



การวิเคราะห์หาโลหะหนักในข้าวโดยเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรี



ภัทราวดี เข้มเพชร

วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมี
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

การวิเคราะห์หาโลหะหนักในข้าวโดยเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรี



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมี
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

วิทยานิพนธ์ เรื่อง "การวิเคราะห์หาโลหะหนักในข้าวโดยเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรี"

ของ ภัทราวดี เข้มเพชร

ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนงค์ ศรีโสภา)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปริญญา มาสวัสดิ์)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิภารัตน์ เชื้อขวด ชัยสิทธิ์)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุทธพงษ์ อุดแน่น)

อนุมัติ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.กรองกาญจน์ ชูทิพย์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	การวิเคราะห์หาโลหะหนักในข้าวโดยเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรี
ผู้วิจัย	ภัทรราวี เข้มเพชร
ประธานที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.ปริญญา มาสวัสดิ์

ประเภทสารนิพนธ์	วิทยานิพนธ์ วท.ม. สาขาวิชาเคมี, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2564
คำสำคัญ	เทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรีที่อาศัยโทรศัพท์เคลื่อนที่ในการถ่ายภาพ, ตะกั่ว, แคดเมียม, ทองแดง, สังกะสี, ไตโรโซน, การย่อยด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรีที่อาศัยโทรศัพท์เคลื่อนที่ในการถ่ายภาพสำหรับการหาปริมาณตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และสังกะสีในข้าวไทยที่มีทั้งความสะอาดและประหยัดค่าใช้จ่าย โดยได้ออกแบบกล่องควบคุมแสงที่ใช้ในการถ่ายภาพที่ทำจากพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดกรดโพลีแลคติก ซึ่งเป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้ โดยมีกล่องวงจรควบคุมแสงด้านล่างที่ใช้หลอดไฟเพียงตัวเดียว ใช้แสงในการถ่ายภาพเพียง 20 ลักซ์ ในการศึกษา โลหะหนักทำปฏิกิริยากับไตโรโซนในสารละลายบัฟเฟอร์ที่พีเอชแตกต่างกันเพื่อให้สารละลายสีเฉพาะสำหรับโลหะหนักแต่ละชนิด จากผลลัพธ์โดยใช้แอปพลิเคชัน Color Name ที่ไม่เสียค่าใช้จ่าย ความเข้มข้นของโลหะหนักเป็นสัดส่วนกับความเข้มของสีแดงของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโลหะหนักกับไตโรโซน พบความเป็นเส้นตรงในช่วง 0.1–1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดอยู่ระหว่าง 0.01 ถึง 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์เชิงปริมาณอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.02 ถึง 0.06 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการวิเคราะห์วันเดียวกัน (intra-day) (%RSD, n=5) คือ 0.4–0.8 ซึ่งมีความแม่นยำสูง ในขณะที่การวิเคราะห์ต่างวันกัน (inter-day) (%RSD, n=5) เท่ากับ 0.5–0.8 ซึ่งมีความแม่นยำสูง มีค่าร้อยละการกลับคืนของโลหะหนักที่เติมลงในตัวอย่างข้าวไทยอยู่ในช่วงร้อยละ 99.4 ถึง 105.5 เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคเฟลมอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตเมตรีพบว่าให้ผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

Title	DETERMINATION OF HEAVY METALS IN RICE BY DIGITAL IMAGE COLORIMETRY
Author	PATTARAWADEE KHEAMPHET
Advisor	Associate Professor Prinya Masawat, Ph.D.
Academic Paper	M.S. Thesis in Chemistry (Type A 2), Naresuan University, 2021
Keywords	Smartphone-based digital imaging device, Lead, Cadmium, Copper, Zinc, Dithizone, UV-digestion

ABSTRACT

In the present research the smartphone-based digital imaging equipment was developed for lead, cadmium, copper, and zinc determination in Thai rice which was convenient and cost-effective. This smartphone-based digital imaging device had a built-in light control box made of poly(lactic acid) or PLA, a compostable and biodegradable plastic, with a light control circuit box underneath that uses a single white light-emitting diode (LED) lamp and takes photos at only 20 lux. In the present study, the dithizone ligand in different buffers was employed to produce a specific color solution for each heavy metal. According to the output from the free Color Name application, the concentration of heavy metals was proportional to the intensity of the resulting red color. The lower detection limit was determined to be between 0.01 and 0.02 mg L⁻¹, whereas the quantification limit was in the range from 0.02 to 0.06 mg L⁻¹. The intra-day precision (%RSD, n=5) was 0.4–0.8 with high consistency, while the interday precision (%RSD, n=5) was 0.5–0.8 with good efficacy. The recovery rate for heavy metals added to samples of Thai rice ranged from 99.4 to 105.5 percent. Acceptable accuracy when compared to flame atomic absorption spectrophotometric data using a paired t-test at 95% confident level.

ประกาศคุณูปการ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงในความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ ดร.ปริญญา มาสวัสดิ์ ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้เป็นที่ปรึกษา พร้อมทั้งให้คำแนะนำตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการวิทยานิพนธ์อันประกอบไปด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อนงค์ ศรีโสภา ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.วิภารัตน์ เชื้อชวด ชัยสิทธิ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุทธพงษ์ อุดแน่น กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ด้วยความเอาใจใส่ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์และทรงคุณค่า

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่อำนวยความสะดวกในเรื่องของสถานที่ ห้องปฏิบัติการ อุปกรณ์ และเครื่องมือวิทยาศาสตร์ สำหรับการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

เหนือสิ่งอื่นใดขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ของผู้วิจัยที่เฝ้าก้ำกัใจและให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้านอย่างดีที่สุดเสมอมา

ภัทรราตี เข้มเพชร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
ประกาศศุณฺพการ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ณ
สารบัญภาพ	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	3
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ข้าว	4
2.2 โลหะหนัก	8
2.3 ไดธัยซอน (Dithizone).....	12
2.4 การย่อยด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต.....	15
2.5 หลักการของเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์พชัน สเปกโทรโฟโตมิเตอร์.....	15
2.6 เทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอร์ิเมตรี (Digital image colorimetry ; DIC)	18
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	24
3.1 กลุ่มตัวอย่าง.....	24
3.2 อุปกรณ์และสารเคมี.....	24
3.3 การเตรียมสารละลาย.....	26
3.4 เครื่องดิจิทัลอิมเมจคัลเลอร์มิเตอร์ (Digital Image Colorimeter; DIC).....	27
3.5 การเตรียมตัวอย่างข้าว.....	28
3.6 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	29
บทที่ 4 ผลของการวิจัย.....	47
4.1 ผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายภาพสีของสารประกอบเชิงซ้อน ระหว่างตะกั่วกับไดไฮโดรโซนด้วยเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอร์มิเตอร์.....	47
4.2 ผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายภาพสีของสารประกอบเชิงซ้อน ระหว่างแคดเมียมกับไดไฮโดรโซนด้วยเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอร์มิเตอร์.....	54
4.3 ผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายภาพสีของสารประกอบเชิงซ้อน ระหว่างทองแดงกับไดไฮโดรโซนด้วยเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอร์มิเตอร์.....	67
4.4 ผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายภาพสีของสารประกอบเชิงซ้อน ระหว่างสังกะสีกับไดไฮโดรโซนด้วยเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอร์มิเตอร์.....	80
4.5 การศึกษาความแม่นยำของเครื่องมือ (Inter-day, Intra-day precision).....	93
4.6 ผลการหาปริมาณโลหะหนักต่าง ๆ ในตัวอย่างข้าวและค่าร้อยละการกลับคืน (%Recovery) ของวิธีการสกัดตัวอย่างข้าวด้วยเทคนิคการย่อยแบบเปียกโดยใช้ แสงอัลตราไวโอเล็ต (UV-digestion).....	97
4.7 ผลการศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดของเครื่องมือ (Limit of Detection; LOD และ Limit of Quantitation; LOQ).....	102
4.8 ผลการศึกษาตัวรบกวน (Interference).....	106

บทที่ 5 สรุปลผลการวิจัย.....	107
5.1 สรุปลผลการทดลอง	107
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	109
บรรณานุกรม.....	110
ประวัติผู้วิจัย	115



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 มาตรฐานอาหารที่มีสารปนเปื้อนโลหะ	2
ตาราง 2 ชุดการทดลองที่ใช้ศึกษาของเข้มข้นของไดไฮโดรเจน สำหรับการหาปริมาณตะกั่ว .29	29
ตาราง 3 ชุดการทดลองที่ใช้ศึกษาปริมาตรของไดไฮโดรเจน สำหรับการหาปริมาณตะกั่ว	30
ตาราง 4 ชุดการทดลองที่ใช้ศึกษาของเข้มข้นของไดไฮโดรเจน สำหรับการหาปริมาณ แคลเซียม	31
ตาราง 5 ชุดการทดลองที่ใช้ศึกษาปริมาตรของไดไฮโดรเจน สำหรับการหาปริมาณแคลเซียม	32
ตาราง 6 ชุดการทดลองที่ใช้ศึกษาอะซิเตดบัพเฟอร์ที่พีเอชต่าง ๆ สำหรับการหาปริมาณ แคลเซียม	33
ตาราง 7 ชุดการทดลองที่ใช้ศึกษาปริมาตรของบัพเฟอร์ สำหรับการหาปริมาณแคลเซียม	34
ตาราง 8 ชุดการทดลองที่ใช้ศึกษาของเข้มข้นของไดไฮโดรเจน สำหรับการหาปริมาณทองแดง ..	35
ตาราง 9 ชุดการทดลองที่ใช้ศึกษาปริมาตรของไดไฮโดรเจน สำหรับการหาปริมาณทองแดง.....	36
ตาราง 10 ชุดการทดลองที่ใช้ศึกษาบัพเฟอร์ที่พีเอชต่าง ๆ สำหรับการหาปริมาณทองแดง ..	37
ตาราง 11 ชุดการทดลองที่ใช้ศึกษาปริมาตรของบัพเฟอร์ สำหรับการหาปริมาณทองแดง.....	38
ตาราง 12 ชุดการทดลองที่ใช้ศึกษาของเข้มข้นของไดไฮโดรเจน สำหรับการหาปริมาณสังกะสี...39	39
ตาราง 13 ชุดการทดลองที่ใช้ศึกษาปริมาตรของไดไฮโดรเจน สำหรับการหาปริมาณสังกะสี.40	40
ตาราง 14 ชุดการทดลองที่ใช้ศึกษาบัพเฟอร์ที่พีเอชต่างๆ สำหรับการหาปริมาณสังกะสี.41	41
ตาราง 15 ชุดการทดลองที่ใช้ศึกษาปริมาตรของบัพเฟอร์ สำหรับการหาปริมาณสังกะสี.42	42
ตาราง 16 ค่าความเป็นเส้นตรง (R-squared) และค่าความชัน (Slope) ของสีแดงเมื่อความ เข้มข้นของไดไฮโดรเจนต่างกัน.....	47

ตาราง 17 ค่าความเป็นเส้นตรง (R-squared) และค่าความชัน (Slope) ของสีแดงเมื่อ ปริมาตรของไดไฮโดรเจนต่างกัน.....	50
ตาราง 18 ค่าความเป็นเส้นตรง (R-squared) และค่าความชัน (Slope) ของสีแดงเมื่อความ เข้มข้นของไดไฮโดรเจนต่างกัน.....	54
ตาราง 19 ค่าความเป็นเส้นตรง (R-squared) และค่าความชัน (Slope) ของสีแดงเมื่อใช้ ปริมาตรของไดไฮโดรเจนต่างกัน.....	57
ตาราง 20 ผลการศึกษาบัพเฟอร์ที่ระดับพีเอชต่าง ๆ.....	60
ตาราง 21 ผลการศึกษาปริมาตรของบัพเฟอร์ที่พีเอช 5.....	63
ตาราง 22 ค่าความเป็นเส้นตรง (R-squared) และค่าความชัน (Slope) ของสีแดงเมื่อความ เข้มข้นของไดไฮโดรเจนต่างกัน.....	67
ตาราง 23 ค่าความเป็นเส้นตรง (R-squared) และค่าความชัน (Slope) ของสีแดงเมื่อใช้ ปริมาตรของไดไฮโดรเจนต่างกัน.....	70
ตาราง 24 ผลการศึกษาบัพเฟอร์ที่ระดับพีเอชต่าง ๆ.....	73
ตาราง 25 ผลการศึกษาปริมาตรของบัพเฟอร์ที่พีเอช 2.....	76
ตาราง 26 ค่าความเป็นเส้นตรง (R-squared) และค่าความชัน (Slope) ของสีแดงเมื่อความ เข้มข้นของไดไฮโดรเจนต่างกัน.....	80
ตาราง 27 ค่าความเป็นเส้นตรง (R-squared) และค่าความชัน (Slope) ของสีแดงเมื่อ ปริมาตรของไดไฮโดรเจนต่างกัน.....	83
ตาราง 28 ผลการศึกษาบัพเฟอร์ที่ระดับพีเอชต่าง ๆ.....	86
ตาราง 29 ผลการศึกษาปริมาตรของบัพเฟอร์ที่พีเอช 4.5.....	89
ตาราง 30 ผลการทดลองของตะกั่ว เมื่อทำการวัดโดยเครื่องดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริมิเตอร์ เป็นเวลา 5 วัน.....	93
ตาราง 31 ผลการทดลองของแคดเมียม เมื่อทำการวัดโดยเครื่องดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริ มิเตอร์ เป็นเวลา 5 วัน.....	93

ตาราง 32 ผลการทดลองของทองแดง เมื่อทำการวัดโดยเครื่องดิจิตอลอิมเมจคัลเลอริมิเตอร์เป็นเวลา 5 วัน.....	94
ตาราง 33 ผลการทดลองของสังกะสี เมื่อทำการวัดโดยเครื่องดิจิตอลอิมเมจคัลเลอริมิเตอร์เป็นเวลา 5 วัน.....	94
ตาราง 34 ผลการทดลองของตะกั่ว เมื่อทำการวัดโดยเครื่องดิจิตอลอิมเมจคัลเลอริมิเตอร์ 5 ครั้งในวันเดียวกัน แต่คนละเวลา.....	95
ตาราง 35 ผลการทดลองของแคดเมียม เมื่อทำการวัดโดยเครื่องดิจิตอลอิมเมจคัลเลอริมิเตอร์ 5 ครั้งในวันเดียวกัน แต่คนละเวลา.....	95
ตาราง 36 ผลการทดลองของทองแดง เมื่อทำการวัดโดยเครื่องดิจิตอลอิมเมจคัลเลอริมิเตอร์ 5 ครั้งในวันเดียวกัน แต่คนละเวลา.....	96
ตาราง 37 ผลการทดลองของสังกะสี เมื่อทำการวัดโดยเครื่องดิจิตอลอิมเมจคัลเลอริมิเตอร์ 5 ครั้งในวันเดียวกัน แต่คนละเวลา.....	96
ตาราง 38 ผลการหาปริมาณโลหะหนักต่าง ๆ ในตัวอย่างข้าวและคาร์ร่อยละการกลับคืน (%Recovery) โดยเทคนิคดิจิตอลอิมเมจคัลเลอริเมตรี.....	98
ตาราง 39 ผลการหาปริมาณโลหะหนักต่าง ๆ ในตัวอย่างข้าวและคาร์ร่อยละการกลับคืน (%Recovery) โดยเทคนิคเฟลมอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตเมตรี.....	100
ตาราง 40 การคำนวณ t-Test: Paired Two Sample for Means ของสังกะสีในตัวอย่างข้าวกล้อง โดยเทคนิคอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตเมตรี และเทคนิคดิจิตอลอิมเมจคัลเลอริเมตรี.....	101
ตาราง 41 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายแบลงค์ที่ได้จากเครื่องเฟลมอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เมื่อทำการทดลองจำนวน 20 ครั้ง.....	102
ตาราง 42 ค่าสีแดงของสารละลายแบลงค์ ที่ได้จากเครื่องดิจิตอลอิมเมจคัลเลอริมิเตอร์ ที่ใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่ในการถ่ายภาพ เมื่อทำการทดลองจำนวน 20 ครั้ง.....	104

ตาราง 43 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และสังกะสี	107
ตาราง 44 ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดของเครื่องมือ (Limit of Detection; LOD และ Limit of Quantitation; LOQ)	108



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพ 1 ต้นข้าว.....	4
ภาพ 2 ข้าวหอมมะลิ.....	6
ภาพ 3 ข้าวหอมมะลิ.....	7
ภาพ 4 ข้าวไรซ์เบอร์รี่.....	8
ภาพ 5 ลักษณะโครงสร้างของไดไฮโดรไซน.....	12
ภาพ 6 การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างตะกั่วกับไดไฮโดรไซน.....	13
ภาพ 7 การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแคดเมียมกับไดไฮโดรไซน.....	13
ภาพ 8 การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างทองแดงกับไดไฮโดรไซน.....	14
ภาพ 9 การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสังกะสีกับไดไฮโดรไซน.....	14
ภาพ 10 ภาพถ่ายของกล้อง UV digestion (28) โดย (a) ภายนอกกล้อง (b) ภายในกล้อง.....	15
ภาพ 11 การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานจากสถานะพื้นเป็นสถานะกระตุ้น.....	16
ภาพ 12 องค์ประกอบที่สำคัญของเครื่องเฟลมอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์.....	17
ภาพ 13 ระบบสีแบบ RGB.....	18
ภาพ 14 เครื่องดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริมิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	28
ภาพ 15 การย่อยแบบเปียกโดยใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต (UV-digestion).....	44
ภาพ 16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานตะกั่วกับค่าสี RGB ของสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วกับไดไฮโดรไซน โดยศึกษาความเข้มของไดไฮโดรไซนเท่ากับ (A) 0.0015 %(w/v), (B) 0.0025 %(w/v), (C) 0.0050 %(w/v) และ (D) 0.0100 %(w/v).....	49

- ภาพ 17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานตะกั่วกับค่าสี RGB ของสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วกับไดไฮโดรอน โดยศึกษาไดไฮโดรอนที่ความเข้มข้น 0.0025 %w/v ปริมาตร (A) 0.5 มิลลิลิตร, (B) 1.0 มิลลิลิตร, (C) 1.25 มิลลิลิตร และ (D) 1.5 มิลลิลิตร.....52
- ภาพ 18 ภาพถ่ายสีของสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วกับไดไฮโดรอนที่สภาวะการทดลองที่เหมาะสม เมื่อใช้ไดไฮโดรอนที่ความเข้มข้น 0.0025 %(w/v) ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร.....53
- ภาพ 19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานตะกั่วกับค่าสี RGB ของสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วกับไดไฮโดรอนที่สภาวะการทดลองที่เหมาะสม.....53
- ภาพ 20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแคดเมียมกับค่าสี RGB ของสารประกอบเชิงซ้อนแคดเมียมกับไดไฮโดรอน เมื่อใช้ความเข้มข้นของไดไฮโดรอนเท่ากับ (A) 0.0015 %(w/v), (B) 0.0025 %(w/v), (C) 0.0050 %(w/v) และ (D) 0.0100 %(w/v).....56
- ภาพ 21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแคดเมียมกับค่าสี RGB ของสารประกอบเชิงซ้อนของแคดเมียมกับไดไฮโดรอน เมื่อใช้ไดไฮโดรอนความเข้มข้น 0.0050 %w/v ปริมาตร (A) 0.5 มิลลิลิตร, (B) 1.0 มิลลิลิตร, (C) 1.25 มิลลิลิตร และ (D) 1.5 มิลลิลิตร.....59
- ภาพ 22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแคดเมียมกับค่าสี RGB ของสารประกอบเชิงซ้อนของแคดเมียมกับไดไฮโดรอน เมื่อใช้บัฟเฟอร์ที่ระดับพีเอชเท่ากับ (A) 3, (B) 4, (C) 5 และ(D) 6.....62
- ภาพ 23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแคดเมียมกับค่าสี RGB ของสารประกอบเชิงซ้อนของแคดเมียมกับไดไฮโดรอน เมื่อใช้ปริมาตรของอะซิเตทบัฟเฟอร์พีเอช 5 เท่ากับ (A) 0.5 มิลลิลิตร, (B) 1.0 มิลลิลิตร, (C) 1.25 มิลลิลิตร และ (D) 1.5 มิลลิลิตร.....65

ภาพ 24 ภาพถ่ายสีของสารประกอบเชิงซ้อนของแคดเมียมกับไดไฮโดรเจนที่สภาวะการ
ทดลองที่เหมาะสม ซึ่งใช้ไดไฮโดรเจนที่ความเข้มข้น 0.0050 %(w/v) ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร
และใช้อะซิเตทบัฟเฟอร์พีเอช 5 ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร.....66

ภาพ 25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแคดเมียม
กับค่าสี RGB ของสารประกอบเชิงซ้อนของแคดเมียมกับไดไฮโดรเจนที่สภาวะการทดลองที่
เหมาะสม.....66

ภาพ 26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานทองแดง
กับค่าสี RGB ของสารประกอบเชิงซ้อนของทองแดงกับไดไฮโดรเจน เมื่อใช้ไดไฮโดรเจนความ
เข้มข้นเท่ากับ (A) 0.0015 %(w/v), (B) 0.0025 %(w/v), (C) 0.0050 %(w/v) และ (D) 0.0100
%(w/v).....69

ภาพ 27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานทองแดง
กับค่าสี RGB ของสารประกอบเชิงซ้อนของทองแดงกับไดไฮโดรเจน เมื่อใช้ไดไฮโดรเจนความ
เข้มข้นเท่ากับ 0.0050 %w/v ปริมาตร (A) 0.5 มิลลิลิตร, (B) 1.0 มิลลิลิตร, (C) 1.25
มิลลิลิตร และ (D) 1.5 มิลลิลิตร72

ภาพ 28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานทองแดง
กับค่าสี RGB ของสารประกอบเชิงซ้อนของทองแดงกับไดไฮโดรเจน เมื่อใช้บัฟเฟอร์ที่ระดับพี
เอชเท่ากับ (A) 2, (B) 3.5, (C) 4.5 และ (D) 5.5.....75

ภาพ 29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานทองแดง
กับค่าสี RGB ของสารประกอบเชิงซ้อนของทองแดงกับไดไฮโดรเจน เมื่อใช้ปริมาตรของคลอ
ไรด์บัฟเฟอร์พีเอช 2 เท่ากับ (A) 0.5 มิลลิลิตร, (B) 1.0 มิลลิลิตร, (C) 1.25 มิลลิลิตร และ
(D) 1.5 มิลลิลิตร78

ภาพ 30 ภาพถ่ายสีของสารประกอบเชิงซ้อนของทองแดงกับไดไฮโดรเจนที่สภาวะการทดลอง
ที่เหมาะสม เมื่อใช้ไดไฮโดรเจนที่ความเข้มข้น 0.0050 %(w/v) ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร และใช้
คลอไรด์บัฟเฟอร์พีเอช 2 ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร.....79

ภาพ 31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานทองแดง
กับค่าสี RGB ของสารประกอบเชิงซ้อนของทองแดงกับไดโธไซนที่สภาวะการทดลองที่
เหมาะสม.....79

ภาพ 32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานสังกะสี
กับค่าสี RGB ของสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีกับไดโธไซน เมื่อใช้ความเข้มข้นของไดโธ
ไซนเท่ากับ (A) 0.0015 %(w/v), (B) 0.0025 %(w/v), (C) 0.0050 %(w/v) และ (D) 0.0100
%(w/v).....82

ภาพ 33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานสังกะสี
กับค่าสี RGB ของสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีกับไดโธไซน โดยการศึกษาความเข้มข้น
0.0050 %w/v ปริมาตรไดโธไซน (A) 0.5 มิลลิลิตร, (B) 1.0 มิลลิลิตร, (C) 1.25 มิลลิลิตร
และ (D) 1.5 มิลลิลิตร85

ภาพ 34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานสังกะสีกับ
ค่าสี RGB ของสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีกับไดโธไซน เมื่อศึกษาบัฟเฟอร์ที่ระดับพี
เอชเท่ากับ (A) 3.5, (B) 4, (C) 4.5 และ (D) 5.5.....88

ภาพ 35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานสังกะสีกับ
ค่าสี RGB ของสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีกับไดโธไซน เมื่อใช้ปริมาตรของอะซิเตท
บัฟเฟอร์พีเอช 4.5 เท่ากับ (A) 0.5 มิลลิลิตร, (B) 1.0 มิลลิลิตร, (C) 1.25 มิลลิลิตร และ (D)
1.5 มิลลิลิตร91

ภาพ 36 ภาพถ่ายสีของสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีกับไดโธไซนที่สภาวะการทดลองที่
เหมาะสม ซึ่งใช้ไดโธไซนที่ความเข้มข้น 0.0050 %(w/v) ปริมาตร 1.25 มิลลิลิตร และ
ใช้อะซิเตทบัฟเฟอร์พีเอช 4.5 ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร.....92

ภาพ 37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานสังกะสีกับ
ค่าสี RGB ของสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีกับไดโธไซนที่สภาวะการทดลองที่เหมาะสม
.....92

ภาพ 38 การศึกษาตัวרבกวน โดยการเปรียบเทียบค่าสี RGB ของสารประกอบเชิงซ้อน โลหะหนักกับสารประกอบเชิงซ้อนโลหะหนักที่มีตัวרבกวน (รูปภาพสีของสารละลายโลหะหนักความเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ต่างๆ ที่มีโลหะหนักอื่น ๆ รบกวนและแผนภาพแท่งแสดงค่าสี RGB ของการรบกวน) (A) ตะกั่วที่มีโลหะหนักอื่นรบกวน, (B) แคดเมียมที่มีโลหะหนักอื่นรบกวน, (C) ทองแดงที่มีโลหะหนักอื่นรบกวน และ (D) สังกะสีที่มีโลหะหนักอื่นรบกวน 106



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

ข้าวเป็นสินค้าเกษตรที่สำคัญที่สุดที่ผลิตสำหรับตลาดภายในประเทศและส่งออกในประเทศ ไทย โดยประเทศไทยเป็นผู้ส่งออกข้าวรายใหญ่และเป็นหนึ่งในสิบผู้ผลิตข้าวรายใหญ่ของโลก (1) ข้าวมีสารอาหารที่มีประโยชน์ต่อร่างกายสูง ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรต น้ำ โปรตีน ไฟเบอร์ วิตามิน และแร่ธาตุเป็นหลัก ซึ่งรวมถึงแคลเซียม แมกนีเซียม เหล็ก และทองแดง (2) แต่ในขณะเดียวกันอาจมีการปนเปื้อนของโลหะหนักบางชนิดจากการเพาะปลูกได้ ด้วยเหตุนี้การบริโภคข้าวจึงอาจเป็นอันตรายต่อมนุษย์ เนื่องจากมลพิษของโลหะหนัก เช่น แคดเมียม ตะกั่ว สารหนู พรอท และโลหะหนักอื่นๆ ซึ่งสามารถดูดซึมเข้าสู่ส่วนประกอบของข้าวและถ่ายเทไปยังร่างกายมนุษย์ได้โดยการรับประทาน แม้ว่าโลหะหนักเหล่านี้จะมีประโยชน์ในทางอุตสาหกรรม บางชนิดก็มีประโยชน์ต่อร่างกาย แต่บางชนิดก็เป็นพิษต่อร่างกาย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องให้ความสำคัญ (2, 3)

โลหะหนักหมายถึงประเภทของธาตุที่มีเลขอะตอมและน้ำหนักอะตอมตั้งแต่ 23 ถึง 92 และ 47.86 ถึง 239.03 ตามลำดับ และมีความหนาแน่นมากกว่า 5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โลหะหนักเป็นสารที่ส่งผลเสียต่อสุขภาพของมนุษย์ อย่างไรก็ตาม ธาตุโลหะหนักบางชนิดเป็นสารอาหารสำคัญที่มนุษย์ต้องการในปริมาณจำกัด เพราะปริมาณที่มากเกินไปสามารถนำไปสู่ผลกระทบที่เป็นพิษ ตัวอย่างเช่น ตะกั่วเป็นโลหะที่ใช้กันมากที่สุดรองจากเหล็ก ตะกั่วสามารถทำให้เกิดผลผิดปกติและเป็นพิษในไต ระบบทางเดินอาหาร ระบบย่อยอาหาร ระบบประสาท และระบบไหลเวียนโลหิต ความเป็นพิษของตะกั่วเกิดจากการกระตุ้นของไขมันเปอร์ออกซิเดชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ที่ทำลายการทำงานของร่างกาย การทดสอบในหนูที่ให้ตะกั่ว พบว่าจะเพิ่มลิปิดเปอร์ออกซิเดชันในสมอง เป็นเหตุให้เกิดภาวะเครียดออกซิเดชัน (4) แคดเมียมทำให้แหล่งน้ำใต้ดิน ดิน และทะเลสาบปนเปื้อน อันเป็นผลมาจากการใช้ปุ๋ยเคมีบางชนิด (ปุ๋ยฟอสเฟต) ซึ่งส่งผลเสียต่อพืชผล สัตว์หลายชนิด และปลา แคดเมียมเชื่อมโยงกับโรคไต โรคความดันโลหิตสูง การกลายพันธุ์ และมะเร็ง ผลข้างเคียงที่ร้ายแรงที่สุดของแคดเมียมในมนุษย์คือการเจ็บป่วยของโรค (อิต-อิต) ซึ่งส่งผลต่อการเผาผลาญแคลเซียมและกระดูกโดยตรง (5) ทองแดงเมื่อได้รับในปริมาณมากเกินไป จะกลายเป็นสารพิษที่ส่งผลกระทบต่อร่างกายขึ้นมาทันที และจะแสดงออกมาเป็นความรู้สึกคลื่นไส้ อาเจียน ปวดกล้ามเนื้อ ปวดบริเวณกระเพาะอาหาร ทำให้เกิดโรคโลหิตจางจากการที่เม็ดเลือดแดงแตกตัว (6) สังกะสีถ้าร่างกายได้รับในปริมาณที่มากเกินไป จะทำให้เอนไซม์ของตับทำงานผิดปกติ และพบอาการเลือดออกบริเวณทางเดิน

อาหาร เป็นต้น (7) ประเทศไทยจึงได้มีการจัดทำมาตรฐานอาหารปนเปื้อนโลหะ โดยมีประกาศจากกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 414 (พ.ศ. 2563) เรื่อง ข้อกำหนดเกี่ยวกับการปนเปื้อนของโลหะในอาหาร แสดงดังตาราง 1 (8)

ตาราง 1 มาตรฐานอาหารที่มีสารปนเปื้อนโลหะ

ชนิดของโลหะ	ปริมาณที่ปนเปื้อนในอาหารได้
1. ดีบุก	250 มิลลิกรัมต่ออาหาร 1 กิโลกรัม
2. สังกะสี	100 มิลลิกรัมต่ออาหาร 1 กิโลกรัม
3. ทองแดง	20 มิลลิกรัมต่ออาหาร 1 กิโลกรัม
4. สารหนู	2 มิลลิกรัมต่ออาหาร 1 กิโลกรัม
5. ตะกั่ว	1 มิลลิกรัมต่ออาหาร 1 กิโลกรัม
6. พรอท	0.5 มิลลิกรัมต่ออาหาร 1 กิโลกรัม สำหรับอาหารทะเล และไม่เกิน 0.02 มิลลิกรัมต่ออาหาร 1 กิโลกรัม สำหรับอาหารอื่น
7. แคดเมียม	0.4 มิลลิกรัมต่ออาหาร 1 กิโลกรัม

ในปัจจุบันมีเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น เครื่องอินดักทีฟพลาสมา-แมสสเปกโตรมิเตอร์ (Inductively coupled plasma-mass spectrometer) เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic absorption spectrometer; AAS) และเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-visible spectrophotometer) เป็นต้น แต่เครื่องมือเหล่านี้มีราคาแพง และมีขนาดใหญ่ ดังนั้นเครื่องดิจิทัลอิมเมจโคลอริมิเตอร์ (Digital image colorimeter; DIC) จึงเป็นเครื่องมือที่ได้รับความนิยมในปัจจุบันสำหรับวิเคราะห์หาสารที่มีสีหรือสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่มีสีได้ เนื่องจากใช้อุปกรณ์ราคาไม่แพง และมีขนาดเล็กสามารถพกพาได้สะดวก เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หาสารที่สนใจทั้งในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงจะประยุกต์ใช้เครื่องดิจิทัลอิมเมจโคลอริมิเตอร์ที่ออกแบบขึ้นเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในข้าวซึ่งจะใช้ไดโธโซน (dithizone) เป็นสารที่ทำให้เกิดสี (Color forming reagent) กับโลหะหนัก 4 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และสังกะสี

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในตัวอย่างข้าวด้วยเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรี
2. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมตัวอย่างข้าวโดยใช้เทคนิคการย่อยด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต
3. วิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในข้าวด้วยเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรีเปรียบเทียบกับเทคนิคเฟลมอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรเมตรี

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. หาสภาวะที่เหมาะสมในการทำให้เกิดสีสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโลหะหนักต่าง ๆ ได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และสังกะสีกับไดไฮโซน
2. หาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมตัวอย่างข้าว 3 ชนิด ได้แก่ ข้าวหอมมะลิ ข้าวกล้อง และข้าวไรซ์เบอร์รี่ เพื่อวิเคราะห์หาโลหะหนัก
3. วิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักต่าง ๆ ได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และสังกะสีในตัวอย่างข้าว 3 ชนิด ได้แก่ ข้าวหอมมะลิ ข้าวกล้อง และข้าวไรซ์เบอร์รี่ โดยเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรีที่พัฒนาขึ้นและตรวจสอบความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ เปรียบเทียบกับเทคนิคมาตรฐานคือเฟลมอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรเมตรี

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้วิธีการเตรียมตัวอย่างข้าวก่อนการวิเคราะห์โลหะหนักที่ง่าย และรวดเร็ว
2. ได้วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในข้าวด้วยเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรีอย่างถูกต้องและมีความแม่นยำเมื่อเทียบกับวิธีมาตรฐาน

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาวิธีการหาปริมาณโลหะหนัก 4 ชนิดได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และ สังกะสีในตัวอย่างข้าว 3 ชนิด คือ ข้าวหอมมะลิ ข้าวกล้อง และข้าวไรซ์เบอร์รี่ ด้วยเทคนิคดิจิทัลอิมเมจ คัลเลอริเมตรี เพื่อให้ทราบผลได้อย่างรวดเร็ว ได้ทำการรวบรวมข้อมูลทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วย

2.1 ข้าว

2.1.1 ลักษณะของข้าว

ข้าว (Rice) ดังภาพ 1 เป็นพืชตระกูลหญ้า มีอายุสั้นเพียงฤดูเดียว เจริญเติบโตได้ง่าย เป็นพืชล้มลุกขนาดเล็ก ลำต้นตั้งตรง ลำต้นมีลักษณะกลมเล็กๆ มีข้อและปล้องกลวง ช่วงโคนต้นมีข้อ และปล้องสั้นกว่า และยาวขึ้นเรื่อยๆ มีเปลือกหนา มีขนหยาบๆ ปกคลุม ต้นมีสีเหลืองนวล ใบเป็นใบ เดี่ยว ออกตรงข้ามสลับกัน ใบมีลักษณะยาวรี ขอบใบเรียบ มีเส้นกลางใบตามยาวเห็นชัด ก้านใบออก หุ้มรอบ ๆ ลำต้น มีขน เล็ก ๆ ปกคลุม ผิวใบสากมือ มีสีเขียว ผลเป็นเมล็ดอยู่เป็นช่อ มีลักษณะทรง รีเล็กๆ มีเปลือกแข็งหุ้มเมล็ด เมล็ดอ่อนมีสีเขียว เมล็ดแก่มีสีเหลืองทอง ข้างในมีเมล็ดแข็งมาก มี สีขาวใส สีขาวขุ่น สีดำ สีเหลือง ตามสายพันธุ์ นำมาประกอบอาหารต่าง ๆ ได้หลายเมนู ในประเทศไทยมีการปลูกหลายสายพันธุ์ ที่นิยมปลูกและมีชื่อเสียงมากคือ ข้าวหอมมะลิ เมล็ดข้าวแบ่งออกเป็น สองชนิดคือ ข้าวเหนียว และข้าวเจ้า (9)



ภาพ 1 ต้นข้าว (10)

2.1.2 ประโยชน์และสรรพคุณข้าว

มีโปรตีน คาร์โบไฮเดรต วิตามินเอ วิตามินอี วิตามินซี วิตามินบี1 วิตามินบี2 วิตามินบี3 วิตามินบี5 วิตามินบี6 แคลเซียม ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม เหล็ก ไขมัน พลังงาน เส้นใย สังกะสี เบตาแคโรทีน น้ำตาล แมกนีเซียม และแมงกานีส ช่วยบำรุงร่างกาย ช่วยเจริญอาหาร มีอนุมูลอิสระ ช่วยลดคอเลสเตอรอล ช่วยบำรุงผิวพรรณ ช่วยบำรุงระบบประสาท ช่วยป้องกันโรคความจำเสื่อม ช่วยป้องกันโรคอัลไซเมอร์ ช่วยบำรุงฟัน ช่วยบำรุงกระดูก ช่วยบำรุงสายตา ช่วยป้องกันต่อกระจุก ช่วยป้องกันโรคโลหิตจาง ช่วยลดน้ำตาลในเลือด ช่วยป้องกันโรคหัวใจ ช่วยป้องกันโรคหลอดเลือด แก้วร้อนใน แก้วกระหายน้ำ แก้วท้องร่วง ช่วยลดตะคริว ช่วยป้องกันโรคเหน็บชา ช่วยย่อยอาหาร ช่วยระบบขับถ่าย แก้วท้องผูก ช่วยย่อยอาหารในลำไส้ แก้วตาแดง แก้วอาเจียน ช่วยป้องกันเลือดออกตามไรฟัน ช่วยป้องกันความดันโลหิตสูง ช่วยป้องกันโรคเบาหวาน (9)

2.1.3 การปลูกและขยายพันธุ์ข้าว

ข้าวเป็นพืชที่เจริญได้ในดินแทบทุกชนิด โดยดินร่วนปนทรายจะเจริญเติบโตได้ดี ควรปลูกในฤดูฝน การปลูกจะนิยมปลูกโดยใช้วิธีการขยายพันธุ์ด้วยเมล็ด จะต้องเตรียมดินให้พร้อม แล้วนำเมล็ดพันธุ์มาปลูกในแปลงที่เตรียมไว้โดยหว่านลงไปให้กระจายพอให้ทั่ว ๆ แปลง (9)

2.1.4 ชนิดของข้าวที่นิยมรับประทานในประเทศไทย (11)

