

การศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางแสงของแก้วเจือด้วยนิกเกิลออกไซด์ที่เตรียมจากซีเถ้า ไบออยเหลือทิ้ง

ภัทรพร แสงคำ², สโรชา แซ่จิ๋ว^{1,2} และ ณัฐพล ศรีสิทธิโกศล^{1,2*}

¹สาขาวิชาวัสดุและอุปกรณ์การแพทย์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม, นครปฐม

²ศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางด้านแก้วและวัสดุศาสตร์, นครปฐม

*nattapon2004@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางแสงของแก้วที่เตรียมจากซีเถ้าไบออยเหลือทิ้งเจือด้วยนิกเกิลออกไซด์ (NiO) โดยใช้ซีเถ้าไบออยเป็นแหล่งซิลิกา (SiO₂) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ทดแทนสารเคมีบริสุทธิ์ในระบบแก้ว 60SiO₂: (15-x)B₂O₃: 5BaO: 10CaO: 10Na₂O: xNiO เมื่อ x มีค่าเท่ากับ 0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 ร้อยละโดยโมล แก้วตัวอย่างถูกเตรียมด้วยเทคนิคการหลอมแบบดั้งเดิมที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส และอบที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของซีเถ้าไบออยด้วยเทคนิค EDXRF พบ SiO₂ และ CaO เป็นองค์ประกอบหลักร้อยละ 66.77 และ 17.26 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เมื่อปริมาณความเข้มข้นของ NiO เพิ่มขึ้น พบว่าค่าความหนาแน่นของแก้วมีแนวโน้มลดลงจาก 2.8756 เป็น 2.8361 g/cm³ ในขณะที่ ปริมาตรเชิงโมล เพิ่มขึ้นจาก 22.2437 เป็น 22.5562 cm³/mol เนื่องจากโครงสร้างโครงข่ายแก้วเกิดการขยายตัว จากการเพิ่มขึ้นของออกซิเจนที่ไม่เชื่อมต่อกัน สอดคล้องกับค่าดัชนีหักเหที่มีแนวโน้มลดลงตามทฤษฎีของ Lorentz-Lorenz สำหรับการวิเคราะห์สมบัติทางแสง พบพีคการดูดกลืนแสงเด่นชัดในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 442 และ 640 nm ซึ่งสัมพันธ์กับการเปลี่ยนระดับพลังงานของไอออน Ni²⁺ ในโครงสร้างทรงแปดหน้า (Octahedral Coordination) ส่งผลให้แก้วมีลักษณะปรากฏเป็นสีเหลืองอมน้ำตาล โดยมีค่าความสว่าง (L*) ลดลง และค่าความเป็นสีเหลือง (+b*) เพิ่มขึ้นตามปริมาณการเจือ NiO ผลการวิจัยนี้ชี้ให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการนำซีเถ้าไบออยมาพัฒนาเป็นวัสดุแก้วสีเพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุตกแต่งหรือวัสดุทัศนศาสตร์ที่มีเอกลักษณ์เฉพาะตัว

คำสำคัญ: แก้ว สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางแสง ซีเถ้าไบออย นิกเกิลออกไซด์

Study on Physical and Optical Properties of Nickel Oxide-Doped Glasses Derived from Waste Sugarcane Leaf Ash

Pattraporn Saengka², Sarocha Saejiw^{1,2} and Nattapon Srisittipokakun^{1,2*}

¹ Medical Material and Equipment Program, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University, Nakhon Pathom, 73000, Thailand

² Center of Excellence in Glass Technology and Materials Science (CEGM), Nakhon Pathom Rajabhat University, Nakhon Pathom, 73000, Thailand

*nattapon2004@gmail.com

Abstract

This research aims to study the physical and optical properties of glasses prepared from waste sugarcane leaf ash doped with nickel oxide (NiO). Sugarcane leaf ash was utilized as a source of silica (SiO₂) and calcium oxide (CaO) to replace pure chemicals in the glass system: 60SiO₂: (15-x)B₂O₃: 5BaO: 10CaO: 10Na₂O: xNiO, where x = 0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, and 0.05 mol%. The glass samples were prepared using the conventional melt-quenching technique at 1,200°C and annealed at 500°C. Chemical composition analysis of the sugarcane leaf ash via the EDXRF technique revealed SiO₂ and CaO as the primary constituents at 66.77% and 17.26% by weight, respectively. As the concentration of NiO increased, the density of the glass tended to decrease from 2.8756 to 2.8361 g/cm³. Conversely, the molar volume increased from 22.2437 to 22.5562 cm³/mol. This is due to the expansion of the glass network structure resulting from the increase in non-bridging oxygen (NBO). This correlates with the refractive index, which showed a downward trend consistent with the Lorentz-Lorenz theory. Optical property analysis showed distinct absorption peaks at wavelengths of approximately 442 and 640 nm. These peaks are associated with the energy level transitions of Ni²⁺ ions within an octahedral coordination structure. This results in the glass appearing yellowish-brown. Specifically, the brightness (L*) decreased, while the yellowness (+b*) increased in relation to the amount of NiO doping. These findings indicate the feasibility of developing sugarcane leaf ash into colored glass materials for unique decorative or optical applications.

