



การพัฒนาวิธีวิเคราะห์ทองแดงโดยใช้รีเอเจนต์ธรรมชาติสกัดจากข้าวลิ้มผั่วและตรวจวัดทางแสง
ด้วยตัวตรวจวัดชนิดพีอีดีดี

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR DETERMINATION OF COPPER USING NATURAL
REAGENT EXTRACTED FROM LEUMPUA GLUTINOUS RICE AND OPTICAL PEDD
DETECTION

สาวิตรี ไชยบุรี

บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การพัฒนาวิธีวิเคราะห์ทองแดงโดยใช้รีเอเจนท์ธรรมชาติสกัดจากข้าวลิ้มผิวและ
ตรวจวัดทางแสงด้วยตัวตรวจวัดชนิดฟิโอดีดี



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR DETERMINATION OF COPPER USING
NATURAL REAGENT EXTRACTED FROM LEUMPUA GLUTINOUS RICE AND
OPTICAL PEDD DETECTION



A Thesis Submitted in partial Fulfillment of Requirements
for MASTER OF SCIENCE (Chemistry)
Faculty of Science Srinakharinwirot University
2018
Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การพัฒนาวิธีวิเคราะห์ทองแดงโดยใช้รีเอเจนท์ธรรมชาติสกัดจากข้าวลิ้มผิวและตรวจวัดทางแสงด้วยตัวตรวจวัดชนิดฟลูออโรเมตริก

ของ

สาวิตรี ไชยบุรี

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยะดา จิตรตั้งประเสริฐ)

ประธาน

(รองศาสตราจารย์ ภาสกรหญิงชุติมา เพชรกระจำจ)

ที่ปรึกษาร่วม

(รองศาสตราจารย์ ดร.สิริธร สโมสร)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกรียงศักดิ์ ส่งศรีโรจน์)

ชื่อเรื่อง	การพัฒนาวิธีวิเคราะห์ทองแดงโดยใช้รีเอเจนต์ธรรมชาติสกัดจากข้าวลิ้มผั่วและตรวจวัดทางแสงด้วยตัวตรวจวัดชนิดพีอีดีดี
ผู้วิจัย	สาวิตรี ไชยบุรี
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปิยะดา จิตรตั้งประเสริฐ

ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาวิธีวิเคราะห์ที่รวดเร็วและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมโดยใช้ตัวตรวจวัดสีที่ประดิษฐ์ขึ้นเองโดยอาศัยหลักการของพีอีดีดี (paired emitter detector diode, PEDD) ร่วมกับรีเอเจนต์ธรรมชาติที่สกัดจากข้าวลิ้มผั่วสำหรับการวิเคราะห์คอปเปอร์(II) ไอออน สารสกัดที่ได้มีสารกลุ่มแอนโทไซยานินเป็นองค์ประกอบซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับคอปเปอร์(II) ไอออน ได้อย่างจำเพาะเจาะจงในสารละลายแอสิตเตดบัฟเฟอร์ (pH 6.0) เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนสีม่วงแกมน้ำเงิน ในการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ความเข้มข้นของรีเอเจนต์ ค่า pH และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด พบว่าภายใต้สภาวะที่เหมาะสม วิธีวิเคราะห์นี้ให้ความเป็นเส้นตรงที่ดีในช่วงความเข้มข้น 5.70-50.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ($R^2 > 0.995$) ค่าความแม่นยำของวิธีวิเคราะห์ซึ่งแสดงในรูปของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (RSD) พบว่าค่า RSD ภายในวันเดียวกันและระหว่างวันมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 1.35-2.18 และ 2.29-2.61 ตามลำดับ การใช้ตัวตรวจวัดชนิดพีอีดีดีแบบประหยัดให้ค่าขีดจำกัดต่ำสุดที่ตรวจวัดได้ (LOD) เท่ากับ 1.71 มิลลิกรัมต่อลิตร และขีดต่ำสุดที่วิเคราะห์ได้ (LOQ) เท่ากับ 5.71 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้ยังสามารถนำวิธีที่พัฒนาขึ้นไปประยุกต์ใช้สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณคอปเปอร์(II) ไอออน ในตัวอย่างน้ำเสียจำนวน 5 ตัวอย่าง ได้เป็นผลสำเร็จโดยมีค่าร้อยละของการคืนกลับอยู่ในช่วง 95.37-102.27 และพบว่าให้ผลการวิเคราะห์ที่สอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี

คำสำคัญ : คอปเปอร์ (II) ไอออน ข้าวลิ้มผั่ว รีเอเจนต์ธรรมชาติ พีอีดีดี สเปกโทรสโกปี

Title	DEVELOPMENT OF A METHOD FOR DETERMINATION OF COPPER USING NATURAL REAGENT EXTRACTED FROM LEUMPUA GLUTINOUS RICE AND OPTICAL PEDD DETECTION
Author	SAWITREE CHAIBUREE
Degree	MASTER OF SCIENCE
Academic Year	2018
Thesis Advisor	Assistant Professor Piyada Jittangprasert

In this work, a rapid and environmental friendly method with an in-house colorimeter, based on a paired emitter detector diode (PEDD), employing a natural reagent extract from Leumpua glutinous rice was developed to determine of copper(II) ions. The extract contained anthocyanin compounds which reacted selectively with copper(II) ions in an acetate buffer (pH 6.0) to form a violet complex. The optimum parameters included reagent concentration, pH and reaction time were studied and optimized. Under optimum conditions, a linear calibration curve was obtained over the concentration range of 5.70-50.0 mg/L with good correlation coefficients ($r^2 > 0.995$). The precision of the method was measured in term of relative standard deviation (RSD) value. Intraday and interday RSDs were less than 1.35-2.18 and 2.29-2.61%, respectively. The limit of detection (LOD) and limit of quantitation (LOQ) using the low cost PEDD detector were 1.71 and 5.17 mg/L, respectively. The developed method was successfully applied for the quantitative analysis of copper(II) ions in five wastewater samples. The recoveries were found in the range of 95.37-102.27. The results were in good agreement with those obtained by the Atomic Absorption Spectroscopy.

Keyword : Copper (II) ion Leumpua glutinous rice Natural reagent Paired Emitter
Detector Diode Spectroscopy

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เพราะผู้วิจัยได้รับความกรุณาอย่างยิ่งจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปิยะดา จิตรตั้งประเสริฐ และ รองศาสตราจารย์ ดร. สิริธร สโมสร อาจารย์ที่ปรึกษาหลักและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ท่านได้เสียสละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำปรึกษาและแนะนำในการดำเนินการวิจัยทุกขั้นตอน ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องสิ่งต่าง ๆ อย่างดียิ่ง อีกทั้ง ทำให้ผู้วิจัยได้รับประสบการณ์ในการทำงานวิจัย ได้รับความรู้และเห็นคุณค่าของงานวิจัย และพร้อมทั้งเป็นแบบอย่างของอาจารย์ที่ทุ่มเทให้กับศิษย์ในงานด้านการวิจัยและพัฒนาอย่างไม่เหน็ดเหนื่อย ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เกสร์กรหญิง ชูติมา เพชรกระจ่าง อาจารย์จากภาควิชาเภสัชเคมี คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่ให้ความกรุณาเป็นประธานในการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์ครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้วิชาความรู้แก่ผู้วิจัยในการสำเร็จตามหลักสูตรวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี ซึ่งทำให้ผู้วิจัยได้รับความรู้อย่างเต็มเปี่ยม สามารถนำความรู้ไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

ขอขอบคุณครอบครัว และ พี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่เป็นกำลังใจและคอยช่วยเหลือมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ คุณค่าและประโยชน์ของปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเป็นเครื่องบูชาพระคุณของบิดา มารดา ญาติ ตลอดจนบูรพคณาจารย์ทุกท่านที่อบรมสั่งสอน ชี้แนวทางปฏิบัติที่ดีและสนับสนุนในทุก ๆ ด้าน ทำให้ผู้วิจัยประสบผลสำเร็จในการศึกษาครั้งนี้

สาวิตรี ไชยบุรี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ภูมิหลัง	1
ความมุ่งหมายของงานวิจัย.....	4
ความสำคัญของการวิจัย	4
ขอบเขตของงานวิจัย	4
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
1. ท่องแดง	6
2. ชุดตรวจวัดชนิดพีอีดีดี.....	7
3. สารสกัดจากข้าวลิ้มผิว.....	10
4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	13
4.1 การวิเคราะห์ปริมาณคอปปเปอร์(II) ไอออน ด้วยเทคนิคต่าง ๆ.....	13
4.2 การประยุกต์ใช้ตัวตรวจวัดชนิดพีอีดีดีในงานด้านต่างๆ	16
4.3 การประยุกต์ใช้รีเอเจนท์จากธรรมชาติในงานวิเคราะห์ไอออนของโลหะชนิดต่าง ๆ... ..	18
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	20

1. เครื่องมือ อุปกรณ์ตัวตรวจวัดชนิดพีอีดีดี และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	20
1.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	20
1.2 อุปกรณ์ตัวตรวจวัดชนิดพีอีดีดี	20
1.3 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย	21
1.4 ผลิตภัณฑ์ตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์	22
1.5 สารละลายที่ใช้ในงานวิจัย	22
2. วิธีการดำเนินงานวิจัย	23
2.1 การสกัดข้าวลิ้มผั่วเพื่อใช้เป็นสารละลายรีเอเจนท์ธรรมชาติ และหาโครงสร้างของสาร แอนโทไซยานินตัวหลัก	23
2.2 การศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้สารสกัดข้าวลิ้มผั่วเป็นรีเอเจนท์ในการตรวจวัด คอปเปอร์(II) ไอออน	24
2.3 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์คอปเปอร์(II) ไอออน โดยใช้ตัว ตรวจวัดชนิดพีอีดีดี ร่วมกับรีเอเจนท์จากสารสกัดข้าวลิ้มผั่ว	24
2.4 การศึกษาประสิทธิภาพของวิธีการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้น	25
2.5 การวิเคราะห์ปริมาณคอปเปอร์(II) ไอออน ในตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม และเปรียบเทียบกับวิธีการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี	27
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย	28
ตอนที่ 1 การสกัดข้าวลิ้มผั่วเพื่อใช้เป็นสารละลายรีเอเจนท์ธรรมชาติและการวิเคราะห์ โครงสร้างที่เป็นไปได้	28
ตอนที่ 2 การศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้สารสกัดข้าวลิ้มผั่วเป็นรีเอเจนท์ในการตรวจวัด คอปเปอร์(II) ไอออน	30
ตอนที่ 3 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์คอปเปอร์(II) ไอออน โดยใช้ตัว ตรวจวัดชนิดพีอีดีดี ร่วมกับรีเอเจนท์จากสารสกัดข้าวลิ้มผั่ว	33
3.1 ความเข้มข้นของสารละลายรีเอเจนท์	33

3.2 เวลาที่ใช้ในการตรวจวัด.....	34
3.3 ศึกษาความเสถียรของสารละลายรีเอเจนท์	35
ตอนที่ 4 การศึกษาประสิทธิภาพของวิธีการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้น	36
4.1 ช่วงความเป็นเส้นตรง	36
4.2 ค่าขีดจำกัดต่ำสุดที่ตรวจวัดได้ และค่าขีดจำกัดต่ำสุดที่วิเคราะห์ได้.....	37
4.3 ความเที่ยงของวิธีวิเคราะห์.....	38
4.4 ร้อยละของการคืนกลับ (%recovery)	38
ตอนที่ 5 การวิเคราะห์ปริมาณคอปปเปอร์(II) ไอออน ในตัวอย่างน้ำเสียและเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี	39
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	41
บรรณานุกรม	44
ประวัติผู้เขียน.....	49

สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 แสดงผลวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการของข้าวลิ้มผัวเปรียบเทียบกับข้าวเจ้าหอมนิล หลังการเก็บเกี่ยวทันที	11
ตาราง 2 แสดงการแทนที่ของหมู่ต่าง ๆ ของแอนโทไซยานิน.....	12
ตาราง 3 ผลการศึกษาความเที่ยงของวิธีวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้น สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณคอป เปอร์(II) ไอออน.....	38
ตาราง 4 ผลการศึกษาค่าร้อยละของการคืนกลับของการวิเคราะห์ปริมาณคอปเปอร์(II) ไอออน ใน ตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมยานยนต์	39
ตาราง 5 ปริมาณคอปเปอร์(II) ไอออน ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีที่พัฒนาขึ้น (PEDD) และวิธีอะตอมมิก แอสซอร์พชันสเปกโทรสโกปี (AAS) ซึ่งใช้เป็นวิธีอ้างอิง.....	40
ตาราง 6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการวิเคราะห์ที่ได้จากงานวิจัยที่พัฒนาขึ้น และ งานวิจัยที่เคยรายงานก่อนหน้านี้สำหรับการวิเคราะห์คอปเปอร์(II) ไอออน โดยใช้เอนไซม์จากสาร สกัดธรรมชาติ	42

สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพประกอบ 1 แสดงอุปกรณ์ฟิสิกส์ที่ดี ที่ออกแบบขึ้นเพื่อใช้ร่วมกับการตรวจวัดทางสีในระบบเทคนิคการไหล.....	7
ภาพประกอบ 2 แสดงองค์ประกอบของชุดตรวจวัดชนิดฟิสิกส์ที่ดี ที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	9
ภาพประกอบ 3 แสดงการแทนที่ของแอนโทไซยานินดิน	12
ภาพประกอบ 4 แสดงกลไกการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโลหะคอปเปอร์(II) ไอออน.....	13
ภาพประกอบ 5 แสดงแผนภาพอุปกรณ์ตรวจวัดชนิดฟิสิกส์ที่ดีที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	21
ภาพประกอบ 6 แสดง ก.) สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายรีเอเจนท์ที่สกัดจากข้าวลิ้มผิวในตัวทำละลายเมทานอล ข.) สีของสารสกัดจากข้าวลิ้มผิวในตัวทำละลายเมทานอล ค.) ^1H NMR สเปกตรัมของสารไซยานินดินในสารสกัดจากข้าวลิ้มผิว	30
ภาพประกอบ 7 ก.) แสดงสีของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสารสกัดข้าวลิ้มผิวกับสารละลายโลหะชนิดต่าง ๆ ที่ pH 3.0-8.0 ข.) แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสารสกัดข้าวลิ้มผิวกับสารละลายโลหะชนิดต่าง ๆ ที่ pH.....	32
ภาพประกอบ 8 แสดงโครงสร้างแอนโทไซยานินที่ pH ต่าง ๆ.....	32
ภาพประกอบ 9 โครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างรีเอเจนท์จากสารสกัดข้าวลิ้มผิวกับคอปเปอร์(II) ไอออน.....	33
ภาพประกอบ 10 แสดงผลต่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้ของสารประกอบเชิงซ้อนคอปเปอร์(II) ไอออน เมื่อใช้สารละลายรีเอเจนท์ในช่วงความเข้มข้น 160-800 มิลลิกรัมต่อลิตร (n=5)	34
ภาพประกอบ 11 แสดงผลต่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้ของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสารละลายรีเอเจนท์จากสารสกัดข้าวลิ้มผิวกับสารละลายคอปเปอร์(II) ไอออน.....	35
ภาพประกอบ 12 ก.) แสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ตรวจวัดได้ และ ข.) แสดงสเปกตรัมของสารละลายรีเอเจนท์ที่เตรียมในช่วง 1-15 วัน	36
ภาพประกอบ 13 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานคอปเปอร์(II) ไอออน และผลต่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้.....	37

ภาพประกอบ 14 แสดงสีของสารละลายคอปเปอร์(II) ไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 1.71 มิลลิกรัมต่อลิตร (n=8).....	37
---	----



บทที่ 1

บทนำ

ภูมิหลัง

โลหะเป็นแร่ธาตุประเภทหนึ่งที่มีการนำมาใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวันและในภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ เนื่องจากโลหะมีคุณสมบัติเด่นหลายประการ เช่น มีความแข็งแรงสูง มีความเงาวาว ทนความร้อนสูง และสามารถขึ้นรูปได้หลายวิธี ดังจะเห็นได้จากการนำโลหะมาเป็นวัสดุในการผลิตเครื่องใช้ครัวเรือน ภาชนะบรรจุภัณฑ์ เครื่องประดับ อุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ ยานพาหนะ สิ่งก่อสร้างและอาวุธยุทโธปกรณ์ต่าง ๆ โดยโลหะที่มีการนำมาใช้ประโยชน์ในภาคอุตสาหกรรมในรูปของโลหะและเกลือของโลหะได้แก่ เหล็ก อะลูมิเนียม ตะกั่ว ดีบุก และทองแดง โดยเฉพาะทองแดงหรือคอปเปอร์(Cu) ไอออน ซึ่งทองแดงมีคุณสมบัติที่สำคัญ คือเป็นตัวนำไฟฟ้าและนำความร้อนได้ดี ไม่เกิดสนิม ยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ทนต่อการกัดกร่อนได้ดี อีกทั้งยังมีความเงางาม ทำให้ทองแดงได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรมชุบเคลือบผิวโลหะ ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมในกลุ่มตกแต่งผิวโลหะ ก่อนนำโลหะไปใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมหลักอื่น ๆ เช่น อุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมอัญมณี อุตสาหกรรมยานยนต์ และอุปกรณ์โทรคมนาคม เป็นต้น ทำให้โรงงานอุตสาหกรรมเหล่านี้จำเป็นต้องมีระบบการบำบัดที่ควบคุมปริมาณคอปเปอร์(Cu) ไอออน หรือไอออนของโลหะหนักชนิดอื่น ๆ ในน้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม เพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนในน้ำให้มีปริมาณลดลงจนมีคุณภาพเป็นไปตามมาตรฐานน้ำทิ้ง น้ำเสีย ที่กฎหมายได้กำหนด เพื่อควบคุมไม่ให้เกิดการแพร่กระจายของทองแดงสู่สิ่งแวดล้อม เนื่องจากถ้าร่างกายได้รับทองแดงในปริมาณมากจะทำให้เกิดความเป็นพิษต่อร่างกาย คือ คลื่นไส้ อาเจียน เกิดการอักเสบในช่องท้อง และกล้ามเนื้อ ท้องเสีย การทำงานของหัวใจผิดปกติ ก่อระบบภูมิคุ้มกันของร่างกายและอาจส่งผลให้เกิดความผิดปกติทางจิต รวมถึงอาการเรื้อรังจากการได้รับทองแดงติดต่อกันเป็นเวลานานจะทำให้ตับทำหน้าที่บกพร่องและไม่สามารถขับทองแดงออกจากร่างกายได้ตามปกติ จึงทำให้มีการสะสมทองแดงอยู่ในร่างกายเป็นปริมาณมาก (ศูนย์ข้อมูลพิษวิทยา, 2548)

ดังนั้นการตรวจวิเคราะห์น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมจึงมีความจำเป็นอย่างมากเพื่อการควบคุมคุณภาพของน้ำเสียให้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานกำหนด (กรมควบคุมมลพิษ & กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2559) และเป็นการรับรองคุณภาพของน้ำเสียก่อนมีการปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ เพื่อให้เป็นมีความปลอดภัยตามมาตรฐานต่อผู้อยู่อาศัยบริเวณ

