

การพัฒนาชุดปฏิบัติการ เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะทรานซิชัน สำหรับ นักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 โรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬารามราชวิทยาลัย มุกดาหาร

ธนพัฒน์ ทับโธสง* สุกัญญา กิ่งกลาง และวิชุดา แสนปากดี

สาขาวิชาเคมี โรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬารามราชวิทยาลัย มุกดาหาร อำเภอเมือง
จังหวัดมุกดาหาร 49000

Received: 19 October 2024

Revised: 17 April 2025

Accepted: 7 May 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อพัฒนาชุดปฏิบัติการ เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของ ธาตุโลหะทรานซิชัน กลุ่มตัวอย่างในการวิจัยเป็นนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 จำนวน 24 คน แบ่งการดำเนินงานออกเป็น 3 ระยะ ได้แก่ ระยะที่ 1 ศึกษาสีของสารประกอบเชิงซ้อนของแอนโทไซยานิน จากสารสกัดดอกอินทนิลและไอออนของธาตุโลหะทรานซิชัน ระยะที่ 2 พัฒนาชุดปฏิบัติการ เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะทรานซิชัน และระยะที่ 3 จัดการเรียนรู้ เครื่องมือในการวิจัย ได้แก่ ชุดปฏิบัติการซึ่งประกอบไปด้วย สารเคมี วัสดุอุปกรณ์และบทปฏิบัติการสำหรับการทดลองบทปฏิบัติการออกแบบตามการจัดการเรียนรู้แบบวัฏจักรการสืบเสาะหาความรู้ 5 ขั้น จำนวน 3 บทปฏิบัติการ แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนเป็นแบบปรนัย 4 ตัวเลือก จำนวน 20 ข้อ และแบบสอบถามความพึงพอใจเป็นแบบมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ วิเคราะห์ข้อมูล โดยใช้ค่าเฉลี่ยเลขคณิต ร้อยละ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และสถิติ One-Sample T-Test

ผลการศึกษา พบว่า สีของสารประกอบเชิงซ้อนของแอนโทไซยานินจากสารสกัดดอกอินทนิลและไอออนของธาตุโลหะทรานซิชันทุกชนิดสังเกตเห็นได้ชัดเจน ชุดปฏิบัติการ มีคุณภาพอยู่ในระดับมากที่สุด บทปฏิบัติการมีประสิทธิภาพเท่ากับ 85.76/87.02 ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน ของนักเรียนหลังเรียนสูงกว่าเกณฑ์ร้อยละ 80 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 และความพึงพอใจ ของนักเรียนอยู่ในระดับมากที่สุด

คำสำคัญ: ชุดปฏิบัติการ; บทปฏิบัติการ; สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะทรานซิชัน

The Development of a Laboratory Kit on Transition Metal Complexes for Grade 10th Students Princess Chulabhorn Science High School Mukdahan

Thanaphat Tabthaisong*, Sukanya Kuengklang, and Wichuda Sanpakdee

*Chemistry, Princess Chulabhorn Science High School, Muang District,
Mukdahan Province 49000, Thailand*

Abstract

This research main aims to develop a laboratory set on the topic of transition metal complexes. The research sample consisted of 24 grade 10th students. The operation was divided into 3 phases: Phase 1 studied the color of anthocyanin complex compounds from the extracts of *Lagerstroemia speciosa* (L.) Pers. flowers and transition metal ions; Phase 2 developed a laboratory set on transition metal complex compounds; and Phase 3 organized learning. The research instruments were a laboratory set on transition metal complexes, which consisted of chemicals, materials, and experiments; 3 laboratories designed according to the 5-step inquiry cycle learning model; a 20-question, 4-choice multiple-choice achievement test; and a 5-level rating scale satisfaction questionnaire. Data were analyzed using arithmetic mean, percentage, standard deviation, and one-sample t-test statistics.

The results of the study found that the extract of the *Lagerstroemia speciosa* (L.) Pers. flower changed color well in the test of all types of metal ions. The laboratory set on the topic of transition metal complexes was at the highest level. The laboratory had an efficiency of 85.76/87.02. The academic achievement of the students after studying was higher than the 80 percent criterion with statistical significance at the 0.05 level. And the students' satisfaction was at the highest level.

Keywords: Laboratory Kit; Laboratory Manual; Transition Metal Complexes

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

หลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พ.ศ. 2551 (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. 2560) สาระเคมี ได้กำหนดผลการเรียนรู้ ม. 4/6 บอกสมบัติของธาตุโลหะแทรนซิชันและเปรียบเทียบสมบัติกับธาตุโลหะในกลุ่มธาตุเรฟรีเซนเททีฟ (สำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐานกระทรวงศึกษาธิการ, 2560) และหลักสูตรโรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬาราชวิทยาลัย พ.ศ. 2551 (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. 2566) ได้กำหนดผลการเรียนรู้ ม. 4/11 บอกสมบัติของธาตุโลหะแทรนซิชันและเปรียบเทียบสมบัติกับธาตุโลหะในกลุ่มธาตุเรฟรีเซนเททีฟได้ ม. 4/26 เขียนสูตร อ่านชื่อ เขียนโครงสร้าง แสดงไอโซเมอร์ของสารประกอบเชิงซ้อนและไอออนเชิงซ้อนของธาตุแทรนซิชัน และม. 4/27 บูรณาการความรู้ เรื่อง การเกิดสีของสารประกอบเชิงซ้อนกับองค์ประกอบของสีที่พบในธรรมชาติ ซึ่งออกแบบเป็นหน่วยการเรียนรู้ เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุแทรนซิชัน ที่จัดการเรียนรู้ในรายวิชาโครงสร้างอะตอม ตารางธาตุ และพันธะเคมีระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 แต่จากประสบการณ์ในการจัดการเรียนรู้ในห้องเรียนที่ผ่านมามีข้อจำกัดในการทำปฏิบัติการ เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุแทรนซิชัน เนื่องจากปฏิบัติการที่ใช้ในการเรียนมีความซับซ้อน ส่งผลให้นักเรียนไม่สามารถเชื่อมโยงระหว่างผลการทดลองและทฤษฎีได้ ดังนั้น นักเรียนจึงมีผลการเรียนในหัวข้อ เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะแทรนซิชันต่ำกว่าเกณฑ์ อีกทั้งในปฏิบัติการยังมีการใช้เครื่องแก้วจำนวนมาก มีการใช้สารเคมีที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม และต้องใช้สารเคมีในปริมาณมากเพื่อให้สังเกตเห็นผลการทดลองที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจน ดังนั้นจึงส่งผลกระทบต่อสุขภาพของนักเรียนและครูผู้ร่วมปฏิบัติการ ตลอดจนสารเคมีที่เหลือทิ้งจากห้องปฏิบัติการก็มีโอกาสปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมเป็นอันตรายต่อธรรมชาติ

จากการศึกษางานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่า ไอออนของธาตุโลหะแทรนซิชันสามารถทำหน้าที่เป็นโลหะอะตอมกลางที่สร้างพันธะกับลิแกนด์ที่เป็นสารประกอบอินทรีย์จากธรรมชาติ เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีสี สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ดังนั้นจึงมีการนำสารสกัดจากธรรมชาติมาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดไอออนของธาตุโลหะแทรนซิชัน เช่น งานวิจัยของ ยุรงค์ดี นพวงศ์ (2560) ที่ได้พัฒนาชุดทดสอบเหล็ก โดยใช้สารสกัดจากใบฝรั่ง วัดปริมาณเหล็กจากความเข้มสีของชุดทดสอบที่เกิดปฏิกิริยาเชิงซ้อนระหว่างเหล็กและแทนนินจากสารสกัดใบฝรั่ง เพื่อให้การวัดปริมาณไอออนโลหะมีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น โดยทั่วไปนิยมใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปี (Spectroscopy) แต่เทคนิคดังกล่าวต้องใช้เครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูงซึ่งมีราคาแพง และไม่สะดวกในการใช้งานนอกสถานที่ ดังนั้นจึงได้มีการนำเทคนิคการวัดทางสีมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณสาร เช่น งานวิจัยของ ภัทราวดี เข้มเพชร (2564) ที่ได้วิเคราะห์หาโลหะหนักตะกั่ว (Pb), แคดเมียม (Cd), ทองแดง (Cu), และสังกะสี (Zn) ในข้าวด้วยเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรี (Digital Image Colorimetry Techniques) โดยการใช้แอปพลิเคชัน