Keywords: Glass, Physical Properties, Optical Properties, Sugarcane Leaf Ash, Nickel Oxide

1. บทนำ

อุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลถือเป็นหนึ่งในเสาหลักทางเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย อย่างไรก็ตาม กระบวนการเก็บเกี่ยวและการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวก่อให้เกิดชีวมวลเหลือทิ้งจำนวนมาก โดยเฉพา “ใบอ้อย” ซึ่งมักถูกกำจัดด้วยวิธีการเผาในที่โล่งแจ้ง วิธีการดังกล่าวนอกจากจะเป็นการสูญเสียทรัพยากรไปโดยเปล่าประโยชน์แล้ว ยังเป็นต้นกำเนิดสำคัญของฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชนและสิ่งแวดล้อม จาก

การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าใบอ้อย (Sugarcane Leaf Ash: SCLA) พบว่ามีปริมาณซิลิกา (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลักในสัดส่วนที่สูงมากกว่าร้อยละ 75-80 ซึ่งซิลิกาจัดเป็นสารตั้งต้นหลัก (Glass Former) ในกระบวนการผลิตแก้ว ดังนั้นการนำเถ้าใบอ้อยมาใช้เป็นแหล่งซิลิกาทดแทนทรายควอตซ์ในอุตสาหกรรมแก้ว จึงเป็นแนวทางที่มีศักยภาพสูงในการลดต้นทุนการผลิต ลดปัญหามลพิษจากการเผา และส่งเสริมโมเดลเศรษฐกิจชีวภาพ-เศรษฐกิจหมุนเวียน-เศรษฐกิจสีเขียว (BCG Model) ของประเทศ [1]

ในปัจจุบัน การพัฒนาวัสดุแก้วไม่ได้มุ่งเน้นเพียงแค่ความใสสะอาดเท่านั้น แต่ยังให้ความสำคัญกับการเติมแต่งไอออนของโลหะทรานซิชัน (Transition Metal Ions) เพื่อปรับปรุงสมบัติทางแสงและกายภาพให้เหมาะสมกับการใช้งานเฉพาะทาง หนึ่งในตัวเจือ (Dopant) ที่ได้รับความนิยมอย่างมากคือ นิกเกิลออกไซด์ (NiO) เนื่องจากไอออนของนิกเกิล (Ni^{2+}) สามารถแสดงพฤติกรรมทางแสงที่น่าสนใจ โดยขึ้นอยู่กับโครงสร้างผลึกและการจัดเรียงตัวของลิแกนด์ (Ligand Field) รอบอะตอมกลาง ซึ่ง Ni^{2+} สามารถอยู่ในตำแหน่ง Octahedral หรือ Tetrahedral sites ภายในโครงสร้างร่างแหของแก้ว ส่งผลให้เกิดแถบการดูดกลืนแสงที่ต่างกันในช่วงแสงที่มองเห็นได้ (Visible) และช่วงอินฟราเรดใกล้ (Near-Infrared) ทำให้แก้วที่เจือด้วยนิกเกิลมีความเหมาะสมในการพัฒนาเป็นฟิลเตอร์กรองแสง วัสดุตกแต่ง หรือแม้กระทั่งวัสดุเลเซอร์ [2]

