

ผลของการเติมคอปเปอร์ออกไซด์ต่อสมบัติทางกายภาพและทางแสงของแก้วที่เตรียมจาก ซีเมนต์ไอบีของโรงไฟฟ้าชีวมวล

ณัฐพร มะหิงษา², พิชรพร แจ่มพะเนียด^{1,2} และ กীরติ เกิดศิริ^{1,2,*}

¹สาขาวิชาวัสดุและอุปกรณ์การแพทย์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม, นครปฐม

²ศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางด้านแก้วและวัสดุศาสตร์, นครปฐม

*watcharinratniyom601@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของการเติมคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางแสงของแก้วที่เตรียมจากซีเมนต์ไอบีซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงไฟฟ้าชีวมวล โดยผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (EDXRF) บ่งชี้ว่าซีเมนต์ไอบีประกอบด้วยซิลิกา (SiO₂) ร้อยละ 66.77 และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 17.26 โดยน้ำหนัก จึงสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบหลักทดแทนสารเคมีบริสุทธิ์ในระบบแก้ว โดยใช้กระบวนการสังเคราะห์แก้วด้วยวิธีการหลอมที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส และผ่านการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณความเข้มข้นของ CuO เพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นของแก้วตัวอย่างมีแนวโน้มลดลงจาก 2.8756 ถึง 2.8479 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สวนทางกับปริมาตรเชิงโมลที่มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 22.2437 ถึง 22.4941 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล ปรากฏการณ์นี้อธิบายได้ด้วยบทบาทของ CuO ในฐานะตัวปรับเปลี่ยนโครงข่าย (Network Modifier) ที่เข้าไปขัดขวางโครงสร้างตาข่ายเดิมและเพิ่มปริมาณออกซิเจนที่ไม่เชื่อมต่อกับ (NBO) ส่งผลให้โครงสร้างแก้วขยายตัวและมีช่องว่างเพิ่มขึ้น ในด้านสมบัติทางแสง พบว่าดัชนีหักเหมีแนวโน้มลดลงจาก 1.5703 ถึง 1.5646 สอดคล้องตามทฤษฎีของ Lorentz-Lorenz สำหรับพฤติกรรมการดูดกลืนแสงปรากฏพีกเด่นที่ความยาวคลื่นประมาณ 760 นาโนเมตร ซึ่งระบุถึงการแทรกซึมของไอออน Cu²⁺ ในโครงสร้างทรงแปดหน้าบิดเบี้ยว (Distorted Octahedral) ส่งผลให้แก้วเปลี่ยนจากสีเหลืองอมน้ำตาลตามธรรมชาติไปสู่โทนสีเขียวที่เข้มข้นขึ้นตามปริมาณการเจือ ซึ่งยืนยันได้จากการวิเคราะห์ค่าสีในระบบ CIE L*a*b* ที่ค่า a* มีความเป็นลบมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง

คำสำคัญ: แก้ว สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางแสง ซีเมนต์ไอบี คอปเปอร์ออกไซด์

Effect of Copper Oxide Addition on Physical and Optical Properties of Glass Prepared from Sugarcane Leaf Ash from Biomass Power Plants

Nattaporn Mahingsa², Patcharaporn Jangpaniad^{1,2} and Keerati Kirdsiri^{1,2,*}

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

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

*watcharinratniyom601@hotmail.com

Abstract

This research aims to investigate the influence of copper oxide (CuO) addition on the physical and optical properties of glass prepared from sugarcane leaf ash, a byproduct from biomass power plants. Chemical composition analysis using Energy Dispersive X-Ray Fluorescence (EDXRF) indicates that the sugarcane leaf ash primarily consists of SiO₂ (66.77% by weight) and CaO (17.26% by weight). Consequently, this ash can serve as a primary raw material to replace pure chemicals in the glass system. The glass synthesis was conducted using the melt-quenching technique at a melting temperature of 1,200°C, followed by an annealing process at 500°C. The experimental results reveal that as the CuO concentration increases, the density of the glass samples tends to decrease from 2.8756 to 2.8479 g/cm³. Conversely, the molar volume increases from 22.2437 to 22.4941 cm³/mol. This phenomenon is attributed to the role of CuO as a network modifier, which disrupts the original glass network and increases the formation of non-bridging oxygen (NBO) atoms, leading to structural expansion and increased free volume within the glass matrix. Regarding optical properties, the refractive index exhibits a downward trend from 1.5703 to 1.5646, which is consistent with the Lorentz-Lorenz theory. Optical absorption analysis shows a prominent peak at approximately 760 nm, corresponding to the transition of Cu²⁺ ions within a distorted octahedral coordination. This transition causes the glass to change from its natural yellowish-brown tint—resulting from inherent impurities—to a more intense green hue as the dopant concentration increases. This color shift is further confirmed by CIE L*a*b* colorimetric analysis, where the a* value becomes increasingly negative.

