

การศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางแสง และทางลูมิเนสเซนซ์
ของแก้วซิงค์บอโรเทลลูไรท์ ที่เจือด้วยบิสมัทออกไซด์

Study on Physical, Optical and Luminescence of Zinc Boro-tellurite Glasses
Doped with Bismuth Oxide

ภัทรวิจิ ยะสะกะ^{1,2*} จุฑามาศ เข้มทอง¹ ขนิษฐา ขุนทิพย์¹ และจักรพงษ์ แก้วขาว^{1,2}

¹คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

²ศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีแก้วและวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

*pyasaka@hotmail.com

บทคัดย่อ

ระบบแก้วซิงค์บอโรเทลลูไรท์ที่เจือด้วยไอออนของบิสมัทออกไซด์ถูกเตรียมขึ้นจากองค์ประกอบ $(55-x)\text{TeO}_2 - 30\text{B}_2\text{O}_3 - 15\text{ZnO} - x\text{Bi}_2\text{O}_3$ โดย $(x = 5, 10, 15, 20 \text{ และ } 25 \text{ เปอร์เซ็นต์โดยโมล ของ } \text{Bi}_2\text{O}_3)$ ด้วยเทคนิคการหลอมที่อุณหภูมิสูง และทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว ที่อุณหภูมิ $1,150 \text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง งานวิจัยนี้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางแสง และทางลูมิเนสเซนซ์ของระบบแก้วซิงค์บอโรเทลลูไรท์ ที่เจือด้วยบิสมัทออกไซด์ ผลที่ได้พบว่า ความหนาแน่นของระบบแก้วที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่ปริมาตรเชิงโมลของแก้ว กราฟแบ่งออกเป็นสองช่วงคือ ช่วงแรกที่มีความเข้มข้นของ Bi_2O_3 5-10 เปอร์เซ็นต์โมลค่าปริมาตรเชิงโมลจะมีค่าลดลง ช่วงที่สอง ที่ความเข้มข้นของ Bi_2O_3 10-25 เปอร์เซ็นต์โมล ค่าปริมาตรเชิงโมลจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเจือความเข้มข้นของบิสมัทออกไซด์ เมื่อวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 400 ถึง 1,100 นาโนเมตร พบว่า ค่าความเข้มข้นของพีการดูดกลืนแสงสูงขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของบิสมัทออกไซด์ นอกจากนี้ได้ตรวจสอบคุณสมบัติการเปล่งแสงของ Bi^{3+} ที่เจือในระบบแก้วซิงค์บอโรเทลลูไรท์จากการกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 320 นาโนเมตร พบพีการเปล่งแสงที่ความยาวคลื่นที่ตำแหน่ง 602 นาโนเมตร

คำสำคัญ: แก้วซิงค์บอโรเทลลูไรท์ บิสมัทออกไซด์ สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางแสง สมบัติทางลูมิเนสเซนซ์

Abstract

Bi-doped zinc boro-tellurite glasses of the composition $(55-x)\text{TeO}_2 - 30\text{B}_2\text{O}_3 - 15\text{ZnO} - x\text{Bi}_2\text{O}_3$ with $(X= 5, 10, 15, 20 \text{ and } 25 \text{ mol}\%)$ have been synthesized by conventional melt quenching technique at $1,150^\circ\text{C}$ for 1.5 hours. In order to understand the role of Bi_2O_3 in zinc boro-tellurite glasses systems, the physical, optical and luminescence properties were investigated. The results showed that the density increased whereas the molar volume can be divided into two regions. In the first region (5-10 mol%), the molar volume decreases with increased slightly in Bi_2O_3 content up to 10 mol%. In the second region (10-25 mol%), the molar volume increases with increasing Bi_2O_3 concentrations. The optical absorption spectra of glasses were measured in the wavelength range of 400 – 1,100 nm for Bi^{3+} the intensity of all absorption bands increased with increasing Bi_2O_3 contents. The intensity of all emission bands increased with increasing Bi_2O_3 contents. In addition, the luminescence properties of Bi^{3+} -doped $\text{ZnO} - \text{B}_2\text{O}_3 - \text{TeO}_2 - \text{Bi}_2\text{O}_3$ glass system were carried out using excitation wavelengths of 320 nm for Bi_2O_3 the luminescence peaks around 602 nm.