แม้ว่าจะมีการศึกษาการนำเถ้ากลบมาผลิตแก้วกันอย่างแพร่หลาย แต่การวิจัยเกี่ยวกับการใช้ "เถ้าใบอ้อย" เป็นสารตั้งต้นหลักในการผลิตแก้วโซดาไลม์ซิลิเกตและแก้วชนิดอื่นๆ ยังมีจำนวนจำกัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งการศึกษาลักษณะของการเจือ NiO ลงในแก้วเมทริกซ์ที่เตรียมจากเถ้าใบอ้อย ซึ่งมีความซับซ้อนกว่าแก้วทั่วไปเนื่องจากเถ้าใบอ้อยมักมีสิ่งเจือปนอื่น ๆ (Impurities) เช่น K_2O , CaO , และ P_2O_5 หลงเหลืออยู่ ซึ่งสิ่งเจือปนเหล่านี้อาจส่งผลต่อความหนาแน่น ค่าดัชนีหักเห และพฤติกรรมการดูดกลืนแสงของ Ni^{2+} ในรูปแบบที่ไม่เหมือนกับแก้วสังเคราะห์บริสุทธิ์ [3-6]

ดังนั้น โครงการวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาผลของความเข้มข้นของ NiO ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพ เช่น ความหนาแน่น, ปริมาตรเชิงโมล และสมบัติทางแสง ของแก้วที่เตรียมจากเถ้าใบอ้อย ซึ่งมีความซับซ้อนกว่าการใช้สารเคมีเป็นอย่างมาก การวิจัยนี้จะช่วยพิสูจน์ทราบถึงความเป็นไปได้ในการใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาพัฒนาเป็นวัสดุที่มีมูลค่าสูง สร้างองค์ความรู้ใหม่เกี่ยวกับอิทธิพลของสิ่งเจือปนในเถ้าชีวมวลต่อโครงสร้างแก้ว และนำไปสู่การพัฒนาผลิตภัณฑ์แก้วสีเพื่อประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ประดิษฐ์ หรือใช้ในการตกแต่ง หรือใช้เป็นแก้วกรองแสงที่มีเอกลักษณ์เฉพาะตัว ซึ่งจะเป็นการยกระดับห่วงโซ่อุปทานของเกษตรกรผู้ปลูกอ้อยและอุตสาหกรรมวัสดุศาสตร์ของไทยได้อย่างยั่งยืน

2. วิธีการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้นำเถ้าใบอ้อยจากโรงงานน้ำตาลมาใช้เป็นองค์ประกอบในการทำแก้ว โดยทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุในเถ้าใบอ้อยด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์รังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Fluorescence-EDXRF) ของบริษัท Panalytical รุ่น Minipal-4 แล้วใช้ข้อมูลดังกล่าวในการออกแบบสูตรแก้วต่อไป ผู้วิจัยจึงได้ทำการออกแบบสูตรแก้วโดยใช้เถ้าใบอ้อยแทนสาร CaO และ SiO_2 จากนั้นนำเถ้าไปหลอมในเตาหลอมไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส จากนั้นนำเถ้าหลอมออกจากเตาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง เพื่อให้แก้วเหลวได้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว โดยเทน้ำแก้วลงบนแบบพิมพ์แกรไฟต์ นำแก้วที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จากนั้นปิดเตาให้อุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิห้อง จึงนำแก้วออกจากเตา นำแก้วที่เย็นตัวแล้วไปขัดให้มีขนาด $1.0 \times 1.5 \times 0.3$ ลูกบาศก์เซนติเมตร หลังจากนั้นจึงมาศึกษาสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางแสง ได้แก่ ความหนาแน่น ปริมาตรเชิงโมล ดัชนีหักเห การดูดกลืนแสง และค่าสีในระบบ $\text{CIE L}^*a^*b^*$

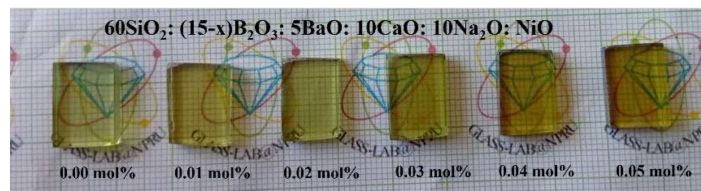
3. ผลการวิจัย

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์ซีเมนต์ด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Fluorescence: EDXRF) โดยใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์รุ่น Minipal-4 จากบริษัท Panalytical พบว่าซีเมนต์ซีเมนต์มีองค์ประกอบหลักคือซิลิกา (SiO_2) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ในปริมาณร้อยละ 66.77 และ 17.26 โดยน้ำหนักตามลำดับ นอกจากนี้ยังตรวจพบออกไซด์ของโลหะทรานซิชันที่มีบทบาทสำคัญต่อการแสดงสีของแก้ว ได้แก่ เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) และแมงกานีสออกไซด์ (MnO) ดังรายละเอียดที่แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างซีเมนต์ซีเมนต์

