

การตรวจวัดไอออนโลหะโดยใช้สารสกัดจากดอกอินทนิล  
ร่วมกับเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรีบนสมาร์ตโฟน  
THE MEASUREMENT OF METAL IONS USING *LAGERSTROEMIA*  
*SPECIOSA* (L.) PERS. FLOWER EXTRACTS WITH DIGITAL IMAGE  
COLORIMETRY TECHNIQUES ON SMARTPHONES

ธนพัฒน์ ทับไธสง\* และ สุกัญญา กิ่งกลาง

Thanaphat Tabthasong\*, and Sukanya Kuengklang

โรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬาราชวิทยาลัย มุกดาหาร

Princess Chulabhorn Science High School Mukdahan

\*corresponding author e-mail: t.tabthasong@gmail.com

(Received: 4 December 2024; Revised: 25 March 2025; Accepted: 4 April 2025)

บทคัดย่อ

แอนโทไซยานินเป็นลิแกนด์ที่สร้างพันธะกับไอออนของโลหะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีสีสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดเชิงคุณภาพ และเมื่อใช้เทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรีร่วมด้วยก็จะสามารถตรวจวัดเชิงปริมาณได้ ดังนั้นการศึกษาค้นคว้าวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีของสารสกัดเมื่อทดสอบไอออนโลหะที่ความเข้มข้นแตกต่างกันร่วมกับเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรี แอนโทไซยานินได้จากการสกัดดอกอินทนิลด้วยน้ำปราศจากไอออน วิเคราะห์ปริมาณแอนโทไซยานินรวมโดยใช้วิธีพีเอช-ดีฟเฟอเรนเชียล ทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของสารสกัดในไอออนโลหะ 12 ชนิด ได้แก่ อลูมิเนียมไอออน โคบอลต์ (II) ไอออนโครเมียม (II) ไอออน คอปเปอร์ (II) ไอออน เพอร์รัส (II) ไอออน เพอร์ริก (III) ไอออน แมงกานีสไอออน แมงกานีส (II) ไอออน โมลิบดีนัม (VI) ไอออน นิกเกิล (II) ไอออน เลด (II) ไอออน และซิงค์ (II) ไอออน ในสภาวะ pH 1–13 วัดค่าความเข้มสีแดง เขียวและน้ำเงิน (Red, Green & Blue; RGB) โดยใช้แอปพลิเคชัน RGB Color Detector สร้างกราฟมาตรฐานความเข้มข้นระหว่างค่าความเข้มสีและความเข้มข้นของสารละลายโลหะ และทดสอบค่าความแม่นยำในการวิเคราะห์ด้วยสถิติ Paired t-test ผลการศึกษา พบว่า สารสกัดจากดอกอินทนิลมีสีม่วงดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุด ( $\lambda_{max}$ ) เท่ากับ 550 นาโนเมตร มีปริมาณแอนโทไซยานินรวม (Total anthocyanin content) เท่ากับ 1.81 mg CGE/ 100 g of FW สารสกัดดอกอินทนิลเปลี่ยนแปลงสีได้ชัดเจนเมื่อทดสอบโคบอลต์ (II) ไอออนโครเมียม (II) ไอออน เพอร์รัส (II) ไอออน เพอร์ริก (III) ไอออน โมลิบดีนัม (VI) ไอออน และ ซิงค์ (II)

ไอออน ค่า  $R^2$  จากกราฟมาตรฐานเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรี เพอร์รัส (II) ไอออน และเพอร์ริก (III) ไอออน จากสีแดง เขียวและน้ำเงิน มีค่าตั้งแต่ 0.990 ขึ้นไป และการทดสอบค่าความแม่นยำในการวิเคราะห์เพอร์รัส (II) ไอออน และเพอร์ริก (III) ไอออน ด้วยสถิติ Paired t-test ระหว่างเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรีกับสเปกโทรโฟโตเมตรี พบว่า มีความแม่นยำไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99 ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดเป็นชุด Test kit สำหรับตรวจหาหรือตรวจวัดปริมาณไอออนของโลหะที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมต่อไปในอนาคต

**คำสำคัญ:** การตรวจวัดไอออนโลหะ สารสกัดดอกอินทนิล เทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรี

### Abstract

The anthocyanin is a ligand that forms complexes with metal ions, creating colored coordination compounds. These can be applied for qualitative analysis, and when combined with digital image colorimetry, they allow for quantitative measurement. Therefore, the objective of this study was to investigate the color change of the extract when tested with metal ions at varying concentrations, along with the digital image colorimetry technique. Anthocyanin was extracted from the flowers of the *Lagerstroemia speciosa* (L.) Pers. using deionized water. The total anthocyanin content was determined by the pH-differential method. The color change of the extract was tested with 12 types of metal ions: Aluminum ion, Cobalt (II) ion, Chromium (II) ion, Copper (II) ion, Ferrous (II) ion, Ferric (III) ion, Magnesium ion, Manganese (II) ion, Molybdenum (VI) ion, Nickel (II) ion, Lead (II) ion, and Zinc (II) ion, under pH 1–13. The intensity of the red, green, and blue (RGB) values was measured using the RGB Color Detector application. A standard concentration graph was created between the color intensity and the metal ion solution concentration, and the accuracy of the analysis was tested using the Paired t-test statistical method. The results revealed that the extract from the *Lagerstroemia speciosa* (L.) Pers. flowers was purple and absorbed light at the maximum wavelength ( $\lambda_{max}$ ) of 550 nm. The total anthocyanin content was 1.81 mg CGE/100 g of FW. The extract exhibited clear color changes when tested with Cobalt (II) ion, Chromium (II) ion, Ferrous (II) ion, Ferric (III) ion, Molybdenum (VI) ion, and Zinc (II) ion. The  $R^2$  values from the standard graphs of the digital image colorimetry technique for Ferrous (II) ion and Ferric (III) ion, derived from the red, green, and blue values, were all above 0.990. The accuracy test using the Paired t-test between the digital image colorimetry technique and spectrophotometry for Ferrous (II)

ion and Ferric (III) ion analysis showed no significant difference at the 99% confidence level. This indicates that the method can be developed into a test kit for detecting or measuring the concentration of metal ions in environmental samples in the future.

**Keywords:** Metal ion measurement, *Lagerstroemia speciosa* (L.) Pers. extract, Digital image colorimetry techniques

## บทนำ

โลหะ เป็นธาตุที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมด้านต่างๆ ซึ่งไอออนของโลหะมีโอกาสปนเปื้อนสู่ระบบนิเวศและสิ่งแวดล้อม ซึ่งไอออนของโลหะเหล่านี้มีผลกระทบต่อระบบชีวภาพของสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม พบว่าโลหะปริมาณเพียงเล็กน้อยก็ก่อให้เกิดผลเสียต่อร่างกายหลายประการ (เกวลี และชลดา, 2565) เช่น เกิดการทำลายผนังเซลล์ ก่อให้เกิดอนุมูลอิสระ ทำให้หลอดเลือดอักเสบ ผนังหลอดเลือดขรุขระ เกิดความไม่เรียบของพื้นผิว ส่งผลต่อกลไกการสร้างไนตริกออกไซด์ของหลอดเลือด ทำให้หลอดเลือดขาดความยืดหยุ่นและหดตัว เป็นต้น (รวีวรรณ และคณะ, 2560) ตัวอย่างโรคที่เกิดจากโลหะ ได้แก่ อัลไซเมอร์ โรคพาร์กินสัน ออทิซึม โรควัวใจและหลอดเลือด โรคเบาหวาน โรคความดันโลหิตสูง โรคไตเสื่อม ตาเสื่อม โรคเรื้อรังต่างๆ เป็นต้น