Keywords: zinc boro-tellurite, bismuth oxide, physical property, optical property, luminescence property

1. บทนำ

"แก้ว" มาจากภาษาอังกฤษว่า "Glass" เป็นวัสดุโปร่งใส เนื้อใสสะอาด มีความเป็นมันแวววาวใส แก้วเป็นสารประกอบของซิลิกากับสารโลหะออกไซด์มีลักษณะโปร่งตาและมีความเปราะในตัวเอง ตาม ASTM กล่าวว่า แก้ว คือวัสดุที่เป็นสารอนินทรีย์ต่าง ๆ มาเผาให้ถึงจุดละลายที่อุณหภูมิสูง และเมื่อเวลาเย็นตัวลงมาจะกลายเป็นของแข็งโดยไม่ตกผลึกวัสดุแก้วในธรรมชาติที่เป็นที่รู้จักกันดีก็คือ "แร่ obsidian" ซึ่งมักพบบริเวณภูเขาไฟเกิดจากลาวาที่มีการเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วเรามีการใช้งานแร่ obsidian ตั้งแต่ยุคหินส่วนการผลิตแก้วโดยมนุษย์นั้นมีการค้นพบมาตั้งแต่สมัยอียิปต์ก่อนคริสต์ศักราชถึง 1,500 ปี [1]

บิส്മัทออกไซด์ เมื่อมีการหลอมเหลวไม่สามารถเชื่อมโยงเป็นโครงข่ายแก้วได้ เนื่องจากมีไอออนของบิส്മัท (Bi^{3+}) ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายใน ส่งผลให้โมเลกุลของบิส്മัทออกไซด์ทำหน้าที่เป็นตัวประสานแทรกในเนื้อแก้ว ซึ่งคุณสมบัติของแก้วจะเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับออกไซด์ของโลหะหนักที่เป็นองค์ประกอบของสูตรแก้วเช่น แก้วที่มีการเติม Bi_2O_3 มีความหนาแน่นสูง ดัชนีหักเหแสงสูง และมีเสถียรภาพทางเคมีและกายภาพสูง ทำให้สามารถนำไปใช้งานได้กว้างขวาง เช่น ทำเป็นแก้วเซรามิกซ์ (Glass ceramics) ขึ้นสำหรับอุปกรณ์แสงและอิเล็กทรอนิกส์ (Layers for optical and electronic devices) เซ็นเซอร์เชิงความร้อน และเชิงกล (Thermal and mechanical sensors) และหน้าที่การสะท้อนแสง (Reflecting windows) เป็นต้น นอกจากนี้แก้วที่มีคุณสมบัติพิเศษชนิดอื่น ที่เกิดจากการเติมวัตถุดิบอื่น ๆ ลงไป เพื่อช่วยในการปรับปรุงคุณสมบัติของแก้วเช่น แก้วคริสตัลที่เกิดจากการเตรียมตะกั่วและกลายเป็นสารประกอบออกไซด์ (PbO) ในเนื้อของแก้วเพื่อทำให้แก้วหนักขึ้นเนื้อของแก้วหยาบและแวววาว แต่ตะกั่วมีความเป็นพิษจึงมีการเติมออกไซด์ของแบเรียมและสังกะสี (BaO, ZnO) เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้ของออกไซด์ของตะกั่วสำหรับการใช้งานทางด้านกัมมันตรังสี [2]