โดยรอบและสิ่งแวดล้อมข้างเคียง ซึ่งวิธีวิเคราะห์ที่เลือกใช้ต้องเป็นวิธีวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพ มีความจำเพาะเจาะจงต่อคอปเปอร์(II) ไอออน มีความถูกต้อง ความแม่นยำสูง และใช้เวลาในการตรวจวิเคราะห์ที่รวดเร็ว ซึ่งเทคนิคที่ได้รับความนิยมและเป็นเทคนิคตามมาตรฐานสากล คือ เทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี (Atomic Absorption Spectroscopy) (Gözde, Sezin, Dotse Selali, & Merve, 2017; Juliana, Marcos, & Ricardo, 2018; Marla, Fabio, Darllen, & Marcos, 2017) นอกจากนี้ยังมีเทคนิคอื่น ๆ ที่ถูกพัฒนาเพื่อนำมาวิเคราะห์ปริมาณคอปเปอร์(II) ไอออน เช่น เทคนิคทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Technique) (Megha, Raimonda, Almira, & Mahendra, 2018; Paulo, Alyne, Edivaltrys, & Antonio, 2015) และเทคนิคยูวีวิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมตรี (UV-VIS Spectrophotometry) (Justyna, Raquel, Víctor, & Joanna, 2018; Könül, Serkan, & Müberra, 2017; Yiming, Jiayi, Chi, & Yiqiang, 2017) เป็นต้น ถึงแม้ว่าเทคนิคการวิเคราะห์เหล่านี้ให้ผลวิเคราะห์ที่มีความถูกต้องแม่นยำสูง แต่ยังคงอาศัยความเชี่ยวชาญในการตรวจวิเคราะห์ ใช้เวลาในการวิเคราะห์นาน อีกทั้งเครื่องมือที่ใช้มีขนาดใหญ่ และมีราคาแพง รวมไปถึงการตรวจวิเคราะห์สามารถทำได้เพียงในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ไม่สามารถประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์แบบภาคสนามได้ จึงทำให้มีคณะนักวิจัยหลายกลุ่มได้พัฒนาเครื่องตรวจวัดชนิดพีอีดีดี (Pair Emitter Detector Diodes; PEDD) เครื่องมือที่มีขนาดเล็กสามารถประดิษฐ์ขึ้นได้เองภายในห้องปฏิบัติการ สำหรับใช้เป็นตัวตรวจวัดทางแสงอย่างง่ายเพื่อทดแทนการใช้เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ เช่นการวิเคราะห์กลุ่มตัวอย่างที่มีคุณสมบัติเป็นอินดิเคเตอร์ (Łukasz, Marta, & Robert, 2008; Łukasz & Robert, 2009; Martina, King Tong, & Dermot, 2005) กลุ่มตัวอย่างโลหะหนัก (King-Tong, Eimear, Susan, & Dermot, 2006; King-Tong, Susan, Martina, & Roderick, 2006) และกลุ่มตัวอย่างชีวภาพ (Kamil & Robert, 2013; Marta, Robert, & Łukasz, 2010; Phoonthawee, Kittiwut, Nuanlaor, & Kamonthip, 2013; Sumonmarn, Nantaya, Kamonchanok, & Siripat, 2016) เป็นต้น พบว่าสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ได้หลากหลายประเภท ให้ผลการวิเคราะห์ที่รวดเร็ว เครื่องมือที่ใช้มีขนาดเล็กจึงสามารถนำไปวิเคราะห์แบบภาคสนามได้สะดวก เครื่องมือราคาถูกจึงเป็นการลดต้นทุนการนำเข้าเครื่องมือจากต่างประเทศ อีกทั้งยังให้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้อง แม่นยำ ไม่แตกต่างจากการใช้เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ขนาดใหญ่อีกด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้นำตัวตรวจวัดชนิดพีอีดีดีมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณคอปเปอร์(II) ไอออน ในตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อให้ได้วิธีวิเคราะห์ที่สะดวก ใช้งานง่าย

นอกจากการพัฒนาวิธีวิเคราะห์ที่สามารถใช้เครื่องมือขนาดเล็กได้นั้น ในปัจจุบันการพัฒนางานวิจัยที่มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่มีความสำคัญและได้รับความสนใจจากกลุ่มนักวิจัยเป็นจำนวนมาก การเลือกใช้รีเอเจนต์จากสารธรรมชาติเป็นอีกหนึ่งทางเลือก เนื่องจากปัจจุบันสารเคมีสังเคราะห์บางกลุ่มก่อให้เกิดอันตรายต่อร่างกายและส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องมาจากไม่มีระบบการบำบัดหรือการกำจัดทิ้งที่เหมาะสม นอกจากนี้รีเอเจนต์บางชนิดอาจต้องมีการนำเข้าจากต่างประเทศซึ่งเป็นการเพิ่มต้นทุนต่อการวิเคราะห์ ดังนั้นจึงมีงานวิจัยที่นำวัสดุธรรมชาติประเภทต่าง ๆ มาใช้ในการตรวจวิเคราะห์ เช่น การใช้สารสกัดจากดอกไม้ ได้แก่ ดอกอัญชัน (Kate, Supaporn, Wasin, & Supara, 2011) ดอกกล้วยไม้ (Sysay & Wirat, 2017; Thanikan, Petcharat, & Sumonmarn, 2017) และดอกชบา (Paweena, Runghana, Amannit, & Prawit, 2018) หรือการใช้สารสกัดจากผักและผลไม้ เช่น ลูกยอ (Sopa, Supada, & Jaroon, 2012) กะหล่ำปลีสีม่วง (Warangkhan, Wanlapa, & Thawatchai, 2014) มะขามป้อม (Natta, Senee, David, & Parawee, 2018) ขมิ้นผสมมะนาว (Sam-ang, Kraingkrai, & Watsaka, 2018) และใบชา (Chrysochoou, Oakes, & Dyar, 2018) เป็นต้น โดยในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ใช้สารสกัดจากข้าวลิ้มผัวหรือข้าวเหนียวลิ้มผัวเป็นรีเอเจนต์ในการตรวจวิเคราะห์ปริมาณคอปเปอร์(II) ไอออน เนื่องจากข้าวลิ้มผัวเป็นสายพันธุ์ข้าวพื้นเมืองที่มีการเพาะปลูกในประเทศ มีราคาถูก หาซื้อได้ง่าย และมีรายงานว่าข้าวลิ้มผัวมีสารในกลุ่มแอนโทไซยานินเป็นองค์ประกอบ (ศูนย์วิจัยข้าวพิษณุโลก, สำนักวิจัยและพัฒนาข้าว, กรมการข้าว, & กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2555) จากรายงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า แอนโทไซยานินมีคุณสมบัติเหมาะสมในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะ สามารถดูดกลืนแสงได้ดี และสามารถมองเห็นการเปลี่ยนแปลงสีด้วยตาเปล่าได้อย่างชัดเจน (วรางคณา เขาคี, รัตกร วงศ์ศิริ, & สุพัตรา มาแดง, 2560) นอกจากนี้ยังไม่มีรายงานวิจัยที่นำข้าวลิ้มผัวมาใช้เป็นรีเอเจนต์ในการวิเคราะห์ปริมาณคอปเปอร์(II) ไอออนมาก่อน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาและพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ที่ใช้ตัวตรวจวัดทางแสงอย่างง่ายชนิดพื้ที่ดีีร่วมกับการใช้รีเอเจนต์ธรรมชาติที่สกัดจากข้าวลิ้มผัวสำหรับนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณคอปเปอร์(II) ไอออน ในตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยาระหว่างรีเอเจนต์จากสารสกัดข้าวลิ้มผัวกับสารละลายคอปเปอร์(II) ไอออน ทำให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์สารประกอบเชิงซ้อนที่มีสีและทำการตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงของผลิตภัณฑ์โดยใช้ตัวตรวจวัดชนิดพื้ที่ดีีขนาดเล็ก โดยงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการนำผลิตภัณฑ์ธรรมชาติซึ่งเป็นวัตถุดิบที่สามารถหาได้ง่ายภายในประเทศมาประยุกต์ใช้ในวิธีการตรวจวิเคราะห์ร่วมกับการใช้ตัว

ตรวจวัดอย่างง่าย ขนาดเล็ก และสามารถประดิษฐ์ขึ้นได้เองภายในห้องปฏิบัติการ ซึ่งเป็นการลดต้นทุนการนำเข้าสารเคมีและเครื่องมือจากต่างประเทศ อีกทั้งยังให้ผลการวิเคราะห์ที่รวดเร็ว มีความถูกต้องและแม่นยำไม่แตกต่างจากการใช้เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ สามารถนำไปใช้ในงานควบคุมและประเมินคุณภาพของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมยานยนต์ และอุตสาหกรรมอื่นที่เกี่ยวข้องกับการใช้คอปเปอร์(II) ไอออน ได้

ความมุ่งหมายของงานวิจัย

1. เพื่อพัฒนาวิธีวิเคราะห์คอปเปอร์(II) ไอออน โดยใช้สารสกัดธรรมชาติจากข้าวลิ้มผัวเป็นรีเอเจนต์ และตรวจวัดด้วยตัวตรวจวัดทางแสงชนิดฟิอิดีดี
2. เพื่อประยุกต์ใช้วิธีวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณคอปเปอร์(II) ไอออน ในตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

ความสำคัญของการวิจัย

1. ได้วิธีการวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สำหรับการประยุกต์ใช้ตรวจวัดคอปเปอร์(II) ไอออน ใช้งานสะดวก รวดเร็ว และมีค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ไม่แพง
2. ได้ข้อมูลเกี่ยวกับวิธีการสกัดข้าวลิ้มผัวซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นรีเอเจนต์จากธรรมชาติอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการตรวจวัดไอออนของโลหะ
3. ได้ข้อมูลเกี่ยวกับปริมาณของคอปเปอร์(II) ไอออน ในตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมยานยนต์ เพื่อใช้ในการตรวจสอบและควบคุมคุณภาพของน้ำเสียให้เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด

ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาวิธีการสกัดข้าวลิ้มผัวเพื่อใช้เป็นสารละลายรีเอเจนต์ธรรมชาติและวิเคราะห์โครงสร้างที่เป็นไปได้
2. ศึกษาความเป็นไปได้ของการนำสารสกัดจากข้าวลิ้มผัวมาใช้เป็นรีเอเจนต์ในการตรวจวัดคอปเปอร์(II) ไอออน
3. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของวิธีการวิเคราะห์คอปเปอร์(II) ไอออน ด้วยรีเอเจนต์จากสารสกัดข้าวลิ้มผัวร่วมกับการใช้ตัวตรวจวัดทางแสงชนิดฟิอิดีดี
4. ศึกษาประสิทธิภาพของวิธีการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้น

5. ประยุกต์ใช้วิธีที่พัฒนาขึ้นสำหรับการตรวจวัดคอปเปอร์(II) ไอออน ในตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม และเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับวิธีวิเคราะห์มาตรฐาน

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. การศึกษาวิธีการสกัดข้าวลิ้มผั่วด้วยเทคนิคการสกัดโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic-assisted extraction) ร่วมกับเทคนิคการสกัดแบบของเหลวด้วยของเหลว (Liquid-liquid extraction) และวิเคราะห์โครงสร้างสารจากสารสกัดด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี

2. การศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้สารสกัดข้าวลิ้มผั่วเป็นรีเอเจนต์ในการตรวจวัดคอปเปอร์(II) ไอออน โดยศึกษาความสามารถในการเลือกจับไอออนของโลหะชนิดต่าง ๆ ได้แก่ Cu(II), Co(II), Cd(II), Cr(III), Fe(III), Ni(II) และ Pb(II) ในสภาวะ pH ต่าง ๆ โดยติดตามการเปลี่ยนแปลงสีและค่าการดูดกลืนแสงของสารประกอบเชิงซ้อน

3. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์คอปเปอร์(II) ไอออน ด้วยรีเอเจนต์จากสารสกัดข้าวลิ้มผั่วร่วมกับการใช้ตัวตรวจวัดทางแสงชนิดฟลูออโรเมตริก

3.1 ความเข้มข้นของสารละลายรีเอเจนต์

3.2 เวลาที่ใช้ในการตรวจวัด

3.3 ความเสถียรของสารละลายรีเอเจนต์

4. การศึกษาประสิทธิภาพของวิธีการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้น

4.1 ช่วงความเป็นเส้นตรง (linearity range)

4.2 ค่าขีดจำกัดต่ำสุดที่ตรวจวัดได้ (limit of detection; LOD) และค่าขีดจำกัดต่ำสุดที่วิเคราะห์ได้ (limit of quantification; LOQ)

4.3 ความเที่ยงของวิธีวิเคราะห์ (precision)

4.4 ร้อยละของการคืนกลับ (%recovery)

5. การประยุกต์ใช้วิธีที่พัฒนาขึ้นสำหรับตรวจวิเคราะห์ปริมาณคอปเปอร์(II) ไอออน ในตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม และเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และนำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

1. ทองแดง
2. ชุดตรวจวัดชนิดพีอีดีดี
3. สารสกัดจากข้าวลิ้มผั่ว
4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ทองแดง

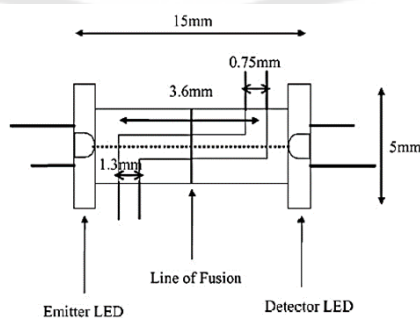
ทองแดง (Copper) มีเลขอะตอมเท่ากับ 29 สัญลักษณ์คือ Cu มาจากภาษาลาตินว่า Cuprum หมายถึง เกาะไซปรัส (Cyprus) ที่เป็นแหล่งค้นพบแร่ทองแดงขนาดใหญ่ สำหรับประเทศไทยการพบแหล่งแร่ทองแดงที่สำคัญอยู่ที่ อำเภอเชียงคาน จังหวัดเลย และจังหวัดขอนแก่น แต่พบได้ในปริมาณที่น้อยและไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้ในการผลิตเชิงอุตสาหกรรม ดังนั้นประเทศไทยจึงต้องมีการนำเข้าทองแดงจากต่างประเทศจำนวนมาก (กิตติพันธุ์ บางยี่ขัน, 2551) ทองแดงมีเลขออกซิเดชัน +1, +2 และ +3 แต่โดยทั่วไปพบทองแดงที่มีเลขออกซิเดชัน +1 (cuprous ion) และ +2 (cupric ion) เท่านั้น ซึ่งคอปเปอร์(II) มีความเสถียรกว่า คอปเปอร์(I) ไอออน และส่วนใหญ่สามารถละลายได้ในน้ำ ทองแดงมีคุณสมบัติเด่นหลายประการ เช่นมีความเหนียว สามารถนำไฟฟ้า และนำความร้อนสูง ด้านงานการกัดกร่อน สามารถนำมาแปรรูปได้ง่าย และยังเป็นวัสดุป้องกันสิ่งมีชีวิตเล็ก ๆ เช่น เพรียง แมลง หรือเชื้อโรคบางชนิด เป็นต้น จึงนิยมนำทองแดงมาใช้ในการหุ้มแผ่นไม้ต่อเรือ หรือนำมาทำเป็นท่อส่งน้ำดื่มเพื่อฆ่าเชื้อโรคหรือเชื้อราต่าง ๆ ที่อยู่ในแหล่งน้ำ และนำสารประกอบทองแดงมาใช้ประโยชน์อย่างหลากหลายเช่น อุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมประมง และอุตสาหกรรมก่อสร้าง เป็นต้น

จากการใช้ประโยชน์ของทองแดงในภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ จึงต้องมีการตระหนักถึงน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตน้ำทิ้งจากกระบวนการหล่อเย็น และน้ำทิ้งจากกระบวนการชะล้าง น้ำเสียประเภทนี้ประกอบด้วยสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และโลหะหนักที่มีองค์ประกอบและปริมาณแตกต่างกันไปตามประเภทของวัตถุดิบ และกระบวนการผลิต ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่โรงงานอุตสาหกรรมทุกโรงงานต้องมีระบบบำบัดน้ำเสีย เพื่อกำจัดสิ่งที่เป็นพิษในน้ำให้มีปริมาณลดลงจนมีคุณภาพเป็นไปตามมาตรฐานน้ำทิ้ง น้ำเสีย โดยกฎหมายได้กำหนดปริมาณ

ทองแดงในน้ำที่จากรองงานอุตสาหกรรมไม่เกิน 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร (กรมควบคุมมลพิษ & กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2559) เพื่อควบคุมไม่ให้เกิดการแพร่กระจายของทองแดงสู่สิ่งแวดล้อม เนื่องจากถ้าร่างกายได้รับทองแดงในปริมาณที่สูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดจะทำให้เกิดผลเสียต่อร่างกาย โดยการเกิดพิษของทองแดงขึ้นอยู่กับปริมาณที่ได้รับเข้าไป ช่องทางที่ได้รับ และสภาพร่างกายของแต่ละบุคคล ทองแดงถูกดูดซึมได้ดีในกระเพาะอาหารและลำไส้ส่วนบน โดยซึมผ่านเข้าผนังลำไส้ไปที่ตับ จากนั้นจะรวมตัวกับน้ำดีแล้วถูกหลั่งออกไปยังบริเวณลำไส้ขับออกไปกับอุจจาระหรืออาจถูกดูดกลับเข้าสู่ร่างกายได้ 30% โดยไปสะสมที่กระดูก กล้ามเนื้อ ตับ และสมอง เมื่อได้รับปริมาณทองแดงในปริมาณมากจะทำให้เกิดความเป็นพิษต่อร่างกาย คือ คลื่นไส้ อาเจียน เกิดการอักเสบในช่องท้องและกล้ามเนื้อ ท้องเสีย การทำงานของหัวใจผิดปกติ ก่ระบบภูมิคุ้มกันของร่างกายและอาจส่งผลให้เกิดความผิดปกติทางจิต ส่วนอาการเรื้อรังจากการได้รับทองแดงติดต่อกันเป็นเวลานาน ทำให้ตับทำหน้าที่บกพร่องไม่สามารถขับทองแดงออกจากร่างกายได้ตามปกติ จึงทำให้มีการสะสมทองแดงอยู่ในร่างกายเป็นปริมาณมาก ส่งผลให้เกิดกลุ่มอาการ Wilson's Diseases คือ ร่างกายสั่นเทาอยู่ตลอดเวลา กล้ามเนื้อแข็งเกร็ง มีน้ำมูก น้ำลายไหล และควบคุมการพูดลำบาก (ศูนย์ข้อมูลพิษวิทยา, 2548)

2. ชุดตรวจวัดชนิดพีอีดีดี

ชุดตรวจวัดชนิดพีอีดีดี เป็นชุดตรวจวัดทางแสงอย่างง่ายชนิดหนึ่งที่มีขนาดเล็ก ถูกออกแบบขึ้นมาเพื่อทดแทนสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ราคาแพงและขนาดใหญ่ ได้มีการเผยแพร่ครั้งแรกในปี ค.ศ. 2005 โดย Martina และคณะ (Martina et al., 2005) ซึ่งออกแบบอุปกรณ์พีอีดีดีสำหรับการใช้ในการตรวจวิเคราะห์ในระบบเทคนิคการไหล ดังภาพประกอบ 1



ภาพประกอบ 1 แสดงอุปกรณ์พีอีดีดี ที่ออกแบบขึ้นเพื่อใช้ร่วมกับการตรวจวัดทางสีในระบบเทคนิคการไหล

ที่มา: Martina, O. T., King Tong, L., & Dermot, D. (2005). Photometric detection in flow analysis systems using integrated PEDDs. *Talanta*, 66, 1340-1344.