สารประกอบ	SiO_2	P_2O_5	CaO	K_2O	Fe_2O_3	MnO
ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	66.77	2.14	17.26	5.80	7.49	0.54

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์ซีเมนต์ด้วยผู้วิจัยจึงได้กำหนดสัดส่วนในการออกแบบสูตรแก้วโดยใช้ซีเมนต์ซีเมนต์เป็นแหล่งซิลิกา (SiO_2) และ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ตามระบบโครงสร้างแก้ว $60\text{SiO}_2 \cdot (15-x)\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{BaO} \cdot 10\text{CaO} \cdot 10\text{Na}_2\text{O} \cdot x\text{NiO}$ ร้อยละโดยโมล โดยกำหนดให้ x คือความเข้มข้นของนิกเกิลออกไซด์ที่ใช้ในการศึกษาที่ระดับ 0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 ร้อยละโดยโมล ตามลำดับ จากการเตรียมแก้วตัวอย่างพบว่า แก้วในชุดควบคุมที่ไม่เติม NiO ($x = 0.0$) มีลักษณะโปร่งใสและแสดงสีเหลืองอมน้ำตาล ซึ่งเป็นผลมาจากธาตุเจือปนตามธรรมชาติในซีเมนต์ซีเมนต์ เช่น Fe_2O_3 และ MnO และเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสารให้สีนิกเกิลออกไซด์ (NiO) มากขึ้น พบว่าแก้วตัวอย่างจะมีการเปลี่ยนแปลงของโทนสีที่เข้มข้นอย่างชัดเจนตามสัดส่วนการเจือ ดังที่แสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แก้วตัวอย่างที่เจือ NiO ในความเข้มข้นที่ต่างกัน

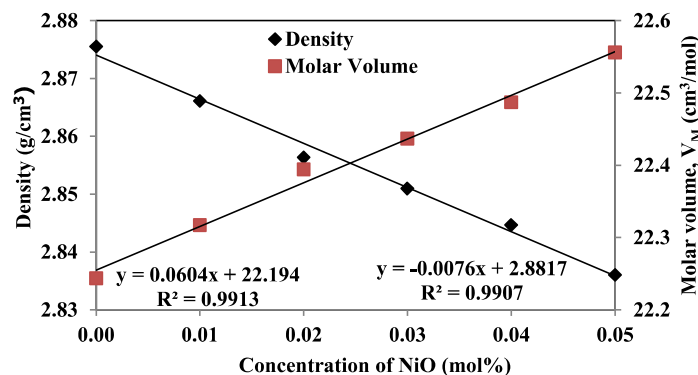
3.1 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่น ปริมาตรเชิงโมล และดัชนีหักเห

จากการวิเคราะห์หาค่าความหนาแน่นของแก้วตัวอย่างที่เติมออกไซด์ของ NiO ที่มีความเข้มข้น 0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 ร้อยละโดยโมล พบว่าค่าความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของ NiO เพิ่มขึ้น โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 2.8756 ± 0.0001 ถึง 2.8361 ± 0.0002 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ขณะที่ค่าปริมาตรเชิงโมลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 22.2437 เป็น 22.5562 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล ดังแสดงในตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าการเติม NiO ส่งผลให้โครงสร้างแก้วเกิดการขยายตัวและมีการจัดเรียงตัวหลวมมากขึ้น การเจือ NiO เข้าไปแทนที่ B_2O_3 ส่งผลกระทบโดยตรงต่อโครงสร้างของแก้ว เนื่องจาก B_2O_3 เป็นสารสร้างโครงข่าย (glass former) ที่มีบทบาทสำคัญในการสร้างพันธะเชื่อมต่อกันภายในโครงข่ายแก้ว และสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงพิกัดของโบรอน (boron coordination) ซึ่งช่วยเพิ่มความหนาแน่นของโครงข่ายได้ เมื่อปริมาณ B_2O_3 ลดลง จำนวนพันธะที่เชื่อมต่อกันภายในโครงข่ายจึงลดลง ส่งผลให้โครงข่ายมีความต่อเนื่องลดลงและเกิดการคลายตัวของโครงข่ายมากขึ้น ในขณะเดียวกัน Ni^{2+} ทำหน้าที่เป็นตัวปรับเปลี่ยนโครงข่าย (network modifier) โดยเข้าไปรบกวนพันธะเชื่อมต่อกันภายในโครงข่าย ส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของออกซิเจนที่ไม่เป็นสะพานเชื่อม (non-bridging oxygen; NBO) และทำให้ระยะห่างเฉลี่ยระหว่างหน่วยโครงข่ายเพิ่มขึ้น การขยายตัวของโครงข่ายดังกล่าวสะท้อนให้เห็นจากการเพิ่มขึ้นของค่าปริมาตรเชิงโมล และเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ค่าความหนาแน่นของแก้วลดลง ทั้งนี้แสดงให้เห็นว่าการ