1. ข้าวหอมมะลิ

มีถิ่นกำเนิดอยู่ที่ประเทศไทย ลักษณะเมล็ดเรียวยาว มีสีขาวนวลเหมือนสีของดอกมะลิตลอดทั้งเมล็ด ดังภาพ 2 เมื่อหุงสุกใหม่ ๆ จะนุ่มมีกลิ่นหอมอ่อน ๆ คล้ายกับกลิ่นของใบเตย ชวนให้น่ารับประทาน หากนำไปใส่ตู้เย็นแล้วกลับมาอุ่นอีกครั้งด้วยไมโครเวฟก็ยังคงความนุ่มเหมือนเพิ่งหุงสุกเสร็จใหม่ ๆ โดยข้าวหอมมะลิใหม่จะหุงไม่ค่อยขึ้นหม้อ หากอยากให้อุ่นหม้อควรเลือกใช้ข้าวหอมมะลิเก่าข้ามปีมาหุงแทน ปัจจุบันกระทรวงพาณิชย์ประกาศให้ข้าวขาวดอกมะลิ 105 (เป็นข้าวไวแสง มีแหล่งผลิตอยู่ที่จังหวัด ฉะเชิงเทรา) และข้าวพันธุ์กข 15 เป็นข้าวหอมมะลิของไทย การเก็บรักษาข้าวหอมมะลิให้หอมนาน ควรเก็บที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส ไม่ควรเก็บไว้ในที่ร้อน หรืออุณหภูมิสูงเกินไป เพราะจะทำให้สารระเหย 2-acetyl-1-pyrroline ที่อยู่ในข้าวระเหยออกไปหมดทำให้ข้าวหมดความหอม

ประโยชน์ของข้าวหอมมะลิ

มีคาร์โบไฮเดรตสูงถึง 77% และโปรตีน 8% ให้พลังงานแก่ร่างกายแลมด้วยวิตามินบี1 ช่วยป้องกันโรคเหน็บชา และวิตามินบี2 ช่วยป้องกันโรคปากนกกระจอก



ภาพ 2 ข้าวหอมมะลิ (12)

2. ข้าวกล้อง

เป็นข้าวที่สีเอาแค่ส่วนเปลือก (แกลบ) ออกเท่านั้น โดยยังมีจมูกข้าวและเยื่อหุ้มเมล็ดข้าว (รำ) ติดอยู่ และส่วนนี้คือส่วนที่ทำให้ข้าวกล้องมีประโยชน์ด้านโภชนาการสูงกว่าข้าวที่สีจนขาว บางคนเรียกข้าวชนิดนี้ว่าข้าวซ้อมมือเนื่องจากสมัยก่อนกระบวนการผลิตข้าวกล้องนั้นทำเพื่อรับประทานกันแค่ในครัวเรือนเท่านั้น โดยการตำข้าว (สีข้าว) ด้วยมือ ทำให้ข้าวที่ได้ออกมาเป็นสีน้ำตาลอมแดง หุงสุกแล้วมีความกรุบ ๆ เล็กน้อย เนื่องจากเยื่อหุ้มเมล็ดที่ยังคงอยู่ ดังภาพ 3

ประโยชน์ของข้าวกล้อง

มีโปรตีนและเส้นใยอาหารอยู่จำนวนมาก ช่วยให้ขับถ่ายได้สะดวก ท้องไม่ผูก และทำให้อิ่มท้องได้นานอีกด้วย มีไนอะซินช่วยรักษาโรคผิวหนังและระบบประสาท อุดมไปด้วยธาตุเหล็กและทองแดงช่วยส่งเสริมการสร้างเม็ดเลือด ป้องกันโรคโลหิตจาง มีวิตามินบีรวม ช่วยป้องกันและบรรเทาอาการอ่อนเพลีย



ภาพ 3 ข้าวหอมมะลิ (13)

3. ข้าวไรซ์เบอร์รี่

เป็นข้าวที่เกิดจากการผสมข้ามสายพันธุ์ระหว่างข้าวหอมนิล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พันธุ์พ่อ) กับข้าวขาวดอกมะลิ 105 (ข้าวหอมมะลิ) จากสถาบันวิจัยข้าว (พันธุ์แม่) จึงทำให้ข้าวไรซ์เบอร์รี่มีสีม่วงเข้มจนเกือบดำ โดดเด่นจากข้าวชนิดอื่น ๆ อย่างชัดเจน ในข้าวไรซ์เบอร์รี่นั้นมีส่วนประกอบที่เรียกว่าสารแอนโทไซยานิน เป็นสารสีที่สามารถละลายน้ำได้ดี จัดอยู่ในกลุ่มของ ฟลาโวนอยด์หรือสารต้านอนุมูลอิสระ ช่วยลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็ง ลักษณะเมล็ดของข้าวพันธุ์นี้จะมีความเรียวยาว ผิวมันวาว เมื่อนำไปหุงสุกจะมีกลิ่นหอมอ่อน ๆ ที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัว มีรสชาติหวานกลมกล่อม เนื้อสัมผัสเหนียวนุ่ม มีเส้นใยค่อนข้างเยอะจึงทำให้อิ่มท้องได้นาน ดังภาพ 4

ประโยชน์ของข้าวไรซ์เบอร์รี่

มีสารที่ชื่อว่าโพลีฟีนอล ช่วยทำลายฤทธิ์ของอนุมูลอิสระซึ่งเป็นคุณสมบัติเด่นของข้าวชนิดนี้ ลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็ง ช่วยป้องกันโรคหัวใจ มีโฟเลตสูง แต่มีดัชนีน้ำตาลที่ค่อนข้างต่ำ เหมาะสำหรับผู้ที่ต้องการควบคุมปริมาณน้ำตาล



ภาพ 4 ข้าวไรซ์เบอร์รี่ (14)

2.2 โลหะหนัก

โลหะหนัก (Heavy metal) คือกลุ่มธาตุที่มีความหนาแน่นมากกว่า 5 กรัมต่อลูกบาศก์ เซนติเมตร และความถ่วงจำเพาะสูงกว่า 4 เทียบกับน้ำซึ่งมีความหนาแน่นเท่ากับ 1 กรัมต่อลูกบาศก์ เซนติเมตร แสดงว่าคุณสมบัติเบื้องต้นของโลหะหลักคือ จมน้ำ แต่โลหะหนักมีคุณสมบัติที่สำคัญอีก อย่างคือ ต้องเป็นโลหะที่อยู่ในกลุ่มธาตุ Transition metals ซึ่งจัดว่าเป็นกลุ่มธาตุที่เป็นพิษต่อ สิ่งมีชีวิต เนื่องจากไม่สลายตัวในกระบวนการทางธรรมชาติ มีความเสถียร และสามารถสะสมอยู่ใน อากาศ ดิน และแหล่งน้ำ รวมถึงสะสมอยู่ในสิ่งมีชีวิตได้อีกด้วย โลหะหนักบางชนิดมีประโยชน์ต่อ ร่างกาย เช่น แมงกานีส (Mn), เหล็ก (Fe), ทองแดง (Cu) และสังกะสี (Zn) เป็นต้น แต่ถ้าได้รับใน ปริมาณที่มากทำให้เป็นพิษได้เช่นกัน และโลหะหนักบางชนิดมีความเป็นพิษต่อร่างกาย เช่น ปรอท (Hg), ตะกั่ว (Pb) และแคดเมียม (Cd) โลหะหนักเหล่านี้สามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติ โดยอาจมา จากการทำเหมืองแร่ โรงงานผลิตสารเคมี โรงงานผลิตไฟฟ้าโดยใช้ถ่านหิน การทำแบตเตอรี่ การใช้ปุ๋ย และยากำจัดศัตรูพืชในการเกษตรกรรม แล้วจะถูกปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมและบรรยากาศ หาก ไม่มีการบริหารจัดการกากของเสียที่ดี จะทำให้เกิดการปนเปื้อนโลหะหนักเหล่านี้ในสิ่งแวดล้อมและ เข้าสู่ห่วงโซ่อาหารได้ ทำให้เกิดปัญหาการปนเปื้อนในอาหารสูงเกินกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่อนุญาตให้ บริโภคได้อย่างปลอดภัย ถ้าคนหรือสัตว์เลี้ยงที่บริโภคอาหารและน้ำที่มีโลหะหนักปนเปื้อนเป็น เวลานาน ก็จะทำให้เกิดการสะสมและอาจเกิดอันตรายต่อร่างกายได้ (15)

2.2.1 ตะกั่ว

ตะกั่วมีสัญลักษณ์ทางเคมี คือ Pb เป็นธาตุในหมู่ที่ 4 เลขอะตอม 82 น้ำหนักอะตอม 207.19 มี 2 วาเลนซ์อิเล็กตรอน คือ 2 และ 4 ละลายในกรดดินประสีว (Nitric acid) ละลายได้น้อย

มากในกรดกำมะถัน (Sulfuric acids) และกรดเกลือ (Hydrochloric acids) ไม่ละลายในน้ำแต่จะละลายในน้ำได้ช้า ๆ ตะกั่วเป็นโลหะที่เป็นพิษ สามารถสะสมในร่างกายของมนุษย์ สารประกอบตะกั่วก็เป็นพิษเช่นกัน การสูดดมควันหรือสารตะกั่วเข้าไป อาจทำให้เคลื่อนไหวร่างกายไม่ได้เนื่องจากพิษที่ได้รับ คนงานซึ่งทำงานสัมผัสอยู่กับตะกั่วต้องมีระบบป้องกันการหายใจเป็นพิเศษและต้องควบคุมเพื่อไม่ให้ตะกั่วอยู่ในระดับที่อันตราย (16)

ตะกั่วเป็นสารที่พบปนเปื้อนทั่วไป ในสมัยก่อนเด็กเป็นโรคพิษตะกั่วจากการรับประทานสีทาบ้าน หรือใช้มือจับของที่ติดสีดังกล่าว ในปัจจุบันสีทำด้วยตะกั่วมีน้อยลง แหล่งที่สำคัญที่ทำให้เกิดพิษสำหรับผู้ใหญ่คือจากอุตสาหกรรมได้แก่ โรงงานทำแบตเตอรี่และโรงงานอื่นๆ ที่มีการใช้ตะกั่วอย่างกว้างขวาง เช่น อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และ คอมพิวเตอร์ สำหรับประชาชนโดยทั่วไปอาจได้รับตะกั่วจากอากาศ ซึ่งมักมีตะกั่วจากการปนเปื้อนจากการใช้น้ำมันรถยนต์ นอกจากนี้ยังมีแหล่งอื่นๆ อีกจำนวนมากที่อาจจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดภาวะตะกั่วเป็นพิษ ได้แก่ หัวกระสุนตะกั่วที่ตกค้างในร่างกาย การทำงานในสนามยิงปืน ยาสมุนไพรมหิก แป้งทาตัวเด็ก ภาชนะเซรามิกที่มีตะกั่ว ท่อประปาที่ทำด้วยตะกั่ว ผลิตภัณฑ์จากแบตเตอรี่ และอาหารที่มีตะกั่วปนเปื้อนเหล่านี้ ไลน์ เครื่องยนต์ที่ใช้ตะกั่วเป็นส่วนประกอบ การเจียรไนพลอยที่ใช้จานตะกั่ว ตะกั่วที่ใช้เป็นตัวพิมพ์หนังสือ ตะกั่วถ่วงน้ำหนักสีที่ทาของใช้ของเด็ก เป็นต้น

การกระจายของตะกั่วในร่างกาย เนื่องจากปกติตะกั่วที่เข้าสู่ร่างกายจะถูกกำจัดออกไปช้า ๆ จึงทำให้ตะกั่วมีการสะสมในร่างกายคนทั่วไปตะกั่วอาจจะสะสมในร่างกายประมาณ 200 มิลลิกรัม ส่วนในคนงานที่ทำงานเกี่ยวกับสารตะกั่วอาจจะสะสมถึง 500 มิลลิกรัม สำหรับการกระจายตัวของสารตะกั่วในร่างกายนั้น ตะกั่วส่วนหนึ่งจะไปอยู่ในเลือดซึ่ง 95% จะจับกับเซลล์เม็ดเลือดแดง ปริมาณที่จะอยู่ในเลือด 2 มิลลิกรัม และมีค่าครึ่งชีวิต 35 วัน อีกส่วนหนึ่งจะกระจายไปที่เนื้อเยื่อของร่างกายเช่น ตับ ไต ระบบประสาท ปริมาณของตะกั่วที่สะสมในส่วนนี้ยังไม่ทราบแน่นอน อาจจะมีประมาณ 0.6 มิลลิกรัม แต่ในบางการศึกษาเชื่อว่ามีมากถึง 10% ของตะกั่วที่สะสมในร่างกายทั้งหมด ตะกั่วในส่วนนี้มีค่าครึ่งชีวิตประมาณ 40 วัน และตะกั่วส่วนใหญ่ที่สุดที่สะสมในร่างกายคือในกระดูกมีประมาณ 200 มิลลิกรัม บางรายงานเชื่อว่ามีประมาณ 90% ของค่าครึ่งชีวิตโดยจะพบตะกั่วในกระดูกประมาณ 20-30 ปี การขจัดตะกั่วในร่างกายส่วนใหญ่ประมาณ 75% จะถูกขับออกทางไต คือ 36 ไมโครกรัมต่อวัน อีก 25% หรือ 12 ไมโครกรัมต่อวัน จะถูกขับออกทางน้ำดี ผม เหงื่อ และเล็บ (17)

2.2.2 แคดเมียม

แคดเมียมเป็นธาตุโลหะหนักที่มีสีเงินแกมขาว มีคุณสมบัติเบา อ่อน ดัดโค้งได้ง่าย และทนต่อการกัดกร่อน มีความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) 8.65 ค่า Mohs hardness 2.0 ค่า refractive index 1.13 จุดหลอมเหลว (m.p.) 302.90 องศาเซลเซียส จุดเดือด 767.0 องศาเซลเซียส มีความดันไอ (vapor pressure) 1.4 มิลลิเมตร ที่ 4000 องศาเซลเซียส และ 16 มิลลิเมตร ที่ 5000 องศาเซลเซียส ดังนั้นเมื่อมีการใช้ความร้อนสูง เช่น การอบแร่ การบัดกรี การหลอมเหล็ก และการเผาของเสีย จะทำให้มีไอของแคดเมียมออกมาได้ในระหว่างกระบวนการที่มีการให้ความร้อน และไอของแคดเมียมในอากาศจะถูกออกซิไดส์อย่างรวดเร็วไปเป็นแคดเมียมออกไซด์ (CdO) นอกจากนี้แคดเมียมยังเป็นธาตุที่ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ดีในกรดไนตริก (HNO_3) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เจือจางซึ่งจะทำให้เป็นอันตรายต่อคนแบบเฉียบพลันเมื่อกินเข้าไป โดยทั่วไปจะไม่ค่อยพบแคดเมียมในรูปของแคดเมียมบริสุทธิ์แต่จะพบในรูปของสารประกอบของเกลือ เช่น cadmium sulfate (CdSO_4), cadmium nitrate (CdNO_3), cadmium chloride (CdCl_2) ซึ่งเป็นสารประกอบที่ไม่มีสีและละลายได้ดีในน้ำ และแคดเมียมยังสามารถรวมตัวกับสารอื่น ๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้โดยเฉพาะรวมกับ cyanides และ amines จากความเป็นพิษของแคดเมียม ทำให้แหล่งน้ำใต้ดิน ดิน และทะเลสาบปนเปื้อน อันเป็นผลมาจากการใช้ปุ๋ยเคมีบางชนิด (ปุ๋ยฟอสเฟต) ซึ่งส่งผลเสียต่อพืชผล สัตว์หลายชนิด และปลา แคดเมียมเชื่อมโยงกับโรคไต โรคความดันโลหิตสูง การกลายพันธุ์ และมะเร็ง (18)

2.2.3 ทองแดง

ทองแดง (Copper) คือธาตุที่มีเลขอะตอม 29 และสัญลักษณ์คือ Cu ทองแดงอยู่ในกลุ่มของธาตุทรานซิชัน มนุษย์ใช้ประโยชน์จากทองแดงมาไม่น้อยกว่า 10,000 ปี โดยพบหลักฐานว่ามนุษย์สามารถหลอมสกัดทองแดงให้บริสุทธิ์ได้เมื่อประมาณ 5000 ปีก่อนคริสตกาล ซึ่งเป็นช่วงก่อนที่มนุษย์จะรู้จักกับทองแดง โดยมนุษย์รู้จักทองคำเมื่อประมาณ 4000 ปีก่อนคริสตกาล โลหะทองแดงสามารถดัดได้ง่าย มีความ ถ่วงจำเพาะ 24.44 ที่อุณหภูมิ 25.0 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว 1084.6 องศาเซลเซียส จุดเดือด 2562.0 องศาเซลเซียส (19)

โลหะทองแดงมีคุณสมบัติเด่นมากมายโดยเฉพาะการนำไฟฟ้าและการนำความร้อนที่สูง มีความต้านทานการกัดกร่อน สามารถแปรรูปด้วยวิธีต่างๆ ได้ง่าย นอกจากนี้ยังมีความแข็งแรง และมีความต้านทานสูง ดังนั้นโลหะทองแดงจึงมีการนำไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง เนื่องจากทองแดงเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีการใช้ งานส่วนใหญ่จึงเกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมไฟฟ้า เช่น ใช้ทำสายไฟ เคเบิล มอเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ไดนาโม พัดลม ระบบควบคุมในโรงงาน อุปกรณ์ไฟฟ้า ระบบจ่ายกำลัง เครื่องปรับอากาศ และ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ด้วยคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อน ทองแดงจึงนำมาใช้ในการก่อสร้างหลายอย่าง เช่น ทำหลังคา ท่อน้ำและข้อต่อต่าง ๆ ระบบให้ความร้อน และระบบปรับอากาศ ใช้ทำเครื่องจักรกล เครื่องใช้ในบ้าน เนื่องจากขึ้นรูปง่ายและเนื่องจากมีความสามารถต้านทานการกัดกร่อนของน้ำทะเล และมีการถ่ายเทความร้อนสูง จึงใช้ทำท่อวาล์ว ข้อต่อในโรงกลั่นน้ำจากน้ำทะเล อุปกรณ์แลกเปลี่ยน ความร้อน และเครื่องมือกลอื่น ๆ ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์และชิ้นส่วนเครื่องบิน เรือเดินสมุทร หัวจักรรถไฟ อุปกรณ์สวิตช์และสัญญาณ

ต่าง ๆ การใช้ประโยชน์ด้านอื่น ๆ ของทองแดง เช่น ใช้ผลิตยุงฆาตภัณฑ์ ใช้ในอุตสาหกรรมเคมีเครื่องวัดต่าง ๆ เครื่องประดับ เครื่องตกแต่ง เหริยญูษาปณ์ บรรจุภัณฑ์และใช้ผลิตโลหะผสม เช่น ทองเหลือง และทองสัมฤทธิ์ เป็นต้น (20)

ทองแดงเป็นแร่ธาตุชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญต่อร่างกาย มีหน้าที่หลากหลายที่ช่วยทำให้ร่างกายทำงานได้อย่างสมดุลและมีประสิทธิภาพ เป็นส่วนประกอบในเซลล์ต่าง ๆ ช่วยควบคุมระบบการทำงานของร่างกายให้เป็นปกติ โดยร่างกายต้องการทองแดงแค้ในปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับสารอาหารชนิดอื่น ดังนั้นจึงไม่ควรได้รับมากเกินไป เพราะจะทำให้เกิดความผิดปกติในร่างกายตามมา และไม่ควรได้รับน้อยเกินไปจนเกิดภาวะขาดแคลนจนเกิดผลเสียต่อสุขภาพ ทองแดงเป็นส่วนประกอบที่อยู่ในร่างกายราว 70-150 กรัม เท่านั้น พบได้ในหัวใจ ไต และสมอง เป็นหลัก อีกทั้งยังพบได้ที่ม้าม และไขกระดูกบ้างเล็กน้อย มีหน้าที่สำคัญคือช่วยป้องกันการเกิดโรคหัวใจ มีหน้าที่ช่วยขนส่งธาตุเหล็กเข้าสู่เลือด ที่ช่วยป้องกันไม่ให้เกิดภาวะเลือดจาง เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีที่เรียกว่า Catalyst ของฮีโมโกลบิน แต่ไม่ได้เป็นส่วนประกอบเพียงแค้ทำหน้าที่ในการช่วยสร้างให้ฮีโมโกลบินสมบูรณ์แบบ จึงถือว่าเป็นแร่ธาตุที่ช่วยสร้างเม็ดเลือดแดง และแหล่งอาหารที่มีแร่ธาตุทองแดงสูงจะพบได้จาก หลากหลายแหล่ง เช่น เมล็ดพันธุ์พืชที่ไม่ผ่านการขัดขาว ขนมปังโฮลวีต ผักใบเขียวเข้ม ถั่วฝักยาว ถั่วลิสงเตา อาหารทะเล ลูกพรุน และธัญพืชชนิดต่าง ๆ เป็นต้น ทองแดงนั้นเมื่อได้รับในปริมาณที่มากเกินไปจะกลายเป็นสารพิษที่ส่งผลกระทบต่อร่างกายขึ้นมาทันที แสดงอาการออกมาเป็นความรู้สึกคลื่นไส้อาเจียน ปวดกล้ามเนื้อ ปวดบริเวณกระเพาะอาหาร และทำให้เกิดโรคโลหิตจาง ได้จากการที่เม็ดเลือดแดงแตกตัว การสะสมในระยะยาวยังไปทำให้ตับทำงานหนักและมีปัญหาตามมา แม้ว่าทองแดงจะเป็นธาตุที่ร่างกาย ต้องการไม่มากนัก แต่ภาวะขาดทองแดงทำให้การเจริญเติบโตของร่างกายช้าลง มีการสลายกระบวนการสร้างเม็ดเลือดขั้นรุนแรง จนเกิดเป็นโรคโลหิตจาง นอกจากนี้ บางส่วนของเอนไซม์ที่มีทองแดงเป็นส่วนประกอบก็จะทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ ทำให้เกิดความผิดปกติและ เจ็บป่วยได้ง่ายตามมา (6)

2.2.4 สังกะสี

มนุษย์รู้จักนำสังกะสีมาใช้ประโยชน์ ตั้งแต่สมัยโบราณแต่ยังไม่รู้จักสังกะสีบริสุทธิ์ รู้จักเพียงในรูปของโลหะผสมเท่านั้น การนำแร่สังกะสีบริสุทธิ์มาใช้แรกเริ่มในยุค ค.ศ. 1000 จากการถลุงในประเทศจีน และอินเดีย จนมีการพัฒนาการถลุงให้ค่อนข้างบริสุทธิ์ เรียกว่า Slab zinc หรือ Spelter ก่อนจะนำมาขายฝั่งยุโรป ในศตวรรษที่ 17 (7)

ประโยชน์และโทษต่อร่างกาย

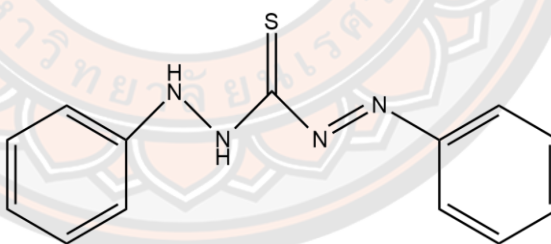
สังกะสีถือเป็นแร่ธาตุชนิดหนึ่งที่เป็นต่อร่างกาย และต้องได้รับเป็นประจำ เนื่องจากเป็นแร่ธาตุที่มีบทบาทสำคัญหลายประการต่อร่างกาย ได้แก่ ช่วยกระตุ้นการสร้างและการซ่อมแซมหนังกำพร้า ช่วยกระตุ้นการสังเคราะห์คอลลาเจน และช่วยในกระบวนการสร้างเอนไซม์ระบบภูมิคุ้มกัน การสร้างสารพันธุกรรม และการซ่อมแซมบาดแผล

ความต้องการสังกะสีของคนแต่ละช่วงวัย คือ ช่วงวัย 0-6 และ 7-12 เดือน ไม่ควรได้รับปริมาณสังกะสีเกิน 2 และ 3 มิลลิกรัมต่อวัน ช่วงวัย 1-3, 4-8, 9-13, 14-18 และ 19 ปีขึ้นไป ไม่ควรได้รับปริมาณสังกะสีเกิน 3, 5, 8, 11 และ 11 มิลลิกรัมต่อวัน ตามลำดับ

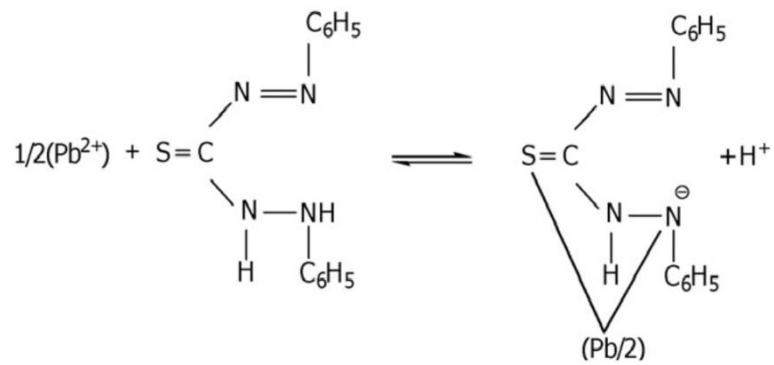
ถ้าร่างกายได้รับสังกะสีในปริมาณที่มากเกินไป จะทำให้เอนไซม์ของตับทำงานผิดปกติ และพบอาการเลือดออกบริเวณทางเดินอาหาร ตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 (พ.ศ. 2537) ได้กำหนดให้มีสังกะสีปนเปื้อนในแหล่งน้ำไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร (7)

2.3 ไดโธโซน (Dithizone)

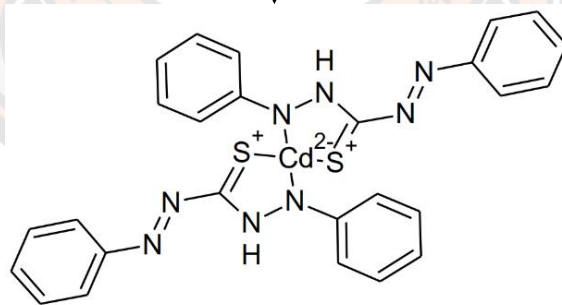
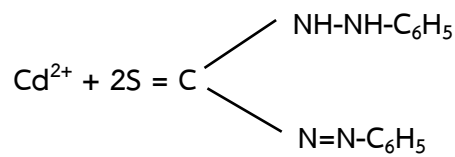
ไดโธโซนมีลักษณะเป็นผงสีเขียวน้ำเงิน ไดโธโซนไม่ละลายน้ำและกรดเจือจาง แต่ละลายได้ในเอทานอล เมทานอล คลอโรฟอร์ม และคาร์บอนเตตระคลอไรด์ ไดโธโซนจะถูกออกซิไดซ์ด้วยอากาศและจะสลายตัวเมื่อถูกแสงในตัวทำละลายอินทรีย์ การเกิดออกซิเดชันนั้นจะกลายเป็น diphenylthiocarbodiazone มีผลทำให้สารละลายเปลี่ยนสีกลายเป็นสีเหลือง เมื่อไดโธโซนทำปฏิกิริยากับโลหะหนักจะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้น้อย และมีสีที่ขึ้นอยู่กับว่าเป็นโลหะชนิดใดและอยู่ในสภาวะที่มีพีเอชและบัฟเฟอร์ชนิดใด จะเรียกสารประกอบที่เกิดขึ้นนี้ว่า dithizonate และจะเรียกโลหะหนักว่า dithizone metals ไดโธโซนถูกนำมาวิเคราะห์หาแร่ธาตุหลายชนิด ซึ่งเป็นไปตามโครงสร้างที่เชื่อมโยงกับไอออนและองค์ประกอบอื่น ๆ คุณสมบัติทางกายภาพเป็นผลึกสีฟ้าอมดำของ $C_{12}H_{10}N_4S$ ดังภาพ 5 (21) และการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโลหะหนักต่าง ๆ ได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และสังกะสีกับไดโธโซนจะเกิดในอัตราส่วน 1:2 ดังภาพ 6 7 8 และ 9 ตามลำดับ



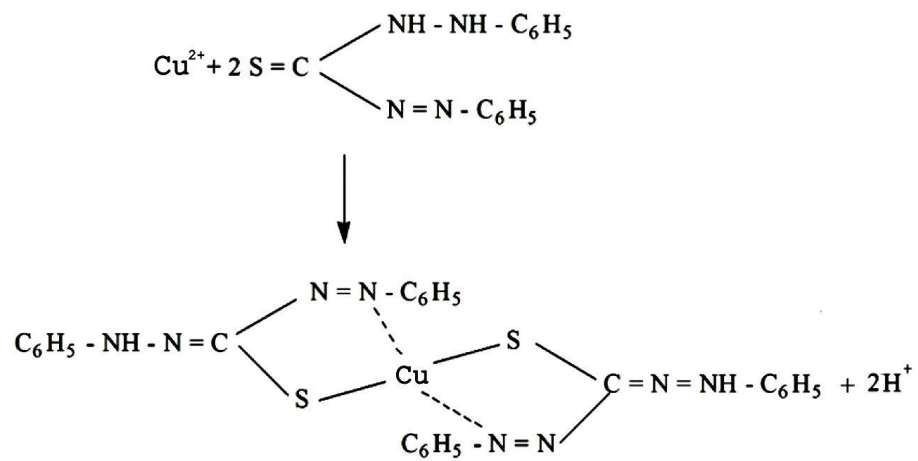
ภาพ 5 ลักษณะโครงสร้างของไดโธโซน (22)



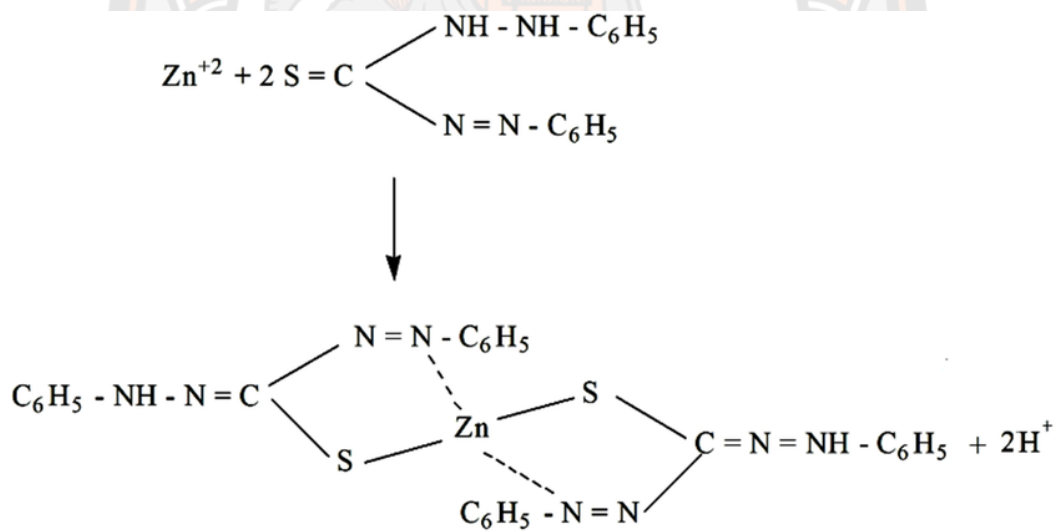
ภาพ 6 การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างตะกั่วกับไดไฮโซน (23)



ภาพ 7 การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแคดเมียมกับไดไฮโซน (24)



ภาพ 8 การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างทองแดงกับไดโรโซน (25)

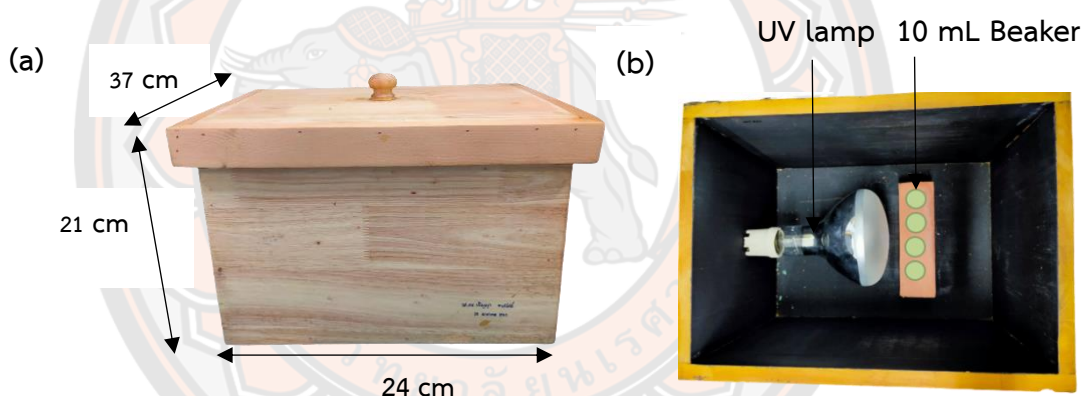


ภาพ 9 การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสังกะสีกับไดโรโซน (25)

2.4 การย่อยด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต

อาศัยหลักการโฟโตไลซิส (Photolysis) ทำให้โมเลกุลเกิดการแตกตัวด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต โดยใช้ความยาวคลื่นประมาณ 200-400 นาโนเมตร สำหรับการย่อยสารอินทรีย์จะใช้ความยาวคลื่นเท่ากับ 254 นาโนเมตร เมื่อโมเลกุลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิดการแตกตัวให้ไฮดรอกซิลเรดิคัลและออกซีเรดิคัลออกมาเข้าทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ในส่วนไฮโดรเจนอะตอมภายในโมเลกุล ทำให้เกิดน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ และสารประกอบเล็ก ๆ จำนวนมากในสารตัวอย่าง (26)

การศึกษาในครั้งนี้อ้างอิงจากงานวิจัยของ Wongthanyakram และ Masawat (27) ซึ่งได้ย่อยโดยใช้กล่อง UV digestion มีลักษณะเป็นกล่องขนาดเท่ากับ 35 × 24 × 21 เซนติเมตร (กว้าง × ยาว × สูง) ทำด้วยไม้อัดและหุ้มด้วยหนังสือดำ ซึ่งเมื่อใช้ไปหลาย ๆ ครั้ง จะพบว่ากล่องไม่สามารถทนต่อความร้อนได้ และกล่องมีขนาดเล็กไม่สามารถใส่วางหลอดทดลองได้ดี ต่อมาจึงได้คิดปรับปรุงประสิทธิภาพกล่องสำหรับย่อยให้ดีขึ้นโดยใช้วัสดุที่ทำกล่องเป็นไม้ที่หนาขึ้นและทนความร้อนมากขึ้น อีกทั้งยังพัฒนาให้กล่องมีขนาดใหญ่ขึ้นเป็นขนาด 37 × 24 × 21 เซนติเมตร (กว้าง × ยาว × สูง) ดังภาพ 6

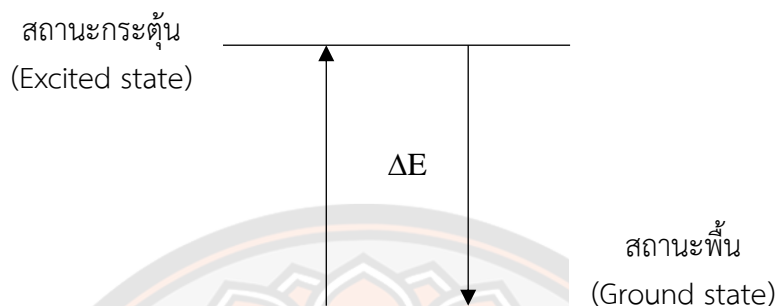


ภาพ 10 ภาพถ่ายของกล่อง UV digestion (28) โดย (a) ภายนอกกล่อง (b) ภายในกล่อง

2.5 หลักการของเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์พชัน สเปกโทรโฟโตมิเตอร์

เครื่องอะตอมมิคแอบซอร์พชัน สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer: AAS) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุ (metal element) ที่อยู่ในตัวอย่างทดสอบด้วยเทคนิคอะตอมมิคแอบซอร์พชัน สเปกโทรเมตรี ซึ่งเป็นกระบวนการที่อะตอมอิสระ (free atom) ของธาตุดูดกลืน (absorb) แสงที่มีความยาวคลื่นระดับหนึ่งโดยเฉพาะซึ่งขึ้นอยู่กับธาตุแต่ละธาตุ เนื่องจากธาตุแต่ละชนิดมีระดับของพลังงานแตกต่างกันจึงมีการดูดกลืนพลังงานได้แตกต่างกัน พลังงานที่พอดีกับคุณสมบัติเฉพาะของ

ธาตุจะทำให้อิเล็กตรอนของธาตุนั้นๆ เปลี่ยนสถานะจากสถานะพื้น (ground state) ไปเป็นสถานะกระตุ้น (excited state) (29) ดังภาพ 7



ภาพ 11 การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานจากสถานะพื้นเป็นสถานะกระตุ้น (29)

องค์ประกอบของเครื่องเฟลมอะตอมมิคแอบซอร์พชัน สเปกโตรโฟโตมิเตอร์มีส่วนประกอบ 5 ส่วน ดังภาพ 8 คือ

แหล่งกำเนิดแสง (light source)

แหล่งกำเนิดแสงโดยทั่วไป เป็นหลอดฮอลโลแคโทด (Hollow cathode lamp; HCL) ภายในหลอดจะบรรจุแก๊สเฉื่อย เช่น อาร์กอน (Ar) หรือ นีออน (Ne) และเคลือบเกลือของโลหะที่จะวิเคราะห์ไว้ที่ขั้วแคโทด โดยหลอดฮอลโลแคโทดมีทั้งแบบ วิเคราะห์ได้ธาตุเดียว (Single lamp) และแบบที่วิเคราะห์ได้หลายธาตุ (Multiple lamp)

ส่วนที่ทำให้กลายเป็นอะตอมอิสระ (Atomizer)

การทำให้เกิดอะตอมอิสระนั้น จะต้องมีการดูดกลืนพลังงานความร้อนเข้าไป ซึ่งพลังงานความร้อนดังกล่าวอาจอยู่ในรูปต่างๆ เช่น พลังงานความร้อนจากเปลวไฟ พลังงานความร้อนจากกระแสไฟฟ้า เป็นต้น โดยกระบวนการทำให้เกิดอะตอมอิสระมีดังนี้

Flame Atomization ใช้พลังงานความร้อนจากเปลวไฟทำให้เกิดอะตอมอิสระ

Electrothermal atomization Technique หรือ Graphite furnace Technique หรือ Flameless atomization Technique จะใช้พลังงานความร้อนจากกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดอะตอมอิสระ

Hydride Generation Technique จะอาศัยปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อเปลี่ยนรูปจากไอออนที่อยู่ในสารละลายให้กลายเป็นสารประกอบไฮไดรด์ที่อยู่ในสถานะแก๊ส เนื่องจาก

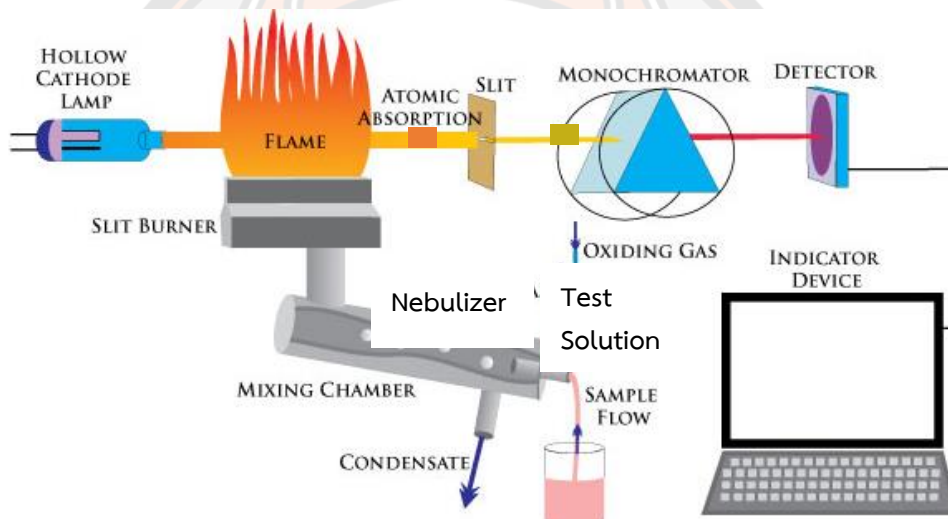
สารประกอบไฮไดรด์มีจุดเดือดที่ต่ำ สามารถระเหยเป็นแก๊สง่าย และมีธาตุเพียงไม่กี่ธาตุที่สามารถเกิดเป็นสารประกอบไฮไดรด์ได้

Cold Vapor Technique จัดเป็นวิธี flameless atomization แบบ Vapor Generation ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุบางชนิดที่เปลี่ยนเป็นไอได้ง่าย ซึ่งได้แก่ การวิเคราะห์ปรอท โดยใช้ปฏิกิริยา reduction ของสารประกอบปรอท

ส่วนแยกแสงหรือโมนโครมาเตอร์ (Monochromator) ใช้แยกแสงให้ได้ความยาวคลื่นที่ต้องการ

ส่วนวัดสัญญาณ (Detector)

เครื่องประมวลผลหรืออ่านผล



ภาพ 12 องค์ประกอบที่สำคัญของเครื่องเฟลมอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (30)

2.6 เทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอร์ิเมตรี (Digital image colorimetry ; DIC)

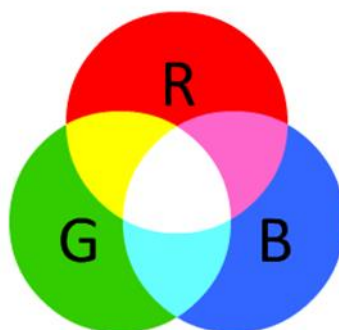
หลักการของเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอร์ิเมตรี อาศัยการถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัล แล้วประมวลผลภาพถ่ายออกมาเป็นค่าสี RGB (Red, Green and Blue) เพื่อแปลผลการวิเคราะห์ที่ได้ ออกมาเป็นปริมาณหรือความเข้มข้นของธาตุหรือสารที่สนใจในตัวอย่าง (31)

การแปลงสัญญาณภาพให้เป็นสัญญาณดิจิทัล

ใน 1 พิกเซลของอิมเมจเซ็นเซอร์มีความสามารถในการบันทึกชนิดของสีต่างๆ ได้หลายโทนสีซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของกล้องถ่ายภาพดิจิทัลนั้นๆ การบันทึกโทนสีต่างๆ แยกเป็น 3 สี คือ สีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน สีแดงถ้าใช้ 8 บิต ในการรับสัญญาณจะรับได้ 256 โทนสีแดง (0 ถึง 255) สีเขียวถ้าใช้ 8 บิต ในการรับสัญญาณ จะรับได้ 256 โทนสีเขียว (0 ถึง 255) และสีน้ำเงินถ้าใช้ 8 บิต ในการรับสัญญาณจะรับได้ 256 โทนสีน้ำเงิน (0 ถึง 255) บิตเป็นหน่วยของสัญญาณดิจิทัล โดย 1 บิต มีสัญญาณดิจิทัลได้ 2 ชนิด คือ 0 หรือ 1 ดังนั้น 8 บิต จะมีสัญญาณดิจิทัลเท่ากับ 2 ยกกำลัง 8 ซึ่งมีค่าเท่ากับ $256 \times 256 \times 256$ เท่ากับ 16.7 ล้านสี และถ้าใช้ซีซีดีชนิดที่มีจำนวนพิกเซลเท่ากับ 2 ล้านพิกเซลหรือ 2 เมกะพิกเซลในการถ่ายภาพหนึ่งภาพ แต่ละพิกเซลใช้ 3 ไบต์ (8 บิต เท่ากับ 1 ไบต์) ในการเก็บชนิดของค่าสีต่างๆ ดังนั้นในการถ่ายภาพ 1 ภาพ จะต้องใช้เนื้อที่ในการเก็บข้อมูลเท่ากับ 3×2 เมกะไบต์ หรือ ประมาณ 6 เมกะไบต์ ซึ่งจะใช้เนื้อที่ในการเก็บบันทึกมาก จึงมีการบีบอัดข้อมูลของภาพ ให้มีขนาดเล็กลงในการบันทึกลงในหน่วยบันทึกข้อมูล (31)

ระบบสี RGB

เป็นระบบสีของแสงซึ่งเกิดจากการหักเหของแสงผ่านแท่งแก้วปริซึมเกิดแถบสีที่เรียกว่า สเปกตรัม (spectrum) สามารถแยกสีตามที่สามารถมองเห็นได้ 7 สี คือ ม่วง คราม น้ำเงิน เขียว เหลือง แสด และแดง ซึ่งเป็นพลังงานในรูปของรังสีที่มีช่วงคลื่นสายตาสถาสามารถมองเห็นได้ แสงสีม่วงมีคลื่นความถี่มากที่สุด โดยคลื่นแสงที่มีความถี่มากกว่าแสงสีม่วงเรียกว่า อัลตราไวโอเล็ต (Ultra violet) และคลื่นแสงสีแดงมีคลื่นความถี่ต่ำที่สุด โดยคลื่นแสงที่ต่ำกว่าแสงสีแดงเรียกว่า อินฟราเรด (Infrared) คลื่นแสงที่มีความถี่สูงกว่าสีม่วงและต่ำกว่าสีแดงมนุษย์ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าได้ และเมื่อศึกษาดูแล้วแสงสีทั้งหมดเกิดจากแสงสี 3 สี คือ สีแดง (Red) สีเขียว (Green) และสีน้ำเงิน (Blue) โดยทั้งสามสีถือเป็นแม่สีของแสง (31) ดังภาพ 9



ภาพ 13 ระบบสีแบบ RGB (31)

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาปริมาณโลหะหนักในตัวอย่างข้าว

Siriangkhwut et al. (1) ได้ศึกษาหาปริมาณแคดเมียมและตะกั่วในตัวอย่างข้าวไทย โดยชั่งตัวอย่างข้าวมา 0.3 กรัม เติมกรดไนตริก:เปอร์คลอริก ในอัตราส่วน 2:1 ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที ทำการย่อยตัวอย่างข้าวด้วยความร้อนโดยใช้เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic water bath) ใช้พลังงานในการอัลตราโซนิก 35 กิโลเฮิร์ตซ์ เป็นเวลา 10 นาที อุณหภูมิอยู่ที่ 70 องศาเซลเซียส ต่อมาเติมกรดไนตริก:เปอร์คลอริก ในอัตราส่วน 2:1 ปริมาตร 1 มิลลิลิตร แล้วย่อยซ้ำอีก 1 ครั้ง ภายใต้สภาวะเดิม สูดท้ายเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 35% ปริมาตร 1 มิลลิลิตร แล้วนำไปอัลตราโซนิกต่อที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที กรองสารละลายตัวอย่างที่ได้ด้วยกระดาษกรองสีในหลอดทดลอง เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 35% ปริมาตร 1 มิลลิลิตร แล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จนสารละลายตัวอย่างเกือบแห้ง เติมสารละลายบัฟเฟอร์อะซิเตทเข้มข้น 0.1 โมลาร์และเก็บสารละลายตัวอย่างที่ได้ไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอะโนดิกสทริปปิงโวลแทมเมตรี (Anodic stripping voltammetry) พบว่าช่วงความเป็นเส้นตรงของการวิเคราะห์แคดเมียมและตะกั่วมีค่าอยู่ระหว่าง 10–200 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 5–200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ มีค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดเท่ากับ 0.11 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับแคดเมียม และ 0.06 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับตะกั่ว นอกจากนี้พบว่ามีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์เท่ากับ 3.5% สำหรับแคดเมียม และ 2.3% สำหรับตะกั่ว

Oliveira et al. (2) ได้ศึกษาหาปริมาณโลหะหนักต่าง ๆ ในตัวอย่างข้าว ได้แก่ สารหนู แคดเมียม ตะกั่ว และซีลีเนียม โดยทำการย่อยตัวอย่างด้วยเครื่องย่อยสารตัวอย่างโดยใช้ความร้อน (Block digester) ร่วมกับการใช้กรดไนตริกเข้มข้น 10 มิลลิลิตร ให้ความร้อนแก่สารละลายตัวอย่างที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที ทิ้งตัวอย่างให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นเจือจางสารตัวอย่างด้วยน้ำปราศจากไอออนให้ได้ 30 มิลลิลิตร และทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแกรไฟต์เฟออร์เนซอะตอมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรเมตรี (Graphite furnace atomic absorption spectrometry) พบว่าความเข้มข้นของแคดเมียมมีค่าเท่ากับ 12.0 ± 4.0 นาโนกรัมต่อกรัม ตะกั่วมีค่าเท่ากับ 177.0 ± 64.0 นาโนกรัมต่อกรัม สำหรับความเข้มข้นของสารหนูและซีลีเนียม พบว่ามีค่าต่ำกว่าค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด ค่าร้อยละการกลับคืนของการวิเคราะห์ของสารหนู แคดเมียม ตะกั่ว และซีลีเนียม อยู่ในช่วง 80-115 มีค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดของสารหนู แคดเมียม ตะกั่ว และซีลีเนียมเท่ากับ 77.2, 1.0, 35.5 และ 192.1 นาโนกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

Ghazanfarirad et al. (32) ได้ทำการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่ว แคดเมียม และสารหนู ในข้าวนำเข้าในภาคตะวันตกของจังหวัดอาเซอร์ไบจาน ซึ่งอยู่ทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือของ

ประเทศอิหร่านและสำหรับตัวอย่างข้าวนำเข้าที่ได้นำมาวิเคราะห์นั้น มีทั้งหมด 16 ยี่ห้อ โดยมีการเตรียมตัวอย่างข้าวดังนี้ ซึ่งตัวอย่างข้าว จำนวน 10 กรัม ใส่ลงในภาชนะและปิดฝาด้วยกระดาษนาฬิกา จากนั้นทำการย่อยตัวอย่างโดยนำภาชนะนี้ไปวางไว้บนฮอทเพลทที่ร้อน ที่อุณหภูมิประมาณ 150 องศาเซลเซียส รอจนตัวอย่างแห้ง แล้วจึงย้ายภาชนะเข้าไปไว้ในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 คืน จนตัวอย่างกลายเป็นเถ้าสีขาวที่ไม่มีคาร์บอนเกิดขึ้น นำตัวอย่างออกจากตู้อบ^[14] แล้วทำการชั่งตัวอย่างที่อยู่ในรูปของซีเถ้าสีขาว จำนวน 1 กรัม ลงในภาชนะที่มีฝาปิด ขนาด 100 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารผสมระหว่างกรดไนตริกบริสุทธิ์กับ 30% ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในอัตราส่วน 1: 1 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร อย่างช้า ๆ เติมเสร็จพักตัวอย่างทิ้งไว้ 10-15 นาที แล้วนำภาชนะไปวางไว้บนหม้อหุงต้มเป็นเวลา 10 นาที จนกระทั่งส่วนผสมกลายเป็นสารละลาย และปริมาตรของสารละลายลดลงเหลือครึ่งหนึ่ง ตั้งตัวอย่างทิ้งไว้ให้เย็นลง และสุดท้ายเติมน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร นำตัวอย่างข้าวที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณของตะกั่ว สารหนู พรอท และแคดเมียม โดยใช้เครื่องแกรไฟต์เฟอเนสอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (AA240Z Zeeman, with Graphite Furnace vaporization) ที่ช่วงความยาวคลื่น 185 ถึง 900 นาโนเมตร ผลการวิจัยพบว่าตัวอย่าง 8 ยี่ห้อ มีปริมาณตะกั่ว และแคดเมียม เท่ากับ 0.916 ± 0.035 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 0.022 ± 0.027 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และมีเพียง 42% ของตัวอย่าง (ข้าว 7 ยี่ห้อ) ที่มีปริมาณสารหนู เท่ากับ 0.057 ± 0.014 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งปริมาณมาตรฐานของโลหะหนักที่อนุญาตให้มีได้ในข้าวสำหรับตะกั่ว แคดเมียม และสารหนู (มาตรฐานของอิหร่าน) กำหนดไว้ที่ 0.1, 0.2 และ 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าตัวอย่างข้าวทั้ง 15 ยี่ห้อ มีปริมาณตะกั่ว และสารหนู อยู่ในระดับที่มาตรฐานกำหนด และอีก 6.2% ของตัวอย่างข้าว (ข้าว 1 ยี่ห้อ) มีระดับแคดเมียมสูงกว่า 0.103 มิลลิกรัมต่อลิตร

Mataveli et al. (33) ได้ศึกษาหาปริมาณสารหนู แคดเมียม และตะกั่ว ในตัวอย่างข้าวของประเทศบราซิล โดยมีการเตรียมตัวอย่างด้วยเทคนิคต่าง ๆ ดังนี้ (1) ทำการเผาตัวอย่างด้วยเตาเผาไฟฟ้า โดยชั่งตัวอย่างข้าวมา 2 กรัม เติมแมกนีเซียมไนเตรท 60% 2 มิลลิลิตร นำตัวอย่างไปเผาที่อุณหภูมิ 420 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็น เติมกรดไนตริกเข้มข้น 1 มิลลิลิตร นำไปให้ความร้อนด้วยแท่นความร้อนจนสารละลายตัวอย่างเกือบแห้ง นำไปเผาด้วยเตาเผาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 420 องศาเซลเซียสอีกครั้งหนึ่ง (2) ทำการย่อยตัวอย่างด้วยเครื่องย่อยตัวอย่างแบบให้ความร้อน (Metallic block) โดยมีวิธีการคือ ชั่งตัวอย่างข้าวมา 1 กรัมใส่ในหลอดทดลอง เติมกรดไนตริกเข้มข้น 1 มิลลิลิตร และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 2 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ข้ามคืนก่อนทำการย่อยด้วยเครื่อง Metallic block ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 ชั่วโมง (3) ทำการย่อยตัวอย่างด้วยแท่นความร้อน (Hot plate) โดยชั่งตัวอย่างมา 0.5 กรัม ในขวดรูปชมพู่ เติมกรดไนตริกเข้มข้น 1 มิลลิลิตร และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 2 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ข้ามคืนก่อนทำการ

ย่อยด้วย Hot plate ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (4) ทำการย่อยตัวอย่างด้วย เครื่องไมโครเวฟ โดยชั่งตัวอย่างมา 0.5 กรัม เติมกรดไนตริกเข้มข้น 2 มิลลิลิตร ไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์ 2 มิลลิลิตร และ 4 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ข้ามคืน ก่อนนำมาย่อยด้วยเครื่องไมโครเวฟชนิดที่ใช้ใน คริวเรือนที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที 130 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 3 นาที นำตัวอย่างที่ เตรียมด้วยวิธีการต่าง ๆ ไปวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคอินดักทีฟพลาสมาแมสสเปกโตรเมตรี (inductively-coupled plasma mass spectrometry) จากการทดลองพบว่าได้ขีดจำกัดต่ำสุด ของการตรวจวัด และขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์เชิงปริมาณในช่วง 0.2-0.4 และ 0.061-0.660 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ มีค่าร้อยละการกลับคืนเท่ากับ 89.3-98.2 สำหรับการเตรียมตัวอย่าง แบบใช้เตาเผาไฟฟ้า ร้อยละการกลับคืนเท่ากับ 94.2-103, 81.0-115 และ 92.8-108 สำหรับการ ย่อยตัวอย่างด้วยเครื่อง Metallic block, Hot plate และเครื่องไมโครเวฟ ตามลำดับ

Mathew et al. (34) ได้พัฒนาการหาปริมาณตะกั่ว พรอท และ ทองแดง พร้อมกัน โดยใช้สเปกโตรโฟโตเมตรีเชิงอนุพันธ์ (Derivative spectrophotometry) โดยชั่งสารมาตรฐาน ตะกั่ว พรอท และ ทองแดง 0.1464, 0.1618 และ 0.3979 กรัมตามลำดับ จากนั้นละลายด้วยน้ำ ปราศจากไอออนและปรับให้ได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ต่อมาเตรียมสารละลายไดไฮดรอกซีโซนเข้มข้น 0.001 ร้อยละโดยมวลต่อปริมาตรละลายในคลอโรฟอร์ม และเตรียมแอมโมเนียบัฟเฟอร์ (1.00 โมลาร์) ที่พีเอช 8 นำไดไฮดรอกซีโซนที่มีการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะหนัก 3 ตัว มาวิเคราะห์โดย เทคนิคสเปกโตรโฟโตเมตรีเชิงอนุพันธ์ซึ่งเป็นวิธีที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนสเปกตรัมการดูดกลืนแสง (Absorption spectra) หรือสเปกตรัมอันดับศูนย์ (Zero order) ไปเป็นสเปกตรัมของอนุพันธ์อันดับ หนึ่ง อันดับสอง หรืออันดับสูงกว่า โดยในงานวิจัยนี้ใช้สเปกตรัมของอนุพันธ์อันดับหนึ่ง ได้ผลคือมีช่วง ความเป็นเส้นตรง อยู่ในช่วง 1-10, 1-10 และ 0.5-10 ของตะกั่ว พรอท และ ทองแดงตามลำดับ พบว่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดของตะกั่วและพรอทเท่ากับ 20 ไมโครกรัมต่อลิตร และของ ทองแดงเท่ากับ 5 ไมโครกรัมต่อลิตร นอกจากนี้พบว่ามีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ เท่ากับ 3.1, 2.6 และ 2.5 ของตะกั่ว พรอท และ ทองแดงตามลำดับ

Duarte et al. (35) ได้ทำการหาปริมาณของสังกะสีในตัวอย่างข้าวกล้อง โดยใช้ สารละลายไดไฮดรอกซีโซน พร้อมตรวจวัดด้วยโปรแกรม ImageJ ซึ่งเป็นโปรแกรมวิเคราะห์ความเข้มของสี ในระบบ RGB ที่ถ่ายจากกล้องสเตอริโอโคปิคัม ไมโครสโคป ก่อนจะนำไปวัดค่าสี RGB และมีการ เตรียมตัวอย่างข้าวกล้องคือ นำเมล็ดข้าวไปอบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส จนกระทั่งข้าวมีน้ำหนัก คงที่ จากนั้นนำข้าวกล้อง 100 มิลลิกรัม ไปย่อยด้วยกรดไนตริกเข้มข้น 4 มิลลิลิตร และกรดเปอร์ คลอริก (HClO₄) 2 มิลลิลิตร (คิดเป็น 2:1 ต่อน้ำหนักข้าวที่ชั่งมา) โดยย่อยที่อุณหภูมิ 120 องศา เซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยมีการย่อยใบมะเขือเทศ และแบ่งข้าว เพื่อเปรียบเทียบ และให้ได้ การวิเคราะห์ที่ถูกต้อง เชื่อถือได้ จากการวิเคราะห์ดังกล่าวพบสังกะสีในตัวอย่างข้าวกล้องจากแถบ

บราซิลเท่ากับ 33.38 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ดังนั้นวิธีการวิเคราะห์สังกะสีด้วยโปรแกรม ImageJ ร่วมกับการทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่มีสีด้วยไดไฮโซน สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวดเร็ว ง่าย และประหยัด

Wang et al. (36) ได้ศึกษาหาปริมาณตะกั่วและแคดเมียมในตัวอย่างข้าวของประเทศจีน โดยมีการเตรียมตัวอย่างข้าวดังนี้ นำตัวอย่างข้าวไปอบเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นบดตัวอย่างให้ละเอียดจนเป็นผง ชั่งตัวอย่างข้าวมา 1 กรัม ละลายตัวอย่างด้วยกรดไนตริกเข้มข้น ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ใช้การย่อยด้วยเตาให้ความร้อนจนสารละลายเกือบแห้ง จากนั้นเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ย่อยจนเกือบแห้งอีกครั้ง แล้วมาละลายสารตัวอย่างด้วยกรดอะซิติกเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 20 มิลลิลิตร ทำการกรองสารละลายตัวอย่างที่ได้ก่อนทำปรับค่า pH ให้ได้ 4.5 ด้วยการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ นำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสแควร์เวฟอะโนดิกสทริปปิงโวลแทมเมตรี (Square wave anodic stripping voltammetry) จากการทดลองพบว่ามีช่วงความเป็นเส้นตรงของการวิเคราะห์ตะกั่วและแคดเมียมอยู่ในช่วง 1.0-80.0 ไมโครกรัมต่อลิตร มีค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดของการวิเคราะห์ตะกั่วและแคดเมียมเท่ากับ 0.08 และ 0.10 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

2.7.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการย่อยด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต

Wongthanyakram and Masawat (27) ได้ศึกษาหาปริมาณตะกั่วในตัวอย่างมันสำปะหลัง โดยย่อยตัวอย่างมันสำปะหลังด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที โดยใช้กรดไนตริกเข้มข้นผสมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาตร 1.00 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง และกรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเบอร์ 5 จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปทำปฏิกิริยาเชิงซ้อนกับสารละลายไดไฮโซนเข้มข้น 0.0025 %w/v จำนวน 0.5 มิลลิลิตร โดยสารละลายที่ได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนสีชมพู และนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรี เปรียบเทียบกับเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมตรี และเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตเมตรี ผลการศึกษาพบว่า ความเข้มข้นของไดไฮโซนที่เหมาะสม คือ 0.0025 %w/v โดยมีโพพานอลเป็นตัวทำละลาย กราฟมาตรฐานมีความเข้มข้นตั้งแต่ 0.10-1.00 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าสัมประสิทธิ์สหพันธ์เท่ากับ 0.9989 มีค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด และขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์เชิงปริมาณเท่ากับ 0.0120 และ 0.0399 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ มีค่าร้อยละการกลับคืนอยู่ในช่วง 80-120 ดังนั้นการวิเคราะห์หาตะกั่วในตัวอย่างมันสำปะหลังโดยเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรีมีประสิทธิภาพ รวดเร็วและราคาถูก

Yu et al. (37) ได้ศึกษาการย่อยโดยใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับปฏิกิริยาเพนตอน สำหรับการหาปริมาณแคดเมียมในข้าวโดยใช้เทคนิคไฮโดรด์เจเนชันอะตอมมิกฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมตรี ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ปฏิกิริยาเคมีแยกธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ออกจากตัวอย่างโดยการ

เปลี่ยนธาตุนั้น ๆ ให้อยู่ในรูปของไฮโดรด์ซึ่งระเหยได้ง่าย หลังจากนั้นจึงถูกทำให้เป็นอะตอมอิสระโดยอาศัยพลังงานความร้อนจากเปลวไฟหรือกระแสไฟฟ้า โดยมีการเตรียมสารละลายก่อนการย่อย คือชั่งตัวอย่างข้าว 0.05 กรัมจากนั้นเติมสารเคมีเฟนตอนเข้มข้น 0.2 ร้อยละโดยมวลต่อปริมาตรซึ่งสารเคมี “เฟนตอน” คือสารเคมีที่ผสมกันระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับเหล็ก (Fe^{2+} , Fe^{3+}) ซึ่งทำปฏิกิริยากันได้อนุมูลอิสระไฮดรอกซิล จากนั้นเติมกรดไนตริก 0.75 ร้อยละโดยมวลต่อปริมาตร และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 18 ร้อยละโดยปริมาตรต่อปริมาตร นำตัวอย่างไปย่อยด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต เป็นเวลา 50 นาที จนสารละลายใสไม่มีสี ต่อมาแยกสารเฟนตอนที่เติมไปในตอนแรกออกด้วยแท่งแม่เหล็กจากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคไฮโดรด์เจนเนอร์เรชันอะตอมมิกฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมตรี พบว่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดเท่ากับ 0.02 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ เท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์ มีการเติมสารละลายมาตรฐานความเข้มข้น 0.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบว่าค่าร้อยละการกลับคืนอยู่ในช่วง 93.0-101

จากการค้นคว้าเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าส่วนใหญ่จะเป็นการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตเมตรี โดยอาศัยการย่อยด้วยโดยวิธีการต่าง ๆ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะเน้นวิธีการย่อยโลหะหนักโดยเครื่องย่อยด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต ก่อนการนำมาทำปฏิกิริยากับไดไฮโซน เพื่อให้สามารถทำการถ่ายภาพและประมวลผลการวิเคราะห์เป็นค่าความเข้มข้นของโลหะหนักแบบอัตโนมัติ และจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ยังไม่พบว่ามีบททดลองเกี่ยวกับอุปกรณ์และแอปพลิเคชันที่สามารถตรวจวัดค่าสีของโลหะหนักหลายชนิดในตัวอย่างข้าวได้แบบอัตโนมัติให้จบเสร็จสิ้นเพียงแค่การใช้แอปพลิเคชันเท่านั้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงจะเป็นงานวิจัยใหม่ที่จะได้มีวิธีการย่อยด้วยเครื่องย่อยด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต และทำการวิเคราะห์ด้วยระบบการถ่ายภาพเพื่อตรวจวัดค่าสีของสารตัวอย่างผ่านแอปพลิเคชันที่ปฏิบัติการในระบบไอโอเอส (iOS) และประยุกต์ใช้ในการหาโลหะหนักในตัวอย่างข้าว และมีเป้าหมายเพื่อพัฒนาวิธีการย่อยและการวิเคราะห์หาโลหะหนักให้สามารถวิเคราะห์ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ สะดวกและรวดเร็ว ค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ต่ำเมื่อเทียบกับการวิเคราะห์โดยเครื่องมือราคาแพง ขนาดใหญ่ และมีการใช้สารเคมีที่มากมาย

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้ได้อธิบายเกี่ยวกับวิธีการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่าง ๆ ในการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักต่างๆ ได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และสังกะสี โดยเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรี โดยใช้ไดโรวีโชนเป็นตัวทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อน ซึ่งสภาวะที่ทำการศึกษา ได้แก่ ตัวทำละลายที่เหมาะสมในการละลายไดโรวีโชน ความเข้มข้นของไดโรวีโชน ปริมาตรของไดโรวีโชน ค่าพีเอชในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

3.1 กลุ่มตัวอย่าง

ตัวอย่างข้าวต่าง ๆ ได้แก่ ข้าวหอมมะลิ 100% ข้าวกล้อง และข้าวไรซ์เบอร์รี่

3.2 อุปกรณ์และสารเคมี

3.2.1 อุปกรณ์

1. เครื่อง Atomic Absorption Spectrometer (AAS), PerkinElmer AAnalyst 200, U.S.A.
2. ตู้อบลมร้อน (Oven), Model UNB 500, Memmert, Germany
3. เครื่องอัลตราโซนิค (Ultrasonicator), Elma S 30H Elmasonic, Germany
4. เครื่องวัดค่าพีเอช 827 pH lap, Metrohm, Switzerland
5. เครื่องทำน้ำปราศจากไอออน, Milli Q Integral 3, Merck, Germany
6. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง, Model BS2245, Sartorius, U.S.A.
7. บีกเกอร์ ขนาด 10, 25, 50, 100 มิลลิลิตร, Duran, Germany
8. ขวดปรับปริมาตร ขนาด 5,10, 25, 50 มิลลิลิตร, Duran, Germany
9. ปิเปต ขนาด 1, 2, 5, 10 มิลลิลิตร, PRECICOROR HBG, Germany
10. ไมโครปิเปต ขนาด 2-20 ไมโครลิตร, NICHIRYO Le, Japan
11. ไมโครปิเปต ขนาด 100-1000 ไมโครลิตร, Bravo P-0156, CAPP, Denmark
12. หลอดไมโครเซนติฟิวก์ ขนาด 1.5 มิลลิลิตร, QSP, U.S.A.
13. กระจกตวง ขนาด 10, 25 มิลลิลิตร, JSGW, India
14. ซ้อนตักสารสแตนเลส
15. หลอดหยดสาร
16. แท่งแก้วคนสาร
17. ขวดสีชา

3.2.2 สารเคมี

1. สารละลายมาตรฐานตะกั่วความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร, Merck, Germany
2. สารละลายมาตรฐานแคดเมียมความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร, Merck, Germany
3. สารละลายมาตรฐานทองแดงความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร, Merck, Germany
4. สารละลายมาตรฐานสังกะสีความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร, Merck, Germany
5. ไตไฮโซน : $C_{13}H_{12}N_4S$ มวลโมเลกุล 256.32 กรัมต่อโมล, Sigma-Aldrich, U.S.A.
6. เอทานอล : C_2H_5OH มวลโมเลกุล 46.07 กรัมต่อโมล, AR grade, RCL Labscan, Thailand
7. โพรพานอล : C_3H_7OH , มวลโมเลกุล 60.10 กรัมต่อโมล, AR grade, RCL Labscan, Thailand
8. กรดไนตริก : HNO_3 , มวลโมเลกุล 63.01 กรัมต่อโมล, 65%, AR grade, RCL Labscan, Thailand
9. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ : H_2O_2 , มวลโมเลกุล 34.01 กรัมต่อโมล, 30%, Merck, Germany
10. กรดซัลฟิวริก : H_2SO_4 , มวลโมเลกุล 98.08 กรัมต่อโมล, 96%, AR grade, UNIVAR, Ajax Finechem, Australia
11. กรดไฮโดรคลอริก : HCl , มวลโมเลกุล 36.46 กรัมต่อโมล, 37%, AR grade, RCL Labscan, Thailand
12. โพแทสเซียมคลอไรด์ : KCl , มวลโมเลกุล 74.55 กรัมต่อโมล, AR grade, UNIVAR, Ajax Finechem, Australia
13. กรดอะซิติก : CH_3COOH , มวลโมเลกุล 60.05 กรัมต่อโมล, AR grade, RCL Labscan, Thailand
14. โซเดียมอะซิเตท : CH_3COONa , มวลโมเลกุล 82.03 กรัมต่อโมล, CARLO ERBA, Italy

3.3.3 เตรียมสารละลายไดไฮโดรเจนความเข้มข้นต่าง ๆ

เตรียมไดไฮโดรเจนให้มีความเข้มข้นต่าง ๆ โดยปิเปตสารละลายไดไฮโดรเจนความเข้มข้น 0.1 %w/v มา 0.5, 1.25, 2.5, และ 5.00 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วเติมโพพานอลจนถึงขีดปรับปริมาตร ซึ่งจะได้ไดไฮโดรเจนที่มีความเข้มข้น 0.001, 0.0025, 0.005 และ 0.01 %w/v ตามลำดับ

3.3.4 เตรียมสารละลายอะซีเตทบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร พีเอช 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0 และ 5.5

ปิเปตกรดอะซีติกความเข้มข้น 17.32 โมลต่อลิตร จำนวน 0.053, 0.046, 0.038, 0.031, 0.021 และ 0.007 มิลลิลิตร และซิงโซเดียมอะซีเตท จำนวน 0.0064, 0.0174, 0.0288, 0.0377, 0.0516 และ 0.0713 กรัม ตามลำดับ ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน จากนั้นนำไปผสมกับกรดอะซีติกในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำปราศจากไอออนจนถึงขีดปรับปริมาตร ซึ่งจะได้สารละลายอะซีเตทบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร พีเอช 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0 และ 5.5 ตามลำดับ

3.3.5 เตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

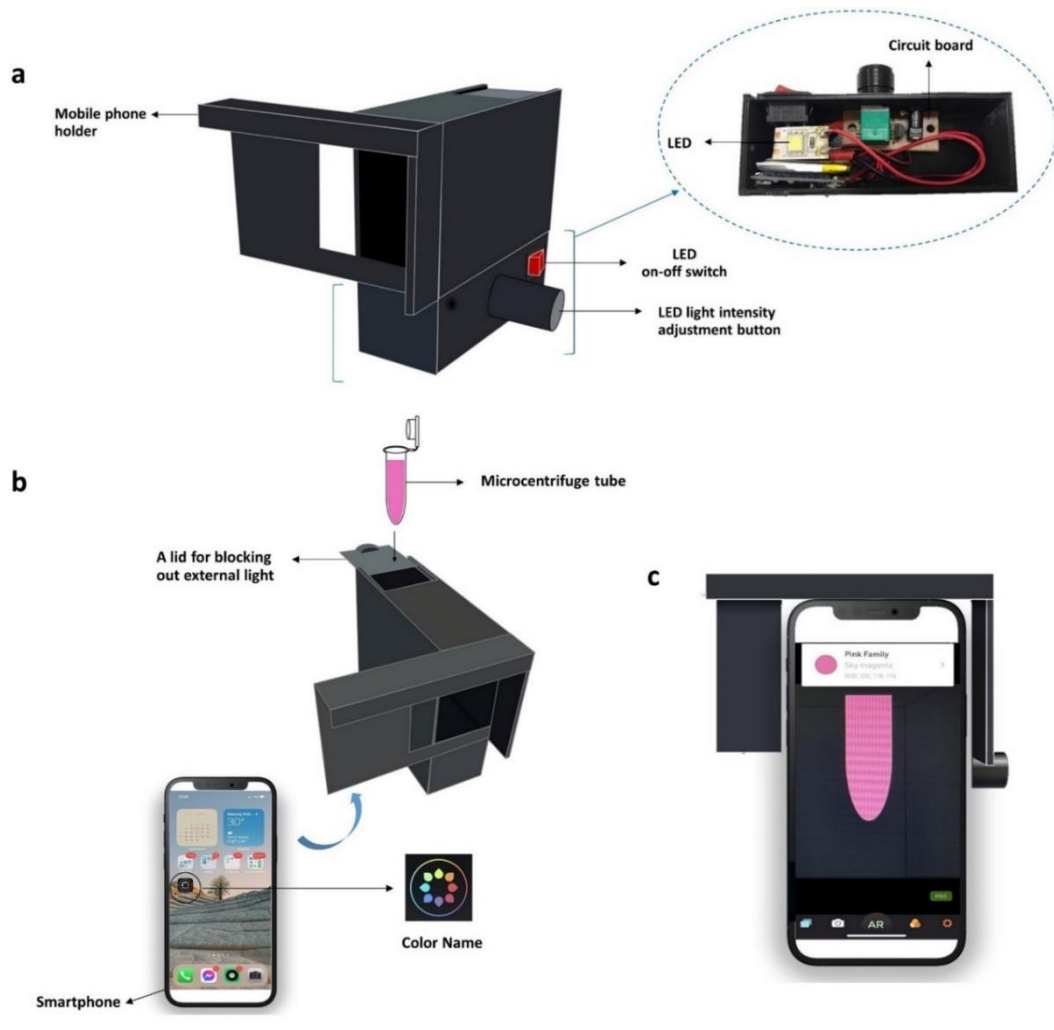
ปิเปตกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 11.80 โมลต่อลิตร จำนวน 0.085 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร เติมน้ำปราศจากไอออนจนถึงขีดปรับปริมาตร

3.3.6 เตรียมสารละลายคลอไรด์บัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.0025 โมลต่อลิตร พีเอช 2.0

ปิเปตสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร จำนวน 2.98 มิลลิลิตร และซิงโซเดียมคลอไรด์จำนวน 0.1643 กรัม ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน จากนั้นนำไปผสมกับกรดไฮโดรคลอริกในขวดปรับปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน

3.4 เครื่องดิจิทัลอิมเมจคัลเลอร์มิเตอร์ (Digital Image Colorimeter; DIC)

หลักการของเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอร์มิเตอร์จะอาศัยภาพที่ถ่ายด้วยกล้องดิจิทัล แล้วประมวลผล ภาพถ่ายดิจิทัลที่ได้โดยอาศัยการวัดค่าสีแดง เขียว และน้ำเงิน (Red Green and Blue: RGB) เพื่อแปลผล การวิเคราะห์ที่ได้ออกมาเป็นปริมาณหรือความเข้มข้นของสารที่สนใจในตัวอย่าง เครื่องมือที่ใช้ในเทคนิค ดิจิทัลอิมเมจคัลเลอร์มิเตอร์ ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 2 ส่วน คือ กล้องดิจิทัล และส่วนที่ใช้ในการประมวลผล หรือวัดค่าสีซึ่งอาจเป็นโปรแกรมหรือซอฟต์แวร์ที่เขียนขึ้นโดยเฉพาะ การประยุกต์ใช้นั้น ๆ ซึ่งในส่วนของงานวิจัยนี้ เครื่องดิจิทัลอิมเมจคัลเลอร์มิเตอร์ได้ใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่ในการถ่ายภาพสีของสารละลายผ่านแอปพลิเคชัน Color Name ซึ่งทำงานในระบบปฏิบัติการไอโอเอสในการประมวลผลค่าสี ดังภาพ 10 สำหรับเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอร์มิเตอร์เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูง ประหยัด และที่สำคัญใช้เวลาสั้นในการวิเคราะห์



ภาพ 14 เครื่องดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริมิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ (38)

3.5 การเตรียมตัวอย่างข้าว

นำตัวอย่างข้าวที่ได้ มาอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็นเป็นเวลา 15 นาที แล้วนำมาปั่นด้วยเครื่องปั่นอาหารจนละเอียด และเก็บตัวอย่างในโถดูดความชื้น เพื่อรอการวิเคราะห์ต่อไป

