

แก้วสีอำพันจากแก้วใบบอ้ยโรงงานน้ำตาลที่เจือเหล็ก (III) ออกไซด์

ภัทรพร แสงคำ², ภูริชญา หิตชนะ^{1,2} และ ณัฐพล ศรีสิทธิโกกุล^{1,2*}

¹สาขาวิชาวัสดุและอุปกรณ์การแพทย์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม, นครปฐม

²ศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางด้านแก้วและวัสดุศาสตร์, นครปฐม

*nattapon2004@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและศึกษาอิทธิพลของการเจือเหล็ก (III) ออกไซด์ ในความเข้มข้นร้อยละ 0.0 – 0.5 โดยโมล ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและทางแสงของแก้วที่เตรียมจากแก้วใบบอ้ยโรงงานน้ำตาล โดยใช้แก้วใบบอ้ยโดยมีองค์ประกอบหลักเป็น SiO_2 และ CaO อยู่ประมาณร้อยละ 66.77 และ 17.26 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ มาใช้เป็นสารตั้งต้นแทน SiO_2 และ CaO ในสูตรแก้ว ตัวอย่างแก้วถูกหลอมด้วยเทคนิคเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส และขึ้นรูปด้วยการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว ผลการศึกษาพบว่า เมื่อความเข้มข้นของ Fe_2O_3 เพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นและดัชนีหักเหของแก้วมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วง 2.8756 – 2.8846 g/cm^3 และ 1.5703 – 1.5761 ตามลำดับ เนื่องจาก Fe_2O_3 มีมวลโมเลกุลสูงและส่งผลต่อสภาพการเกิดข้อของโครงสร้างแก้ว ในขณะที่ปริมาตรเชิงโมลเพิ่มขึ้นสะท้อนถึงการขยายตัวของโครงสร้างเครือข่ายแก้วจากการเพิ่มขึ้นของออกซิเจนที่ตำแหน่งไม่เชื่อมต่อ สำหรับสมบัติทางแสง สเปกตรัมการดูดกลืนแสงปรากฏพีคในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 1,050 nm ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในสถานะ $^5\text{T}_{2g}$ ไปยังสถานะกระตุ้น $^5\text{E}_g$ ของไอออน Fe^{2+} ส่งผลให้แก้วเปลี่ยนจากใสไม่มีสีเป็นสีเหลืองอมน้ำตาลและมีความเข้มมากขึ้นตามปริมาณสารเจือ เมื่อวิเคราะห์ค่าสีในระบบ CIE $L^*a^*b^*$ พบว่าแก้วที่เจือ Fe_2O_3 ร้อยละ 0.1 โดยโมล มีพิกัดสี ($L^* = 78.23$, $a^* = -5.63$, $b^* = 15.11$) ที่ใกล้เคียงกับค่าสีของอำพันในธรรมชาติจากฐานข้อมูลสถาบันอัญมณีศาสตร์สากล (IGS) งานวิจัยนี้จึงยืนยันถึงศักยภาพของแก้วใบบอ้ยในการนำมาพัฒนาเป็นอัญมณีประดิษฐ์และวัสดุกรองแสงเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

คำสำคัญ: แก้ว สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางแสง ขี้เถ้าใบบอ้ย เหล็ก (III) ออกไซด์

Amber Glass from Sugar Factory Sugarcane Leaf Ash Doped with Iron (III) Oxide

Pattraporn Saengka², Phurichaya Hitchana^{1,2} and Nattapon Srisittipokakun^{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

*nattapon2004@gmail.com

Abstract

This research aims to develop and investigate the influence of iron (III) oxide doping, at concentrations of 0.0 – 0.5 mol%, on the physical and optical properties of glass prepared from sugar factory sugarcane leaf ash. Sugarcane leaf ash, primarily composed of SiO_2 and CaO at approximately 66.77% and 17.26% by weight, respectively, was utilized as a precursor to replace SiO_2 and CaO in the glass formulation. The glass samples were melted using an electric furnace at $1,200^\circ\text{C}$ and formed via a rapid quenching technique. The results indicated that as Fe_2O_3 concentration increased, the density and refractive index of the glass showed a continuous upward trend, ranging from $2.8756 - 2.8846 \text{ g/cm}^3$ and $1.5703 - 1.5761$, respectively. This is due to the high molecular weight of Fe_2O_3 and its effect on the atomic polarizability of the glass structure. Meanwhile, the increase in molar volume reflects the expansion of the glass network structure (network expansion) resulting from the increase of non-bridging oxygens (NBOs). Regarding optical properties, the absorption spectra exhibited a peak at a wavelength of approximately 1,050 nm, caused by the electronic transition from the $^5\text{T}_{2g}$ ground state to the $^5\text{E}_g$ excited state of Fe^{2+} ions. This caused the glass to change from transparent and colorless to a brownish-yellow color, which intensified with increasing dopant concentration. Color analysis in the CIE $L^*a^*b^*$ system revealed that glass doped with 0.1 mol% Fe_2O_3 had color coordinates ($L^* = 78.23$, $a^* = -5.63$, $b^* = 15.11$) similar to the color of natural amber based on the International Gem Society (IGS) database. This research confirms the potential of sugarcane leaf ash for development into synthetic gemstones and optical filter materials to add value to agricultural waste.