อุปกรณ์ดังกล่าวประกอบไปด้วยหลอดไฟชนิดเปล่งแสง (light emitting diodes, LED) 2 ตัว โดย LED ตัวที่หนึ่งทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงหรือ LED ตัวเปล่งแสง (LED emitter) และ LED อีกตัวทำหน้าที่เป็นตัวรับแสงหรือตัวตรวจวัดแสง (LED detector) LED ทั้งสองตัวนี้จะวางในตำแหน่งที่หันหน้าหลอดเข้าหากัน และอยู่ในระนาบเดียวกัน โดย LED emitter จะเชื่อมต่อกับแบตเตอรี่ขนาด 9 โวลต์ และ LED detector จะต่อกับวงจรไฟฟ้าซึ่งนำมาใช้ในการตรวจวัดเวลาที่ใช้ในการปล่อยกระแสไฟฟ้า (time for discharge of current) ซึ่งเวลาในการปลดปล่อยกระแสไฟฟ้านี้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารละลายที่ตรวจวัด

ต่อมาในปี 2008 ได้มีการพัฒนาชุดตรวจวัดชนิดพีอีดีดี โดยกลุ่มงานของ Łukasz, Marta และ Robert ซึ่งออกแบบตัวตรวจวัดโดยใช้หลักการวัดค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสงที่ตกกระทบที่ LED detector โดยใช้เครื่อง pH มิเตอร์ (Łukasz et al., 2008) และโวลต์มิเตอร์ (Łukasz & Robert, 2009) โดยค่าความต่างศักย์ที่วัดได้จาก LED detector จะมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลายและกฎของ Lambert-Beer ดังนี้

$$\Delta E_{\text{sample}} = bA_{\text{sample}} = b\epsilon lc$$

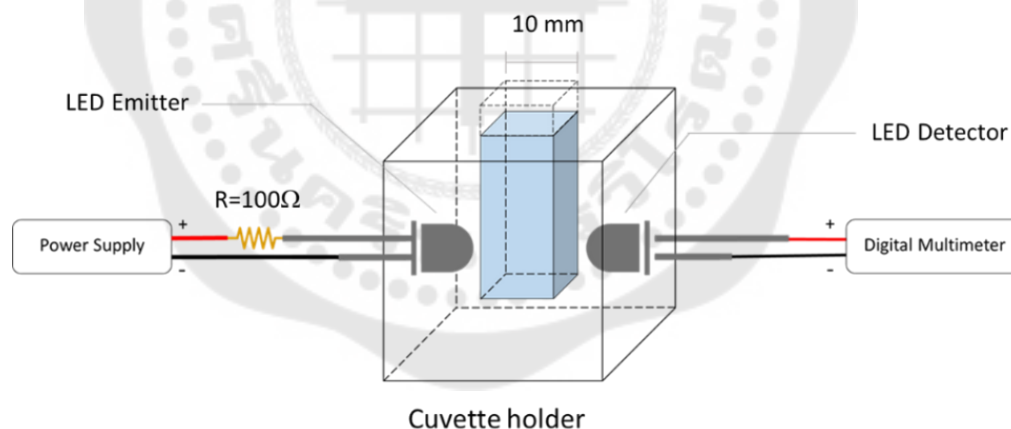
เมื่อ ΔE_{sample} คือ ผลต่างของความต่างศักย์ระหว่างสารละลายแบบลงค์กับสารละลายตัวอย่าง

A_{sample}	คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายตัวอย่าง
ϵ	คือ ค่า molar absorptivity ของสารละลายตัวอย่าง
B	คือ ค่าคงที่
l	คือ ระยะทางที่แสงเดินทางผ่านสารละลายตัวอย่าง
C	คือ ความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่าง

จากงานวิจัยดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการใช้โวลต์มิเตอร์เป็นตัวตรวจวัดสัญญาณความต่างศักย์ให้ผลการวิเคราะห์ที่มีความไวสูงกว่าการใช้เครื่อง pH มิเตอร์

สำหรับชุดตรวจวัดพีอีดีดี ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย LED 2 ตัว โดย LED ตัวที่หนึ่งทำหน้าที่เป็น LED emitter และ LED อีกตัวทำหน้าที่เป็น LED detector โดย LED ทั้ง 2 ตัวนี้จะวางในตำแหน่งที่หันหน้าหลอดเข้าหากัน และอยู่ในระนาบเดียวกัน โดย LED emitter จะเชื่อมต่อกับ

แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง โดยผ่านตัวต้านทานเพื่อควบคุมกระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่หลอด LED emitter ทำให้ LED เปล่งแสงออกมาที่มีความเข้มแสงคงที่ ส่วน LED detector จะต่อกับเครื่องแปลงสัญญาณ (digital multimeter) เพื่อวัดสัญญาณออกมาเป็นค่าความต่างศักย์ และหลอด LED ทั้งสองจะถูกยึดติดไว้กับแท่นสำหรับวางคิวเวตต์ (Cuvette holder) ที่ทำจากพลาสติกอะคริลิก และมีช่องใส่คิวเวตต์ขนาด 10x10 มิลลิเมตร โดยลักษณะของการประกอบติดตั้ง เริ่มจากการต่อขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟเชื่อมกับขั้วบวกของ LED emitter โดยมีตัวต้านทานไฟฟ้าทำหน้าที่ควบคุมกระแสจากแหล่งจ่ายไฟที่ไหลผ่าน LED emitter ให้มีกระแสไฟฟ้าสูงพอที่หลอด LED จะสามารถรับได้ เพราะถ้ามีกระแสผ่านมากเกินไปจะทำให้หลอด LED ขาดได้ ส่วนขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟจะต่อกับขั้วลบของหลอด LED emitter ส่วน LED detector จะต่อกับเครื่องแปลงสัญญาณ ดังภาพประกอบ 2 โดยหลักการทำงานของชุดตรวจวัดชนิดฟิโอดีดีนี้คือ เมื่อแสงเดินทางจาก LED emitter ผ่านสารละลายที่ต้องการตรวจวัดและยังมีแสงที่เหลือจากการผ่านสารละลายไปตกกระทบที่ LED detector โดยสัญญาณที่วัดได้จาก LED detector จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มของแสงที่ผ่าน และแปรตามความเข้มข้นของสารที่ต้องการวิเคราะห์ (Sumonmarn et al., 2016)



ภาพประกอบ 2 แสดงองค์ประกอบของชุดตรวจวัดชนิดฟิโอดีดี ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ที่มา: ดัดแปลงมาจาก Łukasz, T., Marta, P., & Robert, K. (2008). Paired emitter detector diode (PEDD)-based photometry – an alternative approach. *Analyst*, 133, 1501-1504.

3. สารสกัดจากข้าวลิ้มผิว

ข้าวลิ้มผิวหรือข้าวเหนียวลิ้มผิวเป็นข้าวนาปี ปลูกครั้งแรกโดยกลุ่มชาติพันธุ์ชาวม้ง อำเภอพบพระ จังหวัดตาก นิยมปลูกในพื้นที่ที่มีความอุดมสมบูรณ์ของดินและมีสภาพไร่สูงจากระดับน้ำทะเลประมาณ 400-800 เมตร โดยข้าวลิ้มผิวมีลักษณะเยื่อหุ้มเมล็ดข้าวเป็นสีดำ แดง และสีม่วงเข้ม เปลือกเมล็ดเป็นสีฟางขีดดำ จัดเป็นข้าวพันธุ์เบา คือ มีน้ำหนักที่เบาว่าเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวพันธุ์หนักและกลางในปริมาณเท่ากัน ลักษณะเด่นของข้าวลิ้มผิวคือ มีคุณค่าทางโภชนาการสูง โดยเฉพาะสารต้านอนุมูลอิสระพบในเยื่อหุ้มเมล็ดและจมูกข้าว (embryo) โดยส่วนใหญ่เป็นสารประกอบโพลีฟีนอล (polyphenolic compounds) ซึ่งมีคุณสมบัติช่วยชะลอความเสื่อมสภาพของเซลล์ต่าง ๆ ในร่างกาย คงความอ่อนเยาว์ให้กับผิวและอวัยวะภายใน อีกทั้งยังลดความเสี่ยงการเกิดโรคมะเร็งและช่วยสร้างเม็ดเลือดแดง นอกจากนี้บริเวณเยื่อหุ้มเมล็ดของข้าวลิ้มผิวยังเป็นแหล่งรวมของรงควัตถุชนิดแอนโทไซยานิน (anthocyanin) ซึ่งเป็นสารที่จัดอยู่ในกลุ่มฟลาโวนอยด์หรือสารประกอบโพลีฟีนอล นอกจากนี้ยังพบสารกลุ่มอื่น ๆ ที่มีประโยชน์ ตัวอย่างเช่น กรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated fatty acid) ที่ทำหน้าที่ช่วยลดระดับคอเลสเตอรอลชนิดไม่ดี ที่ก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคหลอดเลือดหัวใจ รวมไปถึงช่วยลดมวลไขมันและความดันโลหิต วิตามินอี (Vitamin E) เป็นวิตามินที่มีความจำเป็นต่อร่างกายที่ต้องได้รับทุกวัน มีหน้าที่ในการขยายหลอดเลือด ด้านการแข็งตัวของเลือด และยังจัดเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ช่วยทำให้อวัยวะต่าง ๆ ในร่างกายทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังมี แคลเซียม (Calcium; Ca) ทำหน้าที่ช่วยให้กระดูกและฟันแข็งแรง ลดความเสี่ยงของมะเร็งลำไส้ใหญ่ บรรเทาอาการนอนไม่หลับ สังกะสี (Zinc; Zn) ทำหน้าที่ช่วยการรับรู้รสอาหาร ช่วยป้องกันปัญหาต่อมลูกหมาก และแมงกานีส (Manganese; Mn) ทำหน้าที่ช่วยกระตุ้นเอนไซม์ที่จำเป็นต่อกระบวนการนำ ไบโอดีน วิตามินบี 1 และวิตามินซี มาใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อร่างกาย มีความสำคัญต่อการสร้างไทโรซีนที่เป็นฮอร์โมนหลักของต่อมไทรอยด์ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าข้าวลิ้มผิวมีสารอาหารที่เป็นประโยชน์มากมาย และพบสารอาหารแต่ละชนิดในปริมาณที่แตกต่างกันดังตาราง 1

ตาราง 1 แสดงผลวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการของข้าวลิ้มผั่วเปรียบเทียบกับข้าวเจ้าหอมนิล
หลังการเก็บเกี่ยวทันที

รายการทดสอบ	ข้าวลิ้มผั่ว*	หอมนิล**	หน่วย
Monounsaturated fatty acid	1.16	0.91	g/100g
Polyunsaturated fatty acid	1.19	0.88	g/100g
Unsaturated fat	2.35	1.76	g/100g
Omega 3	33.9	31.5	mg/100g
Omega 6	1,160	850	mg/100g
Omega 9	1,146	901	mg/100g
Niacin	6.48	5.78	mg/100g
Vitamin E (Alpha-Tocopherol)	16.8	7.78	mg/kg
Gamma-oryzanol	491	412	mg/kg
Calcium (Ca)	170	122	mg/kg
Zinc (Zn)	23.6	23.8	mg/kg
Manganese (Mn)	35.4	22.3	mg/kg
Anthocyanin (Cyanidin-3-glucoside)	46.6	1.4	mg/100g
Total antioxidant	834	193	mg Ascorbic acid/100g

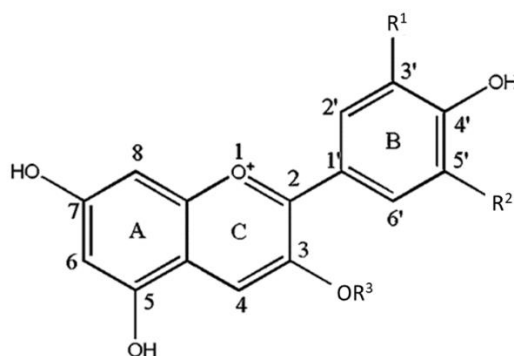
* = ปลูกในสภาพไร่ที่ อ.เขาค้อ จ.เพชรบูรณ์ ฤดูนาปี พ.ศ. 2552

**= ปลูกในสภาพนาที่ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ จ.พิษณุโลก ฤดูนาปี พ.ศ. 2552

ที่มา: ศูนย์วิจัยข้าวพิษณุโลก, ส., กรมการข้าว กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2555).
ข้าวเหนียวดำพันธุ์ลิ้มผั่ว.

จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นได้ว่าข้าวลิ้มผั่วมีแอนโทไซยานินเป็นองค์ประกอบในปริมาณ
ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับข้าวเจ้าหอมนิลซึ่งสารแอนโทไซยานินจัดเป็นรงควัตถุที่มีสีแดง น้ำเงิน และ
ม่วง ที่สามารถเปลี่ยนสีได้ไปตามสภาวะความเป็นกรด-ด่าง กล่าวคือสีของแอนโทไซยานินมีสีแดง

ในสภาวะที่เป็นกรด (pH ต่ำกว่า 7) มีสีม่วงในสภาวะที่เป็นกลาง (pH 7) และมีสีน้ำเงินเข้มในสภาวะที่เป็นด่าง (pH มากกว่า 7) โดยโครงสร้างแอนโทไซยานินเป็นไกลโคไซด์ (glycoside) ของ 2-phenylbenzopyrylium หรือ flavylium cation (ภาพประกอบ 3) โดย R^3 คือหมู่น้ำตาล ได้แก่ กลูโคส (glucose) กาแลกโตส (galactose) แรมโนส (rhamnose) และอะราบิโนส (arabinose) และมีแอนโทไซยานิดินเป็นองค์ประกอบหลัก ($R^3 = H$) ซึ่งในธรรมชาติสามารถพบได้ 6 ชนิด ได้แก่ Cyanidin (Cy) Delphinidin (Dp) Malvidin (Mv) Pelargonidin (Pg) Peonidin (Pn) และ Petunidin (Pt) (ศูนย์วิจัยข้าวพิษณุโลก et al., 2555) องค์ประกอบต่าง ๆ ของแอนโทไซยานิดินดังแสดงในตาราง 2



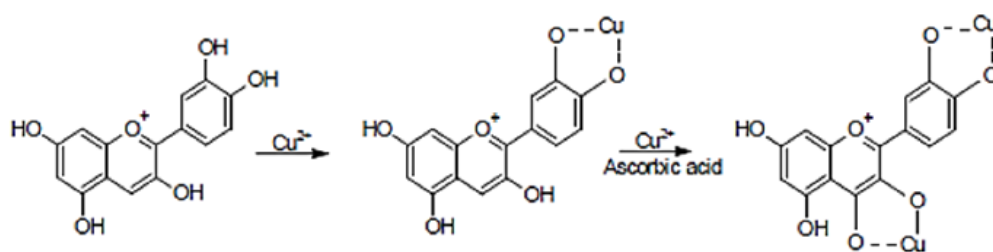
ภาพประกอบ 3 แสดงการแทนที่ของแอนโทไซยานิดิน

ตาราง 2 แสดงการแทนที่ของหมู่ต่าง ๆ ของแอนโทไซยานิดิน

Compounds	R^1	R^2	R^3
Delphinidin (Dp)	OH	OH	H
Cyanidin (Cy)	OH	H	H
Petunidin (Pt)	OCH ₃	OH	H
Peonidin (Pn)	OCH ₃	H	H
Malvidin (Mv)	OCH ₃	OCH ₃	H
Pelargonidin (Pg)	H	H	H

ที่มา: สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ก., กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2553). แอนโทไซยานิน (Anthocyanin).

การแทนที่ของหมู่ไฮดรอกซี (-OH) และหมู่เมทอกซี (-OCH₃) จะทำให้เกิดสีที่แตกต่างกันของแอนโทไซยานิดิน ซึ่งการเพิ่มจำนวนของหมู่ไฮดรอกซีจะทำให้เกิดสีฟ้า (bluish shade) ในขณะที่การเพิ่มจำนวนของหมู่เมทอกซีจะทำให้เกิดสีแดง (redness) อีกทั้งการเพิ่มจำนวนของหมู่ไฮดรอกซีจะทำให้ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังมีรายงานวิจัยกล่าวว่า ไชยานิดิน (cyanidin) ที่เป็นอนุพันธ์ของแอนโทไซยานิดิน สามารถทำปฏิกิริยากับโลหะอย่างรวดเร็ว เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีความเสถียร และในสารละลายที่มีค่า pH อยู่ในช่วง 2-4 แอนโทไซยานินจะอยู่ในรูปของ flavylum cation ซึ่งสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะในตำแหน่ง 2 และ 4 ได้ โดยกรดแอสคอร์บิกทำหน้าที่ป้องกันการเกิดออกซิเดชันของโลหะ (Miguel, 2011) ดังภาพประกอบ 4



ภาพประกอบ 4 แสดงกลไกการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโลหะคอปเปอร์(II) ไอออน กับไชยานิดิน

ที่มา: Miguel, M. G. (2011). Anthocyanins: Antioxidant and/or anti-inflammatory activities. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 01(06), 07-15.

