การพัฒนาแก้วสีน้ำเงินในระบบแก้วโซดาไลม์จากเศษแก้วเหลือใช้

วีรวัต บุญพา[1], สายธาร บูชา[2] และ กีรติ เกิดศิริ[1,3*]

[1]สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
[2]สาขาวิชาฟิสิกส์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
[3]ศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีแก้วและวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
[*]keyrati@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาตัวอย่างแก้วสีน้ำเงินในระบบโซดาไลม์โดยใช้เศษแก้วเหลือใช้ที่เจือด้วยโคบอลต์ออกไซด์ (CoO) ในปริมาณที่แตกต่างกัน แล้วศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางแสง ผลการวิจัยพบว่าค่าความหนาแน่นและค่าดัชนีหักเหของตัวอย่างแก้วมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ CoO ในขณะที่ค่าปริมาตรเชิงโมลจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของ CoO ในระบบแก้ว การวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนแสงพบพีคการดูดกลืน ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 525, 625 และ 725 นาโนเมตร นอกจากนี้พบว่าสีของตัวอย่างแก้วสอดคล้องกับค่าพารามิเตอร์ในระบบ CIE L^*a^*b ดังนั้นผลงานวิจัยนี้จึงเป็นแนวทางในการนำเศษแก้วเหลือใช้จากครัวเรือนมาใช้ให้เกิดประโยชน์ และยังช่วยลดปริมาณขยะเศษแก้วเหลือใช้ได้อีกด้วย

คำสำคัญ: แก้วโซดาไลม์ แก้วสี เศษแก้วเหลือใช้ สมบัติทางแสง

The Development of Deep Blue Colored Glasses in Soda Lime Glass Matrix from Glass Waste

Weerawat Boonpa[1], Saitan Boocha[2], and Keerati Kirdsiri[1,3*]

[1]Science and Physics Program, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University, 73000 Thailand

[2]Industrial Physics Program, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University, 73000 Thailand

[3]Center of Excellence in Glass Technology and Materials Science, Nakhon Pathom Rajabhat University, 73000 Thailand

[*]keyrati@hotmail.com

Abstract

This research work has been developed the deep blue colored glasses in soda lime glass systems doped with different CoO content by using glass waste as the substance and has been studied their physical and optical properties. The results showed that density and refractive index values tended to be increased along with increasing of CoO content. Whereas, the molar volume decreased with increasing of CoO content in glass matrix. The absorption spectra of glass sample showed three absorption peaks at wavelengths of approximately 525, 625 and 725 nm. The emission spectra of the glasses were illustrated the highest emission intensity at 613 nm wavelength. Moreover, the color of glasses associated with the parameter in the CIE L^*a^*b color coordinate. Hence, the results from this research could imply as a new way to recycle household glass waste and also helpsreduce the amout of glass waste.

Keywords: soda lime glass, colored glass, glass waste, optical properties

1. บทนำ

ประเทศไทยเป็นหนึ่งในประเทศหลักที่มีการส่งออกผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับแก้วและกระจกติดอันดับโลก โดยข้อมูลในปี พ.ศ. 2563 ประเทศไทยได้ส่งออกผลิตภัณฑ์กระจกมีมูลค่ากว่า 165 ล้านเหรียญสหรัฐ (กรมเจรจาการค้าระหว่างประเทศ, 2563) อุตสาหกรรมแก้วและกระจกนับว่าเป็นอุตสาหกรรมที่ทำเงินรายได้เข้าสู่ประเทศจำนวนมากอย่างต่อเนื่อง อีกทั้งประเทศไทยถือเป็นศูนย์กลางการผลิตแก้วและกระจกของภูมิภาคอาเซียนที่มีบริษัทขนาดใหญ่ ขนาดกลางและขนาดเล็ก จำนวนมากกว่า 200 โรงงาน นับได้ว่าอุตสาหกรรมแก้วเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานที่สำคัญต่อการพัฒนาและการเติบโตของเศรษฐกิจ เนื่องจากมีหลาย

