ว $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-BaO-SiO}_2$ ที่เติมคอปเปอร์ออกไซด์

Physical Properties and Optical Absorption Study of $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-BaO-SiO}_2$ Glasses Doped with CuO

ปิยะชาติ มีจิตร์ไพศาล^{1,2*} ณัฐพล ศรีสิทธิโกศล^{1,2} และจักรพงษ์ แก้วขาว²

¹สาขาวิชาฟิสิกส์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

²ศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีแก้วและวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

*piyachat_mee@hotmail.com

บทคัดย่อ

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพและการดูดกลืนแสงของแก้วสูตรบิสมัทโซเดียมแบเรียมซิลิเกตที่เติมคอปเปอร์ออกไซด์ โดยศึกษาที่ปริมาณความเข้มข้นของคอปเปอร์ออกไซด์แตกต่างเท่ากับ 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 ร้อยละโดยโมล จากนั้นนำแก้วตัวอย่างมาวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ได้แก่ ความหนาแน่น ปริมาตรเชิงโมลาร์ ดัชนีหักเห และการดูดกลืนแสง ผลการวัดความหนาแน่นของแก้วตัวอย่างพบว่าความหนาแน่นของแก้วตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของคอปเปอร์ออกไซด์ ในขณะที่ปริมาตรเชิงโมลาร์มีค่าลดลง ค่าดัชนีหักเหมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของคอปเปอร์ออกไซด์เช่นกัน ผลการวัดการดูดกลืนแสงของแก้วตัวอย่างพบช่วงการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 776 นาโนเมตร อีกทั้งความเข้มการดูดกลืนแสงมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของคอปเปอร์ออกไซด์

คำสำคัญ: การดูดกลืนแสง คอปเปอร์ออกไซด์ ซิลิกอนออกไซด์ สมบัติทางกายภาพ

Abstract

The aims of this research were to study physical properties and optical absorption of Bismuth Sodium Barium Silicate glasses which study different concentration was 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 and 0.5 mol%. The densities, molar volumes, refractive indexes and optical absorption were studied. The densities of glass samples increased with increasing of CuO concentrations, while molar volumes decreased. The refractive indexes also increased. The optical absorption of glass sampled showed board absorption band at about 776 nm. Besides, the absorbance increased with the increase of CuO concentrations.

Keywords: optical absorption, copper oxide, silicon oxide, physical property

1. บทนำ

แก้วเป็นวัสดุที่ถูกใช้ในชีวิตประจำวันและศึกษาในเชิงวิทยาศาสตร์ โดยทั่วไปแล้วแก้วมีความโปร่งใสในช่วงแสงที่ตามองเห็นเนื่องจากแก้วเป็นวัสดุอสัณฐานซึ่งไม่แสดงแอนไอโซทรอปิกทางแสง (Optical anisotropy) เหมือนกับผลึก ดังนั้นโครงสร้างของแก้วแต่ละชนิดจะมีลักษณะเป็นสามมิติที่อะตอมจับกันลำดับสั้น ๆ ไม่ต่อเนื่อง (Short range order) (Colak et al., 2004:1041) (Abdel-Baki et al., 2006: 217) แก้วสามารถเกิดจากสารประกอบออกไซด์ของธาตุต่างๆ ได้แก่ ซิลิกอนออกไซด์ (SiO_2), โบรอนออกไซด์ (B_2O_3), ฟอสฟอรัส (P_2O_5) เป็นต้น สำหรับแก้วซิลิกอนออกไซด์เป็นแก้วชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญเนื่องจากคุณสมบัติของแก้วชนิดนี้มีความโปร่งแสง และต้านทานการกัดกร่อนได้ดี อย่างไรก็ตามแก้วซิลิกอนออกไซด์มีจุดหลอมเหลวสูง ทั้งนี้ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขโดยการเติมออกไซด์ของธาตุอื่นเพื่อทำลายพันธะระหว่างซิลิกอนกับออกซิเจนบางส่วน เช่น ออกไซด์ของหมู่อัลคาไลน์ (Alkaline group) ออกไซด์ของหมู่อัลคาไลน์-เอิร์ธ (Alkaline-earth group) หรือออกไซด์ของโลหะอื่นๆ เป็นต้น (Ding et al., 2012: 85) (Marzouk et al., 2017:1) ยิ่งกว่านั้นการเติมไอออนของโลหะทรานซิชันลงในแก้วทำให้คุณสมบัติทางกายภาพและทางแสงของแก้วเปลี่ยนไปด้วย ในปัจจุบันไอออนของโลหะทรานซิชันถูกใช้ในการศึกษาโครงสร้างของแก้วเนื่องจากฟังก์ชันออร์บิทัลอิเล็กตรอนชั้น d วงนอกมีความกว้างทำให้ได้รับอิทธิพลจากสิ่งแวดล้อมมาก (Rao et al., 2002: 54) (Reddy et al., 2006: 446) สำหรับไอออนของโลหะทรานซิชันแต่ละชนิดเป็นที่รู้กันว่าสามารถเกิดเลขออกซิเดชันได้หลากหลายในแก้วขึ้นอยู่กับปัจจัยในการหลอม ชนิดของแก้ว รวมถึงสารประกอบทางเคมีที่ใช้ด้วย เลขออกซิเดชันแต่ละชนิดที่แตกต่างกันจะส่งผลให้เกิดการดูดกลืนแสงที่ต่างกันด้วยซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีของสนามลิแกนด์ (El-Batal et al., 2005: 579)