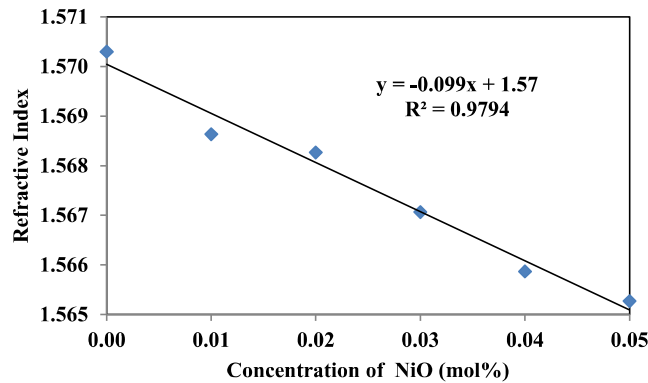
เปลี่ยนแปลงของโครงสร้างภายในแก้วมีอิทธิพลต่อค่าความหนาแน่นมากกว่าผลจากมวลอะตอมของนิกเกิล เมื่อนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับความเข้มข้นของ NiO และระหว่างปริมาตรเชิงโมลกับความเข้มข้นของ NiO ดังแสดงในภาพที่ 2 พบว่ากราฟมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9907 และ 0.9913 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทั้งสองมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับปริมาณ NiO ที่เติมลงในระบบแก้ว จากการวิเคราะห์ค่าดัชนีหักเหของแก้วตัวอย่าง พบว่าค่าดัชนีหักเหมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของ NiO เพิ่มขึ้น โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 1.5703 ± 0.0000 ถึง 1.5653 ± 0.0001 ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งมีแนวโน้มสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาแน่น ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎี Lorentz-Lorenz ซึ่งระบุว่าค่าดัชนีหักเหขึ้นอยู่กับจำนวนอนุภาคและความสามารถในการเกิดโพลาไรซ์ของอิเล็กตรอนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร เมื่อการเติม NiO ทำให้โครงสร้างแก้วขยายตัวและค่าปริมาตรเชิงโมลเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของอนุภาคภายในวัสดุจึงลดลง ส่งผลให้ความสามารถในการเกิดโพลาไรซ์ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรลดลง และทำให้ดัชนีหักเหลดลงตามไปด้วย แม้ว่านิกเกิลจะเป็นธาตุที่มีมวลอะตอมสูง แต่ผลของการขยายตัวและการขยายตัวของโครงสร้างแก้วมีอิทธิพลเด่นกว่า จึงทำให้ค่าความหนาแน่นและดัชนีหักเหลดลงในทิศทางเดียวกัน เมื่อนำค่าดัชนีหักเหมาสร้างกราฟความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของ NiO ดังแสดงในภาพที่ 3 พบว่ากราฟมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9794

ตารางที่ 2 ค่าความหนาแน่น ค่าปริมาตรเชิงโมล และค่าดัชนีหักเหของแก้วที่เติม NiO ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของ NiO (ร้อยละโดยโมล)	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	ดัชนีหักเห	ปริมาตรเชิงโมล (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล)
0.00	2.8756 ± 0.0002	1.5703 ± 0.0000	22.2437
0.01	2.8661 ± 0.0001	1.5686 ± 0.0001	22.3174
0.02	2.8564 ± 0.0003	1.5683 ± 0.0001	22.3943
0.03	2.8510 ± 0.0001	1.5671 ± 0.0001	22.4371
0.04	2.8447 ± 0.0002	1.5659 ± 0.0001	22.4873
0.05	2.8361 ± 0.0001	1.5653 ± 0.0000	22.5562