3.6 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.6.1 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายภาพสีของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างตะกั่วกับไดไฮโซนด้วยเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรี

1. ศึกษาความเข้มข้นของไดไฮโซน

เตรียมไดไฮโซนความเข้มข้น 0.0015, 0.0025, 0.005 และ 0.01 %w/v โดยการปิเปตจากสารละลายไดไฮโซนเข้มข้น 0.1 %w/v แล้วปรับปริมาตรด้วยโพรพานอลเข้มข้น ต่อมาเตรียมสารละลายมาตรฐานตะกั่วเข้มข้น 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปิเปตจากสารละลายมาตรฐานตะกั่วความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิตร ตามลำดับลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยเอทานอล ดังตาราง 2

ตาราง 2 ชุดการทดลองที่ใช้ศึกษาของเข้มข้นของไดไฮโซน สำหรับการหาปริมาณตะกั่ว

ชุดการทดลอง ที่	สารละลาย ไดไฮโซนเข้มข้น (%w/v)	ปริมาตรของไดไฮ โซน (มิลลิลิตร)	สารละลาย มาตรฐานตะกั่ว เข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	สารปรับปริมาตร
1	0.001	1	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล
	0.0025	1	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล
	0.005	1	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล
	0.01	1	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล

2. ศึกษาปริมาณของไดไฮโซน

เตรียมสารละลายมาตรฐานตะกั่วความเข้มข้น 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปิเปตจากสารละลายมาตรฐานตะกั่วความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายไดไฮโซนที่ความเข้มข้น 0.0025 %w/v ปริมาตร 0.50, 1.00, 1.25 และ 1.50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยเอทานอล ดังตาราง 3

ตาราง 3 ชุดการทดลองที่ใช้ศึกษาปริมาณของไดไฮโซน สำหรับการหาปริมาณตะกั่ว

ชุดการทดลอง ที่	สารละลาย ไดไฮโซนเข้มข้น (%w/v)	ปริมาณของไดไฮ โซน (มิลลิลิตร)	สารละลาย มาตรฐานตะกั่ว เข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	สารปรับปริมาตร
2	0.0025	0.50	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล
	0.0025	1.00	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล
	0.0025	1.25	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล
	0.0025	1.5	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล

3.6.2 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายภาพสีของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแคดเมียมกับไดไฮโดรโซนด้วยเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรี

1. ศึกษาความเข้มข้นของไดไฮโดรโซน

เตรียมไดไฮโดรโซนความเข้มข้น 0.0015, 0.0025, 0.005 และ 0.01 %w/v โดยการปิเปตจากสารละลายไดไฮโดรโซนเข้มข้น 0.1 %w/v แล้วปรับปริมาตรด้วยโพทานอลเข้มข้น ต่อมาเตรียมสารละลายมาตรฐานแคดเมียมเข้มข้น 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปิเปตจากสารละลายมาตรฐานแคดเมียมความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิลิตร ตามลำดับ ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายอะซิเตทบัฟเฟอร์พีเอช 5 ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร จำนวน 0.5 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยเอทานอล ดังตาราง 4

ตาราง 4 ชุดการทดลองที่ใช้ศึกษาของเข้มข้นของไดไฮโดรโซน สำหรับการหาปริมาณแคดเมียม

ชุดการทดลอง ที่	สารละลายไดไฮโดร โซนเข้มข้น (%w/v)	ปริมาตรของไดไฮโดร โซน (มิลลิลิตร)	สารละลาย มาตรฐาน แคดเมียมเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	สารปรับปริมาตร
3	0.001	1	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล
	0.0025	1	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล
	0.005	1	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล
	0.01	1	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล

2. ศึกษาปริมาณของไดไฮโซน

เตรียมสารละลายมาตรฐานแคดเมียมความเข้มข้น 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปิเปตจากสารละลายมาตรฐานแคดเมียมความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร เติมสารละลายอะซิเตทบัฟเฟอร์พีเอช 5 ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร จำนวน 0.5 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายไดไฮโซนที่ความเข้มข้น 0.005 %w/v ปริมาตร 0.50, 1.00, 1.25 และ 1.50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยเอทานอล ดังตาราง 5

ตาราง 5 ชุดการทดลองที่ใช้ศึกษาปริมาณของไดไฮโซน สำหรับการหาปริมาณแคดเมียม

ชุดการทดลอง ที่	สารละลาย ไดไฮโซนเข้มข้น (%w/v)	ปริมาตรของไดไฮ โซน (มิลลิลิตร)	สารละลาย มาตรฐาน แคดเมียมเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	สารปรับปริมาตร
4	0.005	0.50	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล
	0.005	1.00	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล
	0.005	1.25	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล
	0.005	1.5	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล

3. ศึกษาบัฟเฟอร์ที่ระดับพีเอชต่าง ๆ

เตรียมสารละลายมาตรฐานแคดเมียมความเข้มข้น 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปิเปตจากสารละลายมาตรฐานแคดเมียมความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร เติมสารละลายบัฟเฟอร์ที่ระดับพีเอช 3, 4, 5 และ 5.5 ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร จำนวน 0.5 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายไดไฮดรอกซีอะลูมิเนียมที่ความเข้มข้น 0.005 %w/v ปริมาตร 1.50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยเอทานอล ดังตาราง 6

ตาราง 6 ชุดการทดลองที่ใช้ศึกษาอะซิติเตดบัฟเฟอร์ที่พีเอชต่าง ๆ สำหรับการหาปริมาณแคดเมียม

ชุดการทดลองที่	สารละลายไดไฮดรอกซีอะลูมิเนียม (%w/v)	ปริมาตรของไดไฮดรอกซีอะลูมิเนียม (มิลลิลิตร)	ระดับพีเอช	ปริมาตรของสารละลายอะซิติเตดบัฟเฟอร์ (มิลลิลิตร)	สารละลายมาตรฐานแคดเมียมเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	สารที่ใช้ปรับปริมาตร
5	0.005	1.50	3.0	0.50	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล
	0.005	1.50	4.0	0.50	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล
	0.005	1.50	5.0	0.50	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล
	0.005	1.50	5.5	0.50	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล

4. ศึกษาปริมาณของบัพเฟอร์

เตรียมสารละลายมาตรฐานแคดเมียมความเข้มข้น 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปิเปตจากสารละลายมาตรฐานแคดเมียมความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร เติมสารละลายอะซิเตทบัฟเฟอร์พีเอช 5 ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ปริมาตร 0.50, 1.00, 1.25 และ 1.50 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายไดไฮโซนที่ความเข้มข้น 0.005 %w/v ปริมาตร 1.50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยเอทานอล ดังตาราง 7

ตาราง 7 ชุดการทดลองที่ใช้ศึกษาปริมาณของบัพเฟอร์ สำหรับการหาปริมาณแคดเมียม

ชุดการทดลองที่	สารละลายไดไฮโซนเข้มข้น (%w/v)	ปริมาณของไดไฮโซน (มิลลิลิตร)	ระดับพีเอช	ปริมาณของสารละลายอะซิเตทบัฟเฟอร์ (มิลลิลิตร)	สารละลายมาตรฐานแคดเมียมเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	สารที่ใช้ปรับปริมาตร
6	0.005	1.50	5.0	0.50	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล
	0.005	1.50	5.0	1.00	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล
	0.005	1.50	5.0	1.25	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล
	0.005	1.50	5.0	1.50	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล

3.6.3 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายภาพสีของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างทองแดงกับไดไฮโดรโซนด้วยเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรี

1. ศึกษาความเข้มข้นของไดไฮโดรโซน

เตรียมไดไฮโดรโซนความเข้มข้น 0.0015, 0.0025, 0.005 และ 0.01 %w/v โดยการปิเปตจากสารละลายไดไฮโดรโซนเข้มข้น 0.1 %w/v แล้วปรับปริมาตรด้วยโพพานอลเข้มข้น ต่อมาเตรียมสารละลายมาตรฐานทองแดงเข้มข้น 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปิเปตจากสารละลายมาตรฐานทองแดงความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิตร ตามลำดับลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิตร จากนั้นเติมสารละลายคลอไรด์บัพเฟอร์พีเอช 2 ความเข้มข้น 0.0025 โมลต่อลิตร จำนวน 1.5 มิลลิตร และปรับปริมาตรด้วยเอทานอล ดังตาราง 8

ตาราง 8 ชุดการทดลองที่ใช้ศึกษาของเข้มข้นของไดไฮโดรโซน สำหรับการหาปริมาณทองแดง

ชุดการทดลอง ที่	สารละลาย ไดไฮโดรโซนเข้มข้น (%w/v)	ปริมาตรของไดไฮ โซน (มิลลิลิตร)	สารละลาย มาตรฐานทองแดง เข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	สารปรับปริมาตร
7	0.001	1	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล
	0.0025	1	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล
	0.005	1	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล
	0.01	1	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล

2. ศึกษาปริมาณของไดไฮโซน

เตรียมสารละลายมาตรฐานทองแดงความเข้มข้น 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปิเปตจากสารละลายมาตรฐานทองแดงความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร เติมสารละลายคลอไรด์บัฟเฟอร์พีเอช 2 ความเข้มข้น 0.0025 โมลต่อลิตร จำนวน 1.5 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายไดไฮโซนที่ความเข้มข้น 0.005 %w/v ปริมาตร 0.50, 1.00, 1.25 และ 1.50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยเอทานอล ดังตาราง 9

ตาราง 9 ชุดการทดลองที่ใช้ศึกษาปริมาณของไดไฮโซน สำหรับการปริมาณทองแดง

ชุดการทดลอง ที่	สารละลาย ไดไฮโซนเข้มข้น (%w/v)	ปริมาณของไดไฮ โซน (มิลลิลิตร)	สารละลาย มาตรฐานทองแดง เข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	สารปรับปริมาตร
8	0.005	0.50	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล
	0.005	1.00	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล
	0.005	1.25	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล
	0.005	1.5	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล

3. ศึกษาบัฟเฟอร์ที่ระดับพีเอชต่าง ๆ

เตรียมสารละลายมาตรฐานทองแดงความเข้มข้น 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปิเปตจากสารละลายมาตรฐานทองแดงความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร เติมสารละลายบัฟเฟอร์ที่ระดับพีเอช 2, 3.5, 4.5 และ 5.5 ความเข้มข้น 0.0025 โมลต่อลิตร จำนวน 1.5 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายไดไฮดรอกซีอะลูมิเนียมที่ความเข้มข้น 0.005 %w/v ปริมาตร 1.50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยเอทานอล ดังตาราง 10

ตาราง 10 ชุดการทดลองที่ใช้ศึกษาบัฟเฟอร์ที่พีเอชต่าง ๆ สำหรับการปริมาณทองแดง

ชุดการทดลองที่	สารละลายไดไฮดรอกซีอะลูมิเนียม (%w/v)	ปริมาตรของไดไฮดรอกซีอะลูมิเนียม (มิลลิลิตร)	ระดับพีเอช	ปริมาตรของสารละลายคลอไรด์บัฟเฟอร์ (มิลลิลิตร)	สารละลายมาตรฐานทองแดงเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	สารที่ใช้ปรับปริมาตร
9	0.005	1.50	2.0	0.50	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล
	0.005	1.50	3.5	0.50	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล
	0.005	1.50	4.5	0.50	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล
	0.005	1.50	5.5	0.50	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล

4. ศึกษาปริมาณของบัพเฟอร์

เตรียมสารละลายมาตรฐานทองแดงความเข้มข้น 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปิเปตจากสารละลายมาตรฐานทองแดงความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร เติมสารละลายคลอไรด์บัพเฟอร์พีเอช 2 ความเข้มข้น 0.0025 โมลต่อลิตร ปริมาตร 0.50, 1.00, 1.25 และ 1.50 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายไดไฮโซนที่ความเข้มข้น 0.005 %w/v ปริมาตร 1.50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยเอทานอล ดังตาราง 11

ตาราง 11 ชุดการทดลองที่ใช้ศึกษาปริมาณของบัพเฟอร์ สำหรับการหาปริมาณทองแดง

ชุดการทดลองที่	สารละลายไดไฮโซน (%w/v)	ปริมาณของไดไฮโซน (มิลลิลิตร)	ระดับพีเอช	ปริมาณของสารละลายคลอไรด์บัพเฟอร์ (มิลลิลิตร)	สารละลายมาตรฐานทองแดงเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	สารที่ใช้ปรับปริมาตร
10	0.005	1.50	2.0	0.50	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล
	0.005	1.50	2.0	1.00	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล
	0.005	1.50	2.0	1.25	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล
	0.005	1.50	2.0	1.50	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล

3.6.4 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายภาพสีของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสังกะสีกับไดไฮโซนด้วยเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรี

1. ศึกษาความเข้มข้นของไดไฮโซน

เตรียมไดไฮโซนความเข้มข้น 0.0015, 0.0025, 0.005 และ 0.01 %w/v โดยการปิเปตจากสารละลายไดไฮโซนเข้มข้น 0.1 %w/v แล้วปรับปริมาตรด้วยโพรพานอลเข้มข้น ต่อมาเตรียมสารละลายมาตรฐานสังกะสีเข้มข้น 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปิเปตจากสารละลายมาตรฐานสังกะสีความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิลิตร ตามลำดับลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายอะซิเตทบัฟเฟอร์พีเอช 4.5 ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร จำนวน 0.5 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยเอทานอล ดังตาราง 12

ตาราง 12 ชุดการทดลองที่ใช้ศึกษาของเข้มข้นของไดไฮโซน สำหรับการหาปริมาณสังกะสี

ชุดการทดลอง ที่	สารละลาย ไดไฮโซนเข้มข้น (%w/v)	ปริมาตรของ ไดไฮโซน (มิลลิลิตร)	สารละลาย มาตรฐานสังกะสี เข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	สารปรับปริมาตร
11	0.001	1	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล
	0.0025	1	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล
	0.005	1	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล
	0.01	1	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล

2. ศึกษาปริมาณของไดไฮโซน

เตรียมสารละลายมาตรฐานสังกะสีความเข้มข้น 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปิเปตจากสารละลายมาตรฐานสังกะสีความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นอะซิเตทบัฟเฟอร์พีเอช 4.5 ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร จำนวน 0.5 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำกลั่นไดไฮโซนที่ความเข้มข้น 0.005 %w/v ปริมาตร 0.50, 1.00, 1.25 และ 1.50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยเอทานอล ดังตาราง 13

ตาราง 13 ชุดการทดลองที่ใช้ศึกษาปริมาณของไดไฮโซน สำหรับการหาปริมาณสังกะสี

ชุดการทดลอง ที่	สารละลาย ไดไฮโซนเข้มข้น (%w/v)	ปริมาตรของ ไดไฮโซน (มิลลิลิตร)	สารละลาย มาตรฐานสังกะสี เข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	สารปรับปริมาตร
12	0.005 %w/v	0.50	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล
	0.005 %w/v	1.00	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล
	0.005 %w/v	1.25	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล
	0.005 %w/v	1.5	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล

3. ศึกษาบัฟเฟอร์ที่ระดับพีเอชต่าง ๆ

เตรียมสารละลายมาตรฐานสังกะสีความเข้มข้น 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปิเปตจากสารละลายมาตรฐานสังกะสีความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร เติมสารละลายบัฟเฟอร์ที่ระดับพีเอช 3.5, 4.0, 4.5 และ 5.0 ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร จำนวน 1.5 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายไดไฮโอโซนที่ความเข้มข้น 0.005 %w/v ปริมาตร 1.50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยเอทานอล ดังตาราง 14

ตาราง 14 ชุดการทดลองที่ใช้ศึกษาบัฟเฟอร์ที่พีเอชต่างๆ สำหรับการหาปริมาณสังกะสี

ชุดการทดลองที่	สารละลายไดไฮโอโซนเข้มข้น (%w/v)	ปริมาตรของไดไฮโอโซน (มิลลิลิตร)	ระดับพีเอช	ปริมาตรของสารละลายคลอไรด์บัฟเฟอร์ (มิลลิลิตร)	สารละลายมาตรฐานสังกะสีเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	สารที่ใช้ปรับปริมาตร
13	0.005	1.50	3.5	1.50	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล
	0.005	1.50	4.0	1.50	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล
	0.005	1.50	4.5	1.50	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล
	0.005	1.50	5.0	1.50	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล

4. ศึกษาปริมาณของบัพเฟอร์

เตรียมสารละลายมาตรฐานสังกะสีความเข้มข้น 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิกรัมต่อลิตร โดย ปิเปตจากสารละลายมาตรฐานสังกะสีความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร เติมสารละลายอะซิเตทบัฟเฟอร์พีเอช 4.5 ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ปริมาตร 0.50, 1.00, 1.25 และ 1.50 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายไดไฮดรอกซีความเข้มข้น 0.005 %w/v ปริมาตร 1.50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยเอทานอล ดังตาราง 15

ตาราง 15 ชุดการทดลองที่ใช้ศึกษาปริมาณของบัพเฟอร์ สำหรับการหาปริมาณสังกะสี

ชุดการทดลองที่	สารละลายไดไฮดรอกซีความเข้มข้น (%w/v)	ปริมาตรของไดไฮดรอกซี (มิลลิลิตร)	ระดับพีเอช	ปริมาตรของสารละลายคลอไรด์บัฟเฟอร์ (มิลลิลิตร)	สารละลายมาตรฐานสังกะสีความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	สารที่ใช้ปรับปริมาตร
14	0.005	1.50	4.5	0.50	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล
	0.005	1.50	4.5	1.00	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล
	0.005	1.50	4.5	1.25	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล
	0.005	1.50	4.5	1.50	0.2, 0.4, 0.8	เอทานอล

3.6.5 การศึกษาความแม่นยำของเครื่องมือ (Inter-day, Intra-day precision)

1. Inter-day precision

เตรียมสารละลายมาตรฐานโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดที่ความเข้มข้น 0.10, 0.30, 0.50, 0.70 และ 1.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังสภาวะการทดลองที่เหมาะสม พร้อมกับถ่ายภาพสีของสารละลายด้วยเครื่องดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริมิเตอร์ที่ใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่ทุกวัน วันละ 1 ชุด เป็นระยะเวลาทั้งหมด 5 วัน แล้วนำผลที่ได้มาทำการสร้างกราฟมาตรฐานแล้วหาเส้นแนวโน้มเพื่อนำค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และค่าความชัน มาคำนวณหาความแม่นยำของวิธีวิเคราะห์

2. Intra-day precision

เตรียมสารละลายมาตรฐานโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดที่ความเข้มข้น 0.10, 0.30, 0.50, 0.70 และ 1.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังสภาวะการทดลองที่เหมาะสม พร้อมกับถ่ายภาพสีของสารละลายด้วยเครื่องดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริมิเตอร์ที่ใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่ 5 ชุด ภายในวันเดียวกัน แต่คนละช่วงเวลาแล้วนำผลที่ได้ มาทำการสร้างกราฟมาตรฐานแล้วหาเส้นแนวโน้มเพื่อนำค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และค่าความชันมาคำนวณหาความแม่นยำของวิธีวิเคราะห์

3.6.6 การหาปริมาณโลหะหนักต่าง ๆ ในตัวอย่างข้าวและคาร์ร่อยละการกลับคืน (%Recovery) ของวิธีการสกัดตัวอย่างข้าวด้วยเทคนิคการย่อยแบบเปียกโดยใช้แสงอัลตราไวโอเลต (UV-digestion) (ภาพ 11)

3.6.6.1 วิเคราะห์ด้วยเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริมิเตอร์

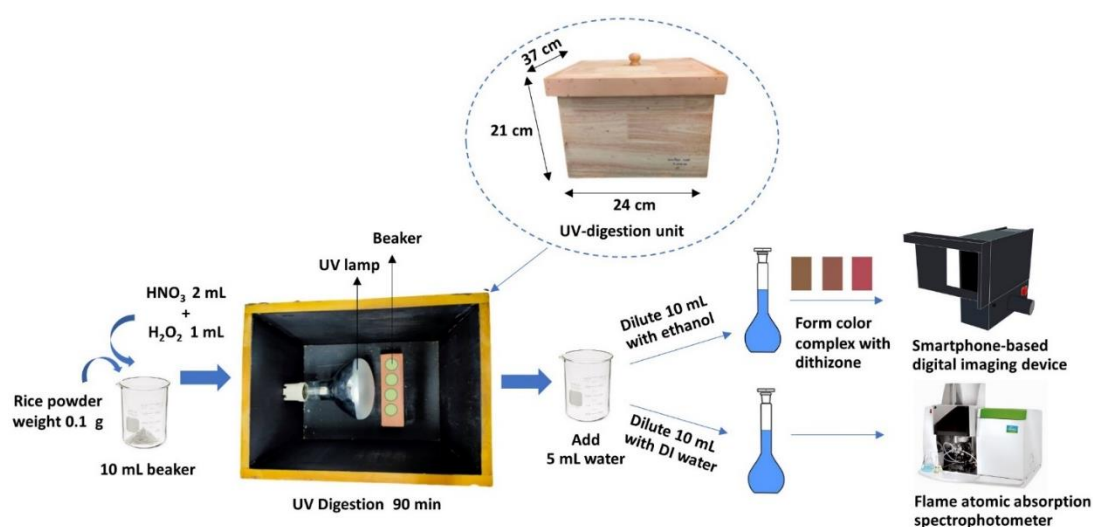
1. การย่อยตัวอย่างข้าวแบบไม่เติมสารละลายมาตรฐานโลหะหนัก ด้วยเทคนิคการย่อยแบบเปียกโดยใช้แสงอัลตราไวโอเลต

ชั่งตัวอย่างข้าว (ที่อบแล้ว) มา 0.1xxx กรัม แล้วนำมาเติมกรดไนตริกกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อัตราส่วน 2: 1 (ปริมาตร 2.00 มิลลิลิตร และ 1.00 มิลลิลิตร ตามลำดับ) โดยทำการเปิดหลอดยูวีเป็นเวลา 10 นาทีแล้วจึงนำตัวอย่างไปย่อยจนสารละลายแห้งเป็นเวลา 90 นาที จากนั้นเติมน้ำปราศจากไอออน 5.00 มิลลิลิตร และนำมาเจือจาง 10 เท่า แล้วปิเปตออกมา 0.5 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตร 10 มิลลิลิตร นำไปฟอร์มสีกับสารละลายไดโธโซน จากนั้นนำไปถ่ายภาพสีด้วยเครื่องดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริมิเตอร์ ดังภาพ 10

2. การย่อยตัวอย่างข้าวแบบเติมสารละลายมาตรฐานโลหะหนัก ด้วยเทคนิคการย่อยแบบเปียกโดยใช้แสงอัลตราไวโอเลต

ชั่งตัวอย่างข้าว (ที่อบแล้ว) มา 0.1xxx กรัม แล้วนำมาเติมกรดไนตริกกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อัตราส่วน 2: 1 (ปริมาตร 2.00 มิลลิลิตร และ 1.00 มิลลิลิตร ตามลำดับ) โดยทำการเปิดหลอดยูวีเป็นเวลา 10 นาทีแล้วจึงนำตัวอย่างไปย่อยจนสารละลายแห้งเป็นเวลา 90 นาที จากนั้นเติมน้ำปราศจากไอออน 5.00 มิลลิลิตร และนำมาเจือจาง 10 เท่า แล้วปิเปตออกมา 0.5 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตร 10 มิลลิลิตร ทำการเติมสารละลายมาตรฐานโลหะหนักได้แก่ ตะกั่ว

แคดเมียม ทองแดง และสังกะสีเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปิเปตมา จำนวน 0.30, 0.50, และ 0.70 มิลลิลิตร ตามลำดับ แล้วนำไปฟอร์มสีกับสารละลายไดธิโซน จากนั้นนำไปถ่ายภาพสีด้วยเครื่องดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริมิเตอร์



ภาพ 15 การย่อยแบบเปียกโดยใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต (UV-digestion) (35)

3.6.6.2 วิเคราะห์ด้วยเทคนิคเฟลมอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตเมตรี (Atomic Absorption Spectrophotometry)

1. การเตรียมสารละลายมาตรฐาน

เตรียมสารละลายมาตรฐานโลหะหนักได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และสังกะสี ความเข้มข้น 0.0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 และ 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการปิเปตสารละลายมาตรฐานของโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.00, 0.50, 1.50, 2.50, 3.50 และ 5.0 มิลลิลิตร ตามลำดับลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำปราศจากไอออนจนถึงขีดปรับปริมาตร

2. การเตรียมสารละลายตัวอย่างแบบไม่เติมสารละลายมาตรฐานโลหะหนัก

หลังจากทำการย่อยตัวอย่างเสร็จเรียบร้อยแล้ว ปิเปตสารตัวอย่างออกมาจำนวน 0.50 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจนถึงขีดปรับปริมาตร

3. การเตรียมสารละลายตัวอย่างแบบเติมสารละลายมาตรฐานโลหะหนักต่าง ๆ ได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และสังกะสี

หลังจากทำการย่อยตัวอย่างเสร็จเรียบร้อยแล้ว ปิเปตสารตัวอย่างออกมาจำนวน 0.50 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร จากนั้นทำการเติมสารละลาย

มาตรฐานโลหะหนักแต่ละชนิดที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปิเปตมาจำนวน 0.10, 0.30, 0.50, 0.07, และ 1.00 มิลลิลิตร ตามลำดับ แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน ส่วนของรีเอเจนต์แบลงค์จะปิเปตออกมา จำนวน 0.50 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจนถึงขีดปรับปริมาตร

3.6.7 การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดของเครื่องมือ (Limit of Detection; LOD และ Limit of Quantitation; LOQ)

นำสารละลายแบลงค์ (น้ำปราศจากไอออน) ไปตรวจวัดด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชัน สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ จำนวน 20 ครั้ง และในส่วนของเครื่องดิจิทัลจิมเมคัลเลอรีมิเตอร์นั้น จะนำสารละลาย นำสารละลายแบลงค์ไปถ่ายภาพสี จำนวน 20 ครั้ง จากนั้นนำค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ที่ได้จากการทดลองของเครื่องมือทั้ง 2 เครื่องมือ ไปคำนวณหาค่า LOD และ LOQ ดังสมการ

$$\text{LOD} = \frac{3 \times \text{SD(Blank)}}{\text{Slope}} \dots\dots\dots (3.1)$$

$$\text{LOQ} = \frac{10 \times \text{SD(Blank)}}{\text{Slope}} \dots\dots\dots (3.2)$$

3.6.8 การศึกษาตัวรบกวน (Interference)

1. ศึกษาตัวรบกวนของตะกั่วที่มีโลหะหนักอื่น ๆ รบกวน

เตรียมสารละลายมาตรฐานตะกั่วเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปิเปตจากสารละลายมาตรฐานตะกั่วความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร จากนั้นเติมโลหะหนักรบกวน (แคดเมียม ทองแดง สังกะสี) เข้มข้น 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร เติมไดไฮโซนความเข้มข้น 0.0025 %(w/v) ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยเอทานอล

2. ศึกษาตัวรบกวนของแคดเมียมที่มีโลหะหนักอื่น ๆ รบกวน

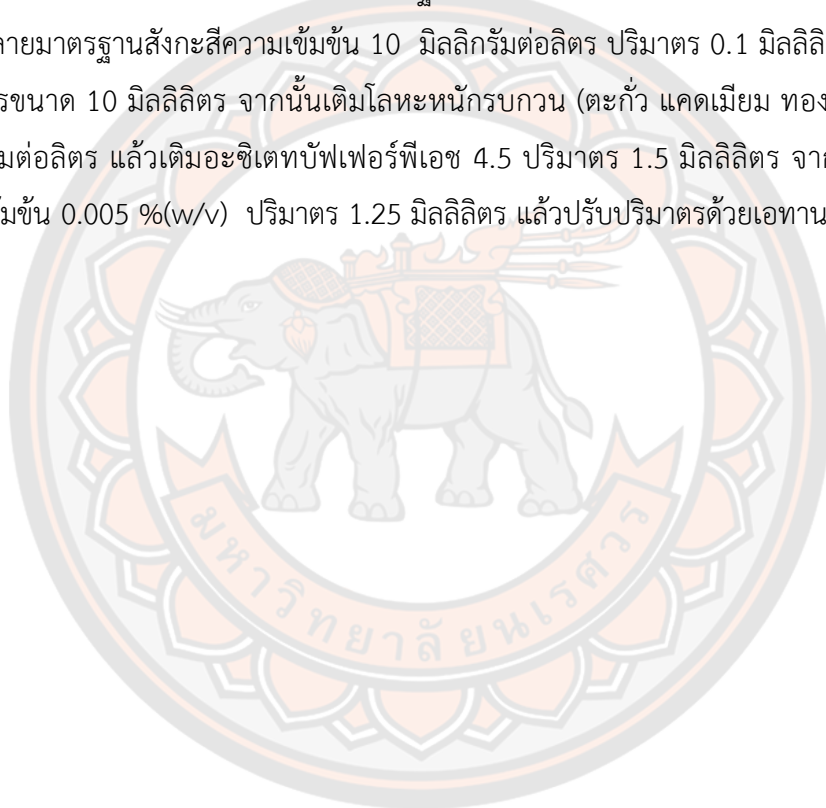
เตรียมสารละลายมาตรฐานแคดเมียมเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปิเปตจากสารละลายมาตรฐานแคดเมียมความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร จากนั้นเติมโลหะหนักรบกวน (ตะกั่ว ทองแดง สังกะสี) เข้มข้น 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วเติมอะซิเตทบัฟเฟอร์พีเอช 5 ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร จากนั้นเติมไดไฮโซนความเข้มข้น 0.005 %(w/v) ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยเอทานอล

3. ศึกษาตัวרבกวนของทองแดงที่มีโลหะหนักอื่น ๆ รบกวน

เตรียมสารละลายมาตรฐานทองแดงเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปิเปตจากสารละลายมาตรฐานทองแดงความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร จากนั้นเติมโลหะหนักรบกวน (ตะกั่ว แคดเมียม สังกะสี) เข้มข้น 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วเติมคลอไรด์บัฟเฟอร์พีเอช 2 ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร จากนั้นเติมไดไฮโซนความเข้มข้น 0.005 % (w/v) ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยเอทานอล

2. ศึกษาตัวרבกวนของสังกะสีที่มีโลหะหนักอื่น ๆ รบกวน

เตรียมสารละลายมาตรฐานสังกะสีเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปิเปตจากสารละลายมาตรฐานสังกะสีความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร จากนั้นเติมโลหะหนักรบกวน (ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง) เข้มข้น 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วเติมอะซิเตทบัฟเฟอร์พีเอช 4.5 ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร จากนั้นเติมไดไฮโซนความเข้มข้น 0.005 % (w/v) ปริมาตร 1.25 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยเอทานอล







บทที่ 4

ผลของการวิจัย

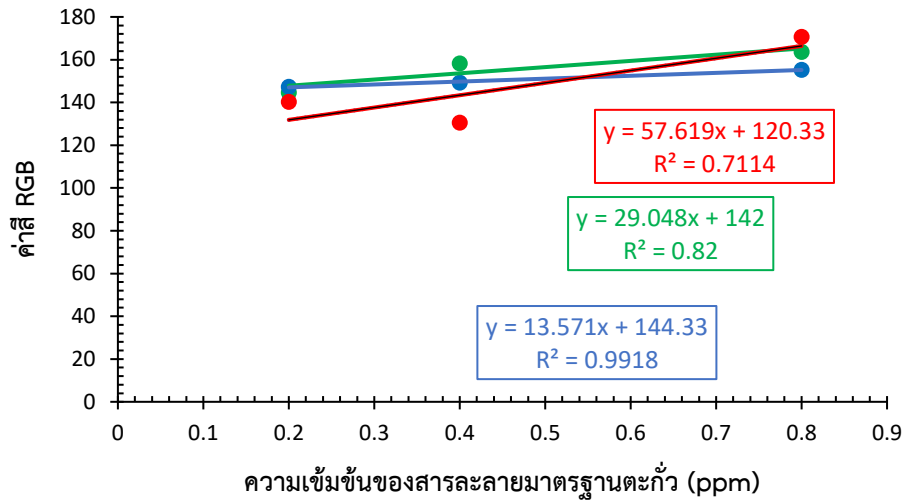
4.1 ผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายภาพสีของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างตะกั่วกับไดไฮโดรโซนด้วยเทคนิคดิจิทัลอิมเมจแคลเลอร์เมตรี

1. ผลการศึกษาความเข้มข้นของไดไฮโดรโซน

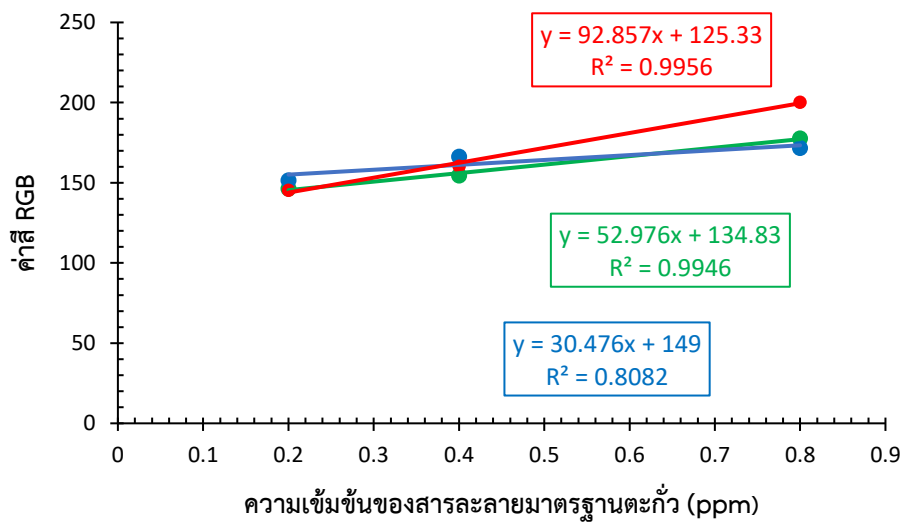
จากการศึกษาความเข้มข้นของไดไฮโดรโซน โดยการเตรียมไดไฮโดรโซนความเข้มข้น 0.0015, 0.0025, 0.005 และ 0.01 %w/v โดยการปิเปตจากสารละลายไดไฮโดรโซนเข้มข้น 0.1 %w/v แล้วปรับปริมาตรด้วย โพรพานอลเข้มข้น ต่อมาเตรียมสารละลายมาตรฐานตะกั่วเข้มข้น 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิกรัมต่อลิตร โดย ปิเปตจากสารละลายมาตรฐานตะกั่วความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิลิตร ตามลำดับลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยเอทานอล ดังตาราง 3.1 (ชุดการทดลองที่ 1) และได้ผลดังตาราง 16 และภาพ 12 ตาราง 16 ค่าความเป็นเส้นตรง (R-squared) และค่าความชัน (Slope) ของสีแดงเมื่อความเข้มข้นของไดไฮโดรโซนต่างกัน

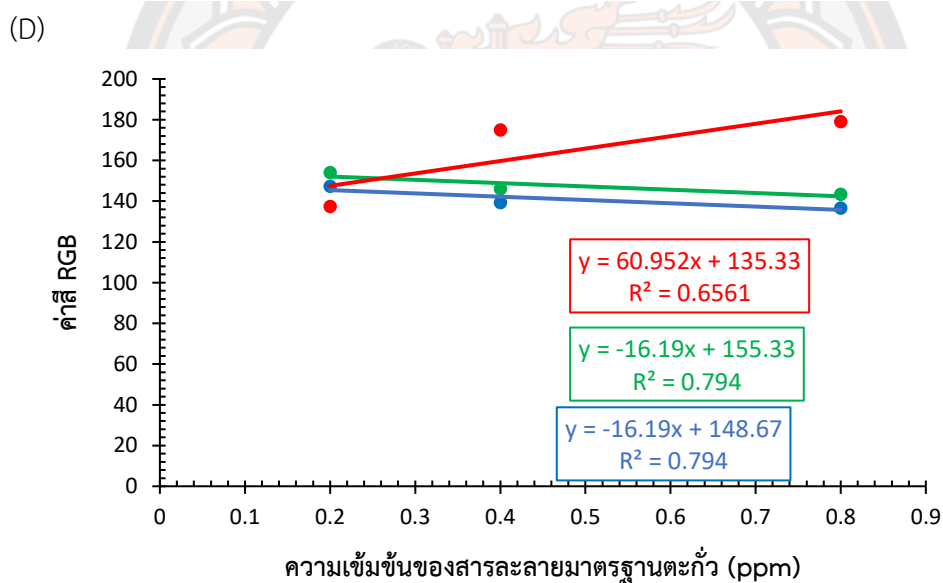
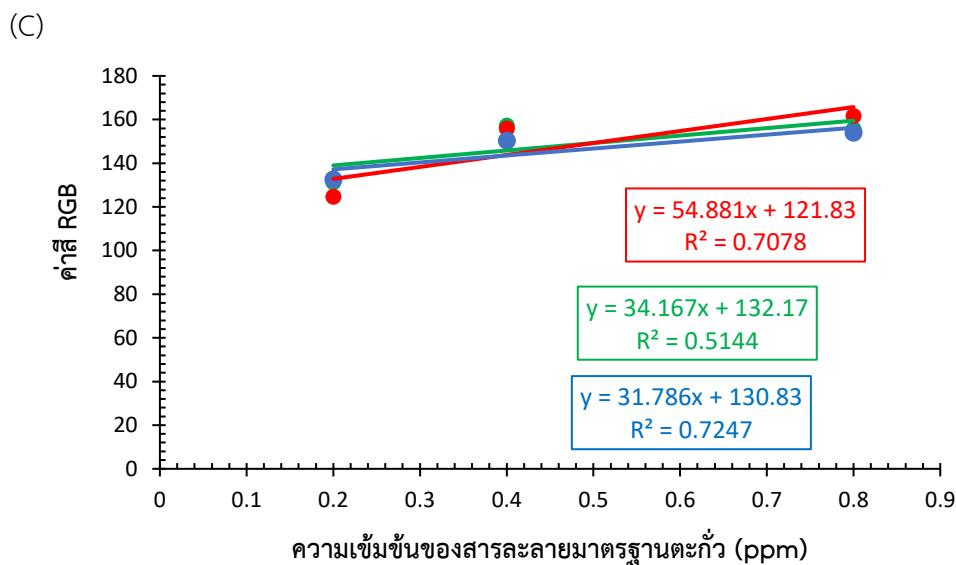
ความเข้มข้นของไดไฮโดรโซน (%w/v)	สีของสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วกับไดไฮโดรโซนเมื่อใช้ตะกั่วความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าสัมประสิทธิ์สหพันธ์ของสีแดง (R-squared)	ค่าความชันของสีแดง (Slope)
0.0015		0.7114	57.61
0.0025		0.9956	92.86
0.0050		0.7078	54.88
0.0100		0.6561	60.95