4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

4.1 การวิเคราะห์ปริมาณคอปเปอร์(II) ไอออน ด้วยเทคนิคต่าง ๆ

4.1.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี

ในปี ค.ศ. 2017 Gözde และคณะ (Gözde et al., 2017) ได้พัฒนาวิธีการวิเคราะห์ปริมาณคอปเปอร์(II) ไอออน ในตัวอย่างน้ำธรรมชาติ ได้แก่ น้ำประปา น้ำทะเล และน้ำเสีย โดยใช้เทคนิคการสกัดระดับจุลภาคด้วยของเหลวแบบกระจาย (Dispersive liquid-liquid microextraction, DLLME) และการใช้ Slotted quartz tube (SQT) เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของสัญญาณในการตรวจวัด ควบคู่กับการตรวจวัดด้วยเทคนิคเฟลอมอะตอมมิคแอบซอร์พ

ชั้นสเปกโทรสโกปี (Flame Atomic Absorption Spectroscopy, FAAS) โดยพบว่าการตรวจวัดด้วย SQT-FAAS DLLME-FAAS และ DLLME-SQT-FAAS ให้การตรวจวัดที่ไวกว่าการใช้เทคนิค FAAS เพียงอย่างเดียวและมีค่าขีดจำกัดต่ำสุดที่ตรวจวัดได้เท่ากับ 0.7 ไมโครกรัมต่อลิตร และขีดจำกัดต่ำสุดที่วิเคราะห์ได้เท่ากับ 2.2 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ถึง 79 ครั้งต่อชั่วโมง และมีค่าร้อยละของการคืนกลับของตัวอย่างทั้งหมดอยู่ในช่วง 78-99

ในปี ค.ศ. 2018 Juliana และคณะ (Juliana et al., 2018) ได้ทำการวิเคราะห์ปริมาณคอปเปอร์(II) ไอออน ในตัวอย่างอาหารเช่น แป้งข้าวโพด แป้งมัน ใบออริกาโน (oregano) และขมิ้น โดยใช้ off-line preconcentration ควบคู่กับการตรวจวัดด้วยเทคนิคเฟลอมอะตอมมิกแอมป์ซอร์ฟชั้นสเปกโทรสโกปี จากการทดลองพบว่าค่าขีดจำกัดต่ำสุดที่ตรวจวัดได้เท่ากับ 0.5 ไมโครกรัมต่อลิตร และค่าขีดจำกัดต่ำสุดที่วิเคราะห์ได้เท่ากับ 1.66 ไมโครกรัมต่อลิตร ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์อยู่ในช่วงร้อยละ 2.70 และ 2.79 สำหรับการตรวจวัดคอปเปอร์(II) ไอออน ที่ระดับความเข้มข้น 5.0 และ 20 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ร้อยละการคืนกลับอยู่ในช่วง 93-100

ในปีต่อมากลุ่มงานวิจัยเดียวกันได้ศึกษาและพัฒนาวิธีการตรวจวัดวิเคราะห์คอปเปอร์(II) ไอออน และแคดเมียม(II) ไอออน ในตัวอย่างจากแหล่งน้ำธรรมชาติและจากสระว่ายน้ำ โดยใช้เทคนิคอะตอมมิกแอมป์ซอร์ฟชั้นสเปกโทรสโกปี ควบคู่กับวิธีการแยกและการเพิ่มความเข้มข้นของสารโดยใช้คอลัมน์ขนาดเล็กแบบออนไลน์จาก polyurethane foam และ phenylfluorone (PUF-PF) จากการทดลองพบว่า ค่าขีดจำกัดต่ำสุดที่ตรวจวัดได้เท่ากับ 0.8 และ 0.3 ไมโครกรัมต่อลิตร และค่าขีดจำกัดต่ำสุดที่วิเคราะห์ได้เท่ากับ 2.6 และ 0.8 ไมโครกรัมต่อลิตร ของคอปเปอร์(II) ไอออน และแคดเมียม(II) ไอออน ตามลำดับ ความเที่ยงของวิธีวิเคราะห์แสดงในรูป %RSD มีค่าเท่ากับ 7.6 ที่ความเข้มข้น 25 ไมโครกรัมต่อลิตร สำหรับคอปเปอร์(II) ไอออน และเท่ากับ 4.0 ที่ความเข้มข้น 10 ไมโครกรัมต่อลิตร สำหรับแคดเมียม(II) ไอออน ร้อยละของการคืนกลับของตัวอย่างทั้งหมดอยู่ในช่วง 83-109

4.1.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า

ในปี ค.ศ. 2015 Paulo และคณะ (Paulo et al., 2015) ได้ศึกษาการนำถ่านชีวภาพมาดัดแปลงบนพื้นผิวขั้วอิเล็กโทรดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจวัดปริมาณคอปเปอร์(II) ไอออน ในตัวอย่างน้ำดื่ม ควบคู่กับเทคนิค differential pulse adsorptive stripping voltammetric (DPAdSV) จากการทดลองพบว่ากราฟมาตรฐานมีความเป็นเส้นตรงในช่วงความเข้มข้น 1.5×10^{-6} - 3.1×10^{-5} โมลต่อลิตร ค่าขีดจำกัดต่ำสุดที่ตรวจวัดได้เท่ากับ 4.0×10^{-7} โมลต่อลิตร

และค่าขีดจำกัดต่ำสุดที่วิเคราะห์ได้เท่ากับ 1.3×10^{-6} โมลต่อลิตร ความเที่ยงของวิธีวิเคราะห์แสดงในรูป %RSD เท่ากับ 6.6

ในปี ค.ศ. 2018 Megha และคณะ (Megha et al., 2018) ได้ศึกษาและพัฒนาเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมตรี Differential pulse voltammetry (DPV) สำหรับการตรวจวัดคอปเปอร์(II) ไอออน เลด(II) ไอออน และเมอร์คิวรี(II) ไอออน โดยใช้ polyaniline single walled carbon nanotubes (SWCNTs) และ ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA) ที่ดัดแปลงบนพื้นผิวอิเล็กโทรดจากเหล็กกล้า พบว่าค่าขีดจำกัดต่ำสุดที่ตรวจวัดได้ของคอปเปอร์(II) ไอออน เลด(II) ไอออน และเมอร์คิวรี(II) ไอออน มีค่าเท่ากับ 0.08, 1.65 และ 0.68 ไมโครโมลาร์ตามลำดับ

4.1.3 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโทรโฟโตเมทรี

ในปี ค.ศ. 2017 Alba และคณะ (Alba, Raquel, Jessica, & Tânia, 2017) ได้ศึกษาและพัฒนาเทคนิค Microsequential Injection Lab-on-Valve ร่วมกับเทคนิคสเปกโทรโฟโตเมทรีแบบออนไลน์ในการตรวจวัดไอออนของคอปเปอร์(II) ไอออน จากการทดลองพบว่า ปริมาณตัวอย่างที่ใช้เท่ากับ 150.0 ไมโครลิตร และปริมาณรีเอเจนท์ที่ใช้เท่ากับ 120.0 ไมโครลิตร ค่าขีดจำกัดต่ำสุดที่ตรวจวัดได้เท่ากับ 12.0 ไมโครกรัมต่อลิตร ความเที่ยงของวิธีวิเคราะห์แสดงในรูป % RSD มีค่าเท่ากับ 2 และค่าร้อยละของการคืนกลับของตัวอย่างทั้งหมดอยู่ในช่วง 90-107

ในปี ค.ศ. 2017 Yiming และคณะ (Yiming et al., 2017) ได้พัฒนาเทคโนโลยีไมโครเฟลท ร่วมกับเทคนิคคลิเลอริเมทรี สำหรับการตรวจวัดคอปเปอร์(II) ไอออน ในตัวอย่างอาหารสัตว์ให้มีประสิทธิภาพและรวดเร็วมากยิ่งขึ้น โดยการสกัดคอปเปอร์(II) ไอออน จากอาหารสัตว์ด้วยสารละลายกรดไตรคลอโรอะซิติก แล้วทำให้เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับ 2, 20-bicinchoninic acid (BCA) ตรวจวัดที่ความยาวคลื่น 354 นาโนเมตร พบว่าการวิเคราะห์ทำได้ภายใน 20 นาที ค่าขีดจำกัดต่ำสุดที่ตรวจวัดได้เท่ากับ 0.033 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร กราฟมาตรฐานมีความเป็นเส้นตรงในช่วงความเข้มข้น 0.1-10 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ร้อยละของการคืนกลับของตัวอย่างทั้งหมดอยู่ในช่วง 96.44-109.79 และเมื่อนำวิธีที่พัฒนาขึ้นไปวิเคราะห์คอปเปอร์(II) ไอออน ในตัวอย่างจริงพบว่ามีความใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโทรสโกปี

ในปี ค.ศ. 2017 Könül และคณะ (Könül et al., 2017) ได้พัฒนาวิธีการตรวจวิเคราะห์คอปเปอร์(II) ไอออน ในตัวอย่างน้ำจากธรรมชาติและแหล่งน้ำเสีย โดยการใช้ N,N'-bissalicylidene-2,3-diaminopyridine (H_2IF) ร่วมกับเทคนิคสเปกโทรโฟโตเมทรี พบว่าผลิตภัณฑ์

ที่เกิดขึ้นให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 414 นาโนเมตร ผลการวิเคราะห์พบว่ากราฟมาตรฐานมีความเป็นเส้นตรงในช่วงความเข้มข้น 6.35-318 ไมโครกรัมต่อลิตร ค่าขีดจำกัดต่ำสุดที่ตรวจวัดได้เท่ากับ 6.38 ไมโครกรัมต่อลิตร ค่าขีดจำกัดต่ำสุดที่วิเคราะห์ได้เท่ากับ 21.27 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเที่ยงของวิธีวิเคราะห์แสดงในรูป %RSD มีค่าน้อยกว่า 0.62 (n=5) สำหรับคอปเปอร์ (II) ไอออน ที่ความเข้มข้น 63.5 ไมโครกรัมต่อลิตร เมื่อนำวิธีที่พัฒนาขึ้นไปวิเคราะห์คอปเปอร์ (II) ไอออน ในตัวอย่างพบว่าให้การวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการตรวจวิเคราะห์สูง มีการตรวจวัดที่รวดเร็วและมีความแม่นยำ

ในปี ค.ศ. 2018 Justyna และคณะ (Justyna et al., 2018) ได้ศึกษาและพัฒนา ระบบ sequential injection (SI) ควบคู่กับการสกัดด้วยคอลัมน์ตัวดูดซับของแข็ง (solid phase extraction) สำหรับการวิเคราะห์ซิงค์ (II) ไอออน และคอปเปอร์ (II) ไอออน ในตัวอย่างน้ำฝนและดินบริเวณที่มีน้ำเสีย โดยตรวจวัดด้วยเทคนิคสเปกโตรโฟโตเมทรีที่ความยาวคลื่น 560.0 นาโนเมตร จากการทำปฏิกิริยากับ 1-(2-Pyridylazo)-2-naphthol (PAN) ผลจากการทดลองพบว่ากราฟมาตรฐานให้ความเป็นเส้นตรงอยู่ในช่วงความเข้มข้นเท่ากับ 0.005-0.3 และ 0.011-0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเที่ยงของวิธีวิเคราะห์แสดงในรูป %RSD มีค่าเท่ากับ 6.0 และ 5.1 ค่าขีดจำกัดต่ำสุดที่ตรวจวัดได้เท่ากับ 1.4 และ 3.0 ไมโครกรัมต่อลิตร สำหรับการตรวจวัดไอออนของซิงค์ (II) ไอออน และคอปเปอร์ (II) ไอออน ตามลำดับ

4.2 การประยุกต์ใช้ตัวตรวจวัดชนิดฟลูออโรโพรบในงานด้านต่างๆ

ในปี ค.ศ. 2006 King-Tong และคณะ (King-Tong, Eimear, et al., 2006) ได้ศึกษาและพัฒนาชุดตรวจวัดฟลูออโรโพรบ โดยอาศัยการใช้หลอด LED ที่ความยาวคลื่นเดียวกันทั้งแหล่งกำเนิดแสงและตัวตรวจวัดแสง สำหรับการวิเคราะห์ร่วมกับเทคนิคแคลอริเมตริก เพื่อวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียม (II) ไอออน และเลด (II) ไอออน ในตัวอย่างน้ำจากธรรมชาติและเปรียบเทียบกับ การตรวจวัดด้วยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ จากการตรวจวัดพบว่า แคดเมียม (II) ไอออน และเลด (II) ไอออน ให้กราฟมาตรฐานมีความเป็นเส้นตรงในช่วงความเข้มข้นเท่ากับ 20.0-80.0 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร และ 0.4-2.0 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ร้อยละค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์เท่ากับ 0.2 และ 0.4 และค่าขีดจำกัดต่ำสุดที่ตรวจวัดได้เท่ากับ 5.0 และ 20.0 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ

ในปี ค.ศ. 2013 Kamil และ Robert (Kamil & Robert, 2013) ได้พัฒนาและสร้างชุดตรวจวัดจากหลอด LED ขนาดเล็กโดยอาศัยหลักการของฟลูออโรโพรบ ร่วมกับระบบการไหลอัตโนมัติ

เพื่อใช้ในการตรวจวัดความเข้มข้นสำหรับการวิเคราะห์เซรัมอัลบูมิน (serum albumin) และโปรตีนเอสตอน (Exton protein) ในตัวอย่างปัสสาวะ ผลการทดลองพบว่าในช่วงความเป็นเส้นตรงในช่วงความเข้มข้นเท่ากับ 15.0-500.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าขีดจำกัดต่ำสุดที่ตรวจวัดได้เท่ากับ 8.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าขีดจำกัดต่ำสุดที่วิเคราะห์ได้เท่ากับ 15.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเที่ยงของวิธีวิเคราะห์แสดงในรูป %RSD เท่ากับ 1.10 และสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ 60 ครั้งต่อชั่วโมง

ในปี ค.ศ. 2014 Asheim และคณะ (Asheim, 2014) ศึกษาและพัฒนาสื่อการเรียนการสอนในวิชาเคมีวิเคราะห์และเคมีอุปกรณ์ โดยการใช้เครื่องตรวจวัดชนิดฟิโอดีดี จากการประยุกต์ใช้ตัวต่อเลโกเพื่อประดิษฐ์เป็นแท่นวางคิวเวตต์ และวัดสัญญาณที่ได้จาก LED emitter ด้วย Multimeter เพื่อช่วยในการสอนเรื่ององค์ประกอบของสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ กฎของเบียร์และแลมเบิร์ต (Beer & Lambert Law) ค่าการดูดกลืนแสง และค่าการส่งผ่าน (transmittance) สำหรับการสร้างกราฟมาตรฐาน และการหาความเข้มข้นของสารละลาย

ในปี ค.ศ. 2016 Sumonmarn และคณะ (Sumonmarn et al., 2016) ได้ศึกษาและพัฒนากระบวนการไหลอัตโนมัติร่วมกับชุดตรวจวัดชนิดฟิโอดีดี เพื่อประเมินความสามารถในการต้านออกซิเดชันโดยรวม ด้วยวิธี ABTS โดยอาศัยกรดแอสคอร์บิกเป็นสารมาตรฐานและรายงานเป็นค่า ascorbic acid equivalent (AAE) ชุดตรวจวัดประกอบด้วยหลอดแอลอีดีสีแดงทำหน้าที่ให้แสงและรับแสง สภาวะที่เหมาะสมของระบบการไหลคือ อัตราการไหลเท่ากับ 1.0 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณสารตัวอย่างที่ฉีดเข้าระบบเท่ากับ 300.0 ไมโครลิตร พบว่าผลการวิเคราะห์ในช่วงความเป็นเส้นตรงที่ดีในช่วงความเข้มข้นเท่ากับ 10.0 - 50.0 ไมโครโมลาร์ มีความแม่นยำสูง ความเที่ยงของวิธีวิเคราะห์แสดงในรูป %RSD มีค่าเท่ากับ 2.41 ค่าขีดจำกัดต่ำสุดที่ตรวจวัดได้เท่ากับ 1.98 ไมโครโมลาร์ และสามารถวิเคราะห์ได้ 48 ตัวอย่างต่อชั่วโมง

ในปี ค.ศ. 2017 Sajika และคณะ (Sajika, Kanchana, Duangjai, & Thitirat, 2017) ได้วิเคราะห์และพัฒนาการวิเคราะห์แบบซีควนเชียลอินเจกชัน (Sequential Injection Analysis, SIA) เพื่อวิเคราะห์กรดซิตริกในตัวอย่างน้ำผลไม้ 3 ชนิด คือ น้ำมะขาม น้ำสับปะรด และน้ำส้ม โดยใช้ปฏิกิริยาทางแสงที่เกิดขึ้นระหว่างเฟอรริกไอออนกับกรดซิตริกภายใต้แสงยูวีกำลังไฟ 108.0 วัตต์ เป็นเวลา 30.0 วินาที เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนสีส้มแดง แล้วทำการวัดโดยใช้ชุดตรวจวัดชนิดฟิโอดีดีที่มีความยาวคลื่น 525 ± 35 นาโนเมตร ผลการทดลองพบว่าได้กราฟมาตรฐานมีความเป็นเส้นตรงในช่วงความเข้มข้น 5.0 - 40.0 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ 0.9967 สามารถวัดตัวอย่างได้ 13 ตัวอย่างต่อชั่วโมง และในการวิเคราะห์หาปริมาณกรดซิตริกในตัวอย่างน้ำผลไม้ไม่มีค่าร้อยละของการคืนกลับอยู่ในช่วง 106 - 117

4.3 การประยุกต์ใช้รีเอเจนต์จากธรรมชาติในงานวิเคราะห์ไอออนของโลหะชนิดต่าง ๆ

ในปี ค.ศ. 2005 Thapanon และคณะ (Thapanon, Supaporn, Somchai, & Jaroon, 2005) ได้ศึกษาและพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ไอออน(III) ไอออน จากตัวอย่างน้ำเสียด้วยสารสกัดจากใบฝรั่งเป็นสารตรวจวัด ร่วมกับเทคนิคโฟลอินเจกชันอะนาไลซิส ในสารละลายบัฟเฟอร์อะซิเตต และทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 570 นาโนเมตร จากการทดลองพบว่าความเที่ยงของวิธีวิเคราะห์แสดงในรูป %RSD อยู่ในช่วง 3-10 ที่ระดับความเข้มข้น 1.0-10.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าร้อยละการคืนกลับอยู่ในช่วง 95-97 สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างได้ 20 ครั้งต่อชั่วโมง และพบว่าการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์นี้มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ประหยัดและสามารถทำได้ง่าย

ในปี ค.ศ. 2009 Ukwueze และคณะ (Ukwueze, Nwadinigwe, Okoye, & Okoye, 2009) ได้ศึกษาและพัฒนาวิธีการวิเคราะห์หาปริมาณเลด(II) ไอออน แคดเมียม(II) ไอออน และโครเมียม(III) ไอออน ในตัวอย่างปัสสาวะ โดยการใช้สารไซยานิดินคลอไรด์ (Cyanidin chloride) ที่สกัดจากดอกชบา และแบล็กเบอร์รี่ ร่วมกับเทคนิคสเปกโทรโฟโตเมทรี วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารประกอบเชิงซ้อนที่ค่าความยาวคลื่น 555, 682 และ 706 นาโนเมตร ของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซยานิดินกับ เลด(II) ไอออน แคดเมียม(II) ไอออน และโครเมียม(III) ไอออน ตามลำดับ ผลจากการทดลองพบว่ากราฟมาตรฐานมีความเป็นเส้นตรงในช่วงความเข้มข้น 0.1-0.5 มิลลิโมลาร์ ($R^2 = 0.994, 0.995$ และ 0.992) ค่าขีดจำกัดต่ำสุดที่ตรวจวัดได้เท่า 0.0018, 0.00003 และ 0.0024 มิลลิโมลาร์ และค่าขีดจำกัดต่ำสุดที่วิเคราะห์ได้เท่ากับ 0.006, 0.0001 และ 0.008 มิลลิโมลาร์ ของสารประกอบโลหะเลด(II) ไอออน แคดเมียม(II) ไอออน และโครเมียม(III) ไอออน ตามลำดับ

ในปี ค.ศ. 2012 Sopa และคณะ (Sopa et al., 2012) ได้ศึกษาและพัฒนาการตรวจวัดปริมาณอะลูมิเนียม(III) ไอออน ในตัวอย่างใบชา โดยใช้สารสกัดจากรากยอเป็นรีเอเจนต์ ร่วมกับเทคนิคโฟลอินเจกชันอะนาไลซิส โดยสารในกลุ่ม anthoquinone ที่อยู่ในสารสกัดจะทำปฏิกิริยากับอะลูมิเนียม(III) ไอออน ได้สารประกอบสีแดงตรวจวัดที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร โดยใช้อัตราการไหลของรีเอเจนต์ 1.5 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นของรีเอเจนต์เท่ากับ 0.3 (น้ำหนักต่อปริมาตร) ที่สภาวะ pH 4.5 ปริมาณสารตัวอย่างที่ใช้เท่ากับ 75 ไมโครลิตร จากการทดลองกราฟมาตรฐานมีความเป็นเส้นตรงในช่วงความเข้มข้น 0.1-1 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าขีดจำกัดต่ำสุดที่ตรวจวัดได้เท่ากับ 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าร้อยละเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ที่ความ

เข้มข้น 0.1 และ 0.6 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเท่ากับ 1.2 และ 1.7 ตามลำดับ สามารถตรวจวัดได้ 35 ตัวอย่างต่อชั่วโมง