ดังนั้นการตรวจวัดเพื่อหาปริมาณโลหะจึงมีความสำคัญและได้รับความสนใจในการคิดค้นและพัฒนาเรื่อยมา จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเทคนิคที่ใช้ในการตรวจหาปริมาณโลหะหนักในปัจจุบัน ได้แก่ เทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโทรสโกปี (Atomic Absorption Spectroscopy; AAS) เทคนิคอะตอมมิกอีมิสชันสเปกโทรสโกปี (Atomic Emission Spectroscopy; AES) ที่มีแหล่งกำเนิดและกระตุ้นอะตอมแบบใช้อาร์กอนพลาสมา (Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy; ICP–AES) เทคนิคแมสสเปกโทรเมตรี (Mass Spectrometry; MS) ที่มีแหล่งกำเนิดและกระตุ้นอะตอมแบบใช้อาร์กอนพลาสมา (Inductively coupled plasma–mass spectrometry; ICP–MS) (Mane et al., 2025) นอกจากนี้เทคนิคทางสเปกโทรสโกปีแล้ว ยังมีเทคนิคทางไฟฟ้าเคมี คือ เทคนิคโวลแทมเมตรี (Voltammetry) และการดูดกลืนและคายพลังงานของธาตุเมื่อได้รับรังสีเอกซ์เข้าไป คือ เทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) แต่เทคนิคดังกล่าวมีข้อจำกัด คือ เครื่องมือมีความซับซ้อนทำให้ต้องการผู้เชี่ยวชาญในการควบคุมเครื่องมือ ราคาและค่าบำรุงรักษาสูงมาก และมีขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างยุ่งยาก ปัจจุบันมีการตรวจวัดโลหะโดยใช้เทคนิคการตรวจวัดสีด้วยเทคนิคการสังเกตด้วยตาเปล่า (Naked-eye method) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ง่ายต่อการวิเคราะห์ รวดเร็ว และราคาถูกไม่ต้องใช้เครื่องมือขั้นสูง ตัวอย่างเช่นงานวิจัยของ Shobana (2023) ที่ได้ใช้เทคนิคการสังเกตด้วยตาเปล่าในการตรวจวัดเฟอร์รัส (II) ไอออน โดยใช้สารสกัด

จากผลพบว่า (*Syzgium cumini*) เป็นรีเอเจนต์ พบว่า เมื่อทดสอบเฟอร์รัส (II) ไอออน สารสกัด จะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน และมีความไวในการทดสอบ (sensitive) อยู่ที่ 1 ppm

จากการศึกษา พบว่า แอนโทไซยานินที่สกัดจากดอกไม้ในธรรมชาติเป็นลิแกนด์ที่สามารถนำมาใช้ในการตรวจวัดไอออนโลหะได้ เนื่องจากโครงสร้างของแอนโทไซยานิน มีคุณสมบัติเหมาะสมที่จะทำหน้าที่เป็นลิแกนด์กับโลหะซึ่งทำหน้าที่เป็นอะตอมกลางในการรับคู่อิเล็กตรอนจากลิแกนด์เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีสี สามารถสังเกตสีด้วยตาเปล่าได้ชัดเจน โดยแอนโทไซยานินเป็นรงควัตถุที่พบในดอกไม้หรือพืชที่มีสีชมพู-ม่วงหลายชนิด ได้แก่ อัญชัน กระเจี๊ยบแดง และกะหล่ำปลีสีม่วง เป็นต้น เช่น งานวิจัยของ สาวิตรี (2561) ที่ใช้สารสกัดจากข้าวลิ้มพัวในการวิเคราะห์คอปเปอร์ (II) ไอออน แอนโทไซยานินจากสารสกัดสามารถทำปฏิกิริยากับคอปเปอร์ (II) ไอออน เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนสีม่วงแกมน้ำเงิน ในการศึกษาครั้งนี้สนใจที่จะใช้แอนโทไซยานินจากดอกอินทนิล (*LAGERSTROEMIA SPECIOSA* (L.) PERS.) ซึ่งเป็นพืชที่พบได้ทั่วไปในบริเวณโรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬาราชวิทยาลัย มุกดาหาร ออกดอกในช่วงต้นฤดูฝนและยังไม่มีการวิจัยที่ศึกษามากนัก

แต่เทคนิคการสังเกตด้วยตาเปล่ายังมีข้อจำกัดในเรื่องการวิเคราะห์เชิงปริมาณ ปัจจุบันได้มีงานวิจัยที่นำหลักการของเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอร์ิเมตรี (Digital image colorimetry techniques) ซึ่งอาศัยการถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัล แล้วประมวลผลภาพถ่ายออกมาเป็นค่าสีแดง เขียวและน้ำเงิน (Red, Green & Blue; RGB) เพื่อแปลผลการวิเคราะห์ที่ได้ออกมาเป็นปริมาณหรือความเข้มข้นของธาตุหรือสารที่สนใจในตัวอย่าง ตัวอย่างเช่นงานวิจัยของ ภัทราวดี (2564) ที่ได้พัฒนาเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอร์ิเมตรี โดยใช้แอปพลิเคชัน Color Name ในสมาร์ตโฟนสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และสังกะสีในข้าวไทย โดยวิธีดังกล่าวมีความแม่นยำสูง และเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคเปลวอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตเมตรี (Flame Atomic Absorption Spectrophotometry; FAAS) พบว่า ให้ผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ตัวอย่างแอปพลิเคชันอื่นๆ ที่มีการนำมาใช้ ได้แก่ ImageJ Color Assist และ RGB tool เป็นต้น โดยในการศึกษาครั้งนี้ใช้แอปพลิเคชัน RGB Color Detector ซึ่งสามารถติดตั้งใช้งานได้ง่ายในสมาร์ตโฟนทุกระบบปฏิบัติการ ทำให้มีความสะดวกในการศึกษามากยิ่งขึ้น

จากปัญหาข้างต้นผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาสีของสารสกัดดอกอินทนิลเมื่อใช้ทดสอบไอออนโลหะชนิดต่างๆ และศึกษาสีของสารสกัดดอกอินทนิลเมื่อทดสอบไอออนโลหะที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน เพื่อพัฒนาเป็นชุดตรวจวัดไอออนโลหะร่วมกับการตรวจวัดโดยเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอร์ิเมตรีจากแอปพลิเคชัน RGB Color Detector เพื่อใช้สำหรับทดสอบไอออนของโลหะเบื้องต้นทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการตรวจหาไอออนของโลหะที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังเป็นการพัฒนาเครื่องมือตามหลักการเคมีสีเขียว (Green

chemistry) กล่าวคือ มีการใช้อุปกรณ์ขนาดเล็ก ลดปริมาณการใช้สารเคมีอันตราย สามารถพกพาได้สะดวก และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมซึ่งเป็นการพัฒนาที่ยั่งยืน

## วิธีดำเนินการวิจัย

### 1. วัสดุและสารเคมี

นิกเกิล ซัลเฟต ( $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) เกรด Laboratory reagent บริษัท Ajax Finechem ประเทศออสเตรเลีย เลด (II) ไนเตรต ( $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ ) เกรด AR/ACS บริษัท KEMAUS ประเทศออสเตรเลีย ซิงค์ ซัลเฟต ( $\text{ZnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) เกรด Technical บริษัท GAMMACO ประเทศไทย เพอร์ริก (III) ซัลเฟต x-ไฮเดรต ( $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ) เกรด Laboratory reagent บริษัท KEMAUS ประเทศออสเตรเลีย โคบอลต์ (II) ไนเตรต ( $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) เกรด AR บริษัท Ajax Finechem ประเทศออสเตรเลีย เพอร์รัส (II) ซัลเฟต ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) เกรด technical บริษัท GAMMACO ประเทศไทย แมงกานีส (II) ซัลเฟต ( $\text{MnSO}_4$ ) เกรด Technical บริษัท อินเทลเลคท์ จำกัด ประเทศไทย อลูมิเนียม ซัลเฟต ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ) เกรด AR บริษัท Ajax Finechem ประเทศออสเตรเลีย โพแทสเซียม โครเมต ( $\text{K}_2\text{CrO}_4$ ) เกรด Analytical reagent บริษัท KEMAUS ประเทศออสเตรเลีย แมงกานีส ซัลเฟต เฮปตะไฮเดรต ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) เกรด AR/ACS บริษัท Loba Chemie ประเทศอินเดีย คอปเปอร์ (II) ซัลเฟต เพนตะไฮเดรต ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) เกรด AR บริษัท KEMAUS ประเทศออสเตรเลีย และ อลูมิเนียม โมลิบเดต ( $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) เกรด AR บริษัท Mallinckrodt ประเทศอังกฤษ