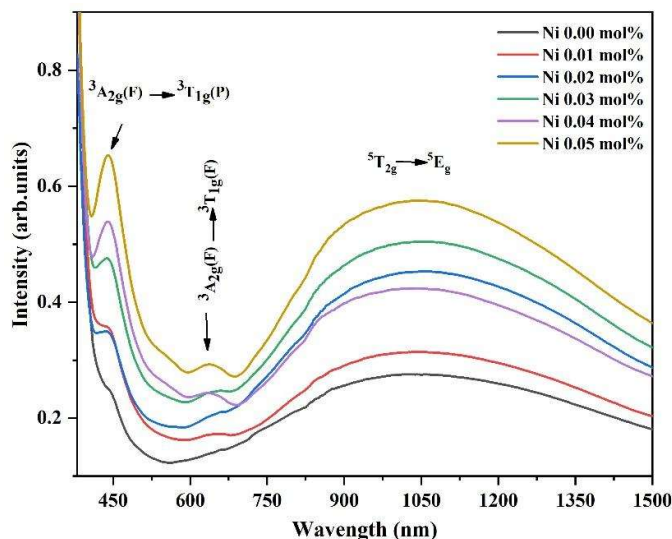
ภาพที่ 2 ค่าความหนาแน่น และค่าปริมาตรเชิงโมล ของแก้วที่เติม NiO ที่ความเข้มข้นต่างๆ



ภาพที่ 3 ค่าดัชนีหักเหของแก้วที่เติม NiO ที่ความเข้มข้นต่างๆ

3.2 ผลการวิเคราะห์การดูดกลืนแสง

จากการวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 200-1,500 นาโนเมตรของแก้วตัวอย่างที่เติม NiO ความเข้มข้น 0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 ร้อยละโดยโมล พบแถบการดูดกลืนแสงที่ประมาณ 442 และ 640 นาโนเมตร ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของไอออน Ni^{2+} และเกิดจากการเปลี่ยนชั้นพลังงาน $^3\text{A}_{2g}(\text{F}) \rightarrow ^3\text{T}_{1g}(\text{P})$ และ $^3\text{A}_{2g}(\text{F}) \rightarrow ^3\text{T}_{1g}(\text{F})$ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบแถบการดูดกลืนแสงบริเวณประมาณ 1,050 นาโนเมตร ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนชั้นพลังงาน $^5\text{T}_{2g} \rightarrow ^5\text{E}_g$ ของไอออน Fe^{2+} ที่มีอยู่เดิมในซีเมนต์ไธม์ ดังแสดงในภาพที่ 4 ลักษณะของสเปกตรัมดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีสถานะผลึก (Crystal Field Theory) เมื่อไอออน $\text{Ni}^{2+}(\text{d}^8)$ ถูกล้อมรอบด้วยออกซิเจนลิแกนด์ 6 ตัวในโครงสร้างทรงแปดหน้า (O_h) สนามไฟฟ้ารอบไอออนจะทำให้ระดับพลังงาน d-orbitals แยกออกเป็นระดับ t_{2g} และ e_g การดูดกลืนกลอนแสงพลังงานเฉพาะในช่วง 442 nm และ 640 nm จึงเกิดจากการกระตุ้นอิเล็กตรอน (d-d transition) ระหว่างสถานะพื้น $^3\text{A}_{2g}(\text{F})$ ไปยังสถานะกระตุ้น $^3\text{T}_{1g}(\text{P})$ และ $^3\text{T}_{1g}(\text{F})$ ตามลำดับ ซึ่งยืนยันการแยกระดับพลังงานของออร์บิทัล d (d-orbital splitting) ของไอออนโลหะทรานซิชันภายใต้สนามไฟฟ้าสถิตที่เกิดจากลิแกนด์ออกซิเจน (O^{2-}) ในโครงสร้างแก้ว โดยตำแหน่งของแถบการดูดกลืนแสงที่ 442 และ 640 นาโนเมตร บ่งชี้ว่าไอออน Ni^{2+} ส่วนใหญ่จัดเรียงตัวอยู่ในตำแหน่งประสานแบบทรงแปดหน้า (octahedral coordination) ซึ่งถูกล้อมรอบด้วยออกซิเจนไอออน ขณะที่แถบการดูดกลืนบริเวณ 1,050 นาโนเมตรเป็นผลจาก Fe^{2+} ที่เป็นธาตุเจือปนตามธรรมชาติในซีเมนต์ไธม์ ทั้งนี้ ความเข้มของแถบการดูดกลืนที่เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ NiO แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของศูนย์กลางการดูดกลืนแสง ส่งผลให้แก้วมีความเข้มของโทนสีเพิ่มขึ้นตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert law) และทำให้สีเหลืองอมน้ำตาลตามธรรมชาติของแก้วที่เกิดจาก Fe_2O_3 และ MnO มีความเข้มและชัดเจนยิ่งขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ NiO. [7] อีกทั้งการเติม NiO และการเกิด NBO เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ระดับพลังงานของ valence band ขยับสูงขึ้นเนื่องจากอิเล็กตรอนของ NBO มีพลังงานพันธะยึดเหนี่ยวต่ำกว่า Bridging Oxygen (BO) ส่งผลให้ค่า Optical Band Gap (E_{opt}) มีแนวโน้มลดลง (Red shift) ซึ่งสอดคล้องกับขอบการดูดกลืนแสง (Absorption edge) ในช่วงรังสีอัลตราไวโอเลตที่ขยับมาทางความยาวคลื่นที่ยาวขึ้นเมื่อปริมาณ NiO เพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพที่ 4