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

1. บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมแก้วและกระจกเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่มีบทบาทสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจโลก โดยมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่องตามความต้องการในอุตสาหกรรมก่อสร้างและอุตสาหกรรมยานยนต์ ซึ่งคาดการณ์ว่ามูลค่าตลาดกระจกก่อสร้างทั่วโลกจะเติบโตอย่างมีนัยสำคัญจากการขยายตัวของความเป็นเมือง (urbanization) และความต้องการวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (green materials) [1] อย่างไรก็ตาม กระบวนการผลิตแก้วในปัจจุบันยังคงพึ่งพาวัตถุดิบหลักจาก

ธรรมชาติ เช่น หินหรือซิลิกา (SiO_2) ในปริมาณมาก ซึ่งกระบวนการขุดเจาะและการขนส่งวัตถุดิบเหล่านี้ได้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก การมองหาแหล่งวัตถุดิบทางเลือก (alternative raw materials) ที่มาจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจึงเป็นแนวทางที่ได้รับความนิยมอย่างมากในงานวิจัยด้านวัสดุศาสตร์ยุคใหม่ เพื่อตอบสนองต่อแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (circular economy) และลดต้นทุนการผลิตในระยะยาว [2]

ประเทศไทยเป็นหนึ่งในประเทศผู้ส่งออกน้ำตาลรายใหญ่ของโลก โดยพื้นที่เพาะปลูกอ้อยจะหนาแน่นในภาคกลางและภาคตะวันตก เช่น จังหวัดกาญจนบุรี สุพรรณบุรี และราชบุรี จากรายงานของสำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย (สอน.) พบว่าในปีการผลิต 2565 และ 2566 ประเทศไทยมีปริมาณอ้อยเข้าหีบรวมกว่า 90 ล้านตัน [3] อย่างไรก็ตาม ปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นซ้ำซากในกระบวนการเก็บเกี่ยวคือ การเผาอ้อย เพื่อความสะดวกรวดเร็วและลดต้นทุนแรงงานในการเก็บเกี่ยว ซึ่งจะก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ โดยเฉพาะฝุ่นละอองขนาดเล็ก ($\text{PM}_{2.5}$) ที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชนในพื้นที่และจังหวัดใกล้เคียง รวมถึงกรุงเทพมหานคร นอกจากนี้ หลังกระบวนการผลิตไฟฟ้าในโรงไฟฟ้าชีวมวล ยังคงมี "ขี้เถ้าใบอ้อย" (sugarcane leaf ash) เหลือทิ้งจำนวนมาก ซึ่งหากไม่ได้รับการจัดการที่เหมาะสมจะเป็นภาระในการกำจัด ทั้งที่ขี้เถ้าเหล่านี้มีองค์ประกอบของซิลิกา (SiO_2) ในปริมาณสูง ซึ่งมีศักยภาพในการนำมาเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในกระบวนการผลิตแก้วได้

แก้วบอโรซิลิเกต (borosilicate glass) เป็นชนิดของแก้วที่ได้รับความนิยมสูงในการประยุกต์ใช้งานด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรม เนื่องจากมีโครงสร้างร่างแหที่แข็งแรงจากการผสมโบรอนออกไซด์ (B_2O_3) ทำให้มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำ (low thermal expansion coefficient) ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน (thermal shock resistance) และมีความทนทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมีสูง ด้วยสมบัติที่โดดเด่นข้างต้น แก้วบอโรซิลิเกตจึงถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในชีวิตประจำวันและอุตสาหกรรม เช่น ภาชนะเครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการ เลนส์ทางแสง ภาชนะทนความร้อนสำหรับทำอาหาร รวมถึงบรรจุภัณฑ์ยาและเวชภัณฑ์ที่ต้องการความบริสุทธิ์สูง

เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าและขยายขอบเขตการใช้งานของวัสดุแก้วที่เตรียมได้จากขี้เถ้าใบอ้อย การเติมไอออนของโลหะทรานซิชัน เช่น คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ลงในโครงสร้างแก้วเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงสมบัติทางแสงและกายภาพ การศึกษาวิจัยพบว่า CuO ทำหน้าที่เป็นตัวให้สี (colorant) ที่ทำให้แก้วมีเฉดสีฟ้าหรือสีเขียวเทอร์ควอยซ์ ซึ่งมีสีสันสวยงามและเป็นที่ต้องการในอุตสาหกรรมแก้วศิลปะและกระจกดัดตกแต่ง นอกจากนี้ ไอออนของคอปเปอร์ (Cu^{2+}) ยังมีสมบัติในการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเฉพาะ ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้เป็นฟิลเตอร์กรองแสง (optical filter) หรือวัสดุป้องกันแสงในงานทัศนศาสตร์ได้ [4-8]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาอิทธิพลของการเติมคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางแสงของแก้วที่เตรียมได้จากขี้เถ้าใบอ้อยของโรงไฟฟ้าชีวมวล โดยกระบวนการวิจัยเริ่มต้นจากการออกแบบส่วนผสมและศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการหาสูตรแก้วต้นแบบ (based glass) ที่มีความเหมาะสม จากนั้นจึงเจือคอปเปอร์ออกไซด์ลงในสูตรแก้ว และขั้นตอนสุดท้ายจะตรวจวัดสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางแสง ได้แก่ ความหนาแน่น ดัชนีหักเห สเปกตรัมการดูดกลืนแสง และค่าพิกัดสีในมาตรฐาน $\text{CIE L}^* a^* b^*$ การวิจัยนี้จะช่วยพิสูจน์ทราบถึงความเป็นไปได้ในการใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาพัฒนาเป็นวัสดุที่มีมูลค่าสูง สร้างองค์ความรู้ใหม่เกี่ยวกับอิทธิพลของสิ่งเจือปนในแก้วชีวมวลต่อโครงสร้างแก้ว และนำไปสู่การพัฒนาผลิตภัณฑ์แก้วสีเพื่อประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ประดิษฐ์ ฟิลเตอร์กรองแสง (optical filter) หรือวัสดุป้องกันแสงในงานทัศนศาสตร์ได้

2. วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการใช้ประโยชน์จากเศษเหลือทิ้งจากการเกษตร โดยนำขี้เถ้าใบอ้อยจากโรงงานน้ำตาลมาประยุกต์ใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการสังเคราะห์แก้ว ซึ่งขั้นตอนแรกเริ่มจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเชิงลึกด้วยเทคนิคการเรืองแสงรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Fluorescence: EDXRF) โดยใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์รุ่น

Minipal-4 จากบริษัท Panalytical เพื่อนำข้อมูลร้อยละโดยน้ำหนักของสารประกอบสำคัญ เช่น SiO_2 , CaO , K_2O และ Fe_2O_3 มาใช้เป็นฐานข้อมูลในการคำนวณและออกแบบสูตรแก้ว โดยผู้วิจัยได้กำหนดให้ปริมาณซีเมนต์ในอัตราส่วนที่ต่ำลงเพื่อทดสอบการนำสารเคมีบริสุทธิ์ประเภทแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และซิลิกา (SiO_2) ในโครงสร้างแก้ว ในกระบวนการสังเคราะห์นั้น สารผสมทั้งหมดจะถูกนำไปหลอมเหลวภายใต้อุณหภูมิสูงถึง 1,200 องศาเซลเซียส ภายในเตาหลอมไฟฟ้าเพื่อให้ได้น้ำแก้วที่มีความเข้มข้นสม่ำเสมอ จากนั้นจึงดำเนินการขึ้นรูปผ่านกระบวนการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quenching) โดยการเทน้ำแก้วลงบนแม่พิมพ์แกรไฟต์ และนำชิ้นแก้วที่ได้เข้าสู่กระบวนการอบคืนตัว (Annealing) ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เพื่อลดความเครียดที่สะสมภายในเนื้อวัสดุ ก่อนจะปล่อยให้อุณหภูมิภายในเตาตกลงอย่างอิสระ จนถึงอุณหภูมิห้อง ภายหลังจากกระบวนการหลอม แก้วตัวอย่างจะถูกนำมาขัดแต่งพื้นผิวให้ได้ขนาดมาตรฐาน $1.0 \times 1.5 \times 0.3$ ลูกบาศก์เซนติเมตร เพื่อเตรียมความพร้อมสำหรับการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะ ซึ่งครอบคลุมทั้งสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ค่าความหนาแน่นและปริมาตรเชิงโมล ตลอดจนสมบัติทางแสงซึ่งประกอบด้วยการวัดค่าดัชนีหักเห พฤติกรรมการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ และการวิเคราะห์ค่าสีตามระบบมาตรฐานสากล CIE Lab* เพื่อประเมินผลกระทบของการเติมสารเจือที่มีต่อโครงสร้างและสมบัติทัศนศาสตร์ของแก้วอย่างเป็นระบบ

3. ผลการวิจัย

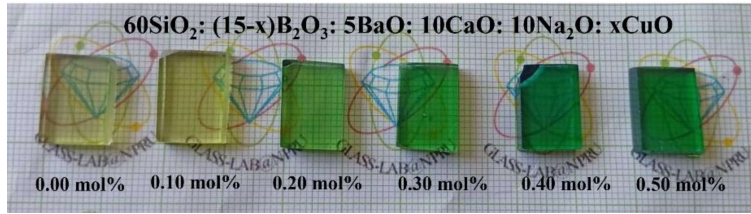
3.1 องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างซีเมนต์ในอัตราส่วน

ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะทางเคมีของซีเมนต์ในอัตราส่วนด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Fluorescence: EDXRF) ผ่านเครื่องสเปกโตรมิเตอร์รุ่น Minipal-4 (Panalytical) บ่งชี้ว่าวัตถุดิบดังกล่าวประกอบด้วยสารประกอบเชิงซ้อนที่มีความเหมาะสมต่อการเป็นโครงสร้างหลักของแก้ว โดยพบสารประกอบจำพวกซิลิกา (SiO_2) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ในปริมาณร้อยละ 66.77 และ 17.26 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ยิ่งไปกว่านั้น ข้อมูลการวิเคราะห์ยังปรากฏร่องรอยของออกไซด์โลหะทรานซิชันที่มีนัยสำคัญต่อสมบัติทางทัศนศาสตร์และการแสดงพฤติกรรมการดูดกลืนแสงของเนื้อแก้ว ได้แก่ เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) และแมงกานีสออกไซด์ (MnO) ซึ่งรายละเอียดองค์ประกอบทางเคมีโดยรวมของซีเมนต์ในอัตราส่วนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ถูกจำแนกไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างซีเมนต์ในอัตราส่วน

