

การศึกษาค่าการดูดกลืนแสง ชนิดและปริมาณออกไซด์
ของธาตุในสารตัวอย่างแก้วสีต่างๆ
เพื่ออธิบายเชิงฟิสิกส์ของสีแก้วที่ปรากฏแตกต่างกัน
**The Study of Light Absorptance and Elemental
Oxides in Glass Samples for Physical
Descriptions of their Apparent in Different Colors**

นนทนัช วัฒนสุภิญญา *

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีความมุ่งหมายเพื่อศึกษาค่าการดูดกลืนแสงชนิดและปริมาณออกไซด์ของธาตุในตัวอย่างแก้วสีต่างๆ เพื่อมาใช้อธิบายเชิงฟิสิกส์ของสีแก้วที่ปรากฏแตกต่างกัน ทำการเลือกชิ้นตัวอย่างแก้ว ด้วยการกระแทกมาจากส่วนกันขวดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร ทั้งหมด 4 สี ได้แก่ แก้วสีขาว แก้วสีเขียว แก้วสีน้ำตาล และแก้วสีฟ้า ทำการวัดและวิเคราะห์ออกไซด์ของธาตุในแก้วตัวอย่างโดยใช้เทคนิคการร่วรังสีเอกซ์ชนิดกระจายความยาวคลื่น (Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence Technique : WDXRFS) โดยแก้วแต่ละสีจะมีธาตุที่ประกอบแตกต่างกัน พบว่าแก้วสีขาวนั้นมีปริมาณสารประกอบออกไซด์ที่เป็นธาตุหลักในการผลิตใกล้เคียงตามอัตราส่วนผสมหลักมาตรฐานในการผลิตแก้วที่ใช้เป็นภาชนะบรรจุแก้วใสไม่มีสี ซึ่งแตกต่างจากแก้วสีเขียวที่มีปริมาณโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) และเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ในแก้วสีเขียวมีปริมาณมากกว่าแก้วสีขาวอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสีเขียวที่ปรากฏเกิดจากกระบวนการที่เหล็ก (Fe^{2+}) เข้าแทนที่แมกนีเซียม (Mg^{2+}) ทำให้แก้วมีสีเขียว ซึ่งถ้าหากเพิ่มปริมาณเหล็ก (Fe^{2+}) มากขึ้น ก็จะส่งผลให้แก้วมีสีเขียวมากยิ่งขึ้น ในแก้วสีน้ำตาลมีปริมาณเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) และ แมงกานีสออกไซด์ (MnO) มากกว่าแก้วสีขาวอย่างชัดเจน จึงส่งผลให้เห็นแก้วเป็นสีน้ำตาลและในแก้วสีฟ้าพบว่ามีโคบอลต์ออกไซด์ (CoO) และแบเรียมออกไซด์ (BaO) เป็นส่วนประกอบซึ่งไม่พบในแก้วสีอื่น โดยโคบอลต์ออกไซด์ (CoO) เป็นส่วนประกอบที่ให้สีน้ำเงิน ศึกษาปริมาณค่าการดูดกลืนแสง (Light Absorption) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ที่ตกกระทบแก้วตัวอย่างขนาด 2×2 เซนติเมตร ในช่วงความคลื่นระหว่าง 350 - 950 นาโนเมตร โดยค่าการดูดกลืนของชิ้นตัวอย่างแก้วสีขาวมีค่าต่ำใกล้เคียงกันแต่ละช่วงความยาวคลื่น แก้วสีเขียวมีค่าการดูดกลืนแสงต่ำสุดที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นของแสงสีเขียว แก้วน้ำตาลมีค่าการดูดกลืนแสงสูงมากอย่างเด่นชัดที่ความยาวคลื่น

* อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิทยาศาสตร์ คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

400 นาโนเมตร เป็นช่วงความยาวคลื่นของแสงสีม่วง และส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 500-800 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นของแสงสีเขียว สีเหลือง สีแสดและสีแดง เกิดการผสมแสงสีดังกล่าวเป็นสีน้ำตาลปรากฏต่อสายตาที่มองเห็น และแก้วสีฟ้ามีค่าการดูดกลืนสูงในช่วง 500-700 นาโนเมตร ส่งผ่านแสงสีม่วงและสีน้ำเงินช่วงความยาวคลื่น 380-420 นาโนเมตร ซึ่งผลการทดลองและวิเคราะห์ที่ได้มีความสอดคล้องกับทฤษฎีทางฟิสิกส์ของสีที่ปรากฏ

คำสำคัญ : สารเจือ, การดูดกลืนแสง, สเปกตรัม, เทคนิคการวาวรังสีเอกซ์ชนิดกระจายความยาวคลื่น, ออกไซด์ของธาตุ

Abstract

The purpose of this research was to study the light absorptance and elements oxides in glass samples for physical description of their apparent in different colors. Glass samples were chose by cracking at bottom of a bottle, which has a diameter of 4 cm in four colors: white, green, brown, and blue. The elements oxides in glass samples were measured and analyzed by using wavelength dispersive x-ray fluorescence technique. Each glass color had different elements. The white glass had a compound oxide production as the main element in nearly proportional rate as the main ingredient finding in the manufacture of glass is colorless containers. Green glass and white glass were different, green glass ostensibly had Chromium Oxide (Cr_2O_3) and Iron Oxide (Fe_2O_3) more than white glass had. Green color, which results from the replacement of iron (Fe^{2+}) into magnesium (Mg^{2+}) enhances the amount of green color. If there was an increase in that particular amount of iron (Fe^{2+}) this can cause the intensity of green color of the glass. Brown glass ostensibly had Iron Oxide (Fe_2O_3) and Manganese Oxide (MnO) more than white glass. Consequently, the glass was brown color. Blue glass obtained Cobalt Oxide (CoO) component, which was not found in the other glass; as a result, the glass was blue color. The study of the light absorption in the incident of glass samples, size 2x2 cm, by spectrophotometer in the wavelength range of 350-950 nm revealed that the absorption of white glass was low similarly in each wavelength. The absorption of green glass was very low in the wavelength of 550 nm, which was the wavelength of green light. The absorption of brown glass was very high in the wavelength of 400 nm, which was the wavelength of violet light. The transmission in the wavelength rang of 500-800 nm, which was the wavelength of green, yellow, orange, and red light. All colors mixed together to make brown was to see. The absorption of blue glass was in the wavelength range of 500 - 700 nm, the wavelength of light violet and blue was transmitted in

the wavelength range of 380-420 nm. The results from the experiments and analysis were consistent with the theoretical physical description of their apparent colors.