อุตสาหกรรมที่จำเป็นต้องพึ่งพาชิ้นส่วนจากวัสดุแก้ว เช่น อุตสาหกรรมก่อสร้าง อุตสาหกรรมรถยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม เป็นต้น นอกจากนี้ตัวเลขการส่งออกเฉพาะผลิตภัณฑ์แก้ว ขวด และเครื่องแก้วบนโต๊ะอาหาร มีแนวโน้มขยายตัวร้อยละ 20-30 ซึ่งคิดเป็นมูลค่ารายได้ที่เข้าสู่ประเทศกว่าอีกหลายพันล้านบาท (กรมเจรจาการค้าระหว่างประเทศ, 2563; พัชรินทร์ รัตนพงศ์ภิญโญ, 2561) นอกจากนี้วัสดุแก้วยังมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ทั้งหมด (Pietrzak et al., 2019)

จากข้อมูลเบื้องต้นของโรงงานแปรรูปกระจกชั้นนำของประเทศ พบว่า ในแต่ละเดือนจะมีเศษกระจกเหลือทิ้งที่ต้องขายคืนให้กับโรงงานหลอมกว่า 40 ตัน หรือปีละกว่า 400 ตัน (สยามธุรกิจ, 2560) โดยทั่วไปเศษแก้วที่เหลือในกระบวนการขึ้นรูปและแปรรูปกระจก มักถูกขายกลับสู่โรงงานหลอมแก้วเพื่อนำกลับไปรวมกับวัตถุดิบในการหลอมครั้งใหม่ ซึ่งจะช่วยประหยัดพลังงานและต้นทุนในกระบวนการหลอม แต่อย่างไรก็ตาม มูลค่าของเศษแก้วที่ขายกลับให้โรงงานหลอมแก้วนั้นมีราคาค่อนข้างต่ำ (ทั้งนี้ขึ้นกับประเภทของผลิตภัณฑ์ เช่น เศษแก้วจากขวดแก้วจะมีราคาประมาณ 50-130 USD ต่อตัน) จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าเศษแก้วเหลือใช้นั้นจะเป็นแก้วโซดาไลม์ที่มีส่วนประกอบหลักเป็น SiO_2, Na_2CO_3 และ CaO ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้หากมีการเติมสารที่เหมาะสมอาจพัฒนาไปเป็นวัสดุชนิดอื่นๆ ได้ (Testa et al., 2017)

แก้วสี (colored glass) เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมหลายหลาย ไม่ว่าจะเป็นการใช้ประโยชน์ด้าน วิทยาศาสตร์ ซึ่งอาศัยสมบัติการดูดกลืนแสงในช่วงตามองเห็นที่แตกต่างกันเป็นหลัก หรือการใช้ประโยชน์ในวงการของตกแต่ง เครื่องประดับ และศิลปะ เป็นต้น ซึ่งผลิตภัณฑ์จากแก้วสีทั้งหมดที่กล่าวมามีมูลค่าทางเศรษฐกิจสูงมากให้ประเทศไทยในแต่ละปี

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการเตรียมแก้วสีน้ำเงินในระบบโซดาไลม์ซิลิเกตโดยใช้เศษแก้วเหลือทิ้งเป็นวัตถุดิบ แล้วศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางแสง เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเศษแก้วเหลือทิ้งในอุตสาหกรรมต่างๆ มาประยุกต์ใช้ในงานด้านอื่นๆ ในอนาคต

2. วิธีดำเนินงานวิจัย

2.1 การเก็บตัวอย่างเศษแก้วเหลือใช้

ในงานวิจัยนี้ ตัวอย่างเศษแก้วเหลือใช้ถูกรวบรวมจากขวดบรรจุภัณฑ์ใสแบบต่างๆ ที่ถูกใช้งานทั่วไปตามครัวเรือน จากนั้นผู้วิจัยจึงนำขวดบรรจุภัณฑ์มาล้างทำความสะอาดและผึ่งให้แห้ง แล้วจึงทำมาบดให้เป็นเศษแก้วเล็กๆ ด้วยเครื่องบด เพื่อนำไปศึกษาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง X-ray fluorescence spectrometry (XRF)

2.2 การเตรียมตัวอย่างแก้วสีน้ำเงินจากเศษแก้วเหลือใช้

เมื่อผู้วิจัยทราบถึงองค์ประกอบทางเคมีของเศษแก้วตัวอย่างแล้ว จึงทำการออกแบบสูตรแก้วใสและทดลองเตรียมตัวอย่างแก้วใสจากเศษแก้วเหลือใช้ ซึ่งสูตรแก้วใสที่เตรียมได้ คือ $55SiO_2$ - $15Li_2O$ - $20Na_2O$ - CaO หลังจากนั้นผู้วิจัยจึงนำสูตรแก้วใสข้างต้นมาเจือด้วยโคบอลต์ออกไซด์ (CoO) ในปริมาณที่แตกต่างกันเพื่อเตรียมตัวอย่างแก้วสีน้ำเงิน ซึ่งปริมาณของโคบอลต์ออกไซที่จะเจือในสูตรแก้ว คือ 0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 mol% ตามลำดับ

ในลำดับต่อมา ผู้วิจัยจะเตรียมตัวอย่างแก้วสีน้ำเงินด้วยเทคนิคการหลอมแล้วทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว (melt quenching method) ที่อุณหภูมิ 1200 $^{\circ}C$ โดยสารเคมีตั้งต้นที่ใช้ ได้แก่ ลิเทียมคาร์บอเนต (Li_2CO_3), โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3), แคลเซียมคาร์บอเนต (Ca_2CO_3) โคบอลต์ออกไซด์ (CoO) พร้อมทั้งใช้เศษแก้วเหลือใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และปริมาณสารเคมีที่ถูกชั่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1

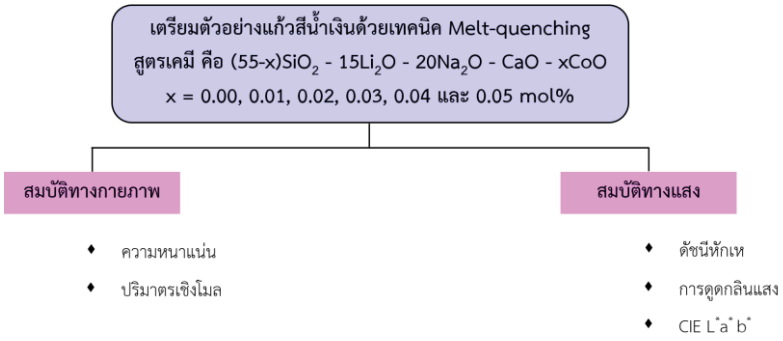
ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยขอไม่กล่าวถึงกระบวนการเตรียมตัวอย่างแก้วด้วยเทคนิคการหลอมแล้วทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งสามารถศึกษาได้ในงานวิจัยก่อนหน้าของคณะผู้วิจัย (Meejitpaisan et al., 2012; Srisittipokakun et al., 2011) เมื่อได้ตัวอย่างแก้วสีน้ำเงินแล้ว ผู้วิจัยจึงนำตัวอย่างแก้วไปตัดและขัดให้มีขนาด 1.0 × 1.5 × 0.3 cm^3 เพื่อให้เหมาะสมต่อการศึกษาสมบัติด้านต่างๆ ต่อไป

ตารางที่ 1 ปริมาณของสารเคมีที่จะต้องเตรียมเพื่อใช้เตรียมตัวอย่างแก้วสีน้ำเงิน

สูตร (55-x)SiO_2 - 15Li_2O - 20Na_2O - CaO - xCoO					
Concentration of CoO (mol%)	ปริมาณสารเคมีที่ต้องชั่ง (กรัม)				
	SiO_2	Li_2CO_3	Na_2CO_3	$CaCO_3$	CoO
0.00	11.9017	3.9918	7.6344	3.6047	0.0000
0.01	11.8996	3.9918	7.6344	3.6047	0.0027
0.02	11.8974	3.9918	7.6344	3.6047	0.0054
0.03	11.8952	3.9918	7.6344	3.6047	0.0081
0.04	11.8931	3.9918	7.6344	3.6047	0.0108
0.05	11.8909	3.9918	7.6344	3.6047	0.0135

2.3 การวิเคราะห์สมบัติของตัวอย่างแก้ว

การวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของตัวอย่างแก้วสีน้ำเงินที่ถูกเตรียมในงานวิจัยนี้สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 1 โดยสมบัติหลักๆ ที่จะทำการวิเคราะห์ ได้แก่ สมบัติทางกายภาพ (physical property) และสมบัติทางแสง (optical property) และกระบวนการวิเคราะห์ทุกขั้นตอนจะดำเนินงานที่อุณหภูมิห้อง



ภาพที่ 1 แผนผังการวิเคราะห์สมบัติของตัวอย่างแก้ว

2.3.1 สมบัติทางกายภาพ

ตัวอย่างแก้วที่เตรียมได้จะถูกนำมาศึกษาสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความหนาแน่น (density) และปริมาตรเชิงโมล (molar volume) สำหรับการวิเคราะห์สมสำหรับค่าความหนาแน่นสามารถวิเคราะห์ได้จากหลักการของอาร์คิมีดีส ซึ่งจะชั่งมวลของตัวอย่างแก้วในอากาศและในน้ำ ด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง รุ่น HR-200 ของบริษัท AND แล้วนำค่าความหนาแน่นที่วิเคราะห์ได้ไปคำนวณหาค่าปริมาตรเชิงโมล ซึ่งขั้นตอนการวิเคราะห์และสมการที่ใช้ในการคำนวณความหนาแน่นและปริมาตรเชิงโมล สามารถศึกษาได้ในงานวิจัยก่อนหน้าของคณะผู้วิจัย (Meejitpaisan et al., 2012; Srisittipokakun et al., 2011)

2.3.2 สมบัติทางแสง

สำหรับการศึกษาสมบัติทางแสงของแก้วตัวอย่างนั้น ผู้วิจัยจะศึกษาค่าดัชนีหักเห (refractive index) ด้วยเครื่อง Abbe refractometer ศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสง (absorption spectra) โดยใช้เครื่อง UV-VIS-NIR Spectrophotometer รุ่น UV-3600 และศึกษาสีของตัวอย่างแก้วในระบบ CIE $L^*a^*b^*$ ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer รุ่น Cary50

3. ผลการวิจัย

3.1 องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างเศษแก้วเหลือใช้

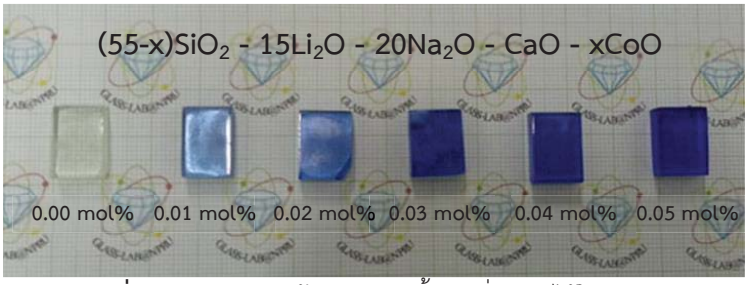
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเศษแก้วเหลือใช้ด้วยเครื่อง X-ray fluorescence spectrometry แสดงในตารางที่ 2 พบว่าเศษแก้วเหลือใช้มีองค์ประกอบหลักเป็นสารประกอบซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) และยังประกอบด้วยสารประกอบออกไซด์อื่นในปริมาณเพียงเล็กน้อย ดังนั้นจึงสามารถใช้เศษแก้วตัวอย่างมาใช้เป็นวัตถุดิบในการเตรียมตัวอย่างแก้วสีน้ำเงินได้

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของเศษแก้วเหลือใช้

ชนิดของสารประกอบออกไซด์ที่เป็นองค์ประกอบ	ปริมาณของสารประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
SiO_2	83.019
Na_2O	4.906
CaO	9.578
Fe_2O_3	0.148
ZnO	1.057
As_2O_3	1.291

3.2 ลักษณะของตัวอย่างแก้วสีน้ำเงินที่เตรียมได้

ตัวอย่างแก้วสีน้ำเงินในระบบแก้วโซดาไลม์ที่เตรียมได้จากสูตร $(55\text{-}x)SiO_2 - 15Li_2O - 20Na_2O - CaO - xCoO$ จะมีลักษณะโปร่งแสง ผิวเรียบมัน และมีสีน้ำเงิน ทั้งนี้ความเข้มของสีน้ำเงินเข้มจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ CoO ที่เจือในระบบแก้วโซดาไลม์

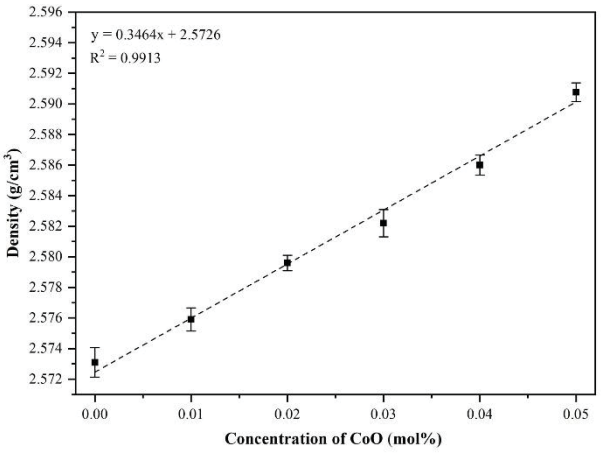


ภาพที่ 2 ลักษณะของแก้วตัวอย่างสีน้ำเงินที่เตรียมได้ในงานวิจัย

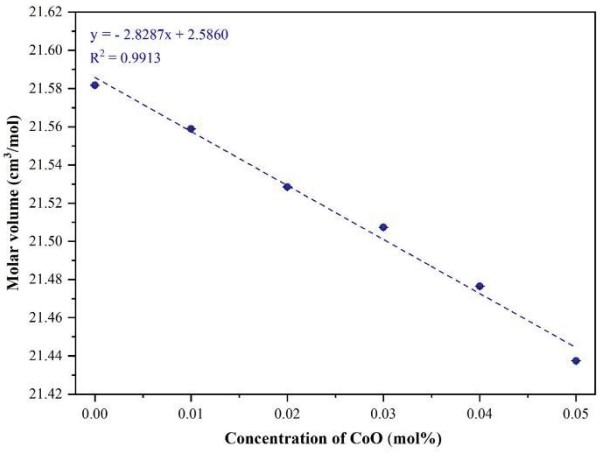
3.3 สมบัติทางกายภาพ

ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นของตัวอย่างแก้วโซดาไลม์ที่เจือด้วย CoO ที่ปริมาณความเข้มข้น 0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 mol% พบว่าค่าความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณความเข้มข้นของ

CoO โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหพันธ์เท่ากับ 0.99 ซึ่งสาเหตุการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นนั้นเนื่องจากการแทนที่ของสารประกอบซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ที่มีมวลโมเลกุล 60.0843 กรัมต่อโมล ด้วยโคบอลต์ออกไซด์ (CoO) ที่มีมวลโมกุลมากกว่า (มีมวลโมเลกุล 74.9326 กรัมต่อโมล) สำหรับค่าปริมาตรเชิงโมลนั้นจะลดลงเมื่อปริมาณของ CoO เพิ่มขึ้น ชี้ให้เห็นว่าโครงข่ายของตัวอย่างแก้วจะแน่นขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของ CoO



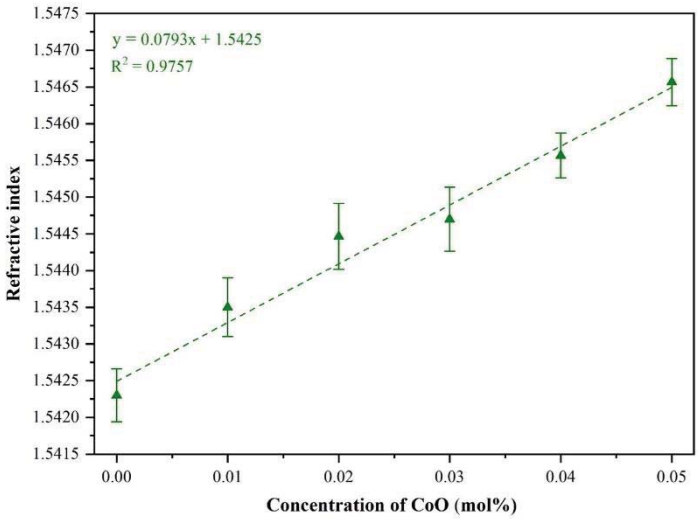
ภาพที่ 3 ความหนาแน่นของตัวอย่างแก้วสีน้ำเงิน เมื่อเจือด้วย CoO ในปริมาณที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 4 ปริมาตรเชิงโมลของตัวอย่างแก้วสีน้ำเงิน เมื่อเจือด้วย CoO ในปริมาณที่แตกต่างกัน

3.4 สมบัติทางแสง

ผลการวิเคราะห์ค่าดัชนีหักเหแสงของตัวอย่างแก้วสีน้ำเงิน จะพบว่าค่าดัชนีหักเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณความเข้มข้นของ CoO เพิ่มขึ้น โดยค่าดัชนีหักเหมีค่าอยู่ช่วง 1.5423 ± 0.0010 ถึง 1.5466 ± 0.0013 ดังแสดงในภาพที่ 5

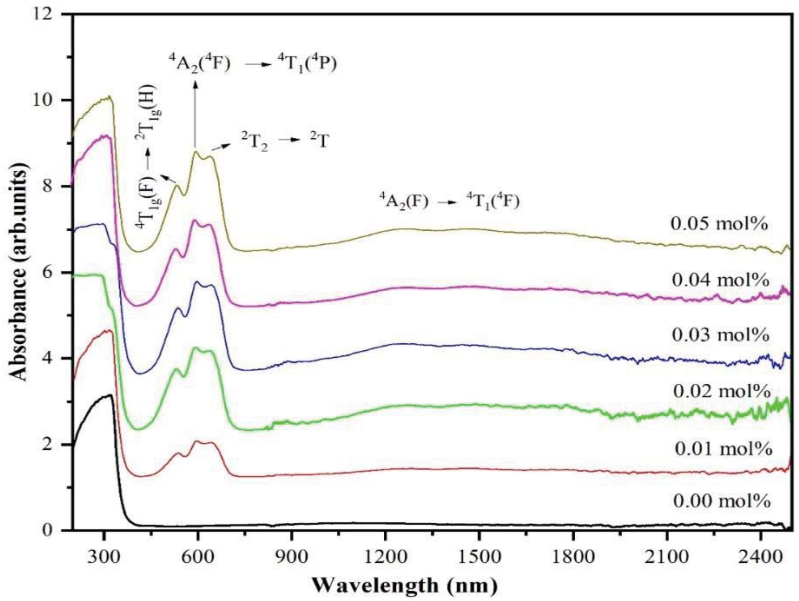


ภาพที่ 5 ค่าดัชนีหักเหตัวอย่างแก้วสีน้ำเงิน เมื่อเจือด้วย CoO ในปริมาณที่แตกต่างกัน

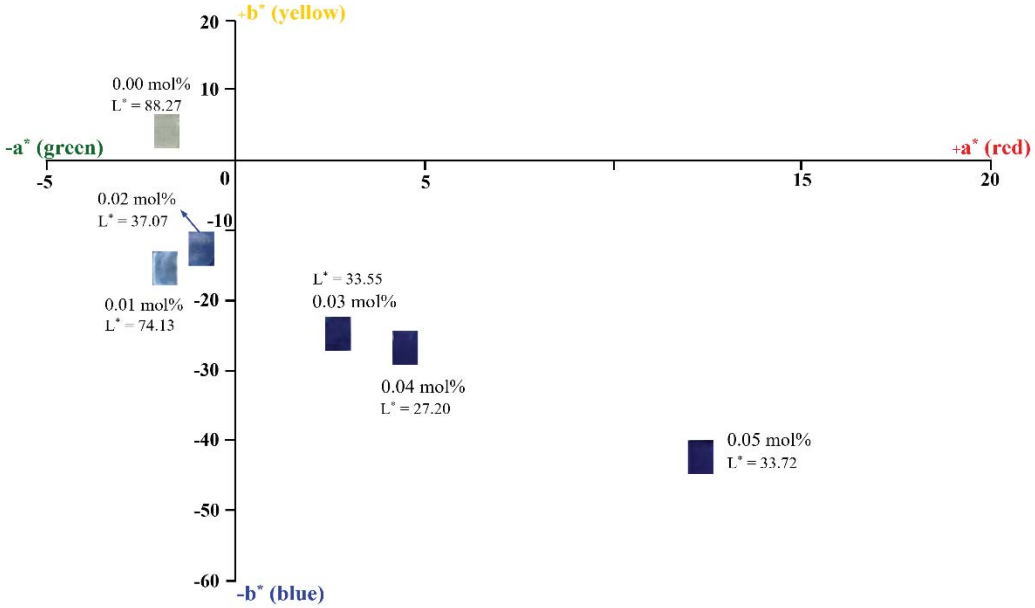
สำหรับสเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 200-2500 นาโนเมตร ของตัวอย่างแก้วที่เติม CoO ที่มีความเข้มข้นต่างกัน จะพบพีคการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ 525, 625 และ 725 นาโนเมตร ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลง

ระดับพลังงานของ CoO จากสถานะพื้นไปยังสถานกระตุ้นต่างๆ $^4T_{1g}(F) \rightarrow {}^2T_{1g}(H)$, $^4A_2(4F) \rightarrow {}^4T_1(4P)$ และ $^2T_2 \rightarrow {}^2T$ ตามลำดับ นอกจี้นี้ยังพบว่าลักษณะของพีคการดูดกลืนจะมีลักษณะที่แหลมคมขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณความเข้มข้น CoO

สำหรับผลการวิเคราะห์ค่าสีของตัวอย่างแก้วสีน้ำเงินในระบบ CIE $L^*a^*b^*$ ดังแสดงในภาพที่ 7 พบว่าตัวอย่างแก้วจะมีค่าความสว่าง L^* (lightness) อยู่ระหว่าง 33.55 ถึง 88.27 ค่าของ a^* มีค่าอยู่ระหว่าง -1.87 ถึง 12.32 และค่าของ b^* มีค่าอยู่ระหว่าง -42.35 ถึง 4.13 ซึ่งการผสมกันระหว่างค่า a^* และค่า b^* ในระบบ CIE $L^*a^*b^*$ ทำให้สายตามนุษย์มองเห็นตัวอย่างแก้วมีสีน้ำเงิน นอกจากนี้ การเพิ่มความเข้มข้นของ CoO จะทำให้ค่าความสว่างของตัวอย่างแก้วมีแนวโน้มลดลงจึงสังเกตเห็นตัวอย่างแก้วมีสีน้ำเงินเข้มขึ้น



ภาพที่ 6 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างแก้วสีน้ำเงิน เมื่อเจือด้วย CoO ในปริมาณที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 7 ค่าสีของตัวอย่างแก้วสีน้ำเงินในระบบ CIE $L^*a^*b^*$

4. สรุปผลการวิจัย

ตัวอย่างแก้วสีน้ำเงินที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้ถูกเตรียมจากเศษแก้วเหลือใช้ด้วยสูตรเคมี คือ (55-x)SiO_2 - 15Li_2O - 20Na_2O - CaO - xCoO เมื่อ x คือปริมาณของ CoO ที่มีค่าตั้งแต่ 0.00 ถึง 0.05 mol% ผลการวิจัยพบว่าค่าความหนาแน่นและค่าดัชนีหักเหของตัวอย่างแก้วมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ CoO ในขณะที่ค่าปริมาตรเชิงโมลมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของ CoO ในระบบแก้ว การวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนแสงพบพีคการดูดกลืนในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 525, 625 และ 725 นาโนเมตร นอกจากนี้พบว่าค่าสีของตัวอย่างแก้วสีน้ำเงินในระบบ CIE $L^*a^*b^*$ จะมีค่า L^* อยู่ระหว่าง 33.5498 ถึง 88.2742 ค่าของ a^* มีค่าอยู่ระหว่าง -1.8698 ถึง 12.3193 และค่าของ b^* มีค่าอยู่ระหว่าง -42.3362 ถึง 4.1306 ซึ่งสอดคล้องกับสีของตัวอย่างแก้วที่เตรียมได้ งานวิจัยนี้จึงเป็นแนวทางในการนำเศษแก้วเหลือใช้จากครัวเรือนมาใช้ให้เกิดประโยชน์

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีแก้วและวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ รวมถึงการอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

กรมเจรจาการค้าระหว่างประเทศ (2563). **มูลค่าสินค้าส่งออก-นำเข้าของไทย ปี 2563**. ค้นเมื่อ 1 เมษายน 2563 จาก https://www.dtn.go.th/th/trade-all?filter=yearly&filter_quatrer=4&filter_monthly=3&year=2020&cnyno= 302.

พัชรินทร์ รัตนพงศ์ภิญโญ. (2561). **ตลาดกระจกไทย...เริ่มฟื้น**. ค้นเมื่อ 1 เมษายน 2563 จาก https://sme.krungthai.com/sme/productListAction. ction?command=getDetail&cateMenuKNOWLEDGE&cateId=37&itemId=186

สยามธุรกิจ (2560). **ไทยเทคโนกลาส ใส่ใจสิ่งแวดล้อมนำเศษกระจกเหลือทิ้งต่อยอดสู่ผลิตภัณฑ์ใหม่ สร้างมูลค่าเพิ่ม**. ค้นเมื่อ 1 เมษายน 2563 จาก https://www.siamturakij.com/news/10787-.

Meejitpaisan, P., Kaewkhao, J., Limsuwan, P., and Kedkaew, C. (2012), Physical and optical properties of the SLS glass doped with low Cr_2O_3 concentrations, **Procedia Engineering**, 32, 787-792.

Pietrzak, A., and Ulewicz, M. (2019). The influence of addition of CRT Glass cullet on selected parameters of concrete composites, **IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.**, 214.

Srisittipokakun, N., Kirdsiri, K., Kaewkhao, J., Kedkaew, C., and Limsuwan, P. (2011). Absorption and coloration of MnO_2 doped in soda-lime-silicate and soda-lime-borate Glasses, **Procedia Engineering**, 8, 261-265.

Testa, M., Malandrino, O., Rosaria Sessa, M., Supino, S., and Sica, D. (2017). Long-Term Sustainability from the Perspective of Cullet Recycling in the Container Glass Industry: Evidence from Italy, **Sustainability**, 9 (10).