ในหมู่ไอออนของโลหะทรานซิชัน แก้วที่เติมไอออนของคอปเปอร์นิยมใช้เพื่อจุดประสงค์ในการตกแต่งเนื่องจากสามารถเกิดสีได้หลากหลาย เช่น สีเหลือง สีส้ม หรือสีแดง สำหรับโครงสร้างของคอปเปอร์อะตอม คือ $[\text{Ar}] 3d^{10} 4s^1$ และไอออนมีความเสถียรที่เลขออกซิเดชันเท่ากับ $1+ (\text{Cu}^+)$ และ $2+ (\text{Cu}^{2+})$ ที่อุณหภูมิสูงจะเกิดสมดุลระหว่าง Cu^+ และ Cu^{2+} จากการละลายของออกซิเจน ดังนี้ $4\text{Cu}^{2+} + 2\text{O}^{2-} \leftrightarrow 4\text{Cu}^+ + \text{O}^{2-}$ (Kaufmann et al., 2008: 4614) (Kaufmann et al., 2009: 531) ทั้งนี้แก้วที่ปรากฏ Cu^+ จะไม่มีสี แต่แก้วที่ปรากฏ Cu^{2+} สามารถเกิดสีเนื่องจากพบการดูดกลืนแสงในช่องแสงที่ตามองเห็น (Kashif et al., 2015:1) สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติทางกายภาพ การดูดกลืนแสง และสีของแก้วสูตร $10\text{Bi}_2\text{O}_3 : 30\text{Na}_2\text{O} : 30\text{BaO} : (30-x)\text{SiO}_2 : x\text{CuO}$ ที่มีปริมาณความเข้มข้นของคอปเปอร์ออกไซด์แตกต่างกัน

2. วิธีการทดลอง

2.1 การเตรียมแก้วตัวอย่าง

แก้วตัวอย่างที่เติมคอปเปอร์ออกไซด์มีส่วนประกอบทางเคมี คือ $10\text{Bi}_2\text{O}_3 : 30\text{Na}_2\text{O} : 30\text{BaO} : (30-x)\text{SiO}_2 : x\text{CuO}$ โดยที่ x คือ ปริมาณความเข้มข้นของคอปเปอร์ออกไซด์ที่ 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 ร้อยละโดยโมล โดยทั้งหมดถูกเตรียมด้วยวิธีเทคนิคการลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็ว (melt quenching technique) การหลอมแก้วตัวอย่างเริ่มจากการชั่งสารเคมีตามสัดส่วนของสูตรแก้ว และผสมกันในบ่ออุณหภูมิสูงที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และอบที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อลดการแตกของแก้วในกรณีที่อุณหภูมิลดลงเร็วมากเกินไป เมื่อสิ้นสุดการอบแล้วปล่อยให้แก้วตัวอย่างเย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง ต่อมาเมื่อแก้วเย็นตัวลงแล้วนำแก้วตัวอย่างตัดที่ขนาด $1.0 \times 1.5 \times 0.3$ ลูกบาศก์เซนติเมตร และขัดให้มีผิวเรียบเพื่อนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ต่อไป