(A)



(B)





ภาพ 16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานตะกั่วกับค่าสี RGB ของสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วกับไดไฮโดรเจน โดยศึกษาความเข้มข้นของไดไฮโดรเจนเท่ากับ (A) 0.0015 % (w/v), (B) 0.0025 % (w/v), (C) 0.0050 % (w/v) และ (D) 0.0100 % (w/v)

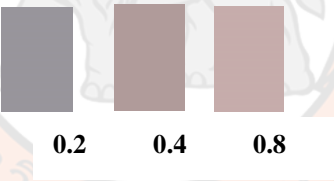
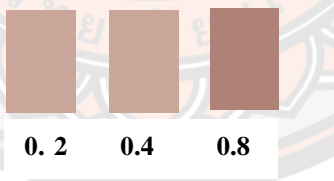

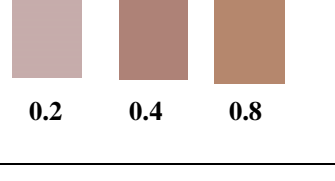
จากตาราง 16 และภาพ 12 พบว่าเมื่อใช้ไดไฮโดรเจนความเข้มข้น 0.0015 % (w/v) และ 0.0025 % (w/v) สีสารประกอบเชิงซ้อนมีสีชมพูอ่อน และที่ความเข้มข้น 0.0050 % (w/v) และ 0.0100 % (w/v) พบว่าสีสารประกอบเชิงซ้อนมีสีม่วงตามสีของไดไฮโดรเจน เนื่องจากความเข้มข้นของไดไฮโดรเจนที่มากขึ้นทำให้สีเข้มขึ้น จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีและค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานตะกั่ว พบว่าเมื่อใช้ความเข้มข้นของไดไฮโดรเจนเท่ากับ 0.0025 % w/v มีค่าความ

ชั้นของสีแดง และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ดีที่สุด ดังนั้นจึงเลือกที่ความเข้มข้นนี้ในการนำไปศึกษาต่อไป

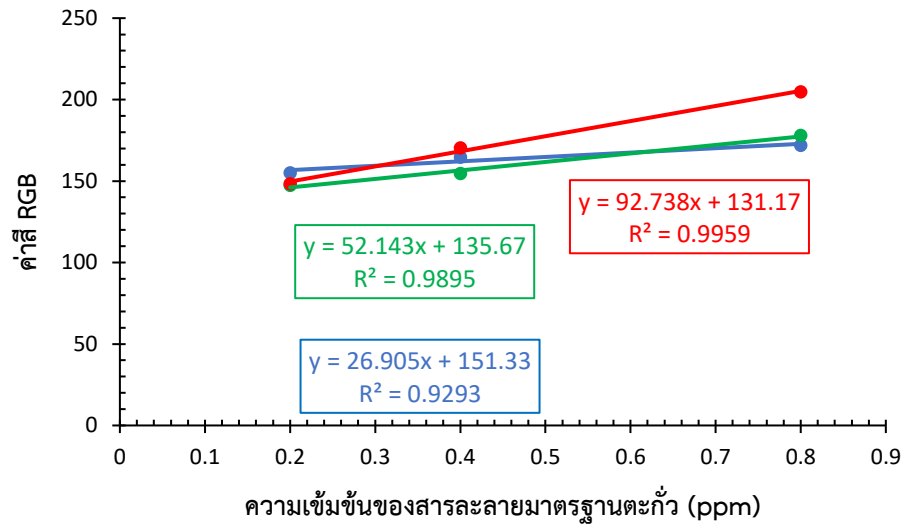
2. ผลการศึกษาปริมาณของไดไฮโซน

จากการศึกษาปริมาณของไดไฮโซน โดยการเตรียมสารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้น 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปีเปิดจากสารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายไดไฮโซนที่ความเข้มข้น 0.0025 %w/v ปริมาตร 0.50, 1.00, 1.25 และ 1.50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยเอทานอล ดังตาราง 3.2 (ชุดการทดลองที่ 2) และได้ผลดังตาราง 17 และภาพ 13

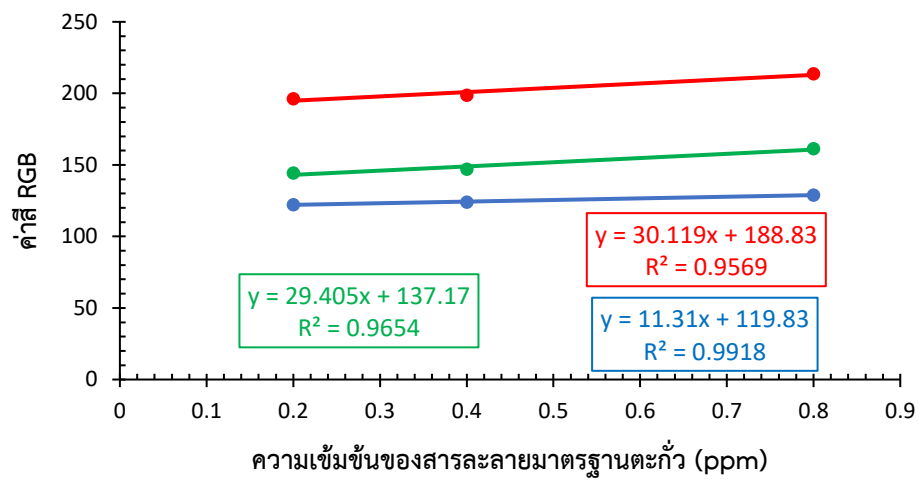
ตาราง 17 ค่าความเป็นเส้นตรง (R-squared) และค่าความชัน (Slope) ของสีแดงเมื่อปริมาตรของไดไฮโซนต่างกัน

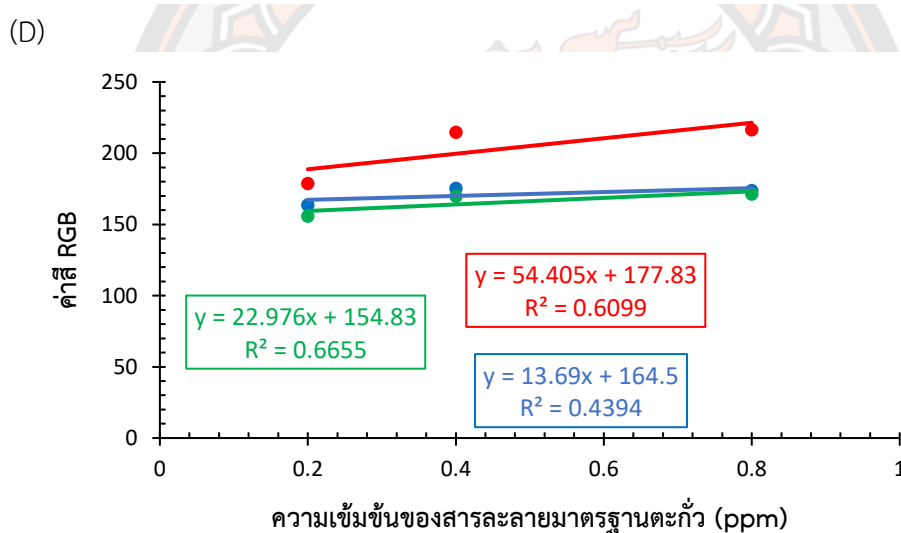
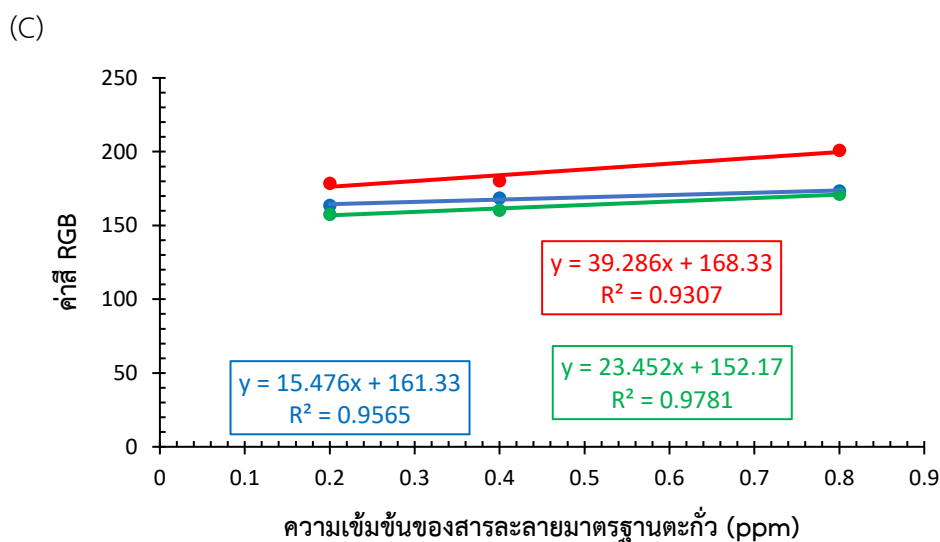
ปริมาณของไดไฮโซนความเข้มข้น 0.0025 %w/v (มิลลิลิตร)	สีของสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วกับไดไฮโซนเมื่อใช้ตะกั่วความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าสัมประสิทธิ์สหพันธ์ของสีแดง (R-squared)	ค่าความชันของสีแดง (Slope)
0.5		0.9959	92.74
1.0		0.9569	30.12
1.25		0.9307	36.29
1.5		0.6099	54.40

(A)



(B)

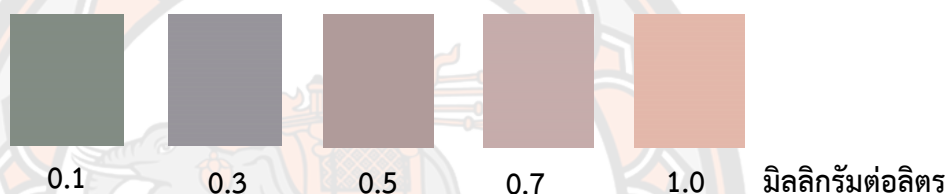




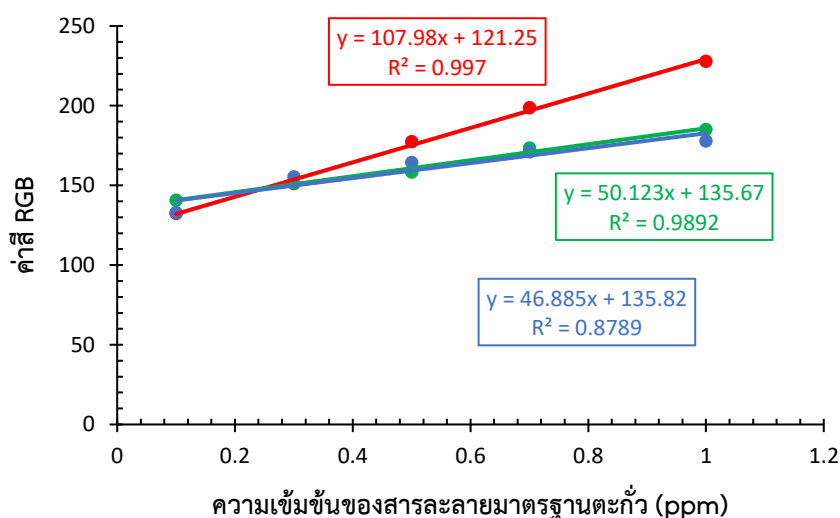
ภาพ 17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานตะกั่วกับค่าสี RGB ของสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วกับไดไฮโดรอน โดยศึกษาไดไฮโดรอนที่ความเข้มข้น 0.0025 %w/v ปริมาตร (A) 0.5 มิลลิลิตร, (B) 1.0 มิลลิลิตร, (C) 1.25 มิลลิลิตร และ (D) 1.5 มิลลิลิตร

จากตาราง 17 และภาพ 13 พบว่าเมื่อใช้ไดไฮโดรอนปริมาณต่างกัน สีของสารประกอบเชิงซ้อนมีสีชมพูอ่อนต่างกัน และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีและความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานตะกั่ว พบว่าเมื่อใช้ปริมาณของไดไฮโดรอนความเข้มข้น 0.0025 %w/v เท่ากับ 0.5 มิลลิลิตร ให้ค่าความชันของสีแดง และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ดีที่สุด ดังนั้นจึงเลือกที่ปริมาณนี้ในการนำไปศึกษาต่อไป

เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมแล้วจึงได้ทำการทดลองซ้ำอีกครั้ง เพื่อให้มีความละเอียดมากขึ้น โดยทำ ทั้งหมด 5 ความเข้มข้น (0.1, 0.3, 0.5, 0.7 และ 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร) โดยเลือกทำซ้ำที่สภาวะการทดลองที่ให้กราฟที่มีแนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เข้าใกล้ 1 มากที่สุด คือ สภาวะการทดลองที่ใช้ความเข้มข้นของไดไฮโดรอนเท่ากับ 0.0025 % (w/v) ปริมาตร 0.5 มิลลิตร ให้ผลของภาพถ่ายสีของสารประกอบเชิงซ้อน ดังภาพ 14 ซึ่งมีสีม่วงไปจนถึงสีชมพูอ่อน เป็นสีที่อยู่ในโทนเดียวกันและมีการไล่กันของระดับสีเช่นเดียวกัน และให้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานเทียบกับค่าสี RGB ดังภาพ 15 โดยมีค่าความชันของสีแดงที่สูง และมีแนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่เข้าใกล้ 1



ภาพ 18 ภาพถ่ายสีของสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วกับไดไฮโดรอนที่สภาวะการทดลองที่เหมาะสม เมื่อใช้ไดไฮโดรอนที่ความเข้มข้น 0.0025 % (w/v) ปริมาตร 0.5 มิลลิตร




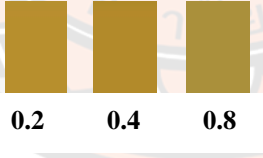
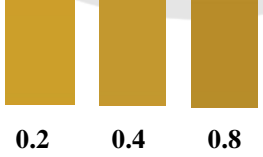
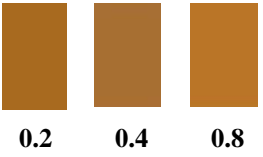
ภาพ 19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานตะกั่วกับค่าสี RGB ของสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วกับไดไฮโดรอนที่สภาวะการทดลองที่เหมาะสม

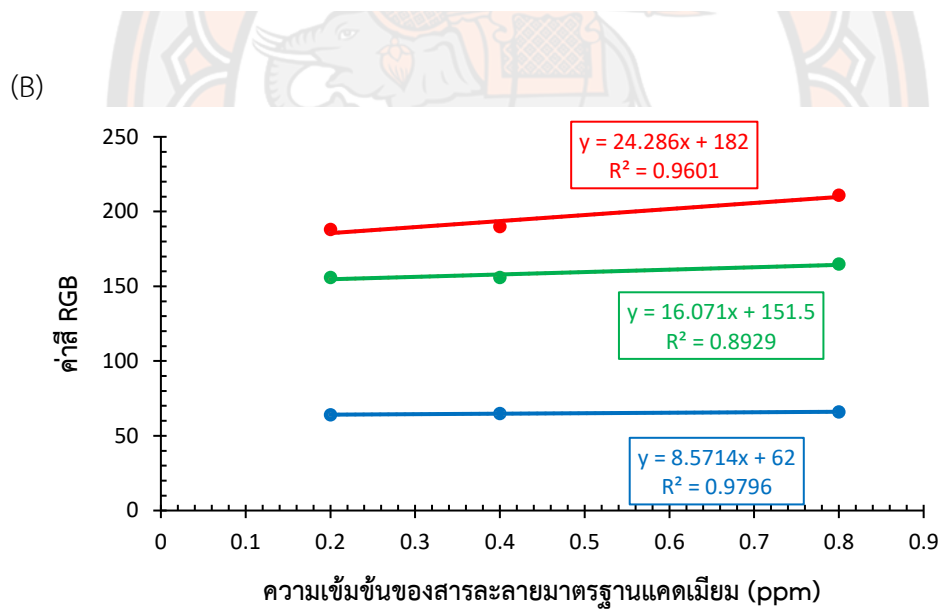
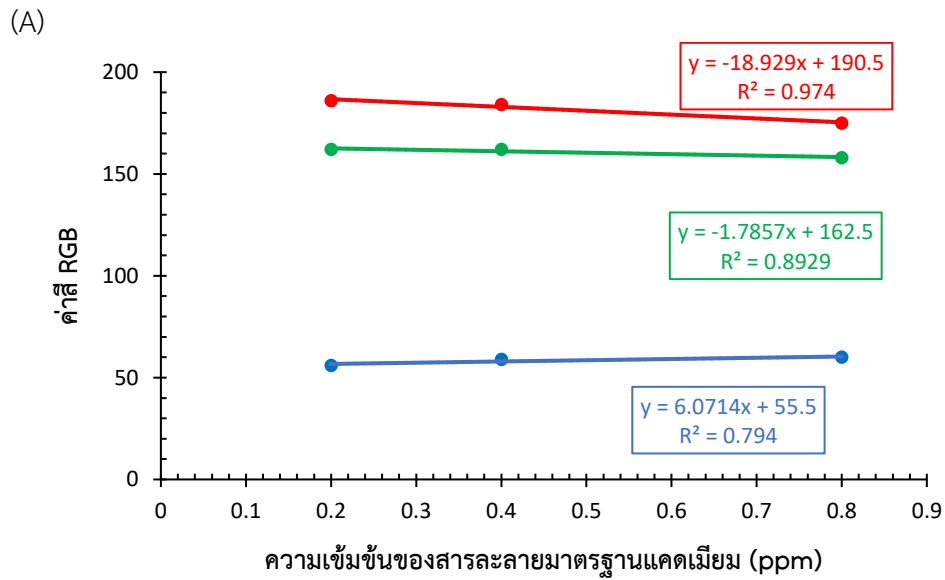
4.2 ผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายภาพสีของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแคดเมียมกับไดไฮโซนด้วยเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรี

1. ผลการศึกษาความเข้มข้นของไดไฮโซน

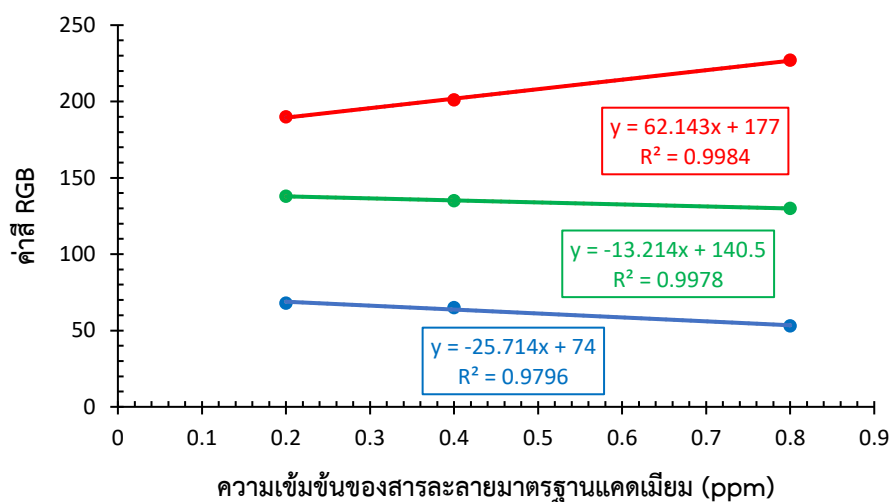
จากการศึกษาความเข้มข้นของไดไฮโซน โดยการเตรียมไดไฮโซนความเข้มข้น 0.0015, 0.0025, 0.005 และ 0.01 %w/v โดยปิเปตจากสารละลายไดไฮโซนเข้มข้น 0.1 %w/v แล้วปรับปริมาตรด้วยโพพานอล ต่อมาเตรียมสารละลายมาตรฐานตะกั่วเข้มข้น 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปิเปตจากสารละลายมาตรฐานตะกั่วความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิลิตร ตามลำดับลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยเอทานอล ดังตาราง 3.3 (ชุดการทดลองที่ 3) และได้ผลดังตาราง 18 และภาพ 16

ตาราง 18 ค่าความเป็นเส้นตรง (R-squared) และค่าความชัน (Slope) ของสีแดงเมื่อความเข้มข้นของไดไฮโซนต่างกัน

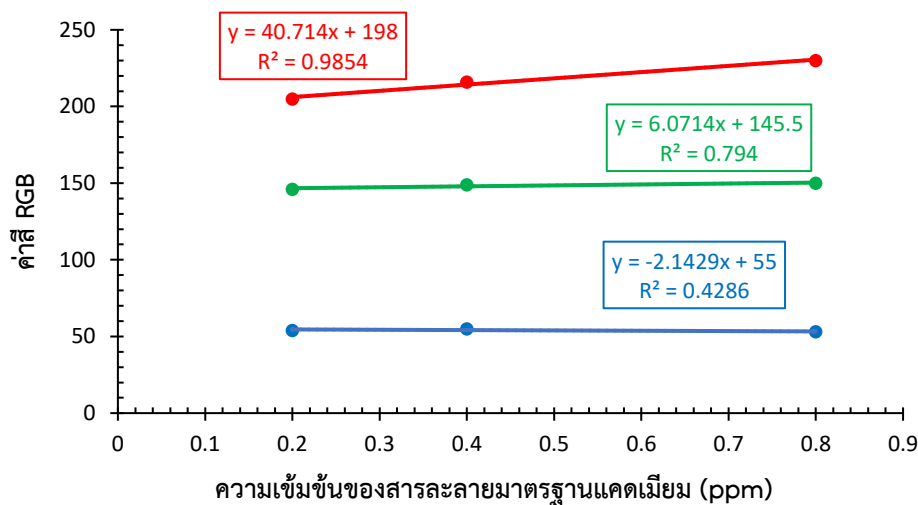
ความเข้มข้นของไดไฮโซน (%w/v)	สีของสารประกอบเชิงซ้อนของแคดเมียมกับไดไฮโซน เมื่อใช้แคดเมียมความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าสัมประสิทธิ์สหพันธ์ของสีแดง (R-squared)	ค่าความชันของสีแดง (Slope)
0.0015		0.9740	18.93
0.0025		0.9601	27.29
0.0050		0.9984	62.14
0.0100		0.9854	40.71



(C)



(D)




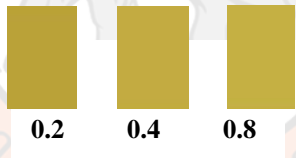
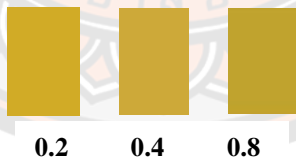
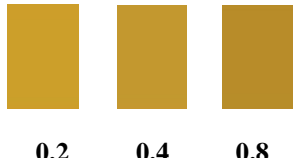
ภาพ 20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแคดเมียมกับค่าสี RGB ของสารประกอบเชิงซ้อนแคดเมียมกับไดโรโซน เมื่อใช้ความเข้มข้นของไดโรโซนเท่ากับ (A) 0.0015 % (w/v), (B) 0.0025 % (w/v), (C) 0.0050 % (w/v) และ (D) 0.0100 % (w/v)

จากตาราง 18 และภาพ 16 เมื่อใช้ความเข้มข้นของไดโรโซนต่างกัน พบว่าสีสารประกอบเชิงซ้อนมีสีส้ม และเข้มข้นตามความเข้มข้นของไดโรโซน และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีและค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแคดเมียม พบว่าเมื่อใช้ความเข้มข้นของไดโรโซนเท่ากับ 0.0050 % w/v ให้ค่าความชันของสีแดง และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ดีที่สุด จึงเลือกที่ความเข้มข้นนี้ในการศึกษาต่อไป

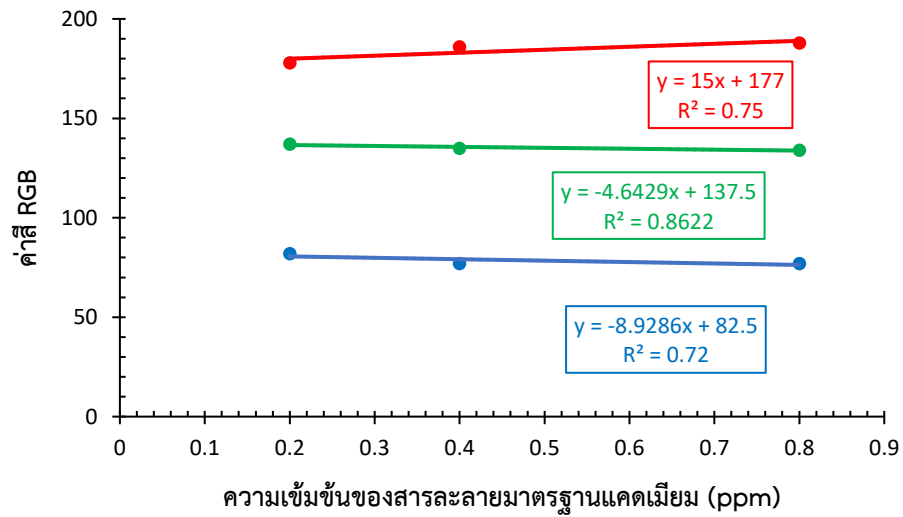
2. ผลการศึกษาปริมาณของไดไฮโซน

จากการศึกษาปริมาณของไดไฮโซน โดยการเตรียมสารละลายมาตรฐานแคดเมียมความเข้มข้น 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปิเปตจากสารละลายมาตรฐานแคดเมียมความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายไดไฮโซนที่ความเข้มข้น 0.0050 %w/v ปริมาตร 0.50, 1.00, 1.25 และ 1.50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยเอทานอล ดังตาราง 3.4 (ชุดการทดลองที่ 4) และได้ผลดังตาราง 19 และภาพ 17

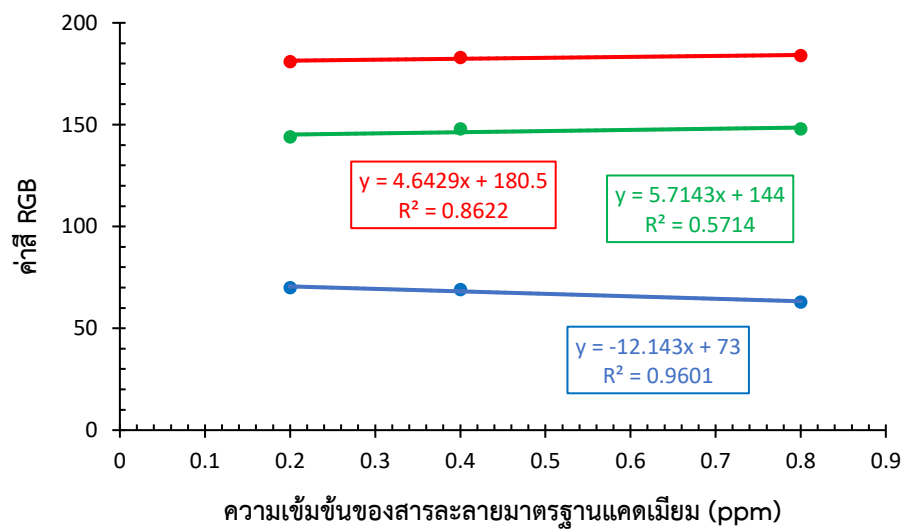
ตาราง 19 ค่าความเป็นเส้นตรง (R-squared) และค่าความชัน (Slope) ของสีแดงเมื่อใช้ปริมาณของไดไฮโซนต่างกัน

ปริมาณของไดไฮโซน ความเข้มข้น 0.0050 %w/v (มิลลิลิตร)	สีของสารประกอบเชิงซ้อน ของแคดเมียมกับไดไฮโซน เมื่อใช้แคดเมียมความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าสัมประสิทธิ์ สหพันธ์ของสีแดง (R-squared)	ค่าความชัน ของสีแดง (Slope)
0.5		0.7500	15.18
1.0		0.8622	4.64
1.25		0.9836	23.93
1.5		0.9902	62.14

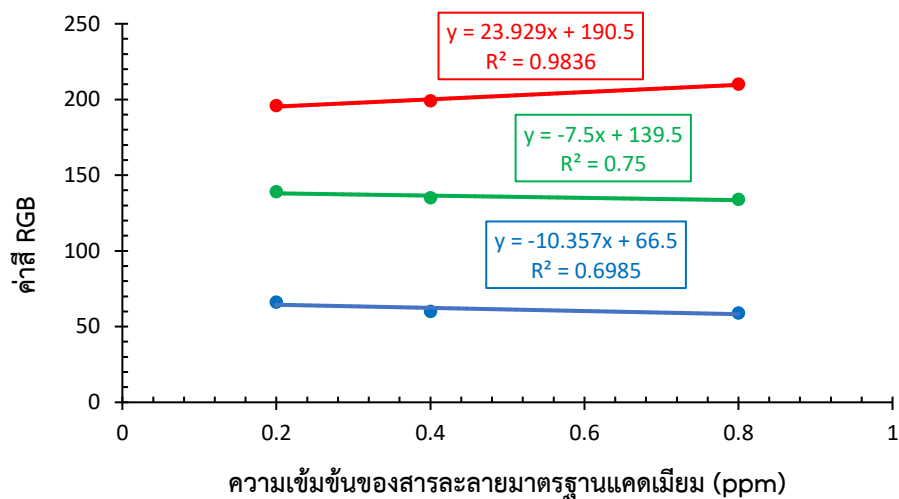
(A)



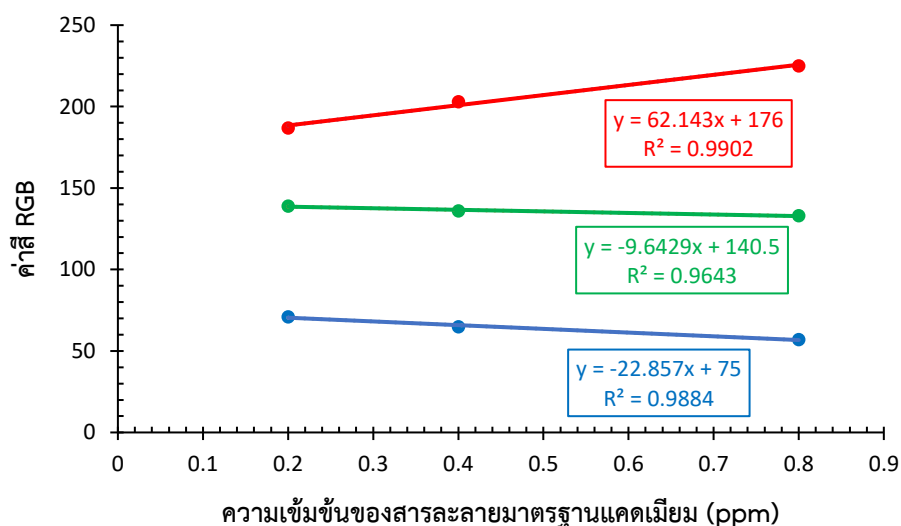
(B)



(C)



(D)



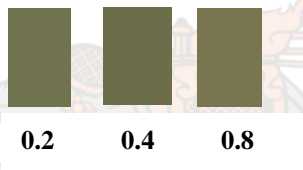

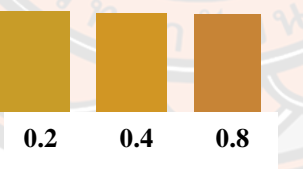
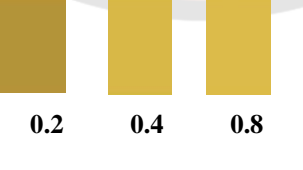
ภาพ 21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแคดเมียมกับค่าสี RGB ของสารประกอบเชิงซ้อนของแคดเมียมกับไดโธไซน เมื่อใช้ไดโธไซนความเข้มข้น 0.0050 %w/v ปริมาตร (A) 0.5 มิลลิลิตร, (B) 1.0 มิลลิลิตร, (C) 1.25 มิลลิลิตร และ (D) 1.5 มิลลิลิตร

จากตาราง 19 และภาพ 17 เมื่อใช้ปริมาตรของไดโธไซนต่างกัน พบว่าสีของสารประกอบเชิงซ้อนมีสีส้มต่างกัน โดยปริมาตรของไดโธไซนมีผลต่อความเข้มของสีของสารประกอบเชิงซ้อน ซึ่งจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีและความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแคดเมียม พบว่าเมื่อใช้ปริมาตรของไดโธไซนความเข้มข้น 0.0050 %w/v เท่ากับ 1.5 มิลลิลิตร มีค่าความเข้มของสีแดง และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ดีที่สุด ดังนั้นจึงเลือกที่ปริมาตรนี้ในการนำไปศึกษาต่อไป

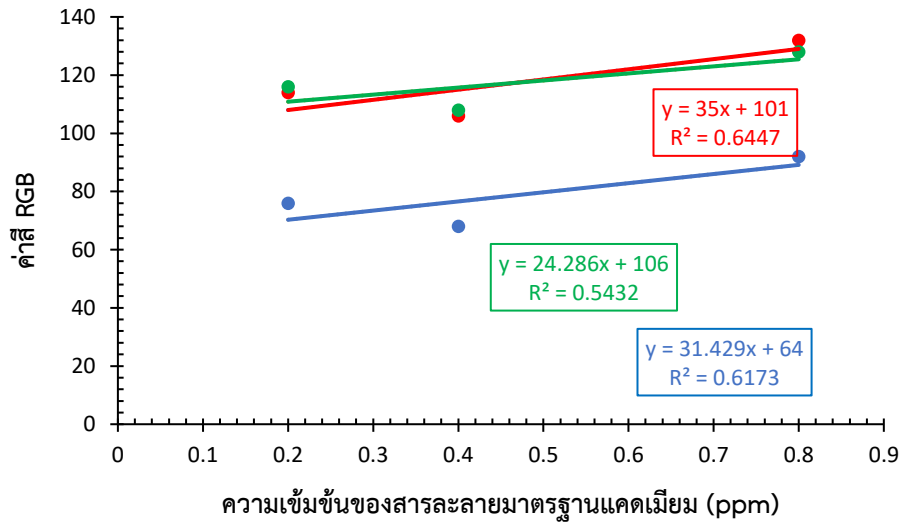
3. ผลการศึกษาบัพเฟอร์ที่ระดับพีเอชต่าง ๆ

ปิเปตสารละลายมาตรฐานแคดเมียมความเข้มข้น 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิกรัมต่อลิตร โดย ปิเปตจากสารละลายมาตรฐานแคดเมียมความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร เติมสารละลายบัพเฟอร์ที่ระดับพีเอช 3, 4, 5 และ 5.5 ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร จำนวน 0.5 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายไดไฮโซน ที่ความเข้มข้น 0.005 %w/v ปริมาตร 1.50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยเอทานอล ดังตาราง 3.5 (ชุดการทดลองที่ 5) ได้ผลดังตาราง 20 และภาพ 18

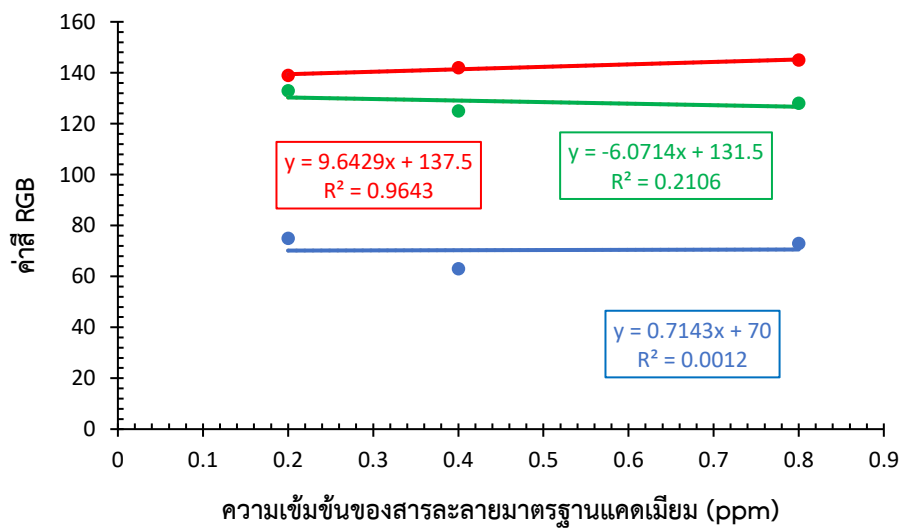
ตาราง 20 ผลการศึกษาบัพเฟอร์ที่ระดับพีเอชต่าง ๆ

