

การสังเคราะห์แก้วสีฟ้าจากผักตบชวาแม่น้ำนครชัยศรี

อรชพร ทิพย์ประสิทธิ์^{1,2} และ วชิรินทร์ ราชนิยม^{1,2*}

¹สาขาวิชาวัสดุและอุปกรณ์การแพทย์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม, นครปฐม

²ศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางด้านแก้วและวัสดุศาสตร์, นครปฐม

*watcharinratniyom601@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร โดยการสังเคราะห์แก้วสีฟ้าจากผักตบชวาลุ่มน้ำนครชัยศรีเพื่อใช้ทดแทนสารเคมีบริสุทธิ์ในกลุ่มตัวปรับเปลี่ยนโครงสร้างแก้วอย่าง CaO และ K_2O กระบวนการเริ่มต้นจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผักตบชวาด้วยเทคนิค EDXRF ซึ่งพบว่าผักตบชวาประกอบด้วยสารสำคัญอย่าง K_2O และ CaO ในสัดส่วนที่สูงเพียงพอต่อการออกแบบสูตรแก้ว รวมถึงออกไซด์ของโลหะทรานซิชันอย่าง Fe_2O_3 และ MnO ในการเตรียมแก้วสีฟ้าจากผักตบชวาจะแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของ CuO ตั้งแต่ 0.00 ถึง 0.50 ร้อยละโดยโมล จากการศึกษาพฤติกรรมทางกายภาพพบว่า การเพิ่มปริมาณ CuO ส่งผลให้ค่าความหนาแน่น เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจาก 2.5467 เป็น 2.5634 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ในขณะที่ปริมาตรเชิงโมลมีค่าลดลงจาก 25.1163 สู่ 24.9901 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล ซึ่งสะท้อนถึงการเกิดกระบวนการหดตัวของโครงสร้างแก้วที่ส่งผลให้โครงข่ายอัดตัวกันแน่นยิ่งขึ้น ค่าดัชนีหักเหมีค่าสูงขึ้นตามความหนาแน่นของอิเล็กตรอน โดยสเปกตรัมการดูดกลืนแสงปรากฏแถบการดูดกลืนกว้างมีจุดสูงสุดของการดูดกลืนอยู่บริเวณความยาวคลื่นประมาณ 765 นาโนเมตร ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานจาก $^2E_g \rightarrow ^2T_g$ ส่งผลให้แก้วมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพจากสีใสอมเหลืองไปสู่สีฟ้าที่เข้มข้นขึ้น ยืนยันด้วยผลการวัดค่าสีในระบบ CIE $L^*a^*b^*$ ผลการวิจัยนี้ชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของผักตบชวาในการเป็นวัตถุดิบทางเลือกที่ยั่งยืนสำหรับการผลิตแก้วเชิงหน้าที่มีสมบัติทางแสงเฉพาะตัว

คำสำคัญ: แก้ว สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางแสง ผักตบชวา คอปเปอร์ออกไซด์

Synthesis of blue glass from *Eichhornia crassipes* in Nakhon Chai Si River

Arachaphon Thipprasit^{1,2} and Watcharin Rachniyom^{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 enhance the value of agricultural waste by synthesizing blue glass from water hyacinth harvested from the Nakhon Chai Si River basin to replace pure chemical network modifiers such as CaO and K₂O. The process began with a chemical composition analysis of the water hyacinth using the EDXRF technique, which revealed significant concentrations of K₂O and CaO suitable for glass formulation, along with transition metal oxides such as Fe₂O₃ and MnO. In preparing the blue glass, CuO concentration was varied from 0.00 to 0.50 mol%. Physical behavior studies indicated that increasing CuO content led to a continuous rise in density from 2.5467 to 2.5634 g/cm³. Conversely, the molar volume decreased from 25.1163 to 24.9901 cm³/mol, reflecting structural compaction that resulted in a more densely packed glass network. The refractive index increased in accordance with electron density. Optical absorption spectra exhibited a broad absorption band with a peak around 765 nm, attributed to the ⁵E_g → ⁵T_{2g} energy level transition, which caused the physical appearance of the glass to shift from transparent yellowish to an intense blue. This transformation was further confirmed by color measurement results in the CIE L*a*b* system. These findings highlight the potential of water hyacinth as a sustainable alternative raw material for producing functional glass with unique optical properties.