2.2 การวัดคุณสมบัติต่างๆ ของแก้ว

การวัดความหนาแน่นอาศัยหลักการแทนที่น้ำของ Archimedes การหาความหนาแน่นสามารถคำนวณได้จาก ปริมาตรของน้ำที่ถูกแทนที่ โดยการชั่งน้ำหนักของวัตถุในอากาศ และชั่งน้ำหนักของวัตถุนั้นในน้ำหรือของเหลวที่ทราบความ หนาแน่น น้ำหนักที่หายไป $\Delta W = (W_{air} - W_{liq})$ จะเท่ากับ น้ำหนักของน้ำที่ถูกแทนที่ ปริมาตรของวัตถุจะเท่ากับปริมาตรของ น้ำที่ถูกแทนที่คือ $\Delta W/\rho_{liq}$ เพราะฉะนั้นความหนาแน่นของวัตถุสามารถหาได้โดยสมการที่ 1

$$\rho_{sample} = \left(\frac{W_{air}}{W_{air} - W_{liq}} \right) \times \rho_{liq} \quad (1)$$

ซึ่งวิธีนี้โดยทั่วไปมีความคลาดเคลื่อนประมาณ $\pm 0.001 \text{ g/cm}^3$ โดยที่ W_{air} คือ น้ำหนักของตัวอย่างแก้วในอากาศ (กรัม), W_{liq} คือ น้ำหนักของตัวอย่างแก้วในน้ำ (กรัม), $W_{air}-W_{liq}$ คือ น้ำหนักที่หายไปใต้น้ำ (กรัม), ρ คือ ความหนาแน่นของ แก้วตัวอย่าง (กรัมต่อลูกบาศก์เมตร), ρ_{liq} คือ ความหนาแน่นของน้ำ (กรัมต่อลูกบาศก์เมตร) จากนั้นใช้ค่าความหนาแน่นใน การคำนวณหาปริมาตรเชิงโมลาร์ (V_m) ดังสมการที่ 2

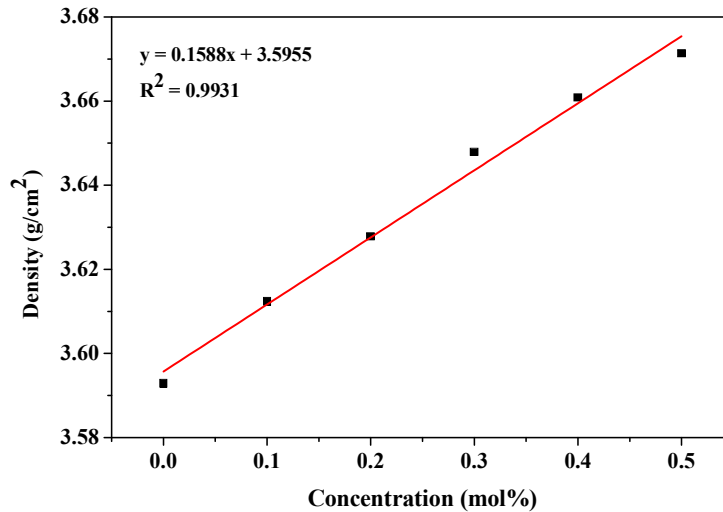
$$V_m = \frac{M_T}{\rho} \quad (2)$$

การวัดค่าดัชนีหักเหสามารถวัดได้จากเครื่อง Abbe refractometer รุ่น 3T โดยมีแหล่งกำเนิดแสง คือ โซเดียม ซึ่งมี ความยาวคลื่น 589.3 nm โดยใช้โมโนโครโมแนฟทาลีน (mono-bromonaphthalene) เพื่อกันการสัมผัสของปรอทและแก้ว การอ่านค่าดัชนีหักเหสามารถอ่านได้ละเอียดสูงสุดเป็นทศนิยม 4 ตำแหน่ง