แก้วเทลลูไรท์มีความน่าสนใจทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเป็นอย่างมากเนื่องจากแก้วชนิดนี้มีความเสถียรที่อุณหภูมิห้องมีคุณสมบัติทางความร้อน ทางแสง และทางไฟฟ้าได้ดี มีค่าดัชนีหักเหสูง และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกค่อนข้างสูง อีกทั้งมีค่าพลังงานโฟตอนต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับแก้วชนิดซิลิเกต และฟอสเฟตค่าดัชนีหักเหสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในด้านอุปกรณ์ทางแสง เลเซอร์ อุปกรณ์ขยายสัญญาณและระบบโทรคมนาคม เพราะมีคุณสมบัติเป็น nonlinear optics หรือเรียกว่า nonlinear materials กล่าวคือ เมื่อให้แสงที่มีความยาวคลื่นหนึ่งผ่านแก้วเหล่านี้ แสงที่ผ่านออกมาจะมีความยาวคลื่นเปลี่ยนไปจากเดิมและพลังงานโฟนอนมีความสำคัญในการปรับปรุงและพัฒนาการส่งผ่านแสงในช่วงวิซิเบิลถึงอินฟราเรด (มีค่าสูงได้ถึง 6 ไมโครเมตร) และอัตราการสลายตัวของมัลติโฟนอนที่เจือด้วยกลุ่มไอออนของธาตุหายากจะมีค่าต่ำกว่าแก้วชนิดซิลิเกตและฟอสเฟตปัจจุบันนี้แก้วเทลลูไรท์สามารถเป็นคู่แข่งที่สำคัญในการทำอุปกรณ์ส่งผ่านแสงในช่วงอินฟราเรด โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการใช้งานที่มีศักยภาพในช่วงความยาวคลื่นที่สามารถส่งข้อมูลหลาย ๆ ตัวไปในสายเดียวกันของระบบการสื่อสารข้อมูลสารสนเทศ [3]

แก้วบอเรต (Borate glasses) เป็นแก้วอีกชนิดหนึ่งที่มีความนิยมเป็นอย่างมากและสามารถฟอร์มตัวเป็นแก้วได้ เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำ มีความหนืดสูงมีโครงสร้างของอะตอมที่ง่ายไม่ซับซ้อน มีค่าดัชนีหักเหสูง มีสมบัติการส่งผ่านแสงดี มีเสถียรภาพทางเคมีที่ดี คือไม่ทำปฏิกิริยากับสารอื่นได้ง่าย และมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีเช่นกันจากคุณสมบัติดังกล่าวทำให้แก้วบอเรตนิยมนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมแก้วเป็นเพราะมีความแข็งแรงของพันธะสูง ในโครงสร้างบอเรตประกอบด้วยอะตอมของโบรอน (B^{3+}) จับกับกับอะตอมของออกซิเจนซึ่งจะสามารถฟอร์มตัวเป็นแก้วได้โครงสร้างของ BO_3 จับกันเป็นลักษณะสามเหลี่ยมอยู่ที่มุมของแต่ละพันธะในโครงสร้างแบบสุ่ม แก้วบอเรตนิยมนำมาใช้ทางด้านวัสดุป้องกันรังสี เนื่องจากมีค่าเลขอะตอมยังผลใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อของมนุษย์อีกทั้งยังนำมาใช้งานในด้านอุปกรณ์ทางแสง [4]

จากความสำคัญที่กล่าวมาข้างต้นนั้นทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะศึกษาคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ของแก้วซิงค์โบโรเทลลูไรท์ ที่เจือด้วยบิส്മัทออกไซด์ (เมื่อ x เท่ากับ 5, 10, 15, 20 และ 25 เปอร์เซ็นต์โมล) โดยศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติ

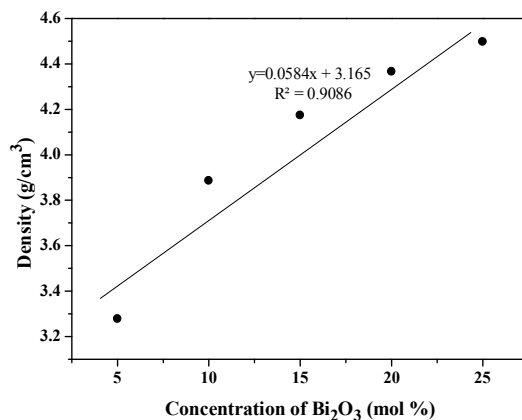
ทางแสงและทางลูมิเนสเซนซ์ ได้แก่ ความหนาแน่น ปริมาตรเชิงโมลการดูดกลืนแสงและการลูมิเนสเซนซ์ของแสงเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์แก้วที่มีประโยชน์และคุณภาพที่ดีต่อไป