Keywords: Glass, Physical Properties, Optical Properties, *Eichhornia crassipes*, Copper Oxide

1. บทนำ

อุตสาหกรรมแก้วและกระจกในปัจจุบันนับเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่มีอัตราการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคการก่อสร้าง ยานยนต์ และบรรจุภัณฑ์ จากรายงานสถานการณ์ตลาดโลก พบว่าความต้องการวัสดุแก้วที่มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Eco-friendly glass) กำลังได้รับความนิยมอย่างมาก เพื่อตอบสนองต่อนโยบายเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) และลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่ใช้แล้วหมดไป เช่น ทรายซิลิกา (Silica sand) ซึ่งกระบวนการขุดทรายก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศทางธรรมชาติ การค้นคว้าวัสดุทดแทนจากชีวมวลหรือของ

เสียทางการเกษตรเพื่อนำมาเป็นแหล่งของซิลิกาในกระบวนการผลิตแก้ว จึงเป็นแนวทางสำคัญที่ทั่วโลกกำลังให้ความสนใจ เพื่อสร้างความยั่งยืนให้กับห่วงโซ่อุปทานของอุตสาหกรรมนี้ [1-2]

ในบริบทของประเทศไทย โดยเฉพาะบริเวณแม่น้ำนครชัยศรี (แม่น้ำท่าจีน) ในจังหวัดนครปฐม ประสบปัญหาการแพร่ระบาดของผักตบชวา (*Eichhornia crassipes*) อย่างรุนแรงและเรื้อรัง จากข้อมูลการบริหารจัดการน้ำพบว่า ผักตบชวามีอัตราการเจริญเติบโตที่รวดเร็วมากจนกลายเป็นวัชพืชที่กีดขวางทางน้ำไหล ส่งผลให้เกิดปัญหาน้ำเน่าเสียจากการขาดออกซิเจน และเป็นอุปสรรคต่อการระบายน้ำในช่วงฤดูน้ำหลาก ซึ่งนำไปสู่ปัญหาน้ำท่วมบ้านเรือนและพื้นที่เกษตรกรรม สร้างความเดือดร้อนให้แก่ประชาชนในพื้นที่เป็นวงกว้าง [3] การกำจัดโดยการนำไปทิ้งหรือทำปุ๋ยเพียงอย่างเดียวยังไม่เพียงพอต่อปริมาณที่เกิดขึ้น แต่จากการศึกษาโครงสร้างทางเคมีพบว่า ผักตบชวามีองค์ประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ในปริมาณค่อนข้างสูง ซึ่งมีศักยภาพเพียงพอที่จะนำมาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตแก้วได้

แก้วบอโรซิลิเกต (Borosilicate glass) เป็นชนิดของแก้วที่มีความสำคัญอย่างมากในชีวิตประจำวันและงานอุตสาหกรรม เนื่องจากมีโครงสร้างที่มีพันธะร่างแหที่แข็งแรง ส่งผลให้มีสมบัติเด่นคือ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำ (Low Coefficient of Thermal Expansion) ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน (Thermal Shock Resistance) และมีความทนทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมีสูง จึงนิยมนำมาผลิตเป็นภาชนะทนความร้อน เครื่องแก้ววิทยาศาสตร์ บรรจุกัมมันตยา รวมถึงส่วนประกอบในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และพลังงานแสงอาทิตย์ [4] การพัฒนาสูตรแก้วบอโรซิลิเกตจากวัสดุเหลือใช้จึงเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์พร้อมกับแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อม