Keywords: Glass, Physical Properties, Optical Properties, Sugarcane Leaf Ash, Iron(III) Oxide

1. บทนำ

อุตสาหกรรมแก้วและกระจกในปัจจุบันถือเป็นอุตสาหกรรมที่มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อการขับเคลื่อนเศรษฐกิจโลก โดยมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่องเพื่อรองรับภาคการก่อสร้าง อุตสาหกรรมยานยนต์ และบรรจุภัณฑ์ จากรายงานการวิเคราะห์

ตลาดโลกพบว่าความต้องการผลิตภัณฑ์แก้วยังคงเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม กระบวนการผลิตแก้วแบบดั้งเดิมจำเป็นต้องใช้พลังงานความร้อนสูงและใช้วัตถุดิบจากธรรมชาติจำนวนมาก โดยเฉพาะทรายซิลิกา (Silica sand) ซึ่งเป็นทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไป สถานการณ์ดังกล่าวส่งผลให้ผู้ประกอบการและนักวิจัยทั่วโลกหันมาให้ความสำคัญกับแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) และการพัฒนาวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Eco-friendly materials) โดยมุ่งเน้นการนำของเสียจากภาคเกษตรหรืออุตสาหกรรมกลับมาใช้เป็นวัตถุดิบปฐมภูมิ เพื่อลดต้นทุนการผลิตและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน [1]

ในประเทศไทย โดยเฉพาะพื้นที่ภาคกลางและภาคตะวันตก นับเป็นแหล่งเพาะปลูกอ้อยที่สำคัญที่สุดของประเทศ ข้อมูลจากสำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทรายระบุว่า ประเทศไทยมีปริมาณอ้อยเข้าหีบหลายสิบล้านตันต่อปี ซึ่งกระบวนการเก็บเกี่ยวอ้อยในปัจจุบันยังคงประสบปัญหาการขาดแคลนแรงงานและเครื่องจักรที่ไม่เพียงพอ ส่งผลให้เกษตรกรจำนวนมากเลือกใช้วิธีการเผาใบอ้อยก่อนการเก็บเกี่ยวเพื่อความสะดวกรวดเร็ว การกระทำดังกล่าวไม่เพียงแต่ทำลายโครงสร้างดิน แต่ยังก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ โดยเฉพาะฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) ที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพและระบบทางเดินหายใจของประชาชนในวงกว้าง รวมถึงสร้างปัญหาสิ่งแวดล้อมในระดับมหภาคที่ภาครัฐต้องเร่งหาแนวทางแก้ไข ด้วยการเพิ่มมูลค่าให้กับใบอ้อยเหลือทิ้งเหล่านี้ [2]

แก้วบอโรซิลิเกต (Borosilicate glass) เป็นประเภทของแก้วที่มีความสำคัญในเชิงพาณิชย์และอุตสาหกรรม เนื่องจากมีสมบัติเด่นในด้านสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำ (Low coefficient of thermal expansion) ทำให้มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน (Thermal shock resistance) และมีความคงทนทางเคมีสูง ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้ แก้วบอโรซิลิเกตจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในชีวิตประจำวันและงานเฉพาะทาง เช่น ภาชนะเครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ เครื่องแก้วในครัวเรือนที่สามารถนำเข้าเตาอบได้ ไปจนถึงบรรจุภัณฑ์สำหรับเภสัชภัณฑ์ ซึ่งการพัฒนาสูตรแก้วชนิดนี้โดยใช้วัสดุทดแทนซิลิกาจากธรรมชาติจึงเป็นความท้าทายทางวิชาการที่น่าสนใจ [3]

