การพัฒนาอัญมณีอาวีนประดิษฐ์จากวัสดุแก้วที่ใช้ขี้เถ้าแกลบในจังหวัดสุพรรณบุรี

ภัทราพร แสงค้า[1,2], นพวรรณ ธรรมปัญญา[1,2] และณัฐพล ศรีสิทธิโภคกุล[1,2,*]

[1]สาขาวิชาเทคโนโลยีแก้วและเซรามิก คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
[2]ศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางด้านแก้วและวัสดุศาสตร์
*nattapon2004@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาอัญมณีอาวีนประดิษฐ์จากวัสดุแก้วที่ใช้ขี้เถ้าแกลบในจังหวัดสุพรรณบุรี โดยเตรียมแก้วจากสูตร (55-x)SiO_2: 13B_2O_3: 20Na_2O: 6.3CaO: 0.2Sb_2O_3: 1Al_2O_3: 4.5BaO: xCoO ร้อยละโดยโมล เมื่อ x คือ ความเข้มข้นของ CoO มีค่า 0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 ร้อยละโดยโมล ถูกเตรียมขึ้นด้วยเทคนิคการหลอมที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมงแล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว จากนั้นทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพ และทางแสงของแก้วที่เตรียมขึ้น พบว่าค่าความหนาแน่น และค่าดัชนีหักเห มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของ CoO ที่เพิ่มมากขึ้น ปริมาตรเชิงโมลมีค่าลดลงส่วนทางกับปริมาณความเข้มข้นของ CoO ที่เพิ่มมากขึ้น การวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 200 – 1,100 นาโนเมตร เกิดขึ้นช่วงความยาวคลื่นประมาณ 539, 597 และ 643 นาโนเมตร ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนชั้นพลังงานจากชั้น $^4T_{1g}$ (F) $\longrightarrow$ $^2T_{1g}$(H) $^4A_2$ (^{4}F) $\longrightarrow$ $^4T_1$(^{4}P) และ $^2T_2$ $\longrightarrow$ ^{2}T ตามลำดับ การวิเคราะห์ค่าสีของแก้วตัวอย่าง พบว่า a* จะมีค่าอยู่ระหว่าง -1.27 ถึง 2.45 ส่วนค่า b* จะมีค่าอยู่ระหว่าง -54.56 ถึง 2.78 โดยจะอยู่ในช่วงสีน้ำเงิน พบว่าแก้วที่เติม CoO ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.04 โดยโมล มีค่า L* = 52.36 ค่า a* = 1.13 และ ค่า b* = -40.23 มีค่าสีที่ใกล้เคียงกับอาวีนจริงในธรรมชาติ และลักษณะทางกายภาพที่ความสอดคล้องกัน

คำสำคัญ: แก้ว อาวีน สี อัญมณี สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางแสง

Development of artificial Hauyne gemstones from glass materials using rice husk ashes in Suphanburi Province

Pattraporn Saengka[1,2], Noppawan Thampanya[1,2] and Nattapon Srisittipokakun[1,2,*]

[1]Glass and Ceramic Technology Program, Faculty of Science and Technology,
Nakhon Pathom Rajabhat University
[2]Center of Excellence in Glass Technology and Materials Science (CEGM),
Nakhon Pathom Rajabhat University
*nattapon2004@gmail.com

Abstract

The aims of this research to develop artificial Hauyne gemstones from glass materials using rice husk ashes in Suphanburi Province. Glass was prepared from the formula (55-x)SiO_2: 13B_2O_3: 20Na_2O: 6.3CaO: 0.2Sb_2O_3: 1Al_2O_3: 4.5BaO: xCoO mol% where x is the concentration of CoO (0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 and 0.05 mol%) have been synthesized by conventional melt quenching technique at 1,200 ^{o}C for 3 hours. Studied the physical properties and the optical properties of glass The results showed that density and refractive index tends to increase according to the increasing concentration of CoO. The molar volume decreases with increasing concentration of CoO. The absorption spectra of glass in the wavelength range of 200 to 1,100 nm showed absorption broadbands at 539, 597 and 643 nm, caused by the energy level change from $^4T_{1g}$ (F) $\rightarrow$ $^2T_{1g}$(H), $^4A_2$ (^{4}F) $\rightarrow$ $^4T_1$(^{4}P) and $^2T_2$ $\rightarrow$ ^{2}T, respectively. Color analysis of the glass sample revealed that the a* value ranged from -1.27 to 2.45, while the b* value ranged from -54.56 to 2.78, falling within the blue color spectrum. It was found that glass doped with CoO at 0.04 mol% had L* = 52.36, a* = -10.1118, and b* = 24.7183. The color value was close to that of real Hauyne in nature and have similar physical characteristics.

Keywords: Glass, Hauyne, Color, Gemstones, Physical properties, Optical properties

1.บทนำ

จังหวัดสุพรรณบุรีเป็นจังหวัดที่มีพื้นที่การปลูกข้าวมากที่สุดแห่งหนึ่งเป็นอันดับต้น ๆ ของประเทศ จากข้อมูลเบื้องต้นกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ได้ประกาศกำหนดพื้นที่เป้าหมายส่งเสริมการปลูกข้าว ปี 2560/2561 รอบที่ 2 ในจังหวัดสุพรรณบุรีกว่า 958,600 ไร่ คิดเป็นพื้นที่อันดับ 1 ของประเทศไทยที่มีการปลูกข้าวสูงสุด อย่างไรก็ตามผลผลิตที่ได้นอกจากข้าวแล้วยังมีแกลบที่เกิดจากการสีข้าว ซึ่งกลุ่มเกษตรกรและโรงสีส่วนใหญ่มักจะใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงในการอบข้าวไม่ให้ชื้นเพื่อให้มีราคาขายที่ดี ดังนั้นสิ่งที่เหลืออยู่เป็นขยะปริมาณมหาศาลในแต่ละปี คือ ขี้เถ้าจากการเผาแกลบ โดยข้อมูลเบื้องต้นจากกลุ่มผู้ประกอบการปลูกข้าวและโรงสีในจังหวัดสุพรรณบุรี พบว่าจะมีขี้เถ้าแกลบเหลือเป็นขยะกว่าปีละ 5,000 ตัน ขี้เถ้าแกลบมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสารซิลิกา (SiO_2) ซึ่งหากทิ้งไว้ก็จะฟุ้งและลอยกระจายไปในอากาศ ส่งผลต่อทั้งสภาพแวดล้อมทางอากาศ และสุขอนามัยของประชาชนในชุมชน และเป็นสาเหตุของโรคทางเดินหายใจที่พบได้บ่อย คือ มะเร็งปอด โรคซิลิโคซิส และโรคติดเชื้อ นิวโมเนีย (ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่สัมผัส ปริมาณและชนิดของอนุภาคซิลิกา)

แก้วจัดเป็นอัญมณีเทียมประเภทหนึ่งที่มีความสำคัญ มีตลาดเฉพาะตัวและมีราคาสูงกว่าพลาสติกและเรซิ่น แต่พบว่าราคาขายในตลาดเมื่อเข้าเรือนกลับทำกำไรไล่เลี่ยกับเพชรรัสเซีย (cubic zirconia) หรือแม้กระทั่งทับทิมสังเคราะห์ซึ่งเป็นพลอยสังเคราะห์ที่เตรียมได้ยากกว่า และใช้ต้นทุนสูงกว่ามาก แก้วส่วนใหญ่จะมีส่วนประกอบหลักเป็น SiO_2, Na_2CO_3 และ

CaO ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้หากมีการเติมสารที่เหมาะสมอาจพัฒนาไปเป็นวัสดุชนิดอื่น ๆ ได้ ทั้งนี้แก้วยังสามารถทำให้เกิดสีสันได้มากกว่าและง่ายกว่า **[1-5]** การเตรียมอัญมณีเทียมจากแก้วจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจอย่างสูงในปัจจุบัน

อัญมณีอาวีน (Hauyne หรือสะกดว่า Haüyne) ถูกค้นพบครั้งแรกในปี พ.ศ. 2350 ในเทือกเขาไอเฟลของประเทศเยอรมนี ชื่อนี้ได้มาจากนักแร่วิทยา René Just Haüy ซึ่งเป็นผู้บุกเบิกการศึกษาด้านผลึกศาสตร์ เป็นแร่สีน้ำเงินหายากที่อยู่ในกลุ่มโซดาไลท์ เป็นแร่เทคโตซิลิเกตและมักพบในหินภูเขาไฟ โดยเฉพาะในเนฟีลีนไซไนต์และโฟโนไลต์ อัญมณีอาวีน มีชื่อเสียงในด้านสีน้ำเงินที่โดดเด่น ซึ่งมีตั้งแต่สีฟ้าอ่อนไปจนถึงสีน้ำเงินเข้ม และมีคุณค่าเป็นอัญมณีสำหรับใช้ในเครื่องประดับ อัญมณีอาวีนมีโครงสร้างเป็นลูกบาศก์คริสตัล โดยทั่วไปจะมีองค์ประกอบของแร่ธาตุอื่น ๆ เช่น เนฟีลีนโนซาน และโซดาไลท์ สีฟ้าเกิดจากการมีกำมะถันอยู่ในองค์ประกอบ แม้ว่าอัญมณีอาวีจะไม่เป็นที่รู้จักมากเท่ากับอัญมณีอื่น ๆ แต่ก็ได้รับความนิยมจากนักสะสมและผู้ชื่นชอบในเรื่องสีสันที่สดใสและความหายาก

ดังนั้นในโครงการนี้จึงเป็นการพัฒนาอัญมณีอาวีนประดิษฐ์จากวัสดุแก้วที่ใช้ขี้เถ้าแกลบในจังหวัดสุพรรณบุรี แล้วทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางแสง รวมถึงการเปรียบเทียบค่าสีของแก้วที่พัฒนาขึ้น โดยผู้วิจัยจะทำการเจือ CoO ลงไปในสูตรแก้ว ทั้งนี้จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าแก้วที่เจือ CoO มีสีน้ำเงิน **[6]** เช่นเดียวอาวีนในธรรมชาติ

2.วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำเพื่อพัฒนาอัญมณีอาวีนประดิษฐ์จากวัสดุแก้วที่ใช้ขี้เถ้าแกลบในจังหวัดสุพรรณบุรี ผู้วิจัยลงพื้นที่จังหวัดสุพรรณบุรีซึ่งเป็นจังหวัดที่มีการปลูกข้าว และสีข้าวปริมาณมาก โดยมุ่งเป้าไปที่อุตสาหกรรมโรงสี เนื่องจากเป็นแหล่งรวบรวมข้าวจากเกษตรกรในชุมชนย่อยเพื่อมาสีรวมกัน ทำให้มีปริมาณข้าวมากกว่าการลงพื้นที่เก็นจากเกษตรกรรายย่อย โดยประสานไปยังโรงสีที่เป็นสมาชิกในสมาคมโรงสีข้าวสุพรรณบุรีที่มีจำนวนสมาชิกทั้งสิ้น 103 แห่ง โดยโรงสีที่มุ่งเป้า คือ โรงสี หจก.ต.ทวีรุ่งเรือง ตั้งอยู่ที่ 4/1 หมู่ 2 ตำบลบางปลาม้า อำเภอบางปลาม้า จังหวัด สุพรรณบุรี 72150 โดยมี นายวินิจ เลาห์ทวีรุ่งเรือง เป็นสมาชิกในสมาคมโรงสีข้าวสุพรรณบุรี กำลังผลิตในการสีข้าวเฉลี่ยต่อปีประมาณ 6 – 7 หมื่นตัน โดยกระบวนการสีข้าวในบริษัทได้มีกระบวนการนำแกลบไปเผาเพื่อใช้ในการอบข้าวอยู่แล้ว ทำให้มีปริมาณขี้เถ้าแกลบเหลือทิ้งประมาณ 3-4 พันตันต่อปี จากนั้นทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุในขี้เถ้าแกลบด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์รังสีเอ็กซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Fluorescence-EDXRF) ของบริษัท Panalytical รุ่น Minipal-4 เมื่อทราบข้อมูลพื้นฐานแล้วจึงทำการออกแบบสูตรแก้วให้เหมาะสมตามอัตราส่วน (55-x)SiO_2: 13B_2O_3: 20Na_2O: 6.3CaO: 0.2Sb_2O_3: 1Al_2O_3: 4.5BaO: xCoO (เมื่อ x เท่ากับ 0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 ร้อยละโดยโมล) โดยหลอมที่อุณหภูมิ 1,200 ºC ใช้เวลา 3 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาที่กำหนด นำเบ้าหลอมออกจากเตาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง แล้วทำให้แก้วเหลวได้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว โดยการเทน้ำแก้วลงบนแบบพิมพ์แกรไฟต์รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าเพื่อขึ้นรูป นำแก้วที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 500 ºC นาน 3 ชั่วโมง จากนั้นปิดเตาให้อุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิห้อง จึงนำแก้วออกจากเตา นำแก้วที่เย็นตัวแล้วไปขัดให้มีขนาด 1.0 × 1.5 × 0.3 ลูกบาศก์เซนติเมตร หลังจากนั้นจึงมาศึกษาสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางแสง ได้แก่ ความหนาแน่น ปริมาตรเชิงโมลดัชนีหักเห การดูดกลืนแสง และค่าสีในระบบ CIE L*a*b*

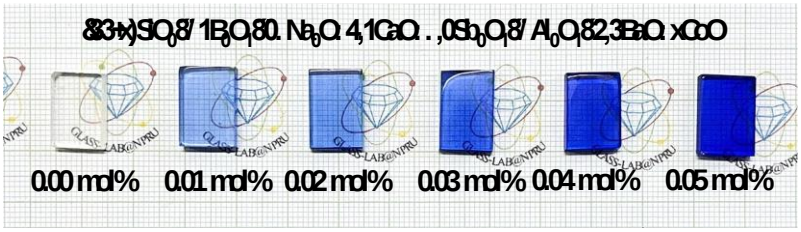
3.ผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุในขี้เถ้าแกลบด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์รังสีเอ็กซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Fluorescence-EDXRF) ของบริษัท Panalytical รุ่น Minipal-4 โดยจะพิจารณาที่ปริมาณ Si เป็นองค์ประกอบหลัก ทั้งนี้เนื่องจาก Si เป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการนำไปใช้ในการหลอมแก้ว ซึ่งจะพบว่าขี้เถ้าแกลบของโรงสีนั้นมีปริมาณ Si ค่อนข้างสูง (มากกว่าร้อยละ 90) แต่ทั้งนี้ยังมีองค์ประกอบอื่น ๆ ที่สำคัญซึ่งอาจส่งผลต่อการเกิดสีในแก้วได้ เช่น แมงกานีส (Mn) เหล็ก (Fe) นิเกิล (Ni) และ ทองแดง (Cu) ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างขี้เถ้าแกลบจากโรงสี หจก.ต.ทวีรุ่งเรือง

องค์ประกอบธาตุ	ต.ทวีรุ่งเรือง
Si	**92.466**
K	5.526
Ca	1.638
Mn	0.239
Fe	0.096
Ni	0.003
Cu	0.011
Zn	0.022

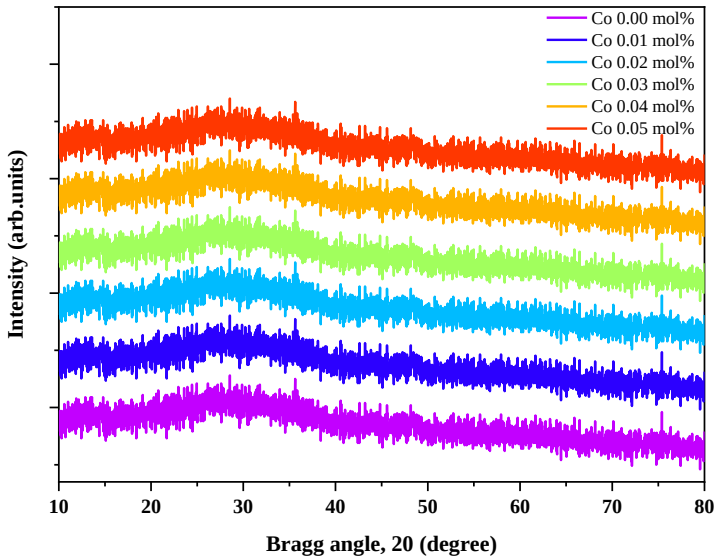
หลังจากทำการหลอมแก้วตามอัตราส่วนที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น พบว่าแก้วตัวอย่างที่ไม่เติมออกไซด์ของ CoO มีลักษณะใสไม่มีสี และเมื่อเติมออกไซด์ของ CoO มีลักษณะใส และมีสีน้ำเงินอ่อน ๆ ซึ่งสีดังกล่าวจะมีความเข้มมากขึ้นเมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของออกไซด์ของ CoO มากขึ้น ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แก้วตัวอย่างที่เติมออกไซด์ของ CoO ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ X-ray diffraction (XRD)

จากการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ของแก้วตัวอย่างที่เติมออกไซด์ของ CoO ที่มีความเข้มข้น 0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 ร้อยละโดยโมล พบว่า รูปแบบของ XRD มีการขึ้นลงที่สม่ำเสมอและไม่พบจุดที่เป็นพีคสูงสุด ซึ่งบ่งชี้ว่ามีโครงสร้างอสัณฐานที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทั้งก่อนและหลังการเติม CoO ตามลำดับ [7] ดังภาพที่ 2



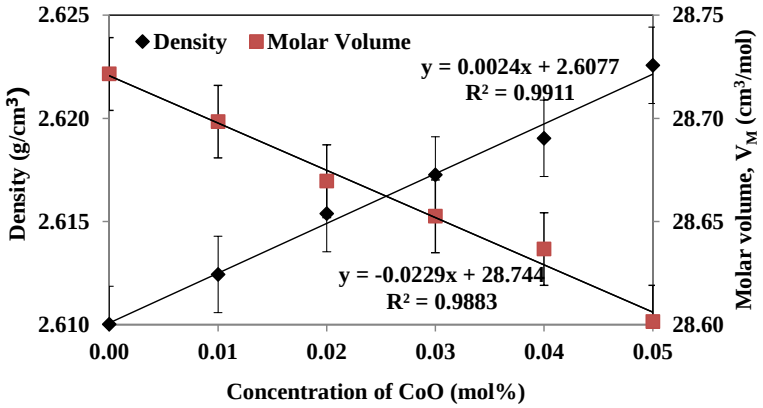
ภาพที่ 2 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของแก้วที่เติม CoO ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่น ปริมาตรเชิงโมลและค่าดัชนีหักเห

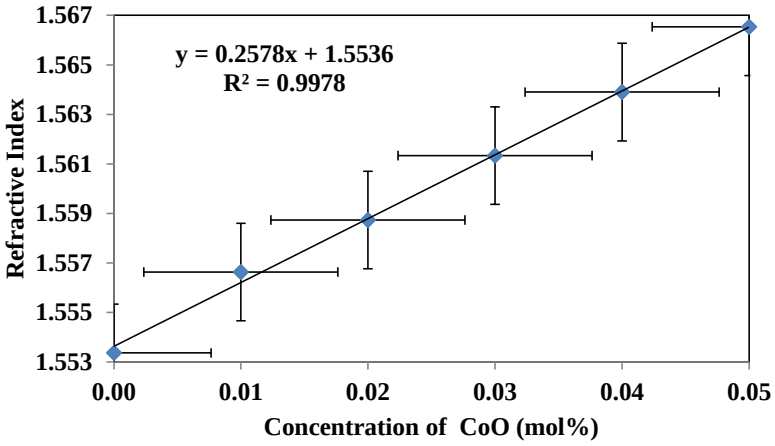
จากการวิเคราะห์หาค่าความหนาแน่นของแก้วตัวอย่างที่เติมออกไซด์ของ CoO ที่มีความเข้มข้น 0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 ร้อยละโดยโมล พบว่าค่าความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของ CoO ที่เพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากออกไซด์ของ CoO ซึ่งมีมวลโมเลกุลมากกว่าการเข้าไปแทนที่ออกไซด์ของ SiO_2 ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 2.6100 ± 0.0001 ถึง 2.6226 ± 0.0001 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และเมื่อนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับความเข้มข้นของแก้วที่เติมออกไซด์ของ CoO สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3 โดยกราฟที่ได้มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9911 ส่วนค่าปริมาตรเชิงโมลมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณความเข้มข้นของ CoO ที่เพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 28.6015 ถึง 28.7215 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล นั่นสามารถสันนิฐานได้ว่า CoO ได้เข้าไปสร้างสะพานเชื่อมออกซิเจน (bridging oxygen) ในโครงสร้างแก้วมากขึ้น ทำให้ระยะห่างระหว่างอะตอมมีขนาดแคบลงจึงทำให้โครงสร้างของแก้วเกิดการหดตัว ในงานวิจัยด้านวัสดุแก้วนั้นจะเรียกสารเคมีที่เติมลงในโครงสร้างแก้วแล้วทำให้ปริมาตรเชิงโมลของแก้วเปลี่ยนแปลงไปว่า Network modifier และเมื่อนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรเชิงโมลกับความเข้มข้นของแก้วที่เติมออกไซด์ของ CoO สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3 โดยกราฟที่ได้มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9883 จากการวิเคราะห์หาค่าดัชนีหักเหของแก้วตัวอย่าง พบว่าค่าดัชนีหักเหมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของ CoO ที่เพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 1.5534 ± 0.0001 ถึง 1.5665 ± 0.0001 นั้นสามารถสันนิฐานได้ว่าแก้วที่มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นทำให้ช่องว่างของโครงสร้างอะตอมมีค่าลดลง ทำให้แสงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางได้ช้าลงส่งผลให้ค่าดรัชนีหักเหเพิ่มขึ้นตามสมการ $n = \frac{c}{v}$ โดยมีลักษณะเช่นเดียวกับความสัมพันธ์ของความหนาแน่น เป็นไปตามหลักทฤษฎีไดอิเล็กตริกแบบดั้งเดิม ซึ่งค่าดรรชนีหักเหจะขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่น และสภาพการเกิดขั้วได้ของอะตอมในวัสดุ และเมื่อนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหกับความเข้มข้นของแก้วที่เติม CoO ดังแสดงในรูปที่ 4 กราฟที่ได้มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9978

ตารางที่ 2 ค่าความหนาแน่นและค่าปริมาตรเชิงโมลของแก้วที่เติม CoO ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ความเข้มข้นของ CoO (ร้อยละโดยโมล)	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	ปริมาตรเชิงโมล (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล)	ค่าดัชนีหักเห
0.00	2.6100 ± 0.0001	28.7215	1.5534 ± 0.0001
0.01	2.6124 ± 0.0001	28.6984	1.5566 ± 0.0001
0.02	2.6154 ± 0.0000	28.6696	1.5587 ± 0.0001
0.03	2.6173 ± 0.0000	28.6525	1.5613 ± 0.0001
0.04	2.6190 ± 0.0001	28.6366	1.5639 ± 0.0000
0.05	2.6226 ± 0.0001	28.6015	1.5665 ± 0.0001



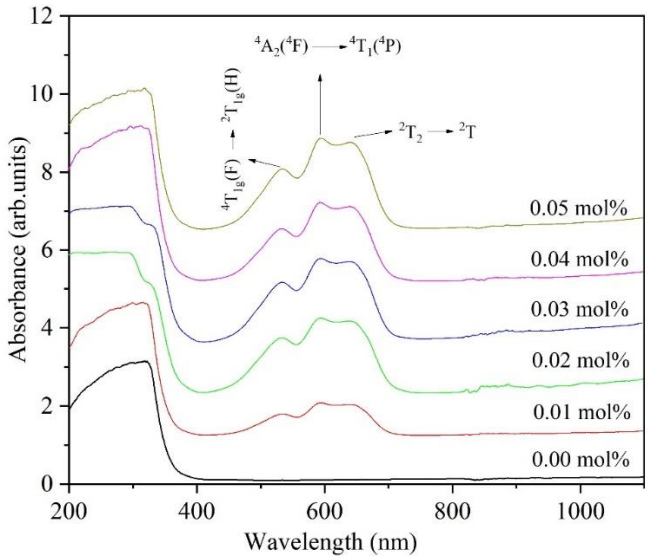
ภาพที่ 3 ค่าความหนาแน่นและค่าปริมาตรเชิงโมลของแก้วที่เติม CoO ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ



ภาพที่ 4 ค่าดัชนีหักเหของแก้วที่เติม CoO ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ผลการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสง (absorption spectra)

จากการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 200 – 1,100 นาโนเมตร ของแก้วตัวอย่างที่เติมออกไซด์ของ CoO ที่มีความเข้มข้น 0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 ร้อยละโดยโมล พบว่าพีคของค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 200 – 1,100 นาโนเมตร พบว่าพีคของค่าการดูดกลืนแสงของไอออน Co ที่ความยาวคลื่นประมาณ 539, 597 และ 643 นาโนเมตร ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนชั้นพลังงานจากชั้น $^4T_{1g}$ (F) $\longrightarrow$ $^2T_{1g}$(H) $^4A_2$ (^{4}F) $\longrightarrow$ $^4T_1$(^{4}P) และ $^2T_2 \longrightarrow {}^2T$ ตามลำดับ และจะมีความเข้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของปริมาณ CoO ที่เพิ่มมากขึ้น ดังภาพที่ 5



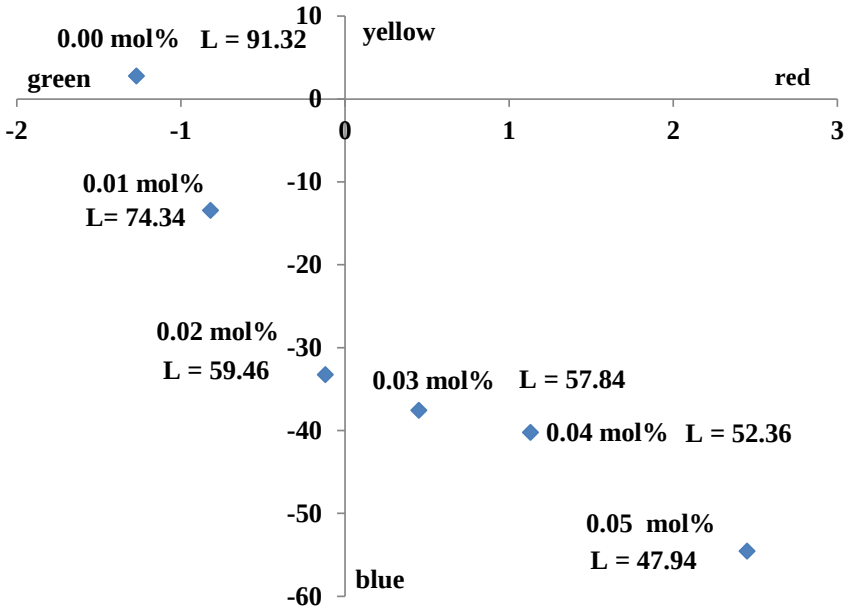
ภาพที่ 5 สเปกตรัมการดูดกลืนของแก้วที่เติม CoO ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ผลการวิเคราะห์สีในระบบ CIE L*a*b*

จากการวิเคราะห์สีในระบบ CIE L*a*b* ของแก้วตัวอย่างที่เติมออกไซด์ของ CoO ที่มีความเข้มข้น 0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 ร้อยละโดยโมล พบว่าค่าความสว่าง (L*) มีค่าลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของ CoO จะมีค่าอยู่ระหว่าง 47.94 - 91.32 โดยค่า a* จะมีค่าอยู่ระหว่าง -1.27 ถึง 2.45 ส่วนค่า b* จะมีค่าอยู่ระหว่าง -54.56 ถึง 2.78 ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยค่าสีมีพิกัดอยู่ในแกน –a และ +b ซึ่งเป็นพิกัดของแกนสีแดง และน้ำเงิน แต่มีค่าทางสีน้ำเงินมากกว่าแดง จึงทำให้แก้วตัวอย่างมีสีน้ำเงิน จะได้กราฟแสดงดังภาพที่ 6

ตารางที่ 3 ค่าสีของแก้วที่เติม CoO ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ความเข้มข้นของ CoO (ร้อยละโดยโมล)	Color measurement		
	L*	a*	b*
0.00	91.32	-1.27	2.78
0.01	74.34	-0.82	-13.45
0.02	59.46	-0.12	-33.24
0.03	57.84	0.45	-37.57
0.04	52.36	1.13	-40.23
0.05	47.94	2.45	-54.56



ภาพที่ 6 ค่าสีระบบ CIE L*a*b* ของแก้วที่เติม CoO ที่ความเข้มข้นต่างๆ

การเปรียบเทียบค่าสีของอัญมณีอาวีนจริงในธรรมชาติกับแก้วที่พัฒนาขึ้น

จากฐานข้อมูลค่าสีของอัญมณีในธรรมชาติของ The International Gem Society (IGS) [8] พบว่าอาวีนจริงในธรรมชาติ นั่นมีสีออกน้ำเงินโดยมีค่า L* อยู่ที่ประมาณ 52 ค่า a* อยู่ที่ประมาณ 1 และ ค่า b* อยู่ที่ประมาณ -40 ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าสีของแก้วตัวอย่างจากตารางที่ 3 พบว่าแก้วที่เติม CoO ที่ความเข้มข้น 0.04 ร้อยละโดยโมล มีค่า L* อยู่ที่ 52.36 ค่า a* อยู่ที่ 1.13 และ ค่า b* อยู่ที่ -40.23 มีค่าสีที่ใกล้เคียงกับอาวีนจริงในธรรมชาติดังภาพที่ 7 ค่าความหนาแน่นของอัญมณีอยู่ที่ประมาณ 2.40-2.50 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร แก้วที่เติม CoO ที่ความเข้มข้น 0.04 ร้อยละโดยโมล มีค่าความหนาแน่นอยู่ที่ 2.6190 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าดัชนีหักเหของอัญมณีอยู่ที่ประมาณ 1.5 แก้วที่เติม CoO ที่ความเข้มข้น 0.04 ร้อยละโดยโมล มีค่าดัชนีหักเหอยู่ที่ 1.5639 ค่าความแข็งของอัญมณีอยู่ที่ประมาณ 5-6 โมห์สเกล [9-10] และลักษณะทางกายภาพมีความสอดคล้องกัน ดังแสดงในตารางที่ 4

1. อัญมณีอาวีน

2.แก้วที่เติม CoO ที่ความเข้มข้น 0.04 ร้อยละโดยโมล

ภาพที่ 7 การเปรียบเทียบค่าสีของอัญมณีอาวีนจริงในธรรมชาติกับแก้วที่พัฒนาขึ้น

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบสมบัติของอัญมณีอาวีนกับการพัฒนาแก้วตัวอย่าง

คุณสมบัติ	อัญมณีอาวีน	แก้วที่เติม CoO ที่ความเข้มข้น 0.04 ร้อยละโดยโมล
L	52	52.36
a*	1	1.13
b*	-40	-40.23
ค่าความแข็ง (โมห์สเกล)	5-6	5.5
ค่าความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	2.4-2.5	2.6190
ค่าดัชนีหักเห	1.5	1.5639

ผลการวิเคราะห์ค่าความแข็งในระบบโมห์สเกล

จากการวิเคราะห์หาค่าความแข็งของแก้วตัวอย่างที่เติมออกไซด์ของ CoO ที่มีความเข้มข้น 0.00, 0.01, 0.02 0.03, 0.04 และ 0.05 ร้อยละโดยโมล พบว่าค่าความแข็งของตัวอย่างแก้วมีค่าประมาณ 5.5 โมห์สเกล ซึ่งเทียบได้กับความแข็งของอะพาไทต์ และยังพบอีกว่าการเติมออกไซด์ของ CoO ลงในโครงสร้างแก้ว จะไม่มีผลต่อค่าความแข็งของแก้ว

4.สรุปผลการวิจัย

ในการทดลองนี้ทางผู้วิจัยดำเนินการพัฒนาอัญมณีอาวีนประดิษฐ์จากวัสดุแก้วที่ใช้ขี้เถ้าแกลบในจังหวัดสุพรรณบุรี จากนั้นทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุในขี้เถ้าแกลบด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์รังสีเอ็กซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Fluorescence-EDXRF) ของบริษัท Panalytical รุ่น Minipal-4 พบว่าขี้เถ้าแกลบของโรงสีนั้นมีปริมาณ SiO_2 ค่อนข้างสูง (มากกว่าร้อยละ 90) แต่ทั้งนี้ยังมีองค์ประกอบอื่น ๆ ที่สำคัญซึ่งอาจส่งผลต่อการเกิดสีในแก้วได้ เช่น แมงกานีส (Mn) เหล็ก (Fe) นิเกิล (Ni) และ ทองแดง (Cu) จากนั้นผู้วิจัยจึงได้วางแผนพัฒนาสูตรแก้วใสให้มีสี โดยการเติมออกไซด์ของ Co เข้าไปในโครงสร้างแก้วเพื่อศึกษาสมบัติการเกิดสี ตามอัตราส่วนของสาร $(55\text{-}x)SiO_2$: $13B_2O_3$: $20Na_2O$: $6.3CaO$: $0.2Sb_2O_3$: $1Al_2O_3$: $4.5BaO$: $xCoO$ ร้อยละโดยโมล เมื่อ x คือ ความเข้มข้นของ CoO มีค่า 0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 ร้อยละโดยโมล โดยให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องจนถึงอุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำแก้วที่เย็นตัวแล้วไปขัดให้มีขนาด $1.0 \times 1.5 \times 0.3$ ลูกบาศก์เซนติเมตร เพื่อนำไปวิเคราะห์สมบัติ ได้แก่ ค่าความหนาแน่น ค่าปริมาตรเชิงโมล ค่าดัชนีหักเห ค่าการดูดกลืนแสง ค่าสี และค่าความแข็งของแก้วตัวอย่าง แก้วตัวอย่างที่ได้มีลักษณะใส ไม่มีสีในแก้วที่ไม่เติม CoO และมีสีน้ำเงินเข้มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของ CoO ที่เพิ่มมากขึ้น จากผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ และทางแสงของตัวอย่างแก้ว จะพบว่าแก้วตัวอย่างที่เติม CoO ที่ความเข้มข้น 0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 ร้อยละโดยโมล พบว่าค่าความหนาแน่นและค่าดัชนีหักเห มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของ CoO ที่เพิ่มมากขึ้น ส่วนปริมาตรเชิงโมลมีค่าลดลงส่วนทางกับปริมาณความเข้มข้นของ CoO ที่เพิ่มมากขึ้น โดยมีค่าความแข็งอยู่ที่ 5.5 โมห์สเกล ในการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสง

ในช่วงความยาวคลื่น 200 – 1,100 นาโนเมตร พบว่าพีคของค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 539, 597 และ 643 นาโนเมตร ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนชั้นพลังงานจากชั้น $^4T_{1g}$ (F) $\rightarrow$ $^2T_{1g}$(H) $^4A_2$ (^{4}F) $\rightarrow$ $^4T_1$(^{4}P) และ $^2T_2 \rightarrow {}^2T$ ตามลำดับ การวิเคราะห์ค่าสีของแก้วตัวอย่าง พบว่าค่า a* จะมีค่าอยู่ระหว่าง -1.27 ถึง 2.45 ส่วนค่า b* จะมีค่าอยู่ระหว่าง -54.56 ถึง 2.78 โดยจะอยู่ในช่วงสีน้ำเงิน ทั้งนี้เมื่อทำการนำค่าสีไปเปรียบเทียบกับค่าสีของอาวีนจริงในธรรมชาติ พบว่าแก้วที่เติม CoO ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.04 โดยโมล มีค่า L* อยู่ที่ 52.36 ค่า a* อยู่ที่ 1.13 และ ค่า b* อยู่ที่ -40.23 มีค่าสีที่ใกล้เคียงกับอาวีนจริงในธรรมชาติ และลักษณะทางกายภาพที่ความสอดคล้องกัน

5.กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ที่ให้การสนับสนุนงบรายได้จากมหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ประจำปีงบประมาณ 2567 ภายใต้โครงการวิจัยบูรณาการนักศึกษาและอาจารย์เพื่อการพัฒนาท้องถิ่นและความเป็นเลิศทางวิชาการ ปีงบประมาณ 2567

6.เอกสารอ้างอิง

[1] 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.

[2] 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.

[3] 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 Li_2SO_4–MgO–P_2O_5 glass system by means of acoustic wave propagation”, Solid State Communications, Vol 330, 114270

[4] G. Ravi Kumar and et al. Role of Mn^{2+} ions on optical and luminescent properties of LiF–Sb_2O_3–ZnO–B_2O_3–SiO_2 glasses. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 170 (2018) 156–165.

[5] V. Volpi and et al. Optical and structural properties of Mn^{2+} doped $PbGeO_3$–$SbPO_4$ glasses and glass–ceramics. Journal of Non-Crystalline Solids, 431 (2016) 135–139

[6] Wufu Tang, Qian Zhang, Zhiwei Luo, Jingbo Yu, Xianglong Gao, Yunxing Li, Anxian Lu, CoO-doped MgO–Al2O3–SiO2-colored transparent glass–ceramics with high crystallinity, https://doi.org/10.1007/s00339-017-1537-6

[7] Y.H. Elbashar, Diaa Rayan, Shimaa G. ElGabaly, A.A. Mohamed, Optical Spectroscopic Study of Cobalt Oxide Doped Boron Glass and Its Ion Effect on Optical Properties, http://ejchem.journals.ekb.eg/

[8] 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)

[9] The GEMSTONE DENSITY Search for, (2024 June 30), https://sosnagems.com/pages/guide-gemstone-density (In Thai)

[10] Lore Kiefert and H. A. Hänni, GEM-QUALITY HAÜYNE FROM THE EIFEL DISTRICT, GERMANY, Gem-Quality Haüyne From the Eifel District, Germany (gia.edu)