แก้วตัวอย่างถูกนำมาวัดการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 350-1100 นาโนเมตร โดยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตร โฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer) รุ่น Varian Cary 50 ที่อุณหภูมิห้อง สีของแก้วตัวอย่างสามารถวัดได้โดย เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงในโหมด CIE L*a*b* (CIELAB) โดยเป็นค่ามาตรฐานขององค์กร Commission International de l'Eclairage (CIE) ค่าดัชนีสีเป็นระบบการบรรยายแบบ 3 มิติ โดยที่แกน L* คือ ความสว่าง (Lightness) ตั้งแต่ค่า +L* แสดงถึงสีขาว จนไปถึง -L* แสดงถึงสีดำ แกน -a* แสดงแสงสีแดง จนไปถึง +a* แสดงแสงสีเขียว ส่วนแกน -b* แสดงแสงสี น้ำเงิน จนไปถึง +b* แสดงแสงสีเหลือง

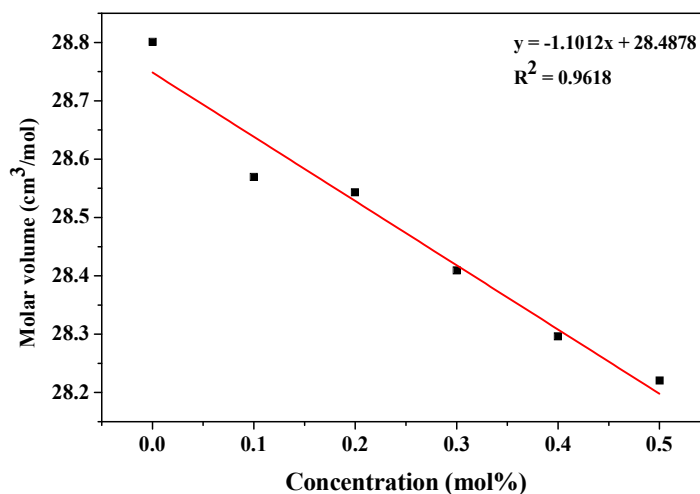
3. ผลการวิจัย

จากการวัดค่าความหนาแน่นของแก้วตัวอย่างที่เติมคอปเปอร์ออกไซด์ พบว่าแก้วตัวอย่างมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 3.5929 – 3.6714 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยเมื่อปริมาณความเข้มข้นของคอปเปอร์ออกไซด์สูงขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นของ แก้วตัวอย่างเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากน้ำหนักมวลโมเลกุลของซิลิกอนออกไซด์ที่ถูกแทนที่ด้วยคอปเปอร์ออกไซด์มีค่าน้อยกว่า นั้นเอง โดยปกติแล้วมวลโมเลกุลของซิลิกอนออกไซด์เท่ากับ 60.0843 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมวลโมเลกุลของคอปเปอร์ ออกไซด์เท่ากับ 79.5394 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคอปเปอร์ออกไซด์กับความ หนาแน่นแสดงดังภาพที่ 1



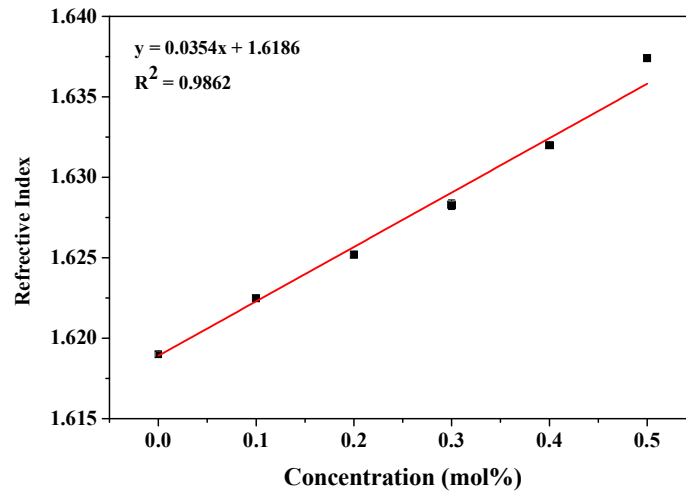
ภาพที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคอปเปอร์ออกไซด์กับความหนาแน่น