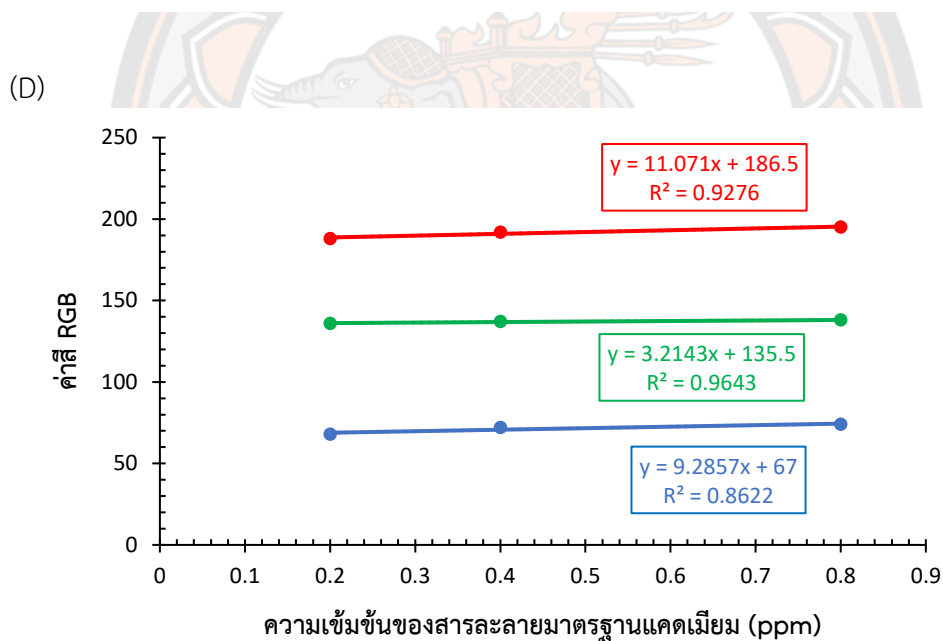
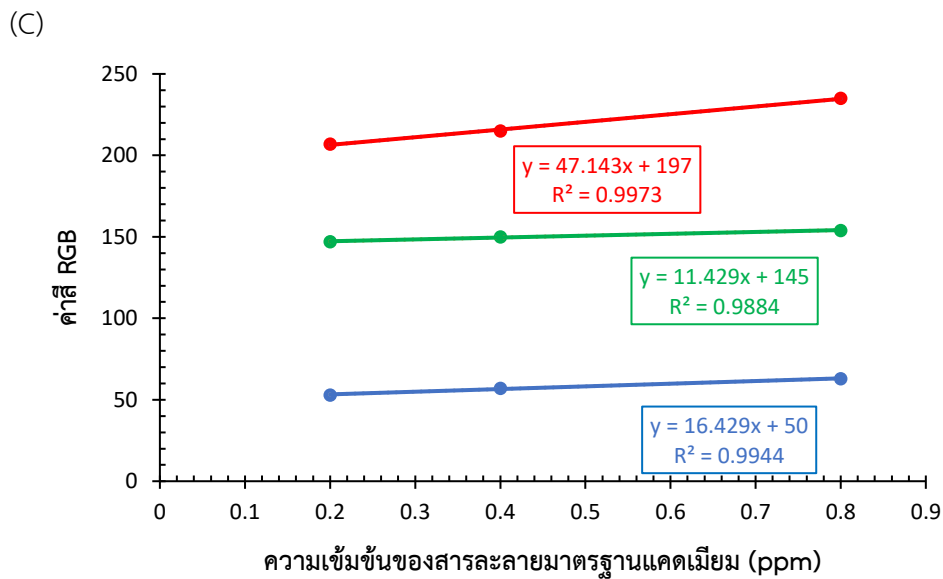
บัพเฟอร์ที่ระดับพีเอช	สีของสารประกอบเชิงซ้อนของแคดเมียมกับไดไฮโซนเมื่อใช้แคดเมียมความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าสัมประสิทธิ์สหพันธ์ของสีแดง (R-squared)	ค่าความชันของสีแดง (Slope)
3	 0.2 0.4 0.8	0.6447	35.00
4	 0.2 0.4 0.8	0.9643	9.64
5	 0.2 0.4 0.8	0.9973	47.14
5.5	 0.2 0.4 0.8	0.9276	11.07

(A)



(B)





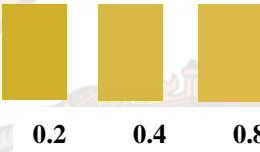
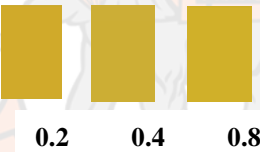
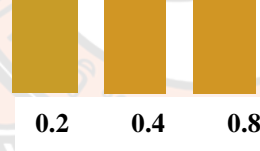

ภาพ 22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแคดเมียมกับค่าสี RGB ของสารประกอบเชิงซ้อนของแคดเมียมกับไตรโคโน เมื่อใช้บัฟเฟอร์ที่ระดับพีเอชเท่ากับ (A) 3, (B) 4, (C) 5 และ(D) 6

จากตาราง 20 และภาพ 18 พบว่าที่พีเอชต่างกันจะให้สีของสารประกอบเชิงซ้อนที่มีโทนสีที่แตกต่างกัน โดยที่ระดับพีเอชเท่ากับ 3 และ 4 จะให้โทนสีเขียว ที่ระดับพีเอชเท่ากับ 5 ให้โทนสีส้ม และที่ระดับพีเอชเท่ากับ 5.5 ให้โทนสีเหลือง และพบว่า ที่ระดับพีเอชเท่ากับ 5 ให้ค่าความชันของสีแดงและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ดีที่สุด ดังนั้นจึงเลือกที่พีเอชนี้ในการศึกษาต่อไป

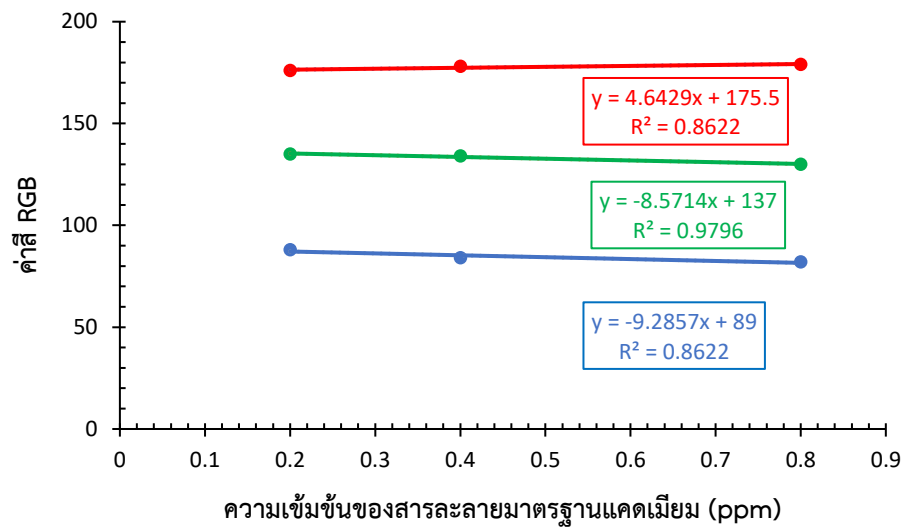
4. ผลการศึกษาปริมาณของบัพเฟอร์

ปีเปตสารละลายมาตรฐานแคดเมียมความเข้มข้น 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิกรัมต่อลิตร โดย ปีเปตจากสารละลายมาตรฐานแคดเมียมความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร เติมสารละลายอะซิเตทบัฟเฟอร์พีเอช 5 ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ปริมาตร 0.50, 1.00, 1.25 และ 1.50 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายไดไฮโซนที่ความเข้มข้น 0.005 %w/v ปริมาตร 1.50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยเอทานอล ดังตาราง 3.6 (ชุดการทดลองที่ 6) และได้ผลดังตาราง 21 และภาพ 19

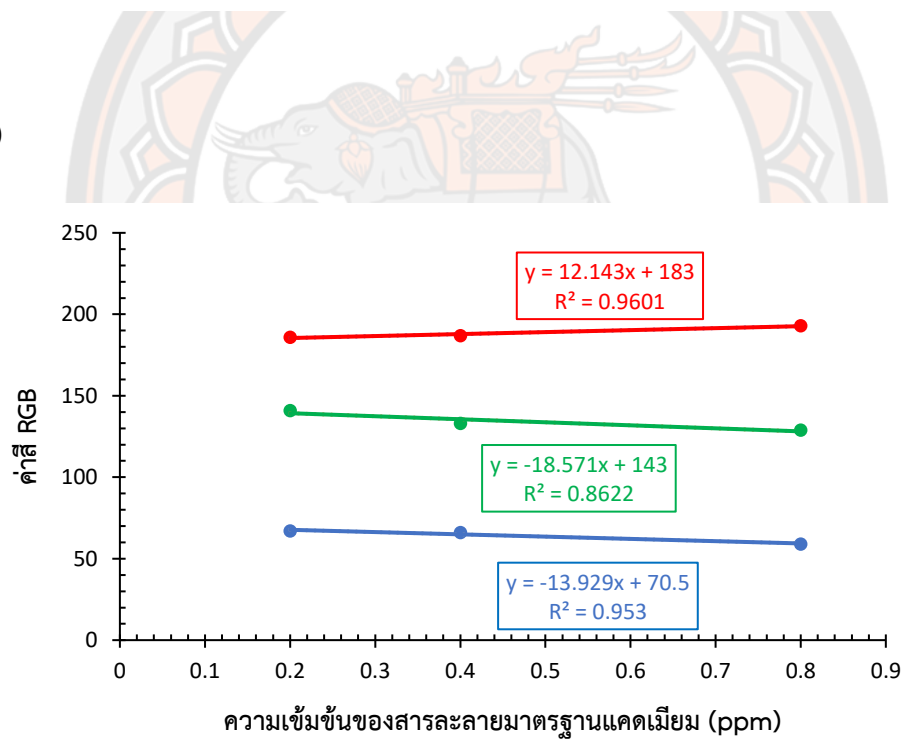
ตาราง 21 ผลการศึกษาปริมาณของบัพเฟอร์ที่พีเอช 5

ปริมาณของบัพเฟอร์ (มิลลิลิตร)	สีของสารประกอบเชิงซ้อน ของแคดเมียมกับไดไฮโซน เมื่อใช้แคดเมียมความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าสัมประสิทธิ์ สหพันธ์ของสี แดง (R-squared)	ค่าความชันของสีแดง (Slope)
0.5		0.8622	4.64
1		0.9601	12.14
1.25		0.9098	7.85
1.5		0.9992	43.57

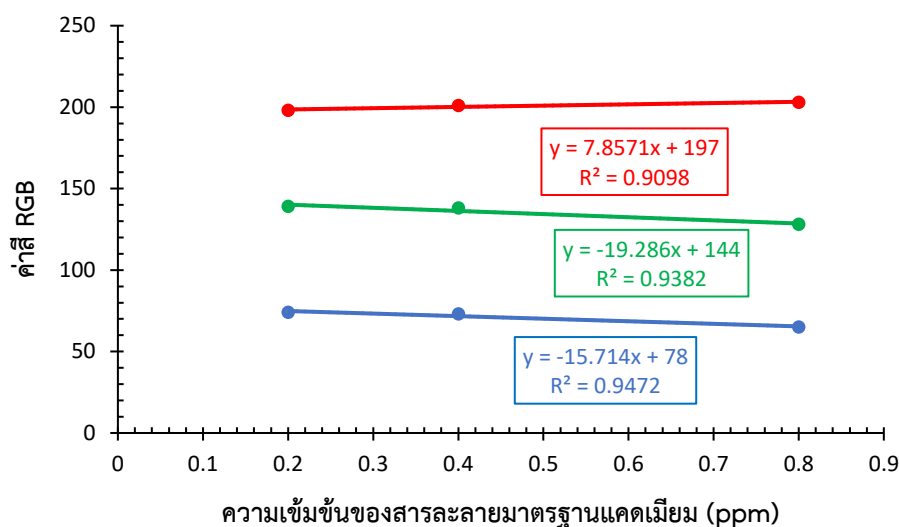
(A)



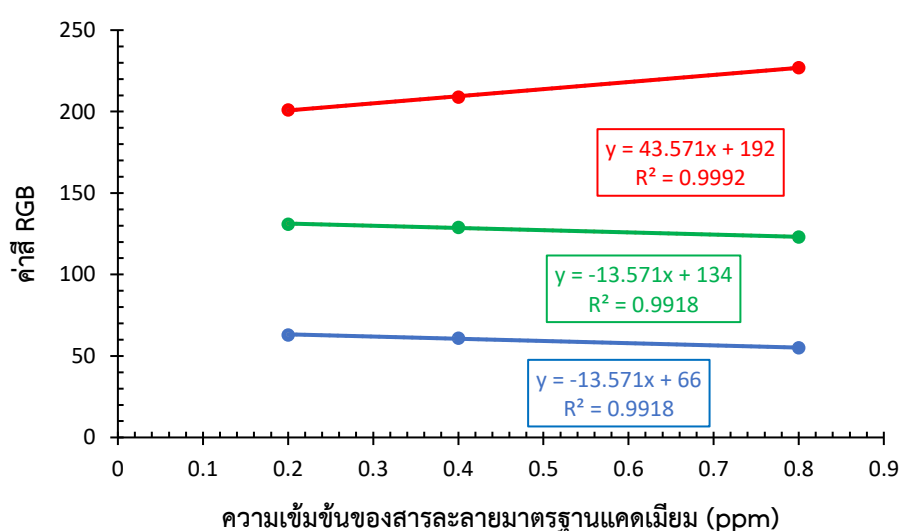
(B)



(C)



(D)

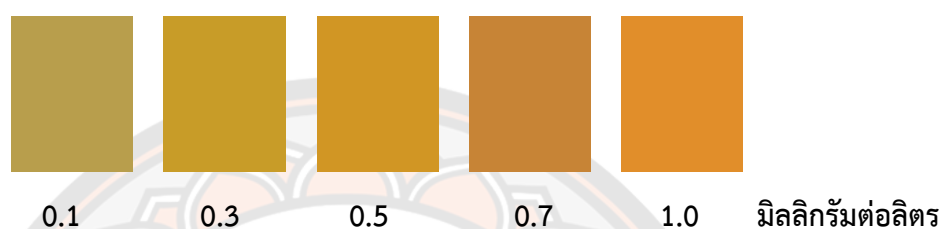


ภาพ 23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแคดเมียมกับค่าสี RGB ของสารประกอบเชิงซ้อนของแคดเมียมกับไดโรโซน เมื่อใช้ปริมาตรของอะซิเตทบัฟเฟอร์พีเอช 5 เท่ากับ (A) 0.5 มิลลิลิตร, (B) 1.0 มิลลิลิตร, (C) 1.25 มิลลิลิตร และ (D) 1.5 มิลลิลิตร

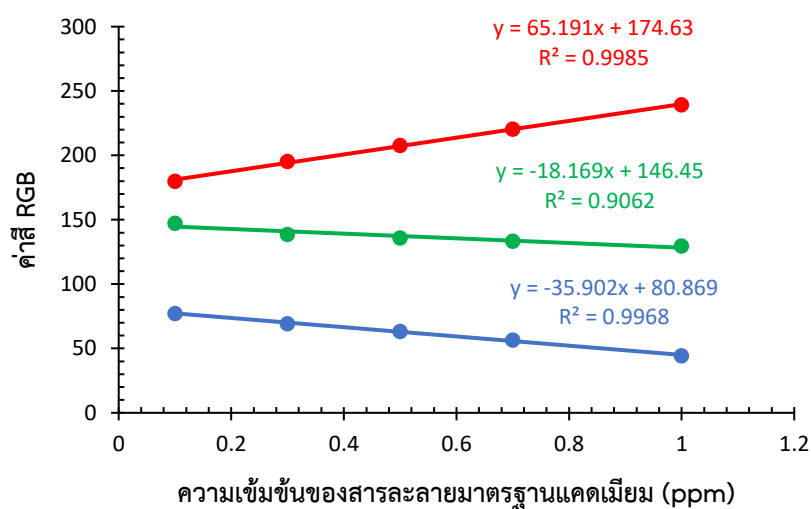
จากตาราง 21 และภาพ 19 พบว่า โทนสีของสารประกอบเชิงซ้อนของแคดเมียมกับไดโรโซนจะเปลี่ยนไปเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาตรของบัฟเฟอร์ โดยจะเปลี่ยนจากโทนสีเหลืองเป็นสีส้ม โดยแนวโน้มของค่าความชันสีแดงและค่าความเป็นเส้นตรงดีที่สุดที่ปริมาตรของอะซิเตทบัฟเฟอร์เท่ากับ 1.50 มิลลิลิตร จึงเลือกที่ปริมาตรนี้ในการศึกษาต่อไป

เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมแล้วจึงได้ทำการทดลองซ้ำอีกครั้ง เพื่อให้มีความละเอียดมากขึ้น โดยทำ ทั้งหมด 5 ความเข้มข้น (0.1, 0.3, 0.5, 0.7 และ 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร) ซึ่งเลือกทำซ้ำที่สภาวะ

การทดลองที่ให้กราฟที่มีแนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เข้าใกล้ 1 มากที่สุด คือ สภาวะการทดลองที่ใช้ความเข้มข้นไดไฮโซน 0.0050 %(w/v) ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร และใช้อะซิเตทบัฟเฟอร์พีเอช 5 ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร ให้ผลของภาพถ่ายสีของสารประกอบเชิงซ้อน ดังภาพ 20 ซึ่งมีสีส้มเหลืองไปจนถึงสีส้ม เป็นสีที่อยู่ในโทนเดียวกันและมีการไล่กันของระดับสี และให้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแคดเมียมกับค่าสี RGB ดังภาพ 21 ที่มีค่าความชันของสีแดงที่สูง และมีแนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่เข้าใกล้ 1



ภาพ 24 ภาพถ่ายสีของสารประกอบเชิงซ้อนของแคดเมียมกับไดไฮโซนที่สภาวะการทดลองที่เหมาะสม ซึ่งใช้ไดไฮโซนที่ความเข้มข้น 0.0050 %(w/v) ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร และใช้อะซิเตทบัฟเฟอร์พีเอช 5 ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร



ภาพ 25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแคดเมียมกับค่าสี RGB ของสารประกอบเชิงซ้อนของแคดเมียมกับไดไฮโซนที่สภาวะการทดลองที่เหมาะสม

4.3 ผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายภาพสีของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างทองแดงกับไดไฮโซนด้วยเทคนิคดิจิทัลอิมเมจแคลเลอร์ิเมตรี

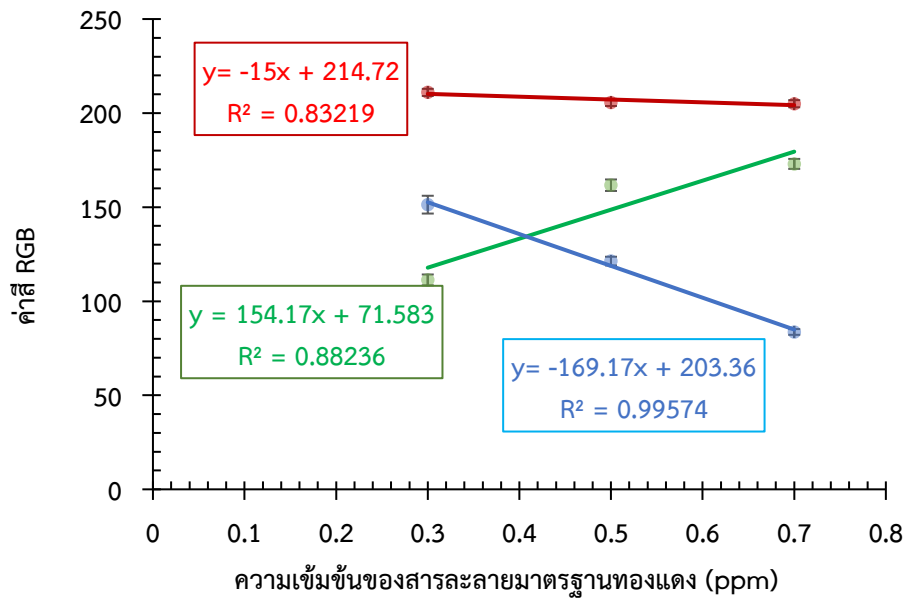
1. ผลศึกษาความเข้มข้นของไดไฮโซน

เตรียมไดไฮโซนความเข้มข้น 0.0015, 0.0025, 0.005 และ 0.01 %w/v โดยปิเปตจากสารละลายไดไฮโซนเข้มข้น 0.1 %w/v แล้วปรับปริมาตรด้วยโพพานอลเข้มข้น ต่อมาเตรียมสารละลายมาตรฐานทองแดงเข้มข้น 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปิเปตจากสารละลายมาตรฐานทองแดงความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิลิตร ตามลำดับลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายคลอไรด์บัฟเฟอร์พีเอช 2 ความเข้มข้น 0.0025 โมลต่อลิตร จำนวน 1.5 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยเอทานอล ดังตาราง 3.7 (ชุดการทดลองที่ 7) และได้ผลดังตาราง 22 และภาพ 22

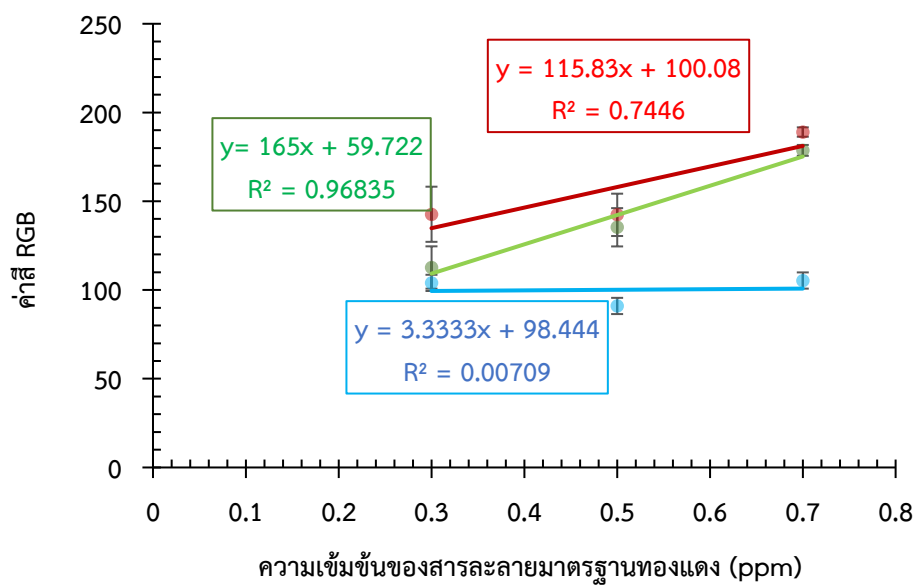
ตาราง 22 ค่าความเป็นเส้นตรง (R-squared) และค่าความชัน (Slope) ของสีแดงเมื่อความเข้มข้นของไดไฮโซนต่างกัน

ความเข้มข้นของไดไฮโซน (%w/v)	สีของสารประกอบเชิงซ้อนของทองแดงกับไดไฮโซนเมื่อใช้ทองแดงความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าสัมประสิทธิ์สหพันธ์ของสีแดง (R-squared)	ค่าความชันของสีแดง (Slope)
0.0015		0.8322	15.00
0.0025		0.7446	115.83
0.0050		0.9921	195.00
0.0100		0.8253	173.33

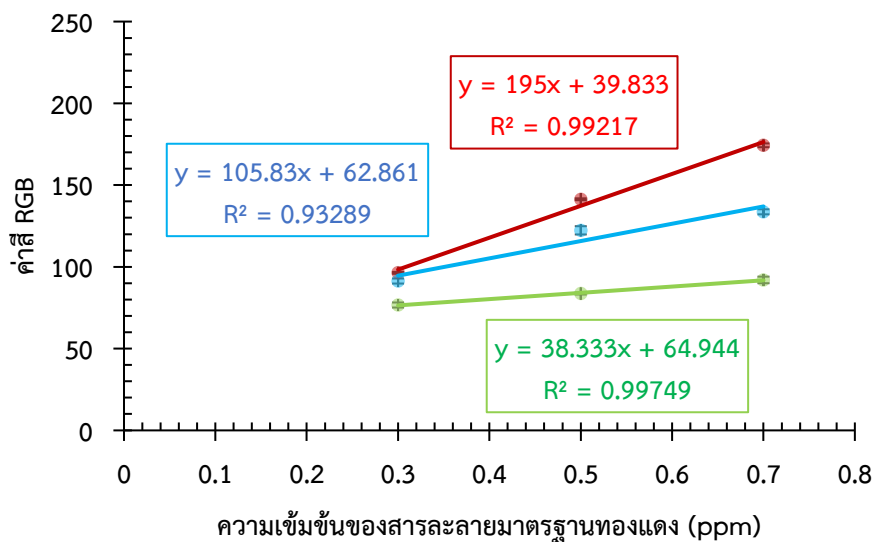
(A)



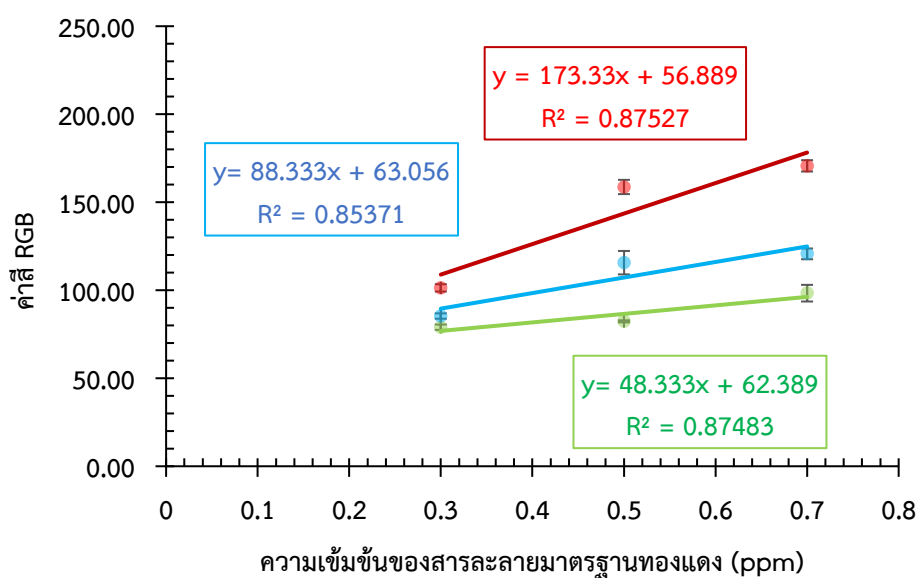
(B)



(C)



(D)



ภาพ 26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานทองแดงกับค่าสี RGB ของสารประกอบเชิงซ้อนของทองแดงกับไดโรโซน เมื่อใช้ไดโรโซนความเข้มข้นเท่ากับ (A) 0.0015 % (w/v), (B) 0.0025 % (w/v), (C) 0.0050 % (w/v) และ (D) 0.0100 % (w/v)

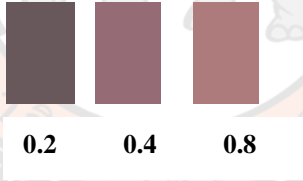
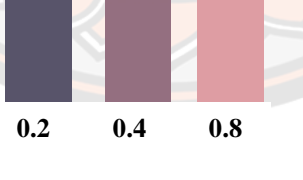
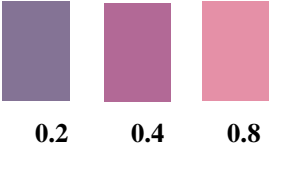
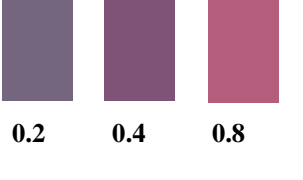
จากตาราง 22 และภาพ 22 พบว่าเมื่อใช้ไดโรโซนความเข้มข้น 0.0015 % (w/v) และ 0.0025 % (w/v) สีสารประกอบเชิงซ้อนมีสีเหลือง และที่ความเข้มข้น 0.0050 % (w/v) และ 0.0100 % (w/v) พบว่าสีสารประกอบเชิงซ้อนมีสีม่วงจนไปถึงสีชมพูและเข้มข้นตามความเข้มข้นของไดโรโซน ซึ่งเป็นสีของสารประกอบเชิงซ้อนของทองแดงกับไดโรโซนที่ถูกต้อง และพบว่าที่ความเข้มข้นของไดโร

โชนเท่ากับ 0.0050 %w/v มีค่าความชันของสีแดง และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ดีที่สุด ดังนั้นจึงเลือกที่ความเข้มข้นนี้ในการศึกษาต่อไป

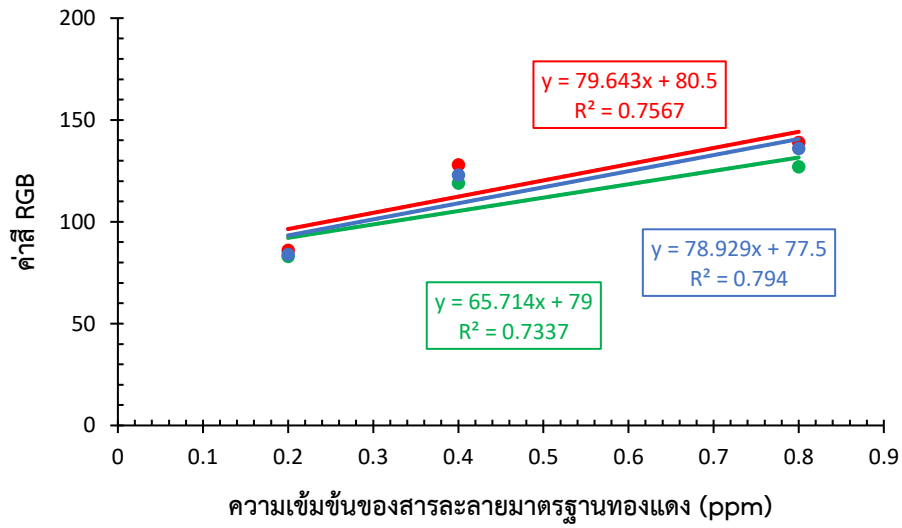
2. ศึกษาปริมาณของไดโรว์โชน

ปีเปตสารละลายมาตรฐานทองแดงความเข้มข้น 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปีเปตจากสารละลายมาตรฐานทองแดงความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร เติมสารละลายคลอไรด์บัฟเฟอร์ พีเอช 2 ความเข้มข้น 0.0025 โมลต่อลิตร จำนวน 1.5 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายไดโรว์โชนที่ความเข้มข้น 0.005 %w/v ปริมาตร 0.50, 1.00, 1.25 และ 1.50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยเอทานอล ดังตาราง 3.8 (ชุดการทดลองที่ 8) และได้ผลดังตาราง 23 และภาพ 23

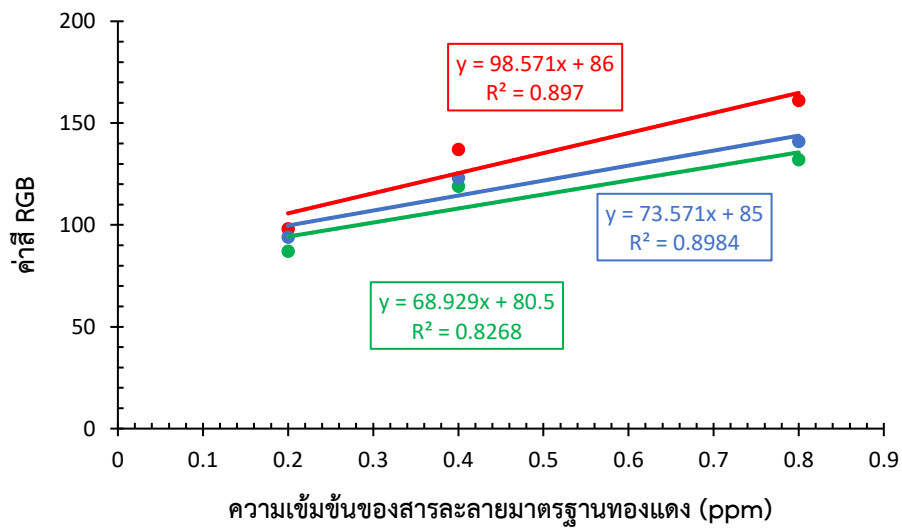
ตาราง 23 ค่าความเป็นเส้นตรง (R-squared) และค่าความชัน (Slope) ของสีแดงเมื่อใช้ปริมาณของไดโรว์โชนต่างกัน

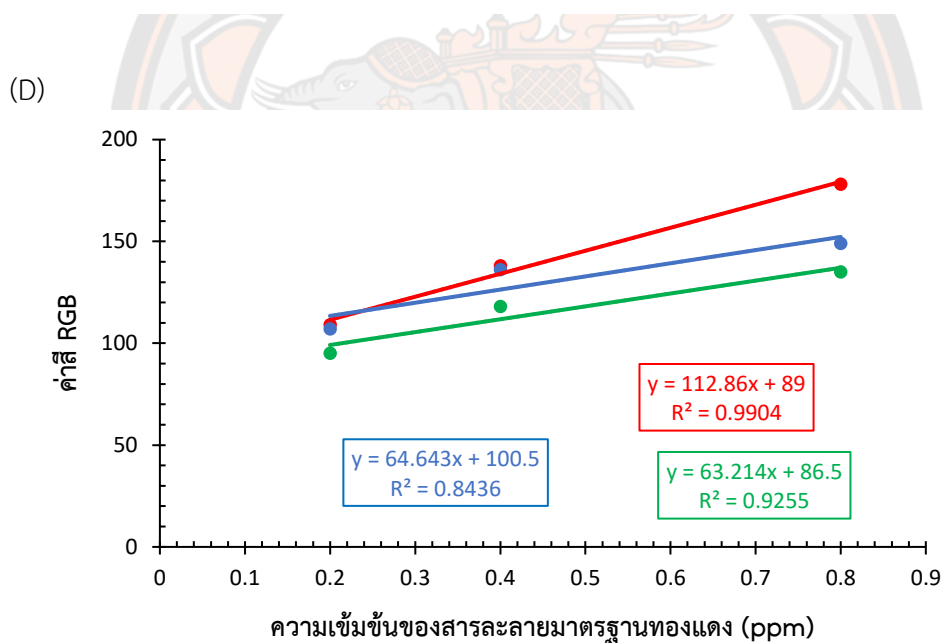
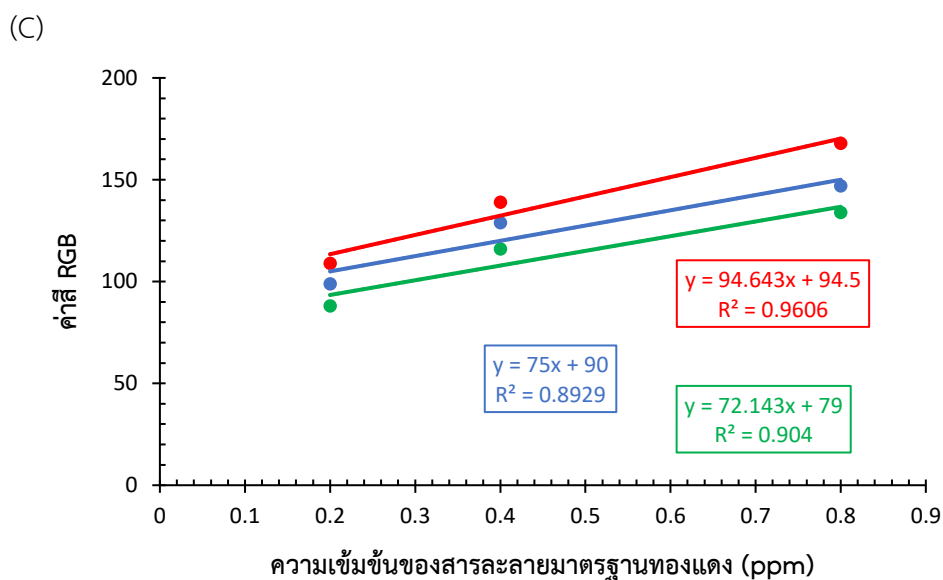
ปริมาณของไดโรว์โชน ความเข้มข้น 0.0050 %w/v (มิลลิลิตร)	สีของสารประกอบเชิงซ้อน ของทองแดงกับไดโรว์โชน เมื่อ ใช้ทองแดงความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าสัมประสิทธิ์ สหพันธ์ของสี แดง (R-squared)	ค่าความชันของสี แดง (Slope)
0.5		0.7567	79.64
1.0		0.8970	98.57
1.25		0.9606	94.64
1.5		0.9904	112.86

(A)



(B)





ภาพ 27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานทองแดงกับค่าสี RGB ของสารประกอบเชิงซ้อนของทองแดงกับไดโธไซน เมื่อใช้ไดโธไซนความเข้มข้นเท่ากับ 0.0050 %w/v ปริมาตร (A) 0.5 มิลลิลิตร, (B) 1.0 มิลลิลิตร, (C) 1.25 มิลลิลิตร และ (D) 1.5 มิลลิลิตร

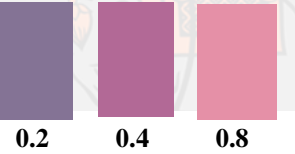
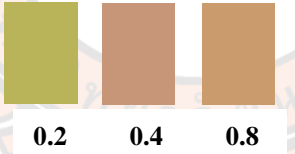
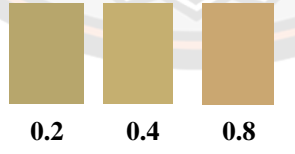
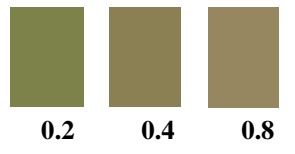
จากตาราง 23 และภาพ 23 พบว่าสีของสารประกอบเชิงซ้อนมีสีม่วงจนถึงสีชมพู แสดงว่าปริมาณของไดโธไซนมีผลต่อสีสารประกอบเชิงซ้อน โดยจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีและความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานทองแดง พบว่าเมื่อใช้ปริมาณของไดโธไซนเท่ากับ 1.5

มิลลิลิตร มีค่าความชันของสีแดง และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ดีที่สุด ดังนั้นจึงเลือกใช้ปริมาตรนี้ในการนำไปศึกษาต่อไป

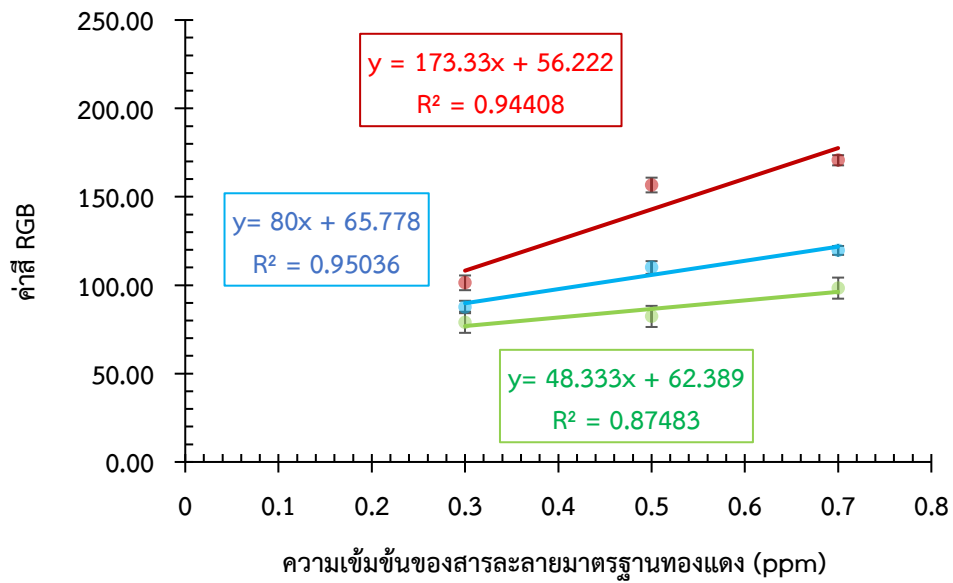
3. ผลการศึกษาบัพเฟอร์ที่ระดับพีเอชต่าง ๆ