ในปี ค.ศ. 2014 Warangkhan และคณะ (Warangkhan et al., 2014) ได้ศึกษาและพัฒนาการตรวจวัดปริมาณคอปเปอร์(II) ไอออน เลด(II) ไอออน อะลูมิเนียม(III) ไอออน และไอร์รอน(III) ไอออน ในตัวอย่างน้ำประปา และน้ำบาดาล โดยวิธีการตรวจวัดแบบ Naked eye ร่วมกับการใช้สารสกัดไซยานิดินสกัดจากกะหล่ำปลีสีม่วง โดยเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนสีน้ำเงิน จากการทดลองพบว่าค่าขีดจำกัดต่ำสุดที่ตรวจวัดได้เท่ากับ 50, 80, 50 และ 200 ไมโครโมลาร์ ให้สีของสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนของโลหะกับไซยานิดินที่ pH 7, 6, 4 และ 5 ของคอปเปอร์(II) ไอออน เลด(II) ไอออน อะลูมิเนียม(III) ไอออน และไอร์รอน(III) ไอออน ตามลำดับ

ในปี ค.ศ. 2018 Paweena และคณะ (Paweena et al., 2018) ได้ศึกษาและพัฒนาการวิเคราะห์คอปเปอร์(II) ไอออน และอะลูมิเนียม(III) ไอออน ในตัวอย่างน้ำบาดาล โดยใช้สารสกัดจากดอกชบา (*hibiscus rosa-sinensis*) เป็นรีเอเจนท์ ร่วมกับ marking reagent ชนิด NaF และ DMG จากการทดลองพบว่าสารประกอบเชิงซ้อนเกิดเป็นสีชมพูอมม่วงและสีม่วง ที่ pH 7 ค่าขีดจำกัดต่ำสุดที่ตรวจวัดได้เท่ากับ 0.5 และ 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับคอปเปอร์(II) ไอออน และอะลูมิเนียม(III) ไอออน และเมื่อนำวิธีที่พัฒนาขึ้นไปตรวจวัดคอปเปอร์(II) ไอออน และอะลูมิเนียม(III) ไอออน ในตัวอย่างจริงพบว่ามีค่าใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

1. เครื่องมือ อุปกรณ์ตัวตรวจวัดชนิดฟิสิกส์ดี และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย
2. การสกัดข้าวลิ้มผิวเพื่อใช้เป็นสารละลายรีเอเจนท์ธรรมชาติ
3. การศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้สารสกัดข้าวลิ้มผิวเป็นรีเอเจนท์ในการตรวจวัดคอปเปอร์(II) ไอออน
4. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์คอปเปอร์(II) ไอออน โดยใช้ตัวตรวจวัดชนิดฟิสิกส์ดี ร่วมกับรีเอเจนท์จากสารสกัดข้าวลิ้มผิว
5. การศึกษาประสิทธิภาพของวิธีการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้น
6. การวิเคราะห์ปริมาณคอปเปอร์(II) ไอออน ในตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมและเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี

1. เครื่องมือ อุปกรณ์ตัวตรวจวัดชนิดฟิสิกส์ดี และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

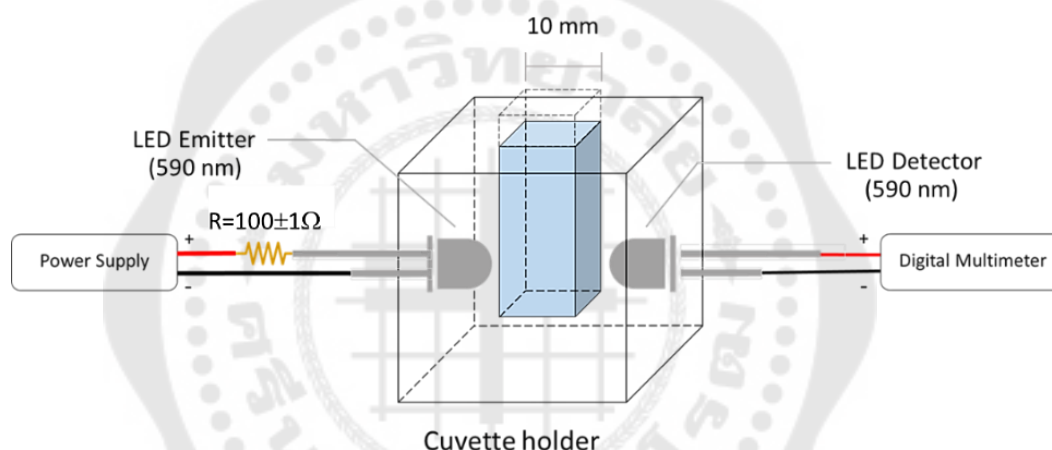
1.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ รุ่น UV-2450 จากบริษัท Shimadzu
- เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรมิเตอร์ (NMR) 300 เมกะเฮิร์ต รุ่น Avance II จากบริษัท Bruker
- เครื่องผลิตน้ำปราศจากไอออน รุ่น Labostar จากบริษัท Siemens
- เครื่องชั่งอย่างละเอียด 5 ตำแหน่ง รุ่น AX105DR จากบริษัท Mettler Toledo
- เครื่องกรองสุญญากาศ (Vacuum Filter) รุ่น Aspirator A-3S จากบริษัท EYELA
- เครื่องระเหยแบบหมุนเหวี่ยง (rotary evaporator) รุ่น R114 จากบริษัท BÜCHI
- เครื่องอัลตราโซนิก รุ่น D13 จากบริษัท GT SONIC

1.2 อุปกรณ์ตัวตรวจวัดชนิดฟิสิกส์ดี

ในงานวิจัยนี้ นำตัวตรวจวัดขนาดเล็กมาใช้ในการวิเคราะห์คอปเปอร์(II) ไอออน โดยใช้ตัวตรวจวัดดังกล่าวอาศัยหลักการของ Paired Emitter Detector Diodes ซึ่งตัวตรวจวัดชนิดนี้ประกอบด้วยหลอดแอลอีดีจำนวน 2 หลอด (Amber LED, บริษัท Baku, ประเทศจีน) ทำหน้าที่

เป็น LED emitter และ LED detector ตามลำดับ หลอดทั้งสองยึดติดกับแท่นวางคิ่วเวตต์ ในตำแหน่งหันหน้าหลอดเข้าหากัน ดังภาพประกอบ 5 โดยทางด้าน LED emitter เชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง 8 โวลต์ (รุ่น BK-1502DD จากบริษัท Baku, ประเทศจีน) ผ่านตัวต้านทานขนาด 100 ± 1 โอห์ม เพื่อแปลงแสงที่มีความเข้มแสงคงที่ที่มีความยาวคลื่น 590 ± 13.0 นาโนเมตร และในส่วน LED detector ต่อกับ digital multimeter (รุ่น DM-890, บริษัท Digicon) เพื่อวัดสัญญาณค่าความต่างศักย์ สัญญาณที่วัดได้จาก LED-detector เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มของแสงที่ผ่านตัวอย่างมาตกกระทบที่ LED detector และแปรผกผันตามความเข้มข้นของคอปเปอร์(II) ไอออน



ภาพประกอบ 5 แสดงแผนภาพอุปกรณ์ตรวจวัดชนิดฟิสิกส์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

1.3 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

สารเคมีทั้งหมดเป็นประเภทสำหรับงานวิเคราะห์ทางเคมี (AR grade) ประกอบด้วย

- แคดเมียม(II) ไนเตรต เตตระไฮเดรต ($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) จากบริษัท Carlo Erba
- คอปเปอร์(II) ไนเตรต ไตรไฮเดรต ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) จากบริษัท Carlo Erba
- โคบอลต์(II) ไนเตรต เฮกซะไฮเดรต ($\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) จากบริษัท Carlo Erba
- โครเมียม(III) ไนเตรต นานาไฮเดรต ($\text{Cr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) จากบริษัท Ajax

Finechem

- นิกเกิล(II) ไนเตรต เฮกซะไฮเดรต ($\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) จากบริษัท Ajax Finechem
- เลด(II) ไนเตรต ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$) จากบริษัท Carlo Erba

- ไอร์ออน(III) ไนเตรต นานไฮเดรต ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) จากบริษัท Ajax Finechem
- กรดอะซิติกเข้มข้น (CH_3COOH) จากบริษัท Merck
- โซเดียมอะซิเตต (CH_3COONa) จากบริษัท Ajax Finechem
- ไดคลอโรมีเทน (CH_2Cl_2) จากบริษัท RCI Labscan
- เมทานอล (CH_3OH) จากบริษัท RCI Labscan
- ไดเมทิล ซัลฟอกไซด์ - d_6 ($\text{DMSO}-d_6$) จากบริษัท Cambridge Isotope Laboratories

1.4 ผลิตภัณฑ์ตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์

ตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ น้ำเสียจากกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม ยานยนต์

1.5 สารละลายที่ใช้ในงานวิจัย

1.5.1 สารละลายรีเอเจนท์จากสารสกัดข้าวลิ้มผิวเข้มข้น 320 มิลลิกรัมต่อลิตร

ซึ่งสารสกัดข้าวลิ้มผิวที่ได้จากกระบวนการสกัดปริมาณ 1.60 มิลลิกรัม ละลายในตัวทำละลายเมทานอล 5.0 มิลลิลิตร และเก็บที่อุณหภูมิ 0-2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนนำไปใช้

1.5.2 สารละลายมาตรฐานคอปเปอร์(II) ไอออนเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

ซึ่งสารประกอบคอปเปอร์(II) ไนเตรต ไตรไฮเดรต 0.385 กรัม ละลายและปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จนครบ 100.0 มิลลิลิตร ด้วยขวดปรับปริมาตร และนำไปเจือจางจนได้ความเข้มข้น 5.0-50.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

1.5.3 สารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.10 โมลาร์ (pH 6)

ผสมสารละลายโซเดียมอะซิเตตเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ปริมาตร 235.0 มิลลิลิตร กับสารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ปริมาตร 15.0 มิลลิลิตร แล้วตรวจวัดสภาพความเป็นกรดด้วยเครื่องพีเอชมิเตอร์ (pH meter) ที่ผ่านการปรับเทียบมาตรฐาน ก่อนนำสารละลายบัฟเฟอร์ไปใช้

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 การสกัดข้าวลิ้มผิวเพื่อใช้เป็นสารละลายรีเอเจนต์ธรรมชาติ และหาโครงสร้างของสารแอนโทไซยานินตัวหลัก

ในงานวิจัยนี้ได้นำเทคนิคการสกัดโดยใช้เครื่องอัลตราโซนิก และเทคนิคการสกัดแบบของเหลวด้วยของเหลวซึ่งเคยมีรายงานมาก่อนหน้านี้ (Ukwueze et al., 2009; Warangkhan et al., 2014) มาดัดแปลงโดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1.1 นำข้าวลิ้มผิวจากกรรมกรข้าว จังหวัดเพชรบูรณ์ น้ำหนัก 1.00 กิโลกรัม มาขัดด้วยเครื่องขัดข้าวโฮมเมท (HOMEMATE) ในโหมด milled rice with embryo เพื่อให้ได้เยื่อหุ้มเมล็ด และใส่ลงในบีกเกอร์

2.1.2 เตรียมสารละลายผสมระหว่างเมทานอลและกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2.0 โมลาร์ ในอัตราส่วนร้อยละ 85 ต่อ 15 (ปริมาตรต่อปริมาตร) ปริมาตร 600.0 มิลลิลิตร

2.1.3 เติมสารละลายผสมจากข้อ 2.1.2 ลงในบีกเกอร์ที่มีเยื่อหุ้มเมล็ด (ข้อ 2.1.1) จากนั้นนำบีกเกอร์มาแช่ในอ่างน้ำแข็ง แล้วนำไปสกัดเย็นด้วยเครื่องอัลตราโซนิกที่ความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

2.1.4 นำมากรองด้วยกระดาษกรอง Whatman No.1 จากนั้นนำสารสกัดที่ได้ไประเหยด้วยเครื่องระเหยแบบหมุนเหวี่ยงที่อุณหภูมิ 35-38 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อระเหยเมทานอลออก

2.1.5 ทำการสกัดต่อ โดยใช้ไดคลอโรมีเทนปริมาตร 15.0 มิลลิลิตร เป็นตัวทำละลายในการสกัด เพื่อกำจัดสารรบกวนประเภทไม่มีขั้ว และทำการสกัดซ้ำอีก 2 ครั้ง

2.1.6 นำส่วนของสารละลายทั้งหมดเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นปริมาตร 20.0 มิลลิลิตร ก่อนนำไปรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

2.1.7 ทำการตกตะกอนโดยตั้งสารสกัดทิ้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปกรองด้วยเครื่องสุญญากาศ และทำให้แห้ง

2.1.8 เก็บตะกอนในขวดสีชาที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส จนกว่าจะนำไปใช้งาน

2.1.9 นำไปหาโครงสร้างของสารแอนโทไซยานินตัวหลัก โดยแบ่งสารสกัดที่จากข้อ 2.1.5 มา 100.0 มิลลิกรัม

2.1.10 นำมาแยกด้วย Sephadex LH20 โดยใช้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 0.1 ในตัวทำละลายเมทานอลเป็นตัวชะ

2.1.11 นำสารหลักสีแดงที่แยกได้ไปวิเคราะห์โครงสร้าง ^1H ด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (^1H NMR) และใช้ DMSO- d_6 เป็นตัวทำละลาย

2.2 การศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้สารสกัดข้าวลิ้มผัวเป็นรีเอเจนต์ในการตรวจวัดคอปเปอร์(II) ไอออน

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาความสามารถในการเลือกจับของสารละลายรีเอเจนต์จากสารสกัดข้าวลิ้มผัวกับสารละลายโลหะชนิดต่าง ๆ โดยพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงสีและค่าการดูดกลืนแสงของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสารละลายรีเอเจนต์กับสารละลายโลหะที่สภาวะ pH ต่าง ๆ โดยขั้นตอนการศึกษามีดังนี้

2.2.1 ปิเปตสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.10 โมลาร์ (pH 3, 7-8) และสารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.10 โมลาร์ (pH 4-6) ใส่ลงในภาดหลุมแต่ละหลุม ๆ ละ 1.00 มิลลิลิตร

2.2.2 ปิเปตสารละลายไอออนของโลหะแต่ละชนิดได้แก่ Cu(II), Co(II), Cd(II), Cr(II), Fe(III), Ni(II) และ Pb(II) ความเข้มข้น 10.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 ไมโครลิตร ลงในภาดหลุมข้างต้น

2.2.3 ปิเปตสารละลายรีเอเจนต์จากสารสกัดข้าวลิ้มผัวความเข้มข้น 320 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 ไมโครลิตร ลงในภาดหลุม และผสมให้เข้ากัน

2.2.4 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นของแต่ละโลหะที่ pH ต่าง ๆ

2.2.5 ทำการทดลองข้อ 2.2.1-2.2.3 ซ้ำ เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงของสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นโดยใช้เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ในช่วงความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตร

2.3 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์คอปเปอร์(II) ไอออน โดยใช้ตัวตรวจวัดชนิดฟิอิดีตี ร่วมกับรีเอเจนต์จากสารสกัดข้าวลิ้มผัว

2.3.1 ศึกษาความเข้มข้นของสารละลายรีเอเจนต์

2.3.1.1 เตรียมสารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.10 โมลาร์ (pH 6.0) และปิเปตลงในหลอดทดลอง ปริมาตร 1.00 มิลลิลิตร

2.3.1.2 ปิเปตสารละลายคอปเปอร์ (II) ไอออน ความเข้มข้น 10.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 ไมโครลิตร ลงในหลอดทดลอง

2.3.1.3 ปิเปตสารละลายรีเอเจนต์ที่เตรียมได้ในช่วงความเข้มข้น 160-800 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 ไมโครลิตร ลงในหลอดทดลอง

2.3.1.4 นำมาวัดค่าความต่างศักย์ด้วยตัวตรวจวัดชนิดพีอีดีดี เปรียบเทียบค่าความต่างศักย์ในแต่ละความเข้มข้นของสารละลายรีเอเจนท์ที่ทำการศึกษา เพื่อหาความเข้มข้นของสารละลายรีเอเจนท์ที่เหมาะสม

2.3.2 ศึกษาเวลาที่ใช้ในการตรวจวัด

2.3.2.1 เตรียมสารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.10 โมลาร์ (pH 6.0) และปิเปตลงในหลอดทดลอง ปริมาตร 1.00 มิลลิลิตร

2.3.2.2 ปิเปตสารละลายคอปเปอร์(II) ไอออน ความเข้มข้น 10.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100.0 ไมโครลิตร ลงในหลอดทดลอง

2.3.2.3 ปิเปตสารละลายรีเอเจนท์เข้มข้น 320 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้ปริมาตร 100.0 ไมโครลิตร ลงในหลอดทดลอง เริ่มจับเวลา

2.3.2.4 ตรวจวัดค่าความต่างศักย์ด้วยตัวตรวจวัดชนิดพีอีดีดีในช่วงเวลา 1-25 นาที เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของสัญญาณการตรวจวัดที่เวลาต่าง ๆ

2.3.3 ศึกษาความเสถียรของสารละลายรีเอเจนท์

2.3.2.1 เตรียมสารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.10 โมลาร์ (pH 6.0) และปิเปตลงในหลอดทดลอง ปริมาตร 1.00 มิลลิลิตร

2.3.2.2 ปิเปตน้ำปราศจากไอออน ปริมาตร 100.0 ไมโครลิตร ลงในหลอดทดลอง

2.3.2.3 ปิเปตสารละลายรีเอเจนท์เข้มข้น 320 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้ปริมาตร 100.0 ไมโครลิตร ลงในหลอดทดลอง

2.3.2.4 ตรวจวัดค่าความต่างศักย์ด้วยตัวตรวจวัดชนิดพีอีดีดี เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของสัญญาณการตรวจวัดที่วันต่าง ๆ เมื่อใช้สารละลายรีเอเจนท์ขวดเดียวกันที่เตรียมเก็บไว้ในช่วง 1-15 วัน

2.4 การศึกษาประสิทธิภาพของวิธีการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้น

2.4.1 ช่วงความเป็นเส้นตรง

นำสารละลายมาตรฐานคอปเปอร์(II) ไอออน ในช่วงความเข้มข้น 5.0-50.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100.0 ไมโครลิตร มาทำการวิเคราะห์โดยใช้สารละลายรีเอเจนท์สกัดจากข้าวลิ้มผั่วเข้มข้น 320.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100.0 ไมโครลิตร ในสารละลายบัฟเฟอร์อะซิเตต (pH 6) ปริมาตร 1.00 มิลลิลิตร ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด ทำการตรวจวัดที่ความยาว

คลื่น 590 นาโนเมตร ภายในระยะเวลา 2 นาที โดยใช้ตัวตรวจวัดทางแสงชนิดฟิโอดีดี ตรวจวัดซ้ำความเข้มข้นละ 3 ครั้ง แล้วสร้างกราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานคอปเปอร์(II) ไฮดรอกไซด์

2.4.2 ค่าขีดจำกัดต่ำสุดที่ตรวจวัดได้ (LOD) และค่าขีดจำกัดต่ำสุดที่วิเคราะห์ได้ (LOQ)