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคอปเปอร์ออกไซด์กับปริมาตรเชิงโมลาร์ดังภาพที่ 2 พบว่าค่าปริมาตรเชิงโมลาร์ของแก้วตัวอย่างอยู่ในช่วง 28.2208 - 28.5696 ลูกบาศก์เมตรต่อโมล อย่างไรก็ตามค่าปริมาตรเชิงโมลาร์ของแก้วตัวอย่างมีค่าลดลงตามปริมาณความเข้มข้นของคอปเปอร์ออกไซด์ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากคอปเปอร์ออกไซด์ทำหน้าที่เป็นตัว network former ดังนั้นการเพิ่มความเข้มข้นของคอปเปอร์ออกไซด์ในแก้วตัวอย่างเป็นการสร้างพันธะระหว่างคอปเปอร์ไอออนกับออกซิเจนมากขึ้นด้วย



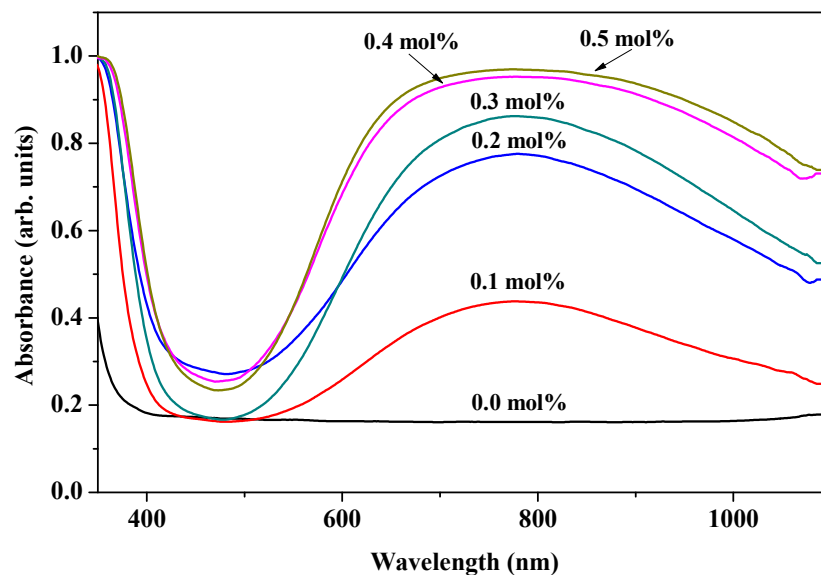
ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคอปเปอร์ออกไซด์กับปริมาตรเชิงโมลาร์

ผลการวัดค่าดัชนีหักเหของแก้วตัวอย่างพบว่าค่าดัชนีหักเหของแก้วตัวอย่างอยู่ในช่วง 1.6190 - 1.6374 โดยค่าดัชนีหักเหของแก้วตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของคอปเปอร์ออกไซด์ เนื่องจากค่าดัชนีหักเหของแก้วเท่ากับอัตราเร็วของแสงในแก้วเทียบกับสุญญากาศ เมื่อปริมาณคอปเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น และทำให้แสงเดินทางช้าลงด้วย จึงเป็นสาเหตุให้ค่าดัชนีของแก้วตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นนั่นเอง กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคอปเปอร์ออกไซด์กับดัชนีหักเหแสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคอปเปอร์ออกไซด์กับดัชนีหักเห

