

การเตรียมแก้วบอโรซิลิเกตที่เจือสารให้สี NiO และ CoO โดยใช้เทคนิคไมโครเวฟ

ภัทรพร แสงคำ¹ และณัฐพล ศรีสิทธิโกกุล^{1,2*}

¹ศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางด้านแก้วและวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

²สาขาวิชาวัสดุและอุปกรณ์การแพทย์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

*nattapon2004@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำเพื่อพัฒนากระบวนการเตรียมแก้วบอโรซิลิเกตที่เจือสารให้สี NiO และ CoO โดยใช้เทคนิคไมโครเวฟ แล้วทดลองเตรียมตัวอย่างแก้วเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมกับเทคนิคการหลอมด้วยไมโครเวฟ โดยนำส่วนผสมที่เตรียมไว้ใส่เข้าหลอม นำเข้าเตาไมโครเวฟแล้วให้กำลังไฟฟ้ากับตั้งเวลาที่ 1,000 วัตต์ เป็นเวลา 25 นาที จากนั้นเมื่อครบเวลาหลอมเปิดฝาดำเนินการเอาแก้วหลอมออกจากเตาเผาและเทน้ำแก้วเหลวลงในแม่พิมพ์แกรไฟต์ ที่วางแก้วเริ่มแข็งตัวจึงนำแก้วออกจากแม่พิมพ์ แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำแก้วที่เย็นตัวแล้วไปขัดให้มีขนาด $1.0 \times 1.5 \times 0.3$ ลูกบาศก์เซนติเมตร เพื่อนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติในด้านต่าง ๆ ของแก้วได้แก่ ค่าความหนาแน่น ค่าดัชนีหักเห การดูดกลืนแสง และสีในระบบ CIE L^*a^*b

คำสำคัญ: เทคนิคไมโครเวฟ นิกเกิลออกไซด์ โคบอลต์ออกไซด์ ค่าดัชนีหักเห แก้วบอโรซิลิเกต

Preparation of borosilicate glasses doped with NiO and CoO colorants using microwave technique

Patraporn Saengka¹ and Nattapon Srisittipokakun^{1,2*}

¹Center of Excellence in Glass Technology and Materials Science (CEGM),

Nakhon Pathom Rajabhat University

²Medical Material and Equipment Program, Faculty of Science and Technology,

Nakhon Pathom Rajabhat University

*nattapon2004@gmail.com

Abstract

This research aims to develop a process for preparing borosilicate glass doped with NiO and CoO using microwave techniques. The study involves preparing glass samples to determine the optimal conditions for microwave melting. The prepared mixture is placed in a crucible, heated in a microwave oven at 1,000 watts for 25 minutes, and then removed after melting. The molten glass is poured into a graphite mold and left to solidify. Once the glass begins to harden, it is removed from the mold and annealed at 500°C for 3 hours. After cooling, the glass is polished to a size of 1.0 × 1.5 × 0.3 cubic centimeters for analysis of various properties, including density, refractive index, light absorption, and color in the CIE Lab system.

Keyword: Microwave technique NiO CoO Refractive Index Borosilicate glass

1. บทนำ

อุตสาหกรรมแก้วและกระจกถือเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่ทำเงินรายได้เข้าสู่ประเทศจำนวนมากอย่างต่อเนื่อง ประเทศไทยนั้นถือเป็นศูนย์กลางการผลิตแก้วและกระจกของภูมิภาคอาเซียนที่มีบริษัทขนาดใหญ่ ขนาดกลางและขนาดเล็ก จำนวนมากกว่า 200 โรงงาน จึงนับได้ว่าอุตสาหกรรมแก้วเป็นอุตสาหกรรมที่สำคัญอุตสาหกรรมหนึ่งของประเทศ เนื่องจากมียังหลายอุตสาหกรรมที่ต้องพึ่งพาชิ้นส่วนจากวัสดุแก้ว เช่น อุตสาหกรรมรถยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้า ก่อสร้าง อาหารและเครื่องดื่ม นอกจากนี้ตัวเลขของการส่งออกเฉพาะแก้ว ขวด และเครื่องแก้วบนโต๊ะอาหาร มีแนวโน้มขยายตัวร้อยละ 20-30 ซึ่งคิดเป็นมูลค่ารายได้ที่เข้าประเทศกว่าอีกหลายพันล้านบาท และยังเป็นการเพิ่มมูลค่าวัตถุดิบที่มีคุณภาพดีที่มีอยู่ในประเทศ เช่น หวาย หินปูน โดโลไมต์ แร่ฟันม้า ได้อย่างคุ้มค่า อีกทั้งวัสดุแก้วยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เพราะแก้วเป็นวัสดุที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ทั้งหมด (100% recyclable) แต่ในกระบวนการผลิตแก้วทั้งในอุตสาหกรรมแก้วใส และแก้วสีส่วนมากนิยมผลิตแก้วจากสารซิลิกา ซึ่งมีจุดหลอมเหลวค่อนข้างสูง โดยทั่วไปนิยมใช้อุณหภูมิในการหลอมอยู่ที่ 1,600 องศาเซลเซียส ซึ่งส่งผลทำให้ต้นทุนการผลิตด้านพลังงานมีค่าสูงมาก ซึ่งในบางธุรกิจอาจไม่มีความจำเป็นต้องผลิตแก้วจำนวนมาก หรือขนาดใหญ่ กระบวนการผลิตแบบเดิมจึงทำให้สิ้นเปลืองต้นทุนการผลิตค่อนข้างมาก ดังนั้นหากสามารถพัฒนากระบวนการหลอมแก้วใหม่ที่สามารถใช้อุปกรณ์ที่หาได้ง่าย การซ่อมบำรุงไม่ซับซ้อนย่อมส่งผลทำให้ต้นทุนการผลิตลดลงอย่างมีนัยยะ [1-5].