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

ข้อมูลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์ในอัตราส่วนถูกนำมาใช้เป็นเกณฑ์หลักในการคำนวณและออกแบบโครงสร้างแก้ว โดยอาศัยซีเมนต์ดังกล่าวเป็นแหล่งวัตถุดิบสำคัญของซิลิกา (SiO_2) และ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ตามระบบโครงสร้างแก้ว $60\text{SiO}_2 \cdot (15-x)\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{BaO} \cdot 10\text{CaO} \cdot 10\text{Na}_2\text{O} \cdot x\text{CuO}$ ร้อยละโดยโมล โดยกำหนดให้ x คือความเข้มข้นของคอปเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในการศึกษาที่ระดับ 0.0 0.1 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 ร้อยละโดยโมล ตามลำดับ จากการเตรียมแก้วตัวอย่างพบว่า แก้วในชุดควบคุมที่ไม่เติม CuO ($x = 0.0$) มีลักษณะโปร่งใสแต่ปรากฏสีเหลืองอมน้ำตาล ซึ่งเป็นอิทธิพลจากออกไซด์ของโลหะทรานซิชันที่ปนเปื้อนอยู่ตามธรรมชาติในซีเมนต์ในอัตราส่วน อาทิ เหล็กออกไซด์ Fe_2O_3 และ แมงกานีสออกไซด์ MnO อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสารให้สีอย่างคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) เข้าสู่ระบบแก้วพบว่าลักษณะทางกายภาพของแก้วตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงของโทนสีไปทางสีเขียวที่เข้มข้นขึ้นอย่างมีนัยสำคัญตามสัดส่วนการเจือที่เพิ่มขึ้น ดังที่แสดงในภาพที่ 1



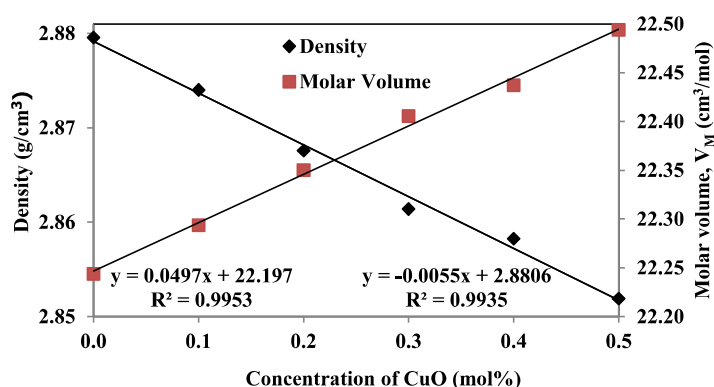
ภาพที่ 1 แก้วตัวอย่างที่เจือ CuO ในความเข้มข้นที่ต่างกัน

3.2 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่น ปริมาตรเชิงโมล และดัชนีหักเห