เพื่อให้แก้วที่สังเคราะห์ได้มีความสวยงามและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานศิลปะหรือผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์ได้ดียิ่งขึ้น การเติมสารเจือปน (Dopant) ในกลุ่มออกไซด์ของโลหะทรานซิชันจึงเป็นขั้นตอนที่สำคัญ โดยเฉพาะการใช้คอปเปอร์ออกไซด์ (Copper (II) oxide: CuO) ซึ่งเมื่อละลายอยู่ในโครงสร้างร่างแหของแก้ว จะทำหน้าที่เป็นตัวให้สี (Colorant) โดยไอออน Cu^{2+} จะดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นสีแดงและส้ม ทำให้แก้วปรากฏเป็นสีฟ้าหรือสีน้ำเงินอมเขียวที่มีความสวยงามเป็นเอกลักษณ์ นอกจากสมบัติด้านความงามแล้ว แก้วที่เจือด้วยทองแดงยังมีแนวโน้มที่จะมีสมบัติทางแสงที่ดีและมีฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรียในบางสภาวะ ซึ่งเหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์แก้วมูลค่าสูงในอนาคต [5-9]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสังเคราะห์แก้วสีฟ้าจากผักตบชวาแม่น้ำนครชัยศรี โดยกระบวนการวิจัยเริ่มต้นจากการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการออกแบบส่วนผสมและกระบวนการหลอมเพื่อขึ้นรูปแก้วตัวอย่าง จากนั้นจึงทำการศึกษาผลของการเจือคอปเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ และทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ค่าความหนาแน่นและค่าดัชนีหักเหแสง และสมบัติทางแสง ได้แก่ พฤติกรรมการดูดกลืนแสงและค่าฟลักตัส เพื่อประเมินศักยภาพในการนำไปใช้งานจริง

2. วิธีการทดลอง

การศึกษานี้มุ่งเน้นการยกระดับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรสู่ผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์ที่มีมูลค่าสูงขึ้น โดยการนำผักตบชวาจากแหล่งน้ำในเขตลุ่มน้ำนครชัยศรีมาประยุกต์ใช้เป็นวัตถุดิบต้นน้ำสำหรับการผลิตแก้ว ขั้นตอนเริ่มต้นจากการวิเคราะห์สัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีของผักตบชวากับเทคนิค Energy Dispersive X-ray Fluorescence (EDXRF) ผ่านเครื่องสเปกโตรมิเตอร์รุ่น Minipal-4 (Panalytical) เพื่อนำผลที่ได้มาออกแบบสูตรผสมในระบบแก้วให้มีความเหมาะสม โดยเน้นการใช้สารสกัดจากผักตบชวาเป็นส่วนประกอบหลักในการเตรียมสารตั้งต้น จากนั้นจึงนำส่วนผสมทั้งหมดเข้าสู่กระบวนการหลอมละลายในเตาไฟฟ้า ณ อุณหภูมิสูง 1,200 องศาเซลเซียส จนวัสดุหลอมรวมเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสมบูรณ์ในขั้นตอนการขึ้นรูป ชิ้นงานจะถูกเตรียมด้วยเทคนิคการทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว (Quenching) โดยการเทลงบนแม่พิมพ์แกรไฟต์ และนำไปผ่านกระบวนการอบคืนตัว (Annealing) ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เพื่อปรับปรุงโครงสร้างภายในและลดความเครียดของเนื้อวัสดุ ก่อนจะปล่อยให้เย็นตัวลงตามธรรมชาติจนถึงอุณหภูมิห้อง เมื่อได้ชิ้น

ตัวอย่างแก้วแล้ว จะดำเนินการขัดแต่งพื้นผิวให้ได้มีมาตรฐานขนาด $1.0 \times 1.5 \times 0.3$ ลูกบาศก์เซนติเมตร เพื่อนำไปทดสอบคุณลักษณะเฉพาะในเชิงลึก ซึ่งครอบคลุมทั้งการประเมินสมบัติทางกายภาพพื้นฐาน เช่น ค่าความหนาแน่นและปริมาตรเชิงโมล ตลอดจนการวิเคราะห์สมบัติทางแสงผ่านการวัดดัชนีหักเห พฤติกรรมการดูดกลืนรังสีในย่านสเปกตรัมต่างๆ และการวิเคราะห์ค่าสีตามระบบมาตรฐาน CIE $L^*a^*b^*$ เพื่อทำความเข้าใจถึงผลกระทบเชิงโครงสร้างและพฤติกรรมทางทัศนศาสตร์ที่เกิดจากการเจือสารคอปเปอร์ออกไซด์ลงในโครงสร้างแก้วที่พัฒนาขึ้นจากวัสดุธรรมชาติอย่างเป็นระบบ

3. ผลการวิจัย

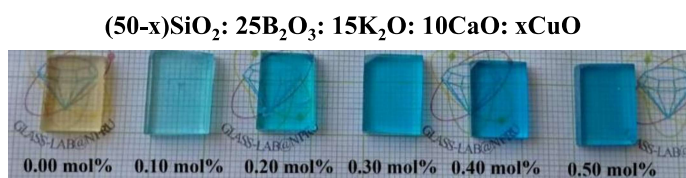
3.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผักตบชวา

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผักตบชวากับเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (EDXRF) ผ่านเครื่องสเปกโตรมิเตอร์รุ่น Minipal-4 (Panalytical) พบข้อมูลที่น่าสนใจว่า ผักตบชวาประกอบด้วยสารสำคัญอย่าง K_2O และ CaO ในปริมาณสูง ซึ่งมีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับใช้ทดแทนสารเคมีบริสุทธิ์ในกลุ่มตัวปรับเปลี่ยนโครงสร้างแก้ว (Network Modifiers) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยเหตุนี้ ในการวิจัยจึงได้กำหนดสูตรผสมโดยใช้ผักตบชวาเป็นสารตั้งต้นหลักเพื่อทำหน้าที่แทน CaO และ K_2O โดยตรง นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ยังแสดงให้เห็นถึงการมีอยู่ของออกไซด์ของโลหะทรานซิชันในปริมาณที่มีนัยสำคัญ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อสมบัติทางทัศนศาสตร์และพฤติกรรมการดูดกลืนแสงของเนื้อแก้วที่สังเคราะห์ขึ้น สารประกอบเหล่านี้ประกอบด้วยเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) และแมงกานีสออกไซด์ (MnO) โดยรายละเอียดขององค์ประกอบทางเคมีทั้งหมดที่ตรวจพบในผักตบชวาสำหรับงานวิจัยครั้งนี้ ได้แสดงข้อมูลไว้อย่างครบถ้วนในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างผักตบชวา

สารประกอบ	SiO_2	P_2O_5	K_2O	CaO	MnO	Fe_2O_3	CuO	ZnO
ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	2.34	4.18	55.31	36.31	0.93	0.89	0.03	0.03

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผักตบชวาได้ถูกนำมาใช้เป็นบรรทัดฐานสำคัญในการคำนวณและออกแบบโครงสร้างระบบแก้ว โดยใช้ข้อมูลจากพืชชนิดนี้เป็นแหล่งวัตถุดิบหลักในการเตรียม K_2O และ CaO ภายใต้สูตรโครงสร้าง $(50-x)SiO_2 \cdot 25B_2O_3 \cdot 15CaO \cdot 10K_2O \cdot xCuO$ ร้อยละโดยโมล โดยกำหนดให้ x คือความเข้มข้นของคอปเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในการศึกษาที่ระดับ 0.0 0.1 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 ร้อยละโดยโมล ตามลำดับ จากการเตรียมแก้วตัวอย่างพบว่า แก้วในกลุ่มควบคุมที่ปราศจากการเติม CuO ($x = 0.0$) มีลักษณะโปร่งใสแต่ติดโทนสีเหลืองอ่อน ซึ่งเป็นผลโดยตรงจากอิทธิพลของสารประกอบโลหะทรานซิชันที่พบตามธรรมชาติในผักตบชวา ได้แก่ เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) และแมงกานีสออกไซด์ (MnO) อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) เข้าสู่ระบบพบว่าลักษณะทางกายภาพของแก้วตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงของโทนสีไปสู่สีฟ้าที่เข้มข้นยิ่งขึ้นได้ชัดเจนตามสัดส่วนการเจือที่เพิ่มสูงขึ้น ดังที่แสดงในภาพที่ 1



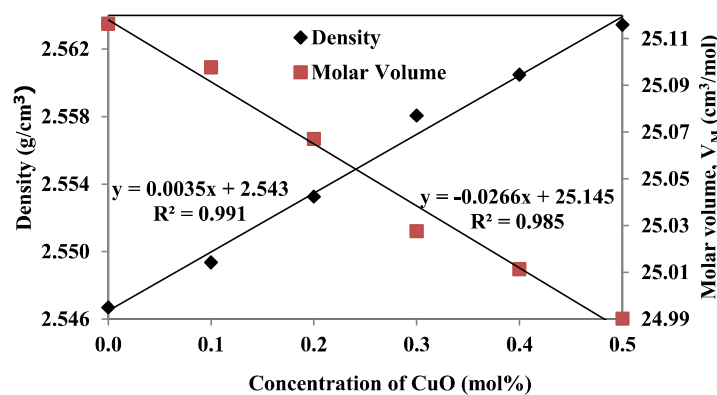
ภาพที่ 1 แก้วตัวอย่างที่เจือ CuO ในความเข้มข้นที่ต่างกัน