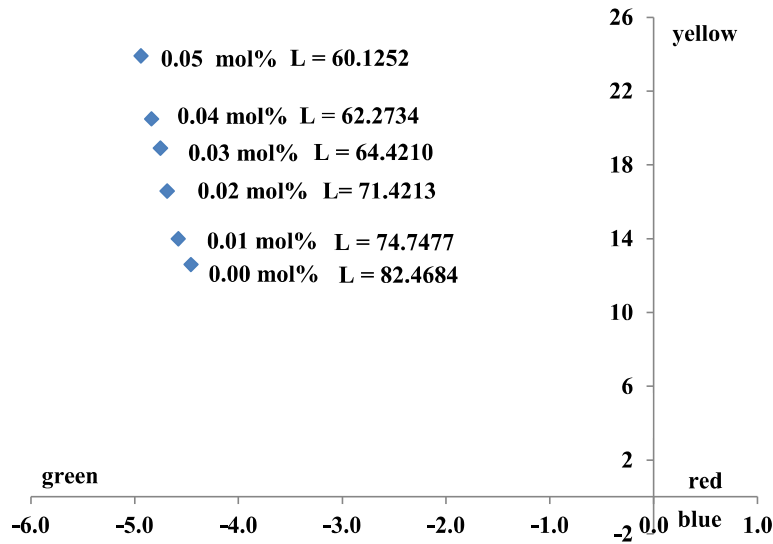
ภาพที่ 4 สเปกตรัมการดูดกลืนของแก้วที่เติม NiO ที่ความเข้มข้นต่างๆ

3.3 ผลการวิเคราะห์สีในระบบ CIE L*a*b*

จากการวิเคราะห์สีในระบบ CIE L*a*b* ของแก้วตัวอย่างที่เติมออกไซด์ของ NiO ที่มีความเข้มข้น 0.00 0.01 0.02 0.03 0.04 และ 0.05 ร้อยละโดยโมล พบว่าค่าความสว่าง (L*) ขึ้นกับปริมาณความเข้มข้นของ NiO ที่เพิ่มขึ้น โดยค่า a* จะมีค่าอยู่ระหว่าง -4.4580 ถึง -4.9399 (แสดงสภาวะความเป็นสีเขียว) ส่วนค่า b* จะมีค่าอยู่ระหว่าง 12.6090 ถึง 23.9096 (แสดงสภาวะความเป็นสีเหลือง) ดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งเมื่อพิจารณาตำแหน่งพิกัดสีพบว่าค่าสีตกอยู่ในจุดภาค (Quadrant) ระหว่างแกน -a* และ +b* โดยค่าพิกัดในแกนสีเหลือง (+b*) มีอิทธิพลสูงกว่าค่าในแกนสีเขียวอย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้แก้วตัวอย่างแสดงลักษณะปรากฏเป็นสีเหลืองอมน้ำตาลที่ความเข้มเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนการเจือสารให้สีดังแสดงในภาพที่ 5 ทั้งนี้ สารให้สีในแก้วนี้ คือ ไอออนของโลหะทรานซิชัน (Ni^{2+}) ที่สร้างพันธะโคเวเลนต์/ไอออนิก ตรึงอยู่ในโครงสร้างซิลิเกตเมทริกซ์อย่างถาวร ต่างจากสารสีอินทรีย์ (Organic dyes) จึงมีความเสถียรต่อแสงไม่เกิดการซีดจาง เมื่อได้รับแสงแดดหรือรังสี UV เป็นระยะเวลานาน ทำให้เหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์เป็นวัสดุตกแต่งภายนอกหรืออัญมณีประดิษฐ์ได้อย่างยั่งยืน