ในงานวิจัยนี้คำนวณหาค่าขีดจำกัดต่ำสุดที่ตรวจวัดได้ และค่าขีดจำกัดต่ำสุดที่วิเคราะห์ได้ จากกราฟมาตรฐาน (Alankar & Vipin B., 2011) โดยใช้สูตรดังสมการ (1)

$$\begin{aligned} \text{LOD} &= y_{\text{Intercept}} + 3\text{SD}_{\text{Intercept}} \\ \text{LOQ} &= y_{\text{Intercept}} + 10\text{SD}_{\text{Intercept}} \end{aligned} \quad (1)$$

เมื่อ $y_{\text{Intercept}}$ คือ สัญญาณที่อ่านได้บนแกน y เมื่อ $x=0$
 $\text{SD}_{\text{Intercept}}$ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ $y_{\text{Intercept}}$

2.4.3 ความเที่ยงของวิธีวิเคราะห์

2.4.3.1 ความเที่ยงภายในวันเดียวกัน (intraday precision)

นำสารละลายมาตรฐานคอปเปอร์(II) ไฮดรอกไซด์ ที่ 2 ระดับความเข้มข้น คือ 10 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร มาทำการวิเคราะห์ร่วมกับตัวตรวจวัดทางแสงชนิดฟิโอดีดี โดยใช้สภาวะการทดลองเช่นเดียวกับการหาช่วงความเป็นเส้นตรง ทำการตรวจวัดซ้ำความเข้มข้นละ 5 ครั้ง คำนวณค่าร้อยละความเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (relative standard deviation; %RSD) ของสัญญาณที่ตรวจวัดได้ของสารละลายมาตรฐานคอปเปอร์(II) ไฮดรอกไซด์ ในแต่ละความเข้มข้นที่ศึกษา

2.4.3.2 ความเที่ยงระหว่างวัน (interday precision)

นำสารละลายมาตรฐานคอปเปอร์(II) ไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 2 ระดับ คือ 10 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร มาทำการวิเคราะห์ร่วมกับตัวตรวจวัดทางแสงชนิดฟิโอดีดี โดยใช้สภาวะการทดลองเช่นเดียวกับการหาช่วงความเป็นเส้นตรง ทำการตรวจวัดซ้ำเป็นระยะเวลา 5 วัน ต่อเนื่องกัน คำนวณค่าร้อยละความเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ของสัญญาณที่ตรวจวัดได้ของสารละลายมาตรฐานคอปเปอร์(II) ไฮดรอกไซด์ ในแต่ละความเข้มข้นที่ศึกษาภายในระยะเวลา 5 วัน

2.4.4 ร้อยละของการคืนกลับ (%recovery)

สำหรับการศึกษาค่าร้อยละการคืนกลับในตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมยานยนต์ทำการวิเคราะห์โดยใช้วิธีที่พัฒนาขึ้น โดยเติมสารละลายมาตรฐานคอปเปอร์(II) ไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงในตัวอย่างน้ำเสียแต่ละตัวอย่าง จากนั้นนำมาทำการวิเคราะห์ร่วมกับตัวตรวจวัดทางแสงชนิดฟิอิดีดี โดยใช้สภาวะการทดลองเช่นเดียวกับการหาช่วงความเป็นเส้นตรง ทำการตรวจวิเคราะห์ซ้ำ 3 ครั้ง คำนวณค่าร้อยละการคืนกลับในแต่ละตัวอย่าง

2.5 การวิเคราะห์ปริมาณคอปเปอร์(II) ไฮดรอกไซด์ ในตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมและเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี

ในงานวิจัยนี้ใช้ตัวอย่างน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมยานยนต์ก่อนเข้าสู่กระบวนการบำบัดจำนวน 5 ตัวอย่าง ได้แก่ S1 S2 S3 S4 และ S5 ซึ่งมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

2.5.1 นำตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการกรองปริมาตร 100 ไมโครลิตร ไปวิเคราะห์โดยใช้วิธีวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้น

2.5.2 ทำการวิเคราะห์ซ้ำตัวอย่างละ 3 ครั้ง เพื่อวิเคราะห์ปริมาณคอปเปอร์ (II) ไฮดรอกไซด์ในแต่ละตัวอย่างจากกราฟมาตรฐาน

2.5.3 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้จากวิธีวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นกับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี โดยใช้ paired t-test

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาและพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ที่ใช้ตัวตรวจวัดทางแสงอย่างง่ายและขนาดเล็กชนิดฟิโอดีดีร่วมกับการใช้รีเอเจนต์ธรรมชาติที่สกัดจากข้าวลิ้มผัวสำหรับนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณคอปเปอร์(II) ไอออนในตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยผู้วิจัยขอเสนอผลการวิจัยดังหัวข้อต่อไปนี้

ตอนที่ 1 การสกัดข้าวลิ้มผัวเพื่อใช้เป็นสารละลายรีเอเจนต์ธรรมชาติและการวิเคราะห์โครงสร้างที่เป็นไปได้

ตอนที่ 2 การศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้สารสกัดข้าวลิ้มผัวเป็นรีเอเจนต์ในการตรวจวัดคอปเปอร์(II) ไอออน

ตอนที่ 3 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์คอปเปอร์(II) ไอออน โดยใช้ตัวตรวจวัดชนิดฟิโอดีดี ร่วมกับรีเอเจนต์จากสารสกัดข้าวลิ้มผัว

ตอนที่ 4 การศึกษาประสิทธิภาพของวิธีการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้น

ตอนที่ 5 การวิเคราะห์ปริมาณคอปเปอร์(II) ไอออน ในตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมและเปรียบเทียบกับวิธีการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี

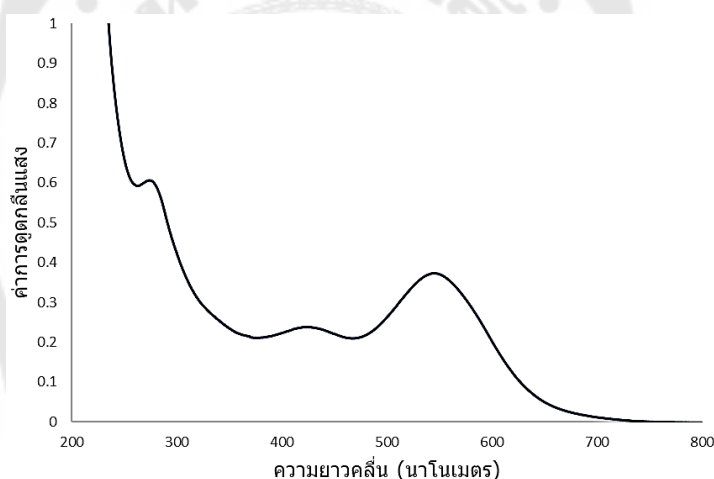
ตอนที่ 1 การสกัดข้าวลิ้มผัวเพื่อใช้เป็นสารละลายรีเอเจนต์ธรรมชาติและการวิเคราะห์โครงสร้างที่เป็นไปได้

งานวิจัยนี้ได้ใช้สารสกัดจากข้าวลิ้มผัวซึ่งเป็นข้าวพันธุ์พื้นเมือง จากจังหวัดเพชรบูรณ์ สำหรับเป็นรีเอเจนต์ในการวิเคราะห์คอปเปอร์(II) ไอออน โดยนำเทคนิคการสกัดด้วยเครื่องอัลตราโซนิก และเทคนิคการสกัดแบบของเหลวด้วยของเหลวมาใช้ร่วมกัน ซึ่งเทคนิคการสกัดทั้ง 2 เทคนิคเป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมเนื่องจากเป็นเทคนิคที่ง่ายและรวดเร็ว (Ukwueze et al., 2009; Warangkhan et al., 2014) ผลการสกัดเมื่อใช้เทคนิคการสกัดจากเครื่องอัลตราโซนิกด้วยตัวทำละลายผสมระหว่างเมทานอลต่อกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2.0 โมลาร์ พบว่าปริมาณสารสกัดที่ได้มีน้ำหนักเท่ากับ 2.52 กรัมต่อ 100.0 กรัม ของเยื่อหุ้มเมล็ดที่ใช้ เมื่อนำสารสกัดที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตร ผลการทดลองแสดงดังภาพประกอบ 6 พบว่าความยาวคลื่นให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด ($\lambda_{\max}$) 3 ค่า คือ 274.4, 423.2 และ 545.0 นาโนเมตร (ภาพประกอบ 6 ก.) ซึ่งเป็นค่า $\lambda_{\max}$ ของฟลาโวนอยด์และสารประกอบฟีนอลของแอนโทไซ

ยานิน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Warangkhan et al., 2014) โดยสีสารละลายของสารสกัดจากข้าวลิ้มผัวในตัวทำละลายเมทานอลเป็นสีแดงอมม่วง (Magenta) ดังภาพประกอบ 6 ข.

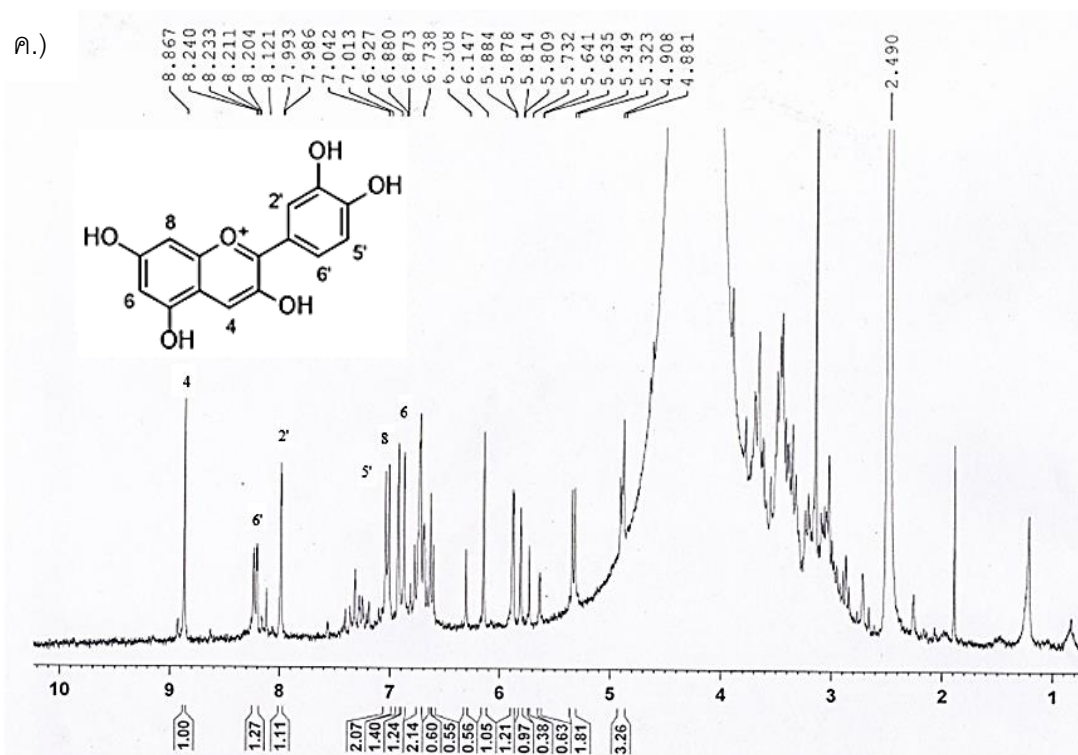
สารหลักสีแดงส่วนที่ได้จากสารสกัดข้าวลิ้มผัวที่ผ่านการแยกด้วย sephadex LH20 เมื่อนำไปศึกษาหาโครงสร้าง ^1H ด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี พบสัญญาณที่เคมีคัล ชิฟท์ (δ) 8.87 (s), 8.22 (dd, $J = 8.7, 2.2$ Hz), 7.99 (d, $J = 2.2$ Hz), 7.03 (d, $J = 8.8$ Hz), 6.93 (brs) และ 6.88 (d, $J = 2.1$ Hz) เป็นสัญญาณของโปรตอน 4, 6', 2', 5', 8 และ 6 ตามลำดับ ซึ่งลักษณะรูปแบบของสเปกตรัมมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากงานวิจัยของ Warangkhan และคณะ (Warangkhan et al., 2014) ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า สารสกัดจากข้าวลิ้มผัวมีไซยานิดินเป็นองค์ประกอบหลัก โครงสร้างของไซยานิดิน ดังแสดงในภาพประกอบ 6 ค.

ก.)



ข.)





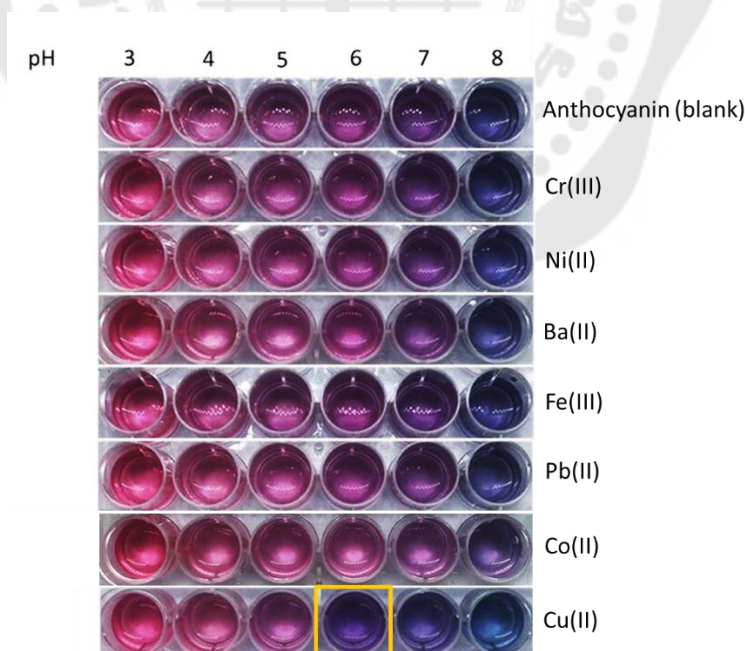
ภาพประกอบ 6 แสดง ก.) สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายรีเอเจนท์ที่สกัดจากข้าวลิ้มผั่ว ในตัวทำละลายเมทานอล ข.) สีของสารสกัดจากข้าวลิ้มผั่วในตัวทำละลายเมทานอล ค.) ^1H NMR สเปกตรัมของสารไซยานิดินในสารสกัดจากข้าวลิ้มผั่ว

ตอนที่ 2 การศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้สารสกัดข้าวลิ้มผั่วเป็นรีเอเจนท์ในการตรวจวัดคอปเปอร์(II) ไอออน

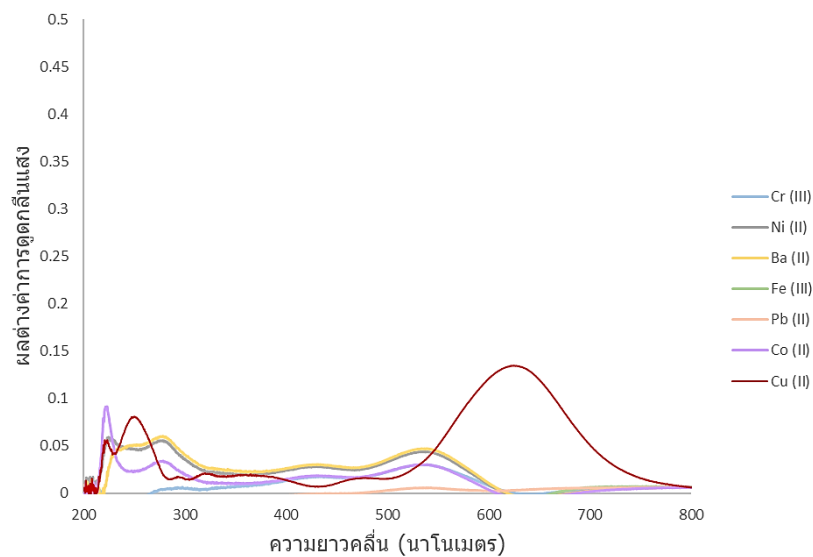
จากการศึกษาความสามารถในการเลือกจับของสารละลายรีเอเจนท์จากสารสกัดข้าวลิ้มผั่วกับสารละลายไอออนของโลหะชนิดต่าง ๆ ได้แก่ คอปเปอร์(II) ไอออน โคบอลต์(II) ไอออน โครเมียม(III) ไอออน เหล็ก(III) ไอออน นิกเกิล(II) ไอออน ตะกั่ว(II) ไอออน และแบเรียม(II) ไอออน ที่สภาวะ pH 3.0-8.0 โดยพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายและสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารประกอบเชิงซ้อน (ภาพประกอบ 7) ผลการทดลองพบว่าสารละลายรีเอเจนท์จากสารสกัดข้าวลิ้มผั่วมีสีชมพูในช่วง pH 3.0-6.0 เปลี่ยนเป็นสีม่วงและสีน้ำเงินที่ pH 7.0 และ 8.0 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากสารละลายสกัดจากข้าวลิ้มผั่วมีแอนโทไซยานินเป็นองค์ประกอบหลัก เมื่ออยู่สภาวะ pH แตกต่างกันจะส่งผลให้โครงสร้างของแอนโทไซยานินมีการเปลี่ยนแปลงได้ 4 รูปแบบ คือ flavylum cation, carbinol, chalcone และ quinonoidol ดังภาพประกอบ 8 กล่าวคือ ในช่วง pH ที่เป็นกรด ($\text{pH} \leq 3$) โครงสร้างแอนโทไซยานินจะอยู่ในรูปของ flavylum

cation (AH^+) ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักที่แสดงสีชมพู เมื่อ pH มีค่าสูงขึ้น (pH 4-6) แอนโทไซยานินจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้เปลี่ยนเป็น carbinol (B) และ chalcone (C) ซึ่งไม่ทำให้สารละลายมีความเข้มสีลดลง แต่เมื่อ pH มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงที่เป็นกลาง และเป็นเบส (pH 6-8) แอนโทไซยานินจะเป็นสีม่วงและสีน้ำเงินตามลำดับ เนื่องจากแอนโทไซยานินจะมีโครงสร้างแบบ blue quinoidal (A) ซึ่งมีสีน้ำเงิน (อรุษา เชาวณลิขิต, 2554) เมื่อเติมสารละลายไอออนของโลหะแต่ละชนิดลงไปจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าที่ pH 6.0 สารละลายรีเอเจนต์จากสารสกัดข้าวลิ้มฝั้วสามารถเกิดอันตรกิริยากับคอปเปอร์(II) ไอออน และมีการเปลี่ยนสีของสารละลายจากสีชมพูอ่อนเป็นสีม่วงแกมน้ำเงินอย่างชัดเจน ดังภาพประกอบ 7 ก. เมื่อนำสารละลายที่ pH 6.0 ไปตรวจวัดด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (ภาพประกอบ 7 ข.) พบว่า λ_{max} ของสารละลายรีเอเจนต์มีการเปลี่ยนแปลง แต่เมื่อเติมคอปเปอร์(II) ไอออน ลงไปทำให้เกิด bathochromic shift ค่า λ_{max} มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 546.6 นาโนเมตรเป็น 624.8 นาโนเมตร และมีการดูดกลืนแสงสูงสุดเมื่อเทียบกับไอออนของโลหะชนิดอื่นๆ ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไอออนของโลหะกับหมู่ ortho-dihydroxyl ที่ตำแหน่งวงแหวน B ของโครงสร้างแอนโทไซยานิน สำหรับโครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นแสดงดังภาพประกอบ 9 (Warangkhan et al., 2014)

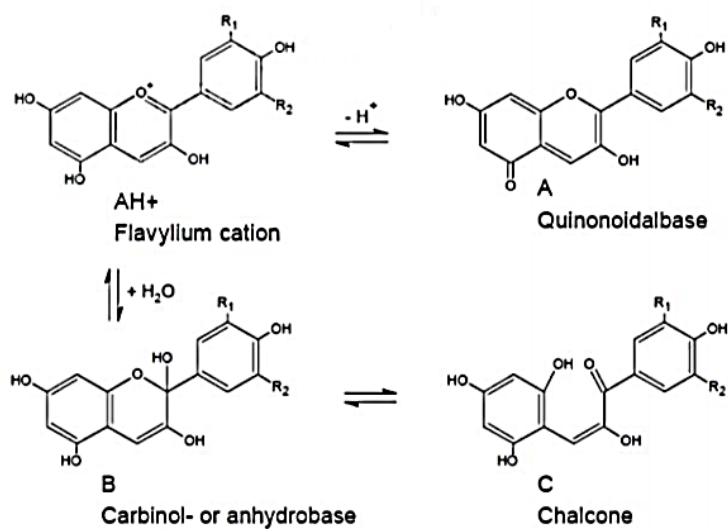
ก.)