ปีเปตสารละลายมาตรฐานทองแดงความเข้มข้น 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปีเปตจากสารละลายมาตรฐานทองแดงความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร เติมสารละลายบัพเฟอร์ที่ระดับพีเอช 2, 3.5, 4.5 และ 5.5 ความเข้มข้น 0.0025 โมลต่อลิตร จำนวน 1.5 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายไดไฮโซน ที่ความเข้มข้น 0.005 %w/v ปริมาตร 1.50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยเอทานอล ดังตาราง 3.9 (ชุดการทดลองที่ 9) และได้ผลดังตาราง 24 และภาพ 24

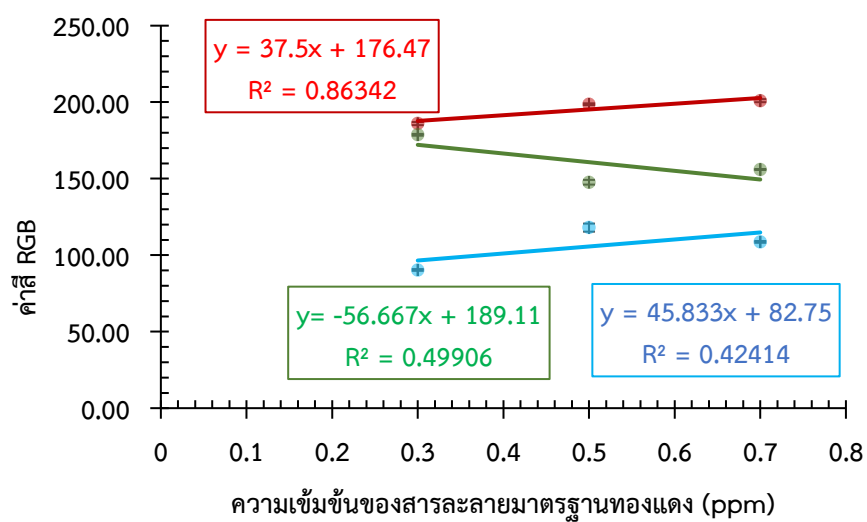
ตาราง 24 ผลการศึกษาบัพเฟอร์ที่ระดับพีเอชต่าง ๆ

บัพเฟอร์ที่ระดับพีเอช	สีของสารประกอบเชิงซ้อนของทองแดงกับไดไฮโซน เมื่อใช้ทองแดงความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าสัมประสิทธิ์สหพันธ์ของสีแดง (R-squared)	ค่าความชันของสีแดง (Slope)
2	 0.2 0.4 0.8	0.9441	173.33
3.5	 0.2 0.4 0.8	0.8634	37.77
4.5	 0.2 0.4 0.8	0.9126	46.67
5.5	 0.2 0.4 0.8	0.4404	35.00

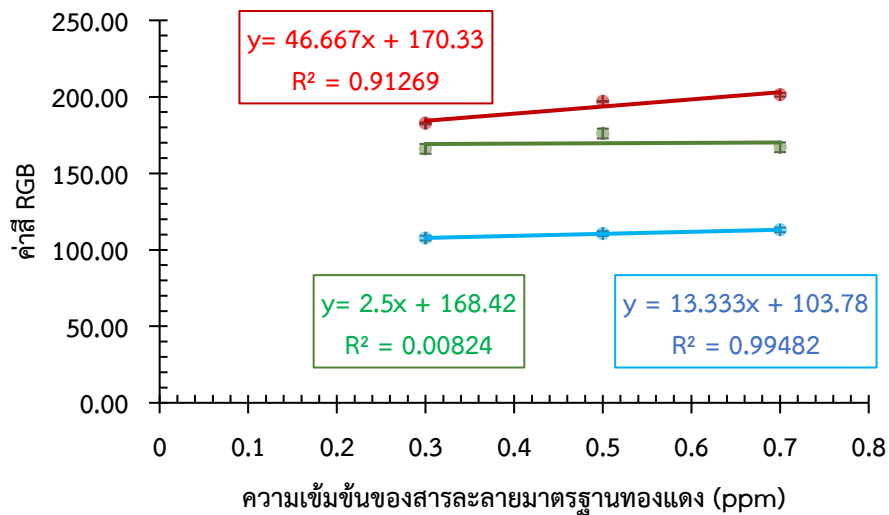
(A)



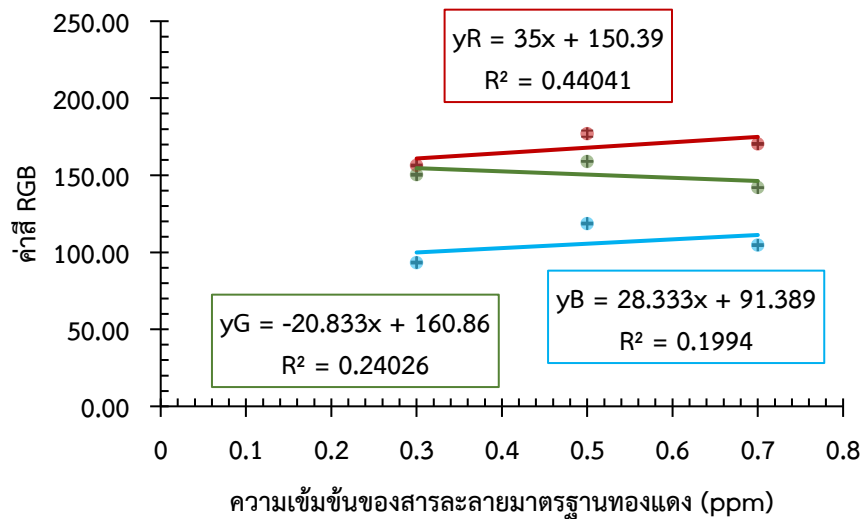
(B)



(C)



(D)



ภาพ 28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานทองแดงกับค่าสี RGB ของสารประกอบเชิงซ้อนของทองแดงกับไดโรโซน เมื่อใช้บัฟเฟอร์ที่ระดับพีเอชเท่ากับ (A) 2, (B) 3.5, (C) 4.5 และ (D) 5.5





จากตาราง 24 และภาพ 24 พบว่า พีเอชต่างกันสีของสารประกอบเชิงซ้อนจะมีโทนสีที่ต่างกัน โดยที่ระดับพีเอชเท่ากับ 2 สารประกอบเชิงซ้อนจะมีสีโทนม่วงไปจนถึงชมพู ซึ่งเป็นสีของ

สารประกอบเชิงซ้อนของทองแดงกับไดไฮดรอนที่ถูกต้อง ที่ระดับพีเอชเท่ากับ 3.5 และ 4.5 สารประกอบเชิงซ้อนมีสีโทนส้มเหลือง และที่ระดับพีเอชเท่ากับ 5.5 สารประกอบเชิงซ้อนมีสีโทนเขียว และพบว่า ที่ระดับพีเอชเท่ากับ 2 ให้ค่าความชันของสีแดงและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ดีที่สุด ดังนั้นจึงเลือกที่พีเอชนี้ในการศึกษาต่อไป

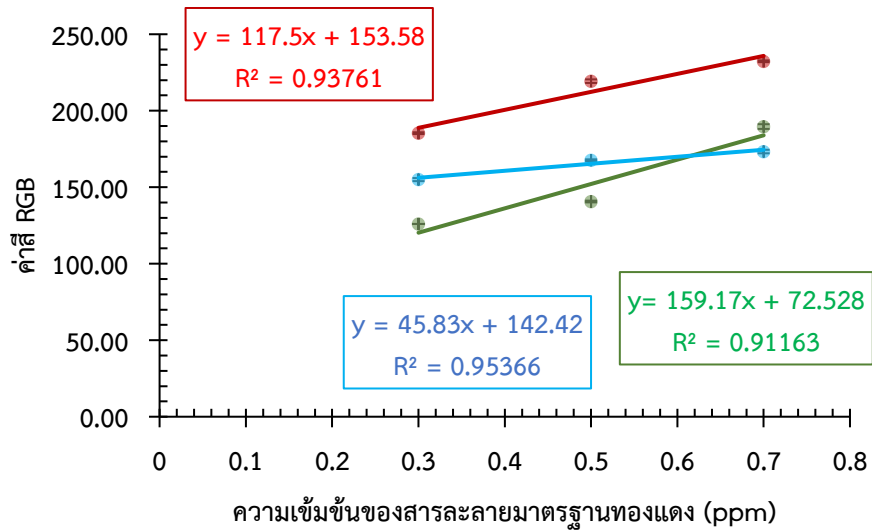
4. ผลการศึกษาปริมาณของบัฟเฟอร์

ปีเปตสารละลายมาตรฐานทองแดงความเข้มข้น 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปีเปตจากสารละลายมาตรฐานทองแดงความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร เติมสารละลายคลอไรด์บัฟเฟอร์พีเอช 2 ความเข้มข้น 0.0025 โมลต่อลิตร ปริมาตร 0.50, 1.00, 1.25 และ 1.50 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายไดไฮดรอนที่ความเข้มข้น 0.005 %w/v ปริมาตร 1.50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยเอทานอล ดังตาราง 3.10 (ชุดการทดลองที่ 10) และได้ผลดังตาราง 25 และภาพ 25

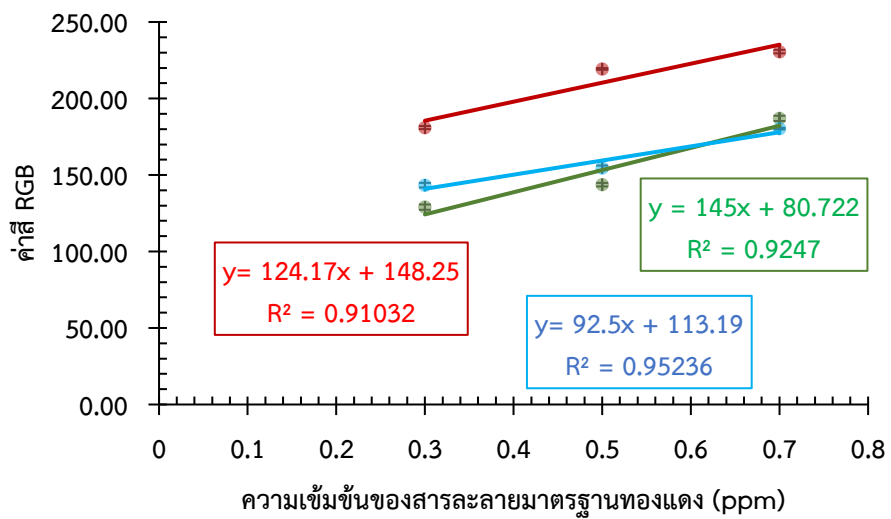
ตาราง 25 ผลการศึกษาปริมาณของบัฟเฟอร์ที่พีเอช 2

ปริมาณของบัฟเฟอร์ (มิลลิลิตร)	สีของสารประกอบเชิงซ้อน ของทองแดงกับไดไฮดรอน เมื่อใช้ทองแดงความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าสัมประสิทธิ์ สหพันธ์ของสี แดง (R-squared)	ค่าความชันของสีแดง (Slope)
0.5		0.9376	117.50
1.0		0.9103	124.17
1.25		0.8554	167.50
1.5		0.9725	211.67

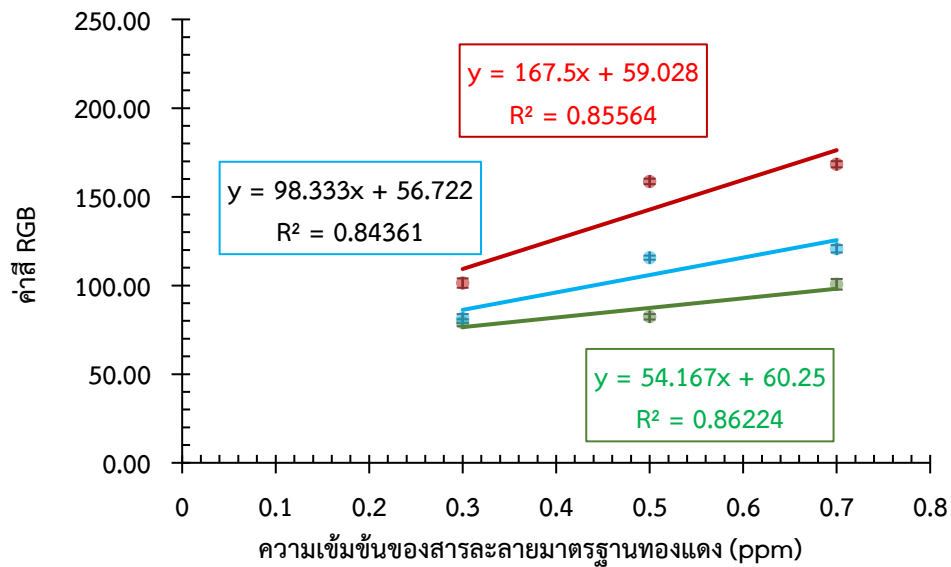
(A)



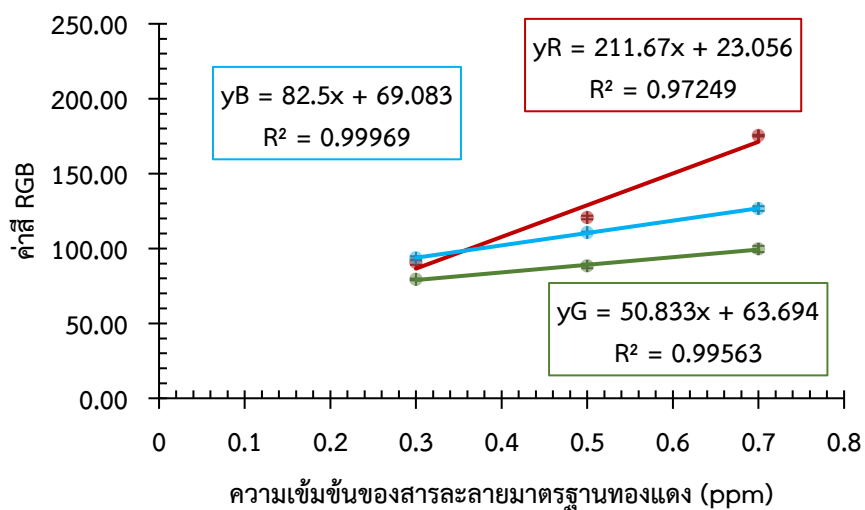
(B)



(C)



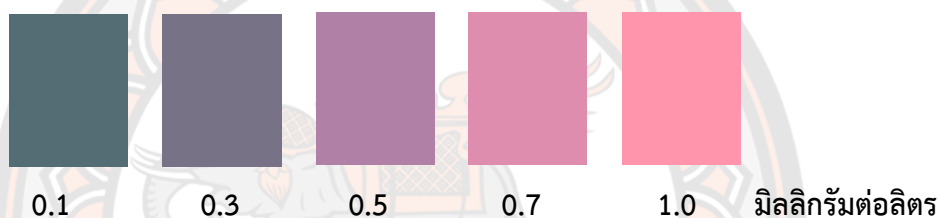
(D)



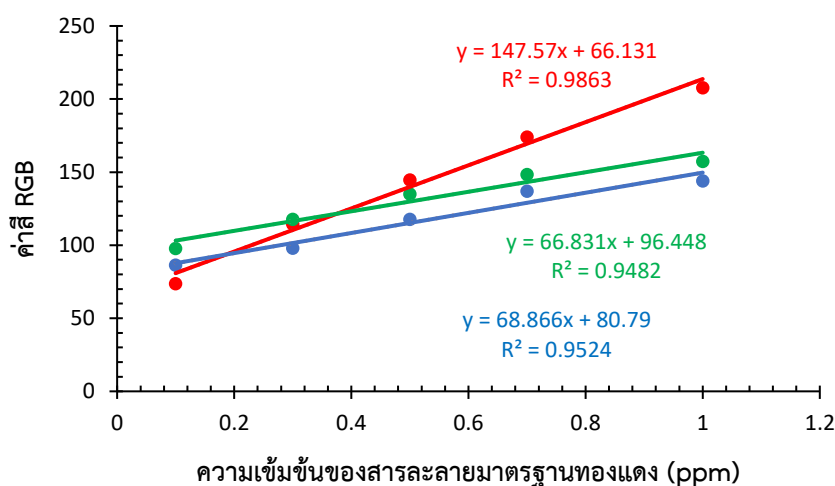
ภาพ 29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานทองแดงกับค่าสี RGB ของสารประกอบเชิงซ้อนของทองแดงกับไธโรโซน เมื่อใช้ปริมาตรของคลอไรด์บัฟเฟอร์พีเอช 2 เท่ากับ (A) 0.5 มิลลิลิตร, (B) 1.0 มิลลิลิตร, (C) 1.25 มิลลิลิตร และ (D) 1.5 มิลลิลิตร

จากตาราง 25 และภาพ 25 พบว่าโทนสีของสารประกอบเชิงซ้อนจะเปลี่ยนไปเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาตรของบัฟเฟอร์ จากโทนสีม่วงอมชมพูไปจนถึงสีชมพู โดยแนวโน้มของค่าความเข้มข้นสีและค่าความเป็นเส้นตรงดีที่สุดที่ปริมาตรของคลอไรด์บัฟเฟอร์เท่ากับ 1.50 มิลลิลิตร ดังนั้นจึงเลือกใช้ปริมาตรนี้ในการศึกษาต่อไป

เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมแล้วได้ทำการทดลองซ้ำอีกครั้ง เพื่อให้มีความละเอียดมากขึ้น โดยทำ ทั้งหมด 5 ความเข้มข้น (0.1, 0.3, 0.5, 0.7 และ 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร) ซึ่งเลือกทำซ้ำที่สภาวะการทดลองที่ให้กราฟที่มีแนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เข้าใกล้ 1 มากที่สุด คือ สภาวะการทดลองที่ใช้ความเข้มข้นของไดโรโซนเท่ากับ 0.0050 %(w/v) ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร และใช้คลอไรด์บัฟเฟอร์พีเอช 2 ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร ให้ผลของภาพถ่ายสีของสารประกอบเชิงซ้อน ดังภาพ 26 ซึ่งมีสีม่วงอมชมพูไปจนถึงสีชมพู โดยเป็นสีที่อยู่ในโทนเดียวกันและมีการไล่กันของระดับสี และให้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานทองแดงกับค่าสี RGB ดังภาพ 27 ที่มีค่าความชันของสีแดงที่สูง และแนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่เข้าใกล้ 1



ภาพ 30 ภาพถ่ายสีของสารประกอบเชิงซ้อนของทองแดงกับไดโรโซนที่สภาวะการทดลองที่เหมาะสม เมื่อใช้ไดโรโซนที่ความเข้มข้น 0.0050 %(w/v) ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร และใช้คลอไรด์บัฟเฟอร์พีเอช 2 ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร




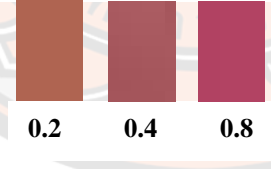
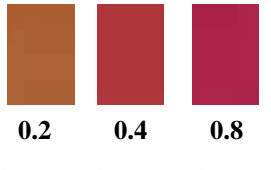
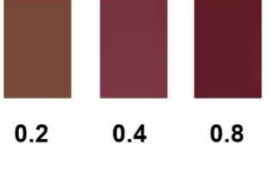
ภาพ 31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานทองแดงกับค่าสี RGB ของสารประกอบเชิงซ้อนของทองแดงกับไดโรโซนที่สภาวะการทดลองที่เหมาะสม

4.4 ผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายภาพสีของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสังกะสีกับไดไฮโดรโซนด้วยเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอร์ิเมตรี

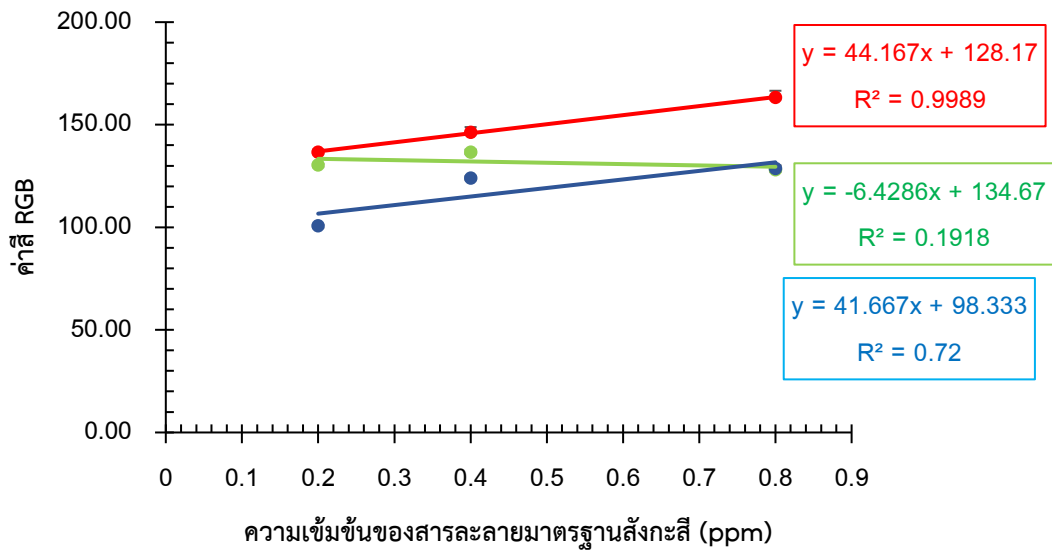
1. ผลการศึกษาความเข้มข้นของไดไฮโดรโซน

เตรียมไดไฮโดรโซนความเข้มข้น 0.0015, 0.0025, 0.005 และ 0.01 %w/v โดยปิเปตจากสารละลายไดไฮโดรโซนเข้มข้น 0.1 %w/v แล้วปรับปริมาตรด้วยโพรพานอลเข้มข้น ต่อมาเตรียมสารละลายมาตรฐานสังกะสีเข้มข้น 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปิเปตจากสารละลายมาตรฐานสังกะสีความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิลิตร ตามลำดับลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายอะซิเตทบัฟเฟอร์พีเอช 4.5 ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร จำนวน 0.5 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยเอทานอล ดังตาราง 3.11 (ชุดการทดลองที่ 11) และได้ผลดังตาราง 26 และภาพ 28

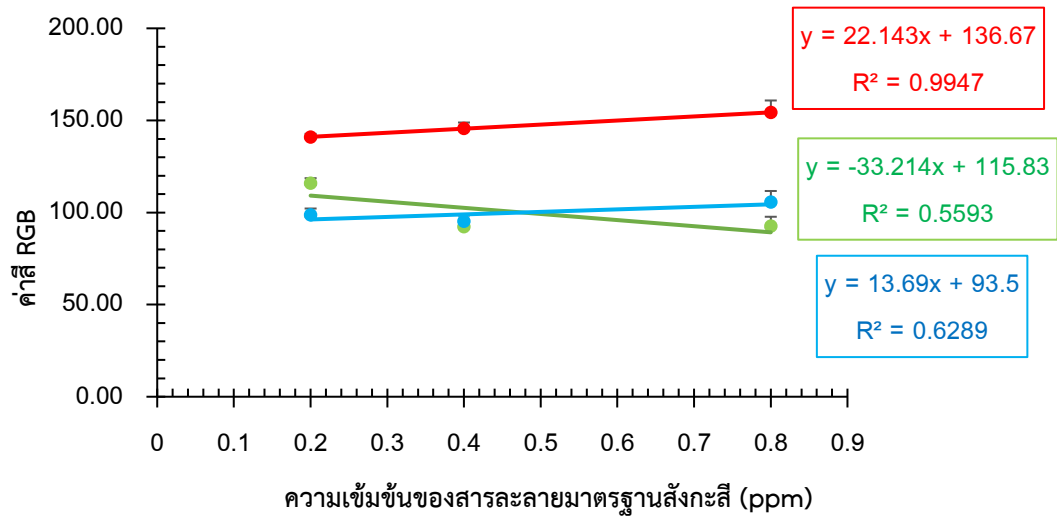
ตาราง 26 ค่าความเป็นเส้นตรง (R-squared) และค่าความชัน (Slope) ของสีแดงเมื่อความเข้มข้นของไดไฮโดรโซนต่างกัน

ความเข้มข้นของไดไฮโดรโซน (%w/v)	สีของสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีกับไดไฮโดรโซน เมื่อใช้สังกะสีความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าสัมประสิทธิ์สหพันธ์ของสีแดง (R-squared)	ค่าความชันของสีแดง (Slope)
0.0015		0.9989	44.16
0.0025		0.9943	22.14
0.0050		0.9897	50.95
0.0100		0.0611	6.78

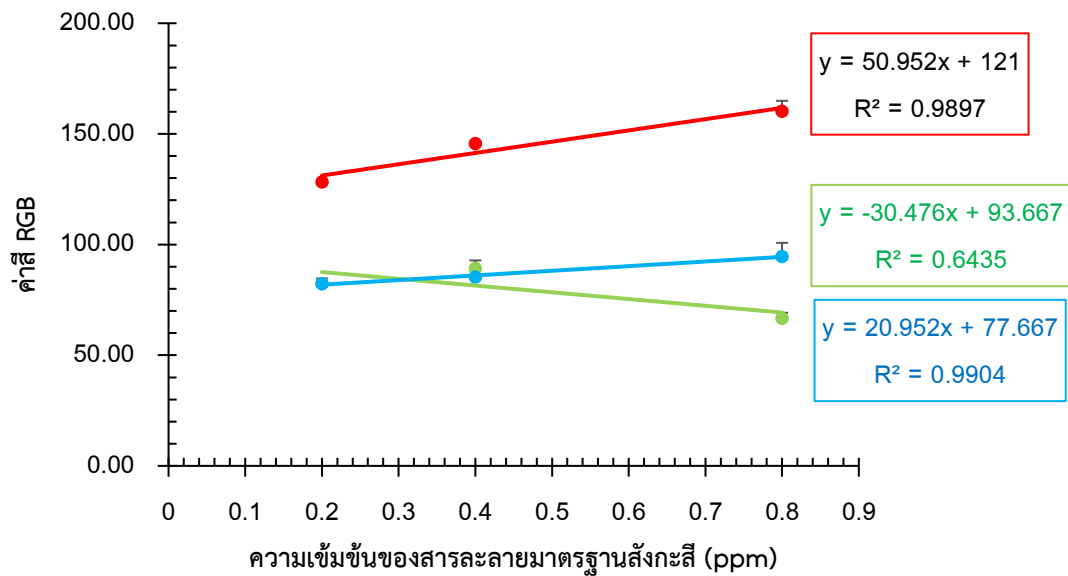
(A)



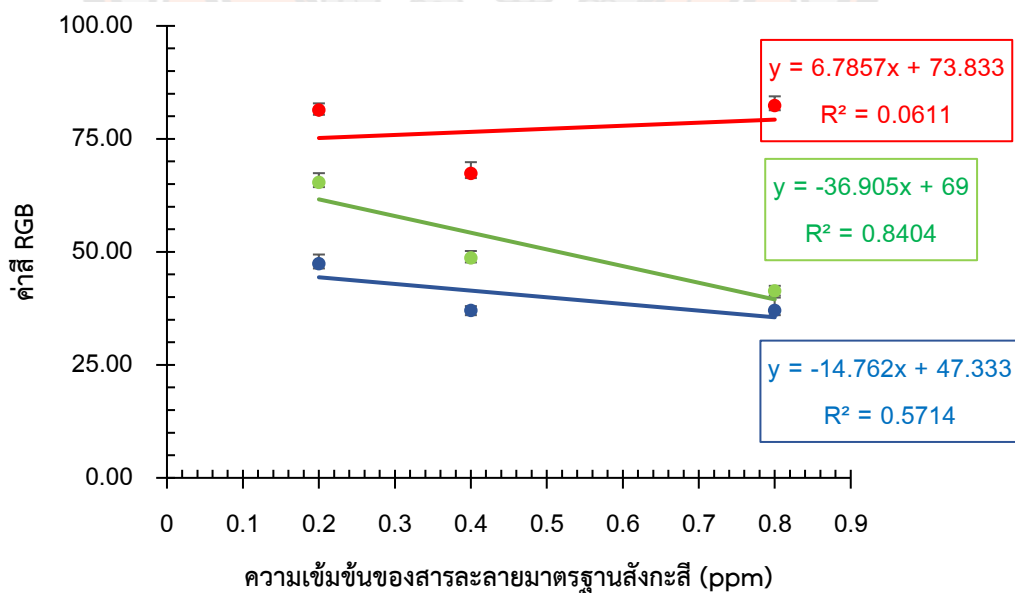
(B)



(C)



(D)

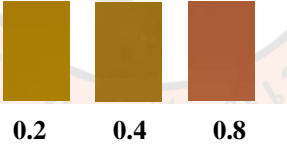
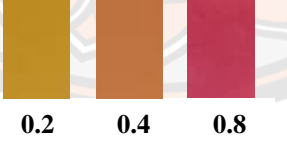

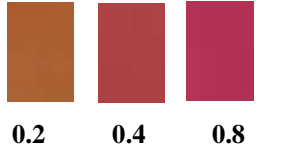


ภาพ 32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานสังกะสีกับค่าสี RGB ของสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีกับไตรโชน เมื่อใช้ความเข้มข้นของไตรโชนเท่ากับ (A) 0.0015 %(w/v), (B) 0.0025 %(w/v), (C) 0.0050 %(w/v) และ (D) 0.0100 %(w/v)

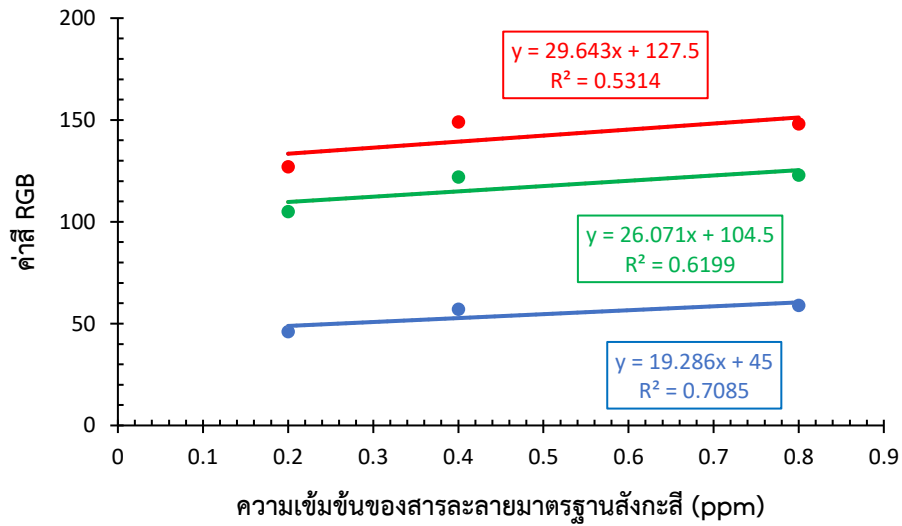
จากตาราง 26 และภาพ 28 พบว่าสีสารประกอบเชิงซ้อนมีสีชมพูอมส้มจนไปถึงสีชมพู และเข้มข้นตามความเข้มข้นของไดไฮโดรอน จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีและค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานทองแดง พบว่าที่ความเข้มข้นของไดไฮโดรอนเท่ากับ 0.0050 %w/v มีค่าความเข้มข้นของสีแดง และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ดีที่สุด ดังนั้นจึงเลือกที่ความเข้มข้นนี้ในการศึกษาต่อไป

2. ผลการศึกษาปริมาณของไดไฮโดรอน

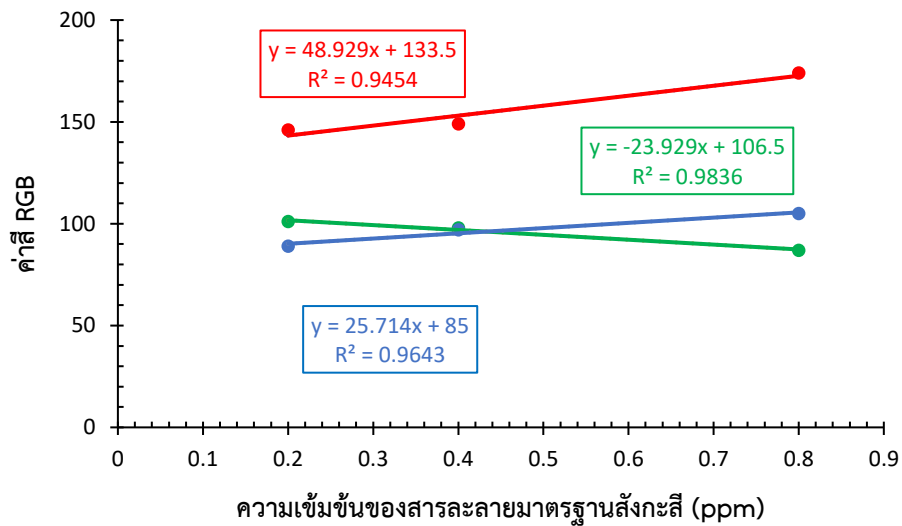
ปีเปตสารละลายมาตรฐานสังกะสีความเข้มข้น 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปีเปตจากสารละลายมาตรฐานสังกะสีความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิตร เติมสารละลายอะซิเตทบัฟเฟอร์พีเอช 4.5 ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร จำนวน 0.5 มิลลิตร จากนั้นเติมสารละลายไดไฮโดรอนที่ความเข้มข้น 0.005 %w/v ปริมาตร 0.50, 1.00, 1.25 และ 1.50 มิลลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยเอทานอล ดังตาราง 3.12 (ชุดการทดลองที่ 12) และได้ผลดังตาราง 27 และภาพ 29 ตาราง 27 ค่าความเป็นเส้นตรง (R-squared) และค่าความชัน (Slope) ของสีแดงเมื่อปริมาตรของไดไฮโดรอนต่างกัน

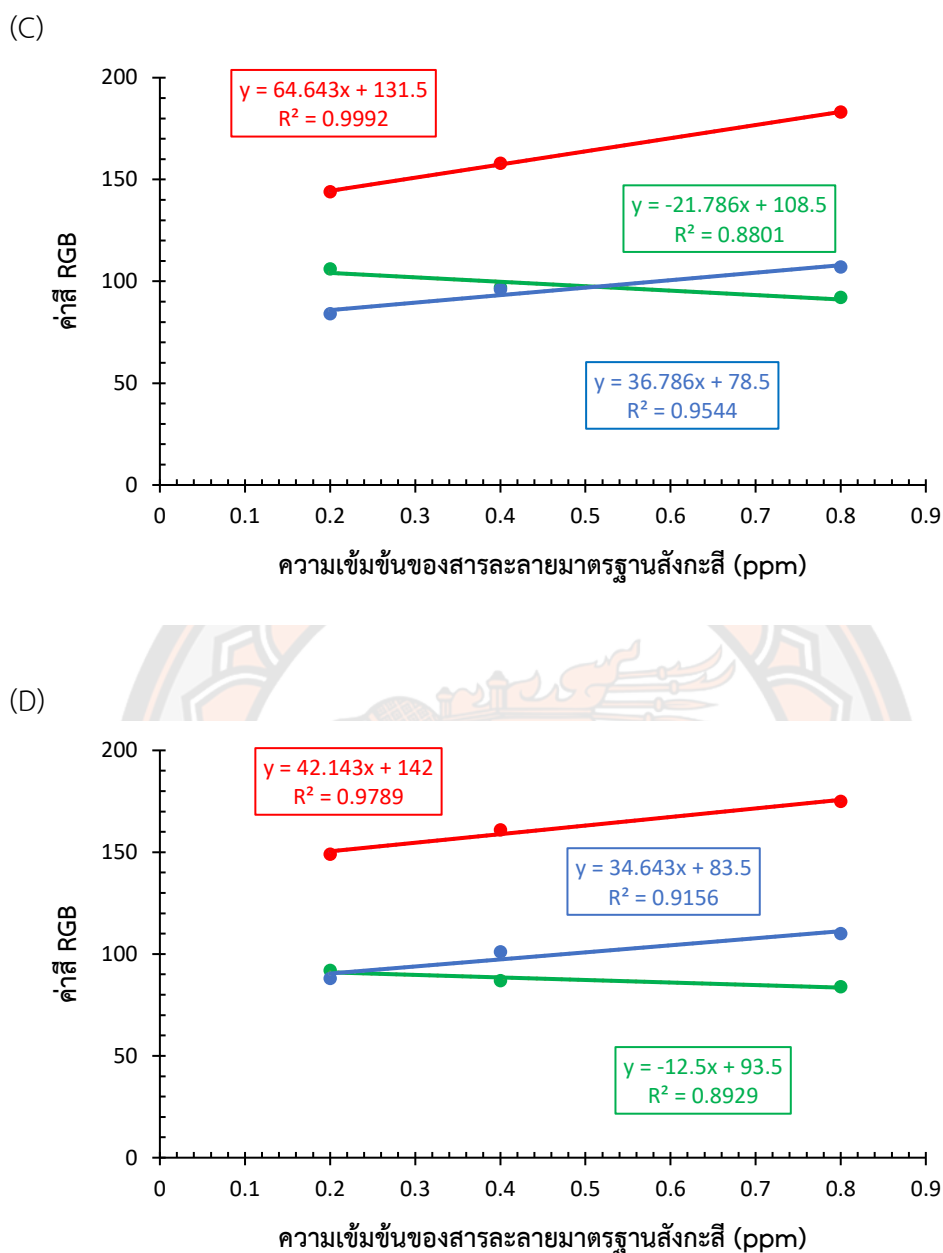
ปริมาตรของไดไฮโดรอนความเข้มข้น 0.0050 %w/v (มิลลิลิตร)	สีของสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีกับไดไฮโดรอน เมื่อใช้สังกะสีความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าสัมประสิทธิ์สหพันธ์ของสีแดง (R-squared)	ค่าความชันของสีแดง (Slope)
0.5	 0.2 0.4 0.8	0.5314	29.64
1.0	 0.2 0.4 0.8	0.9454	48.92
1.25	 0.2 0.4 0.8	0.9992	64.64
1.5	 0.2 0.4 0.8	0.9789	42.14

(A)



(B)