ตารางที่ 3 ค่าสีของแก้วที่เติม NiO ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของ NiO (ร้อยละโดยโมล)	Color measurement		
	L*	a*	b*
0.00	82.4684	-4.4580	12.6090
0.01	74.7477	-4.5792	14.0017
0.02	71.4213	-4.6872	16.5922
0.03	64.4210	-4.7509	18.9099
0.04	62.2734	-4.8378	20.4927
0.05	60.1252	-4.9399	23.9096



ภาพที่ 5 ค่าสีระบบ CIE L*a*b* ของแก้วที่เติม NiO ที่ความเข้มข้นต่างๆ

4. สรุปผลการวิจัย

บทความวิจัยนี้ศึกษาผลของการเจือปนิกเกิลออกไซด์ (NiO) ในปริมาณร้อยละ 0.00-0.05 โดยโมล ต่อสมบัติทางกายภาพและทางแสงของแก้วโซดาไลม์โบโรซิลิเกตที่เตรียมจากซีเถ้าไบออยซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีซิลิกา และแคลเซียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก จากการศึกษาพบว่า เมื่อความเข้มข้นของ NiO เพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่น และค่าดัชนีหักเหของแก้วมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ค่าปริมาตรเชิงโมลเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเกิดจากการขยายตัวของโครงสร้างแก้วและการแทนที่ด้วยนิเกิลไอออน นอกจากนี้ สเปกตรัมการดูดกลืนแสงปรากฏพีคเด่นชัดในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 442 และ 640 nm ซึ่งสัมพันธ์กับการเปลี่ยนระดับพลังงานของ Ni^{2+} ส่งผลให้แก้วมีลักษณะปรากฏเป็นสีเหลืองอมน้ำตาลตามระบบสี CIE Lab* โดยมีความเข้มของสีเพิ่มขึ้นและค่าความสว่าง (L^*) ลดลงตามปริมาณสารเจือ งานวิจัยนี้จึงยืนยันศักยภาพของซีเถ้าไบออยในการพัฒนาเป็นวัสดุแก้วสีที่มีมูลค่าสูงเพื่อการประยุกต์ใช้งานเฉพาะทางได้อย่างยั่งยืน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ที่ให้การสนับสนุนงบรายได้จากมหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ประจำปีงบประมาณ 2569 ภายใต้โครงการวิจัยบูรณาการนักศึกษาและอาจารย์เพื่อการพัฒนาท้องถิ่นและความเป็นเลิศทางวิชาการ ปีงบประมาณ 2569

6. References

- [1] Bhatia, S.K., Palai, A.K., Kumar, A., & Bhatia, R.K. (2021). Trends in renewable energy production employing biomass-based biochar: A review. *Bioresource Technology*, 340, 125644.
- [2] Cannavale, A., Fiorito, F., Manca, M., Giovanni, T., Cingolani, R., Gigli, G., (2010). Multifunctional bioinspired sol-gel coatings for architectural glasses. *Building and Environment* 45, pp. 1233-1243.
- [3] Thakur, S., Thakur, V., Singh, L., Ahmad, A.F., Aliyu, U.S., Tafida, R.A., Prasad, A.S.S. (2024). Thermo- and photoluminescent properties and gamma radiation shielding efficiency of NiO doped B_2O_3 - Bi_2O_3 glass system. *Radiation Physics and Chemistry*, 216, 111402.



- [4] Sayyed, M.I., Sadeq, M.S., (2021). Environment influence on the crystal field and Racah's parameters of constant NiO-doped borosilicate glasses, *Optik*, 247, 167861.
- [5] Amin, H.Y., Alharbi, S.A.R., Abdelghany, A.M., Sadeq, M.S., (2025). Structural reorganization and ligand field parameters induced by Ag₂O incorporation in Ni-doped sodium borate glasses, *Ceramics International*, 51(29) Part B, pp. 60744-60757.
- [6] Almunyif, A., Maatouk, A., Alsaiari, F.M., Alshamari, A., Elkelany, E.A., Abul-Magd, A.A., (2025). Tungsten-induced structural reorganization and optical tuning in Ni²⁺ doped borate glasses, *Ceramics International*, 51(28) Part C, pp. 58593-58604.
- [7] Wang, W.C., Zhou, R., Le, H.Q., Zhang, Q.Y., Wondraczek, L., (2019). Ni-doped fluorosulfates with broad NIR luminescence, *Luminescence*, 210, pp. 457-463.