### 2. อุปกรณ์และเครื่องมือ

อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ยี่ห้อ Memmert รุ่น WNB 10 เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer Model: Shimadzu UV-1800 ประเทศญี่ปุ่น และเครื่องชั่งดิจิทัล ทศนิยม 3 ตำแหน่ง ยี่ห้อ OHAUS รุ่น PR423/E ประเทศสหรัฐอเมริกา

### 3. การเตรียมสารสกัดจากดอกอินทนิล

เก็บตัวอย่างดอกอินทนิลจากบริเวณโรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มุกดาหาร โดยใช้เฉพาะกลีบดอกอินทนิล ล้างน้ำให้สะอาดแล้วนำมาผึ่งลมให้แห้ง ชั่งน้ำหนักดอกอินทนิล 5 กรัมแล้วเติมน้ำปราศจากไอออน จำนวน 80 มิลลิลิตร นำไปให้ความร้อนในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที หลังจากนั้นตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องแล้วนำไปกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1

### 4. การศึกษาประสิทธิภาพของสารสกัดดอกอินทนิลในการทดสอบไอออนโลหะ

#### 4.1 การศึกษาการดูดกลืนแสงของสารสกัดดอกอินทนิล

เตรียมสารสกัดดอกอินทนิลที่สภาวะ pH ต่างๆ โดยการเติมสารละลายที่ pH 1 3 5 7 9 11 และ 13 ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ลงในสารสกัดดอกอินทนิล 2 มิลลิลิตร เขย่าแล้วนำไป

วัดค่าการดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่นแสง 450–700 นาโนเมตร โดยใช้เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer จากนั้นหาค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุด ( $\lambda_{max}$ ) จากกราฟระหว่างความยาวคลื่นและค่าการดูดกลืนแสงของสารสกัดดอกอินทนิลที่สภาวะ pH ต่างๆ

#### 4.2 การวิเคราะห์ปริมาณแอนโทไซยานินรวม (Total anthocyanin content)

##### จากสารสกัดดอกอินทนิล

วิเคราะห์โดยใช้วิธีพีเอช-ดิฟเฟอเรนเชียล (pH differential) อ้างอิงจาก Shafazila, Pat & Lee, (2010) โดยนำค่าการดูดกลืนแสง (A) ที่ความยาวคลื่น 510 และ 700 นาโนเมตรของสารสกัดดอกอินทนิลที่สภาวะ pH 1 และ 4.50 มาคำนวณหาค่าการดูดกลืนแสง (A) ที่แท้จริงดังสมการที่ 1

$$A = (A_{510} - A_{700})_{pH1} - (A_{510} - A_{700})_{pH4.5} \quad (1)$$

จากนั้นคำนวณหาปริมาณแอนโทไซยานินรวม (ปริมาณแอนโทไซยานินรวม (Total anthocyanin contents; TA) โดยแสดงข้อมูลปริมาณแอนโทไซยานินรวมในหน่วยของมิลลิกรัมสมมูลของ Cyanidin-3-glucoside (Cyanidin-3-glucoside equivalent; CGE) ต่อตัวอย่างสด (FW) 100 กรัม (mg CGE/ 100 g of FW) โดยแทนค่าการดูดกลืนแสง (A) ที่แท้จริงจากสมการที่ 1 ดังสมการที่ 2

$$TA \text{ content} = \frac{(A \times Mw \times \text{dilution factor} \times 100)}{\epsilon} \quad (2)$$

เมื่อ Mw หมายถึง มวลโมเลกุลของ Cyanidin-3-glucoside ซึ่งเท่ากับ 449.2 g/mol

$\epsilon$  หมายถึง โมลาร์แอบซอร์บติวิตี (molar absorptivity) ในงานวิจัยนี้ใช้ค่าของ cyanidin-3- glucoside ในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 1 ซึ่งเท่ากับ 26,900  $M^{-1}cm^{-1}$

Dilution factor หมายถึง แฟคเตอร์ที่เกิดจากการเจือจางสารละลาย ซึ่งในที่นี้ใช้ตัวอย่าง 2 มิลลิลิตร เจือจางด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ จนมีปริมาตร 4 มิลลิลิตร ใช้ค่า Dilution factor เท่ากับ 2

#### 4.3 การศึกษาการเกิดปฏิกิริยาของสารสกัดดอกอินทนิลกับไอออนโลหะ

1) หยดสารสกัดดอกอินทนิล 2 หยด ในจานหลุมพลาสติก (Culture plate) แล้วปรับสภาวะด้วยสารละลาย pH 1 3 5 7 9 11 และ 13 ที่เตรียมจากสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) และสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ( $NH_4OH$ ) 2 หยด ผสมให้เข้ากัน

2) หยดสารละลายอลูมิเนียมไอออน โคบอลต์ (II) ไอออน โครเมียม (II) ไอออน คอปเปอร์ (II) ไอออน เฟอร์รัส (II) ไอออน เฟอร์ริก (III) ไอออน แมกนีเซียมไอออน แมงกานีส (II) ไอออน โมลิบดีนัม (VI) ไอออน นิเกิล (II) ไอออน เลด (II) ไอออน และซิงค์ (II) ไอออน เข้มข้น 1,000 mg/L จำนวน 3 หยด ลงในสารสกัดดอกอินทนิลที่ปรับสภาวะ pH จากนั้นผสมให้เข้ากัน แล้วสังเกตสี

#### 4.4 การศึกษาสีของสารสกัดดอกอินทนิลในการทดสอบไอออนโลหะที่ความเข้มข้นต่างๆ

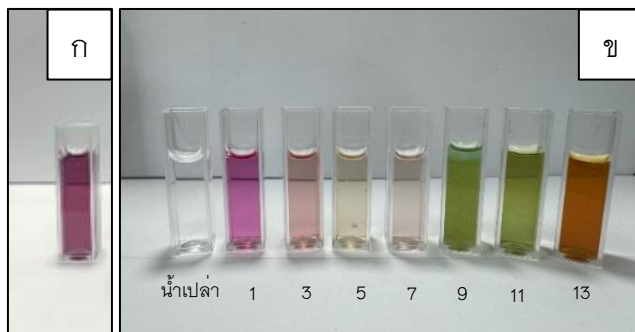
1) หยดสารสกัดดอกอินทนิล 2 หยด ในจานหลุมพลาสติก แล้วปรับสถานะด้วยสารละลาย pH 1 ที่เตรียมจากสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) และสารละลายแอมโมเนียไฮดรอกไซด์ (NH<sub>4</sub>OH) 2 หยด ผสมให้เข้ากัน แล้วหยดสารละลาย โคเรเมียม (II) ไอออน และโมลิบดีนัม (VI) ไอออน ในความเข้มข้น 1,000 500 250 125 62 และ 31 mg/L จำนวน 3 หยด ผสมให้เข้ากัน สังเกตสี แล้วนำไปวัดค่าความเข้มสีในค่าสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน (Red, Green & Blue; RGB) โดยใช้แอปพลิเคชัน RGB Color Detector วัดที่ระยะห่างระหว่างกล้องของสมาร์ทโฟนกับจานหลุมพลาสติก 6 cm ในห้องมืดควบคุมแสงโดยใช้คอมไฟให้ได้ความเข้มแสง 20 lux จากนั้นสร้างกราฟมาตรฐานความเข้มสีระหว่างค่าความเข้มสีและความเข้มข้นของสารละลายโลหะ