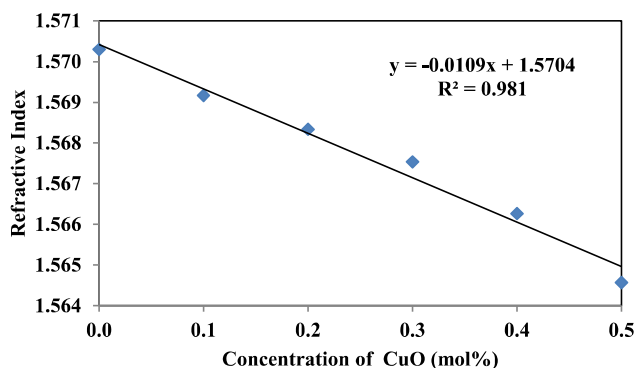
จากการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของแก้วตัวอย่างที่เตรียมจากซีเมนต์เข้าใบอ้อยเจือด้วย CuO ที่มีความเข้มข้น 0.0 0.1 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 ร้อยละโดยโมล พบว่าค่าความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการเจือที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าลดลงจาก 2.8756 ± 0.0002 ถึง 2.8479 ± 0.0003 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งปรากฏผลในทิศทางตรงกันข้ามกับค่าปริมาตรเชิงโมล ที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องตามปริมาณ CuO โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 22.2437 ถึง 22.4941 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล ดังรายละเอียดในตารางที่ 2 ปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระดับจุลภาค การเจือ CuO แทนที่ B₂O₃ ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและทางแสงอย่างมีนัยสำคัญทางฟิสิกส์แก้ว เนื่องจากการลดลงของ B₂O₃ ซึ่งเป็นสารสร้างเครือข่าย (Glass Former) ทำให้จำนวนพันธะโคเวเลนต์ [BO₃] และ [BO₄] ที่แข็งแกร่งลดลง ประกอบกับการที่ไอออน Cu²⁺ เข้าไปทำหน้าที่เป็นตัวปรับเปลี่ยนโครงสร้าง (Network Modifier) แทรกอยู่ตามช่องว่างและตัดพันธะร่างแหแก้วเดิม ก่อให้เกิดออกซิเจนที่ไม่เชื่อมต่อน (Non-Bridging Oxygen: NBO) เพิ่มขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างตาข่ายของแก้วเกิดการขยายตัวและมีช่องว่างภายในเพิ่มขึ้น สะท้อนออกมาผ่านการเพิ่มขึ้นของปริมาตรเชิงโมล สำหรับการเจือ CuO เข้าไปแทนที่ B₂O₃ นั้น ส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นผ่านกลไกทางโครงสร้างที่สำคัญ เนื่องจาก B₂O₃ เป็นสารสร้างเครือข่าย (Glass Former) ที่มีบทบาทในการรักษาความหนาแน่นของโครงสร้างผ่านปรากฏการณ์ความผิดปกติของโบรอน (Boron Anomaly) การลดปริมาณ B₂O₃ จึงทำให้จำนวนพันธะเชื่อมต่อในโครงข่ายลดลง ส่งผลให้ความแข็งแรงและความหนาแน่นของโครงสร้างโดยรวมลดลงตามไปด้วย แม้ว่าทองแดง (Cu) จะเป็นธาตุที่มีน้ำหนักอะตอมสูงกว่าธาตุหลักบางชนิด แต่ในระบบแก้วจากซีเมนต์เข้าใบอ้อยนี้ บทบาทของ CuO ในฐานะตัวปรับเปลี่ยนโครงสร้างส่งผลให้เกิดการผลักกันของประจุและการบิดเบี้ยวของโครงสร้างเดิมจนขยายตัวออก ปรากฏการณ์นี้ยืนยันได้จากการเพิ่มขึ้นของปริมาตรเชิงโมลอย่างต่อเนื่อง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างแก้วมีความโปร่งขึ้นและมีช่องว่างระหว่างโมเลกุลมากขึ้น เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ค่าความหนาแน่นลดลง โดยความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและปริมาตรเชิงโมลกับความเข้มข้นของ CuO แสดงให้เห็นความสอดคล้องเชิงเส้นอย่างชัดเจน ดังภาพที่ 2 ในส่วนของสมบัติทางแสงจากการวิเคราะห์ค่าดัชนีหักเห พบว่ามีแนวโน้มลดลงตามปริมาณ CuO ที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าลดลงจาก 1.5703 ± 0.0000 ถึง 1.5646 ± 0.0001 ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งมีทิศทางการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับค่าความหนาแน่น ปรากฏการณ์นี้อธิบายได้ด้วยทฤษฎีความสัมพันธ์ของ Lorentz-Lorenz ซึ่งระบุว่าดัชนีหักเหของวัสดุขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอะตอมและความสามารถในการเกิดโพลาไรซ์ของอิเล็กตรอน (Electronic Polarizability) ต่อหน่วยปริมาตร การใช้ซีเมนต์เข้าใบอ้อยที่มี K₂O และสารเจือปนอื่น ๆ เข้าไปแทนที่โครงสร้าง SiO₂ และ CaO พร้อมทั้งเจือ CuO แทนที่ B₂O₃ ส่งผลให้โครงข่ายตาข่ายของแก้วเกิดการขยายตัว การขยายตัวนี้ทำให้จำนวนอนุภาคต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรลดน้อยลง ส่งผลให้อันตรกิริยาระหว่างคลื่นแสงกับอิเล็กตรอนในเนื้อวัสดุลดลง แสงจึงเดินทางผ่านแก้วได้เร็วขึ้นและมีค่าดัชนีหักเหที่ต่ำลงที่สุดในที่สุด แม้ว่าคอปเปอร์จะเป็นธาตุที่มีน้ำหนักอะตอมสูง แต่อิทธิพลจากการขยายตัวของโครงสร้างแก้ว (Structural Expansion) มีผลเหนือกว่าการเพิ่มขึ้นของมวลอะตอม จึงทำให้ทั้งความหนาแน่นและดัชนีหักเหมีค่าลดลงในทิศทางเดียวกันสอดคล้องตามหลักการทางทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์ โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหกับความเข้มข้นของ CuO ปรากฏดังภาพที่ 3

ตารางที่ 2 ค่าความหนาแน่น ค่าปริมาตรเชิงโมล และค่าดัชนีหักเหของแก้วที่เติม CuO ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของ CuO (ร้อยละโดยโมล)	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	ปริมาตรเชิงโมล (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล)	ดัชนีหักเห
0.0	2.8756 ± 0.0002	22.2437	1.5703 ± 0.0000
0.1	2.8700 ± 0.0003	22.2935	1.5692 ± 0.0001
0.2	2.8636 ± 0.0003	22.3502	1.5683 ± 0.0001
0.3	2.8574 ± 0.0000	22.4057	1.5675 ± 0.0001
0.4	2.8542 ± 0.0003	22.4372	1.5663 ± 0.0001
0.5	2.8479 ± 0.0003	22.4941	1.5646 ± 0.0001