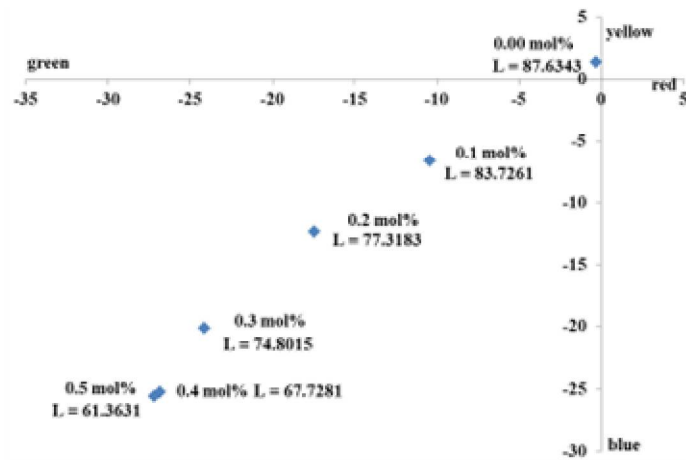
ภาพที่ 4 การดูดกลืนแสงของแก้วตัวอย่างที่เติมความเข้มข้นของคอปเปอร์ออกไซด์ถูกวัดในช่วงความยาวคลื่น 350 – 1,100 นาโนเมตร ที่อุณหภูมิห้อง คอปเปอร์ไอออนในแก้วสามารถเกิดได้ทั้งเลขออกซิเดชัน 1+ (Cu^+) และ 2+ (Cu^{2+}) อย่างไรก็ตาม Cu^+ ไม่ปรากฏการดูดกลืนแสงในช่วงแสงที่ตามองเห็น (Zhang et al., 2009: 3531) ในขณะที่ Cu^{2+} ปรากฏการดูดกลืนแสงแบบกว้างในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 776 นาโนเมตร ซึ่งสัมพันธ์กับระดับชั้นพลังงาน ${}^2E_g(D) \rightarrow {}^2T_{2g}(D)$ แบบทรงแปดหน้า (Kido et al., 2006: 4062) (Magdas et al., 2014: 314) ยิ่งกว่านั้นการเพิ่มความเข้มข้นของคอปเปอร์ออกไซด์ส่งผลให้ความเข้มการดูดกลืนแสงของแก้วตัวอย่างเพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณไอออนของคอปเปอร์มากขึ้น



ภาพที่ 4 การดูดกลืนแสงของแก้วตัวอย่างที่เติมความเข้มข้นของคอปเปอร์ออกไซด์

ค่าดัชนีสีของแก้วตัวอย่างที่เติมความเข้มข้นของคอปเปอร์ออกไซด์แสดงดังภาพที่ 5 การวัดค่าดัชนีสีจากเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ในระบบ CIE $L^*a^*b^*$ โดย L คือ ค่าความส่องสว่าง (a, -a) คือ ค่าแกนสีแดง-เขียว (b, -b) คือ ค่าแกนสีเหลือง-น้ำเงิน พบว่าก่อนเติมคอปเปอร์ออกไซด์ แก้วตัวอย่างจะใสไม่มีสี ค่าดัชนีสี (a, b) จะอยู่ที่ประมาณ (0, 0)

ในขณะที่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของคอปเปอร์ออกไซด์จะส่งผลให้แก้วตัวอย่างมีแนวโน้มเกิดสีเขียว-น้ำเงินมากขึ้น และปริมาณค่าความส่องสว่างมีค่าลดลงซึ่งสัมพันธ์กับกราฟการดูดกลืนแสง