การหลอมแก้วด้วยเทคนิคไมโครเวฟมีข้อดีหลายประการที่สามารถช่วยปรับปรุงกระบวนการผลิตและลดค่าใช้จ่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพ การใช้ไมโครเวฟในการหลอมแก้วทำให้สามารถหลอมได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น เพราะไมโครเวฟสามารถสร้างความร้อนได้โดยตรงที่ตัววัสดุ (ในกรณีนี้คือแก้ว) ในการหลอมแก้วมีข้อได้เปรียบจากการที่พลังงานจากไมโครเวฟจะถูกส่งตรงไปยังตัวแก้วโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการถ่ายโอนความร้อนจากภายนอกเหมือนในเตาแบบดั้งเดิม ซึ่งหมายความว่าความร้อนจะถูกสร้างขึ้นภายในแก้วเอง ทำให้การหลอมเกิดขึ้นเร็วขึ้น และสามารถควบคุมอุณหภูมิได้แม่นยำกว่าในกระบวนการหลอมแก้วแบบปกติที่ใช้ความร้อนจากเตาไฟแบบทั่วไปที่มีกระจายความร้อนออกมา ทำให้มีสูญเสียพลังงานในกระบวนการ ทำให้ต้องใช้พลังงานมากมายในการอุ่นอากาศหรือเตา ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานมากกว่าในวิธีดั้งเดิมที่ใช้เชื้อเพลิงหรือระบบความร้อนที่ต้องการเวลาและพลังงานมากในการทำให้แก้วหลอมละลาย หนึ่งในข้อดีสำคัญคือการลดเวลาในการหลอมแก้ว เนื่องจากไมโครเวฟสามารถสร้างความร้อนที่เข้มข้นและเร็วกว่า ซึ่งจะช่วยให้กระบวนการหลอมแก้วเสร็จสิ้นในระยะเวลาที่สั้นลง การใช้เวลาน้อยลงหมายถึงการประหยัดพลังงานและสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตได้อย่างมาก การควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการหลอมแก้วเป็นอีกข้อที่สำคัญ เพราะไมโครเวฟสามารถให้ความร้อนอย่างแม่นยำ ทำให้การหลอมแก้วมีความเสถียรและสม่ำเสมอ ลดความเสี่ยงที่อาจเกิดจากการควบคุมอุณหภูมิที่ไม่ดี เช่น การหลอมเกินหรือละลายไม่หมด การใช้ไมโครเวฟในการหลอมแก้วยังเหมาะสมสำหรับการทดลองหรือการผลิตในปริมาณที่น้อยหรือขนาดเล็ก เนื่องจากไมโครเวฟสามารถควบคุมกระบวนการได้อย่างมีประสิทธิภาพในปริมาณที่ไม่มาก ทำให้ไม่ต้องลงทุนในเครื่องจักรขนาดใหญ่หรือการจัดการที่ซับซ้อน นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมคุณสมบัติของแก้วได้ดีขึ้น เช่น ความหนาแน่นหรือโครงสร้างที่สม่ำเสมอ ซึ่งสามารถปรับให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งานที่ต้องการ

งานวิจัยเกี่ยวกับโคบอลต์ออกไซด์ (CoO) ในแก้วเน้นการศึกษาคุณสมบัติที่โคบอลต์ออกไซด์สามารถนำมาปรับปรุงหรือเสริมเพิ่มในแก้ว ซึ่งได้แก่คุณสมบัติทางสี, ความทนทาน, และคุณสมบัติทางไฟฟ้าและแม่เหล็ก. โคบอลต์ออกไซด์มักใช้ในการสร้างสีที่โดดเด่นให้กับแก้ว โดยเฉพาะการให้สีฟ้าที่สวยงามและมีความคงทนสูงในการใช้งาน ซึ่งได้รับความนิยมในอุตสาหกรรมการผลิตแก้วตกแต่ง, กระจก, และเครื่องประดับ. เมื่อโคบอลต์ออกไซด์ถูกเติมลงไปในแก้วในปริมาณที่เหมาะสมจะให้สีฟ้าที่มีลักษณะพิเศษ ซึ่งสามารถควบคุมและเปลี่ยนแปลงได้ตามความเข้มข้นและวิธีการผลิต ทำให้เป็นสารเติมแต่งที่มีความหลากหลายในการใช้งานด้านการออกแบบ งานวิจัยบางชิ้นยังได้ศึกษาผลกระทบของโคบอลต์ออกไซด์ต่อคุณสมบัติแม่เหล็กของแก้ว พบว่าโคบอลต์ออกไซด์สามารถมีบทบาทในการเพิ่มคุณสมบัติทางแม่เหล็กให้กับแก้ว ซึ่งเหมาะสำหรับการใช้งานที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีแม่เหล็กหรือการใช้งานในอุปกรณ์ที่ต้องการคุณสมบัติทางแม่เหล็กในแก้ว [6-7].

นิเกิลออกไซด์ (NiO) ในแก้วมักมุ่งเน้นไปที่การศึกษาและพัฒนาคุณสมบัติของแก้วที่ใช้สารนี้เป็นส่วนประกอบหลัก โดยมีการสำรวจผลกระทบของนิเกิลออกไซด์ต่อคุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และการทำงานของแก้วในหลากหลายด้าน เช่น การเปลี่ยนสีของแก้ว, การปรับปรุงความทนทาน, และการเสริมคุณสมบัติทางไฟฟ้าและความร้อน งานวิจัยบางส่วนยังมุ่งเน้นไปที่การใช้ นิเกิลออกไซด์ในการผลิตแก้วที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้า ซึ่งมีการศึกษาผลกระทบของการเติมนิเกิลออกไซด์ต่อคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของแก้ว ผลการวิจัยพบว่า การเติมนิเกิลออกไซด์ในปริมาณที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติการนำไฟฟ้าในแก้วบางประเภท ซึ่งสามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตกระจกแสงอาทิตย์ที่มีการดูดซับแสงและแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า [8-11].

โครงการวิจัยนี้เป็นแก้วบอโรซิลิเกตที่เจือสารให้สี NiO และ CoO โดยใช้เทคนิคไมโครเวฟ โดยมีขั้นตอนการดำเนินการวิจัยดังนี้ ออกแบบสูตรแก้ว และทดลองเตรียมตัวอย่างแก้วเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมกับเทคนิคการหลอมด้วยไมโครเวฟ จากนั้นจึงนำสูตรแก้วที่ได้มาเจือสารให้สี NiO และ CoO และหาเงื่อนไขที่เหมาะสม เมื่อได้ตัวอย่างแก้วสีแล้วจึงทำการศึกษาสมบัติของตัวอย่างแก้วสี ได้แก่ ค่าความหนาแน่น ค่าดัชนีหักเหแสง ค่าการดูดกลืนแสง และค่าสี.

2. วิธีการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการวางแผนพัฒนาสูตรแก้วใสให้มีสี โดยการเติมออกไซด์ของสารให้สีเข้าไปในโครงสร้างแก้วเพื่อศึกษาสมบัติการเกิดสี ตามอัตราส่วนของสารดังนี้ $10\text{SiO}_2 : (50-x)\text{B}_2\text{O}_3 : 10\text{Na}_2\text{O} : 30\text{ZnO} : x\text{A}$ ร้อยละโดยโมล เมื่อ A คือ สารให้สีที่จะทำการวิจัยในโครงการนี้ ได้แก่ NiO และ CoO และ x เป็นความเข้มข้นของสารให้สีที่เติมลงไปในสูตรแก้ว โดยมีอัตราส่วน ดังต่อไปนี้

NiO มีความเข้มข้น 0.00, 0.01, 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 ร้อยละโดยโมล

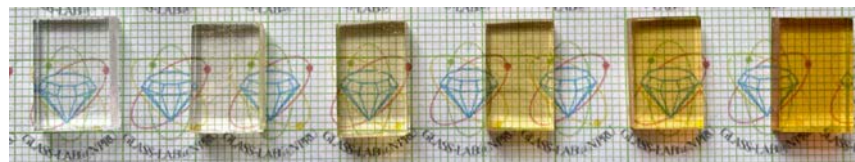
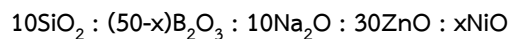
CoO มีความเข้มข้น 0.00, 0.01, 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 ร้อยละโดยโมล

จากนั้นทำการหลอมแก้วด้วยเทคนิคเตาไมโครเวฟโดยมีขั้นตอนการหลอมแก้วดังนี้ นำส่วนผสมที่เตรียมไว้ใส่เข้าหลอมนำเข้าเตาไมโครเวฟแล้วให้กำลังไฟฟ้ากับตั้งเวลาที่ 1,000 วัตต์ เป็นเวลา 25 นาที จากนั้นเมื่อครบเวลาหลอมเปิดฝาด่านำเอาแก้วหลอมออกจากเตาเผาและเทน้ำแก้วเหลวลงในแม่พิมพ์แกรไฟต์ ที่ไว้จนแก้วเริ่มแข็งตัวจึงนำแก้วออกจากแม่พิมพ์ แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยขั้นตอนการเทแก้วจะต้องทำอย่างรวดเร็ว เนื่องจากน้ำแก้วเหลวจะมีความหนืดเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ลดลงจนกลายเป็นของแข็ง หลังจากนั้นนำแก้วที่เย็นตัวแล้วไปขัดให้มีขนาด $1.0 \times 1.5 \times 0.3$ ลูกบาศก์เซนติเมตร เพื่อนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติในด้านต่าง ๆ ของแก้วได้แก่ ค่าความหนาแน่น ค่าดัชนีหักเห การดูดกลืนแสง และสีในระบบ CIE L^*a^*b

3. ผลการวิจัย

3.1 แก้วที่เจือด้วย NiO

จากผลการทดลองหลอมแก้วด้วยเทคนิคไมโครเวฟที่เจือ NiO พบว่าแก้วตัวอย่างที่ไม่เติมออกไซด์ของ NiO มีลักษณะใสไม่มีสี และเมื่อเติมออกไซด์ของ NiO มีลักษณะสี และมีสีน้ำตาลอ่อนๆ ซึ่งสีดังกล่าวจะมีความเข้มมากขึ้นเมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของออกไซด์ของ NiO มากขึ้น ดังภาพที่ 1



0.00 mol% 0.01 mol% 0.05 mol% 0.10 mol% 0.15 mol% 0.20 mol%

ภาพที่ 1 แก้วตัวอย่างที่เจือ NiO ในความเข้มข้นที่ต่างกัน

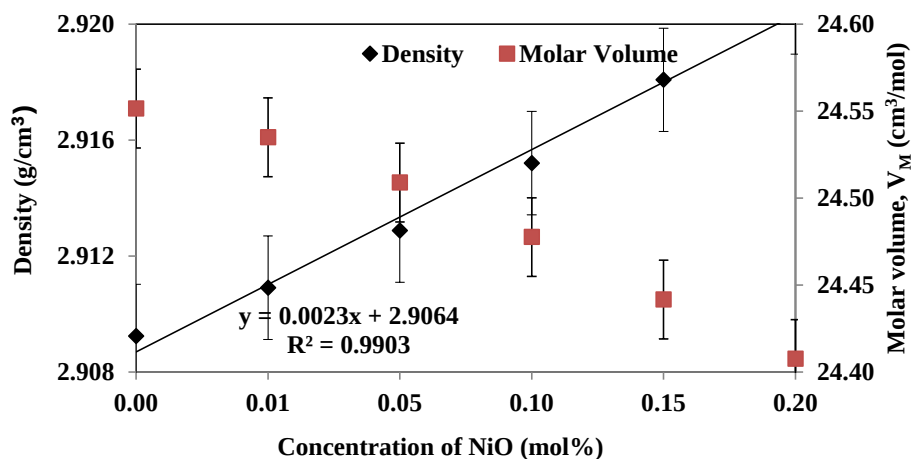
ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่น ปริมาตรเชิงโมล และดัชนีหักเห

จากการวิเคราะห์หาความหนาแน่นของแก้วตัวอย่างที่เติมออกไซด์ของ NiO ที่มีความเข้มข้น 0.00, 0.01, 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 ร้อยละโดยโมล พบว่าค่าความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของ NiO ที่เพิ่มมากขึ้น โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 2.9092 ± 0.0004 ถึง 2.9207 ± 0.0001 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ทั้งนี้เนื่องจากออกไซด์ของ NiO ซึ่งมีมวลโมเลกุลมากกว่าเข้าไปแทนที่ออกไซด์ของ B_2O_3 ดังแสดงในตารางที่ 1 และเมื่อนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับความเข้มข้นของแก้วที่เติมออกไซด์ของ NiO สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2 โดยกราฟที่ได้มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9903 ส่วนค่าปริมาตรเชิงโมลมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณความเข้มข้นของ NiO ที่เพิ่มมากขึ้น มีค่าอยู่ระหว่าง 24.4076 ถึง 24.5514 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล ดังแสดงในตารางที่ 1 นั้นสามารถสันนิษฐานได้ว่า NiO ได้เข้าไปสร้างสะพานเชื่อมออกซิเจน (bridging oxygen) ในโครงสร้างแก้วมากขึ้น ทำให้ระยะห่างระหว่างอะตอมมีขนาด