ภาพที่ 2 ค่าความหนาแน่น และค่าปริมาตรเชิงโมล ของแก้วที่เติม CuO ที่ความเข้มข้นต่างๆ

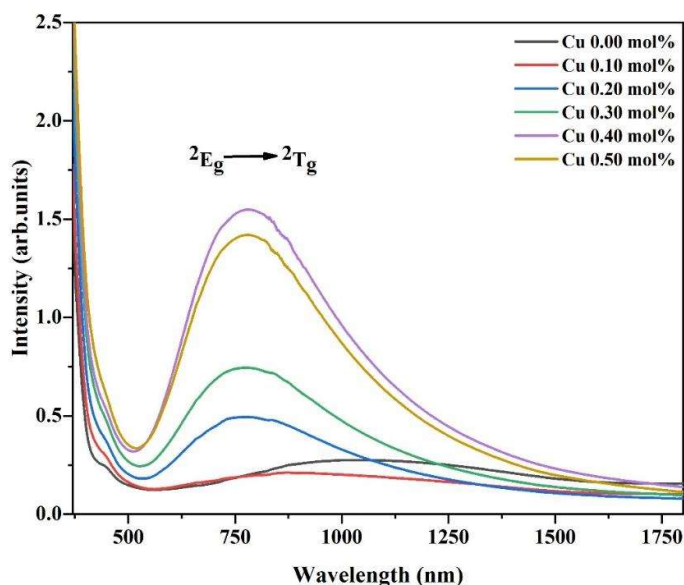


ภาพที่ 3 ค่าดัชนีหักเหของแก้วที่เติม CuO ที่ความเข้มข้นต่างๆ

3.3 ผลการวิเคราะห์การดูดกลืนแสง

จากการวิเคราะห์การดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 200 – 1,800 นาโนเมตร ของแก้วตัวอย่างที่เติมออกไซด์ของ CuO ที่มีความเข้มข้น 0.0 0.1 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 ร้อยละโดยโมล พบลักษณะเด่นของพีการดูดกลืนแสงที่กว้างและมีความเข้มสูงในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 760 นาโนเมตร ซึ่งเป็นเอกลักษณ์เฉพาะของไอออนคอปเปอร์ (Cu^{2+}) พิกดังกล่าวเกิดจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในวงโคจร d-orbital จากสถานะพื้น ^2E_g ไปยังสถานะกระตุ้น ^2T_g ดังแสดงในภาพที่ 4 ลักษณะของสเปกตรัมที่ปรากฏนี้สามารถอธิบายได้ด้วย ทฤษฎีสถานะผลึก (Crystal Field Theory) โดย

ตำแหน่งและความกว้างของพีคการดูดกลืนแสงบ่งชี้ว่าไอออนของคอปเปอร์จัดเรียงตัวอยู่ในโครงสร้างทรงแปดหน้าที่มีการบิดเบี้ยว (Distorted Octahedral Coordination) อันเนื่องมาจากปรากฏการณ์จอห์น-เทลเลอร์ (Jahn-Teller effect) ซึ่งส่งผลให้ระดับพลังงาน d-orbital เกิดการแยกตัวที่ซับซ้อนขึ้น [9] นอกจากนี้ ในตัวอย่างแก้วฐาน (x = 0.0) ยังปรากฏการดูดกลืนแสงบางส่วนในช่วงความยาวคลื่นต่ำและช่วงอินฟราเรด ซึ่งเป็นอิทธิพลจากธาตุเจือปนตามธรรมชาติในซีเมนต์ไอบีเอ เช่น Fe_2O_3 และ MnO เมื่อมีการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของ CuO มากขึ้น ความเข้มของการดูดกลืนแสงในช่วงสีแดงและอินฟราเรดใกล้จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้แก้วที่เดิมมีสีเหลืองอมน้ำตาลตามธรรมชาติเปลี่ยนเข้าสู่โทนสีเขียวที่เข้มข้นและชัดเจนยิ่งขึ้นตามปริมาณการเจือสารให้สีคอปเปอร์



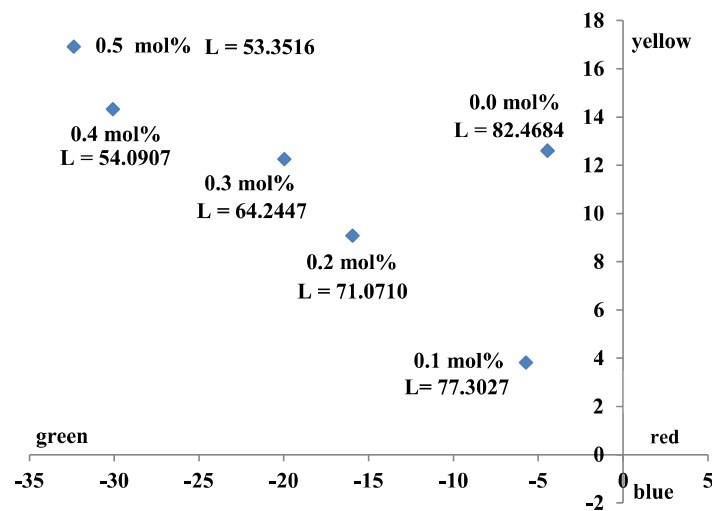
ภาพที่ 4 สเปกตรัมการดูดกลืนของแก้วที่เติม CuO ที่ความเข้มข้นต่างๆ