2. วิธีการทดลอง

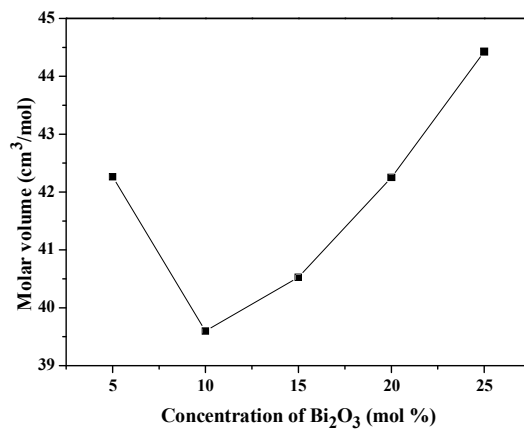
แก้วซิงค์บอโรเทลลูไรท์ที่เจือด้วยบิสมัทออกไซด์ สูตร $(55-x)\text{TeO}_2 - 30\text{B}_2\text{O}_3 - 15\text{ZnO} - x\text{Bi}_2\text{O}_3$ (เมื่อ X เท่ากับ 5, 10, 15, 20 และ 25 เปอร์เซ็นต์โดยโมล) ด้วยเทคนิคการหลอมแก้วที่อุณหภูมิสูงและทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Melt Quenching Technique) ถูกเตรียมขึ้นจากสารเคมี ดังนี้ คือ ZnO , B_2O_3 , TeO_2 และ Bi_2O_3 ต่อมาทำการบดสารเคมีทั้งหมดให้เข้ากันจนเป็นเนื้อเดียวกันด้วยโกร่งบดสาร จากนั้นคำนวณสารเคมีที่ใช้ในการหลอมแก้วเป็น 15 กรัม บรรจุในบ้าหลอมอะลูมินา และนำเข้าเตาเผาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 1.5 ชั่วโมง แล้วนำตัวอย่างแก้วที่ได้เข้าเตาอบ เพื่ออบไล่ความเครียดของแก้วที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 3 ชั่วโมง โดยปล่อยให้เย็นตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง ขั้นตอนสุดท้ายของการเตรียมแก้วตัวอย่าง คือการนำไปตัดและขัดให้มีขนาด 1.0 ซม. x 1.5 ซม. x 0.3 ซม. สำหรับวิเคราะห์สมบัติการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่องยูวี-วิสเนียร์ไออาร์สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (รุ่น UV-3600 บริษัท Bara Scientific) การวิเคราะห์สมบัติการเปล่งแสงโดยใช้เครื่อง Fluorescence Spectrophotometer (รุ่น Cary Eclipse บริษัท Agilent Technologies)

3. ผลการวิจัย

ผลจากการศึกษาค่าความหนาแน่นและค่าปริมาตรเชิงโมลของแก้วซิงค์บอโรเทลลูไรท์ที่เจือด้วยความเข้มข้นของ Bi_2O_3 ที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ 5 ถึง 25 เปอร์เซ็นต์โมล พบว่าค่าความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของ Bi_2O_3 โดยค่าความหนาแน่นมีค่าอยู่ระหว่าง 3.2787 ± 0.0008 ถึง 4.4981 ± 0.2855 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 1 และค่าปริมาตรเชิงโมล และค่าปริมาตรเชิงโมล แสดงในรูปที่ 2 กราฟแบ่งเป็นสองช่วง ที่ช่วง 5 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์โมล ค่าปริมาตรเชิงโมลจะมีค่าลดลง ช่วงที่สองที่ความเข้มข้นของ Bi_2O_3 10 ถึง 25 เปอร์เซ็นต์โมล ค่าปริมาตรเชิงโมลจะมีค่าเพิ่มขึ้นโดยค่าปริมาตรเชิงโมลมีค่าอยู่ระหว่าง 39.5977 ถึง 44.4263 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล

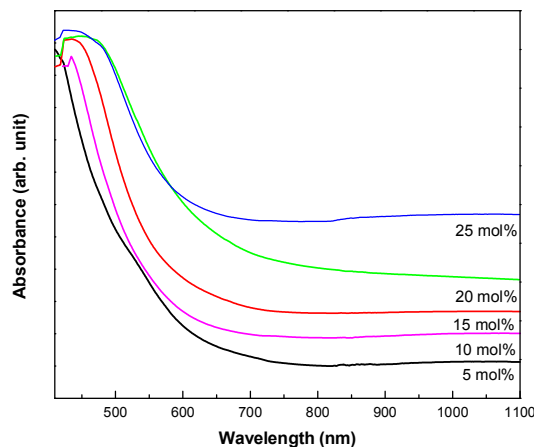


รูปที่ 1 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของแก้ว $(55-x)\text{TeO}_2 - 30\text{B}_2\text{O}_3 - 15\text{ZnO} - x\text{Bi}_2\text{O}_3$ ที่เจือด้วย Bi_2O_3 ที่ความเข้มข้นที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2 กราฟแสดงค่าปริมาตรเชิงโมลของแก้ว (55-x)TeO₂ - 30B₂O₃ - 15ZnO - xBi₂O₃ ที่เจือด้วย Bi₂O₃ ที่ความเข้มข้นที่ต่างกัน

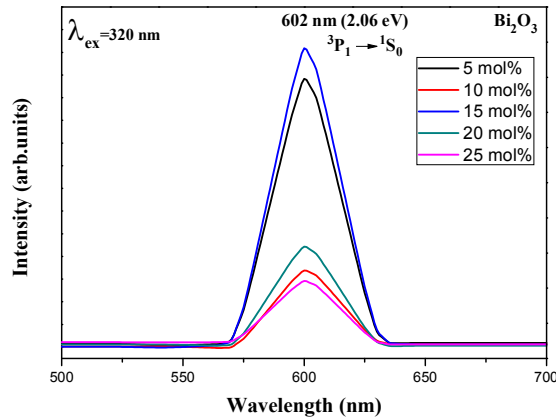
ผลการศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของแก้วซิงค์บอโรเทลลูไรท์ที่เจือด้วยความเข้มข้นของ Bi₂O₃ ที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ 5 ถึง 25 เปอร์เซ็นต์โมล สเปกตรัมการดูดกลืนแสงถูกบันทึกในช่วงความยาวคลื่น 400 ถึง 1,100 นาโนเมตร อยู่ในช่วง UV-VIS-NIR ที่อุณหภูมิห้อง แสดงดังรูปที่ 3 พบว่าตำแหน่งของการดูดกลืนแสง (Absorption Edge) มีการเลื่อนตำแหน่งจาก 421 ไปยัง 455 นาโนเมตร ตามปริมาณการเติม Bi₂O₃ ที่เพิ่มขึ้น คือ 5 ถึง 25 เปอร์เซ็นต์โมล แสดงให้เห็นว่า การเลื่อนตำแหน่งของขอบการดูดกลืนไปยังความยาวคลื่นที่สูงขึ้นตามปริมาณการเติม Bi₂O₃ และอะตอมจับกันแบบ NBO (Non-Bridging Oxygen) โดยการเลื่อนของตำแหน่งขอบดูดกลืนของตำแหน่งขอบการดูดกลืน จะส่งผลให้การจับกันของอะตอม B-O-B แบบ BO (Bridging Oxygen) ลดลง เป็นผลของการเติม Bi₂O₃ ลงไปในแก้วซึ่งอะตอมของ Bi³⁺ จะเข้าไปแทนที่ออกซิเจนในโครงสร้างแก้ว



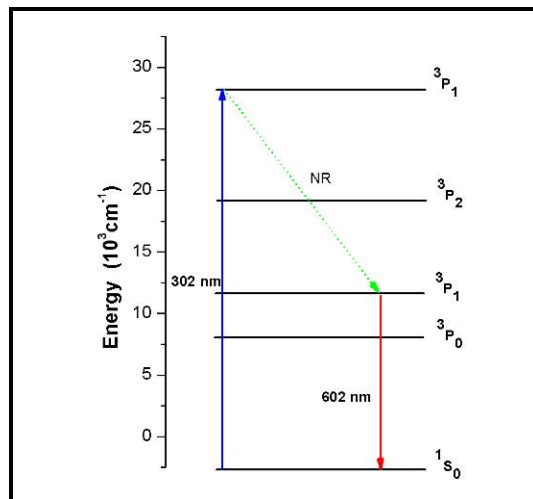
รูปที่ 3 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของแก้ว (55-x)TeO₂ - 30B₂O₃ - 15ZnO - xBi₂O₃ ที่เจือด้วย Bi₂O₃ ที่ความเข้มข้นที่ต่างกัน (55-x)TeO₂ - 30B₂O₃ - 15ZnO - xBi₂O₃ ที่เจือด้วย Bi₂O₃ ที่ความเข้มข้นที่ต่างกัน