Keywords : Impurity, Absorption, Spectrum, Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence Technique, Elements of Oxides

บทนำ

ปัจจุบันทุกประเทศทั่วโลกมีการแข่งขันในด้านการค้าสูง ไม่ว่าจะเป็นภายในประเทศหรือต่างประเทศ ต่างก็ต้องการที่จะเป็นผู้นำทางด้านการค้า เพราะฉะนั้นผู้ผลิตสินค้าจึงต้องพัฒนาสินค้าของตนเองอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้สามารถแข่งขันกับตลาดโลกหรือสินค้าจากบริษัทอื่นที่เป็นสินค้าชนิดและประเภทเดียวกัน เพื่อให้สินค้าของตนเองเป็นที่ยอมรับ บรรจุกฎภัณฑ์มีความสำคัญในอุตสาหกรรมการผลิต และมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อผลผลิตทั้งหลาย เช่น ด้านการรักษาคุณภาพ ปกป้องตัวสินค้า ให้ความสะดวกในเรื่องการขนส่ง การจัดเก็บมีความรวดเร็วในการขนส่ง และส่งเสริมทางด้านการตลาด บรรจุกฎภัณฑ์เพื่อการจัดจำหน่ายเป็นสิ่งแรกๆ ที่ผู้บริโภคเห็น ดังนั้นบรรจุกฎภัณฑ์จะต้องทำหน้าที่บอกกล่าวสิ่งต่างๆ ของตัวผลิตภัณฑ์ วัสดุที่นำมาใช้เป็นบรรจุกฎภัณฑ์มีอยู่หลายชนิด เช่น แก้ว พลาสติก กระดาษ โลหะ เป็นต้น ซึ่งมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันไปตามแต่ละชนิดของวัสดุนั้นๆ

วัสดุที่น่าสนใจก็คือแก้ว เนื่องจากแก้วเป็นวัสดุโปร่งใส เนื้อใสสะอาดมีความแวววาวสุกใส แก้วเป็นสารประกอบของซิลิกากับสารโลหะออกไซด์สารอนินทรีย์ต่างๆ แก้วเป็นวัสดุที่แข็งแรงทนทาน สามารถนำกลับมาใช้ใหม่โดยวิธี รีไซเคิลได้ ขวดแก้วสามารถนำกลับมาใช้บรรจุแบบหมุนเวียนหลายๆ ครั้งได้อย่างประหยัด หลอมใหม่ได้ 100% โดยที่คุณสมบัติไม่เปลี่ยนจึงไม่ก่อให้เกิดขยะหรือมลภาวะใดๆ แก้วสิ่งแวดล้อม มีความคงทนทางกายภาพและทางเคมียากแก่การกัดกร่อน ไม่ทำปฏิกิริยาใดๆ กับผลิตภัณฑ์ที่บรรจุอยู่ภายใน สีของแก้วยังมีผลต่อการรักษาคุณภาพสินค้า มีคุณสมบัติช่วยป้องกันแสงยูวีจึงเหมาะสำหรับอาหารและเครื่องดื่มบางอย่างที่ต้องการถนอมให้อยู่ยาวนานขึ้นหรืออย่าไม่ให้เสื่อมคุณภาพ เช่น ขวดแก้วสีชา (Amber Glass Bottle) เป็นขวดแก้วที่มีสีชาหรือสีอำพัน มักใช้เป็นภาชนะบรรจุสารเคมี การบรรจุสารเคมีในขวดแก้วสีชานั้นก็เพื่อไม่ให้สารเคมีถูกแสงและป้องกันการเสื่อมสภาพของสารเคมีเนื่องจากสารเคมีบางชนิดมีความไวต่อแสงหรือบางชนิดอาจเกิดปฏิกิริยาเมื่อถูกความร้อนสูงทำให้เกิดเป็นไอหรือเกิดการระเบิดได้คุณสมบัติของแก้วจะแตกต่างกันไปเนื่องจากส่วนประกอบและองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน ด้วยการเติมสารประกอบออกไซด์ของธาตุลงไป จะส่งผลต่อคุณสมบัติของแก้ว เช่น ความหนืดของแก้ว ความต้านทานไฟฟ้า และความสามารถในการส่งผ่านแสงหรือดูดกลืนแสงแต่ละช่วงความยาวคลื่นที่ต่างกัน นำไปสู่การปรากฏสีของแก้วที่มองเห็น

ผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการค้นคว้าวิจัยเรื่อง การศึกษาการใช้ค่าการดูดกลืนแสง ชนิดและปริมาณออกไซด์ ของธาตุในสารตัวอย่างแก้วอธิบายเชิงฟิสิกส์ของสีที่ปรากฏ ด้วยการวัดและวิเคราะห์ออกไซด์ของธาตุในแก้วตัวอย่างโดยใช้เทคนิคการวาวรังสีเอกซ์ชนิดกระจายความยาวคลื่น (Wavelength Dispersive X-Ray

Fluorescence Technique : WDXRFS) เพื่อนำชนิดและปริมาณออกไซด์ของธาตุที่วิเคราะห์ได้มาทำการศึกษาและอธิบายเชิงฟิสิกส์ของสีที่ปรากฏของแก้วโดยแก้วแต่ละสีจะมีธาตุที่เป็นองค์ประกอบแตกต่างกันในขั้นตอนของการผลิตจากโรงงาน ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมชิ้นตัวอย่างจากขวดแก้วที่มีสีแตกต่างกัน มาวิเคราะห์เปรียบเทียบชนิดออกไซด์ของธาตุที่เป็นส่วนประกอบของแก้วที่มีสีต่างกันเหล่านั้น เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สามารถนำไปใช้ในการอธิบายเชิงฟิสิกส์ของสีที่ปรากฏ โดยใช้อธิบายร่วมกับการทดลองหาค่าการดูดกลืน (Absorbance) หรือค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Absorption Coefficient) ของตัวอย่างแก้วด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์เพื่อศึกษาปริมาณการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงที่ต่างกัน

ผลที่ได้จากการศึกษาสามารถนำไปเป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนาบรรจุภัณฑ์ที่ผลิตจากแก้วให้ได้คุณสมบัติที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ชนิดนั้นๆ เพื่อให้มีคุณภาพดีมากขึ้นในอนาคตและเป็นแนวทางในการศึกษาบรรจุภัณฑ์ชนิดอื่นต่อไป

วิธีการทดลอง

1. ศึกษาปริมาณของธาตุในแก้วตัวอย่าง มาใช้อธิบายเชิงฟิสิกส์ของสีที่ปรากฏด้วยเครื่องวัดสเปกตรัมการวาวรังสีเอกซ์แบบกระจายความยาวคลื่น (Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence Technique : WDXRFS) ผลิตโดยบริษัท BRUKER รุ่น SRS 3400

การเตรียมสารตัวอย่าง

- เนื่องจากสารตัวอย่างต้องมีขนาดพอดีและเหมาะสมกับภาชนะที่วางสารตัวอย่างในเครื่องมือวัด ดังนั้นในการเตรียมสารตัวอย่างแก้วสีต่างๆ ได้แก่ สีขาว สีเขียว สีน้ำตาล และสีฟ้า สีละ 2 ชิ้น จึงได้นำขวดแก้วสีต่างๆ ที่สามารถหาได้โดยทั่วไปมาใช้ในการเตรียมสารตัวอย่าง โดยใช้บริเวณก้นขวดมาทำการทดลอง เนื่องจากต้องการแก้วที่มีลักษณะแบนราบมากที่สุดไม่โค้งงอ โดยชิ้นงานมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร

- นำสารตัวอย่างแก้วสีต่างๆ เช็ดทำความสะอาดด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (IPA) ไปวางในเครื่อง WDXRFS เพื่อทำการวัดและวิเคราะห์ธาตุ โดยทำการทดลองสีละ 2 ชิ้น ชิ้นละ 1 ครั้ง สำหรับสารตัวอย่างแต่ละชนิด

การวัดและวิเคราะห์สารตัวอย่าง

- ทำการวัดและวิเคราะห์ชนิดและปริมาณธาตุที่เป็นส่วนประกอบของสารตัวอย่างแก้วสีด้วยเครื่อง WDXRFS โดยทำการวัดตัวอย่างแก้วสี สีละ 2 ชิ้น ชิ้นละ 1 ครั้ง สำหรับสารตัวอย่างแต่ละชนิด

- วิเคราะห์สเปกตรัมของแก้วตัวอย่างแต่ละสีด้วยโปรแกรม Semi -Quantitative ที่สามารถวิเคราะห์เชิงปริมาณออกไซด์ของธาตุในตัวอย่างแก้ว

2. ศึกษาความสอดคล้องของปริมาณการดูดกลืนแสงกับช่วงความยาวคลื่นแสงที่แตกต่างกันด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ผลิตโดยบริษัท Jenway รุ่น 6400

ทำการศึกษาปริมาณการดูดกลืนแสง โดยการนำเศษแก้วที่มาจากขวดใบเดียวกับที่ใช้ในการศึกษาปริมาณออกไซด์ของธาตุในแก้วตัวอย่างด้วยเครื่อง WDXRF'S นำมากะเทาะให้มีขนาดพอเหมาะประมาณรูปทรงสี่เหลี่ยม 2×2 เซนติเมตร ที่สามารถวางในเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ได้ ปรับค่าความยาวคลื่นแสงในการทดลองตั้งแต่ 350 ถึง 950 นาโนเมตร โดยเพิ่มค่าความยาวคลื่น 50 นาโนเมตร ในการทดลองแต่ละครั้ง ในกรณีนี้ไม่ได้ใช้สารตัวอย่างเปรียบเทียบเพื่อหาค่าความดูดกลืนแสง เนื่องจากสารตัวอย่างแต่ละชิ้นอาจมีความหนาและรูปลักษณะแตกต่างกัน ดังนั้นการทดลองจึงเป็นการหาค่าความดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างที่แปรตามความยาวคลื่นแสงที่ผ่านสารตัวอย่างที่มีความหนาคงที่ค่าหนึ่งของสารตัวอย่างนั้นๆ

การวัดและวิเคราะห์สารตัวอย่าง

ทำการวัดและวิเคราะห์ปริมาณการดูดกลืนแสงกับช่วงความยาวคลื่นแสงที่แตกต่างกันด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

- วัดปริมาณการดูดกลืนแสงของชิ้นตัวอย่างแก้วทั้งหมด 4 สี ได้แก่ แก้วสีขาว แก้วสีเขียว แก้วสีน้ำตาล และแก้วสีฟ้าโดยการทดลอง 3 ครั้ง สำหรับสารตัวอย่างแต่ละสี
- นำผลการทดลองที่ได้ของแต่ละตัวอย่างมาหาค่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ย ($\bar{X}$) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)
- แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับค่าการดูดกลืนแสงของแก้วตัวอย่างเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของปริมาณการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

1. ผลการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณออกไซด์ของธาตุในตัวอย่างแก้วสีต่างๆ ด้วยเครื่องวัดสเปกตรัมการวาวรังสีเอกซ์แบบกระจายความยาวคลื่น

ผลการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบในขวดแก้วสีขาวในเครื่องวัดสเปกตรัมของการวาวรังสีเอกซ์แบบกระจายความยาวคลื่น วัดปริมาณความเข้มข้นธาตุออกมาเป็นหน่วยเปอร์เซ็นต์ (%) และหน่วยส่วนต่อล้านส่วน (part per million : ppm) ใช้กับธาตุที่มีปริมาณน้อยมากๆ ดังในตารางผลที่แสดงหากธาตุใดมีปริมาณมากจะแสดงผลในช่องเปอร์เซ็นต์ และธาตุที่มีปริมาณน้อยมากๆ จะแสดงผลในช่อง ppm พบว่าแก้วสีขาวมีปริมาณสารประกอบออกไซด์ที่เป็นธาตุหลักในการผลิตใกล้เคียงตามอัตราส่วนผสมหลักมาตรฐานในการผลิตแก้วที่ใช้เป็นภาชนะบรรจุแก้วใสไม่มีสี (ดังตารางที่ 1) ซึ่งสามารถดูเปรียบเทียบกับกราฟสเปกตรัมการวาวรังสีเอกซ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีเอกซ์กับความยาวคลื่นของเส้นรังสีเอกซ์ (ดังภาพ 1(a) และภาพ 1(b)) โดยชิ้นตัวอย่างทั้งสองมาจากขวดแก้วที่แตกต่างกัน ดังนั้นปริมาณของสารประกอบออกไซด์ของธาตุชนิดเดียวกันในชิ้นตัวอย่างทั้งสองอาจมีปริมาณแตกต่างกันบ้าง สำหรับธาตุส่วนที่เหลือที่ไม่ได้แสดงไว้ในตารางเป็นปริมาณสารประกอบออกไซด์ของธาตุปริมาณน้อยๆ และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) รวมเป็นปริมาณเต็ม 100 % (ดังตารางที่ 2)

ผลการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารในขุดแก้วสีเขียว ในเครื่องวัดสเปกตรัมของการวาวรังสีเอกซ์แบบกระจายความยาวคลื่น (ดังตารางที่ 3) โดยขึ้นตัวอย่างทั้งสองมาจากขุดแก้วที่แตกต่างกัน ดังนั้นปริมาณของสารประกอบออกไซด์ของธาตุชนิดเดียวกันในขึ้นตัวอย่างทั้งสองอาจแตกต่างกันบ้าง ซึ่งสามารถดูเปรียบเทียบกับกราฟสเปกตรัมการวาวรังสีเอกซ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีเอกซ์กับความยาวคลื่นของเส้นรังสีเอกซ์ (ดังภาพ 1(c) และภาพ 1(d)) พบธาตุแมงกานีสออกไซด์ (MnO) และนิกเกิลออกไซด์ (NiO) ซึ่งไม่พบ 2 ธาตุนี้ในแก้วสีขาว สำหรับส่วนที่เหลือที่ไม่ได้แสดงไว้เป็นปริมาณสารประกอบออกไซด์ของธาตุปริมาณน้อยๆ และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) รวมเป็นปริมาณเต็ม 100% จากผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าธาตุแมงกานีสออกไซด์ (MgO) และนิกเกิลออกไซด์ (NiO) มีผลต่อการเกิดสีเขียว ในกรณีที่เป็นแร่แอมฟิโบล (Amphibole) และ เทรโมไลต์ (Thermolite) พบว่ามีนิกเกิลออกไซด์ (NiO) อยู่ปริมาณเล็กน้อย ซึ่งตามทฤษฎีถ้าถูกแทนที่โดย แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ก็จะส่งผลให้แก้วปรากฏเป็นสีเขียวได้เช่นกัน จากการวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบในแก้วสีเขียว เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาเปรียบเทียบกับธาตุที่เป็นองค์ประกอบในแก้วสีขาว พบว่าปริมาณโครเมียมออกไซด์ (Cr₂O₃) ในแก้วสีเขียวมีปริมาณมากกว่าในแก้วสีขาวอย่างเห็นได้ชัด และปริมาณเหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃) ในแก้วสีเขียวมีปริมาณมากกว่าแก้วสีขาวเช่นกันซึ่งสีที่เกิดขึ้นเกิดจากกระบวนการที่เหล็ก (Fe²⁺) เข้าแทนที่แมกนีเซียม (Mg²⁺) ทำให้มีสีเขียว ซึ่งถ้าหากเพิ่มปริมาณเหล็ก (Fe²⁺) มากขึ้น ก็จะส่งผลให้แก้วมีสีเขียวมากยิ่งขึ้น

ในแก้วสีน้ำตาลวิเคราะห์ชนิดและปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสาร (ดังตารางที่ 4) พบว่าขึ้นตัวอย่างทั้งสองมีปริมาณของสารประกอบออกไซด์ของธาตุชนิดเดียวกัน ในขึ้นตัวอย่างทั้งสองอาจแตกต่างกันบ้าง เช่นเดียวกับแก้วสีอื่นๆ ซึ่งสามารถดูเปรียบเทียบกับกราฟสเปกตรัมการวาวรังสีเอกซ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีเอกซ์กับความยาวคลื่นของเส้นรังสีเอกซ์ (ดังภาพ 1(e) และภาพ 1(f)) แก้วสีน้ำตาลพบธาตุแมงกานีสออกไซด์ (MnO) เช่นเดียวกับแก้วสีเขียว และปริมาณเหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃) ที่สูงกว่าแก้วสีขาวอย่างชัดเจน สำหรับส่วนที่เหลือที่ไม่ได้แสดงไว้เป็นปริมาณสารประกอบออกไซด์ของธาตุปริมาณน้อยๆ และคาร์บอนไดออกไซด์ CO₂ รวมเป็น 100%

ผลการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารในขุดแก้วสีฟ้า (ดังตารางที่ 5) พบว่าธาตุที่เป็นองค์ประกอบของขึ้นตัวอย่างทั้งสองขึ้น มีปริมาณของสารประกอบออกไซด์ของธาตุชนิดเดียวกันแตกต่างกันบ้าง เนื่องจากมาจากขุดแก้วที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถดูเปรียบเทียบกับกราฟสเปกตรัมการวาวรังสีเอกซ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีเอกซ์กับความยาวคลื่นของเส้นรังสีเอกซ์ (ดังภาพ 1(g) และภาพ 1(h)) แก้วสีฟ้าพบธาตุโคบอลต์ออกไซด์ (CoO) และแบเรียมออกไซด์ (BaO) ที่ไม่พบในแก้วสีอื่น สำหรับส่วนที่เหลือที่ไม่ได้แสดงไว้เป็นปริมาณสารประกอบออกไซด์ของธาตุปริมาณน้อยๆ และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) รวมเป็น 100% เช่นเดียวกับแก้วสีอื่นๆ การพบอาร์เซนิกไตรออกไซด์ (As₂O₃) ปริมาณร้อยละ 0.200 คาดว่าน่าจะเป็นส่วนประกอบของแร่โอลิวีน (Olivenite) หรือ Cu₃As₂O₈·Cu(OH)₂ ที่ส่งผลให้แก้วเป็นสีฟ้าเช่นกันนอกจากนี้จะเห็นได้ว่าแก้วสีฟ้านี้มีปริมาณอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) และ ไทเทเนียมออกไซด์ (TiO₂) น้อยกว่าแก้วสีขาวมาก ซึ่งนับว่าเป็นสารเจือที่ผลต่อการปรากฏสีของแก้ว โดยการเพิ่มปริมาณของไทเทเนียม (Ti) ในอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) จะมีผลต่อการปรากฏสีของแก้วให้เป็นสีฟ้า

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมหลักในการผลิตแก้วที่ใช้เป็นภาชนะบรรจุใส [4]

ที่	ส่วนผสม	ปริมาณ (ร้อยละ)
1	SiO_2	71.5 – 73.5
2	Al_2O_3	0.4 – 2.2
3	CaO	7.8 – 10.8
4	MgO	0.1 – 3.6
5	BaO	0.0 – 0.5
6	Na_2O	12.5 – 15.5
7	K_2O	0.4 – 1.0
8	B_2O_3	0.0 – 0.2
9	Fe_2O_3	0.04 – 0.05

ตารางที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารในขวดแก้วสีขาวด้วยโปรแกรม
Semi - Quantitative

สารประกอบออกไซด์	ปริมาณที่วิเคราะห์ได้			
	เปอร์เซ็นต์ (%)		ppm	
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
Na ₂ O	16.0	17.5	-	-
MgO	2.30	0.925	-	-
Al ₂ O ₃	1.31	1.13	-	-
SiO ₂	63.4	68.9	-	-
P ₂ O ₅	-	-	398	344
SO ₃	0.164	0.312	-	-
K ₂ O	0.097	0.118	-	-
CaO	5.82	7.08	-	-
TiO ₂	-	-	536	509
Cr ₂ O ₃	-	-	63.5	82.7
Fe ₂ O ₃	-	-	592	609
CuO	-	-	33.8	36.7
ZnO	-	-	25.2	29.1
As ₂ O ₃	-	-	38.0	41.1
SrO	-	-	66.4	71.0
ZrO ₂	0.020	0.026	-	-
PbO	-	-	135	107

ตารางที่ 3 แสดงผลการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารในขวดแก้วสีเขียวด้วยโปรแกรม
Semi - Quantitative

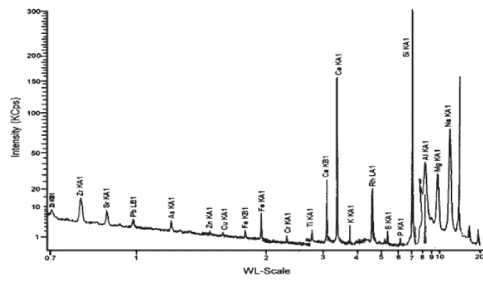
สารประกอบออกไซด์	ปริมาณที่วิเคราะห์ได้			
	เปอร์เซ็นต์ (%)		ppm	
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
Na ₂ O	17.8	18.2	-	-
MgO	0.994	0.966	-	-
Al ₂ O ₃	1.44	1.42	-	-
SiO ₂	67.1	65.2	-	-
P ₂ O ₅	-	-	149	109
SO ₃	0.081	0.086	-	-
K ₂ O	0.199	0.195	-	-
CaO	8.85	8.81	-	-
TiO ₂	-	-	602	629
Cr ₂ O ₃	0.220	0.217	-	-
MnO	-	-	55.5	51.8
Fe ₂ O ₃	0.165	0.158	-	-
NiO	-	-	22.2	20.8
CuO			32.2	24.6
ZnO	-	-	30.0	24.2
SrO	-	-	67.5	62.7
ZrO ₂	0.019	0.018	-	-
PbO	-	-	92.5	96.8

ตารางที่ 4 แสดงผลการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารในขวดแก้วสีน้ำตาลด้วยโปรแกรม
Semi - Quantitative

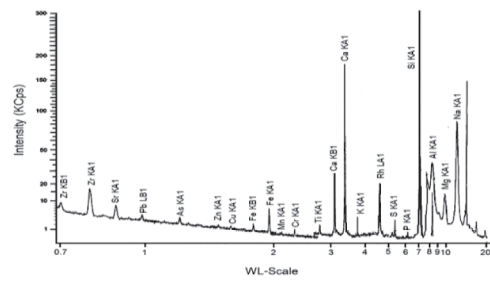
สารประกอบออกไซด์	ปริมาณที่วิเคราะห์ได้			
	เปอร์เซ็นต์ (%)		ppm	
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
Na ₂ O	16.4	18.1	-	-
MgO	2.68	0.425	-	-
Al ₂ O ₃	1.73	1.44	-	-
SiO ₂	66.8	66.9	-	-
P ₂ O ₅	-	-	166	85.9
SO ₃	-	-	448	694
CaO	9.46	10.1	-	-
K ₂ O	0.126	0.305	-	-
TiO ₂	-	-	697	380
Cr ₂ O ₃	-	-	109	251
MnO	-	-	38.6	264
Fe ₂ O ₃	0.171	0.163	-	-
CuO	-	-	31.0	232
ZnO	-	-	28.0	47.4
SrO	-	-	82.8	322
ZrO ₂	0.027	0.023	-	-
PbO	-	-	66.0	326

ตารางที่ 5 แสดงผลการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารในขวดแก้วสีฟ้าด้วยโปรแกรม
Semi - Quantitative

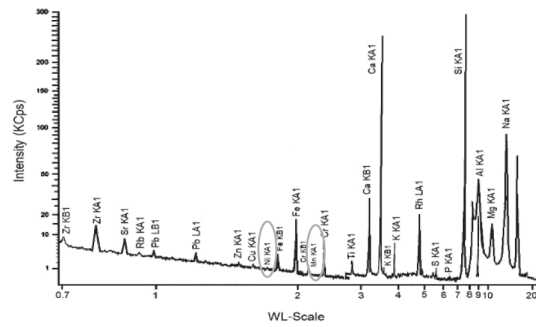
สารประกอบออกไซด์	ปริมาณที่วิเคราะห์ได้			
	เปอร์เซ็นต์ (%)		ppm	
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
Na ₂ O	17.9	18.1	-	-
Al ₂ O ₃	0.597	0.63	-	-
SiO ₂	59.2	55.32	-	-
SO ₃	0.377	0.412	-	-
K ₂ O	0.247	0.21	-	-
CaO	1.92	2.16	-	-
TiO ₂	-	-	65.4	66.3
Cr ₂ O ₃	-	-	43.57	52.6
Fe ₂ O ₃	-	-	374	281
CoO	-	-	183	147
CuO	-	-	34.89	35.0
As ₂ O ₃	0.200	1.436	-	-
SrO	-	-	148	140
ZrO ₂	-	-	14.58	20.5
BaO	0.413	0.511	-	-



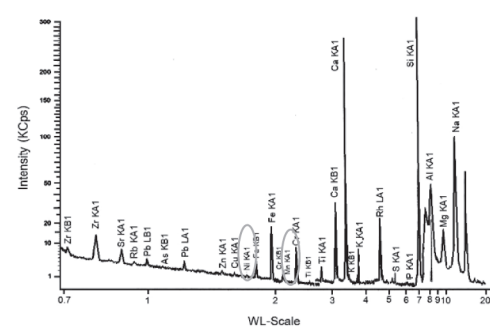
(a) แก้วสีขาวชิ้นที่ 1



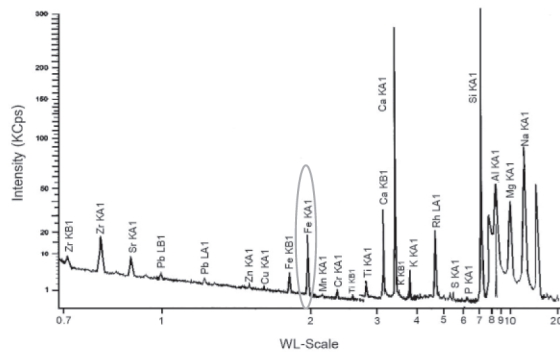
(b) แก้วสีขาวชิ้นที่ 2



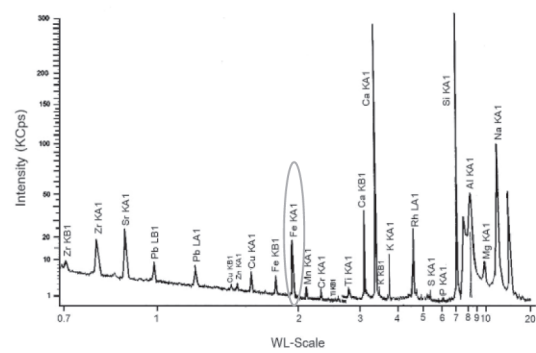
(c) แก้วสีเขียวชิ้นที่ 1



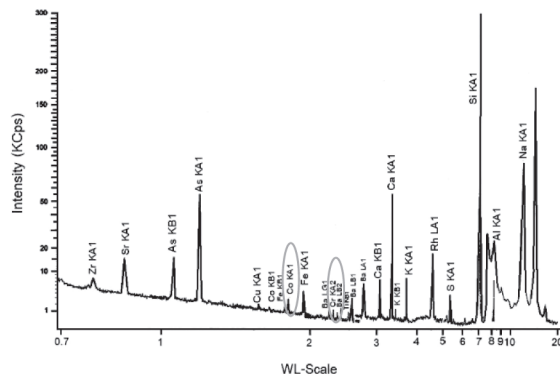
(d) แก้วสีเขียวชิ้นที่ 2



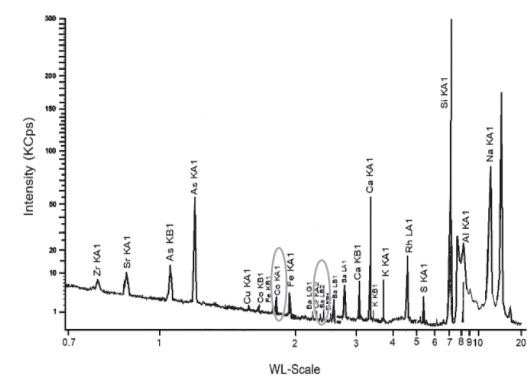
(e) แก้วสีน้ำตาลชิ้นที่ 1



(f) แก้วสีน้ำตาลชิ้นที่ 2



(g) แก้วสีฟ้าชิ้นที่ 1



(h) แก้วสีฟ้าชิ้นที่ 2

ภาพที่ 1 สเปกตรัมการวาวรังสีเอกซ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีเอกซ์กับความยาวคลื่นของเส้นรังสีเอกซ์ด้วยเครื่องวัดสเปกตรัมการวาวรังสีเอกซ์แบบกระจายความยาวคลื่น (WDXRFs) ของแก้วสีขาว สีเขียว สีนํ้าตาล และสีฟ้า

2. ผลการวัดค่าความดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างแก้วต่อแสงที่มีความยาวคลื่นต่างๆ ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)

ผลการทดลองที่ได้มาแสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่น (Wavelength) กับค่าการดูดกลืน (Absorption) ของตัวอย่างแก้วสีขาว สีเขียว สีน้ำตาลและสีฟ้า (ดังภาพที่ 2) พบว่าในช่วงความยาวคลื่นของแสงสีม่วง-สีแดง (380-760 นาโนเมตร) ค่าการดูดกลืนของชิ้นตัวอย่างแก้วสีขาวมีค่าใกล้เคียงกันโดยไม่แตกต่างกันจนเห็นได้ชัดเหมือนชิ้นตัวอย่างแก้วสีอื่น และค่าการดูดกลืนมีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับค่าการดูดกลืนของแก้วสีอื่นๆ แสดงว่าการดูดกลืนแสงสีต่างๆ ที่กระทบชิ้นตัวอย่างแก้วสีขาวมีปริมาณที่น้อย จึงส่งผลให้แสงสีต่าง ๆ สามารถส่องผ่านทะลุชิ้นตัวอย่างแก้วได้มากเท่าๆ กันในทุกช่วงความยาวคลื่น แสดงว่า แสงสีต่างๆ เมื่อตกกระทบแก้วสีขาวแล้วจะส่งผ่านออกจากชิ้นตัวอย่างได้ทุกสีและเข้าสู่ตาคนเราทำให้เห็นแก้วเป็นสีขาว

แก้วสีเขียว ค่าการดูดกลืนสูงมากตรงบริเวณความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร ขึ้นไปจนถึงประมาณ 500 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงของสีม่วงและสีน้ำเงิน และจะค่อยๆ ลดลงเมื่อความยาวคลื่นเข้าสู่ช่วง 500-570 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นของสีเขียว โดยมีค่าการดูดกลืนน้อยสุดและค่าการดูดกลืนสูงขึ้นอีกที่ความยาวคลื่นประมาณ 650-700 นาโนเมตร ที่เป็นช่วงของแสงสีแดงและสีส้ม แสดงว่าแสงสีเขียวตรงความยาวคลื่น 500- 570 นาโนเมตร สามารถผ่านทะลุชิ้นตัวอย่างแก้วได้มาก เพราะถูกดูดกลืนไว้น้อย และนั่นคือแสงอื่นๆ ถูกดูดกลืนไว้มากกว่าแสงสีเขียวทำให้เมื่อแสงตกกระทบสารตัวอย่างมีแสงสีเขียวส่งผ่านมาสู่ตาเราทำให้เห็นเป็นวัตถุสีเขียว

แก้วสีน้ำตาลพบว่าค่าการดูดกลืนสูงมากอย่างเด่นชัด ในช่วงความยาวคลื่นของแสงสีม่วงและสีน้ำเงินระหว่าง 380-500 นาโน เนื่องจากแก้วสีน้ำตาลทึบแสงมากกว่าแก้วสีอื่น จึงมีการดูดกลืนแสงมาก ส่งผ่านแสงได้น้อย เนื่องจาก แก้วสีน้ำตาลมีการส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น สีเขียว สีเหลือง สีแดงและสีส้ม ดังนั้นแสงที่เหลือเหล่านี้นี้เป็นแสงที่ส่งผ่านออกจากสารตัวอย่างเข้าสู่ตาผสมกันออกเป็นสีน้ำตาลที่ปรากฏต่อสายตา

แก้วสีฟ้า พบว่าในช่วงความยาวคลื่น 500-700 นาโนเมตร มีค่าการดูดกลืนสูง ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นของแสงสีเขียว สีเหลือง สีแดงและสีส้ม แสดงว่าแก้วสีฟ้ามีการดูดกลืนแสงสีเหล่านี้มาก เหลือแสงสีม่วงและสีน้ำเงินตรงความยาวคลื่น 380-420 นาโนเมตร ส่งผ่านทะลุชิ้นตัวอย่างแก้วออกมาสู่ตาเราทำให้มองเห็นเป็นวัตถุสีฟ้า

ตารางที่ 6 ผลการทดลองหาค่าการดูดกลืนแสง ของตัวอย่างแก้วสีขาวกับช่วงความยาวคลื่นแสงที่แตกต่างกัน ด้วยเครื่องทดสอบการดูดกลืนแสง (Spectrophotometer)

ความยาวคลื่น (nm)	แก้วสีขาว			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย $\pm$ SD*
350	0.124	0.136	0.136	0.132 $\pm$ 0.008
400	0.077	0.086	0.081	0.081 $\pm$ 0.005
450	0.101	0.101	0.100	0.101 $\pm$ 0.001
500	0.090	0.087	0.090	0.089 $\pm$ 0.002
550	0.085	0.086	0.082	0.084 $\pm$ 0.002
600	0.083	0.082	0.081	0.082 $\pm$ 0.001
650	0.094	0.097	0.097	0.096 $\pm$ 0.002
700	0.100	0.101	0.100	0.100 $\pm$ 0.001
750	0.098	0.103	0.098	0.100 $\pm$ 0.003
800	0.095	0.115	0.119	0.110 $\pm$ 0.015
850	0.119	0.121	0.117	0.119 $\pm$ 0.002
900	0.125	0.129	0.125	0.126 $\pm$ 0.003
950	0.121	0.124	0.123	0.123 $\pm$ 0.002

หมายเหตุ : *SD คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ 7 ผลการทดลองหาค่าการดูดกลืนแสง ของตัวอย่างแก้วสีเขียวกับช่วงความยาวคลื่นแสงที่แตกต่างกัน ด้วยเครื่องทดสอบการดูดกลืนแสง (Spectrophotometer)

ความยาวคลื่น (nm)	แก้วสีเขียว			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย $\pm$ SD*
350	0.380	0.380	0.364	0.375 $\pm$ 0.011
400	0.446	0.472	0.370	0.429 $\pm$ 0.059
450	0.813	0.876	0.776	0.822 $\pm$ 0.054
500	0.446	0.423	0.392	0.420 $\pm$ 0.028
550	0.349	0.381	0.248	0.326 $\pm$ 0.078
600	0.775	0.685	0.486	0.649 $\pm$ 0.163
650	0.894	0.736	0.786	0.805 $\pm$ 0.089
700	0.588	0.594	0.606	0.596 $\pm$ 0.010
750	0.439	0.382	0.411	0.411 $\pm$ 0.029
800	0.547	0.319	0.366	0.411 $\pm$ 0.136
850	0.349	0.335	0.311	0.332 $\pm$ 0.021
900	0.371	0.388	0.361	0.373 $\pm$ 0.015
950	0.481	0.358	0.365	0.401 $\pm$ 0.080

หมายเหตุ : *SD คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ 8 ผลการทดลองหาค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างแก้วสีน้ำตาล กับช่วงความยาวคลื่นแสงที่แตกต่างกัน ด้วยเครื่องทดสอบการดูดกลืนแสง (Spectrophotometer)

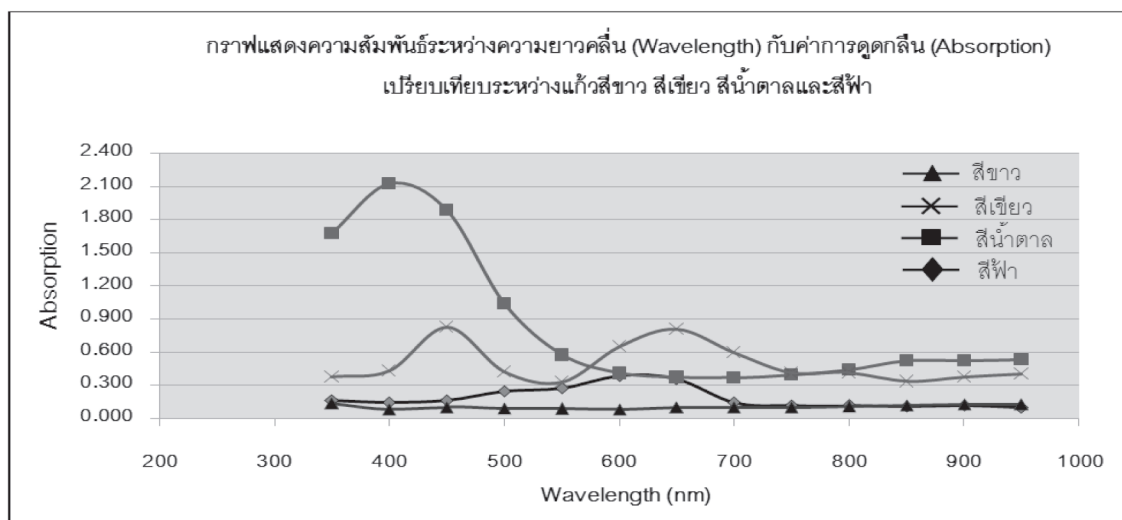
ความยาวคลื่น (nm)	แก้วสีน้ำตาล			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย $\pm$ SD*
350	1.666	1.676	1.673	1.672 $\pm$ 0.006
400	2.130	2.120	2.116	2.122 $\pm$ 0.008
450	1.931	1.868	1.856	1.885 $\pm$ 0.046
500	1.034	1.040	1.043	1.039 $\pm$ 0.005
550	0.565	0.575	0.576	0.572 $\pm$ 0.007
600	0.405	0.409	0.405	0.406 $\pm$ 0.003
650	0.367	0.371	0.370	0.369 $\pm$ 0.002
700	0.366	0.370	0.366	0.367 $\pm$ 0.003
750	0.396	0.391	0.389	0.392 $\pm$ 0.004
800	0.447	0.441	0.429	0.439 $\pm$ 0.010
850	0.576	0.494	0.486	0.519 $\pm$ 0.057
900	0.528	0.516	0.514	0.519 $\pm$ 0.009
950	0.532	0.533	0.534	0.533 $\pm$ 0.001

หมายเหตุ : *SD คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ 9 ผลการทดลองหาค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างแก้วสีฟ้า กับช่วงความยาวคลื่นแสงที่แตกต่างกันด้วยเครื่องทดสอบการดูดกลืนแสง (Spectrophotometer)

ความยาวคลื่น (nm)	แก้วสีฟ้า			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย $\pm$ SD*
350	0.149	0.149	0.184	0.161 $\pm$ 0.023
400	0.131	0.148	0.156	0.145 $\pm$ 0.014
450	0.160	0.164	0.172	0.165 $\pm$ 0.007
500	0.235	0.244	0.250	0.243 $\pm$ 0.008
550	0.270	0.269	0.279	0.273 $\pm$ 0.006
600	0.374	0.380	0.394	0.383 $\pm$ 0.011
650	0.340	0.353	0.369	0.354 $\pm$ 0.015
700	0.125	0.161	0.134	0.140 $\pm$ 0.021
750	0.102	0.124	0.116	0.114 $\pm$ 0.012
800	0.109	0.111	0.112	0.111 $\pm$ 0.002
850	0.097	0.112	0.102	0.104 $\pm$ 0.008
900	0.117	0.114	0.107	0.113 $\pm$ 0.006
950	0.088	0.097	0.103	0.096 $\pm$ 0.008

หมายเหตุ : *SD คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน



ภาพที่ 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่น (Wavelength) กับค่าการดูดกลืนแสง (Absorption) เปรียบเทียบระหว่างแก้วสีขาว สีเขียว น้ำตาลและสีฟ้า

สรุปผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

จากผลการศึกษาค่าการดูดกลืนแสง ชนิดและปริมาณออกไซด์ของธาตุในสารตัวอย่างแก้วสีต่างๆ เพื่ออธิบายเชิงฟิสิกส์ของสีแก้วที่ปรากฏแตกต่างกัน ผู้วิจัยสรุปสังเคราะห์ได้ว่า แก้วสีขาว สีเขียว สีน้ำตาลและสีฟ้า มีค่าการดูดกลืนแสง ชนิดและปริมาณออกไซด์ของธาตุแตกต่างกันไป เนื่องจากส่วนประกอบและองค์ประกอบทางเคมีที่และการเติมสารประกอบออกไซด์ของธาตุลงไป ชนิดและในปริมาณที่แตกต่างกัน จะส่งผลต่อสีที่ปรากฏ เนื่องจากคุณสมบัติทางสีของแร่ธาตุที่เกี่ยวข้องกับแก้ว และในด้านความสามารถในการส่งผ่านแสงหรือดูดกลืนแสงแต่ละช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกันของแก้วสีขาว สีเขียว สีน้ำตาลและสีฟ้า นำไปสู่การปรากฏสีของแก้วที่มองเห็นต่างกัน ซึ่งผลการทดลองที่ได้นี้สามารถนำไปเป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนาบรรจุภัณฑ์ที่ผลิตจากแก้วให้ได้คุณสมบัติที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ชนิดนั้นๆ เพื่อให้มีคุณภาพดีมากขึ้นในอนาคตและเป็นแนวทางในการศึกษาบรรจุภัณฑ์ชนิดอื่นต่อไป

บรรณานุกรม

- โครงการเทคโนโลยีสารสนเทศตามพระราชดำริสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี. (2549). *การผสมแสงสี*. ค้นเมื่อวันที่ 30 เมษายน 2555. จาก <http://kanchanapisek.or.th/kp9/physics/lessonplan/lesson09.doc>.
- สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศและวิทยาศาสตร์บริการกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2555). *ประมวลสารสนเทศพร้อมใช้เรื่องน้ำรู้ของอุตสาหกรรมแก้ว และกระจกกับการตรวจสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์ (Glasses industry with quality audit of)*. กรุงเทพฯ : สำนักฯ.
- Coming Museum of Glass. (2002). *Materials of Glass*. Retrieved 22 May 2013. From <http://www.cmog.org/article/what-is-glass.html>.
- Glassware Chemical. (2010). Archive for the “ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแก้ว” (glass introduction). Retrieved 17 January 2013. From <http://glasswarechemical.com/category/introduction-of-glass/>.
- Jingxuan, Wang, Siuwen Yu & Qing Guan. (1982). Effect of Transition Metal Ions Mn^{3+} , Co^{2+} , Ni^{2+} on The Color of Mixed Pr Nd Glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 52 (1-3), 447-454.
- M. Chavoutier, et al. (2013). *Effect of TiO_2 Content on The Crystallization and The Color of (ZrO_2, TiO_2) -doped $Li_2O-Al_2O_3-SiO_2$ Glasses*. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 384, 15-24.
- Tutorvista. (2013). *White Light Through a Prism*. Retrieved 30 April 2013. From <http://www.tutorvista.com/physics/dispersion-of-white-light>.