2) ทำการทดลองตามข้อ 1) แต่ปรับสถานะของสารสกัดดอกอินทนิลด้วยสารละลาย pH 3 เมื่อทดสอบเพอร์ริก (III) ไอออน และโมลิบดีนัม (VI) สารละลาย pH 5 ที่เตรียมจากสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) และสารละลายแอมโมเนียไฮดรอกไซด์ (NH<sub>4</sub>OH) เมื่อทดสอบเพอร์รัส (II) ไอออน โมลิบดีนัม (VI) ไอออน และซิงค์ (II) ไอออน สารละลาย pH 7 เมื่อทดสอบเพอร์ริก (III) ไอออน และโมลิบดีนัม (VI) ไอออน สารละลาย pH 9 เมื่อทดสอบโมลิบดีนัม (VI) ไอออน สารละลาย pH 11 เมื่อทดสอบโคบอลต์ (II) ไอออน และโมลิบดีนัม (VI) ไอออน

#### ผลการวิจัย

##### 1. ผลการศึกษาการดูดกลืนแสงของสารสกัดดอกอินทนิลและปริมาณแอนโทไซยานินรวมจากสารสกัดดอกอินทนิล

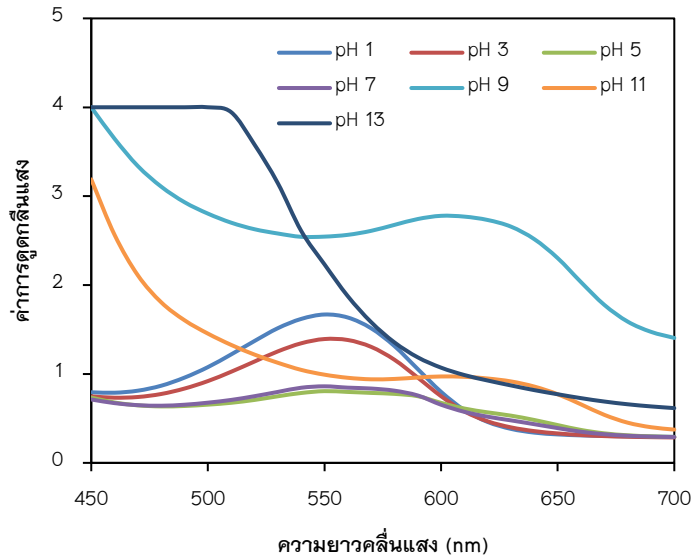
เมื่อปรับสถานะ pH ของสารสกัดดอกอินทนิลโดยใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) และสารละลายแอมโมเนียไฮดรอกไซด์ (NH<sub>4</sub>OH) ในสถานะ pH 1 3 5 7 9 11 และ 13 สามารถแสดงสีของสารสกัดดอกอินทนิลที่เกิดขึ้นได้ ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 (ก) สีของสารสกัดดอกอินทนิล และ (ข) ของสารสกัดดอกอินทนิลที่สถานะ pH 1–13

จากภาพที่ 1(ก) สารสกัดที่ได้จากดอกอินทนิลมีสีม่วง และภาพที่ 1(ข) สารสกัดดอกอินทนิลที่สภาวะ pH<7 จะมีสีม่วง pH 9–11 จะมีสีเขียว ส่วน pH 13 จะมีสีน้ำตาล

เมื่อวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารสกัดดอกอินทนิลที่สภาวะ pH 1 3 5 7 9 11 และ 13 ในความยาวคลื่นแสง 450–700 นาโนเมตร โดยใช้เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer สามารถแสดงผลได้ ดังภาพที่ 2



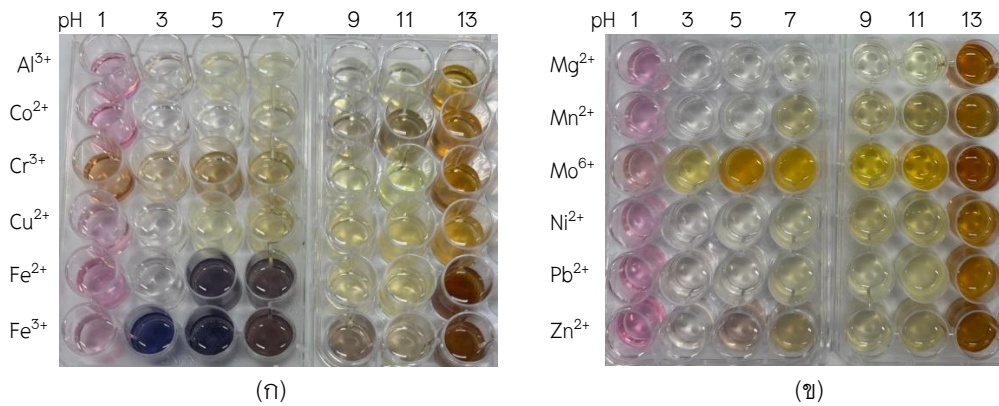
ภาพที่ 2 การดูดกลืนแสงของสารสกัดดอกอินทนิลที่สภาวะ pH 1–13

จากภาพที่ 2 พบว่า สารสกัดดอกอินทนิลที่สภาวะ pH 1–7 มีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุด ( $\lambda_{max}$ )=550 นาโนเมตร ในขณะที่สารสกัดดอกอินทนิลที่สภาวะ pH>7 มีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุด ( $\lambda_{max}$ )>550 นาโนเมตร และปริมาณแอนโทไซยานินรวม (Total anthocyanin content) จากสารสกัดดอกอินทนิลเท่ากับ 1.81 mg CGE/100 g of FW

## 2. ผลการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาของสารสกัดดอกอินทนิลกับไอออนโลหะ

เมื่อทดสอบการเกิดปฏิกิริยาของสารสกัดดอกอินทนิลกับไอออนโลหะ โดยทดสอบอลูมิเนียมไอออน คอปเปอร์ (II) ไอออน แมกนีเซียมไอออน แมงกานีส (II) ไอออน นิลเกิล (II) ไอออน และเลด (II) ไอออน โคบอลต์ (II) ไอออน เฟอร์รัส (II) ไอออน เฟอร์ริก (III) ไอออน โมลิบดีนัม (VI) ไอออน และซิงค์ (II) ไอออน ใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) และสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) ปรับสภาวะ pH 1–13 ผลการทดสอบสามารถแสดงได้ ดังภาพที่ 3





**ภาพที่ 3** การเปลี่ยนแปลงสีของสารสกัดดอกอินทนิลเมื่อทดสอบไอออนโลหะ (ก) อลูมิเนียม ไอออน โคบอลต์ (II) ไอออน โครเมียม (II) ไอออน คอปเปอร์ (II) ไอออน เฟอร์รัส (II) ไอออน เฟอร์ริก (III) ไอออน และ (ข) แมกนีเซียมไอออน แมงกานีส (II) ไอออน โมลิบดีนัม (VI) ไอออน นิลเกิล (II) ไอออน เลด (II) ไอออน และซิงค์ (II) ไอออน

จากภาพที่ 3 พบว่า สารสกัดดอกอินทนิลเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อทดสอบสารละลายธาตุอินทรีย์ ไอออน คอปเปอร์ (II) ไอออน แมกนีเซียมไอออน แมงกานีส (II) ไอออน นิลเกิล (II) ไอออน และเลด (II) ไอออน เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลที่ pH 11 เมื่อทดสอบโคบอลต์ (II) ไอออน เปลี่ยนเป็นสีส้มที่ pH 1–5 เมื่อทดสอบโครเมียม (II) ไอออน เปลี่ยนเป็นสีม่วงอมน้ำตาลที่ pH 5–7 เมื่อทดสอบเฟอร์รัส (II) ไอออน เปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินที่ pH 3 และเปลี่ยนเป็นสีม่วงอมน้ำตาลที่ pH 5–7 เมื่อทดสอบเฟอร์ริก (III) ไอออน เปลี่ยนเป็นสีชมพูอ่อนที่ pH 1 และเปลี่ยนเป็นสีเหลืองที่ pH 3–11 เมื่อทดสอบโมลิบดีนัม (VI) ไอออน และเปลี่ยนเป็นสีชมพูที่ pH 5 เมื่อทดสอบซิงค์ (II) ไอออน