แม้ว่าในปัจจุบันจะมีการศึกษาการนำขี้เถ้าแกลบมาพัฒนาเป็นแก้วกันอย่างแพร่หลาย แต่การวิจัยเกี่ยวกับการใช้ "เถ้าใบอ้อย" เป็นสารตั้งต้นหลักในการผลิตแก้วยังมีจำนวนจำกัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งการศึกษาผลกระทบของการเจือเหล็ก (III) ออกไซด์ (Fe_2O_3) ลงในแก้วเมทริกซ์ที่เตรียมจากขี้เถ้าใบอ้อย เป็นสารเจือปนสามารถทำให้เกิดสีได้ทั้งโทนสีเขียวและสีอำพัน ขึ้นอยู่กับสภาวะบรรยากาศในการหลอมและปฏิกิริยารีดอกซ์ กระบวนการดังกล่าวมีความซับซ้อนกว่าแก้วทั่วไปเนื่องจากขี้เถ้าใบอ้อยมักมีสิ่งเจือปนอื่น ๆ (Impurities) เช่น K_2O , CaO , และ P_2O_5 หลงเหลืออยู่ ซึ่งสิ่งเจือปนเหล่านี้อาจส่งผลต่อความหนาแน่น ค่าดัชนีหักเห และพฤติกรรมการดูดกลืนแสงของ Fe^{2+} ในรูปแบบที่ไม่เหมือนกับแก้วสังเคราะห์บริสุทธิ์ โดยแก้วที่เจือด้วยเหล็ก (III) ออกไซด์ เริ่มมีการศึกษาผลกระทบต่อสมบัติต่าง ๆ เพิ่มมากขึ้น [4-8]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาอิทธิพลของการเจือเหล็ก (III) ออกไซด์ ในอัตราส่วนต่างๆ ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพ (ความหนาแน่นและปริมาตรโมลาร์) และสมบัติทางแสงของแก้วฐานเถ้าใบอ้อย ซึ่งมีความซับซ้อนกว่าการใช้สารเคมีเป็นอย่างมาก การศึกษานี้จะช่วยยืนยันศักยภาพของการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาแปรรูปเป็นวัสดุวิศวกรรมขั้นสูง สร้างองค์ความรู้ใหม่เกี่ยวกับโครงสร้างแก้วจากชีวมวล และนำไปสู่การพัฒนาผลิตภัณฑ์แก้วสีเพื่อประยุกต์ใช้เป็นอัญมณีประดิษฐ์ หรือใช้ในการตกแต่ง หรือใช้เป็นแก้วกรองแสงที่มีเอกลักษณ์เฉพาะตัว อันเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มและส่งเสริมความยั่งยืนให้กับห่วงโซ่อุปทานของอุตสาหกรรมอ้อยและวัสดุศาสตร์ไทย

2. วิธีการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้นำขี้เถ้าใบอ้อยจากโรงงานน้ำตาลมาใช้เป็นองค์ประกอบในการทำแก้ว โดยทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุในขี้เถ้าใบอ้อยด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์รังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Fluorescence-EDXRF) ของบริษัท Panalytical รุ่น Minipal-4 แล้วใช้ข้อมูลดังกล่าวในการออกแบบสูตรแก้วต่อไป ผู้วิจัยจึงได้ทำการออกแบบสูตรแก้วโดยใช้ขี้เถ้าใบอ้อยแทนสาร CaO และ SiO_2 จากนั้นนำเข้าไปหลอมในเตาหลอมไฟฟ้าที่อุณหภูมิ

1,200 องศาเซลเซียส จากนั้นนำแก้วหลอมออกจากเตาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง 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 CIE $L^*a^*b^*$

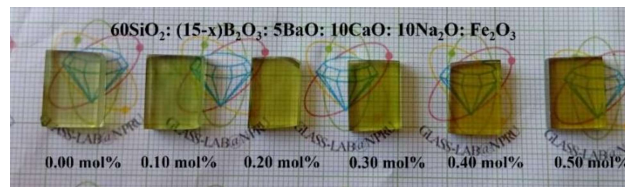
3. ผลการวิจัย

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์แก้วโดยใช้เครื่องมือสเปกโตรมิเตอร์รังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Fluorescence-EDXRF) ของบริษัท Panalytical รุ่น Minipal-4 จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างซีเมนต์แก้วมีองค์ประกอบหลักเป็น SiO_2 , CaO อยู่ประมาณร้อยละ 66.77 และ 17.26 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ อีกทั้งองค์ประกอบของธาตุเจือปนที่ส่งผลต่อสีที่สำคัญ คือ Fe_2O_3 และ MnO มี ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างซีเมนต์แก้ว