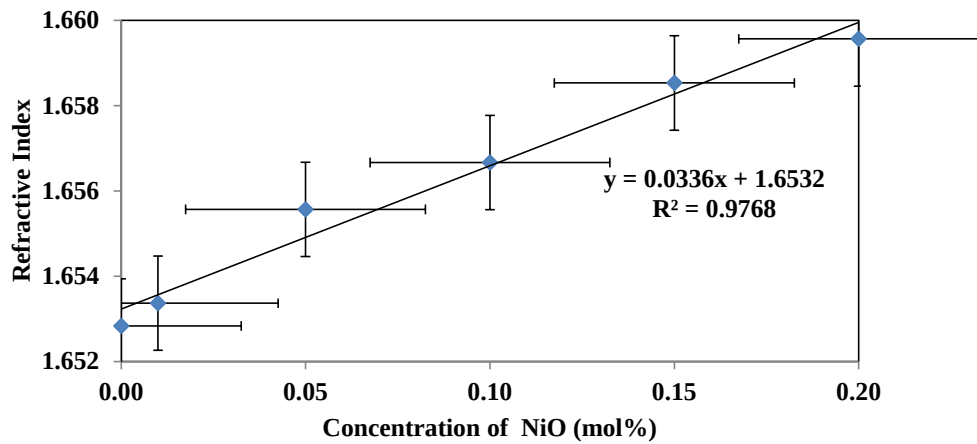
แคลงจึงทำให้โครงสร้างของแก้วเกิดการหดตัว ในงานวิจัยด้านวัสดุแก้วนั้นจะเรียกสารเคมีที่เติมลงในโครงสร้างแก้วแล้วทำให้ปริมาตรเชิงโมลของแก้วเปลี่ยนแปลงไปว่า Network modifier กล่าวคือเมื่อเติมสาร NiO เข้าไปในโครงสร้างแก้ว NiO จะเข้าไปสร้างสะพานเชื่อมออกซิเจน (bridging oxygen) ในโครงสร้างแก้วมากขึ้น และเมื่อนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรเชิงโมลกับความเข้มข้นของแก้วที่เติมออกไซด์ของ NiO สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2 จากการวิเคราะห์หาค่าดัชนีหักเหของแก้วตัวอย่าง พบว่าค่าดัชนีหักเหมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของ NiO ที่เพิ่มมากขึ้น มีค่าอยู่ระหว่าง 1.6528 ± 0.0001 ถึง 1.6596 ± 0.0001 ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยมีลักษณะเช่นเดียวกับความสัมพันธ์ของค่าความหนาแน่น เป็นไปตามทฤษฎีเป็นไปตามหลักทฤษฎีไดอิเล็กตริกแบบดั้งเดิม ซึ่งค่าดัชนีหักเหจะขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นและสภาพการเกิดข้อได้ของอะตอมในวัสดุ และเมื่อนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหกับความเข้มข้นของแก้วที่เติม NiO ดังแสดงในภาพที่ 3 โดยกราฟที่ได้มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9768

ตารางที่ 1 ค่าความหนาแน่น ค่าปริมาตรเชิงโมล และค่าดัชนีหักเหของแก้วที่เติม NiO ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของ NiO (ร้อยละโดยโมล)	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	ดัชนีหักเห	ปริมาตรเชิงโมล (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล)
0.00	2.9092 ± 0.0004	1.6528 ± 0.0001	24.5514
0.01	2.9109 ± 0.0001	1.6534 ± 0.0001	24.5350
0.05	2.9129 ± 0.0001	1.6556 ± 0.0001	24.5089
0.10	2.9152 ± 0.0001	1.6567 ± 0.0001	24.4776
0.15	2.9181 ± 0.0004	1.6585 ± 0.0001	24.4417
0.20	2.9207 ± 0.0001	1.6596 ± 0.0001	24.4076



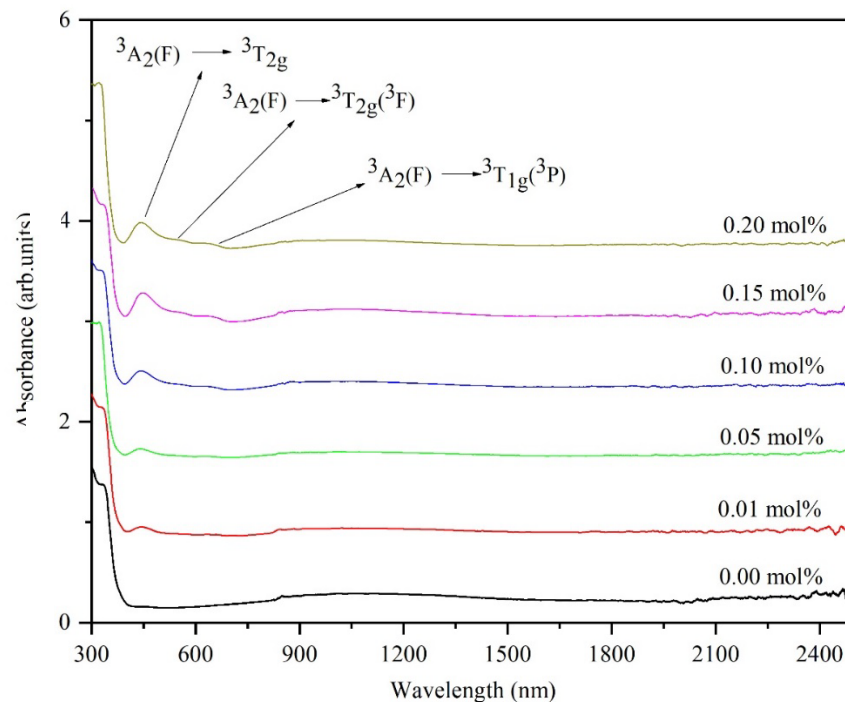
ภาพที่ 2 ค่าความหนาแน่น และค่าปริมาตรเชิงโมล ของแก้วที่เติม NiO ที่ความเข้มข้นต่างๆ



ภาพที่ 3 ค่าดัชนีหักเหของแก้วที่เติม NiO ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ผลการวิเคราะห์การดูดกลืนแสง

จากการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 200 - 2500 นาโนเมตร ของแก้วตัวอย่างที่เติมออกไซด์ของ NiO ที่มีความเข้มข้น 0.00, 0.01, 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 ร้อยละโดยโมล พบว่าพีคของการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 442, 550 และ 649 นาโนเมตร ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนชั้นพลังงานจากชั้น $^4A_2(F)$ ไปยังชั้น $^3T_{2g}$, $^3T_{1g}(^3F)$ และ $^3T_{1g}(^3P)$ ตามลำดับ [12] ดังภาพที่ 4 จากการดูดกลืนในช่วงความยาวคลื่นนี้ ทำให้สีของแก้วที่มองเห็นมีสีน้ำตาล และมีความเข้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของปริมาณ NiO ที่เพิ่มมากขึ้น