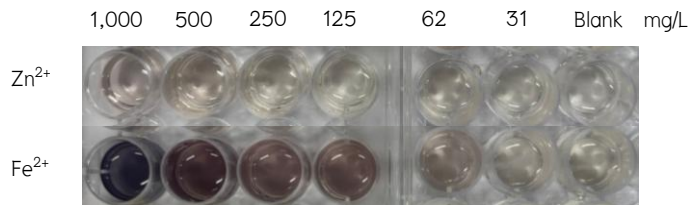
จากข้อมูลการเปลี่ยนสีของสารสกัดดอกอินทนิลสามารถสรุปได้ว่าโครเมียม (II) ไอออน และซิงค์ (II) ไอออน สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจนที่สภาวะกรด เฟอร์รัส (II) ไอออน และเฟอร์ริก (III) ไอออน สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจนที่สภาวะกรด-กลาง โคบอลต์ (II) ไอออน สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจนที่สภาวะเบส โมลิบดีนัม (VI) ไอออน สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจนทั้งสภาวะกรดและเบส

### 3. ผลการศึกษาสีของสารสกัดดอกอินทนิลในการทดสอบไอออนโลหะที่ความเข้มข้นต่างๆ

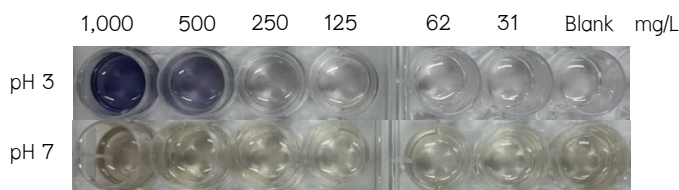
เมื่อทำการทดสอบไอออนโลหะ โคบอลต์ (II) ไอออน โครเมียม (II) ไอออน เฟอร์รัส (II) ไอออน เฟอร์ริก (III) ไอออน โมลิบดีนัม (VI) ไอออน และซิงค์ (II) ไอออน ที่ความเข้มข้นความเข้มข้น 31–1,000 mg/L ได้ผลการทดสอบ ดังภาพที่ 4–8



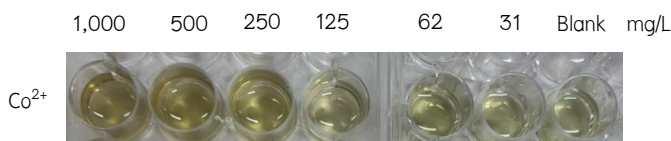
ภาพที่ 4 สีของสารสกัดดอกอินทนิลเมื่อทดสอบไอออนโลหะ โครเมียม (II) ไอออน ที่ pH 1



ภาพที่ 5 สีของสารสกัดดอกอินทนิลเมื่อทดสอบไอออนโลหะ ซิงค์ (II) ไอออน และเฟอร์รัส (II) ไอออน ที่ pH 5

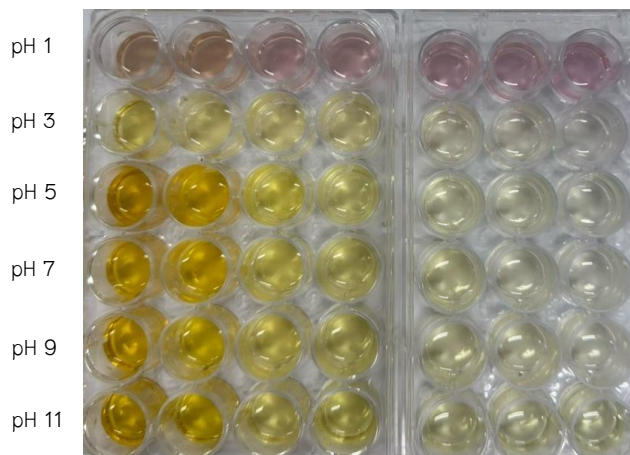


ภาพที่ 6 สีของสารสกัดดอกอินทนิลเมื่อทดสอบไอออนโลหะ เฟอร์ริก (III) ไอออน ที่ pH 3 และ 7



ภาพที่ 7 สีของสารสกัดดอกอินทนิลเมื่อทดสอบไอออนโลหะ โคบอลต์ (II) ไอออน ที่ pH 11

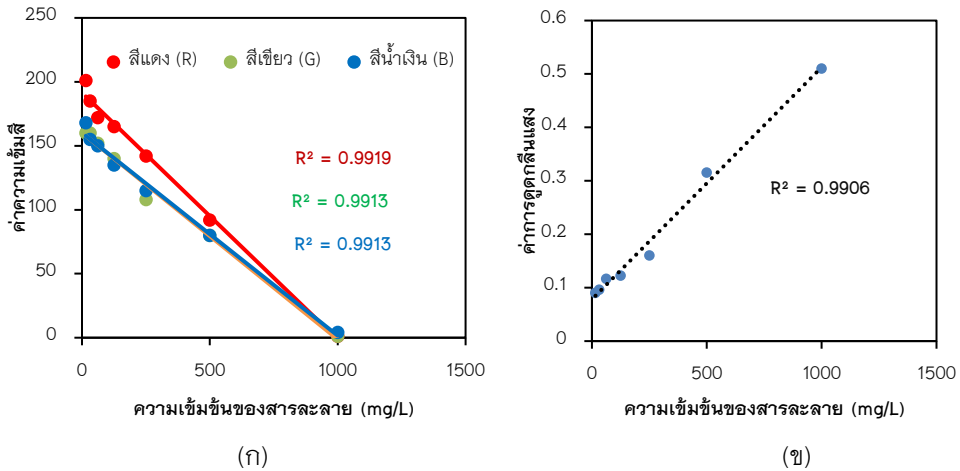




**ภาพที่ 8** สีของสารสกัดดอกอินทนิลเมื่อทดสอบโมลิบดินัม (VI) ไอออน ที่ pH 1–11

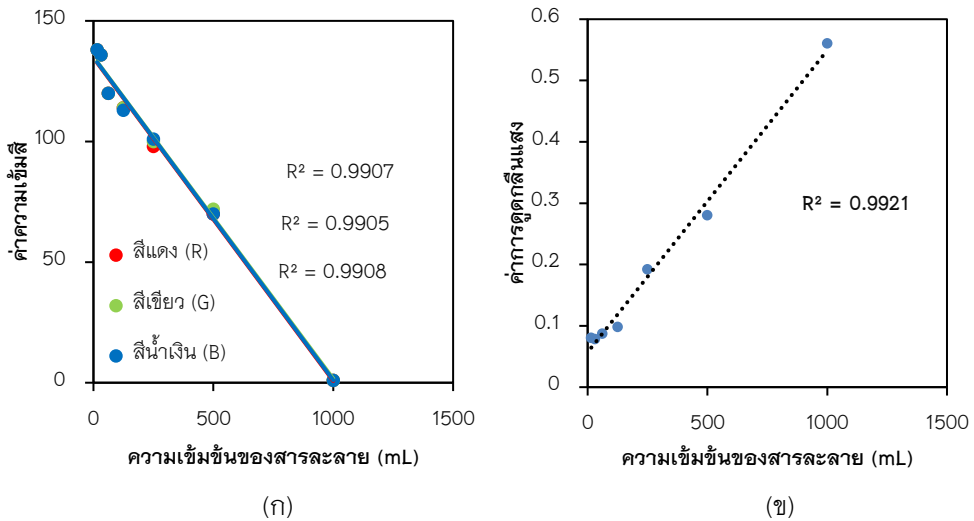
จากภาพที่ 4–8 พบว่า สีของดอกอินทนิลมีการเปลี่ยนแปลงแตกต่างกันตามความเข้มข้นของสารละลายไอออนโลหะ กล่าวคือ เมื่อสารละลายโลหะมีความเข้มข้นมากสารสกัดดอกอินทนิลจะเปลี่ยนแปลงให้สีที่เข้มมาก ในขณะที่สารละลายโลหะที่มีความเข้มข้นน้อยสารสกัดดอกอินทนิลจะเปลี่ยนแปลงให้สีที่จาง

เมื่อวัดค่าความเข้มสีในค่าสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินของสารสกัดดอกอินทนิลจากการทดสอบไอออนโลหะหนักที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยใช้แอปพลิเคชัน RGB Color Detector แล้วนำมาสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างค่าความเข้มสีและความเข้มข้นของสารละลายไอออนโลหะ โดยสามารถแสดงตัวอย่างกราฟมาตรฐานของเฟอร์รัส (II) ไอออนได้ ดังภาพที่ 9 และแสดงตัวอย่างกราฟมาตรฐานของเฟอร์ริก (III) ไอออน ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 9 (ก) กราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มสีและความเข้มข้นของสารละลายเฟอรัรัส (II) ไอออน ที่ pH 5 โดยเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรี และ (ข) กราฟมาตรฐานระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสารละลายเฟอรัรัส (II) ไอออน ที่ pH 5 โดยเทคนิคสเปกโทรสโคปี

จากภาพที่ 9 พบว่า กราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มสีและความเข้มข้นของสารละลายเฟอรัรัส (II) ไอออน ที่ pH 5 โดยเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรี ทุกสี มี  $R^2 > 0.99$  (สีแดง = 0.9919 สีเขียว = 0.9913 สีน้ำเงิน = 0.9913) และกราฟมาตรฐานระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสารละลายเฟอรัรัส (II) ไอออน ที่ pH 5 โดยเทคนิคสเปกโทรสโคปี มี  $R^2 > 0.99$  (0.9906)



ภาพที่ 10 (ก) กราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มสีและความเข้มข้นของสารละลายเพอร์ริก (III) ไอออน ที่ pH 3 โดยเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรี และ (ข) กราฟมาตรฐานระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสารละลายเพอร์ริก (III) ไอออน ที่ pH 3 โดยเทคนิคสเปกโทรสโคปี

จากภาพที่ 10 พบว่า กราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มสีและความเข้มข้นสารละลายเพอร์ริก (III) ไอออน ที่ pH 1 โดยเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรี ทุกสีมี  $R^2 > 0.99$  (สีแดง=0.9907 สีเขียว=0.9905 สีน้ำเงิน= 0.9908) และกราฟมาตรฐานระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสารละลายเพอร์ริก (III) ไอออน ที่ pH 1 โดยเทคนิคสเปกโทรสโคปี มี  $R^2 > 0.99$  (0.9921)

### 3. ผลการเปรียบเทียบปริมาณไอออนโลหะที่ตรวจวัดด้วยเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรีและเทคนิคสเปกโทรสโคปี

เมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณเพอร์ริส (II) ไอออน ในน้ำตัวอย่างระหว่างเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรีที่วัดจากความเข้มสีในค่าสีแดง เขียวและน้ำเงิน โดยใช้แอปพลิเคชัน RGB Color Detector และเทคนิคสเปกโทรสโคปี โดยใช้เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 550 nm ด้วยการใส่สารสกัดดอกอินทนิลเป็นอินดิเคเตอร์ ในสภาวะ pH 5 วิเคราะห์ด้วยสถิติ Paired t-test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99 ดังตารางที่ 1

**ตารางที่ 1** เปรียบเทียบปริมาณเฟอร์รัส (II) ไอออน ในน้ำตัวอย่างระหว่างด้วยเทคนิคดิจิทัล อิมเมจคัลเลอริเมตรีและเทคนิคสเปกโทรสโคปี ที่สภาวะ pH 5

ตัวอย่าง	N	[Fe <sup>2+</sup> ] (mg/L)		t	t <sub>critical</sub>
		เทคนิคดิจิทัลอิมเมจ	เทคนิค		
		คัลเลอริเมตรี	สเปกโทรสโคปี		
sample 1	5	22.10	22.02	2.76	4.60
sample 2	5	7.90	7.78	4.55	4.60
sample 3	5	13.46	13.23	2.11	4.60
sample 4	5	5.43	5.06	2.47	4.60
sample 5	5	8.52	8.17	2.43	4.60

จากตารางที่ 1 พบว่า  $t_{critical} > t$  ดังนั้นปริมาณของเฟอร์รัส (II) ไอออน ในน้ำตัวอย่าง ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรีและเทคนิคสเปกโทรสโคปี ในสภาวะ pH 5 จึงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99

เมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณเฟอร์ริก (III) ไอออน ในน้ำตัวอย่างระหว่างเทคนิค ดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรีที่วัดจากความเข้มสีในค่าสีแดง เขียวและน้ำเงิน โดยใช้แอปพลิเคชัน RGB Color Detector และเทคนิคสเปกโทรสโคปี โดยใช้เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ที่ความยาว คลื่น 550 nm ด้วยการใส่สารสกัดดอกอินทนิลเป็นอินดิเคเตอร์ ในสภาวะ pH 3 วิเคราะห์ด้วย สถิติ Paired t-test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99 ดังตารางที่ 2

**ตารางที่ 2** เปรียบเทียบปริมาณเฟอร์ริก (III) ไอออน ในน้ำตัวอย่างระหว่างด้วยเทคนิคดิจิทัล อิมเมจคัลเลอริเมตรีและเทคนิคสเปกโทรสโคปี ที่สภาวะ pH 3

ตัวอย่าง	N	[Fe <sup>3+</sup> ] (mg/L)		t	t <sub>critical</sub>
		เทคนิคดิจิทัลอิมเมจ	เทคนิค		
		คัลเลอริเมตรี	สเปกโทรสโคปี		
sample 1	5	10.16	10.21	2.51	4.60
sample 2	5	27.43	27.41	2.45	4.60
sample 3	5	29.55	29.28	0.34	4.60
sample 4	5	13.00	13.23	1.63	4.60
sample 5	5	11.45	11.34	2.03	4.60

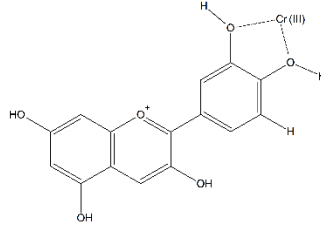
จากตารางที่ 2 พบว่า  $t_{\text{max}} > t_{\text{min}}$  ดังนั้นปริมาณของเพอร์ริก (III) ไอออน ในน้ำตัวอย่างที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรีและเทคนิคสเปกโทรสโคปี ในสภาวะ pH 3 จึงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99

### อภิปรายผล

สารสกัดดอกอินทนิลที่สภาวะ pH 1 มีสีแดง-ชมพู เนื่องจากแอนโทไซยานินอยู่ในรูป Flavylium cation ที่ pH 3–7 มีสีม่วงอ่อนอมน้ำเงิน เนื่องจากแอนโทไซยานินอยู่ในรูป Quinoidal base ที่ pH 9–11 มีสีเขียว เนื่องจากแอนโทไซยานินอยู่ในรูป Chalcone และที่ pH 13 มีสีน้ำตาล เนื่องจากแอนโทไซยานินอยู่ในรูป Chalcone โดย Chalcone ที่สภาวะความเป็นด่างสูงจะมีเหลือง ดังนั้นที่ pH 13 จึงมีทั้ง Chalcone ที่อยู่ในรูปสีเขียวและสีเหลืองผสมกันจึงมองเห็นเป็นสีน้ำตาล เมื่อวัดค่าการดูดกลืนแสง (A) ของสารสกัดดอกอินทนิล พบว่า ที่สภาวะ pH 1–7 มีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุด ( $\lambda_{\text{max}}$ )=550 นาโนเมตร ในขณะที่สารสกัดดอกอินทนิลที่สภาวะ pH>7 มีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุด ( $\lambda_{\text{max}}$ )>550 นาโนเมตร เนื่องจากที่สภาวะ pH 1–7 แอนโทไซยานินยังอยู่ในรูป Flavylium cation และ Quinoidal base ซึ่งมีโครงสร้างหลักเป็นแอนโทไซยานิน อยู่ในสภาวะที่ pH>7 แอนโทไซยานินอยู่ในรูป Chalcone ที่วง 6 เหลี่ยมในโครงสร้างของแอนโทไซยานินถูกทำลาย ดังนั้น Chalcone จึงดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นแตกต่างจากแอนโทไซยานิน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ วรภัทร และคณะ (2563) ที่รายงานว่าการเปลี่ยนแปลงสีของแอนโทไซยานินที่สภาวะ pH ต่างๆ เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแอนโทไซยานิน เมื่อวิเคราะห์ ปริมาณแอนโทไซยานินรวมจากสารสกัดดอกอินทนิล พบว่า มีค่าเท่ากับ 1.81 mg CGE/ 100 g of FW

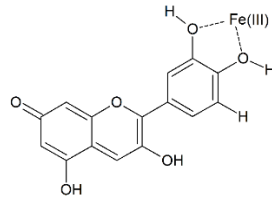
การศึกษาสีของสารสกัดดอกอินทนิลในการทดสอบไอออนโลหะ พบว่า สารสกัดดอกอินทนิลสามารถทดสอบโคเรียม (II) ไอออน ซิงค์ (II) ไอออน เพอร์รัส (II) ไอออน เพอร์ริก (III) ไอออน โคบอลต์ (II) ไอออน และ โมลิบดีนัม (VI) ไอออน แล้วเปลี่ยนแปลงสีได้ชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mulyaningsih, Pratiwi & Hasanah (2023) ที่ได้รายงานว่แอนโทไซยานินมีความสามารถในการตรวจจับโลหะหนักหลายชนิด เช่น เพอร์รัส (II) ไอออน และเพอร์ริก (III) ไอออน เป็นต้น จากงานวิจัยของ Bahreini et al. (2024) ได้แสดงโครงสร้างของสารเชิงซ้อนระหว่างแอนโทไซยานินกับไอออนโลหะ โดยไอออนโลหะจะสร้างพันธะโคออร์ดิเนตโคเวเลนต์กับหมู่ -OH ในโครงสร้างของแอนโทไซยานิน โดยไอออนโลหะแต่ละชนิดสามารถทดสอบได้ที่สภาวะ pH ต่างกัน เช่น โคเรียม (II) ไอออน และ ซิงค์ (II) ไอออน ทดสอบได้ในสภาวะกรด เพอร์รัส (II) ไอออน และเพอร์ริก (III) ไอออน ทดสอบได้ในสภาวะกรด-กลาง โคบอลต์ (II) ไอออน ทดสอบได้ในสภาวะเบส และ โมลิบดีนัม (VI) ไอออน ทดสอบได้ในสภาวะกรด-เบส เนื่องจากไอออน

โลหะที่ทำหน้าที่เป็นอะตอมกลางมีความสามารถในการสร้างพันธะโคออร์ดิเนตโคเวเลนต์กับ ลิแกนด์แอนโทไซยานินในสารสกัดดอกอินทนิลในโครงสร้างที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น สารสกัด ดอกอินทนิลที่สภาวะ pH 1 สามารถทดสอบโครเมียม (II) ไอออน โดยเปลี่ยนเป็นสีส้ม เนื่องจากเกิด สารเชิงซ้อนระหว่างโคบอลต์ (II) ไอออน และแอนโทไซยานินอยู่ในรูป Flavylium cation ดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 โครงสร้างสารเชิงซ้อนระหว่างโคบอลต์ (II) ไอออน และแอนโทไซยานินอยู่ในรูป Flavylium cation

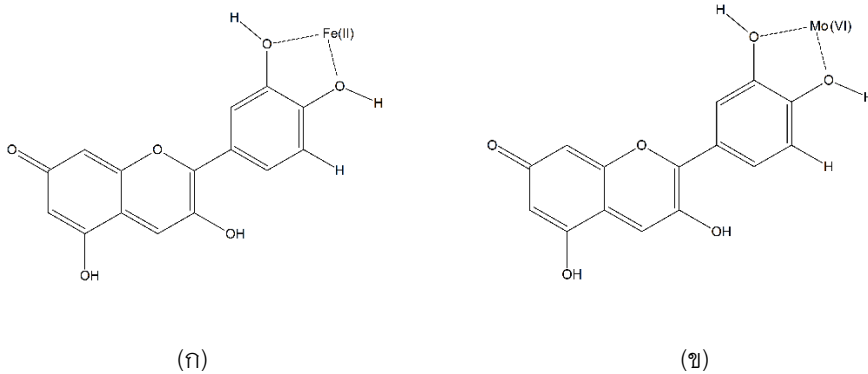
งานวิจัยของ เกติณี และศศิธร (2562) ได้แสดงโครงสร้างเชิงซ้อนระหว่างแอนโทไซยานิน กับไอออน เพอร์ริก (III) ไอออน ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 โครงสร้างเชิงซ้อนระหว่างแอนโทไซยานินกับเพอร์ริก (III) ไอออน

การที่สารสกัดดอกอินทนิลสามารถเปลี่ยนแปลงสีได้แตกต่างกันเมื่อทดสอบไอออน โลหะชนิดต่างๆ เป็นผลเนื่องจากไอออนโลหะที่ทำหน้าที่เป็นอะตอมกลางแต่ละชนิด โดยเมื่อเกิด เป็นสารเชิงซ้อนกับแอนโทไซยานินในสารสกัดดอกอินทนิลแล้วจะดูคลืนแสงได้แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น สารสกัดดอกอินทนิลที่สภาวะ pH 7 สามารถทดสอบเพอร์รัส (II) ไอออน จะเปลี่ยน เป็นสีน้ำตาลอมม่วง ในขณะที่ทดสอบโมลิบดีนัม (VI) ไอออน จะเปลี่ยนเป็นเหลือง เนื่องจาก เพอร์รัส (II) ไอออนและโคบอลต์ (II) ไอออน จะเป็นโลหะอะตอมกลางที่สร้างพันธะโคออร์ดิเนต โคเวเลนต์กับลิแกนด์แอนโทไซยานินในรูป Quinoidal base สามารถแสดงโครงสร้างของเชิงซ้อน ทั้ง 2 ชนิดได้ ดังภาพที่ 13





**ภาพที่ 13** โครงสร้างสร้างเชิงซ้อนของ (ก) เฟอรัส (II) ไอออนกับแอนโทไซยานินในรูปแบบ Quinoidal base ที่ pH 7 และ (ข) โมลิบดีนัม (VI) ไอออนกับแอนโทไซยานินในรูปแบบ Quinoidal base ที่ pH 7

การศึกษาลักษณะของสารสกัดดอกอินทนิลในการทดสอบไอออนโลหะที่ความเข้มข้น 15–1,000 mg/L ในสภาวะ pH ที่เหมาะสม โดยเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรีจากแอปพลิเคชัน RGB Color Detector บนสมาร์ตโฟน พบว่า  $R^2$  จากกราฟมาตรฐานความเข้มข้นของเฟอรัส (II) ไอออน และเฟอริก (III) ไอออน จากสีแดง เขียวและน้ำเงิน มีค่าตั้งแต่ 0.990 ขึ้นไป และการทดสอบค่าความแม่นยำในการวิเคราะห์เฟอรัส (II) ไอออน และเฟอริก (III) ไอออน ด้วยสถิติ Paired t-test ระหว่างเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรีกับสเปกโตรโฟโตเมตรี พบว่า มีความแม่นยำไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99 โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อการวัดค่าความเข้มสีด้วยเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรีจากแอปพลิเคชัน RGB Color Detector บนสมาร์ตโฟนมาจากการรบกวนของแสงจากสิ่งแวดล้อม โดยการตรวจวัดค่าความเข้มสีในระบบเปิดแสงจะมีผลต่อค่าความเข้มสีที่วัดได้โดยตรง ดังนั้นค่าความเข้มสีที่ได้จึงมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับระดับของแสงจากสิ่งแวดล้อม ดังงานวิจัยของ เหมือนหมาย, ทยาวิร์ และมาริษา (2564) ที่ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้สมาร์ตโฟนในการวัดค่าสี โดยผลการทดลอง พบว่า ความเป็นไปได้ในการนำสมาร์ตโฟนมาใช้ในการวิเคราะห์ค่าสี โดยค่าสีที่ได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ระบบการวัดค่าสี แอปพลิเคชัน สภาพแวดล้อมขณะวัด แสงต้นกำเนิด เป็นต้น

## สรุปผลการวิจัย

สารสกัดจากดอกอินทนิลมีสีม่วงดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุด ( $\lambda_{\max}$ ) เท่ากับ 550 นาโนเมตร มีปริมาณแอนโทไซยานินรวมเท่ากับ 1.81 mg CGE/ 100 g of FW สารสกัดดอกอินทนิลสามารถทดสอบโคบอลต์ (II) ไอออน โครเมียม (II) ไอออน เพอร์รัส (II) ไอออน เพอร์ริก (III) ไอออน โมลิบดีนัม (VI) ไอออน และ ซิงค์ (II) ไอออน แล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงสีได้ชัดเจน และ  $R^2$  จากกราฟมาตรฐานเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรี เพอร์รัส (II) ไอออน และเพอร์ริก (III) ไอออน จากสีแดง เขียวและน้ำเงิน มีค่าตั้งแต่ 0.990 ขึ้นไป และการทดสอบค่าความแม่นยำในการวิเคราะห์ เพอร์รัส (II) ไอออน และเพอร์ริก (III) ไอออน ด้วยสถิติ Paired t-test ระหว่างเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรีกับสเปกโทรโฟโตเมตรี พบว่า มีความแม่นยำไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99 ดังนั้นแอนโทไซยานินจากดอกอินทนิลจึงมีศักยภาพในการใช้เป็นอินดิเคเตอร์สำหรับการตรวจวัดไอออนโลหะทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ เนื่องจากสามารถสังเกตสีที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจน มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ให้ความเข้มสีที่สอดคล้องกับความเข้มข้นของสารละลายโลหะ ให้ผลการทดสอบรวดเร็วทันทีที่ทดสอบและใช้ปริมาณน้อยก็สามารถสังเกตเห็นผลได้ สามารถนำไปออกแบบเป็นชุดทดสอบไอออนโลหะที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม และควรมีการพัฒนาให้การวัดค่าความเข้มสีโดยใช้แอปพลิเคชัน RGB Color Detector มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด โดยการออกแบบระบบที่ไม่มีผลรบกวนจากแสงภายนอก ซึ่งจะทำให้ปริมาณของไอออนโลหะที่ตรวจวัดได้มีความถูกต้องมากที่สุด

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณะผู้บริหารและคณะครูโรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬารัตนราชวิทยาลัย มุกดาหาร ที่อำนวยความสะดวกและให้ความช่วยเหลือในการศึกษาในครั้งนี้ด้วยดีตลอดมา

## เอกสารอ้างอิง

- เกวลี ขอบธรรม, และชลดา เตชะเกียรติไกร ชีรการุณวงศ์. (2565). การพัฒนาเซนเซอร์สีอย่างง่ายสำหรับการตรวจวัดไอออนโลหะทองแดงและเหล็ก. *PSRU Journal of Science and Technology*, 7(2), 14–29.
- เกศินี เสาวงามจันทร์, และศศิธร มั่นเจริญ. (2562). การพัฒนาเทคนิคการวิเคราะห์ปริมาณเหล็ก (III) โดยใช้สารสกัดแอนโทไซยานินจากธรรมชาติตรวจวัดด้วยสมาร์ทโฟน. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 28(8), 1373–1388.
- ภัทราวดี เข้มเพชร. (2564). การวิเคราะห์หาโลหะหนักในข้าวโดยเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรี. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต). มหาวิทยาลัยนเรศวร, คณะวิทยาศาสตร์, สาขาวิชาเคมี.

- รวิวรรณ วัฒนานายน, ชูรายา สะตาปอ, บีสมี ยามา, สาลูมา สมานหมาน, และปิยาภรณ์ วังศิริกุล. (2560). การตรวจวัดไอออนเหล็กโดยใช้แอนโทไซยานินจากกระเจี๊ยบแดง. **วารสารมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์**, 9(2), 97–103.
- วรินทร์ รัตนการุณจิต, รัฐพล มีลาภสม, ศักดิ์ศรี สุภาพร, และปริม จารุจรัส. (2563). การใช้สมาร์ทโฟนเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดทางสีสำหรับการหาปริมาณไอออนเหล็กในน้ำโดยใช้แอนโทไซยานินเป็นรีเอเจนต์. **วารสารหน่วยวิจัยวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อมเพื่อการเรียนรู้**, 11(1), 144–163.
- วิชชุดา ไชยะโชค, และสุธา ชาวเธียร. (2552). การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนโลหะหนักโดยใช้กากของเหลวเขียว. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.
- สาวิตรี ไชยบุรี. (2561). การพัฒนาวิธีวิเคราะห์ทองแดงโดยใช้รีเอเจนต์ธรรมชาติสกัดจากข้าวลิ้มผั่วและตรวจวัดทางแสงด้วยตัวตรวจวัดชนิดฟลูออโรเมตริก. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต). มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, คณะวิทยาศาสตร์, สาขาวิชาเคมี.
- สุดเขต ไชโย. (2555). การพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ทองแดงและปรอทปริมาณน้อยโดยสรีรปิงโวลแทมเมตรี. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต). มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, คณะวิทยาศาสตร์, สาขาวิชาเคมี.
- เหมือนหมาย อภินทนาพงศ์, ทายาวีร์ ปินตา, และมาริษา แก้วเพชร. (2564). การศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้สมาร์ทโฟนและกล้องดิจิทัลในการวัดค่าสี. ใน **การประชุมวิชาการระดับชาติวิทยาลัยนครราชสีมา** (น. 731–740). นครราชสีมา: วิทยาลัยนครราชสีมา.
- Bahreini, Z., Abedi, M., Ashori, A., & Parach, A. (2024). Extraction and characterization of anthocyanin pigments from Iris flowers and metal complex formation. **Heliyon**, 10, 795–804.
- Ion, T., Violeta, N., & Mira, I. (2011). Determination of Tin in Canned Foods by Inductively Coupled plasma–Mass Spectrometry. **Polish Journal of Environmental Studies**, 21, 741–754.
- Khaodee, W., Aeungmaitrepirom, W., & Tuntulani, T. (2014). Effectively simultaneous naked–eye detection of Cu(II), Pb(II), Al(III) and Fe(III) using cyanidin extracted from red cabbage as chelating agent. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, 126, 98–104.
- Mane, P.V., Mahishi, A., Bhat, M.P., Lee, K.H., Swamyayaka, A., Madegowda, M., Isloor, A.M., & Kurkuri, M. (2025). Eco–friendly mercury ion detection and removal in water using anthocyanins: Mechanistic insights through DFT studies. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, 13(2), 288–302.
- Mulyaningsih, R.D., Pratiwi, R., & Hasanah, A.N. (2023). An Update on the Use of Natural Pigments and Pigments Nanoparticle Adducts for Metal Detection Based on Colour Response. **Biosensors**, 13(5), 554–575.
- Shafazila, T.S., Pat, M.L., & Lee, K.H. (2010). Radical scavenging activities of extract and solvent partition fractions from Dendrobium Sonia ‘Red Bom’ flower. **Proceeding of International Conference on Science and Social Research** (pp. 762–765). Malaysia: Universiti Teknologi MARA.

Shobana, J., Dayanidhi, K., Vadivel, P., & Sheik, N. (2023). Syzgium cumini extract—a natural naked eye colorimetric sensor for selective and sensitive detection of Fe<sup>2+</sup> in aqueous medium. **Groundwater for Sustainable Development**, 20, 866–880.