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

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างซีเมนต์แก้ว ผู้วิจัยจึงได้ทำการออกแบบสูตรแก้วโดยใช้ซีเมนต์แก้ว แทนสาร SiO_2 ตามอัตราส่วนของสารดังนี้ $60\text{SiO}_2 : (15-x)\text{B}_2\text{O}_3 : 5\text{BaO} : 10\text{CaO} : 10\text{Na}_2\text{O} : x\text{Fe}_2\text{O}_3$ ร้อยละโดยโมล เมื่อ x คือ ความเข้มข้นของเหล็ก (III) ออกไซด์ จากการหลอมแก้วที่เจือสารให้สี Fe_2O_3 ที่มีความเข้มข้น 0.0 0.1 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 ร้อยละโดยโมล แก้วตัวอย่างที่ไม่เติมออกไซด์ของ Fe_2O_3 มีลักษณะใสมีสีเหลืองอมน้ำตาล ซึ่งสีดังกล่าวจะมีความเข้มมากขึ้นเมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของออกไซด์ของ Fe_2O_3 มากขึ้น ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แก้วตัวอย่างที่เจือ Fe_2O_3 ในความเข้มข้นที่ต่างกัน

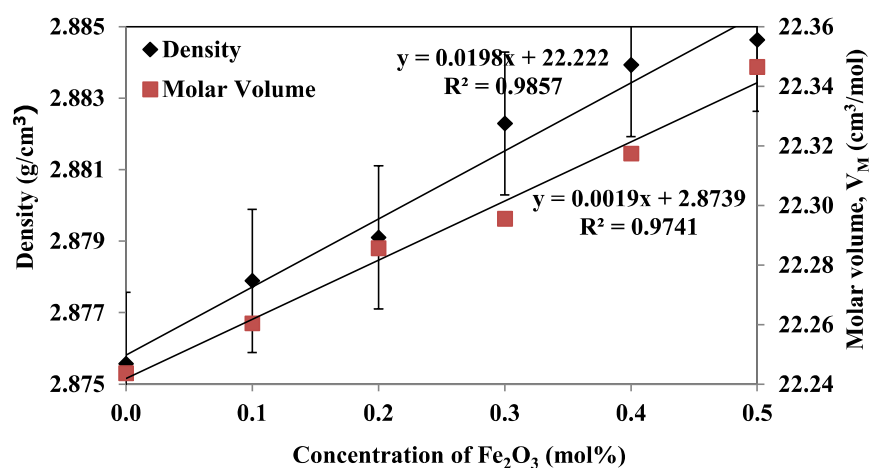
3.1 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่น ปริมาตรเชิงโมล และดัชนีหักเห

จากการวิเคราะห์หาความหนาแน่นของแก้วตัวอย่างที่เติมออกไซด์ของ Fe_2O_3 ที่มีความเข้มข้น 0.0 0.1 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 ร้อยละโดยโมล พบว่าค่าความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของ Fe_2O_3 ที่เพิ่มมากขึ้น โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 2.8756 ± 0.0002 ถึง 2.8846 ± 0.0002 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ทั้งนี้เนื่องจากออกไซด์ของ Fe_2O_3 ซึ่งมีมวลโมเลกุลมากกว่าเข้าไปแทนที่ออกไซด์ของ B_2O_3 ดังแสดงในตารางที่ 2 และเมื่อนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับความเข้มข้นของแก้วที่เติมออกไซด์ของ Fe_2O_3 สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2 โดยกราฟที่ได้มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9857 ส่วนค่าปริมาตรเชิงโมลมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของ Fe_2O_3 ที่เพิ่มมากขึ้น มีค่าอยู่ระหว่าง 22.2437 ถึง 22.3465 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล ดังแสดงในตารางที่ 2 นั้นสามารถสันนิษฐาน

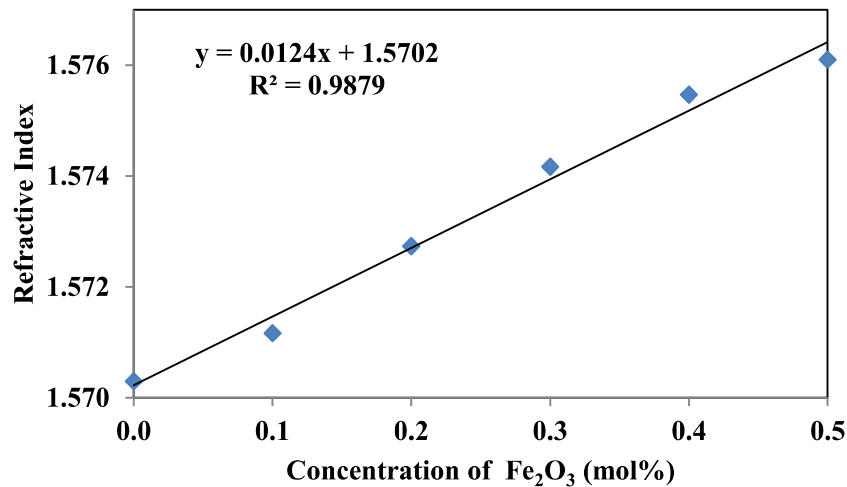
ได้ว่า Fe_2O_3 สะท้อนถึงการขยายตัวของโครงสร้างเครือข่ายแก้ว (Network expansion) ซึ่งมักเกิดจากการที่ไอออนของเหล็กเข้าไปขัดขวางหรือปรับเปลี่ยนโครงสร้างซิลิกา ทำให้เกิดช่องว่างในโครงสร้างมากขึ้น (Non-bridging oxygens - NBOs) ทำให้ระยะห่างระหว่างอะตอมมีขนาดกว้างขึ้น ส่งผลให้ระยะห่างระหว่างอะตอมในโครงสร้างแก้วขยายกว้างขึ้นในระดับจุลภาค ในงานวิจัยด้านวัสดุแก้วนั้นจะเรียกสารเคมีที่เติมลงในโครงสร้างแก้วแล้วทำให้ปริมาตรเชิงโมลของแก้วเปลี่ยนแปลงไปว่า Network modifier และเมื่อนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรเชิงโมลกับความเข้มข้นของแก้วที่เติมออกไซด์ของ Fe_2O_3 สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2 โดยกราฟที่ได้มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9741 จากการวิเคราะห์หาค่าดัชนีหักเหของแก้วตัวอย่าง พบว่าค่าดัชนีหักเหแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของ Fe_2O_3 ที่เพิ่มมากขึ้น มีค่าอยู่ระหว่าง 1.5703 ± 0.0000 ถึง 1.5761 ± 0.0000 ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยมีลักษณะเช่นเดียวกับความสัมพันธ์ของค่าความหนาแน่น เป็นไปตามทฤษฎีเป็นไปตามหลักทฤษฎีไดอิเล็กตริกแบบดั้งเดิม ซึ่งค่าดัชนีหักเหจะขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่น และสภาพการเกิดข้อได้ของอะตอมในวัสดุ และเมื่อนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหกับความเข้มข้นของแก้วที่เติม Fe_2O_3 ดังแสดงในภาพที่ 3 โดยกราฟที่ได้มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9879

ตารางที่ 2 ค่าความหนาแน่น ค่าปริมาตรเชิงโมล และค่าดัชนีหักเหของแก้วที่เติม Fe_2O_3 ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของ Fe_2O_3 (ร้อยละโดยโมล)	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	ดัชนีหักเห	ปริมาตรเชิงโมล (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล)
0.0	2.8756 ± 0.0002	1.5703 ± 0.0000	22.2437
0.1	2.8779 ± 0.0002	1.5712 ± 0.0001	22.2604
0.2	2.8791 ± 0.0001	1.5727 ± 0.0001	22.2856
0.3	2.8823 ± 0.0001	1.5742 ± 0.0001	22.2955
0.4	2.8839 ± 0.0001	1.5755 ± 0.0001	22.3174
0.5	2.8846 ± 0.0002	1.5761 ± 0.0000	22.3465



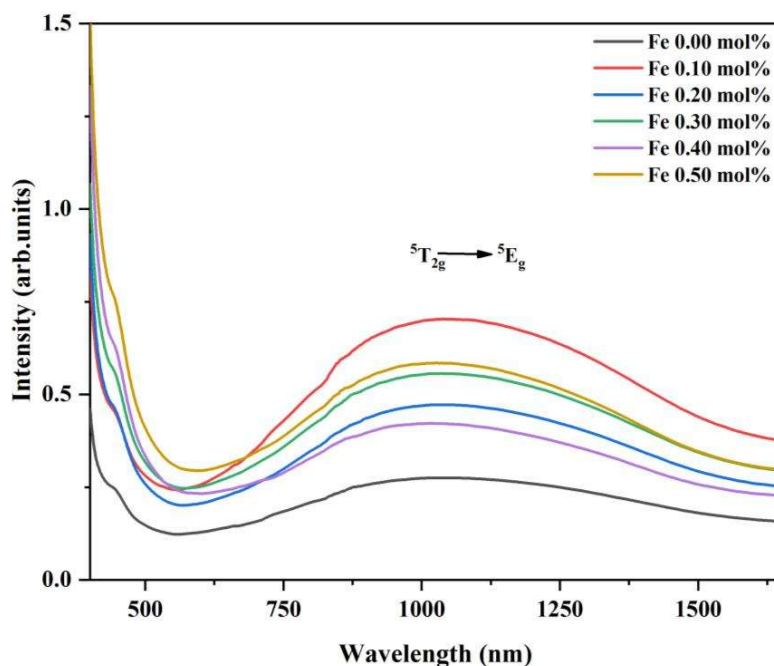
ภาพที่ 2 ค่าความหนาแน่น และค่าปริมาตรเชิงโมล ของแก้วที่เติม Fe_2O_3 ที่ความเข้มข้นต่างๆ



ภาพที่ 3 ค่าดัชนีหักเหของแก้วที่เติม Fe₂O₃ ที่ความเข้มข้นต่างๆ

3.2 ผลการวิเคราะห์การดูดกลืนแสง

จากการวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 200 - 2,100 นาโนเมตร ของแก้วตัวอย่างที่เจือด้วย Fe₂O₃ ในความเข้มข้น 0.0 0.1 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 ร้อยละโดยโมล พบพีคการดูดกลืนแสงเด่นชัดในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 1,050 นาโนเมตร ในย่านอินฟราเรดใกล้ (Near-Infrared; NIR) ดังแสดงในภาพที่ 4 ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนใน d-orbital จากสถานะพื้น (⁵T_{2g}) ไปยังสถานะกระตุ้น (⁵E_g) ของไอออนเหล็กในสถานะรีดิวซ์ Fe²⁺ ที่จัดเรียงตัวแบบแปดหน้า (Octahedral geometry) ตามทฤษฎีสถานะผลึก (Crystal Field Theory) โดยเมื่อไอออน Fe²⁺ ถูกล้อมรอบด้วยลิแกนด์ออกซิเจน (O²⁻) ในโครงสร้างแก้ว สนามไฟฟ้าจากลิแกนด์จะส่งผลให้ระดับพลังงาน d-orbital เกิดการแยกตัวออก (Ligand field splitting) ในช่วงความยาวคลื่นสั้น (ต่ำกว่า 500 นาโนเมตร) กราฟการดูดกลืนแสงมีการพุ่งสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากขอบการดูดกลืนมูลฐาน (Fundamental Absorption Edge) ซึ่งเกิดจากกระบวนการถ่ายโอนประจุ (Charge Transfer Transition) ระหว่างไอออนของออกซิเจนและไอออนเหล็กในสถานะออกซิเดชัน (Fe³⁺) คือ (O²⁻ → Fe³⁺) ร่วมกับการกระโดดของอิเล็กตรอนข้ามช่องว่างแถบพลังงาน (Band gap) จากแถบวาเลนซ์ (Valence band) ไปยังแถบคอนดักชัน (Conduction band) ของโครงสร้างแก้วการดูดกลืนแสงอย่างรุนแรงในช่วงความยาวคลื่นสั้นที่ทำให้แสงสีเหลืองและสีแดงสามารถส่องผ่านเนื้อแก้วได้มากกว่าปกติ ส่งผลให้แก้วปรากฏเป็นสีเหลืองอมน้ำตาลหรือสีอำพันอย่างชัดเจน โดยความเข้มของสีและความสามารถในการดูดกลืนแสงจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเจือ Fe₂O₃ ซึ่งสอดคล้องกับกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert Law) อย่างไรก็ตาม ความสูงของพีคการดูดกลืนแสงที่ 1,050 นาโนเมตร จะขึ้นอยู่กับสัดส่วนปริมาณไอออน Fe²⁺ ที่เกิดจากสมดุลปฏิกิริยารีดอกซ์ (Fe²⁺/Fe³⁺) ภายในโครงสร้างแก้วขณะทำการหลอมที่อุณหภูมิสูง [9]



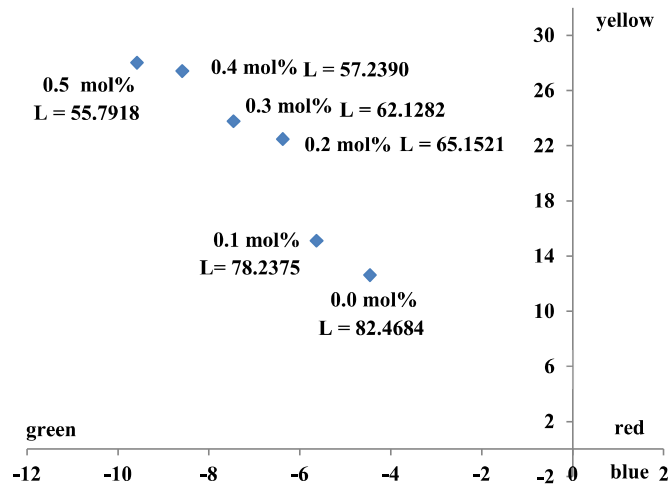
ภาพที่ 4 สเปกตรัมการดูดกลืนของแก้วที่เติม Fe_2O_3 ที่ความเข้มข้นต่างๆ

3.3 ผลการวิเคราะห์สีในระบบ CIE $L^*a^*b^*$

จากการวิเคราะห์สีในระบบ CIE $L^*a^*b^*$ ของแก้วตัวอย่างที่เติมออกไซด์ของ Fe_2O_3 ที่มีความเข้มข้น 0.0 0.1 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 ร้อยละโดยโมล พบว่าค่าความสว่าง (L^*) ขึ้นกับปริมาณความเข้มข้นของ Fe_2O_3 ที่เพิ่มขึ้น โดยค่า a^* จะมีค่าอยู่ระหว่าง -4.4580 ถึง -9.5815 ส่วนค่า b^* จะมีค่าอยู่ระหว่าง 12.6090 ถึง 28.0098 ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยค่าสีมีพิกัดอยู่ในแกน -a และ +b ซึ่งเป็นพิกัดของแกนสีเขียว และเหลือง แต่ค่าทางแกน +b มีค่ามากกว่าจึงทำให้แก้วตัวอย่างมีสีเหลืองอมน้ำตาล ดังแสดงในภาพที่ 5

ตารางที่ 3 ค่าสีของแก้วที่เติม Fe_2O_3 ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของ Fe_2O_3 (ร้อยละโดยโมล)	Color measurement		
	L^*	a^*	b^*
0.0	82.4684	-4.4580	12.6090
0.1	78.2375	-5.6330	15.1126
0.2	65.1521	-6.3757	22.4802
0.3	62.1282	-7.4587	23.7721
0.4	57.2390	-8.5867	27.4201
0.5	55.7918	-9.5815	28.0098



ภาพที่ 5 ค่าสีระบบ CIE L*a*b* ของแก้วที่เติม Fe_2O_3 ที่ความเข้มข้นต่างๆ

การเปรียบเทียบค่าสีของอำพันจริงในธรรมชาติกับแก้วที่พัฒนาขึ้น

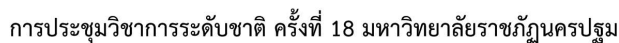
จากฐานข้อมูลค่าสีของอัญมณีในธรรมชาติของ The International Gem Society (IGS) [10] พบว่าอำพันจริงในธรรมชาติ นั้นมีสีออกเหลืองโดยมีค่า L^* อยู่ที่ประมาณ 75 ค่า a^* อยู่ที่ประมาณ -5.1 และ ค่า b^* อยู่ที่ประมาณ 13.2 ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าสีของแก้วตัวอย่างจากตารางที่ 3 พบว่าแก้วที่เติม Fe_2O_3 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยโมล มีค่า L^* อยู่ที่ 78.2375 ค่า a^* อยู่ที่ -5.6330 และ ค่า b^* อยู่ที่ 15.1126 มีค่าสีที่ใกล้เคียงกับอำพันจริงในธรรมชาติ และลักษณะทางกายภาพที่ความสอดคล้องกัน

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำเพื่อพัฒนาแก้วสีอำพันจากซีเถ้าไบออยโรงงานน้ำตาล โดยทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุในซีเถ้าไบออยด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์รังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน พบว่ามีปริมาณ SiO_2 และ CaO สูงถึงร้อยละ 66.77 และ 17.26 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จากนั้นใช้ข้อมูลดังกล่าวออกแบบสูตรแก้วในระบบ $60\text{SiO}_2: (15-x)\text{B}_2\text{O}_3: 5\text{BaO}: 10\text{CaO}: 10\text{Na}_2\text{O}: x\text{Fe}_2\text{O}_3$ ร้อยละโดยโมล เมื่อ x คือ ความเข้มข้นของ Fe_2O_3 (0.0 0.1 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 ร้อยละโดยโมล) แล้วทำการหลอมแก้วที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส จากการวิเคราะห์คุณสมบัติพบว่าแก้วตัวอย่างที่ไม่เติม Fe_2O_3 มีลักษณะใส มีสีเหลืองอมน้ำตาลจาง ๆ และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ Fe_2O_3 แก้วจะมีสีเข้มมากขึ้นจนเป็นสีอำพัน ค่าความหนาแน่นและดัชนีหักเหมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณ Fe_2O_3 ที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่าปริมาตรเชิงโมลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสะท้อนถึงการขยายตัวของโครงสร้างเครือข่ายแก้ว ในด้านสมบัติทางแสงพบว่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 1,050 นาโนเมตร เกิดจากการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอน Fe^{2+} จาก ${}^5\text{T}_{2g}$ ไปยังสถานะกระตุ้น ${}^5\text{E}_g$ ซึ่งเป็นการดูดกลืนแสงในช่วงสีแดงและอินฟราเรดใกล้ ทำให้สีของแก้วที่มองเห็นมีลักษณะเป็นสีเหลืองอมน้ำตาลหรือสีอำพัน โดยเฉพาะที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยโมล จะมีค่าสีใกล้เคียงกับอำพันจริงในธรรมชาติมากที่สุด

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ที่ให้การสนับสนุนงบรายได้จากมหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ประจำปีงบประมาณ 2569 ภายใต้โครงการวิจัยบูรณาการนักศึกษาและอาจารย์เพื่อการพัฒนาท้องถิ่นและความเป็นเลิศทางวิชาการ ปีงบประมาณ 2569



- [1] Grand View Research, (2023), Glass manufacturing market size, share & trends analysis report by product (flat glass, container glass), by application (construction, automotive, packaging), by region, and segment forecasts, 2023-2030
- [2] Pollution Control Department, (2024), Thailand's state of pollution report 2023: PM2.5 situation and agricultural burning, Ministry of Natural Resources and Environment.
- [3] Saengka, P., Srisittipokakun, N., Intachai, N. and Kothan, S., (2025), Study of Physical and Optical Properties of Sugarcane Leaf Ash Glass Dopes with Copper Oxide, Suranaree J. Sci. Technol, 32(4), 030340 (1-7)
- [4] Siddiq, H., Aljuraide, N.I., Almotawa, R.M., Abul-Magd, A.A., Alshamari, A., Almuniyif, A., (2025), Mössbauer investigation of the role of Pb²⁺ ions in tailoring the structural, dielectric, and shielding properties of Fe₂O₃/Li₂O doped vanadate glasses, Journal of Alloys and Compounds, 1044, 184374
- [5] Alsaif, N.A.M., Al-Ghamdi, H., Alfryyan, N., Higazy, K.S., Rammah, Y.S., Kaky, K.M., (2025), Lutetium barium tellurite silicate glass samples doped with Fe₂O₃: Fabrication, physical, structure, and radiation attenuation capacity, Optical Materials, 159, 116541
- [6] Khedr, A.A.F., Abul-Magd, A.A., (2025), Tuning the optical band gap and shielding efficiency of heavy metal borate glasses through controlled Fe₂O₃ doping, Optical Materials, 160, 116717.
- [7] McGlashan, A., Nelson, P.N., Prasad, P.S., Iezid, M., Goumeidane, F., Rajaramakrishna, R., (2024), Physical, thermal, optical, shielding and elastic properties of Bi₂O₃–B₂O₃–TeO₂ glass system doped with Fe₂O₃, Radiation Physics and Chemistry, 217, 111444
- [8] Usman, I., Sanusi, M.S.M., Ahmad, N.E., Shaharin, M.S.B., (2023). Structural and optical properties of tungsten-sodium-zinc-borate glass doped α -Fe₂O₃ nanoparticle, Ceramics International, 49(16), pp. 26256-26266
- [9] Sukenaga, S., Cicconi, M.R., Yamada, H., Wakihara, T., Ohara, K., Shibata, H., Neuville, D.R., (2024). Iron redox effect on the structure and viscosity of a sodium silicate glass and melt, Chemical Physics, 161(24), pp. 244503
- [10] The International Gem Society (IGS), Gemstone Color Measurements and Specifications, accessed April 11, 2023, from. <https://www.gemsociety.org/article/color-measurements-specification>