๗.)

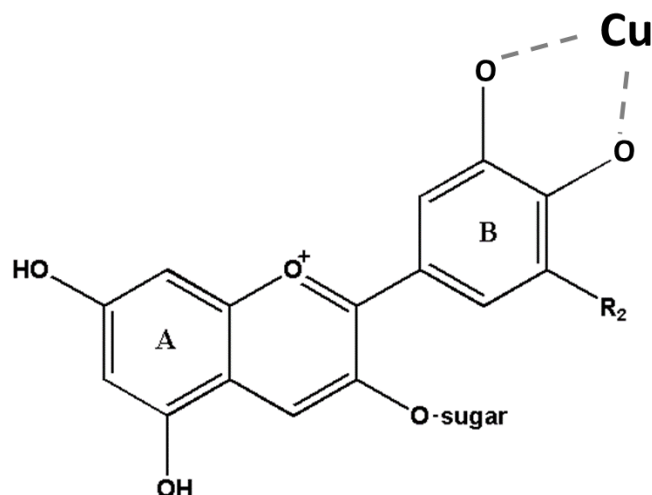


ภาพประกอบ 7 ก.) แสดงสีของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสารสกัดข้าวลิ้มผัวกับสารละลายโลหะชนิดต่าง ๆ ที่ pH 3.0-8.0 ข.) แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสารสกัดข้าวลิ้มผัวกับสารละลายโลหะชนิดต่าง ๆ ที่ pH



ภาพประกอบ 8 แสดงโครงสร้างแอนโทไซยานินที่ pH ต่าง ๆ

ที่มา: อรุษา, (2554). การสกัดและวิธีการวิเคราะห์แอนโทไซยานิน. วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี), 3(6), 26-36.

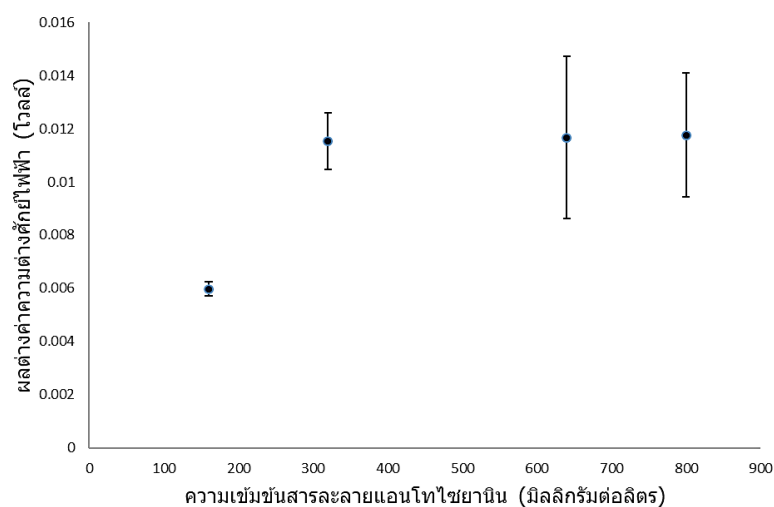


ภาพประกอบ 9 โครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างรีเอเจนต์จากสารสกัดข้าวลิ้มผัวกับ
คอปเปอร์(II) ไอออน

ตอนที่ 3 การศึกษาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์คอปเปอร์(II) ไอออน โดยใช้ตัว
ตรวจวัดชนิดฟิอิดิตี ร่วมกับรีเอเจนต์จากสารสกัดข้าวลิ้มผัว

3.1 ความเข้มข้นของสารละลายรีเอเจนต์

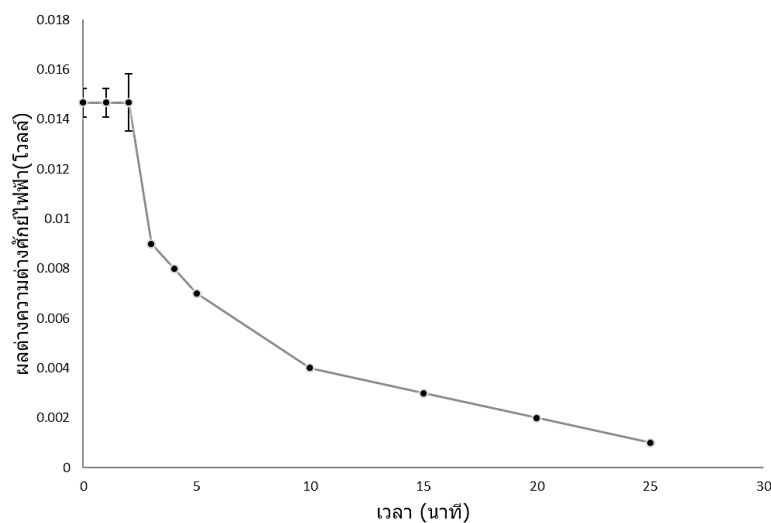
จากการศึกษาค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายรีเอเจนต์จากสารสกัดข้าว
ลิ้มผัวในช่วงความเข้มข้น 160-800 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองแสดงดังภาพประกอบ 10
พบว่าสัญญาณที่ตรวจวัดได้มีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายรีเอเจนต์ และสัญญาณ
เริ่มมีค่าคงที่ที่ความเข้มข้นของสารละลายรีเอเจนต์เท่ากับ 320 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นต้นไป แสดง
ให้เห็นว่าที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายรีเอเจนต์เท่ากับ 320 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นความ
เข้มข้นที่เพียงพอต่อการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับสารละลายคอปเปอร์(II) ไอออน และเมื่อใช้
ความเข้มข้นของสารละลายแอนโทไซยานินมากกว่า 320 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าเกิดตะกอนของ
แอนโทไซยานิน ส่งผลให้สัญญาณความต่างศักย์ที่ตรวจวัดเกิดความคลาดเคลื่อนสูง ดังนั้นใน
งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สารละลายรีเอเจนต์เข้มข้น 320 มิลลิกรัมต่อลิตรในการวิเคราะห์



ภาพประกอบ 10 แสดงผลต่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้ของสารประกอบเชิงซ้อนคอปเปอร์(II) ไอออน เมื่อใช้สารละลายรีเอเจนท์ในช่วงความเข้มข้น 160-800 มิลลิกรัมต่อลิตร ($n=5$)

3.2 เวลาที่ใช้ในการตรวจวัด

จากการศึกษาผลของเวลาในการตรวจวัดที่มีต่อสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดอย่างง่ายชนิดพีอีดีดี โดยทำการศึกษาในช่วงเวลาตรวจวัด 1-25 นาที หลังจากเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างคอปเปอร์(II) ไอออน กับสารละลายรีเอเจนท์จากสารสกัดข้าวลิ้มผั่ว ผลการทดลองพบว่าการตรวจวัดต้องทำภายในระยะเวลา 2 นาที ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ให้ค่าสัญญาณสูงสุดและคงที่ แต่เมื่อเวลาผ่านไปมากขึ้นสัญญาณการตรวจวัดมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว (ภาพประกอบ 11) ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยก่อนหน้านี้ (Warangkhan et al., 2014) ที่กล่าวว่าสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างคอปเปอร์(II) ไอออน กับแอนโทไซยานินในตัวทำละลายผสมระหว่างเมทานอลและน้ำ ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันของคอปเปอร์(II) ไอออน เป็นคอปเปอร์(I) ไอออน และเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของแอนโทไซยานิน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงส่งผลให้เกิด bathochromic shift สามารถเกิดขึ้นภายในช่วงระยะเวลานั้น ๆ และค่าการดูดกลืนแสงมีค่าลดลง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกทำการตรวจวิเคราะห์ปริมาณคอปเปอร์(II) ไอออนภายในเวลา 2 นาที

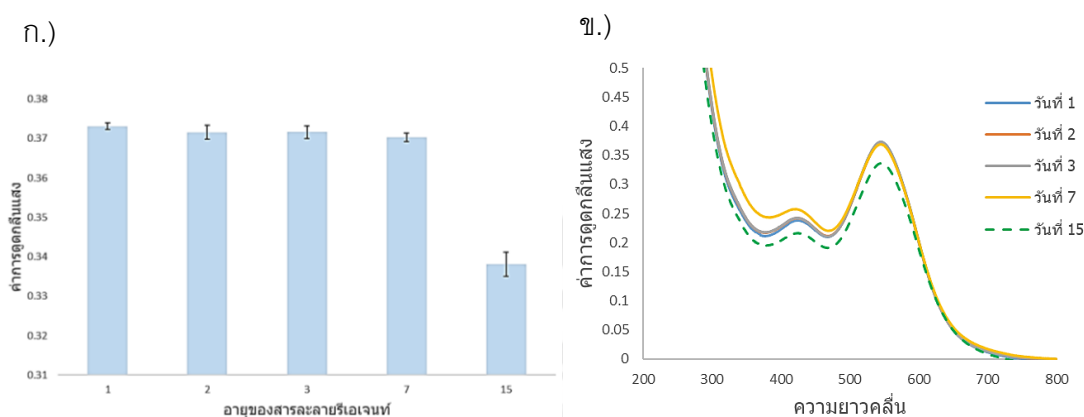


ภาพประกอบ 11 แสดงผลต่างค่าความต่างสีกฟลูออเรสเซนซ์ที่ตรวจวัดได้ของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสารละลายรีเอเจนท์จากสารสกัดข้าวลิ้มผัวกับสารละลายคอปเปอร์(II) ไอออนที่เวลาต่าง ๆ (n=5)

3.3 ศึกษาความเสถียรของสารละลายรีเอเจนท์

เมื่อสารสกัดจากข้าวลิ้มผัวที่เตรียมในตัวอย่างละลายเมทานอลในช่วงวันที่ 1-15 มาทำการตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตร เพื่อศึกษาความเสถียรของรีเอเจนท์ที่มีผลต่อสัญญาณการตรวจวัด ผลการทดลองพบว่า สารละลายรีเอเจนท์ที่เตรียมได้สามารถเก็บไว้ได้นาน 7 วัน ที่อุณหภูมิ 0-2 องศาเซลเซียส โดยยังให้สัญญาณการตรวจวัดคงที่ แต่หลังจาก 7 วัน พบว่าสารละลายรีเอเจนท์ให้สัญญาณค่าการดูดกลืนแสงลดลง ดังภาพประกอบ 12 เนื่องจากความไม่เสถียรของแอนโทไซยานินซึ่งถูกควบคุมโดยหลายปัจจัย ได้แก่ pH อุณหภูมิ และแสง จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ (ยุพาพร ผลาจรศักดิ์, 2547) พบว่าในสารละลายกรด (pH 1.0) แอนโทไซยานินจะมีความคงตัวสูงแม้ว่าจะได้รับผลกระทบจากปัจจัยอื่นอย่างเช่น แสงและอุณหภูมิ แต่เมื่อ pH สูงขึ้น (pH 4.0 ขึ้นไป) จะมีความคงตัวต่ำแม้จะอยู่ในสภาวะอุณหภูมิต่ำและไม่มีแสงก็ตาม แสดงให้เห็นว่า pH มีผลต่อความคงตัวของโครงสร้างของแอนโทไซยานินมากกว่าอุณหภูมิและแสง เมื่อเปรียบเทียบในสภาวะอุณหภูมิแตกต่างกัน พบว่าโครงสร้างของแอนโทไซยานินจะเกิดการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิสูง (30 องศาเซลเซียส) ได้มากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ (4 องศาเซลเซียส) เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิด chalcone มากขึ้น และปริมาณ flavylum ลดลง ทำให้สีแดงของสารละลายแอนโทไซยานินมีความเข้มลดลง นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง

ของแอนโทไซยานินยังขึ้นกับแสง เนื่องจากแสงจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา photo-oxidation ทำให้ carbinol base เปลี่ยนเป็น chalcone ได้เร็วขึ้น ในงานวิจัยนี้จึงเก็บสารสกัดจากข้าวลิ้มฝัวที่เตรียมได้ไว้ในขวดสีชาที่อุณหภูมิ 0-2 องศาเซลเซียส และควรเตรียมใหม่ทุกสัปดาห์

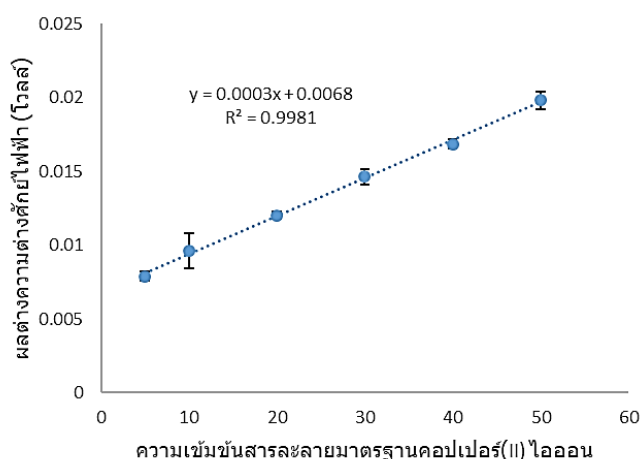


ภาพประกอบ 12 ก.) แสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ตรวจวัดได้ และ ข.) แสดงสเปกตรัมของสารละลายรีเอเจนท์ที่เตรียมในช่วง 1-15 วัน

ตอนที่ 4 การศึกษาประสิทธิภาพของวิธีการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้น

4.1 ช่วงความเป็นเส้นตรง

จากการศึกษาช่วงความเป็นเส้นตรงของการวิเคราะห์สารละลายคอปเปอร์(II) ไฮดรอกไซด์ด้วยสารละลายรีเอเจนท์ธรรมชาติสกัดจากข้าวลิ้มฝัวร่วมกับอุปกรณ์ตรวจวัดทางแสงชนิดฟิโอดีดีภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ผลการทดลองแสดงดังภาพประกอบ 13 พบว่า วิธีการวิเคราะห์นี้ให้ความเป็นเส้นตรงในช่วงความเข้มข้นของคอปเปอร์(II) ไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 5.70-50.0 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9981 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์การยอมรับโดยทั่วไป (R^2 มากกว่า 0.995)



ภาพประกอบ 13 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานคอปเปอร์(II) ไอออน และผลต่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้

4.2 ค่าขีดจำกัดต่ำสุดที่ตรวจวัดได้ และค่าขีดจำกัดต่ำสุดที่วิเคราะห์ได้

ในงานวิจัยนี้คำนวณหาขีดจำกัดต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้ (LOD) และค่าขีดจำกัดต่ำสุดที่วิเคราะห์ได้ (LOQ) โดยใช้ $3(S_y/S)$ และ $10(S_y/S)$ ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าวิธีวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นมีความไวที่ดี โดยมีความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้เท่ากับ 1.71 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในภาพประกอบ 14 จะเห็นได้ว่าที่ระดับค่า LOD ของวิธีวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นสามารถมองเห็นการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายได้เมื่อเทียบกับสารละลายรีเอเจนท์ สารสกัดจากข้าวลิ้มผิวและความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถวิเคราะห์ได้เท่ากับ 5.71 มิลลิกรัมต่อลิตร



ภาพประกอบ 14 แสดงสีของสารละลายคอปเปอร์(II) ไอออน ที่ความเข้มข้น 1.71 มิลลิกรัมต่อลิตร (n=8)

4.3 ความเที่ยงของวิธีวิเคราะห์

จากการศึกษาความเที่ยงของวิธีวิเคราะห์ทั้งความเที่ยงภายในวันเดียวกัน ซึ่งทำการวิเคราะห์ซ้ำจำนวน 5 ครั้ง และความเที่ยงระหว่างวัน ซึ่งทำการวิเคราะห์ซ้ำเป็นระยะเวลา 5 วัน ต่อเนื่องกัน โดยทำการวิเคราะห์กับสารละลายมาตรฐานคอปเปอร์(II) ไอออน ที่ความเข้มข้น 2 ระดับ คือ ความเข้มข้น 10 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมที่สุด ผลการทดลองที่ได้แสดงดังตาราง 3 ซึ่งรายงานเป็นค่าร้อยละความเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) ของสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้ พบว่าวิธีที่พัฒนาขึ้นมีความเที่ยงที่ดี โดยมีค่า %RSD ของการวิเคราะห์คอปเปอร์(II) ไอออน ภายในวันเดียวกันอยู่ในช่วง 1.35-2.18 และระหว่างวันอยู่ในช่วง 2.29-2.61 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสารสกัดจากข้าวลิ้มผิวมีความสามารถในการนำมาใช้เป็นรีเอเจนท์จากธรรมชาติสำหรับการตรวจวัดปริมาณคอปเปอร์(II) ไอออนร่วมกับอุปกรณ์ตรวจวัดชนิดพีอีดีดีที่ประดิษฐ์ขึ้นเองได้เป็นอย่างดี

ตาราง 3 ผลการศึกษาความเที่ยงของวิธีวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้น สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณคอปเปอร์(II) ไอออน

ความเข้มข้น คอปเปอร์(II) ไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละความเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ของสัญญาณที่ตรวจวัดได้	
	ในวันเดียวกัน (n=5)	ระหว่างวัน (n=5)
10.0	2.18	2.61
30.0	1.35	2.29

4.4 ร้อยละของการคืนกลับ (%recovery)

จากการศึกษาร้อยละของการคืนกลับในตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมยานยนต์จำนวน 5 ตัวอย่าง โดยเติมสารละลายมาตรฐานคอปเปอร์(II) ไอออน ความเข้มข้น 10.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงในตัวอย่างน้ำเสีย แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธีที่พัฒนาขึ้น พบว่ามีค่าร้อยละของการคืนกลับอยู่ในช่วง 95.37-102.27 แสดงว่าวิธีที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้วิเคราะห์คอปเปอร์(II) ไอออน ในตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมได้เป็นอย่างดี โดยแสดงผลการทดลองดังตาราง

ตาราง 4 ผลการศึกษาค่าร้อยละของการคืนกลับของการวิเคราะห์ปริมาณคอปเปอร์(II) ไอออน ในตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมยานยนต์