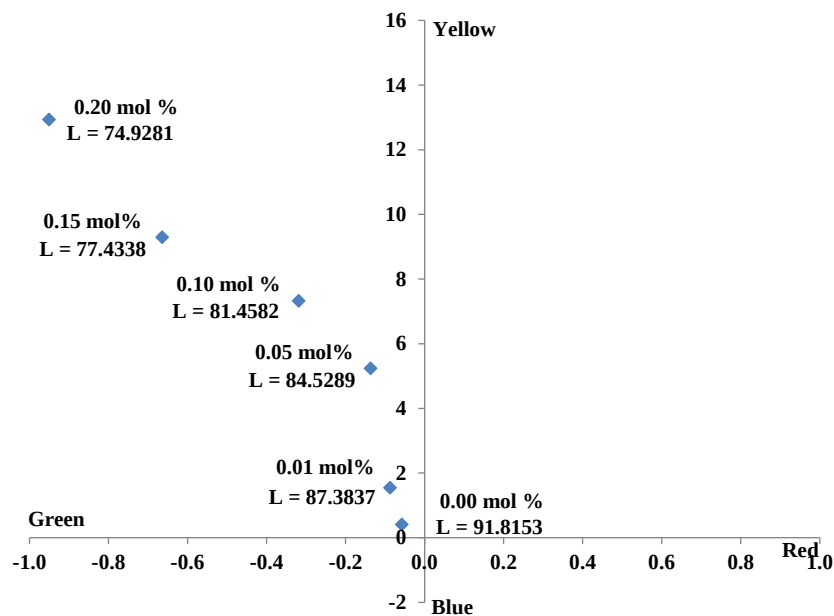
ภาพที่ 4 สเปกตรัมการดูดกลืนของแก้วที่เติม NiO ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ผลการวิเคราะห์สีในระบบ CIE L*a*b*

จากการวิเคราะห์สีในระบบ CIE L*a*b* ของแก้วตัวอย่างที่เติมออกไซด์ของ NiO ที่มีความเข้มข้น 0.00, 0.01, 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 ร้อยละโดยโมล พบว่าค่าความสว่าง (L*) ขึ้นกับปริมาณความเข้มข้นของ NiO ที่เพิ่มขึ้น โดยค่า a* จะมีค่าอยู่ระหว่าง -0.0580 ถึง -0.9506 ส่วนค่า b* จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.4076 ถึง 12.9382 ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยค่าสีมีพิกัดอยู่ในแกน -a และ +b ซึ่งเป็นพิกัดของแกนสีเหลือง และเขียว จึงทำให้แก้วตัวอย่างมีสีน้ำตาล ดังแสดงในภาพที่ 5

ตารางที่ 2 ค่าสีของแก้วที่เติม NiO ที่ความเข้มข้นต่างๆ

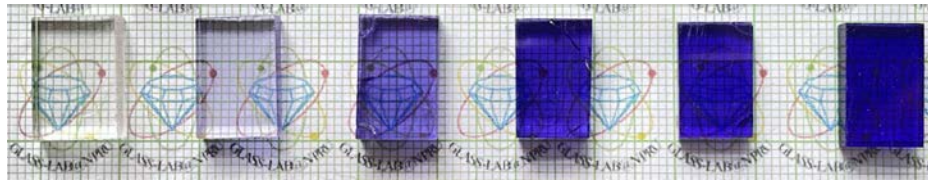
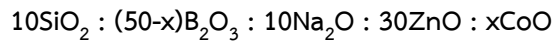
ความเข้มข้นของ NiO (ร้อยละโดยโมล)	Color measurement		
	L*	a*	b*
0.00	91.8153	-0.0580	0.4076
0.01	87.3837	-0.0874	1.5476
0.05	84.5289	-0.1371	5.2371
0.10	81.4582	-0.3187	7.3290
0.15	77.4338	-0.6645	9.2992
0.20	74.9281	-0.9506	12.9382



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

3.2 แก้วที่เจือด้วย CoO

จากผลการทดลองหลอมแก้วด้วยเทคนิคไมโครเวฟที่เจือ CoO พบว่าแก้วตัวอย่างที่ไม่เติมออกไซด์ของ CoO มีลักษณะใสไม่มีสี และเมื่อเติมออกไซด์ของ CoO มีลักษณะสี และมีสีน้ำเงิน ซึ่งสีดังกล่าวจะมีความเข้มมากขึ้นเมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของออกไซด์ของ CoO มากขึ้น ดังภาพที่ 6



0.00 mol% 0.01 mol% 0.05 mol% 0.10 mol% 0.15 mol% 0.20 mol%

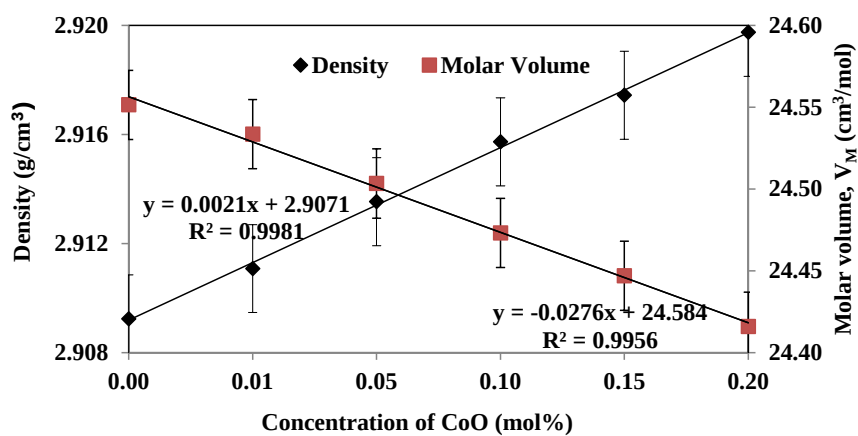
ภาพที่ 6 แก้วตัวอย่างที่เจือ CoO ในความเข้มข้นที่ต่างกัน

ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่น ปริมาตรเชิงโมล และดัชนีหักเห