3.2 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่น ปริมาตรเชิงโมล และดัชนีหักเห

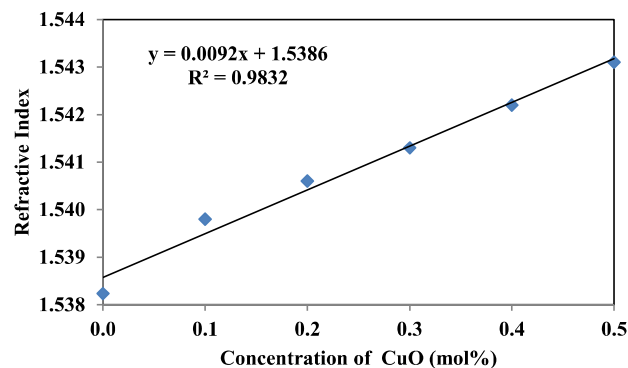
จากการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของแก้วตัวอย่างที่เตรียมจากผักตบชวาเจือด้วย CuO ที่มีความเข้มข้น 0.0 0.1 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 ร้อยละโดยโมล พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของ CuO ส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น และปริมาตรเชิงโมล อย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจาก 2.5467 ± 0.0001 ถึง 2.5634 ± 0.0001 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร การที่ความหนาแน่นของแก้วมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ผักตบชวาแทนที่ CaO และ K₂O สามารถอธิบายได้ด้วยปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีและการจัดเรียงตัวของโครงข่ายแก้วในระดับโมเลกุล โดยแม้ว่าผักตบชวาจะถูกนำมาใช้เพื่อเป็นแหล่งของสารประกอบกลุ่มตัวปรับเปลี่ยนโครงสร้างแก้ว (Network Modifiers) อย่าง K₂O และ CaO แต่จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDXRF กลับพบว่าในผักตบชวามีสารประกอบที่มีมวลอะตอมสูงอย่างเหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃) ปนเปื้อนอยู่ร้อยละ 0.89 โดยน้ำหนัก ซึ่งการแทนที่สารเคมีบริสุทธิ์ด้วยวัสดุธรรมชาติที่มีมวลโมเลกุลเฉลี่ยรวมสูงขึ้น ย่อมส่งผลโดยตรงให้ค่าความหนาแน่นของแก้วขยับสูงขึ้นตามลำดับ นอกจากนี้ ในเชิงทัศนศาสตร์ โครงสร้าง ไอออนของทองแดง (Cu²⁺) มักเข้าไปทำหน้าที่เป็นตัวปรับเปลี่ยนโครงสร้างแก้ว (Network modifier) ซึ่งจะเข้าไปแทรกตัวอยู่ตามช่องว่างของโครงข่ายซิลิเกตและโบเรตที่ได้จากผักตบชวา การแทรกตัวดังกล่าวช่วยเพิ่มมวลรวมของแก้วต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรให้สูงขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นของแก้วเพิ่มขึ้นตามหลักการทางฟิสิกส์พื้นฐาน ในทางกลับกันค่าปริมาตรเชิงโมลกลับแสดงแนวโน้มที่ลดลงอย่างชัดเจนจาก 25.1163 ถึง 24.9901 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล ดังรายละเอียดในตารางที่ 2 พฤติกรรมนี้สะท้อนถึงการเกิดกระบวนการหดตัวของโครงข่ายแก้วซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตและขนาดของไอออน เมื่อไอออน Cu²⁺ เข้าไปในโครงข่ายแก้ว มันจะสร้างพันธะกับออกซิเจนในโครงข่ายและดึงดูดออกซิเจนรอบข้างให้เข้ามาใกล้กันมากขึ้นเพื่อรักษาสภาพความเป็นกลางทางไฟฟ้า ส่งผลให้ระยะห่างระหว่างไอออนเฉลี่ยลดลง การที่มวลเพิ่มขึ้นในขณะที่ปริมาตรส่วนเกินภายในโครงข่ายลดลง จึงเป็นเหตุผลทางวิทยาศาสตร์ที่ชัดเจนว่าทำไมการเติม CuO จึงส่งผลให้แก้วมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นแต่มีปริมาตรเชิงโมลลดลงในลักษณะแปรผกผันกันอย่างเป็นระบบ ตามหลักการการจัดเรียงตัวของอะตอมในวัสดุอสัณฐาน ดังภาพที่ 2 ในส่วนของสมบัติทางแสงจากการวิเคราะห์ค่าดัชนีหักเห พบว่าการเติม CuO ส่งผลโดยตรงให้ค่าดัชนีหักเหมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจาก 1.5382 ± 0.0001 ถึง 1.5431 ± 0.0000 ดังแสดงในตารางที่ 2 ค่าดัชนีหักเหของวัสดุจะแปรผันตรงกับค่าความหนาแน่นของเนื้อวัสดุเมื่อโครงข่ายแก้วมีความหนาแน่นมากขึ้น อะตอมจะอยู่ชิดกันส่งผลให้มีจำนวนอิเล็กตรอนต่อหน่วยปริมาตรเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งอิเล็กตรอนเหล่านี้จะทำอันตรกิริยากับคลื่นแสงที่เดินทางผ่านเข้ามา ทำให้ความเร็วของแสงในตัวกลางลดลงและเกิดการหักเหที่สูงขึ้นในที่สุด การเติม CuO เข้าไปในโครงข่ายแก้วที่สังเคราะห์จากผักตบชวาจะส่งผลต่อการเกิดออกซิเจนที่ไม่มีพันธะเชื่อมโยง (Non-bridging oxygens: NBOs) ซึ่งไอออนของทองแดง (Cu²⁺) จะเข้าไปทำหน้าที่เป็นตัวปรับเปลี่ยนโครงสร้าง (Network modifier) ทำให้พันธะที่แข็งแรงของ Si-O-Si หรือ B-O-B ขาดออกและเปลี่ยนเป็น Si-O⁻ หรือ B-O⁻ ซึ่งออกซิเจนในลักษณะ NBOs นี้มีค่าสภาพขั้วได้ที่สูงกว่าออกซิเจนที่มีพันธะเชื่อมโยง (Bridging oxygens: BOs) มาก เนื่องจากอิเล็กตรอนวงนอกถูกยึดเหนี่ยวไว้หลวมกว่า จึงสามารถตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าของคลื่นแสงได้ง่ายกว่า ดังนั้น การเพิ่มขึ้นของดัชนีหักเหในแก้วจากผักตบชวาเมื่อเติม CuO จึงเป็นผลลัพธ์รวมจากการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นมวล การเพิ่มสัดส่วนของ NBOs ที่มีสภาพขั้วได้สูง และการจัดเรียงตัวของโครงข่ายที่อัดตัวกันแน่นขึ้นตามทฤษฎีทางวัสดุศาสตร์และทัศนศาสตร์เชิงโครงสร้างอย่างชัดเจน ปรากฏดังภาพที่ 3