ตัวอย่าง	ร้อยละของการคืนกลับ (n=3)
S1	95.37
S2	96.33
S3	102.27
S4	97.67
S5	99.41

ตอนที่ 5 การวิเคราะห์ปริมาณคอปเปอร์(II) ไอออน ในตัวอย่างน้ำเสียและเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอะตอมมิคแอ็บซอร์พชันสเปกโทรสโกปี

ในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าวิธีที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปประยุกต์เพื่อวิเคราะห์ปริมาณคอปเปอร์(II) ไอออน ในตัวอย่างจริงได้ โดยนำไปใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณคอปเปอร์(II) ไอออน ในตัวอย่างน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมยานยนต์ก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสียจำนวน 5 ตัวอย่าง ผลการวิเคราะห์แสดงดังตาราง 5 ปริมาณคอปเปอร์(II) ไอออน ในตัวอย่างน้ำเสียอยู่ในช่วงความเข้มข้น 13.0-32.0 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเห็นได้ว่าตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัด จึงทำให้ยังคงมีปริมาณคอปเปอร์(II) ไอออน สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานกำหนด ค่ามาตรฐานปริมาณทองแดงในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมควรมีค่าไม่เกิน 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้กับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอะตอมมิคแอ็บซอร์พชันสเปกโทรสโกปีซึ่งเป็นเทคนิคมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับโดยทั่วไป (ตาราง 5) และเมื่อทดสอบความแตกต่างของปริมาณคอปเปอร์(II) ไอออน ที่วิเคราะห์ได้ทั้งจาก 2 วิธี โดยใช้การประเมินแบบ paired *t*-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่าได้ค่า *t*-stat น้อยกว่าค่า *t*-critical two-tail (*t*-stat=0.509 , *t*-critical=2.776) และมีค่า P-Value (two tail) เท่ากับ 0.637 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 จึงสามารถสรุปได้ว่าผลการวิเคราะห์จากทั้ง 2 วิธีนี้ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้รีเอเจนต์จากสารสกัดข้าวลิ้มผั่วมกับชุดตรวจวัดพีอีดีดีขนาดเล็กที่ประดิษฐ์ขึ้นเองนั้น ให้ผลการวิเคราะห์ที่มีความถูกต้อง แม่นยำ ไม่แตกต่างจากการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ขนาดใหญ่ ซึ่งนอกจากจะสามารถสร้างขึ้นได้เองแล้ว วิธีที่พัฒนาขึ้นยังสามารถ

ทำได้ง่าย สะดวก ราคาถูก มีขนาดเล็ก สามารถนำไปใช้ในภาคสนามได้ และมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

ตาราง 5 ปริมาณคอปเปอร์(II) ไอออน ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีที่พัฒนาขึ้น (PEDD) และวิธีอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี (AAS) ซึ่งใช้เป็นวิธีอ้างอิง

ตัวอย่างน้ำเสีย	ปริมาณคอปเปอร์(II) ไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร) โดยวิธี	
	PEDD	AAS
S1	13.83±1.18	14.02±0.02
S2	18.61±1.65	18.05±0.05
S3	27.67±0.94	27.95±0.03
S4	29.00±1.67	28.50±0.04
S5	31.22±0.69	31.35±0.08

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาวิธีการวิเคราะห์ที่ใช้ตัวตรวจวัดทางแสงอย่างง่ายและขนาดเล็ก ชนิดฟิโอดีดีร่วมกับการใช้รีเอเจนท์ธรรมชาติที่สกัดจากข้าวลิ้มผัวสำหรับนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณคอปเปอร์(II) ไอออน ในตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารกลุ่มแอนโทไซยานินในรีเอเจนท์จากสารสกัดข้าวลิ้มผัวกับสารละลายคอปเปอร์(II) ไอออน ทำให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์สารประกอบเชิงซ้อนที่มีสีและทำการตรวจวัดสัญญาณของผลิตภัณฑ์โดยใช้ตัวตรวจวัดชนิดฟิโอดีดีขนาดเล็ก โดยสามารถสรุปผลการวิจัย อภิปรายผลการวิจัย และข้อเสนอแนะดังนี้

จากการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ที่ใช้ตัวตรวจวัดทางแสงชนิดฟิโอดีดีที่ประดิษฐ์ขึ้นเอง สำหรับการวิเคราะห์คอปเปอร์(II) ไอออน โดยมีหลอด LED ที่เป็นส่วนประกอบสำคัญทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดและตัวตรวจวัดแสงที่มีความยาวคลื่น 590 นาโนเมตร โดยค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้เป็นสัดส่วนผกผันกับความเข้มข้นของคอปเปอร์(II) ไอออน จึงทำให้ได้วิธีวิเคราะห์ที่มีราคาถูก เครื่องมือมีขนาดเล็กสามารถพกพาได้สะดวก และเมื่อนำอุปกรณ์ตรวจวัดอย่างง่ายชนิดฟิโอดีดี มาประยุกต์ใช้ร่วมกับการใช้รีเอเจนท์ธรรมชาติสกัดจากข้าวลิ้มผัวซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ธรรมชาติที่สามารถหาได้ง่าย ราคาถูก และมีปริมาณมากในประเทศไทยมาศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์คอปเปอร์(II) ไอออน ผลจากการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมพบว่าในการวิเคราะห์คอปเปอร์(II) ไอออน ในช่วงความเข้มข้น 5.0-50.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้สารละลายรีเอเจนท์สกัดจากข้าวลิ้มผัวความเข้มข้น 320.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์ pH 6.0 และทำการตรวจวิเคราะห์ด้วยตัวตรวจวัดชนิดฟิโอดีดีที่มีความยาวคลื่น 590 นาโนเมตร ภายในระยะเวลา 2 นาที โดยปริมาตรของตัวอย่างและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้เพียง 1.20 มิลลิลิตรต่อการตรวจวัดเท่านั้น สำหรับประสิทธิภาพของวิธีที่พัฒนาขึ้นนี้ให้ช่วงความเป็นเส้นตรงที่ดีในช่วงความเข้มข้น 5.70-50.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความแม่นยำของวิธีวิเคราะห์ซึ่งแสดงในรูปของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (RSD) พบว่าค่า RSD ภายในวันเดียวกันและระหว่างวันมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 2.18 และ 2.61 ตามลำดับ ค่าร้อยละของการคืนกลับของคอปเปอร์(II) ไอออน ในตัวอย่างน้ำเสียจากกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมยานยนต์จำนวน 5 ตัวอย่าง อยู่ในช่วงร้อยละ 95.37-102.27 และเมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้กับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอะตอมมิก แอ็บซอร์ปชันสเปกโทสโกปีโดยใช้การประเมินทางสถิติแบบ paired *t*-test พบว่าผลการวิเคราะห์

จากทั้งสองวิธีนี้ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าวิธีที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้งานได้จริง และให้ผลการวิเคราะห์ที่มีความถูกต้องแม่นยำ นอกจากนี้ยังให้ประสิทธิภาพของวิธีวิเคราะห์ที่สูงกว่างานวิจัยอื่น ๆ ที่นำรีเอเจนต์จากธรรมชาติมาใช้ในการวิเคราะห์คอปเปอร์(II) ไอออน โดยสรุปผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการวิเคราะห์ ดังแสดงในตาราง 6 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของวิธีวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ที่สามารถวิเคราะห์เชิงปริมาณได้อย่างถูกต้องและสามารถวิเคราะห์ในช่วงความเข้มข้นที่กว้างมากกว่างานวิจัยก่อนหน้านี้

จากความมุ่งหวังในงานวิจัยนี้ต้องการพัฒนาวิธีวิเคราะห์คอปเปอร์(II) ไอออน โดยใช้สารสกัดธรรมชาติจากข้าวลิ้มผิวเป็นรีเอเจนต์และตรวจวัดด้วยตัวตรวจวัดทางแสงชนิดฟิโอดีดี พบว่าวิธีการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพมีความถูกต้องและแม่นยำสูงไม่แตกต่างจากการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ขนาดใหญ่ อีกทั้งยังเป็นวิธีวิเคราะห์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีวิธีการวิเคราะห์ที่ไม่ยุ่งยาก เครื่องมือสามารถประดิษฐ์ขึ้นได้เองในห้องปฏิบัติการ โดยใช้วัสดุภายในประเทศสามารถลดต้นทุนการนำเข้าสารเคมีและเครื่องมือจากต่างประเทศ เครื่องมือมีขนาดเล็ก ราคาไม่แพง จึงสามารถนำไปใช้ในภาคสนามได้ด้วย นอกจากนี้ยังได้ข้อมูลเกี่ยวกับวิธีการสกัดข้าวลิ้มผิวซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นสารละลายรีเอเจนต์จากธรรมชาติอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการตรวจวัดไอออนของโลหะ และได้ข้อมูลเกี่ยวกับปริมาณคอปเปอร์(II) ไอออน ในตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมยานยนต์เพื่อใช้ในการตรวจสอบและประเมินคุณภาพของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมให้เป็นไปตามมาตรฐานกำหนดก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติได้

ตาราง 6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการวิเคราะห์ที่ได้จากงานวิจัยที่พัฒนาขึ้น และงานวิจัยที่เคยรายงานก่อนหน้านี้สำหรับการวิเคราะห์คอปเปอร์(II) ไอออน โดยใช้รีเอเจนต์จากสารสกัดธรรมชาติ

เทคนิคที่ใช้ในการตรวจวัด	รีเอเจนต์ธรรมชาติ	ช่วงความเป็นเส้นตรง (มิลลิกรัมต่อลิตร)	LOD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ชนิดของตัวอย่าง	งานวิจัยอ้างอิง
การสังเกตด้วยตาเปล่า (Naked eye)	กะหล่ำปลีสีม่วง	3.18-5.08	3.18	น้ำประปาและน้ำบาดาล	(Warangkhan et al., 2014)

ตาราง 6 (ต่อ)

เทคนิคที่ใช้ในการ ตรวจวัด	รีเอเจนท์ ธรรมชาติ	ช่วงความเป็นเส้นตรง (มิลลิกรัมต่อลิตร)	LOD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ชนิดของตัวอย่าง	งานวิจัยอ้างอิง
การสังเกตด้วยตาเปล่า	ดอกชบา	1.00-10.00	1.00	น้ำบาดาล	(Paweena et al., 2018)
PEDD	ข้าวลิ้มผัว	5.70-50.00	1.71	น้ำเสียจากโรงงาน อุตสาหกรรม	งานวิจัยนี้



บรรณานุกรม

- Alankar, S., & Vipin B., G. (2011). Methods for the determination of limit of detection and limit of quantitation of the analytical methods. *Chronicles of Young Scientists*, 2(1), 21-25.
- Alba, G., Raquel, B. R. M., Jessica, A., & Tânia, M. (2017). Microsequential injection lab-on-valve system for the spectrophotometric bi-parametric determination of iron and copper in natural waters. *Talanta*, 167, 703-708.
- Chrysochoou, M., Oakes, J., & Dyar, M. D. (2018). Investigation of iron reduction by green tea polyphenols. *Applied Geochemistry*, 97, 263-269.
- Gözde, Ö., Sezin, E., Dotse Selali, C., & Merve, F. (2017). Sensitive determination of copper in water samples using dispersive liquid-liquid microextraction-slotted quartz tube-flame atomic absorption spectrometry. *Microchemical Journal*, 13, 406-410.
- Juliana, M. d. S., Marcos, T. C., & Ricardo, J. C. (2018). Polyurethane foam functionalized with phenylfluorone for online preconcentration and determination of copper and cadmium in water samples by flame atomic absorption spectrometry. *Microchemical Journal*, 138, 92-97.
- Justyna, P., Raquel, B. R. M., Victor, C., & Joanna, K. (2018). Sequential injection system with in-line solid phase extraction and soil minicolumn for determination of zinc and copper in soil leachates. *Talanta*, 185, 316-323.
- Kamil, S., & Robert, K. (2013). Nephelometry and turbidimetry with paired emitter detector diodes and their application for determination of total urinary protein. *Analytica Chimica Acta*, 788, 68-73.
- Kate, G., Supaporn, K. H., Wasin, W., & Supara, G. (2011). Exploiting green analytical procedures for acidity and iron assays employing flow analysis with simple natural reagent extracts. *Talanta*, 84, 1396-1400.
- King-Tong, L., Eimear, M., Susan, B., & Dermot, D. (2006). Paired emitter-detector light emitting diodes for the measurement of lead(II) and cadmium(II). *Analytica Chimica Acta*, 569, 221-226.

- King-Tong, L., Susan, B., Martina, O. T., & Roderick, S. (2006). A low-cost optical sensing device based on paired emitter–detector light emitting diodes. *Analytica Chimica Acta*, 557, 111-116.
- Könül, B., Serkan, D., & Müberra, A. (2017). A novel spectrophotometric method for the determination of copper ion by using a salophen ligand, N,N'-disalicylidene-2,3-diaminopyridine *Journal of Taibah University for Science*, 11, 808-814.
- Łukasz, T., Marta, P., & Robert, K. (2008). Paired emitter detector diode (PEDD)-based photometry an alternative approach. *Analyst*, 133, 1501-1504.
- Łukasz, T., & Robert, K. (2009). Simplified paired-emitter–detector-diodes-based photometry with improved sensitivity. *Analytica Chimica Acta*, 639, 73-77.
- Marla, T. F. T., Fabio, d. S. D., Darllen, G. d. S., & Marcos, A. B. (2017). Determination of copper total and speciation in food samples by flame atomic absorption spectrometry in association with solid-phase extraction with bamboo (*Bambusa vulgaris*) fiber loaded with bathocuproine. *Microchemical Journal*, 132, 351-357.
- Marta, P., Robert, K., & Łukasz, T. (2010). A concept of dual optical detection using three light emitting diodes. *2010*, 82, 422-425.
- Martina, O. T., King Tong, L., & Dermot, D. (2005). Photometric detection in flow analysis systems using integrated PEDDs. *Talanta*, 66, 1340-1344.
- Megha, A. D., Raimonda, C., Almira, R., & Mahendra, D. S. (2018). EDTA_PANI/SWCNTs nanocomposite modified electrode for electrochemical determination of copper (II), lead (II) and mercury (II) ions *Electrochimica Acta*, 259, 930-938.
- Miguel, M. G. (2011). Anthocyanins: Antioxidant and/or anti-inflammatory activities. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 01(06), 07-15.
- Natta, J., Senee, K., David, J. H., & Parawee, R. (2018). A simple flow injection spectrophotometric procedure for iron(III) determination using *Phyllanthus emblica* Linn. as a natural reagent. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 204, 726-734.
- Paulo, R. O., Alyne, C. L.-M., Edivaltrys, I. P. R., & Antonio, S. M. (2015). Electrochemical determination of copper ions in spirit drinks using carbon paste electrode modified with biochar. *Food Chemistry*, 171, 426-431.

- Paweena, P., Runghana, P., Annanitt, K., & Prawit, N. (2018). Simple and Selective Naked-Eye Detection of Cu^{2+} and Al^{3+} Using *Hibiscus rosa-sinensis* Linn Flower Extract. *ORIENTAL JOURNAL OF CHEMISTRY*, 34, 188-195.
- Phoonthawee, S., Kittiwut, K., Nuanlaor, R., & Kamonthip, S. (2013). Sequential injection system for simultaneous determination of sucrose and phosphate in cola drinks using paired emitter-detector diode sensor. *Talanta*, 115, 361-366.
- Sajika, K., Kanchana, U., Duangjai, N., & Thitirat, M. (2017). Sequential Injection System for Analysis of Citric Acid in Fruit Juices.
- Sam-ang, S., Kraingkrai, P., & Watsaka, S. (2018). Employing natural reagents from turmeric and lime for acetic acid determination in vinegar sample. *journal of food and drug analysis*, 26, 583-590.
- Sopa, T., Supada, K., & Jaroon, J. (2012). Flow injection spectrophotometry using natural reagent from *Morinda citrifolia* root for determination of aluminium in tea. *Food Chemistry*, 132, 624-629.
- Sumonmarn, C., Nantaya, M., Kamonchanok, P., & Siripat, N. (2016). Evaluation of antioxidant capacity using flow injection analysis with low-cost PEDD detection. *Science and Technology Silpakorn University*, 3(5), 82-92.
- Sysay, P., & Wirat, R. (2017). A novel flow injection spectrophotometric method using plant extracts as green reagent for the determination of doxycycline. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 171, 200-206.
- Thanikan, S., Petcharat, S., & Sumonmarn, C. (2017). Use of Natural Pigment from Orchid as a Reagent for Quantitative Analysis of Ammonia in Chemical Fertilizers. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, 22, 366-376.
- Thapanon, S., Supaporn, K. H., Somchai, L., & Jaroon, J. (2005). Exploiting guava leaf extract as an alternative natural reagent for flow injection determination of iron. *Talanta*, 68, 262-267.
- Ukwueze, N. N., Nwadinigwe, C. A., Okoye, C. O. B., & Okoye, F. B. C. (2009). Potentials of 3, 3¹, 4¹, 5, 7-pentahydroxyflavylium of *Hibiscus rosa-sinensis* L. (*Malvaceae*)

- flowers as ligand in the quantitative determination of Pb, Cd and Cr. *International Journal of Physical Sciences*, 4(2), 058-062.
- Warangkhan, K., Wanlapa, A., & Thawatchai, 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.
- Yiming, N., Jiayi, W., Chi, Z., & Yiqiang, C. (2017). Rapid determination of trace copper in animal feed based on micro-plate colorimetric reaction and statistical partitioning correction. *Food Chemistry*, 221, 1406–1414.
- กรมควบคุมมลพิษ, & กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2559). มาตรฐานคุณภาพน้ำ. Retrieved from http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water01.html
- กิตติพันธุ์ บางยี่ขัน. (2551). โลหะกับการพัฒนาประเทศ. สอพ. 3.
- ยุพาพร ผลาจรศักดิ์. (2547). การสกัดและความคงตัวของแอนโทไซยานินส์ที่สกัดได้จากเปลือกมังคุด. (วิทยาสตรมหาบัณฑิต), มหาลัยศิลปากร, นครปฐม.
- วรางคณา เขาคี, รติกร วงศ์กิติ, & สุพัตรา มาแดง. (2560). การตรวจวัดไอออนตะกั่วในน้ำตัวอย่างด้วยตาเปล่าโดยใช้รีเอเจนต์สกัดจากเปลือกแก้วมังกรขาว. วารสารวิทยาศาสตร์ มข., 45(4), 886-895.
- ศูนย์ข้อมูลพิษวิทยา. (2548). ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับสิ่งเป็นพิษ. ความเป็นพิษของทองแดง. Retrieved from http://webdb.dmsc.moph.go.th/ifc_toxic/a_tx_1_001c.asp?info_id=296
- ศูนย์วิจัยข้าวพิษณุโลก, สำนักวิจัยและพัฒนาข้าว, กรมการข้าว, & กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2555). ข้าวเหนียวดำพันธุ์ลิ้มผิว.
- อรุษา เขาวนลิขิต. (2554). การสกัดและวิธีการวิเคราะห์แอนโทไซยานิน. วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี), 3(6), 26-36.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาว สาวิตรี ไชยบุรี
วัน เดือน ปี เกิด	2 มกราคม 2536
สถานที่เกิด	นครราชสีมา
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2558 หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี คณะ วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ พ.ศ. 2561 หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี คณะ วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ที่อยู่ปัจจุบัน	55 หมู่ 7 ตำบลเมืองปัก อำเภอปักธงชัย จังหวัดนครราชสีมา 30150