3.4 ผลการวิเคราะห์สีในระบบ $\text{CIE L}^*\text{a}^*\text{b}^*$

จากการวิเคราะห์ค่าสีในระบบมาตรฐานสากล $\text{CIE L}^*\text{a}^*\text{b}^*$ ของแก้วตัวอย่างที่เตรียมจากซีเมนต์ไอบีเอเจือด้วยคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ที่มีความเข้มข้น 0.0 0.1 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 ร้อยละโดยโมล พบว่าค่าความสว่าง (L^*) มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องจาก 82.4684 ถึง 53.3516 ตามปริมาณความเข้มข้นของ CuO ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสะท้อนถึงการดูดกลืนแสงที่สูงขึ้นจนทำให้เนื้อแก้วมีความทึบแสงมากขึ้น ในขณะที่ค่าพิกัดสีบนแกนเขียว-แดง (a^*) แสดงค่าเป็นลบและลดลงอย่างมีนัยสำคัญจาก -4.4580 ถึง -32.3836 บ่งชี้ถึงสภาวะความเป็นสีเขียว (Greenness) ที่เข้มข้นขึ้นอย่างชัดเจนตามปริมาณสารเจือ สำหรับค่าพิกัดบนแกนน้ำเงิน-เหลือง (b^*) มีค่าอยู่ระหว่าง 3.8148 ถึง 16.9245 ซึ่งแสดงสภาวะความเป็นสีเหลือง (Yellowness) ดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งเมื่อพิจารณาตำแหน่งพิกัดสีในปริภูมิสี (Color Space) พบว่าค่าพิกัดส่วนใหญ่ตกอยู่ในจตุภาค (Quadrant) ระหว่างแกน $-a^*$ และ $+b^*$ โดยที่ระยะประชิดของค่าในแกนสีเขียว ($-a^*$) มีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วและโดดเด่นกว่าแกนอื่น ๆ ส่งผลให้แก้วตัวอย่างที่เดิมมีลักษณะสีเหลืองอมน้ำตาล (เนื่องจากอิทธิพลของ Fe_2O_3 และ MnO ในซีเมนต์ไอบีเอ) ค่อยๆ เปลี่ยนเฉดสีเข้าสู่โทนสีเขียวอมฟ้าที่เข้มข้นตามสัดส่วนการเจือของไอออนคอปเปอร์ ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมของการดูดกลืนแสงของ Cu^{2+} ในโครงสร้างแก้วซิลิเกตที่ตรวจพบจากการวิเคราะห์สเปกตรัม โดยลักษณะปรากฏของสีแก้วที่เปลี่ยนแปลงไปตามความเข้มข้นของ CuO ดังแสดงในภาพที่ 5

ตารางที่ 3 ค่าสีของแก้วที่เติม CuO ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของ CuO (ร้อยละโดยโมล)	Color measurement		
	L*	a*	b*
0.0	82.4684	-4.4580	12.609
0.1	77.3027	-5.7274	3.8148
0.2	71.0710	-15.9622	9.0709
0.3	64.2447	-19.9621	12.2526
0.4	54.0970	-30.0885	14.3346
0.5	53.3516	-32.3836	16.9245



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

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษาศักยภาพของการนำซีเถ้าไปอัดจากโรงไฟฟ้าชีวมวลมาใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการสังเคราะห์แก้วบอโรซิลิเกตเพื่อมุ่งเน้นการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรตามแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค EDXRF พบว่าซีเถ้าไปอัดประกอบด้วยซิลิกา (SiO_2) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นส่วนประกอบหลัก ซึ่งสามารถใช้ทดแทนสารเคมีบริสุทธิ์ในการออกแบบสูตรแก้วระบบ $60\text{SiO}_2 \cdot (15-x)\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{BaO} \cdot 10\text{CaO} \cdot 10\text{Na}_2\text{O} \cdot x\text{CuO}$ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยผู้วิจัยได้ศึกษาอิทธิพลของการเติมคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ที่ระดับความเข้มข้น 0.0 - 0.5 ร้อยละโดยโมล ผ่านกระบวนการหลอมที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส และการอบคืนตัวที่ 500 องศาเซลเซียส เพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและทัศนศาสตร์ของวัสดุแก้วที่เตรียมได้ ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มปริมาณ CuO ส่งผลให้ความหนาแน่นของแก้วมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ปริมาตรเชิงโมลเพิ่มขึ้น ซึ่งอธิบายได้ด้วยบทบาทของ CuO ในฐานะตัวปรับเปลี่ยนโครงข่าย (Network Modifier) ที่เข้าไปเพิ่มออกซิเจนที่ไม่เชื่อมต่อกับ (NBO) ค่าดัชนีหักเหมีแนวโน้มลดลงตามความหนาแน่นสอดคล้องกับทฤษฎีของ Lorentz-Lorenz ขณะที่ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนแสงปรากฏพีกเด่นในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 760 นาโนเมตร ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนระดับพลังงานอิเล็กตรอนของไอออน Cu^{2+} ในโครงสร้างทรงแปดหน้าที่ยึดเหนี่ยวตามปรากฏการณ์จอห์น-เทลเลอร์ ส่งผลให้ลักษณะปรากฏของแก้วเปลี่ยนจากสีเหลืองอมน้ำตาลตามธรรมชาติ (อิทธิพลจาก Fe_2O_3 และ MnO ในซีเถ้า) เข้าสู่โทนสีเขียวที่เข้มข้นขึ้นตามปริมาณการ