ตารางที่ 2 ค่าความหนาแน่น ค่าปริมาตรเชิงโมล และค่าดัชนีหักเหของแก้วที่เติม CuO ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของ CuO (ร้อยละโดยโมล)	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	ดัชนีหักเห	ปริมาตรเชิงโมล (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล)
0.0	2.5467 ± 0.0001	1.5382 ± 0.0001	25.1163
0.1	2.5493 ± 0.0001	1.5398 ± 0.0000	25.0977
0.2	2.5532 ± 0.0000	1.5406 ± 0.0000	25.0670
0.3	2.5581 ± 0.0001	1.5413 ± 0.0000	25.0275
0.4	2.5605 ± 0.0001	1.5422 ± 0.0000	25.0114
0.5	2.5634 ± 0.0001	1.5431 ± 0.0000	24.9901



ภาพที่ 2 ค่าความหนาแน่น และค่าปริมาตรเชิงโมล ของแก้วที่เติม CuO ที่ความเข้มข้นต่างๆ



ภาพที่ 3 ค่าดัชนีหักเหของแก้วที่เติม CuO ที่ความเข้มข้นต่างๆ

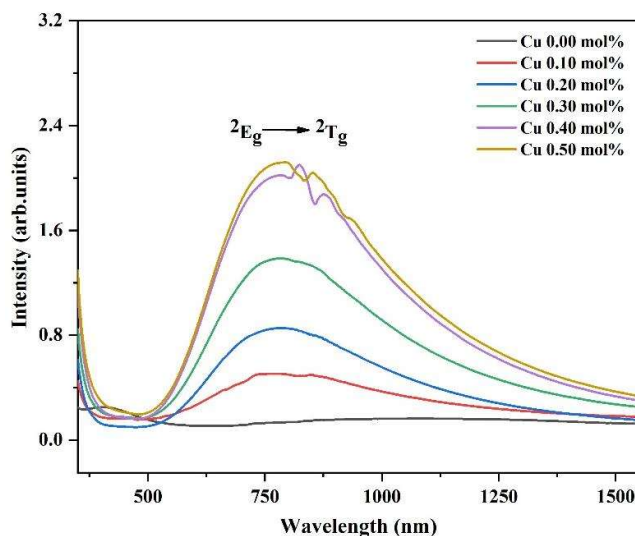
3.3 ผลการวิเคราะห์การดูดกลืนแสง และค่าสีในระบบ CIE L*a*b*

จากการวิเคราะห์สมบัติทางแสงของแก้วที่เตรียมจากผักตบชวาเมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของ CuO พบว่าลักษณะของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงมีพฤติกรรมที่แปรผันตามปริมาณสารเจืออย่างชัดเจน โดยปรากฏแถบการดูดกลืน

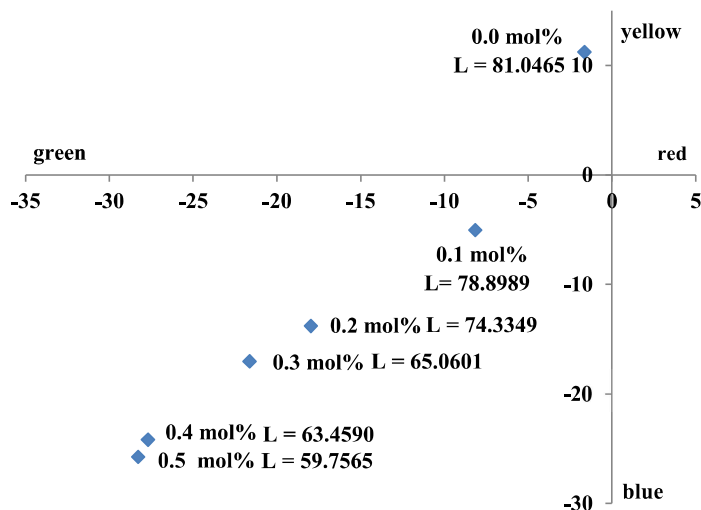
แสงกว้าง (Broad band) ในย่านแสงที่มองเห็นได้ไปจนถึงย่านอินฟราเรดใกล้ ซึ่งมีจุดสูงสุดของการดูดกลืนอยู่บริเวณความยาวคลื่นประมาณ 765 นาโนเมตร ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานจาก $^2E_g \rightarrow ^2T_g$ ดังแสดงในภาพที่ 4 ปรากฏการณ์นี้อธิบายได้ด้วยทฤษฎีสถานะผลึก และการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในวงโคจร d (d-d transition) ของไอออนคอปเปอร์ (Cu^{2+}) ที่ตำแหน่งทรงเหลี่ยมแปดหน้าซึ่งเกิดการบิดเบี้ยว (Distorted Octahedral) อันเนื่องมาจากปรากฏการณ์ Jahn-Teller Effect ส่งผลให้เกิดการดูดกลืนพลังงานแสงในย่านสีแดงและอินฟราเรด