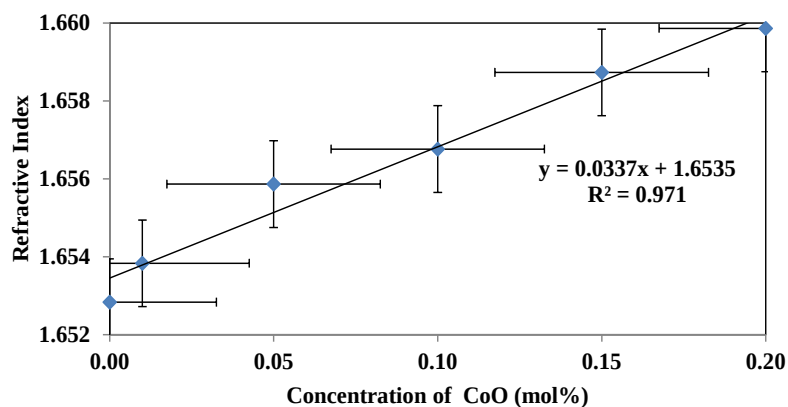
จากการวิเคราะห์หาค่าความหนาแน่นของแก้วตัวอย่างที่เติมออกไซด์ของ CoO ที่มีความเข้มข้น 0.00, 0.01, 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 ร้อยละโดยโมล พบว่าค่าความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของ CoO ที่เพิ่มมากขึ้น โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 2.9092 ± 0.0004 ถึง 2.9197 ± 0.0001 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ทั้งนี้เนื่องจากออกไซด์ของ CoO ซึ่งมีมวลโมเลกุลมากกว่าเข้าไปแทนที่ออกไซด์ของ B_2O_3 ดังแสดงในตารางที่ 3 และเมื่อนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับความเข้มข้นของแก้วที่เติมออกไซด์ของ CoO สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 7 โดยกราฟที่ได้มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9981 ส่วนค่าปริมาตรเชิงโมลมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณความเข้มข้นของ CoO ที่เพิ่มมากขึ้น มีค่าอยู่ระหว่าง 24.4159 ถึง 24.5514 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล ดังแสดงในตารางที่ 3 นั้นสามารถสันนิษฐานได้ว่า CoO ได้เข้าไปสร้างสะพานเชื่อมออกซิเจน (bridging oxygen) ในโครงสร้างแก้วมากขึ้น ทำให้ระยะห่างระหว่างอะตอมมีขนาดแคบลงจึงทำให้โครงสร้างของแก้วเกิดการหดตัว ในงานวิจัยด้านวัสดุแก้วนั้นจะเรียกสารเคมีที่เติมลงในโครงสร้างแก้วแล้วทำให้ปริมาตรเชิงโมลของแก้วเปลี่ยนแปลงไปว่า Network modifier กล่าวคือเมื่อเติมสาร CoO เข้าไปในโครงสร้างแก้ว CoO จะเข้าไปสร้างสะพานเชื่อมออกซิเจน (bridging oxygen) ในโครงสร้างแก้วมากขึ้น และเมื่อนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรเชิงโมลกับความเข้มข้นของแก้วที่เติมออกไซด์ของ CoO สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 7 โดยกราฟที่ได้มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9956 จากการวิเคราะห์หาค่าดัชนีหักเหของแก้วตัวอย่างที่เติมออกไซด์ของ CoO พบว่าค่าดัชนีหักเหมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของ CoO ที่เพิ่มมากขึ้น มีค่าอยู่ระหว่าง 1.6528 ± 0.0001 ถึง 1.6599 ± 0.0001 ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยมีลักษณะเช่นเดียวกับความสัมพันธ์ของความหนาแน่น เป็นไปตามทฤษฎีเป็นไปตามหลักทฤษฎีไดอิเล็กตริกแบบดั้งเดิม ซึ่งค่าดัชนีหักเหจะขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่น และสภาพการเกิดขั้วได้ของอะตอมในวัสดุ และเมื่อนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหกับความเข้มข้นของแก้วที่เติม CoO ดังแสดงในภาพที่ 8 โดยกราฟที่ได้มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9710.

ตารางที่ 3 ค่าความหนาแน่น ค่าปริมาตรเชิงโมล และค่าดัชนีหักเหของแก้วที่เติม CoO ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของ CoO (ร้อยละโดยโมล)	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	ดัชนีหักเห	ปริมาตรเชิงโมล (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล)
0.00	2.9092 ± 0.0004	1.6528 ± 0.0001	24.5514
0.01	2.9111 ± 0.0001	1.6538 ± 0.0001	24.5335
0.05	2.9135 ± 0.0001	1.6559 ± 0.0001	24.5034
0.10	2.9157 ± 0.0001	1.6568 ± 0.0001	24.4732
0.15	2.9174 ± 0.0001	1.6587 ± 0.0001	24.4470
0.20	2.9197 ± 0.0001	1.6599 ± 0.0001	24.4159



ภาพที่ 7 ค่าความหนาแน่น และค่าปริมาตรเชิงโมล ของแก้วที่เติม CoO ที่ความเข้มข้นต่างๆ

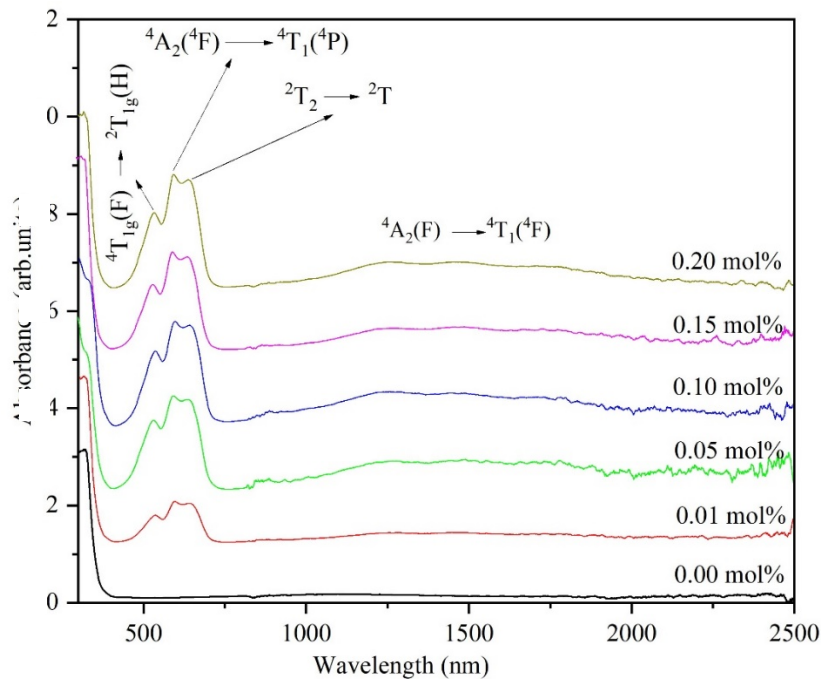


ภาพที่ 8 ค่าดัชนีหักเหของแก้วที่เติม CoO ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ผลการวิเคราะห์การดูดกลืนแสง

จากการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 300 - 2500 นาโนเมตร ของแก้วตัวอย่างที่เติมออกไซด์ของ CoO ที่มีความเข้มข้น 0.00, 0.01, 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 ร้อยละโดยโมล พบว่าพีคของการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 532 594 และ 638 นาโนเมตร ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานจาก $^4T_{2g}(F) \rightarrow ^2T_{1g}(H)$,

$^4A_2(F) \rightarrow ^4T_1(F)$ และ $^4T_2 \rightarrow ^4E_1$ ตามลำดับ ทำให้สีของแก้วที่มองเห็นมีสีน้ำเงิน และจะมีความเข้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของปริมาณ CoO ที่เพิ่มมากขึ้น [6] อีกทั้งยังพบว่าฟิสิกการดูดกลืนในช่วงพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนมีการเคลื่อนที่มายังช่วงความยาวคลื่นยาว ดังภาพที่ 9



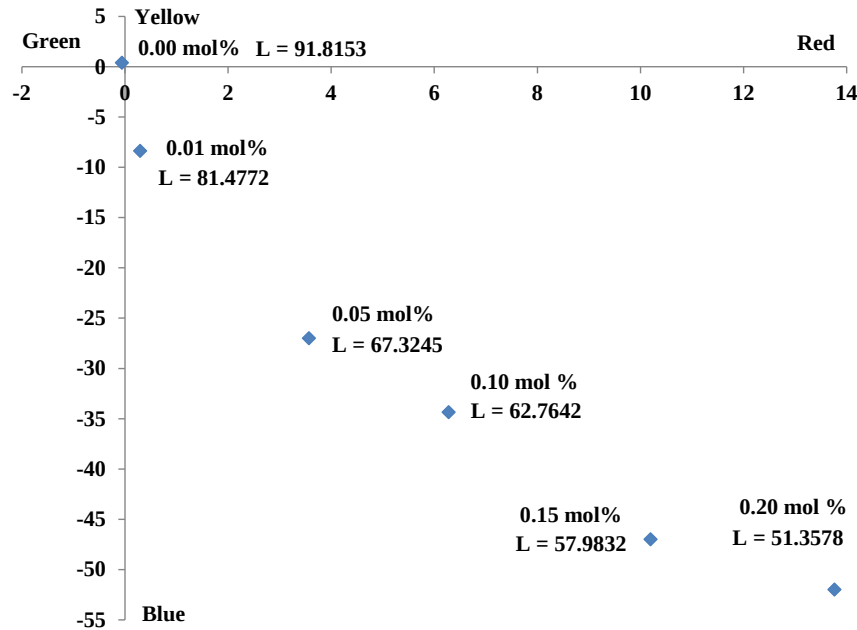
ภาพที่ 9 สเปกตรัมการดูดกลืนของแก้วที่เติม CoO ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ผลการวิเคราะห์สีในระบบ CIE L*a*b*

จากการวิเคราะห์สีในระบบ CIE L*a*b* ของแก้วตัวอย่างที่เติมออกไซด์ของ CoO ที่มีความเข้มข้น 0.00, 0.01, 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 ร้อยละโดยโมล พบว่าค่าความสว่าง (L*) ไม่ขึ้นกับปริมาณความเข้มข้นของ CoO ที่เพิ่มขึ้น โดยค่า a* จะมีค่าอยู่ระหว่าง -0.0580 ถึง -21.1040 ส่วนค่า b* จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.4076 ถึง 7.7736 ดังแสดงในตารางที่ 4 โดยค่าสีมีพิกัดอยู่ในแกน -a และ +b ซึ่งเป็นพิกัดของแกนสีแดง และน้ำเงิน จึงทำให้แก้วตัวอย่างมีสีน้ำเงิน ดังแสดงในภาพที่ 10 ซึ่งจากฐานข้อมูลค่าสีของอัญมณีในธรรมชาติของ The International Gem Society (IGS) พบว่าอวีนจริงในธรรมชาติ นั้นมีสีออกน้ำเงินโดยมีค่า L* อยู่ที่ประมาณ 52 ค่า a* อยู่ที่ประมาณ 1 และ ค่า b* อยู่ที่ประมาณ -40 จึงทำให้แก้วตัวอย่างมีสีน้ำเงิน [13]

ตารางที่ 4 ค่าสีของแก้วที่เติม CoO ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของ CoO (ร้อยละโดยโมล)	Color measurement		
	L*	a*	b*
0.00	91.8153	-0.0580	0.4076
0.01	81.4772	0.2933	-8.3548
0.05	67.3245	3.5670	-26.9884
0.10	62.7642	6.2789	-34.3483
0.15	57.9832	10.1957	-46.9842
0.20	51.3578	13.7609	-51.9831



ภาพที่ 10 ค่าสีระบบ CIE L*a*b* ของแก้วที่เติม CoO ที่ความเข้มข้นต่างๆ

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำเพื่อพัฒนากระบวนการเตรียมแก้วบอโรซิลิเกตที่เจือสารให้สี NiO และ CoO โดยใช้เทคนิคไมโครเวฟ แล้วทดลองเตรียมตัวอย่างแก้วเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมกับเทคนิคการหลอมด้วยไมโครเวฟ โดยนำส่วนผสมที่เตรียมไว้ใส่เข้าหลอม นำเข้าเตาไมโครเวฟแล้วให้กำลังไฟฟ้ากับตั้งเวลาที่ 1,000 วัตต์ เป็นเวลา 25 นาที จากนั้นเมื่อครบเวลาหลอมเปิดฝาดำเนินการเอาแก้วหลอมออกจากเตาเผาและเทน้ำแก้วเหลวลงในแม่พิมพ์แกรไฟต์ ที่ตั้งไว้จนแก้วเริ่มแข็งตัวจึงนำแก้วออกจากแม่พิมพ์ แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำแก้วที่เย็นตัวแล้วไปขัดให้มีขนาด $1.0 \times 1.5 \times 0.3$ ลูกบาศก์เซนติเมตร เพื่อนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติในด้านต่าง ๆ ของแก้วได้แก่ ค่าความหนาแน่น ค่าดัชนีหักเห การดูดกลืนแสง และสีในระบบ CIE L*a*b

แก้วที่เติมด้วย NiO ความเข้มข้นร้อยละ 0.00, 0.01, 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 โดยโมล พบว่าแก้วที่ได้มีลักษณะโปร่งใส โดยแก้วตัวอย่างที่ไม่เติมออกไซด์ของ NiO มีลักษณะใสไม่มีสี และเมื่อเติมออกไซด์ของ NiO มีลักษณะสี และมีสีน้ำตาลอ่อนๆ ซึ่งสีดังกล่าวจะมีความเข้มมากขึ้นเมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของออกไซด์ของ NiO มากขึ้น มีค่าความหนาแน่นและค่าดัชนีหักเหมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของ NiO ที่เพิ่มมากขึ้น ส่วนค่าปริมาตรเชิงโมลมีแนวโน้มลดลงสวนทางกับปริมาณความเข้มข้นของ NiO ที่เพิ่มมากขึ้น ค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 200 - 2,500 นาโนเมตร พบว่าพีคของการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 442, 550 และ 649 นาโนเมตร ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนชั้นพลังงานจากชั้น $4A_2(F)$ ไปยังชั้น $3T_{2g}$, $3T_{1g}(^3F)$ และ $3T_{1g}(^3P)$ ตามลำดับ ทำให้สีของแก้วที่มองเห็นมีสีน้ำตาล และมีความเข้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของปริมาณ NiO ที่เพิ่มมากขึ้น

แก้วที่เติมด้วย CoO ความเข้มข้นร้อยละ 0.00, 0.01, 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 โดยโมล พบว่าแก้วตัวอย่างที่ไม่เติมออกไซด์ของ CoO มีลักษณะใสไม่มีสี และเมื่อเติมออกไซด์ของ CoO มีลักษณะสี และมีสีน้ำเงิน ซึ่งสีดังกล่าวจะมีความเข้มมากขึ้นเมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของออกไซด์ของ CoO มากขึ้น มีค่าความหนาแน่นและค่าดัชนีหักเหมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของ CoO ที่เพิ่มมากขึ้น ส่วนค่าปริมาตรเชิงโมลมีแนวโน้มลดลง สวนทางกับปริมาณความเข้มข้นของ CoO ที่เพิ่มมากขึ้น ค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 200 - 2,500 นาโนเมตร พบว่าพีคของการดูดกลืนแสงที่ความ

ยาวคลื่นประมาณ 532, 594 และ 638 นาโนเมตร ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานจาก ${}^4T_{2g}(F) \rightarrow {}^2T_{1g}(H)$, ${}^4A_2(F) \rightarrow {}^4T_1(F)$ และ ${}^4T_2 \rightarrow {}^4E_1$ ตามลำดับ ทำให้สีของแก้วที่มองเห็นมีสีน้ำเงิน และจะมีความเข้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของปริมาณ CoO ที่เพิ่มมากขึ้น อีกทั้งยังพบว่าฟิสิกการดูดกลืนในช่วงพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนมีการเคลื่อนที่มายังช่วงความยาวคลื่นยาว.

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ที่ให้การสนับสนุนจนสามารถสำเร็จจากมหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ประจำปีงบประมาณ 2568 ภายใต้โครงการวิจัยบูรณาการนักศึกษาและอาจารย์เพื่อการพัฒนาท้องถิ่นและความเป็นเลิศทางวิชาการ ปีงบประมาณ 2568

6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Complete research report, Research plan on “Research and Development to Increase the Value of Gemstones”, Sub-Project 2: Development of Color-Changing Artificial Gemstones for Jewelry Products (Project Leader), National Research Council of Thailand (NRCT), Fiscal Year 2010 and 2012.
- [2] Complete report “Project on the Study of Glass Production from Rice Husk in Nakhon Pathom Province”, Research and Development Project for Undergraduate Students (EnPUS), Thailand Research Fund Office, 2008.
- [3] Full report “Creation of artificial sapphire from waste rice husk ash”, Industrial and Research Project for Bachelor's degree (IRPUS), Thailand Research Fund (TRF), 2009 (awaiting publication).
- [4] Sathit Homwan, A study of glass production from local sand in the western region, Bachelor of Science Thesis, Nakhon Pathom Rajabhat University, 2006.
- [5] Varshneya, A.K., 1994, Fundamental of Inorganic Glasses, Academic Press, London, pp. 1-30
- [6] A.M. Abdelghany, G. El-Damrawi, A.H. Oraby and M.A. Madshal, 2018. “Optical and FTIR structural studies on CoO-doped strontium phosphate glasses”, Journal of Non-Crystalline Solids, Vol 499, pp.153–158.
- [7] A. M. Fayad, Kh.S. Shaaban, W.M. Abd-Allah and M. Ouis, 2020. “Structural and Optical Study of CoO Doping in Borophosphate Host Glass and Effect of Gamma Irradiation”, Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials, Vol 30, pp. 5042–5052.
- [8] Jingbo Yu, Yi Gu, Qian Zhang, Zhiwei Luo, Anxian Lu, 2018. “A new type of NiO-doped phosphate glass with excellent Faraday effects”, Journal of Materials Letters, Vol 212, pp. 25-27.
- [9] A. Venkata Sekhar, A.V. Kityk, J. Jedryka, P. Rakus, A. Wojciechowski, A. Siva Sesha Reddy, G. Naga Raju, and N. Veeraiah, 2021, “Dielectric dispersion and impedance spectroscopy of NiO doped Li_2SO_4 – MgO – P_2O_5 glass system”, Journal of Alloys and Compounds, Vol 824, 153907.
- [10] M.I. Sayyed, M.S. Sadeq, 2021, “Environment influence on the crystal field and Racah’s parameters of constant NiO-doped borosilicate glasses”. Journal of Optik, Vol.247, 167861.
- [11] Sumeth Siroj and et al., 2023 “New glass cathode materials for Li-ion battery: Ni-Co doping in Li-B-O based glass”. Journal of Materials Science for Energy Technologies, 6, pp. 554-560.
- [12] Faten Al-Hazmi, S.F. Mansour, M.S. AlHammad, M.A. Abdo, M.S. Sadeq, 2020. “Impact of sunlight on



the optical properties and ligand field parameters of nickel borosilicate glasses”, Journal of Ceramics International, Vol 47, pp 8566-8572.

- [13] The International Gem Society (IGS), search word Gemstone Color Measurements and Specifications, (2023, April 11), from <https://www.gemsociety.org/article/color-measurements-specification/> (In Thai).