ผลการศึกษาสเปกตรัมการลูมิเนสเซนซ์ของแก้วซิงค์บอโรเทลลูไรท์ที่เจือด้วยความเข้มข้นของ Bi₂O₃ ที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ 5 ถึง 25 เปอร์เซ็นต์โมล สเปกตรัมการลูมิเนสเซนซ์ถูกบันทึกในช่วงความยาวคลื่น 500 ถึง 700 นาโนเมตร ความยาวคลื่นที่ใช้กระตุ้น คือ 320 นาโนเมตร แหล่งกำเนิดแสงคือหลอดไฟแฟลช (Xenon Flash Lamp) แสดงดังรูปที่ 4 พบว่าสามารถสังเกตเห็นสเปกตรัม 1 พิก ในช่วง VIS โดยการเปล่งแสงที่ความยาวคลื่น 602 นาโนเมตร โดรนสอดคล้องกับรูปแบบ

ระดับพลังงานของ Bi^{3+} แสดงในรูปที่ 5 จากรูปจะแสดงไดอะแกรมของระดับพลังงานไอออน Bi^{3+} ที่ กระตุ้นแสง เปล่งแสง และการปล่อยพลังงานในรูปของความร้อน (Nonradiative) เมื่อไอออนของ Bi^{3+} ถูกกระตุ้นที่ระดับพลังงานต่าง ๆ



รูปที่ 4 สเปกตรัมการเปล่งแสงของแก้ว $(55-x)\text{TeO}_2 - 30\text{Bi}_2\text{O}_3 - 15\text{ZnO} - x\text{Bi}_2\text{O}_3$
โดยทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของ Bi_2O_3 แตกต่างกัน



รูปที่ 5 ไดอะแกรมระดับพลังงานสำหรับการดูดกลืนแสง และสเปกตรัมการเปล่งแสงของ Bi^{3+}

4. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาแก้วซิงค์บอโรเทลลูไรท์ที่เจือด้วยบิสมัทออกไซด์ พบว่าค่าความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของ Bi_2O_3 และค่าปริมาตรเชิงโมล กราฟแบ่งเป็นสองช่วง ที่ช่วง 5 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์โมล ค่าปริมาตรเชิงโมลจะมีค่าลดลง ช่วงที่สองที่ความเข้มข้นของ Bi_2O_3 10 ถึง 25 เปอร์เซ็นต์โมล ค่าปริมาตรเชิงโมลจะมีค่าเพิ่มขึ้นโดยค่าปริมาตรเชิงโมลมีค่าอยู่ระหว่าง 3.2787 ± 0.0008 ถึง 4.4981 ± 0.2855 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล ผลของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงถูกบันทึกในช่วงความยาวคลื่น 400 ถึง 1,100 นาโนเมตร อยู่ในช่วง UV-VIS-NIR ที่อุณหภูมิห้อง พบว่าตำแหน่งของการดูดกลืนแสง (Absorption Edge) มีการเลื่อนตำแหน่งจาก 421 ไปยัง 455 นาโนเมตร ตามปริมาณการเติม Bi_2O_3 ที่เพิ่มขึ้น และผลของสเปกตรัมการลูมิเนสเซนซ์ถูกบันทึกในช่วงความยาวคลื่น 500 ถึง 700 นาโนเมตร ความยาวคลื่นที่ใช้กระตุ้น คือ 320

นาโนเมตร พบว่าสามารถสังเกตเห็นสเปกตรัม 1 พีค ในช่วง VIS โดยการเปล่งแสงที่ความยาวคลื่น 602 นาโนเมตร ($^3P_1 \rightarrow ^1S_0$)

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีแก้วและวัสดุศาสตร์ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ อาคารศูนย์วิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ที่อำนวยความสะดวกและให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการวิเคราะห์ข้อมูลงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

1. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะ และวัสดุแห่งชาติ, 1997, **วัสดุแก้ว**, [online] Available: <http://www2.mtec.or.th/th/research/GSAT/glassweb/define.html>. (19 ธันวาคม 2560).
2. Robert, H.D., 1994, **Glass Science**, John Wiley&sons., New York.
3. Dimitrov, V., and Komatsu, T., 2013, "Optical Basicity and Chemical Bonding of Bi₂O₃ Containing Glasses", **Journal of Non-Crystalline Solids**, Vol. 382, pp. 18–23.
4. Raouf A.H. El-Mallawany.(2012) **Tellurite glasses**. Broken Sound Parkway
5. "สมบัติ และลักษณะของแมงกานีสออกไซด์", [online], เข้าถึงได้จาก: <https://web.ku.ac.th/schoolnet/snet5/topic2/Mn.html>. (20 มกราคม 2561).
6. M.Anand Pandarinath, G. Upeniter, K. Narasimha Rao, 2016, "Thermal, optical and spectroscopic studies of boro-tellurite glass system containing ZnO", **Journal of Non-Crystalline Solids**, Vol 433, pp 60-67
7. 2014, "Bismuth modified physical, structural and optical properties of mid-IR transparent zinc boro-tellurite glasses" **Journal of Alloys and Compounds**, Vol 587, pp 66-73
8. Ramesh. Boda Md. Shareefuddin, M.N Chary, R. Sayanna., 2016, "FTIR and Optical Properties of Europium Doped Lithium Zinc Bismuth Borate Glasses", **Journal of**, Vol., pp. 1914-1922.
9. Amandeep Kaur, และคณะ .2017, "Short-range structure and thermal properties of aluminotellurite glasses". **Journal of Non-Crystalline Solids**, Vol 470, pp 14-18
10. N.Elkhoshkhany, Rafik Abbas, R. El-Mallawany, S.F. Hatho, 2017 "Optical properties and crystallization of bismuth boro-tellurite glasses", **Journal of**, Vol., pp
11. วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี, **ความหมายของแก้ว** [online], Available: <https://th.wikipedia.org> [06/03/2015]
12. **วัสดุเซรามิก**, [online], Available: <http://www.electron.rmutphysics.com>. [16/11/2015].
13. ชนัญญา วงษ์ดียิ่ง, 2015, "การศึกษาคุณสมบัติของแก้วซิงค์แบเรียมบอเร็ตที่เจือด้วยโคบอลต์ออกไซด์และนีโอดีเมียมออกไซด์", มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา
14. EDMUND PAWEŁ GOLIS^{1*}, MANUELA REBEN^{2*}, JAN WASYLAK², JACEK FILIPECKI¹, 2008, "Investigations of tellurite glasses for optoelectronics devices", Vol. 23, pp 1

15. Institute for Photonics & Advanced Sensing (IPAS), 2009, [online], Available: www.adelaide.edu.au/ipas [11/12/2018].
16. “โลหะทรานสิชัน”, [ออนไลน์],เข้าถึงได้จาก:http://www.chemistry.sc.chula.ac.th/Chem_Tutor/transition.pdf.(20/12 /2017).
17. ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. **วัสดุวิศวกรรม** กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2549
18. วิกีพีเดียสารานุกรมเสรี, **บิสมีท**, [online], Available: <https://th.wikipedia.org>, [07/01/2018].
19. “ความหนาแน่น,[online], Availablehttp://www.teacher.ssru.ac.th/reudee_ni/file.php/Book-CeramicTest/physic-chapter3.html.(23/01/2018).
20. แม้น อมรสิทธิ์ และ อมร เพชรสม, 2552, **หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ**, กรุงเทพฯ: บริษัทชวนพิมพ์ จำกัด. (23/01/2018).
21. สื่อการสอนฟิสิกส์,ความแตกต่างของ PHOSPHORESCENCE และ FLUORESCENCE, [online], Available: www.rmutphysics.com,[11/01/2018]
22. ชันนัญญา วงษ์ดียิ่ง, 2015, “การศึกษาคุณสมบัติของแก้วชิงค์แบเรียมโบเรตที่เจือด้วยโคบอลต์ออกไซด์และนีโอติเมียมออกไซด์”, มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา