

อิทธิพลของไอออนแมงกานีสต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและทางแสงในแก้ว จากซีเถ้าไบออยของโรงไฟฟ้าชีวมวล

ณัฐพร มะหิงษา², ณัฐนิชา เครือวัลย์^{1,2} และ กীরติ เกิดศิริ^{1,2,*}

¹สาขาวิชาวัสดุและอุปกรณ์การแพทย์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม, นครปฐม

²ศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางด้านแก้วและวัสดุศาสตร์, นครปฐม

*watcharinratniyom601@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาอิทธิพลของไอออนแมงกานีสต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและทางแสงของแก้วที่สังเคราะห์จากซีเถ้าไบออยของโรงไฟฟ้าชีวมวล โดยใช้ซีเถ้าไบออยเป็นวัตถุดิบหลักเพื่อทดแทนสารเคมีบริสุทธิ์อย่างซิลิกา และแคลเซียมออกไซด์ จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค EDXRF พบว่าซีเถ้าไบออยมี SiO_2 และ CaO เป็นส่วนประกอบหลักร้อยละ 66.77 และ 17.26 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ แก้วตัวอย่างถูกเตรียมด้วยวิธีการหลอมที่อุณหภูมิ $1,200^\circ\text{C}$ และผ่านกระบวนการอบคืนตัวที่ 500°C ผลการทดสอบพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณแมงกานีสไดออกไซด์จากร้อยละ 0.0 ถึง 0.5 โดยโมล ค่าความหนาแน่นของแก้วมีแนวโน้มลดลงจาก 2.8756 ถึง 2.8501 g/cm^3 ในขณะที่ปริมาตรเชิงโมลเพิ่มขึ้นจาก 22.2437 ถึง $22.4892 \text{ cm}^3/\text{mol}$ ซึ่งสะท้อนถึงการขยายตัวของโครงสร้างแก้วจากการสร้างออกซิเจนที่ไม่เชื่อมต่อ (NBO) ในด้านสมบัติทางแสง ค่าดัชนีหักเหมีแนวโน้มลดลงจาก 1.5703 ถึง 1.5651 สอดคล้องกับความหนาแน่นตามทฤษฎี Lorentz-Lorenz สเปกตรัมการดูดกลืนแสงปรากฏแถบการดูดกลืนกว้างบริเวณความยาวคลื่น 500 nm ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนสถานะพลังงานจากสถานะพื้น $^5\text{E}_g$ ไปยังสถานะกระตุ้น $^5\text{T}_{2g}$ ของไอออน Mn^{3+} ส่งผลให้แก้วมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพจากสีเหลืองอมน้ำตาลในชุดควบคุมไปสู่โทนสีเหลืองอมน้ำตาลที่เข้มขึ้นขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ สอดคล้องกับการวิเคราะห์ค่าสีในระบบ CIE $L^*a^*b^*$ ที่พบว่าค่าความสว่าง (L^*) ลดลง ขณะที่ค่า b^* มีความเป็นบวกเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารเจือ สรุปได้ว่าซีเถ้าไบออยมีศักยภาพสูงในการนำมาพัฒนาเป็นวัสดุแก้วเชิงฟังก์ชันที่มีสมบัติทางทัศนศาสตร์เฉพาะตัวและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: แก้ว สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางแสง ซีเถ้าไบออย แมงกานีสไดออกไซด์



Influence of Manganese Ions on Physical and Optical Property of Glass made from Sugarcane Leaf Ash from Biomass Power Plants

Nattaporn Mahingsa ², Natchicha Kruewal^{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 investigates the influence of manganese ions on the physical and optical properties of glass synthesized from sugarcane leaf ash (SLA) obtained from biomass power plants. The SLA was utilized as the primary raw material to replace pure chemicals, specifically silica and calcium oxide. Chemical composition analysis via the EDXRF technique revealed that SLA contains SiO₂ and CaO as major constituents at 66.77% and 17.26% by weight, respectively. Glass samples were prepared using the melt-quenching method at 1,200°C, followed by an annealing process at 500°C. Experimental results indicated that increasing the concentration of manganese dioxide (MnO₂) from 0.0 to 0.5 mol% led to a decrease in glass density from 2.8756 to 2.8501 g/cm³, while the molar volume increased from 22.2437 to 22.4892 cm³/mol. This phenomenon reflects the expansion of the glass network due to the formation of non-bridging oxygen (NBO). Regarding optical properties, the refractive index showed a declining trend from 1.5703 to 1.5651, consistent with the density variations according to the Lorentz-Lorenz theory. The optical absorption spectra exhibited broad absorption bands centered around 500 nm, resulting from the ⁵E_g → ⁵T_{2g} electronic transition of Mn³⁺ ions. This led to a significant physical color transformation from the brownish-yellow observed in the control group to an intensified brownish-yellow hue. These findings align with the CIE L*a*b* color analysis, which showed a decrease in brightness (L*) and an increase in the b* value (yellowness) as the dopant concentration increased. In conclusion, sugarcane leaf ash demonstrates high potential as a sustainable alternative material for developing functional glass with unique optical properties and environmental benefits.

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

1. บทนำ

อุตสาหกรรมแก้วและกระจกถือเป็นหนึ่งในภาคการผลิตที่มีบทบาทสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจโลก โดยอุตสาหกรรมนี้มีการขยายตัวอย่างต่อเนื่องตามความต้องการในภาคของอุตสาหกรรมการก่อสร้าง ยานยนต์ และ บรรจุภัณฑ์

ภัณฑ์ จากรายงานการวิเคราะห์ตลาดโลกพบว่า มูลค่าตลาดการของอุตสาหกรรมการผลิตแก้วมีแนวโน้มเติบโตขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยได้รับแรงหนุนจากความต้องการวัสดุที่มีความยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [1] แต่อย่างไรก็ตาม อุตสาหกรรมนี้กำลังเผชิญกับความท้าทายด้านต้นทุนพลังงานและวัตถุดิบ โดยเฉพาะซิลิกาหรือทรายที่มีคุณภาพสูงนั้นต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งนำไปสู่กระแสการวิจัยและพัฒนาเพื่อค้นหาวัดุดิบทางเลือก (alternative materials) จากวัสดุเหลือทิ้งในภาคอุตสาหกรรมและเกษตรกรรม เพื่อลดต้นทุนการผลิตและลดผลกระทบทางนิเวศวิทยา ตามแนวทางเศรษฐกิจหมุนเวียน (circular economy) ที่มุ่งเน้นการใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์สูงสุด

ประเทศไทยเป็นหนึ่งในผู้ผลิตและส่งออกน้ำตาลรายใหญ่ของโลก โดยพื้นที่เพาะปลูกอ้อยมีความหนาแน่นในพื้นที่ของภาคกลางและภาคตะวันตก เช่น จังหวัดกาญจนบุรี สุพรรณบุรี และราชบุรี ซึ่งเป็นพื้นที่ยุทธศาสตร์สำคัญในการป้อนวัตถุดิบเข้าสู่อุตสาหกรรมผลิตน้ำตาลและโรงไฟฟ้าชีวมวล ข้อมูลจากสำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทรายระบุว่า ปริมาณอ้อยที่เข้าหีบในอุตสาหกรรมน้ำตาลในแต่ละปีนั้นมีจำนวนมหาศาล แต่ปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นในกระบวนการเก็บเกี่ยวคือ เกษตรกรมักทำการการเผาอ้อยก่อนตัดเพื่อให้ง่ายประประหยัดต้นทุนในการเก็บเกี่ยว ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพอากาศและเป็นสาเหตุหลักของการเกิดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) ที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของประชาชนในวงกว้าง [2] นอกจากนี้ กระบวนการผลิตไฟฟ้าชีวมวลที่ใช้ใบอ้อยเป็นเชื้อเพลิงยังก่อให้เกิดขี้เถ้า (ash) ในปริมาณมาก ซึ่งหากไม่มีการจัดการที่เหมาะสม ขี้เถ้าเหล่านี้จะกลายเป็นขยะอุตสาหกรรมที่สร้างมลพิษสะสมแก่ชุมชนโดยรอบในอนาคต

แก้วบอโรซิลิเกต (borosilicate Glass) เป็นแก้วที่มีสมบัติเด่นในด้านความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน (thermal shock resistance) และมีความทนทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมีสูง จึงเป็นที่นิยมนำมาใช้ในการนำมาประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวันและงานอุตสาหกรรม เช่น ภาชนะเครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการ บรรจุภัณฑ์ยา เลนส์สัมผัส และอุปกรณ์รองรับแสงอาทิตย์ (solar energy collectors) ซึ่งองค์ประกอบหลักของแก้วชนิดนี้คือซิลิกา (SiO_2) งานวิจัยในระยะหลังพบว่าขี้เถ้าจากโรงไฟฟ้าชีวมวลมีปริมาณซิลิกาสูง ซึ่งมีศักยภาพเพียงพอที่จะนำมาใช้เป็นแหล่งซิลิกาทดแทนทรายในกระบวนการผลิตแก้วบอโรซิลิเกตได้ การนำขี้เถ้าเหล่านี้มาใช้ประโยชน์จึงไม่เพียงแต่ช่วยลดต้นทุนวัตถุดิบแต่ยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับของเสียจากภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมพลังงานไปพร้อมกัน

เพื่อพัฒนาสมบัติของแก้วให้เหมาะสมกับการใช้งานเฉพาะทาง การเติมไอออนโลหะทรานซิชันลงในโครงสร้างแก้วจึงเป็นแนวทางที่ได้รับความนิยมอย่างมาก โดยเฉพาะการเติมไอออนแมงกานีส (manganese ions) ซึ่งเป็นธาตุที่สามารถเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและทางแสงของแก้วได้อย่างโดดเด่น การศึกษาที่ผ่านมาพบว่าแมงกานีสสามารถทำหน้าที่เป็นตัวปรับเปลี่ยนโครงสร้าง (network modifier) และส่งผลต่อค่าช่องว่างแถบพลังงานทางแสง (optical band gap) รวมถึงทำให้เกิดสมบัติการเรืองแสง (luminescence) ในย่านแสงสีแดงเมื่อได้รับการกระตุ้น ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในด้านวัสดุทางแสง ตัวตรวจจับรังสี หรือใช้ในการตกแต่งเพื่อความสวยงาม [3-9]

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของไอออนแมงกานีสที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางแสงของวัสดุแก้วที่สังเคราะห์จากขี้เถ้าใบอ้อยของโรงไฟฟ้าชีวมวล ซึ่งจะเริ่มต้นจากการออกแบบอัตราส่วนผสมของสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบและการหาสภาวะการหลอมที่เหมาะสมที่สุด (optimization) เพื่อเตรียมตัวอย่างแก้วตัวอย่าง จากนั้นจะทำการเจือไอออนของแมงกานีสออกไซด์ แล้วศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางแสง ซึ่งครอบคลุมการตรวจสอบค่าความหนาแน่น ดัชนีหักเห การดูดกลืนแสง และค่าพิกัดสีในระบบ $\text{CIE } L^* a^* b^*$

2. วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการเพิ่มมูลค่าเศษเหลือทิ้งภาคการเกษตร โดยนำขี้เถ้าใบอ้อยจากโรงงานน้ำตาลมาใช้เป็นวัตถุดิบหลักเพื่อทดแทนสารเคมีบริสุทธิ์อย่างแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และซิลิกา (SiO_2) ในการสังเคราะห์แก้ว เริ่มต้นด้วยการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเชิงลึกด้วยเทคนิค EDXRF (รุ่น Minipal-4) เพื่อใช้ปริมาณสารประกอบสำคัญ อาทิ SiO_2 ,

CaO, K₂O และ Fe₂O₃ เป็นฐานข้อมูลในการคำนวณและออกแบบสูตรแก้วอย่างแม่นยำ กระบวนการสังเคราะห์เริ่มต้นจากการหลอมผสมสารสกัดส่วนต่าง ๆ ภายใต้อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส จนได้น้ำแก้วที่สม่ำเสมอ จากนั้นขึ้นรูปด้วยวิธีการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วบนแม่พิมพ์แกรไฟต์ และนำชิ้นแก้วเข้าสู่กระบวนการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เพื่อลดความเครียดภายในเนื้อวัสดุ ก่อนปล่อยให้อุณหภูมิลดลงสู่ระดับปกติอย่างอิสระ ภายหลังการหลอม แก้วตัวอย่างจะถูกขัดแต่งผิวให้ได้ขนาดมาตรฐาน 1.0 × 1.5 × 0.3 ลูกบาศก์เซนติเมตร เพื่อเตรียมความพร้อมสำหรับการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะ ซึ่งครอบคลุมทั้งสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ค่าความหนาแน่นและปริมาตรเชิงโมล ตลอดจนสมบัติทางแสงและทัศนศาสตร์ ประกอบด้วยการวัดค่าดัชนีหักเห พฤติกรรมการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ และการวิเคราะห์ค่าสีตามระบบมาตรฐานสากล CIE L*a*b* เพื่อประเมินอิทธิพลของการเติมสารเจือที่มีต่อโครงสร้างและสมบัติของแก้วที่เตรียมจากซีเมนต์ไอบอ้อยอย่างเป็นระบบ

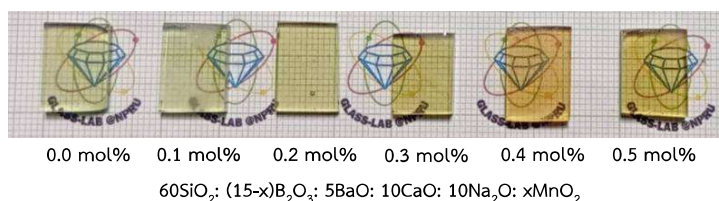
3. ผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์ไอบอ้อยด้วยเทคนิค EDXRF (รุ่น Minipal-4, Panalytical) ยืนยันถึงความเหมาะสมในการใช้เป็นโครงสร้างหลักของแก้ว โดยพบสารประกอบสำคัญอย่างซิลิกา (SiO₂) ปริมาณร้อยละ 66.77 และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 17.26 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังตรวจพบออกไซด์ของโลหะทรานซิชันที่มีอิทธิพลต่อสมบัติทางทัศนศาสตร์และการดูดกลืนแสง ได้แก่ เหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃) และแมงกานีสออกไซด์ (MnO) ซึ่งรายละเอียดองค์ประกอบทางเคมีทั้งหมดของซีเมนต์ไอบอ้อยในงานวิจัยนี้ได้สรุปไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างซีเมนต์ไอบอ้อย

สารประกอบ	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	MnO
ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	66.77	2.14	17.26	5.80	7.49	0.54

ข้อมูลองค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์ไอบอ้อยถูกนำมาใช้เป็นเกณฑ์หลักในการออกแบบโครงสร้างแก้ว โดยใช้เป็นแหล่งวัตถุดิบสำคัญของซิลิกา (SiO₂) และ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ตามระบบโครงสร้างแก้ว SiO₂: B₂O₃: BaO: CaO: Na₂O: xMnO₂ ร้อยละโดยโมล โดยกำหนดให้ x คือความเข้มข้นของแมงกานีสไดออกไซด์ที่ใช้ในการศึกษาที่ระดับ 0.0 0.1 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 ร้อยละโดยโมล ตามลำดับ จากการเตรียมแก้วตัวอย่างพบว่า แก้วชุดควบคุมที่ไม่เติม MnO₂ (x = 0.0) มีลักษณะโปร่งใสแต่ปรากฏสีเหลืองอมน้ำตาล ซึ่งเป็นอิทธิพลจากออกไซด์ของโลหะทรานซิชันที่ปนเปื้อนอยู่ตามธรรมชาติในซีเมนต์ไอบอ้อย ได้แก่ เหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃) และ แมงกานีสออกไซด์ (MnO) อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสารให้สีอย่างแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO₂) เข้าสู่ระบบแก้ว พบว่าลักษณะทางกายภาพของแก้วตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงของโทนสีไปทางสีเขียวที่เข้มข้นขึ้นอย่างมีนัยสำคัญตามสัดส่วนการเจือที่เพิ่มขึ้น ดังที่แสดงในภาพที่ 1



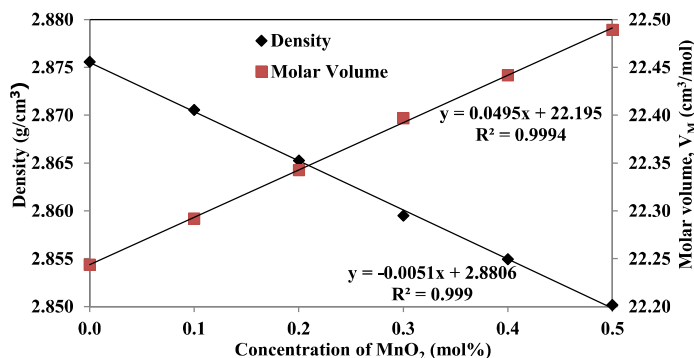
ภาพที่ 1 แก้วตัวอย่างที่เจือ MnO₂ ในความเข้มข้นที่ต่างกัน

3.1 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่น ปริมาตรเชิงโมล และดัชนีหักเห

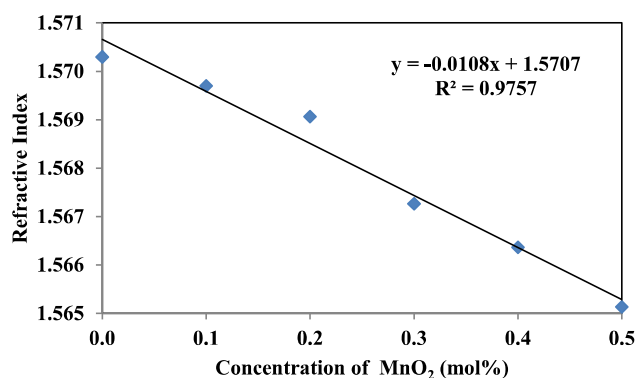
จากการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของแก้วจากซีเถ้าไบออยที่เจือด้วยแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) ในช่วงความเข้มข้นร้อยละ 0.0 ถึง 0.5 โดยโมล พบว่าค่าความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องจาก 2.8756 ± 0.0002 ถึง 2.8501 ± 0.0004 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งสวนทางกับค่าปริมาตรเชิงโมลที่เพิ่มสูงขึ้นจาก 22.2437 ถึง 22.4892 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง การเจือ MnO_2 เข้าไปแทนที่ B_2O_3 ยังส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของโครงข่ายผ่านกลไกการลดลงของสารสร้างเครือข่ายแก้ว (Glass Former) ซึ่งนำไปสู่การลดลงของความหนาแน่นแม้ว่ามวลโมเลกุลเฉลี่ยของระบบจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยก็ตาม พฤติกรรมดังกล่าวยืนยันได้จากการเพิ่มขึ้นของปริมาตรเชิงโมลที่แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างแก้วมีความโปร่งและมีช่องว่างระหว่างโมเลกุลมากขึ้น ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและปริมาตรเชิงโมลกับความเข้มข้นของ MnO_2 แสดงความสอดคล้องเชิงเส้นอย่างชัดเจนอันเป็นลักษณะเฉพาะของแก้วในระบบนี้ ดังภาพที่ 2 ในส่วนของสมบัติทางแสงจากการวิเคราะห์ค่าดัชนีหักเห พบว่ามีแนวโน้มลดลงตามปริมาณ MnO_2 ที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าลดลงจาก 1.5703 ± 0.0000 ถึง 1.5651 ± 0.0001 ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งเป็นทิศทางการเปลี่ยนแปลงเดียวกับค่าความหนาแน่นตามรายละเอียดในตารางที่ 2 ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้ด้วย ทฤษฎีความสัมพันธ์ของ Lorentz-Lorenz ซึ่งระบุว่าดัชนีหักเหของวัสดุแปรผันตรงกับความหนาแน่นของอะตอมและความสามารถในการเกิดโพลาไรซ์ของอิเล็กตรอน (Electronic Polarizability) ต่อหน่วยปริมาตร การแทนที่องค์ประกอบหลักอย่าง SiO_2 และ CaO ด้วยซีเถ้าไบออยที่มีสิ่งปนเปื้อนของ K_2O ร่วมกับการเจือ MnO_2 ลงในตำแหน่งของ B_2O_3 ส่งผลโดยตรงให้โครงข่ายของแก้วเกิดการขยายตัว สภาวะดังกล่าวทำให้ความหนาแน่นของอนุภาคต่อหน่วยปริมาตรลดน้อยลง ซึ่งตามหลักการทางทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์ เมื่อความหนาแน่นของเนื้อวัสดุลดลง จะส่งผลให้อันตรกิริยาระหว่างคลื่นแสงกับอิเล็กตรอนภายในลดลงตามไปด้วย แสงจึงสามารถเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางได้ด้วยความเร็วที่สูงขึ้นเป็นเหตุให้ค่าดัชนีหักเหของแก้วมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง แม้ว่าแมงกานีสจะเป็นธาตุที่มีมวลอะตอมค่อนข้างสูง แต่ผลกระทบจากการขยายตัวของโครงข่ายแก้วมีอิทธิพลเชิงประจักษ์ที่เหนือกว่าการเพิ่มขึ้นของมวลรวม ส่งผลให้ทั้งค่าความหนาแน่นและดัชนีหักเหเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางลดลงที่สอดคล้องกัน ดังแสดงความสัมพันธ์เชิงความเข้มข้นของ MnO_2 ในภาพที่ 3

ตารางที่ 2 ค่าความหนาแน่น ค่าปริมาตรเชิงโมล และค่าดัชนีหักเหของแก้วที่เติม MnO_2 ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของ MnO_2 (ร้อยละโดยโมล)	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	ปริมาตรเชิงโมล (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล)	ดัชนีหักเห
0.00	2.8756 ± 0.0002	22.2437	1.5703 ± 0.0000
0.01	2.8705 ± 0.0003	22.2920	1.5697 ± 0.0002
0.02	2.8653 ± 0.0003	22.3424	1.5691 ± 0.0002
0.03	2.8595 ± 0.0003	22.3968	1.5673 ± 0.0001
0.04	2.8550 ± 0.0003	22.4419	1.5664 ± 0.0001
0.05	2.8501 ± 0.0004	22.4892	1.5651 ± 0.0001



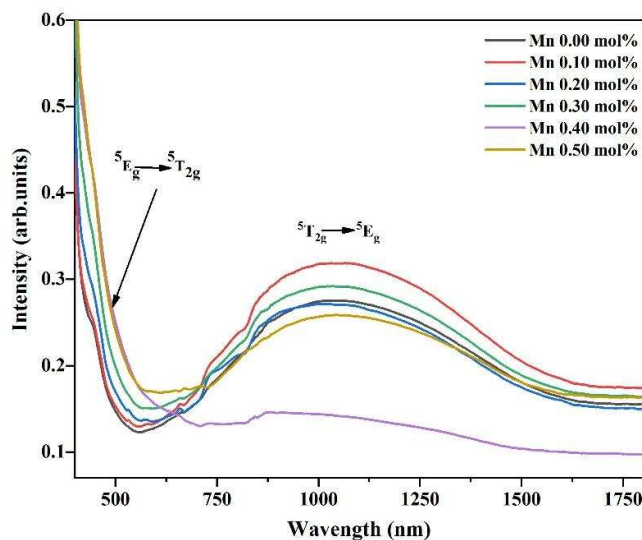
ภาพที่ 2 ค่าความหนาแน่น และค่าปริมาตรเชิงโมล ของแก้วที่เติม MnO₂ ที่ความเข้มข้นต่างๆ



ภาพที่ 3 ค่าดัชนีหักเหของแก้วที่เติม MnO₂ ที่ความเข้มข้นต่างๆ

3.2 ผลการวิเคราะห์การดูดกลืนแสง

จากการวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของแก้วจากซีเถ้าโบออยที่เจือด้วยแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO₂) พบพฤติกรรมทางทัศนศาสตร์ที่สำคัญคือการปรากฏของแถบการดูดกลืนแสงกว้าง (Broad bands) ในสองช่วงความยาวคลื่นหลัก โดยแถบแรกปรากฏในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 500 nm ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนสถานะพลังงานระดับอิเล็กตรอน d-d transition จากสถานะพื้น ⁵E_g ไปยังสถานะกระตุ้น ⁵T_{2g} ของไอออน Mn³⁺ ในโครงสร้างแบบทรงแปดหน้า (Octahedral coordination) และอีกหนึ่งแถบการดูดกลืนที่เด่นชัดปรากฏในช่วงย่านรังสีอินฟราเรดใกล้ (Near-Infrared) ประมาณ 1,050 nm ซึ่งระบุถึงการเปลี่ยนสถานะจากสถานะพื้น (⁵T_{2g}) ไปยังสถานะกระตุ้น (⁵E_g) ของไอออน Fe²⁺ พฤติกรรมการดูดกลืนแสงนี้ส่งผลโดยตรงต่อค่าสีของแก้ว ในเชิงทฤษฎีสถานะผลึก (Crystal Field Theory) และกลศาสตร์ควอนตัม พฤติกรรมเหล่านี้สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อไอออนของแมงกานีสถูกล้อมรอบด้วยออกซิเจนลิแกนด์ในโครงข่ายแก้วซิลิเกต จะเกิดการแยกออกของระดับพลังงานในวงโคจร d-orbital (d-orbital splitting) ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าสถิต ความเข้มของการดูดกลืนแสงที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณ MnO₂ สัมพันธ์โดยตรงกับความหนาแน่นของไอออนแมงกานีสที่เพิ่มสูงขึ้น



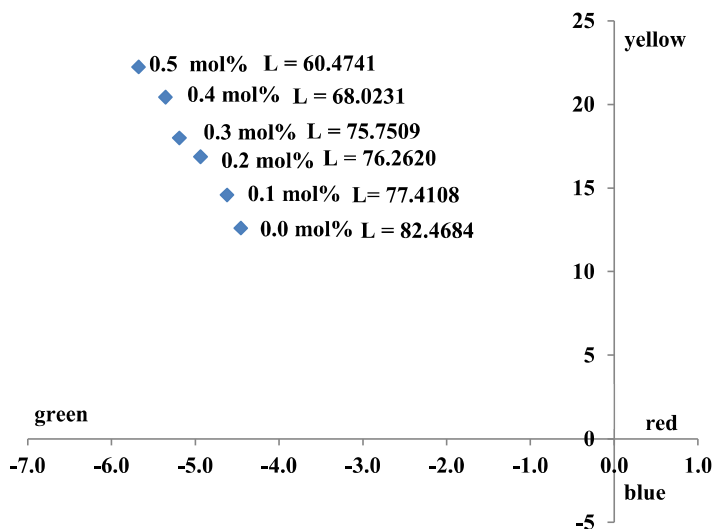
ภาพที่ 4 สเปกตรัมการดูดกลืนของแก้วที่เติม MnO_2 ที่ความเข้มข้นต่างๆ

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

จากการวิเคราะห์สมบัติทางทัศนศาสตร์ด้านการวัดค่าสีของแก้วที่เข้าไปอ้อยตามระบบมาตรฐานสากล CIE $L^*a^*b^*$ พบการเปลี่ยนแปลงที่สัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) ที่เพิ่มขึ้น โดยค่าความสว่าง (L^*) มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องจาก 82.4684 สู่ 60.4741 บ่งชี้ว่าแก้วมีความทึบแสงและมีดลงเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นไอออนตัวดูดกลืนแสง ในขณะที่ค่า a^* (แกนสีเขียว-แดง) มีค่าเป็นลบมากขึ้นจาก -4.4580 เป็น -5.6771 แสดงถึงอิทธิพลของโทนสีเขียวที่เด่นชัดขึ้นเล็กน้อย และที่สำคัญที่สุดคือค่า b^* (แกนสีน้ำเงิน-เหลือง) มีค่าเป็นบวกเพิ่มขึ้นอย่างก้าวกระโดดจาก 12.6090 ไปจนถึง 22.2441 ดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าแก้วมีการเปลี่ยนเฉดสีไปทางโทนสีเหลือง-น้ำตาลที่เข้มข้นขึ้นตามสัดส่วนการเจือ การดูดกลืนสเปกตรัมแสงในช่วงสีม่วงและน้ำเงินได้มากขึ้น แสงที่ส่องผ่านออกมาจึงเหลือเพียงช่วงความยาวคลื่นในย่านสีเหลืองและสีแดง ส่งผลให้ค่า b^* เพิ่มขึ้นและสีของแก้วมีความเข้มข้นสอดคล้องกับพฤติกรรมของการดูดกลืนแสงที่ปรากฏในสเปกตรัมอย่างเป็นระบบ ดังแสดงในภาพที่ 5

ตารางที่ 3 ค่าสีของแก้วที่เติม MnO_2 ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของ MnO_2 (ร้อยละโดยโมล)	Color measurement		
	L^*	a^*	b^*
0.0	82.4684	-4.4580	12.6090
0.1	77.4108	-4.6221	14.5909
0.2	76.2620	-4.9374	16.8682
0.3	75.7509	-5.1908	18.0073
0.4	68.0231	-5.3578	20.4369
0.5	60.4741	-5.6771	22.2441



ภาพที่ 5 ค่าสีระบบ CIE L*a*b* ของแก้วที่เติม MnO₂ ที่ความเข้มข้นต่างๆ

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของการเจือเมงกานีสไดออกไซด์ (MnO₂) ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและทางแสงของแก้วบอโรซิลิเกตที่สังเคราะห์จากซีเมนต์ไอบีออย ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่มีซิลิกา (SiO₂) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลักสูงถึงร้อยละ 66.77 และ 17.26 ตามลำดับ กระบวนการเตรียมแก้วใช้วิธีการหลอมที่อุณหภูมิ 1,200°C และขึ้นรูปด้วยเทคนิคการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quenching) ผลการศึกษาพบว่าการเพิ่มปริมาณ MnO₂ ส่งผลให้ความหนาแน่น และค่าดัชนีหักเหมีลดลงตามความหนาแน่นตามทฤษฎี Lorentz-Lorenz ในขณะที่ปริมาตรเชิงโมลเพิ่มขึ้นปรากฏการณ์นี้อธิบายได้ด้วยการขยายตัวของโครงสร้างแก้ว (Structural Expansion) จากการสร้างออกซิเจนที่ไม่เชื่อมต่อ (NBO) โดยไอออนเมงกานีสและสิ่งปนเปื้อนในซีเมนต์ไอบีออยที่ทำหน้าที่เป็นตัวปรับเปลี่ยนโครงข่าย นอกจากนี้ การวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนแสงปรากฏแถบการดูดกลืนที่สำคัญบริเวณ 500 และ 1,050 nm ซึ่งเกิดจากไอออนของ Mn³⁺ และ Fe²⁺ ตามลำดับ ส่งผลให้แก้วเปลี่ยนเฉดสีจากเหลืองอมน้ำตาลไปเป็นโทนสีเหลืองอมน้ำตาลที่เข้มขึ้น งานวิจัยนี้จึงยืนยันศักยภาพของซีเมนต์ไอบีออยในการเป็นวัตถุดิบทางเลือกเพื่อการผลิตแก้วเชิงฟังก์ชันที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ที่ให้การสนับสนุนงบรายได้จากมหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ประจำปีงบประมาณ 2569 ภายใต้โครงการวิจัยบูรณาการนักศึกษาและอาจารย์เพื่อการพัฒนาท้องถิ่นและความเป็นเลิศทางวิชาการ ปีงบประมาณ 2569

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Grand View Research. (2024). Glass Manufacturing Market Size, Share & Trends Analysis Report by Product (Container Glass, Flat Glass), By Application (Packaging, Construction, Automotive), By Region, And Segment Forecasts, 2025 - 2030. Grand View Research.



- [2] Nation Thailand. (2025, January 18). Burnt sugarcane volume on declining trend, says cane and sugar board. The Nation.
- [3] Yamagouni, P.G., Nirlakalla, R., (2025), “MnO₂-doped tellurite glasses: Potential and performance in faraday rotator technologies”, *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 660, 123541.
- [4] Alazoumi, S.H., Umar, S.A., Ahmad, A.F., Sidek, H.A.A., Awshah, A.A., Thakur, S., Geidam, I.G., (2024), “Structural, elastic, thermo-physical and gamma radiation shielding efficiency of MnO₂ doped TeO₂-PbO-ZnO glasses”, *Optical Materials*, Vol. 150, 115277.
- [5] Moustafa, M.G., Aladim, A.K., Kubuki, S., Ibrahim, A., (2025), “Exploring the photocatalytic performance of borosilicate glass nanocomposites modified with MnO₂ for environmental safety”, *Ceramics International*, Vol 51(15), pp. 20194-20203.
- [6] Rao, L.S., Prabha, K.A., Naidu, C.D., Hussain, S., (2025), “Structural aspects of Bi₂O₃-B₂O₃-MnO₂-ZrO₂ glasses evaluated by Raman and photoluminescence spectroscopy for solid state lighting”, *Inorganic Chemistry Communications*, Vol 173, 113787.
- [7] Sangeetha, G., Sekhar, K.C., Chary, M.N., Shareefuddin, Md., (2022), “Influence of magnesium oxide on the physical and spectroscopic properties of manganese doped sodium tetra borate glasses”, *Optik*, Vol. 259, 168952.
- [8] Shen, Y., Liu, H., Muhammad, R., Yao, Y., Yu, X., Korotkevich, A., Mao, M., Cao, L., Liu, B., Ren, H., Lin, H., Spreitzer, M., Kuz'min, M.P., Zuo, R., Song, K., (2025), “Crystallization behavior and microwave dielectric properties of low loss MgO-Al₂O₃-SiO₂-MnO₂-ZnO and MgO-Al₂O₃-SiO₂-GeO₂ microcrystalline glass-ceramics for LTCC substrate applications”, *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 45(15), 117629
- [9] Xu, S., Zhang, G., Zhang, H., Su, C., Wan, Y., (2023), “Constructing Tb³⁺→Mn²⁺ energy transfer to realize tunable luminescence and optical temperature measurement in glass-ceramics containing Y₂Sn₂O₇”, *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 622 (15), 122688