Color Name บนสมาร์ทโฟนในการวิเคราะห์ค่าความเข้มสีของสารละลายที่เกิดปฏิกิริยาเชิงซ้อนระหว่างโลหะหนักและไดไฮโซน โดยในการวิจัยครั้งนี้ใช้เทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรี เพื่อวิเคราะห์ปริมาณของไอออนโลหะของธาตุแทรนซิชันผ่านค่าความเข้มสีจากแอปพลิเคชัน RGB Color Detector บนสมาร์ทโฟน

แอนโทไซยานินเป็นลิแกนด์จากธรรมชาติที่นิยมนำมาใช้ในการทดสอบไอออนโลหะ เนื่องจากหาได้ง่าย พบได้ทั่วไปในธรรมชาติ สกัดได้ง่าย และเป็นลิแกนด์ที่มีความว่องไวต่อไอออนโลหะของธาตุแทรนซิชัน โดยแอนโทไซยานินเป็นรงควัตถุที่พบในดอกไม้หรือพืชที่มีสีชมพู-ม่วง หลายชนิด ได้แก่ อัญชัน กระเจี๊ยบแดง และกะหล่ำปลีสีม่วง เป็นต้น ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้เลือกใช้แอนโทไซยานินจากดอกอินทนิล ซึ่งเป็นพืชที่พบได้ทั่วไปในบริเวณโรงเรียน ออกดอกในช่วงต้นฤดูฝนและยังไม่มีงานวิจัยที่ศึกษามากนักจากการทดสอบเบื้องต้น พบว่า แอนโทไซยานินจากดอกอินทนิลสามารถเปลี่ยนแปลงสีได้ชัดเจนในระดับที่ตาเปล่าสามารถสังเกตเห็น เมื่อทดสอบกับไอออนของธาตุโลหะแทรนซิชันที่นำมาทดสอบทุกชนิด ซึ่งองค์ความรู้ เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะแทรนซิชันปรากฏในบทเรียนรายวิชาเคมีระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 โดยองค์ความรู้ในเรื่องดังกล่าวควรจัดทำเป็นชุดปฏิบัติการเพื่อให้การเรียนการสอนมีประสิทธิภาพ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้พัฒนาชุดปฏิบัติการ เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะแทรนซิชัน เพื่อใช้ประกอบการจัดการเรียนรู้ในหัวข้อ สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะแทรนซิชัน โดยอาศัยข้อมูลการเปลี่ยนแปลงสีของแอนโทไซยานิน จากสารสกัดดอกอินทนิลเมื่อเกิดเป็นสารเชิงซ้อนกับไอออนของธาตุโลหะแทรนซิชัน และมีการออกแบบภายใต้หลักการเคมีสีเขียว (Green Chemistry) กล่าวคือ มีการใช้อุปกรณ์ขนาดเล็ก ลดปริมาณการใช้สารเคมี และมีการใช้สารสกัดจากธรรมชาติทดแทนสารเคมีที่เป็นอันตราย รวมทั้งมีการออกแบบให้มีขนาดกะทัดรัด สามารถพกพาได้สะดวก เพื่อให้สามารถนำไปใช้ในการเรียนรู้ได้อย่างไม่จำกัดสถานที่ และประยุกต์ใช้หลักการของเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรี ทำให้มีความสะดวกในการศึกษามากยิ่งขึ้น ซึ่งชุดปฏิบัติการ เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะแทรนซิชัน จะช่วยส่งเสริมให้นักเรียนมีความรู้ความเข้าใจใน เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุแทรนซิชันมากยิ่งขึ้น ส่งผลต่อการยกระดับผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนให้เป็นไปตามเป้าหมายของหลักสูตร และยังสามารถกระตุ้นให้นักเรียนเกิดทักษะความคิดสร้างสรรค์เพื่อต่อยอดเป็นโครงงานวิทยาศาสตร์ที่เป็นนวัตกรรมขับเคลื่อนการพัฒนาประเทศได้ในอนาคต



วัตถุประสงค์การวิจัย

วัตถุประสงค์การวิจัยหลัก

เพื่อพัฒนาชุดปฏิบัติการ เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะแทรนซิชัน

วัตถุประสงค์การวิจัยเฉพาะ

1. เพื่อศึกษาสีของสารประกอบเชิงซ้อนของแอนโทไซยานินจากสารสกัดดอกอินทนิลและไอออนของธาตุโลหะแทรนซิชัน
2. เพื่อพัฒนาชุดปฏิบัติการ เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะแทรนซิชัน ที่มีประสิทธิภาพตามเกณฑ์ E_1/E_2 เท่ากับร้อยละ 80/80
3. เพื่อเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 หลังเรียนด้วยชุดปฏิบัติการ เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะแทรนซิชัน กับเกณฑ์ร้อยละ 80
4. เพื่อศึกษาความพึงพอใจของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 ที่มีต่อการเรียนโดยใช้ชุดปฏิบัติการ เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะแทรนซิชัน

นิยามศัพท์เฉพาะ

ชุดปฏิบัติการ เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะแทรนซิชัน หมายถึง ชุดสารเคมี วัสดุอุปกรณ์ และชุดปฏิบัติการสำหรับการทดลอง เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะแทรนซิชัน โดยผู้วิจัยได้ออกแบบตามหลักการเคมีสีเขียว (Green Chemistry) ซึ่งมีส่วนประกอบต่าง ๆ ดังนี้

- | | |
|----------------------|-------------------------------------|
| 1. สารสกัดดอกอินทนิล | 2. สารละลายไอออนโลหะ |
| 3. ชุดปฏิบัติการ | 4. แผ่นทดสอบ ขนาด 4 ช่อง และ 8 ช่อง |
| 5. ไม้จิ้มฟัน | 6. ปากกาไวท์บอร์ด |
| 7. กระดาษทิชชู | |

ชุดปฏิบัติการ เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะแทรนซิชัน หมายถึง เอกสารสื่อประกอบการทดลอง เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะแทรนซิชัน โดยผู้วิจัยได้ออกแบบตามการจัดการเรียนรู้แบบวัฏจักรการสืบเสาะหาความรู้ 5 ขั้น (5E's) จำนวน 3 ชุดปฏิบัติการ ประกอบไปด้วย

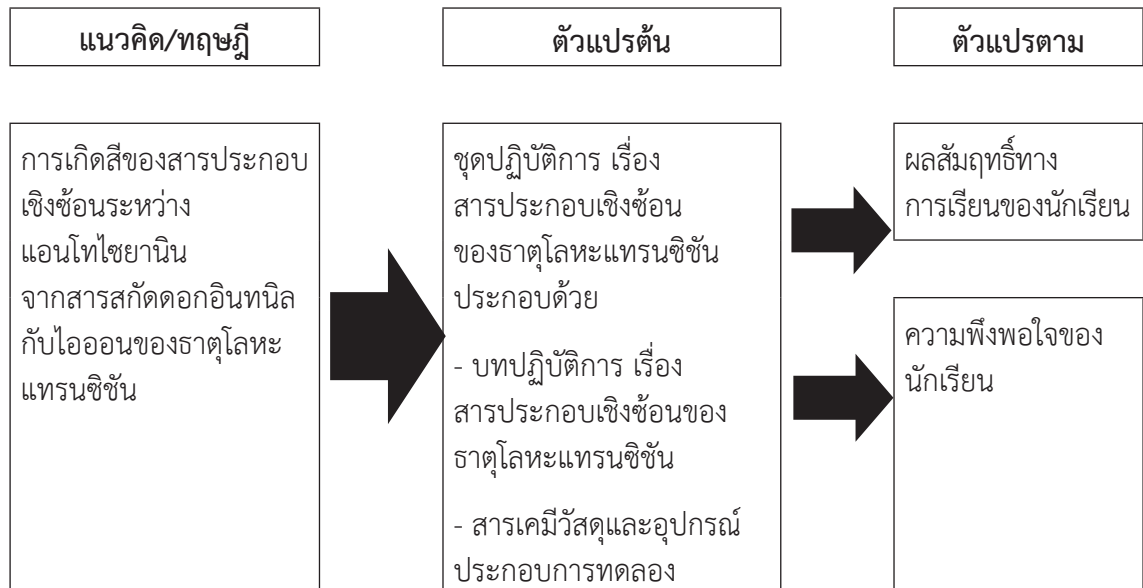
ชุดปฏิบัติการที่ 1 สีของสารประกอบของธาตุโลหะแทรนซิชันและธาตุโลหะเรพรีเซนเททีฟ

ชุดปฏิบัติการที่ 2 ผลของลิแกนด์และโลหะอะตอมกลางที่มีต่อสีของสารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะแทรนซิชัน

ชุดปฏิบัติการที่ 3 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนธาตุโลหะแทรนซิชันโดยเทคนิคดิฟฟิวซิโอมิเกรชันอิเล็กโตรเมตรีผ่านสมาร์ตโฟน

วิธีดำเนินการวิจัย

ขอบเขตการวิจัย/กรอบแนวคิด



ประชากร หรือ กลุ่มเป้าหมาย

ประชากรในการวิจัยในครั้งนี้ คือ นักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 จำนวน 144 คน ซึ่งกำลังศึกษาอยู่ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2567 โรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬารณราชวิทยาลัย มุกดาหาร

กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้ คือ นักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 จำนวน 24 คน ซึ่งกำลังศึกษาอยู่ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2567 โรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬารณราชวิทยาลัย มุกดาหาร ได้มาโดยการสุ่มแบบกลุ่ม (Cluster Sampling)

ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

การศึกษาในครั้งนี้แบ่งการดำเนินงานออกเป็น 3 ระยะ ได้แก่ ระยะที่ 1 การศึกษาสีของสารประกอบเชิงซ้อนของแอนโทไซยานินจากสารสกัดดอกอินทนิลและไอออนของธาตุโลหะแทรนซิชัน ระยะที่ 2 การพัฒนาชุดปฏิบัติการ เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะแทรนซิชัน และระยะที่ 3 การจัดการเรียนรู้

เครื่องมือที่ใช้วิจัย

1. ชุดปฏิบัติการ เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะแทรนซิชัน สร้างโดยอาศัยการศึกษา ลักษณะและสมบัติของสารสกัดดอกอินทนิล และการเปลี่ยนแปลงสีของแอนโทไซยานินจากสารสกัดดอกอินทนิลในการทดสอบไอออนโลหะของธาตุแทรนซิชัน จำนวน 9 ชนิด ได้แก่ โมลิบดีนัม (VI) ไอออน (Mo6+), โคบอลต์ (II) ไอออน (Co2+), นิกเกิล (II) ไอออน (Ni2+), คอปเปอร์ (II) ไอออน (Cu2+),

เฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}), เฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}), โครเมียม (III) ไอออน (Cr^{3+}), โซเดียมไอออน (Na^+) และแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) ที่ความเข้มข้น 0.01-1,000 mg/L ในสภาวะ pH 1, 3, 5, 7, 9, 11 และ 13 โดยเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรด้วยแอปพลิเคชัน RGB Color Detector นำผลการศึกษามาออกแบบเป็นชุดปฏิบัติการแล้วนำไปให้ผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 5 ท่าน ประเมินคุณภาพ แล้วทำการปรับปรุงแก้ไขตามคำแนะนำ

2. บทปฏิบัติการ เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะทรานซิชัน สร้างโดยการศึกษาและสังเคราะห์มาตรฐานสารการเรียนรู้ ตัวชี้วัดและสารการเรียนรู้แกนกลางตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช 2551 (ฉบับปรับปรุง พ.ศ.2560) และหลักสูตรโรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬารณราชวิทยาลัยพุทธศักราช 2551 (ฉบับปรับปรุง พ.ศ.2566) แล้วสร้างบทปฏิบัติการตามการจัดการเรียนรู้แบบวัฏจักรการสืบเสาะหาความรู้ 5 ขั้น (5E's) จำนวน 3 บทปฏิบัติการ จากนั้นนำไปหาประสิทธิภาพตามเกณฑ์ E_1/E_2

3. แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะทรานซิชัน สร้างโดยการศึกษาและวิเคราะห์มาตรฐานสารการเรียนรู้ ผลการเรียนรู้และสารการเรียนรู้แกนกลางตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช 2551 (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. 2560) และหลักสูตรโรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬารณราชวิทยาลัย พุทธศักราช 2551 (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. 2560) แล้วสร้างแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน ซึ่งเป็นแบบทดสอบปรนัย 4 ตัวเลือก จำนวน 40 ข้อ ข้อละ 1 คะแนน รวม 30 คะแนน ตรวจสอบความเที่ยงตรง (Validity) โดยให้ผู้เชี่ยวชาญประเมินความสอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับพฤติกรรมที่วัด โดยผลการประเมินของผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 5 ท่าน พบว่า มีค่าดัชนีความสอดคล้องอยู่ระหว่าง 0.80-1.00 ทำการปรับปรุงแก้ไขตามที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ แล้วนำแบบทดสอบไปทดลองใช้ (Try Out) จากนั้นวิเคราะห์ค่าความเชื่อมั่น (Reliability) โดยใช้สูตร Lovett (rcc) พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.98 และเลือกข้อสอบที่มีค่าความยากง่าย (p) อยู่ระหว่าง 0.40 – 0.80 ค่าอำนาจจำแนกเทียบเกณฑ์ (B-Index) อยู่ระหว่าง 0.54-0.82 จำนวน 20 ข้อ เพื่อนำไปวัดผลสัมฤทธิ์กลุ่มตัวอย่างจำนวน 24 คน

4. แบบสอบถามด้านความพึงพอใจ สร้างโดยการศึกษาเอกสารแล้วสร้างแบบสอบถามด้านความพึงพอใจของนักเรียนที่มีต่อการเรียนโดยใช้ชุดปฏิบัติการ เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะทรานซิชัน ซึ่งเป็นมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ คือ มากที่สุด มาก ปานกลาง น้อย และน้อยที่สุด แล้วนำแบบสอบถามเสนอต่อผู้เชี่ยวชาญ โดยผลการประเมินของผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 5 ท่าน พบว่า มีค่าดัชนีความสอดคล้องอยู่ระหว่าง 0.80-1.00 แล้วทำการปรับปรุงแก้ไขแบบสอบถามตามที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ และนำไปใช้กับกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 24 คน ได้ค่าความเชื่อมั่น เท่ากับ 0.99

การเก็บรวบรวมข้อมูล ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูล ดังนี้

จัดการเรียนรู้โดยใช้ชุดปฏิบัติการ เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะแทรนซิชัน กับกลุ่มตัวอย่าง ซึ่งก็คือ นักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 จำนวน 24 คน เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง แล้ววัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนโดยใช้แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะแทรนซิชัน และให้กลุ่มตัวอย่างทำแบบสอบถามด้านความพึงพอใจที่มีต่อการเรียน โดยใช้ชุดปฏิบัติการ เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะแทรนซิชัน

การวิเคราะห์ข้อมูล ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้นำข้อมูลมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการและค่าสถิติต่าง ๆ ดังนี้

หาคุณภาพของชุดปฏิบัติการ เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะแทรนซิชัน ประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญ หาคุณภาพของบทปฏิบัติการ เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะแทรนซิชัน โดยการหาประสิทธิภาพตามเกณฑ์ E_1/E_2 วิเคราะห์ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนโดยใช้ค่าเฉลี่ยเลขคณิต ร้อยละ และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน วิเคราะห์ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนหลังการเรียนของกลุ่มตัวอย่างกับเกณฑ์ ร้อยละ 80 โดยใช้สถิติ One-Sample T-Test และวิเคราะห์คะแนนความพึงพอใจของกลุ่มตัวอย่างที่มีต่อการเรียน โดยใช้ค่าเฉลี่ยเลขคณิตแล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับเกณฑ์

สรุปผลการวิจัย

การดำเนินงานระยะที่ 1 การศึกษาสีของสารประกอบเชิงซ้อนของแอนโทไซยานิน จากสารสกัดดอกอินทนิลและไอออนของธาตุโลหะแทรนซิชัน พบว่า สารสกัดดอกอินทนิลสีม่วงมีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุด (λ_{max}) เท่ากับ 550 nm มี Total Anthocyanin Content เท่ากับ 1.81 mg CGE/ 100 g of FW สารสกัดดอกอินทนิลเปลี่ยนแปลงสีได้ดีในการทดสอบไอออนโลหะเกือบทุกชนิด ยกเว้นโซเดียมไอออน (Na^+) และแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) โดยความเข้มสีของสารละลายโลหะโมลิบดีนัม (IV) ไอออน (Mo^{6+}), โคบอลต์ (II) ไอออน (Co^{2+}), นิกเกิล (II) ไอออน (Ni^{2+}), และคอปเปอร์ (II) ไอออน (Cu^{2+}) ที่ pH 5 มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด และสารละลายโลหะ เพอร์ริกไอออน (Fe^{3+}), เพอร์รัสไอออน (Fe^{2+}), และโครเมียม (III) ไอออน (Cr^{3+}) ที่ pH 7 มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด และผลต่างของการเปลี่ยนแปลงความเข้มสีของสารสกัดดอกอินทนิลก่อนทดสอบสารละลายโลหะและหลังทดสอบในระบบสีแดง เขียว และน้ำเงิน (Red, Green, & Blue; RGB) พบว่า โมลิบดีนัม (IV) ไอออน (Mo^{6+}) , นิกเกิล (II) ไอออน (Ni^{2+}), คอปเปอร์ (II) ไอออน (Cu^{2+}), เพอร์ริกไอออน (Fe^{3+}), เพอร์รัสไอออน (Fe^{2+}), โครเมียม (III) ไอออน (Cr^{3+}), และอะลูมิเนียมไอออน (Al) มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มสีมากที่สุด ค่าสีน้ำเงิน (B) และโคบอลต์ (II) ไอออน (Co^{2+}) มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มสีมากที่สุด ค่าสีแดง (R)

การดำเนินงานระยะที่ 2 การพัฒนาชุดปฏิบัติการ เรื่องสารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะแทรนซิชัน

1. การพัฒนาชุดปฏิบัติการ เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะแทรนซิชัน เมื่อนำชุดปฏิบัติการ เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะแทรนซิชัน ให้ผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 5 คน ประเมินประสิทธิภาพ ผลจากการประเมินสามารถแสดงได้ดังตาราง 1

ตาราง 1 ประสิทธิภาพของบทปฏิบัติการ เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะแทรนซิชัน

รายการประเมิน		$\bar{X}$
1	คำชี้แจงในการใช้ชุดปฏิบัติการมีความชัดเจน อ่านแล้วเข้าใจและปฏิบัติตามได้ง่าย	4.80
2	วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมีภายในชุดปฏิบัติการครบถ้วน เพียงพอต่อการใช้งาน	4.60
3	ชุดปฏิบัติการสามารถให้ผลการทดลองได้ชัดเจน มีความเหมาะสมในการนำไปปฏิบัติ	4.60
4	ชุดปฏิบัติการมีขนาดพอเหมาะ สามารถเคลื่อนย้ายได้โดยสะดวก	4.70
5	ความปลอดภัยของชุดปฏิบัติการในการใช้งานของนักเรียน	5.00
6	ชุดปฏิบัติการสามารถส่งเสริมความเข้าใจที่ถูกต้องในเนื้อหา	5.00
7	ราคาและความคุ้มค่าของชุดปฏิบัติการ	4.80
8	การออกแบบ ความสวยงาม และความคงทนของชุดปฏิบัติการ	4.80
9	ชุดปฏิบัติการสร้างแรงบันดาลใจให้นักเรียนในการนำไปต่อยอดพัฒนาโครงงานวิทยาศาสตร์ในอนาคต	5.00
เฉลี่ย		4.83
ระดับความเหมาะสม		มากที่สุด

จากตาราง 1 พบว่า ประสิทธิภาพของชุดปฏิบัติการ เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะแทรนซิชันมีค่าเฉลี่ย 4.83 และมีระดับความเหมาะสมอยู่ในระดับมากที่สุด

2. การพัฒนาบทปฏิบัติการ เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะแทรนซิชัน ที่มีประสิทธิภาพ ตามเกณฑ์ร้อยละ 80/80 พบว่า ประสิทธิภาพของบทปฏิบัติการมีประสิทธิภาพ (E_1/E_2) ดังตาราง 2

ตาราง 2 ประสิทธิภาพของบทปฏิบัติการ เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะแทรนซิชัน

ประสิทธิภาพ	คะแนนเต็ม	$\bar{X}$	S.D.	ร้อยละ
ประสิทธิภาพของกระบวนการ (E_1)	30	25.73	3.20	85.76
ประสิทธิภาพของผลลัพธ์ (E_2)	20	17.40	3.08	87.02

ประสิทธิภาพ (E_1/E_2) เท่ากับ 85.76/87.02

จากตาราง 2 บทปฏิบัติการ เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะทรานซิชัน มีประสิทธิภาพของกระบวนการ (E_1) ร้อยละ 85.76 ประสิทธิภาพของผลลัพธ์ E_2 ร้อยละ 87.02 และประสิทธิภาพ (E_1/E_2) เท่ากับ 85.76/87.02 ซึ่งมากกว่าเกณฑ์ที่ตั้งไว้ ดังนั้นบทปฏิบัติการ เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะทรานซิชัน จึงมีประสิทธิภาพเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

การดำเนินงานระยะที่ 3 การจัดการเรียนรู้

1. การเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 หลังเรียนด้วยชุดปฏิบัติการ เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะทรานซิชัน กับเกณฑ์ร้อยละ 80 พบว่า ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 หลังเรียนด้วยชุดปฏิบัติการเทียบเกณฑ์ร้อยละ 80 ได้ผลดังตาราง 3

ตาราง 3 คะแนนผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนเทียบกับเกณฑ์ร้อยละ 80

รายการ	คะแนนเต็ม	N	$\bar{X}$	%	S.D.	df	t	pValue
ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน	20	24	17.40	87.02	3.08	23	10.59*	.00

* มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

จากตาราง 3 พบว่า คะแนนผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนหลังเรียนของนักเรียน มีค่าเท่ากับ 17.40 หรือคิดเป็นร้อยละ 87.02 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ที่ตั้งไว้ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

2. การศึกษาความพึงพอใจของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 ที่มีต่อการเรียนโดยใช้ชุดปฏิบัติการ เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะทรานซิชัน เมื่อนำคะแนนความพึงพอใจของกลุ่มตัวอย่างที่มีต่อการเรียนโดยใช้ชุดปฏิบัติการ เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะทรานซิชัน มาหาค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ผลแสดงดังตาราง 4

ตาราง 4 ความพึงพอใจของนักเรียนที่มีต่อการเรียนโดยใช้ชุดปฏิบัติการ เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะทรานซิชัน

รายการประเมิน	$\bar{X}$
1 บทบาทหน้าที่ที่ได้รับในการดำเนินกิจกรรม	5.00
2 สถานการณ์ของกิจกรรมในชุดกิจกรรม	4.80
3 การนำเสนอผลงานหน้าชั้นเรียน	5.00
4 การแสดงความคิดเห็นภายในกลุ่ม	5.00
5 การวางแผนดำเนินการและการออกแบบการทดลอง	4.80
6 การทดสอบหรือตรวจสอบชิ้นงานของกลุ่มตนเอง เพื่อแก้ไขปรับปรุง	5.00

ตารางต่อ (4)

รายการประเมิน	$\bar{X}$
7 การแลกเปลี่ยนเรียนรู้ ข้อดี ข้อด้อยของกลุ่มตนเองและกลุ่มอื่น ๆ	5.00
8 การเปิดโอกาสให้ร่วมตอบคำถามของครู	5.00
9 สื่อในการจัดการเรียนการสอน	5.00
10 เวลาในการจัดกิจกรรม	5.00
เฉลี่ย	4.96
ระดับความเหมาะสม	มากที่สุด

จากตาราง 4 พบว่า ความพึงพอใจของนักเรียนที่มีต่อการเรียนโดยใช้ชุดปฏิบัติการ เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะทรานซิชัน มีค่าเฉลี่ย 4.96 และมีระดับความเหมาะสมอยู่ในระดับมากที่สุด

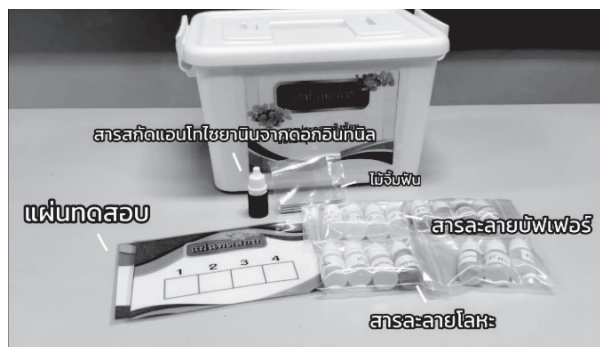
อภิปรายผล

การดำเนินงานระยะที่ 1 การศึกษาสีของสารประกอบเชิงซ้อนของแอนโทไซยานินจาก สารสกัดดอกอินทนิลและไอออนของธาตุโลหะทรานซิชัน สารสกัดดอกอินทนิลมีค่าการดูดกลืนแสง (A) ที่ความยาวคลื่นสูงสุด (Max) เท่ากับ 550 นาโนเมตร ในขณะที่สารสกัดดอกอินทนิลที่สภาวะ pH มากกว่า 7 มีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุด (Max) มากกว่า 550 นาโนเมตร เนื่องจากที่สภาวะ pH 1-7 แอนโทไซยานินยังอยู่ในรูป Flavylium Cation และ Quinoidal Base ซึ่งมีโครงสร้างหลักเป็น แอนโทไซยานินอยู่ ในขณะที่สภาวะ pH มากกว่า 7 แอนโทไซยานินอยู่ในรูป Chalcone ที่วง 6 เหลี่ยม ในโครงสร้างของแอนโทไซยานินถูกทำลาย ดังนั้น Chalcone จึงดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นแตกต่างจาก แอนโทไซยานิน สอดคล้องกับงานวิจัยของ สาวิตรี ไชยบุรี (2561) ที่ศึกษาแอนโทไซยานินจากสารสกัด ข้าวลิ้มผิว เพื่อนำไปใช้เป็นสารทดสอบไอออนทองแดง (Cu) เมื่อจากวิเคราะห์ Total Anthocyanin Content จากสารสกัดดอกอินทนิล ได้เท่ากับ 1.81 mg CGE/ 100 g of FW สารสกัดดอกอินทนิลเมื่อทดสอบ สารละลายโลหะโมลิบดีนัม (VI) ไอออน (Mo6+), โคบอลต์ (II) ไอออน (Co2+), เพอร์ริกไอออน (Fe3+), เพอร์รัสไอออน (Fe2+), โครเมียม (III) ไอออน (Cr3+), นิกเกิล (II) ไอออน (Ni2+) และคอปเปอร์ (II) ไอออน (Cu2+) จะเปลี่ยนแปลงสีจากสารละลายสีม่วงเป็นสารละลายสีน้ำตาล, สีน้ำตาลอ่อน, สีดำ, สีดำอ่อน, สีเขียวอมน้ำตาล, มีสีน้ำตาล, สีเขียวอมเหลือง, และสีน้ำตาล ตามลำดับ โดยความเข้มข้นของสารละลายโลหะโมลิบดีนัม (IV) ไอออน (Mo6+), โคบอลต์ (II) ไอออน (Co2+), นิกเกิล (II) ไอออน (Ni2+), และคอปเปอร์ (II) ไอออน (Cu2+) ที่ pH 5 มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด และสารละลายโลหะ

เฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}), เฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}), และโครเมียม (III) ไอออน (Cr^{3+}) ที่ pH 7 มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด และผลต่างของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารสกัดดอกอินทนิล ก่อนทดสอบสารละลายโลหะและหลังทดสอบในระบบสีแดง เขียวและน้ำเงิน (Red, Green, & Blue; RGB) พบว่า โมลิบดีนัม (IV) ไอออน (Mo^{6+}), นิกเกิล (II) ไอออน (Ni^{2+}), คอปเปอร์ (II) ไอออน (Cu^{2+}), เฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}), เฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}), โครเมียม (III) ไอออน (Cr^{3+}), และอะลูมิเนียมไอออน (Al) มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นมากที่สุดในการทดสอบน้ำเงิน (B) และโคบอลต์ (II) ไอออน (Co^{2+}) มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นมากที่สุดในการทดสอบสีแดง (R) เนื่องจากไอออนโลหะแต่ละชนิดเมื่อเกิดเป็นสารเชิงซ้อนกับแอนโทยานินจากสารสกัดดอกอินทนิลจะให้สีของสารละลายที่แตกต่างกัน ซึ่งสอดคล้องกับบทความวิชาการของ Fedenko, V. S., Shemet, S. A., & Landi, M. (2017) และสีของสารสกัดดอกอินทนิล ก่อนทดสอบและหลังทดสอบโซเดียมไอออน (Na^+) และแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากโซเดียมไอออน (Na^+) และแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) เป็นโลหะที่อยู่ในกลุ่มธาตุหมู่หลัก (Representative Element) ไม่สามารถสร้างพันธะโคออร์ดิเนตโคเวเลนต์กับแอนโทยานินจากสารสกัดดอกอินทนิลเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ให้สีได้

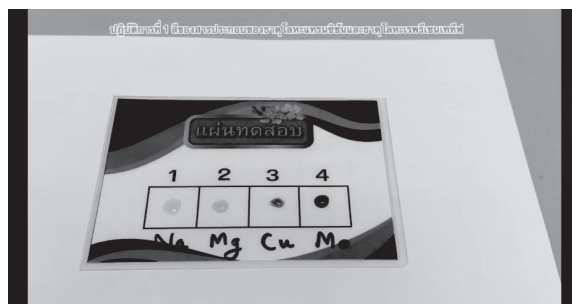
การดำเนินงานระยะที่ 2 การพัฒนาชุดปฏิบัติการ เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะ
แทรนซิชัน

ชุดปฏิบัติการ เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะทรานซิชัน เป็นชุดสารเคมี วัสดุและอุปกรณ์ สำหรับการทดลอง เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะทรานซิชัน โดยผู้วิจัยได้ออกแบบตามหลักการ เคมีสีเขียว (Green Chemistry) คือ ลดปริมาณการใช้สารเคมีที่เป็นอันตราย ใช้สารสกัดจากธรรมชาติ ลดขั้นตอนการทดลอง ไม่ใช่เครื่องแก้วในการทดลอง และวัสดุในการทดลองสามารถใช้ซ้ำได้หลายครั้ง ซึ่งภายในชุดปฏิบัติการ ประกอบไปด้วย สารสกัดดอกอินทนิล สารละลายไอออนโลหะ บทปฏิบัติการ แผ่นทดสอบ ขนาด 4 ช่อง และ 8 ช่อง ไม้จิ้มฟัน ปากกาไวท์บอร์ด และกระดาษทิชชู ดังภาพ 1



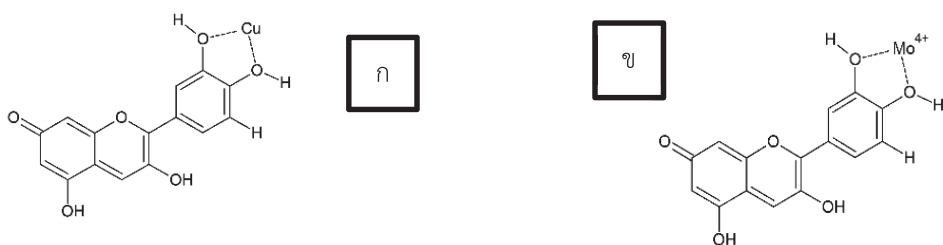
ภาพ 1 ส่วนประกอบของชุดปฏิบัติการ เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุแทรนซิชัน

ตัวอย่างผลการใช้ชุดปฏิบัติการ เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุแทรนซิชัน จัดกิจกรรมการเรียนรู้ ในบทปฏิบัติการที่ 1 เปรียบเทียบสีของสารประกอบของธาตุโลหะแทรนซิชันและธาตุโลหะเรพรีเซนเททีฟซึ่งได้ผลการทดลอง ดังภาพ 2



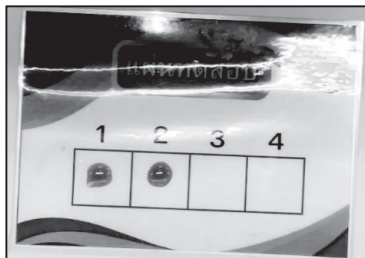
ภาพ 2 ผลการทดลองในปฏิบัติการที่ 1

จากภาพ 2 เมื่อทดสอบโซเดียมไอออน (Na^+) และแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) ในช่องทดสอบที่ 1 และ 2 ด้วยสารสกัดดอกอินทนิลจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสี เนื่องจากโซเดียมไอออน (Na^+) และแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) เป็นธาตุเรพรีเซนเททีฟ ซึ่งไม่เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับแอนโทไซยานินจากสารสกัดดอกอินทนิลในขณะที่คอปเปอร์ (II) ไอออน (Cu^{2+}) และโมลิบดีนัม (IV) ไอออน (Mo^{6+}) เมื่อทดสอบด้วยสารสกัดดอกอินทนิลจะเปลี่ยนแปลงสีดังสังเกตเห็นในช่องทดสอบที่ 3 และ 4 เนื่องจากคอปเปอร์ (II) ไอออน (Cu^{2+}) และโมลิบดีนัม (IV) ไอออน (Mo^{6+}) เป็นธาตุแทรนซิชัน จึงเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับแอนโทไซยานินจากสารสกัดอินทนิลที่มีสี โครงสร้างเชิงซ้อนระหว่างแอนโทไซยานินจากสารสกัดดอกอินทนิลและคอปเปอร์ (II) ไอออน (Cu^{2+}) และโมลิบดีนัม (IV) ไอออน (Mo^{6+}) แสดงได้ดังภาพ 3



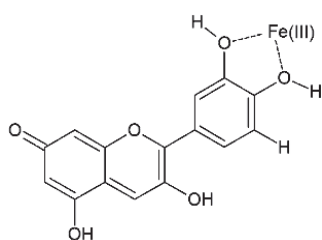
ภาพ 3 โครงสร้างเชิงซ้อนระหว่างแอนโทไซยานินกับ (ก) คอปเปอร์ (II) ไอออน (Cu^{2+}) และ (ข) โมลิบดีนัม (IV) ไอออน (Mo^{6+})

เมื่อพิจารณาบทปฏิบัติการที่ 2 ตอนที่ 1 ศึกษาผลของลิแกนด์ที่มีต่อสีของสารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะแทรนซิชัน ได้ผลการทดลองดังภาพ 4

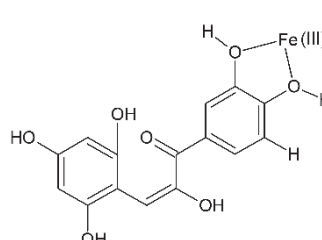


ภาพ 4 ผลการทดลองในปฏิบัติการที่ 2 ตอนที่ 1

จากภาพ 4 เมื่อทดสอบเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) ในช่องทดสอบที่ 1 และ 2 ด้วยสารสกัดดอกอินทนิล โดยทดสอบในสภาวะที่ต่างกัน คือ ช่องทดสอบที่ 1 pH 3 และช่องทดสอบที่ 2 pH 11 พบว่า สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอนโทไซยานินจากสารสกัดดอกอินทนิลกับเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) ทั้ง 2 ช่องทดสอบเกิดสีแตกต่างกัน เนื่องจากที่ pH 3 แอนโทไซยานินอยู่ในรูป Quinoidal Base แต่ที่ pH 11 แอนโทไซยานินอยู่ในรูป Chalcone ดังนั้นเมื่อโครงสร้างของแอนโทไซยานินที่เป็นลิแกนด์ของเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) แตกต่างกัน จึงส่งผลให้สารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นมีสีแตกต่างกันด้วย โครงสร้างเชิงซ้อนระหว่างแอนโทไซยานินในรูป Quinoidal Base กับเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) แสดงได้ดังภาพ 5 (ก) และโครงสร้างเชิงซ้อนระหว่างแอนโทไซยานิน ในรูป Chalcone กับเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) แสดงได้ดังภาพ 5 (ข)



ก



ข

ภาพ 5 (ก) โครงสร้างเชิงซ้อนระหว่างแอนโทไซยานินในรูป Quinoidal Base กับเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) อ้างอิงจากงานวิจัยของ เกศินี เสาวงามจันทร์ และชลดา เตชะเกียรติไกร อีกรารณวงศ์ (2565)

(ข) โครงสร้างเชิงซ้อนระหว่างแอนโทไซยานินในรูป Chalcone กับเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+})

ซึ่งผลการประเมินประสิทธิภาพของชุดปฏิบัติการ เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะแทรนซิชัน โดยผู้เชี่ยวชาญอยู่ในระดับมากที่สุด เนื่องจากชุดปฏิบัติการส่งเสริมให้นักเรียนมีความรู้ความเข้าใจในเรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะแทรนซิชันมากขึ้น กระตุ้นให้นักเรียนมีความกระหายอยากที่จะเรียนรู้ เนื่องจากชุดทดลองมีขนาดพกพาได้สะดวก ใช้งานง่าย ไม่จำกัดสถานที่และเวลาในการทดลอง

นักเรียนสามารถเรียนรู้ได้ด้วยตนเอง เนื่องจากมีบทบาทปฏิบัติการเป็นคู่มือประกอบการเรียนรู้ และมีความปลอดภัย เนื่องจากไม่ได้ใช้เครื่องแก้วหรือเครื่องมือชิ้นสูง สังเกตเห็นผลการทดลองได้ชัดเจน และนักเรียนเกิดแนวความคิดที่จะสร้างสรรค์ต่อยอดเป็นโครงงานวิทยาศาสตร์ในอนาคต เนื่องจากชุดปฏิบัติการทำหน้าที่เชื่อมโยงทฤษฎีเข้ากับบริบทรอบตัวของนักเรียน และมีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเข้ามาช่วยในการทดลอง เช่น ปฏิบัติการที่ 3 ที่ใช้แอปพลิเคชันในสมาร์ทโฟนมาวัดค่าความเข้มข้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ สุนิสา ช้างพาลี, วิริงรอง แสงอรุณเลิศ และภาคิน อินทร์ชิตจ้อย (2560) ที่ใช้ชุดปฏิบัติการเคมีแบบย่อส่วน สำหรับนักเรียนชั้นประถมศึกษาปีที่ 6 โดยพบว่าชุดปฏิบัติการทางเคมีแบบย่อส่วนส่งผลให้การเรียนรู้องค์ความรู้ทางเคมีมีประสิทธิภาพและมีความปลอดภัยสูง ช่วยให้การทดลองทางเคมีเป็นเรื่องที่เข้าถึงได้ง่าย ส่งผลให้ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนและทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ของนักเรียนสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด

การพัฒนาบทบาทปฏิบัติการ เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะทรานซิชัน มีประสิทธิภาพผ่านเกณฑ์ที่ตั้งไว้ เนื่องจากบทบาทปฏิบัติการได้ออกแบบตามการจัดการเรียนรู้แบบวัฏจักรการสืบเสาะหาความรู้ 5 ขั้น (5E's) ซึ่งในกิจกรรมการเรียนรู้นักเรียนมีบทบาทในการสืบเสาะเพื่อสร้างองค์ความรู้ผ่าน 5 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นที่ 1 การสร้างความสนใจ (Engagement) นักเรียนจะถูกกระตุ้นให้มีโอกาสตั้งคำถามต่อประเด็นที่เกี่ยวข้องกับสารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะทรานซิชันที่นำเสนอในชั้นเรียน จากนั้นขั้นที่ 2 การสำรวจและค้นหา (Exploration) นักเรียนจะต้องออกแบบและดำเนินการทดลองเพื่อนำข้อมูลมา ขั้นที่ 3 อธิบายและลงข้อสรุป (Explanation) โดยนักเรียนจะต้องนำเสนอข้อมูลที่ค้นพบในรูปของโครงสร้างทางเคมี สมการเคมี หรือแบบจำลองต่าง ๆ และนักเรียนจะต้องนำองค์ความรู้ที่ค้นพบไปอธิบายปรากฏการณ์อื่น ๆ ในธรรมชาติที่เกี่ยวข้องกับสารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะทรานซิชัน ในขั้นที่ 4 การขยายความรู้ (Elaboration) โดยการออกแบบสร้างสรรค์นำเสนอแนวคิดที่จะพัฒนาเป็นโครงงานวิทยาศาสตร์ แล้วจึงวัดความรู้ความเข้าใจในขั้นที่ 5 ประเมินผล (Evaluation) โดยวิธีการที่หลากหลาย ซึ่งกระบวนการดังกล่าวนักเรียนมีโอกาสดำเนินการความคิดอย่างเต็มที่ และได้ลงมือเรียนรู้ด้วยตนเอง ส่งผลให้นักเรียนมีประสบการณ์ตรงและสามารถเชื่อมโยงเนื้อหาทฤษฎีเข้ากับปรากฏการณ์ทางธรรมชาติได้ง่ายมากขึ้น นักเรียนจึงสามารถสร้างองค์ความรู้ได้ด้วยตนเอง ดังนั้นนักเรียนจึงมีคะแนนจากแบบทดสอบหลังเรียนในแต่ละบทบาทปฏิบัติการและแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนสูง ส่งผลให้ประสิทธิภาพของกระบวนการ/ประสิทธิภาพของผลลัพธ์ (E_1/E_2) ผ่านเกณฑ์ที่ตั้งไว้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ปริญญา พิมพ์ลา (2566) ที่ได้พัฒนาชุดกิจกรรมการจัดการเรียนรู้แบบออนไลน์ โดยใช้กระบวนการสืบเสาะหาความรู้แบบ 5E สำหรับพัฒนาผลสัมฤทธิ์การเรียนรู้เรื่อง ชีวิตในสิ่งแวดล้อม ของนักเรียนระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 พบว่า ชุดกิจกรรมการจัดการเรียนรู้มีประสิทธิภาพเท่ากับ 81.61/83.80 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ที่ตั้งไว้ คือ 80/80 อีกทั้งการออกแบบบทบาทปฏิบัติการ

ได้เปิดโอกาสให้นักเรียนมีการใช้คำถามแลกเปลี่ยนความคิดและร่วมมือกันวางแผนการเรียนรู้ ส่งเสริมให้นักเรียนมีความกระตือรือร้นในการเรียนรู้ โดยนักเรียนมีการสืบค้นนำความรู้มาเชื่อมโยง พร้อมกับลงมือปฏิบัติใช้วัสดุอุปกรณ์ มีการฝึกให้นักเรียนใช้ความคิดของตนเองนำสิ่งที่ค้นพบข้อมูล จากการศึกษาค้นคว้าและทดลองมาอภิปรายจนเกิดองค์ความรู้ นอกจากนี้ นักเรียนยังมีอิสระและเวลา ในการทำงาน เน้นบรรยากาศที่สร้างความพึงพอใจให้กับผู้เรียนซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย ของแมน เชื้อบางแก้ว และพัลลวี สละชีพ (2565)

การดำเนินงานระยะที่ 3 การจัดการเรียนรู้

ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 หลังเรียนด้วยชุดปฏิบัติการ เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะทรานซิชัน ผ่านเกณฑ์ร้อยละ 80 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ 0.05 เนื่องจากชุดปฏิบัติการมีสารเคมี วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้งานได้ง่าย สังเกตเห็นผลการทดลอง ได้ชัดเจน ได้ผลการทดลองเป็นไปตามทฤษฎี นักเรียนจึงสามารถเชื่อมโยงผลการทดลองเข้ากับเนื้อหา ทฤษฎีได้ง่าย และบทปฏิบัติการ เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะทรานซิชัน ที่ออกแบบ ตามการจัดการเรียนรู้แบบวัฏจักรการสืบเสาะหาความรู้ 5 ขั้น (5E's) ก็เป็นกระบวนการที่ส่งเสริม ให้นักเรียนเกิดการสร้างองค์ความรู้ได้ด้วยตนเอง ส่งผลให้นักเรียนมีความรู้ความเข้าใจในเนื้อหาทฤษฎี มากขึ้นและยังมีความคงทนขององค์ความรู้ ส่งผลให้นักเรียนสามารถได้คะแนนจากแบบทดสอบ วัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนผ่านเกณฑ์ที่ตั้งไว้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ พัทรินทร์ วัฒนราช (2563) ที่ได้พัฒนาชุดกิจกรรมการเรียนรู้ตามกระบวนการสืบเสาะหาความรู้ (5E) เรื่อง พลังงานไฟฟ้า วิชาวิทยาศาสตร์ สำหรับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 3 ซึ่งพบว่า นักเรียนที่เรียนโดยใช้ชุดกิจกรรมการเรียนรู้ มีผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนหลังเรียนสูงกว่าก่อนเรียน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 โดยชุดกิจกรรม การเรียนรู้ตามกระบวนการสืบเสาะหาความรู้ (5E) จัดการเรียนรู้อย่างเป็นกระบวนการที่จะส่งผล เสริมให้ผู้เรียนสร้างองค์ความรู้ได้ง่ายและมีเนื้อหาที่มีความยากง่ายเหมาะสมกับระดับชั้นของนักเรียน และการที่นักเรียนได้เรียนรู้ด้วยการลงมือปฏิบัติจริงด้วยตนเองทุกขั้นตอน ทำให้นักเรียนได้ใช้กระบวนการคิด อย่างเป็นระบบและใช้กระบวนการแสวงหาความรู้อย่างมีเหตุผลเป็นขั้นตอน นักเรียนจึงสามารถพัฒนา ความคิดอย่างเต็มที่และเมื่อนักเรียนได้ข้อค้นพบของตนเองแล้ว จึงนำเสนอเพื่อให้เกิดการอภิปรายแลกเปลี่ยน เรียนรู้ซึ่งกันและกัน ดังงานวิจัยของ แวชากิยะห์ วานี (2566) ที่ได้พัฒนาชุดกิจกรรมการเรียนรู้ที่เน้น กิจกรรมการลงมือปฏิบัติจริง โดยใช้วิธีการจัดการเรียนรู้แบบสืบเสาะหาความรู้ 5 ขั้น (5E) เรื่อง ปริมาณ สารสัมพันธ์ สำหรับนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 ซึ่งพบว่า ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนหลังเรียนสูงกว่าก่อนเรียน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ความพึงพอใจของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 ที่มีต่อการเรียนโดยใช้ชุดปฏิบัติการ เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะทรานซิชัน มีค่าเฉลี่ย 4.96 อยู่ในระดับมากที่สุด เนื่องจากชุดปฏิบัติการ มีความแปลกใหม่แตกต่างจากปฏิบัติการที่นักเรียนเคยปฏิบัติ ชุดปฏิบัติการใช้งานสะดวกมีความเหมาะสม กับระดับชั้นของนักเรียน เวลาที่ใช้ในการทำปฏิบัติการเหมาะสมกับความสนใจของนักเรียน ทำปฏิบัติการ มีแบบฝึกหัดที่ให้นักเรียนได้ทบทวนความรู้ความเข้าใจ อีกทั้งนักเรียนได้ปฏิบัติด้วยเองผ่านการทำงานร่วมกัน แบบกลุ่ม นักเรียนจึงได้มีโอกาสแลกเปลี่ยนเรียนรู้ร่วมกันกับเพื่อน ๆ มีบรรยากาศที่เหมาะสมต่อการเรียน และชุดปฏิบัติการยังกระตุ้นความสนใจของนักเรียนได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ น้ำฝน คุจริญไพศาล, ศุทธดา หมั่นแก้ว และสตีททัย ลิเอกวรรณเจริญ (2566) ที่ได้พัฒนาชุดกิจกรรมการเรียนรู้ที่ส่งเสริมทักษะ การทดลองทางวิทยาศาสตร์ เรื่อง เซลล์ไฟฟ้าเคมีจากน้ำผลไม้ สำหรับนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 3

ข้อเสนอแนะ

1. ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

1.1 การเรียนรู้ตามบทปฏิบัติการ เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนของธาตุโลหะทรานซิชัน ของนักเรียน ครูผู้สอนควรให้คำแนะนำ ช่วยเหลือ และประเมินการเรียนรู้ของนักเรียนอย่างสม่ำเสมอ เพื่อให้นักเรียนศึกษาได้สำเร็จตามเป้าหมาย

1.2 ดอกอินทนิลสามารถอบแห้งเก็บไว้ใช้สกัดสารสกัดอินทนิล สำหรับการจัดการเรียนรู้ นอกฤดูออกดอกของต้นอินทนิลได้

1.3 ในการวัดค่าความเข้มสี โดยใช้แอปพลิเคชัน RGB Color Detector ในบทปฏิบัติการที่ 3 ควรศึกษาในช่วงระยะเวลา สถานที่ และสภาวะแวดล้อมใกล้เคียงกัน เนื่องจากเมื่อศึกษาในระบบเปิดแสง จะมีผลต่อค่าความเข้มสีที่วัดได้โดยตรง ดังนั้นค่าความเข้มสีที่ได้จึงมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับระดับของแสง จากสิ่งแวดล้อม

2. ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป

2.1 การวิจัยครั้งต่อไปควรศึกษาและออกแบบระบบปิดที่เหมาะสมสำหรับการวัดค่าความเข้มสี โดยใช้แอปพลิเคชัน RGB Color Detector เพื่อให้มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด โดยการออกแบบระบบ ที่ไม่มีผลรบกวนจากแสงภายนอก ซึ่งจะทำให้ปริมาณของไอออนโลหะที่ตรวจวัดได้มีความถูกต้องมากที่สุด

2.2 การวิจัยครั้งต่อไปควรพัฒนาบทปฏิบัติการที่ส่งเสริมทักษะการสร้างสรรค์โครงงาน วิทยาศาสตร์ ตามแนวทางการจัดการเรียนรู้ต่าง ๆ เช่น การจัดการเรียนรู้โดยใช้โครงงานเป็นฐาน (PBL) การจัดการเรียนรู้ตามแนวทางสะเต็มศึกษา เป็นต้น

2.3 การวิจัยครั้งต่อไปควรศึกษาทักษะหรือสมรรถนะที่สำคัญต่อการเรียนรู้ในศตวรรษที่ 21 เช่น การคิดแก้ปัญหา การคิดวิเคราะห์ การคิดขั้นสูง การคิดอย่างมีวิจารณญาณ การคิดสร้างสรรค์ การคิดเชิงระบบ เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- เกวลี ขอบธรรม และชลดา เดชาเกียรติไกร อีกรารณวงศ์. (2565). การพัฒนาเซ็นเซอร์สียาง่ายสำหรับการตรวจวัดไอออนโลหะทองแดงและเหล็ก. *PSRU Journal of Science and Technology*, 7(2), 14-29.
- น้ำฝน คูเจริญไพศาล, ศุทธดา หมั่นแก้ว และสตีทชัย ลิเอกรวรรณเจริญ. (2566). การพัฒนาชุดกิจกรรมการเรียนรู้ที่ส่งเสริมทักษะการทดลองทางวิทยาศาสตร์ เรื่องเซลล์ไฟฟ้าเคมีจากน้ำผลไม้ สำหรับนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 3. *วารสารครุศาสตร์อุตสาหกรรม*, 22(3), 52-66.
- ปริญญา พิมพ์ลา. (2566). การพัฒนาชุดกิจกรรมการจัดการเรียนรู้แบบออนไลน์โดยใช้กระบวนการสืบเสาะหาความรู้แบบ 5E สำหรับการจัดกิจกรรมการเรียนรู้เรื่องชีวิตในสิ่งแวดล้อมของนักเรียนระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 โรงเรียนนครไทย. *วารสารครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์*, 2(2), 31-42.
- พัชรินทร์ วัฒนราช. (2563). การพัฒนาชุดกิจกรรมการเรียนรู้ตามกระบวนการสืบเสาะหาความรู้ (5E) เรื่องพลังงานไฟฟ้า วิชาวิทยาศาสตร์ สำหรับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 3. *วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต*, 16(2), 42-57.
- ภัทราวดี เข้มเพชร. (2564). *การวิเคราะห์หาโลหะหนักในข้าวโดยเทคนิคจี้ทอลิมเมจคัลเลอรีเมตรี* (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ไม่ได้ตีพิมพ์). มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- แมน เชื้อบางแก้ว และพัสวีย์ สละชีพ. (2565). การพัฒนาชุดกิจกรรมการเรียนรู้ เรื่อง เคมีอินทรีย์ สำหรับรายวิชาเคมี 5 ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 โรงเรียนพระนารายณ์ จังหวัดลพบุรี. *วารสารราชนครินทร์*, 19(2), 20-30.
- ยุรศักดิ์ นพวงศ์. (2560). *การพัฒนาชุดทดสอบเหล็กโดยใช้สารสกัดจากฝรั่ง* (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ไม่ได้ตีพิมพ์). มหาวิทยาลัยทักษิณ.
- เวชากิยะห์ วานี. (2566). การพัฒนาชุดกิจกรรมการเรียนรู้ที่เน้นกิจกรรมการลงมือปฏิบัติจริง โดยใช้วิธีการจัดการเรียนรู้แบบสืบเสาะหาความรู้ 5 ขั้น (5E) เพื่อส่งเสริมทักษะการคิดวิเคราะห์ เรื่อง ปริมาณสารสัมพันธ์ สำหรับนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ไม่ได้ตีพิมพ์). มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา.
- สาวิตรี ไชยบุรี. (2561). *การพัฒนาวิธีวิเคราะห์ทองแดงโดยใช้รีเอเจนต์ธรรมชาติสกัดจากข้าวลิ้มผัว และตรวจวัดทางแสงด้วยตัวตรวจวัดชนิดฟลูออโร* (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ไม่ได้ตีพิมพ์). มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

สำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน กระทรวงศึกษาธิการ. (2560.) *ตัวชี้วัดและสาระการเรียนรู้แกนกลาง กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. 2560) ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช 2551*. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย จำกัด.

สุนิสา ช้างพาลี, วิรัตน์ แสงอรุณเลิศ และภาคิน อินทร์ชิตจ้อย. (2560). การสอนแบบสืบเสาะหาความรู้ 7 ขั้น โดยใช้ชุดปฏิบัติการเคมีแบบย่อส่วน เพื่อเสริมสร้างผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนและทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ของนักเรียนชั้นประถมศึกษาปีที่ 6. *วารสารบัณฑิตวิจัย*, 8(2), 83-99.