ภาพที่ 5 ค่าดัชนีสีของแก้วตัวอย่างที่เพิ่มความเข้มข้นของคอปเปอร์ออกไซด์

4. บทสรุป

แก้วตัวอย่างที่เติมคอปเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 ไร่ย่อยโดยโมล ถูกเตรียมด้วยวิธีการลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็ว และวิเคราะห์ค่าความหนาแน่น ปริมาตรเชิงโมลาร์ ดัชนีหักเหแสง การดูดกลืนแสง และค่าดัชนีสี ผลการวิเคราะห์พบว่าค่าความหนาแน่นและค่าดัชนีหักเหของแก้วตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของคอปเปอร์ออกไซด์ ในขณะที่ค่าปริมาตรเชิงโมลาร์มีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่าแก้วตัวอย่างมีการอัดตัวกันแน่นขึ้น การดูดกลืนแสงของแก้วตัวอย่างปรากฏการดูดกลืนแสงแบบกว้างในช่วงความยาวคลื่น 776 นาโนเมตร ซึ่งสัมพันธ์กับระดับชั้นพลังงาน ${}^2E_g(D) \rightarrow {}^2T_{2g}(D)$ แบบตรงแปดหน้า โดยความเข้มการดูดกลืนแสงและของแก้วตัวอย่างมีค่ามากขึ้นตามความเข้มข้นของคอปเปอร์ออกไซด์ ค่าดัชนีสีแสดงให้เห็นว่าแก้วตัวอย่างเกิดสีน้ำเงิน-เขียวมากขึ้น และปริมาณค่าความส่องสว่างมีค่าลดลง ซึ่งสัมพันธ์กับกราฟการดูดกลืนแสง

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีแก้วและวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม สำหรับความร่วมมือและสนับสนุนงานวิจัยนี้เป็นอย่างดี

6. เอกสารอ้างอิง

- Abdel-Baki, M. & El-Diasty, F. (2006). Optical properties of oxide glasses containing transition metals: Case of titanium- and chromium-containing glasses, *Current Opinion in Solid State & Materials Science*, 10, 217-229.
- Colak, S. C. & Aral, A. (2004). SEM, EDX and UV spectrums of Fe_2O_3 doped soda-lime-silica glasses, *Romanian Journal of Physics*, 50, 1041-1046.

- Ding, J, Zhao, G., Tian, Y., Chen, W. & Hu, L. (2012). Bismuth silicate glass: A new choice for 2 μm fiber laser, **Optical Materials**, 35, 85-88.
- El-Batal, F. H. & Abo-Naf, S. M. (2005). Spectroscopic studies of gamma-irradiated metals-doped soda lime phosphate glass, **Indian Journal of Pure & Applied Physics**, 43, 579-590.
- Kashif, I. & Ratep, A. (2015). Role of copper metal or oxide on physical properties of lithium borate glass, **Journal of Molecular Structure**, 1102, 1-5.
- Kaufmann, J. & Russel, C. (2008). Redox behavior and diffusion of copper in soda-lime-silica melts, **Journal of Non-Crystalline Solids**, 354, 4614-4619.
- Kaufmann, J. & Russel, C. (2009). Thermodynamics of the $\text{Cu}^+/\text{Cu}^{2+}$ -redox equilibrium in soda-silicate and soda-lime-silicate melts, **Journal of Non-Crystalline Solids**, 355, 531-535.
- Kido, L., Muller, M. & Russel, C. (2006). Redox reactions during temperature change in soda-lime-silicate melts doped with copper and iron or copper and manganese, **Journal of Non-Crystalline Solids**, 352, 4062-4068.
- Magdas, D. A., Stefan, R., Toloman, D. & Vedeanu, N. S. (2014). Copper ions influence on lead-phosphate glass network, **Journal of Molecular Structure**, 1056-1057, 314-318.
- Marzouk, M. A., Hamdy, Y. M. & Elbatal, H. A. (2017). Photoluminescence and spectral performance of manganese ions in zinc phosphate and barium phosphate host glasses, **Journals of Non-Crystalline Solids**, 458, 1-14.
- Rao, G. V. & Veeraiah, N. (2002). Study on certain physical properties of $\text{R}_2\text{O}-\text{CaF}_2-\text{B}_2\text{O}_3-\text{Cr}_2\text{O}_3$ glasses, **Journal of Alloys and Compounds**, 339, 54-64.
- Reddy, M. R., Reddy, M. S. & Veeraiah, N. (2006). Physical properties of $\text{PbO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3$ glasses doped with Cr_2O_3 , **Indian Journal of Pure & Applied Physics**, 44, 446-454.
- Zhang, J. & Sheng, J. (2009). Formation and optical properties of copper nanoclusters in a silicate glass, **International Journal of Hydrogen Energy**, 34, 3531-3534.