เจอ ซึ่งยืนยันด้วยค่าพิกัดสีในระบบ CIE $L^*a^*b^*$ ที่มีค่า a^* เป็นลบมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ สรุปได้ว่าสีเข้าไปอ้อมมีศักยภาพสูงในการพัฒนาเป็นวัสดุแก้วสีที่มีมูลค่า เช่น อัญมณีประดิษฐ์หรือฟิลเตอร์กรองแสงทางทัศนศาสตร์

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ที่ให้การสนับสนุนงบรายได้จากมหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ประจำปีงบประมาณ 2569 ภายใต้โครงการวิจัยบูรณาการนักศึกษาและอาจารย์เพื่อการพัฒนาท้องถิ่นและความเป็นเลิศทางวิชาการ ปีงบประมาณ 2569

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] V.T. Nguyen, N. Chattham, A. Pattanaporkratana, C. Jeenanunta, V. Seng, (2025), “Energy Efficiency in Buildings: Smart Glass Technology Evaluation and Selection Model”, *Energies*, Vol. 18(7), 1798P. Singh,
- [2] V. Raghavender, S. Joshi, N.P. Vasan, A. Awasthi, A. Nagpal, A.J.A.A. saheb, (2023), “Composite material: A review over current development and automotive application”, *Materials Today: Proceedings*, 10.1016/j.matpr.2023.11.012
- [3] Office of the Cane and Sugar Board. (2023). Sugarcane production and situation report 2022/2023. Ministry of Industry, Thailand.
- [4] L. Paunescu, N. Constantin, M.F. Dragoescu, A. Ioana, S.M. Axinte, V. Rucai, (2020), “Recycled Glass Waste Expanded by a Microwave Heating Technique”, *U.P.B. Sci. Bull., Series B*, Vol. 82 (4), pp. 325-336.
- [5] S.A. Umar, S.N. Nazrin, I.G. Geidam, R. El-Mallawany, A.M. Abd-Elnaiem, A. Hakamy, F.U. Muhammad, (2023), “Optical basicity, polarizability and spectroscopic investigations of CuO doped $\text{TeO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ glass system”, *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 297, 127309.
- [6] U.G. Issever, G. Kilic, and E. Ilik, (2021), “The Impact of CuO on physical, structural, optical and thermal properties of dark VPB semiconducting glasses”, *Optical Materials*, Vol 116, 111084.
- [7] A. Venkata Sekhar, A.V. Kityk, J. Jedryka, P. Rakus, A. Wojciechowski, A. Siva Sesha Reddy, G. Naga Raju, and N. Veeraiah, (2021), “Investigations on the influence CuO doping on elastic properties of $\text{Li}_2\text{SO}_4\text{-MgO-P}_2\text{O}_5$ glass system by means of acoustic wave propagation”, *Solid State Communications*, Vol 330, 114270.
- [8] J.A. Jiménez, (2022), “ Sm^{3+} photoluminescence and excited-state dynamics in lithium-barium borate glasses co-doped with CuO”, *Chemical Physics*, Vol. 559, 111555.
- [9] H.Y., Amin, S.A.R., Alharbi, F., Ahmad, E.A., Elkelany, (2025), “Effect of selected 3d-transition metal oxides (CoO, NiO and CuO) on the structural, optical and magnetic properties of BNaZn glass host”, *Ceramics International*, Vol 51 (30), Part B, pp. 63746-63757.
- [10] A.M. Elbasiony, M.M. Atta, S.A.M. Issa, M.M. Abdelhamied, H.M.H. Zakaly, Q. Zhang, (2025), “Modulating structural and optical properties of CuO-doped fluorophosphate glasses via electron beam irradiation for optoelectronic applications”, *Ceramics International*, Vol. 51(22), pp. 35355-35364.
- [11] Z. Liu, X. Xu, J. Zhao, T. Zheng, Y. Guo, J. Lv, (2025), “Optical properties of CuO-doped phosphate glass for near-infrared cut filters”, *Ceramics International*, Vol. 51(8), pp.9713-9721.