และยอมให้แสงในย่านสีฟ้าส่องผ่านได้ดีขึ้น โดยความเข้มของการดูดกลืนแสงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณ CuO ที่เพิ่มขึ้นจาก 0.00 เป็น 0.50 ร้อยละโดยโมล ซึ่งเป็นไปตามกฎของ Beer-Lambert พฤติกรรมการดูดกลืนแสงดังกล่าวนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของค่าสีในระบบมาตรฐานสากล CIE $L^*a^*b^*$ อย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าความสว่าง (L^*) มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องจาก 81.0465 ในแก้วที่ไม่เติม CuO จนเหลือ 59.7565 เมื่อเจือ CuO ที่ระดับ 0.50 ร้อยละโดยโมล ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแก้วมีความทึบแสงเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นของตัวดูดกลืนแสง ในขณะที่ค่า a^* มีค่าเป็นลบมากขึ้นเรื่อย ๆ จาก -1.6312 สู่ -27.6890 ซึ่งบ่งบอกถึงการเปลี่ยนเฉดสีไปในโทนสีฟ้า และค่า b^* มีการเปลี่ยนแปลงลดลงจาก 11.2125 เป็น -24.1784 ซึ่งเปลี่ยนไปทางสีฟ้า ดังแสดงในตารางที่ 3 การที่ค่าพิกัดสีเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางดังกล่าวสอดคล้องกับพฤติกรรมการดูดกลืนแสงในย่านความยาวคลื่นยาวที่เพิ่มขึ้น ทำให้ผลรวมทางทัศนศาสตร์ของแก้วปรากฏเป็นสีฟ้าที่เข้มขึ้นและมีความอิ่มตัวของสีมากขึ้นตามสัดส่วนการเจือ เหตุผลเชิงทฤษฎีที่รองรับการเปลี่ยนแปลงนี้คือการที่ไอออน Cu^{2+} เข้าไปทำหน้าที่เป็นสารให้สีในโครงสร้างแก้ว โดยเข้าไปจัดเรียงตัวในช่องว่างของโครงข่ายซิลิเกตที่ได้จากผกผันบวและเกิดอันตรกิริยากับสนามไฟฟ้าของลิแกนด์รอบข้าง ส่งผลให้เกิดการดูดกลืนแสงเฉพาะช่วงความยาวคลื่นที่ส่งผลต่อการรับรู้สีของผู้สังเกตอย่างเป็นระบบ ซึ่งเมื่อพิจารณาตำแหน่งพิกัดสีในปริภูมิสี (Color Space) พบว่าค่าพิกัดส่วนใหญ่ตกอยู่ในจุดภาค (Quadrant) ระหว่างแกน $-a^*$ และ $-b^*$ ส่งผลให้แก้วตัวอย่างที่เดิมมีลักษณะใสสีฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 5

ตารางที่ 3 ค่าสีของแก้วที่เติม CuO ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของ CuO (ร้อยละโดยโมล)	Color measurement		
	L^*	a^*	b^*
0.0	81.0465	-1.6312	11.2125
0.1	78.8989	-8.1502	-5.0450
0.2	74.3349	-17.9639	-13.7905
0.3	65.0601	-21.6250	-17.0216
0.4	63.4590	-28.2783	-25.7622
0.5	59.7565	-27.6890	-24.1784



ภาพที่ 4 สเปกตรัมการดูดกลืนของแก้วที่เติม CuO ที่ความเข้มข้นต่างๆ



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

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการสังเคราะห์แก้วเชิงหน้าที่โดยการยกระดับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรอย่างผักตบชวาจากกลุ่มน้ำนครชัยศรีมาเป็นวัตถุดิบหลักเพื่อทดแทนสารควบคุมโครงสร้างแก้วในกลุ่ม CaO และ K_2O โดยผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDXRF ยืนยันว่าผักตบชวามีสารประกอบสำคัญอย่าง K_2O และ CaO ในปริมาณที่สูงเพียงพอต่อการใช้เป็นสารตั้งต้นหลัก ร่วมกับการตรวจพบออกไซด์ของโลหะทรานสิชันอย่าง Fe_2O_3 และ MnO ที่มีอิทธิพลต่อสมบัติทางทัศนศาสตร์ตามธรรมชาติ ในด้านสมบัติทางกายภาพพบว่าการเพิ่มปริมาณ CuO ในระบบแก้วส่งผลให้ค่าความหนาแน่น และค่าดัชนีหักเหมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาตรเชิงโมลลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสะท้อนถึงการเกิดกระบวนการหดตัวของโครงสร้างแก้วที่ส่งผลให้โครงข่ายอัดตัวกันแน่นยิ่งขึ้น ค่าการดูดกลืนแสงปรากฏแถบการดูดกลืนกว้างในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 765 นาโนเมตร ผลการวัดค่าสีในระบบ CIE L*a*b* ที่ค่าความสว่าง (L*) ลดลง และค่าความเป็นสีฟ้า (b*) ที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างมี