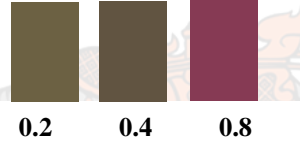
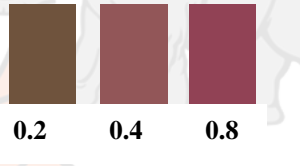
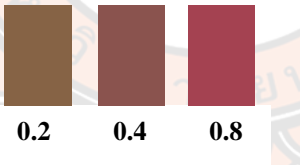
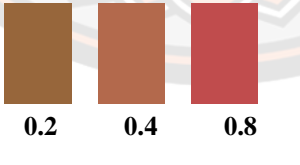
ภาพ 33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานสังกะสีกับค่าสี RGB ของสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีกับไดไฮโดรเจน โดยการศึกษาความเข้มข้น 0.0050 %w/v ปริมาตรไดไฮโดรเจน (A) 0.5 มิลลิลิตร, (B) 1.0 มิลลิลิตร, (C) 1.25 มิลลิลิตร และ (D) 1.5 มิลลิลิตร

จากตาราง 27 และภาพ 29 พบว่าสีสารประกอบเชิงซ้อนมีสีส้มอมเหลืองจนถึงสีชมพูเข้ม เมื่อปริมาตรของไดไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีและค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานสังกะสี พบว่าเมื่อใช้ปริมาตรของไดไฮโดรเจนไดไฮโดรเจนเท่ากับ 1.25 มิลลิลิตร มีค่าความชันของสีแดง และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ดีที่สุด ดังนั้นจึงเลือกที่ปริมาตรนี้ในการนำไปศึกษาต่อไป

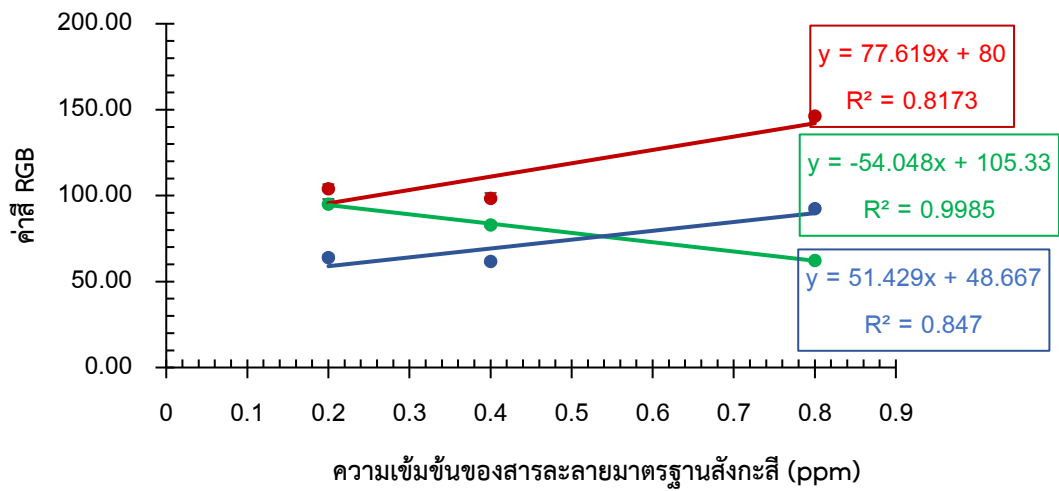
3. ศึกษาบัพเฟอร์ที่ระดับพีเอชต่าง ๆ

ปีเปตสารละลายมาตรฐานสังกะสีความเข้มข้น 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปีเปตจากสารละลายมาตรฐานสังกะสีความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร เติมสารละลายบัพเฟอร์ที่ระดับพีเอช 3.5, 4.0, 4.5 และ 5.0 ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร จำนวน 1.5 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายไดไฮโอโซนที่ความเข้มข้น 0.005 %w/v ปริมาตร 1.50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยเอทานอล ดังตาราง 3.13 (ชุดการทดลองที่ 13) และได้ผลดังตาราง 28 และภาพ 30

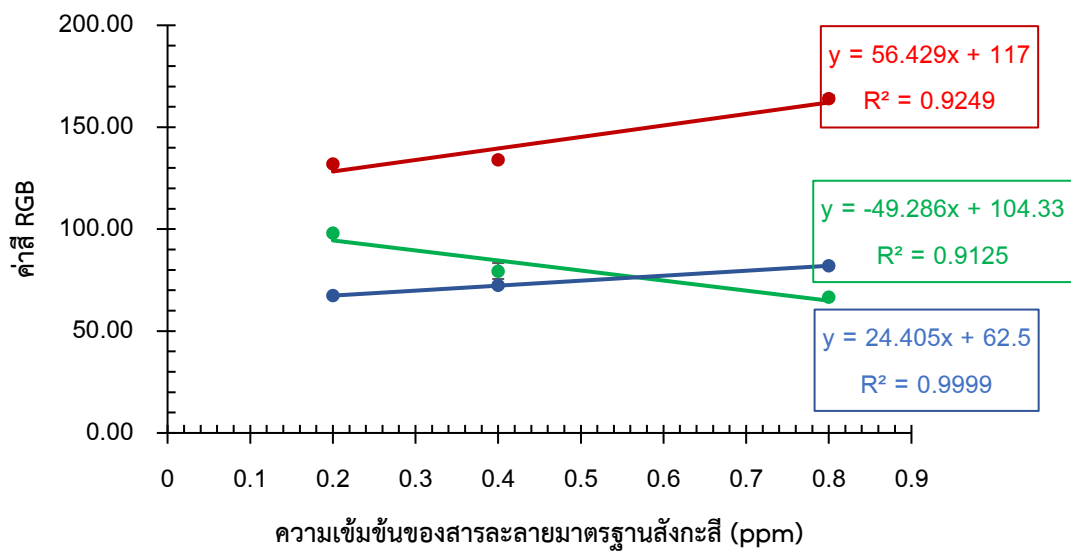
ตาราง 28 ผลการศึกษาบัพเฟอร์ที่ระดับพีเอชต่าง ๆ

บัพเฟอร์ที่ระดับพีเอช	สีของสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีกับไดไฮโอโซน เมื่อใช้สังกะสีความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าสัมประสิทธิ์สหพันธ์ของสีแดง (R-squared)	ค่าความชันของสีแดง (Slope)
3.5		0.8173	77.62
4.0		0.9249	56.43
4.5		0.9909	86.19
5		0.9443	50.95

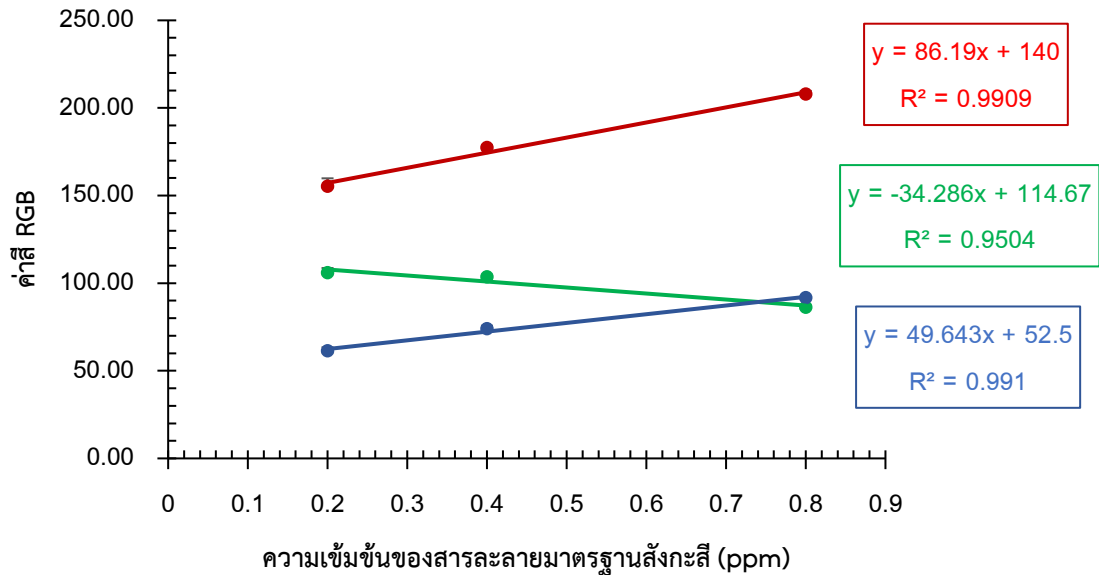
(A)



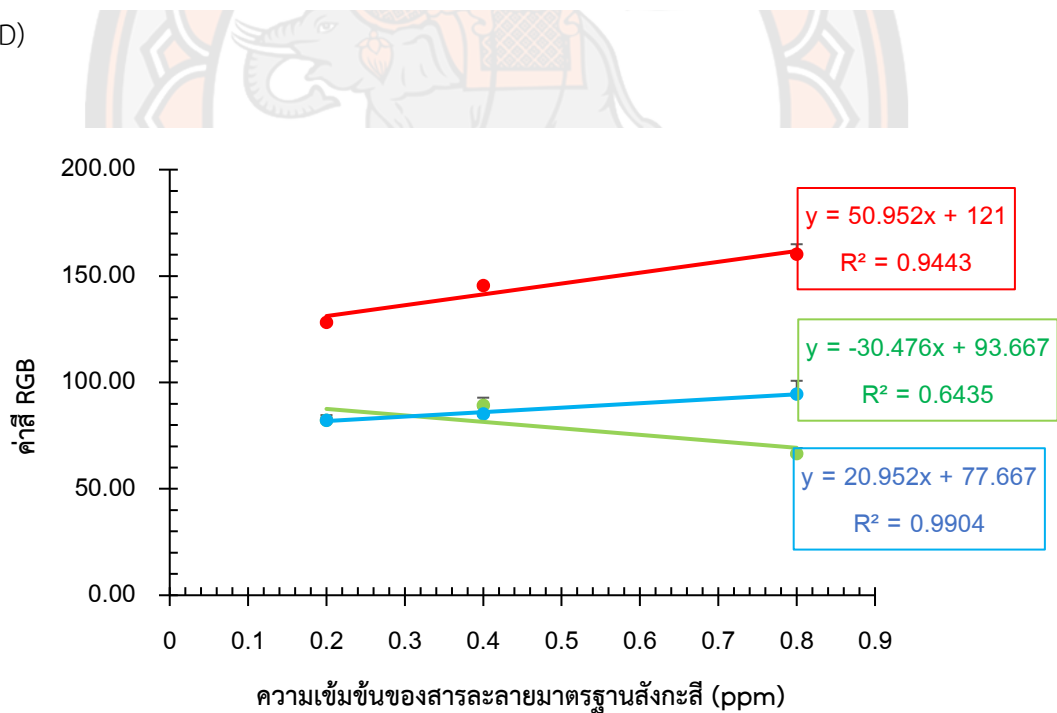
(B)



(C)



(D)



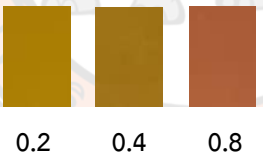
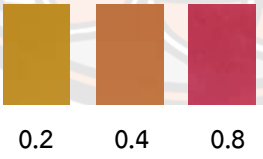
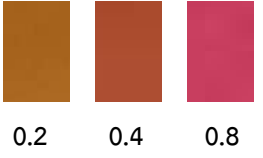

ภาพ 34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานสังกะสีกับค่าสี RGB ของสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีกับไดโรโซน เมื่อศึกษาบัฟเฟอร์ที่ระดับพีเอชเท่ากับ (A) 3.5, (B) 4, (C) 4.5 และ (D) 5.5

จากตาราง 28 และภาพ 30 พบว่า ที่ระดับพีเอชต่างกันสารประกอบเชิงซ้อนจะมีโทนสีที่ต่างกัน โดยที่ระดับพีเอชเท่ากับ 3.5 สารประกอบเชิงซ้อนจะมีสีโทนเขียวอมม่วง ที่ระดับพีเอชเท่ากับ 4 สารประกอบเชิงซ้อนมีสีโทนน้ำตาลชมพู และที่ระดับพีเอชเท่ากับ 4.5 สารประกอบเชิงซ้อนมีสีโทนส้มชมพู โดยที่ระดับพีเอชเท่ากับ 4.5 ให้ค่าความชันของสีแดงและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ดีที่สุด ดังนั้นจึงเลือกที่ พีเอชนี้ในการศึกษาต่อไป

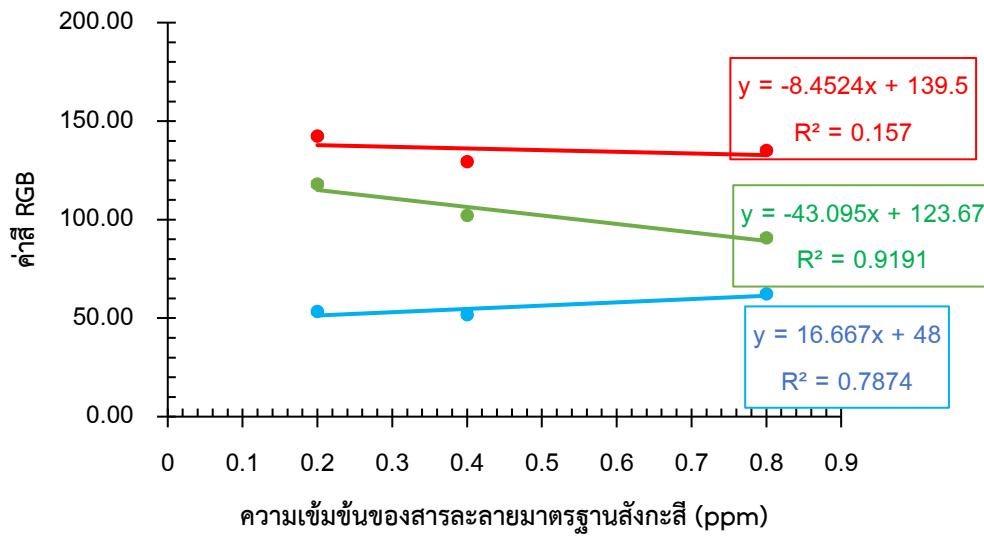
4. ผลการศึกษาปริมาณของบัฟเฟอร์

ปีเปตสารละลายมาตรฐานสังกะสีความเข้มข้น 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปีเปตจากสารละลายมาตรฐานสังกะสีความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.2, 0.4 และ 0.8 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร เติมสารละลายอะซิเตทบัฟเฟอร์พีเอช 4.5 ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ปริมาตร 0.50, 1.00, 1.25 และ 1.50 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายไดไฮโซอินที่ความเข้มข้น 0.005 %w/v ปริมาตร 1.50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยเอทานอล ดังตาราง 3.14 (ชุดการทดลองที่ 14) และได้ผลดังตาราง 29 และภาพ 31

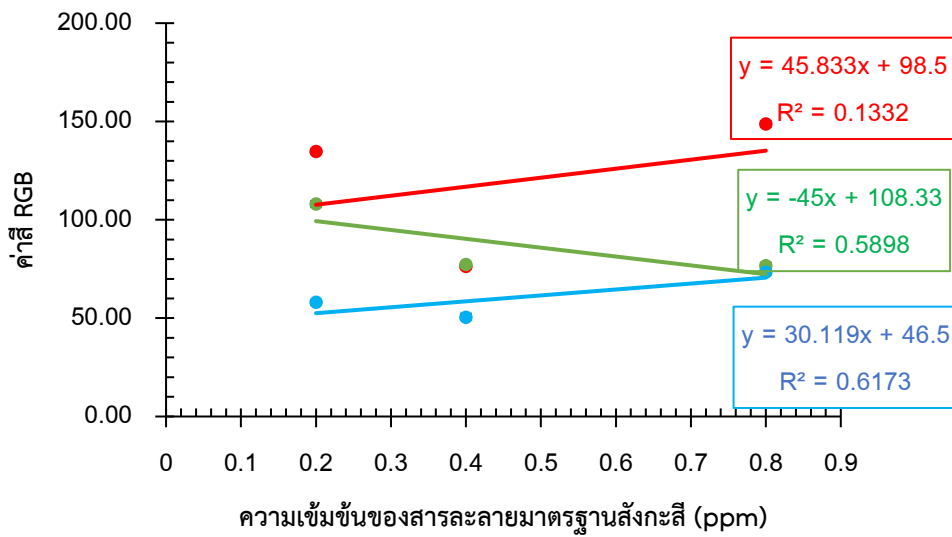
ตาราง 29 ผลการศึกษาปริมาณของบัฟเฟอร์ที่พีเอช 4.5

ปริมาณของบัฟเฟอร์ พีเอช 4.5 (มิลลิลิตร)	สีของสารประกอบเชิงซ้อน ของสังกะสีกับไดไฮโซอิน เมื่อใช้สังกะสีความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าสัมประสิทธิ์ สหพันธ์ของสีแดง (R-squared)	ค่าความชันของสี แดง (Slope)
0.50	 0.2 0.4 0.8	0.157	8.45
1.00	 0.2 0.4 0.8	0.1332	45.83
1.25	 0.2 0.4 0.8	0.025	5.48
1.50	 0.2 0.4 0.8	0.9999	79.88

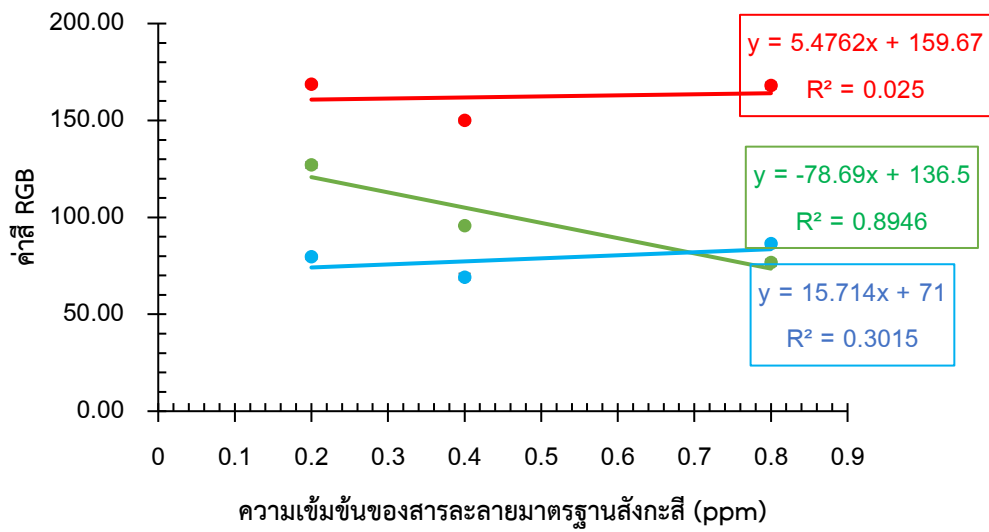
(A)



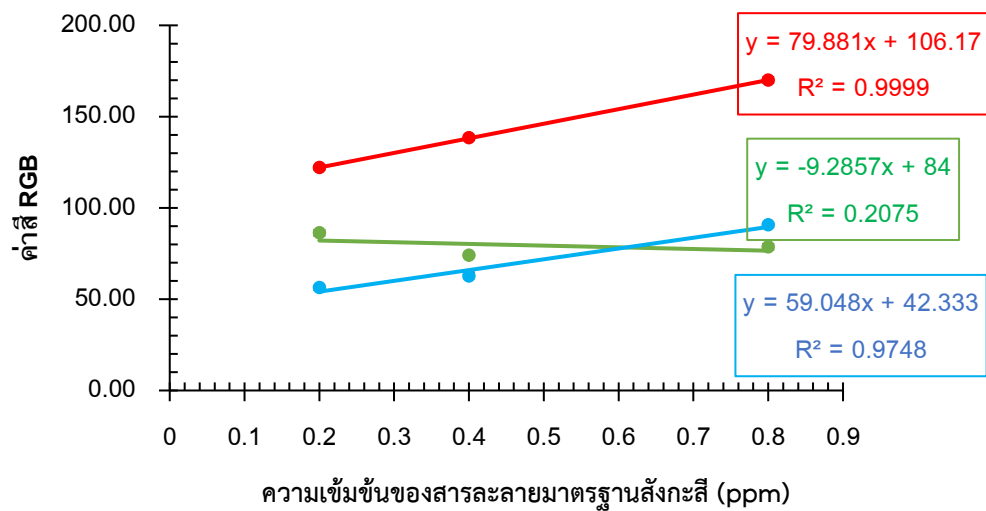
(B)



(C)



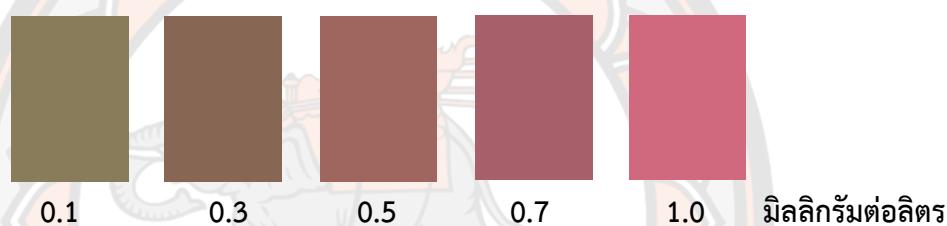
(D)



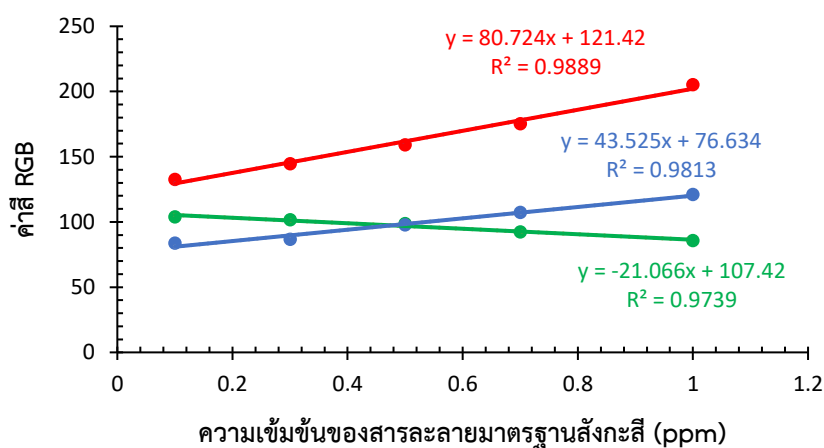
ภาพ 35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานสังกะสีกับค่าสี RGB ของสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีกับไดโรโซน เมื่อใช้ปริมาตรของอะซิเตทบัฟเฟอร์พีเอช 4.5 เท่ากับ (A) 0.5 มิลลิลิตร, (B) 1.0 มิลลิลิตร, (C) 1.25 มิลลิลิตร และ (D) 1.5 มิลลิลิตร

จากตาราง 29 และภาพ 31 พบว่าเมื่อใช้ปริมาตรของบัพเฟอร์ที่แตกต่างกัน โทนสีของสารประกอบเชิงซ้อนจะเปลี่ยนไปเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาตรของบัพเฟอร์ จากโทนสีน้ำตาลส้มเป็นสีชมพูส้ม โดยแนวโน้มของค่าความชันสีแดงและค่าความเป็นเส้นตรงดีที่สุดในปริมาตรของอะซิเตทบัพเฟอร์เท่ากับ 1.50 มิลลิลิตร ดังนั้นจึงเลือกที่ปริมาตรนี้ในการศึกษาต่อไป

เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมแล้วได้ทำการทดลองซ้ำอีกครั้ง เพื่อให้มีความละเอียดมากขึ้น โดยทำ ทั้งหมด 5 ความเข้มข้น (0.1, 0.3, 0.5, 0.7 และ 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร) ซึ่งเลือกทำซ้ำที่สภาวะการทดลองที่ให้กราฟที่มีแนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เข้าใกล้ 1 มากที่สุด คือ สภาวะการทดลองที่ใช้ความเข้มข้นของไดโรโซนเท่ากับ 0.0050 %(w/v) ปริมาตร 1.25 มิลลิลิตร และใช้อะซิเตทบัพเฟอร์พีเอช 4.5 ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร ให้ผลของภาพถ่ายสีของสารประกอบเชิงซ้อน ดังภาพ 32 ซึ่งมีสีน้ำตาลส้มไปจนถึงสีชมพู โดยเป็นสีที่อยู่ในโทนเดียวกันและมีการไล่กันของระดับสี และให้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานสังกะสีกับค่าสี RGB ดังภาพ 33 ที่มีค่าความชันของสีแดงที่สูง และแนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่เข้าใกล้ 1



ภาพ 36 ภาพถ่ายสีของสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีกับไดโรโซนที่สภาวะการทดลองที่เหมาะสม ซึ่งใช้ไดโรโซนที่ความเข้มข้น 0.0050 %(w/v) ปริมาตร 1.25 มิลลิลิตร และใช้อะซิเตทบัพเฟอร์พีเอช 4.5 ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร



ภาพ 37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานสังกะสีกับค่าสี RGB ของสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีกับไดโรโซนที่สภาวะการทดลองที่เหมาะสม

4.5 การศึกษาความแม่นยำของเครื่องมือ (Inter-day, Intra-day precision)

1. Inter-day precision

ได้ทำการทดลองดังหัวข้อ 3.6.5 ข้อที่ 1 ในบทที่ 3 โดยการถ่ายภาพสีของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโลหะหนักกับไดโธโซนด้วยเครื่องดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริมิเตอร์ และนำค่าสีที่ได้ไปสร้างกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโลหะหนักกับค่าสี RGB ผลที่ได้แสดงดังตาราง 30, 31, 32 และ 33

ตาราง 30 ผลการทดลองของตะกั่ว เมื่อทำการวัดโดยเครื่องดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริมิเตอร์ เป็นเวลา 5 วัน

วันที่	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R-Squared; R^2)	ค่าความชันของสีแดง (Slope)
1	0.9954	101.1
2	0.9811	106.7
3	0.9973	101.4
4	0.9845	105.3
5	0.9799	102.3
เฉลี่ย	0.9876	104.0
SD	0.0082	2.16
%RSD	0.8258	2.07

ตาราง 31 ผลการทดลองของแคดเมียม เมื่อทำการวัดโดยเครื่องดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริมิเตอร์ เป็นเวลา 5 วัน

วันที่	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R-Squared; R^2)	ค่าความชันของสีแดง (Slope)
1	0.9899	65.66
2	0.9944	68.19
3	0.9897	64.23
4	0.9799	65.01
5	0.9889	65.79
เฉลี่ย	0.9886	65.77
SD	0.0053	1.49
%RSD	0.54	2.26

ตาราง 32 ผลการทดลองของทองแดง เมื่อทำการวัดโดยเครื่องดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริมิเตอร์ เป็นเวลา 5 วัน

วันที่	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R-Squared; R^2)	ค่าความชันของสีแดง (Slope)
1	0.9745	144.5
2	0.9776	145.3
3	0.9767	148.2
4	0.9865	149.7
5	0.9845	143.3
เฉลี่ย	0.9799	146.2
SD	0.0052	2.66
%RSD	0.53	1.82

ตาราง 33 ผลการทดลองของสังกะสี เมื่อทำการวัดโดยเครื่องดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริมิเตอร์ เป็นเวลา 5 วัน

วันที่	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R-Squared; R^2)	ค่าความชันของสีแดง (Slope)
1	0.9846	79.46
2	0.9814	78.21
3	0.9745	77.45
4	0.9878	75.66
5	0.9749	73.32
เฉลี่ย	0.9806	76.82
SD	0.0059	2.39
%RSD	0.60	3.11

เมื่อพิจารณาจากตาราง 30, 31, 32 และ 33 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของค่าสีแดงมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ต่ำกว่า 0.5 และร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพันธ์ ต่ำกว่า 1.0 เพราะฉะนั้นจะเห็นได้ว่าเครื่องดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริมิเตอร์ มีความแม่นยำในการวิเคราะห์ดีมาก

2. Intra-day precision

ได้ทำการทดลองดังหัวข้อ 3.6.5 ข้อที่ 2 ในบทที่ 3 โดยการถ่ายภาพสีของสารประกอบ เริงซ้อนระหว่างโลหะหนักกับไดไฮโซน ด้วยเครื่องดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริมิเตอร์ และนำค่าสีที่ได้ไปสร้างกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโลหะหนักกับค่าสี RGB ผลที่ได้แสดงดังตาราง 34, 35, 36 และ 37

ตาราง 34 ผลการทดลองของตะกั่ว เมื่อทำการวัดโดยเครื่องดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริมิเตอร์ 5 ครั้งในวันเดียวกัน แต่คนละเวลา

เวลา	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R-Squared; R ²)	ค่าความชันของสีแดง (Slope)
9.00	0.9799	108.0
11.00	0.9876	105.6
13.00	0.9919	104.1
15.00	0.9845	108.5
17.00	0.9912	109.1
เฉลี่ย	0.9870	107.1
SD	0.0050	2.12
%RSD	0.50	1.97

ตาราง 35 ผลการทดลองของแคดเมียม เมื่อทำการวัดโดยเครื่องดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริมิเตอร์ 5 ครั้งในวันเดียวกัน แต่คนละเวลา

เวลา	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R-Squared; R ²)	ค่าความชันของสีแดง (Slope)
9.00	0.9976	63.86
11.00	0.9946	65.46
13.00	0.9841	65.89
15.00	0.9877	62.16
17.00	0.9851	61.34
เฉลี่ย	0.9898	63.74
SD	0.0060	1.99
%RSD	0.60	3.12

ตาราง 36 ผลการทดลองของทองแดง เมื่อทำการวัดโดยเครื่องดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริมิเตอร์ 5 ครั้ง
ในวันเดียวกัน แต่คนละเวลา

เวลา	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R-Squared; R ²)	ค่าความชันของสีแดง (Slope)
9.00	0.9716	148.4
11.00	0.9709	146.2
13.00	0.9763	145.9
15.00	0.9799	144.3
17.00	0.9703	147.6
เฉลี่ย	0.9738	146.5
SD	0.0041	1.61
%RSD	0.43	1.0.1

ตาราง 37 ผลการทดลองของสังกะสี เมื่อทำการวัดโดยเครื่องดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริมิเตอร์ 5 ครั้ง
ในวันเดียวกัน แต่คนละเวลา

เวลา	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R-Squared; R ²)	ค่าความชันของสีแดง (Slope)
9.00	0.9881	78.16
11.00	0.9719	74.29
13.00	0.9879	76.46
15.00	0.9761	79.45
17.00	0.9717	76.72
เฉลี่ย	0.9791	76.99
SD	0.0083	1.94
%RSD	0.84	2.52

เมื่อพิจารณาจากตาราง 34, 35, 36 และ 37 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ
ค่าสีแดงมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ต่ำกว่า 0.5 และร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพันธ์ ต่ำกว่า
1.0 เพราะฉะนั้นจะเห็นได้ว่าเครื่องดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริมิเตอร์ มีความแม่นยำในการวิเคราะห์ดีมาก

4.6 ผลการหาปริมาณโลหะหนักต่าง ๆ ในตัวอย่างข้าวและคาร์บอนการกลับคืน (%Recovery) ของวิธีการสกัดตัวอย่างข้าวด้วยเทคนิคการย่อยแบบเปียกโดยใช้แสงอัลตราไวโอเลต (UV-digestion)

4.6.1 ผลการวิเคราะห์โดยเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรี

จากการทดลองดังหัวข้อ 3.6.6.1 ข้อที่ 1 และ 2 ในบทที่ 3 ได้ผลดังตาราง 38 ซึ่งจากตาราง พบว่าการหาปริมาณโลหะหนักทั้ง 4 ชนิด ในตัวอย่างข้าวหอมมะลิ ผลเฉลี่ยการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง ไม่พบ ตะกั่ว แคดเมียม และทองแดง ในตัวอย่างข้าวหอมมะลิ แต่พบสังกะสีเท่ากับ 0.081 มิลลิกรัมต่อลิตร และตัวอย่างที่มีการเติมสารละลายมาตรฐานโลหะหนักทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และสังกะสี ความเข้มข้น 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลเฉลี่ยการทดลอง ซ้ำ 5 ครั้ง ได้เท่ากับ 0.516, 0.527, 0.507 และ 0.592 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และเมื่อคำนวณหาค่าร้อยละการกลับคืน ผลที่ได้เท่ากับ 103, 105, 101 และ 102 ตามลำดับ ค่าคำนวณหาความเข้มข้นของโลหะหนักในตัวอย่างข้าวกล้องที่ไม่มีการเติมสารละลายมาตรฐานโลหะหนัก ผลเฉลี่ยการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง ไม่พบ ตะกั่ว แคดเมียม และทองแดง ในตัวอย่างข้าวกล้อง แต่พบสังกะสีเท่ากับ 0.067 มิลลิกรัมต่อลิตร และตัวอย่างที่มีการเติมสารละลายมาตรฐานโลหะหนักทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และสังกะสี ความเข้มข้น 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลเฉลี่ยการทดลอง ซ้ำ 5 ครั้ง ได้เท่ากับ 0.489, 0.539, 0.533 และ 0.577 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และเมื่อคำนวณหาค่าร้อยละการกลับคืน ผลที่ได้เท่ากับ 100, 105, 105 และ 102 ตามลำดับ และคำนวณหาความเข้มข้นของโลหะหนักในตัวอย่างข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่ไม่มีการเติมสารละลายมาตรฐานโลหะหนัก ผลเฉลี่ยการทดลอง ซ้ำ 5 ครั้ง ไม่พบ ตะกั่ว แคดเมียม และทองแดง ในตัวอย่างข้าวไรซ์เบอร์รี่ แต่พบสังกะสีเท่ากับ 0.082 มิลลิกรัมต่อลิตร และตัวอย่างที่มีการเติมสารละลายมาตรฐานโลหะหนักทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และสังกะสี ความเข้มข้น 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลเฉลี่ยการทดลอง ซ้ำ 5 ครั้ง ได้เท่ากับ 0.501, 0.527, 0.510 และ 0.587 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และเมื่อคำนวณหาค่าร้อยละการกลับคืน ผลที่ได้เท่ากับ 103, 99, 101 และ 101 ตามลำดับ

ตาราง 38 ผลการหาปริมาณโลหะหนักต่าง ๆ ในตัวอย่างข้าวและค่าร้อยละการกลับคืน (%Recovery) โดยเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอรีเมตรี

ตัวอย่าง	โลหะหนัก	ความเข้มข้นของโลหะหนัก ที่เติมลงไปในตัวอย่าง (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ความเข้มข้นของโลหะ หนักที่วัดได้ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ร้อยละการ กลับคืน (n=5)
ข้าวหอมมะลิ	ตะกั่ว	-	ND*	-
		50.0	51.6±0.9	103.3±1.9
	แคดเมียม	-	ND*	-
		50.0	52.7±1.5	105.5±3.1
	ทองแดง	-	ND*	-
		50.0	50.7±0.6	100.6±1.0
	สังกะสี	-	8.1±0.2	-
		50.0	59.2±0.3	101.9±0.9
ข้าวกล้อง	ตะกั่ว	-	ND*	-
		50.0	48.9±0.9	99.6±1.5
	แคดเมียม	-	ND*	-
		50.0	53.9±3.3	104.9±3.4
	ทองแดง	-	ND*	-
		50.0	53.3±1.1	104.6±2.9
	สังกะสี	-	6.7±0.6	-
		50.0	57.7±1.2	102.1±3.2
ข้าวไรซ์เบอร์รี่	ตะกั่ว	-	ND*	-
		50.0	50.1±1.1	102.6±3.1
	แคดเมียม	-	ND*	-
		50.0	52.7±1.5	99.4±2.7
	ทองแดง	-	ND*	-
		50.0	51.0±0.9	100.6±1.1
	สังกะสี	-	8.2±0.8	-
		50.0	58.7±0.9	101.1±3.2

*ND= not detected

4.6.2 ผลการวิเคราะห์โดยเทคนิคเฟลมอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตเมตรี (Flame Atomic Absorption Spectrophotometry)

จากการทดลองดังหัวข้อ 3.6.6.2 ข้อที่ 2 และ 3 ในบทที่ 3 ได้ผลดังตาราง 39 ซึ่งจากตาราง พบว่าการหาปริมาณโลหะหนักทั้ง 4 ชนิด ในตัวอย่างข้าวหอมมะลิ ผลเฉลี่ยการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง ไม่พบ ตะกั่ว แคดเมียม และทองแดง ในตัวอย่างข้าวหอมมะลิ แต่พบสังกะสีเท่ากับ 0.075 มิลลิกรัมต่อลิตร และตัวอย่างที่มีการเติมสารละลายมาตรฐานโลหะหนักทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และสังกะสี ความเข้มข้น 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลเฉลี่ยการทดลอง ซ้ำ 5 ครั้ง ได้เท่ากับ 0.506, 0.536, 0.512 และ 0.574 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และเมื่อคำนวณหาค่าร้อยละการกลับคืน ผลที่ได้เท่ากับ 101, 107, 103 และ 100 ตามลำดับ คำนวณหาค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในตัวอย่างข้าวกล้องที่ไม่มีการเติมสารละลายมาตรฐานโลหะหนัก ผลเฉลี่ยการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง ไม่พบ ตะกั่ว แคดเมียม และทองแดง ในตัวอย่างข้าวกล้อง แต่พบสังกะสีเท่ากับ 0.063 มิลลิกรัมต่อลิตร และตัวอย่างที่มีการเติมสารละลายมาตรฐานโลหะหนักทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และสังกะสี ความเข้มข้น 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลเฉลี่ยการทดลอง ซ้ำ 5 ครั้ง ได้เท่ากับ 0.469, 0.546, 0.527 และ 0.568 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และเมื่อคำนวณหาค่าร้อยละการกลับคืน ผลที่ได้เท่ากับ 98, 101, 101 และ 101 ตามลำดับ และคำนวณหาค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในตัวอย่างข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่ไม่มีการเติมสารละลายมาตรฐานโลหะหนัก ผลเฉลี่ยการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง ไม่พบ ตะกั่ว แคดเมียม และทองแดง ในตัวอย่างข้าวไรซ์เบอร์รี่ แต่พบสังกะสีเท่ากับ 0.084 มิลลิกรัมต่อลิตร และตัวอย่างที่มีการเติมสารละลายมาตรฐานโลหะหนักทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และสังกะสี ความเข้มข้น 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลเฉลี่ยการทดลอง ซ้ำ 5 ครั้ง ได้เท่ากับ 0.503, 0.536, 0.528 และ 0.576 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และเมื่อคำนวณหาค่าร้อยละการกลับคืน ผลที่ได้เท่ากับ 103, 100, 101 และ 98 ตามลำดับ

ตาราง 39 ผลการหาปริมาณโลหะหนักต่าง ๆ ในตัวอย่างข้าวและค่าร้อยละการกลับคืน (%Recovery) โดยเทคนิคเฟลมอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตเมตรี

ตัวอย่าง	โลหะหนัก	ความเข้มข้นของโลหะหนักที่เติมลงไป ในตัวอย่าง (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ความเข้มข้นของโลหะหนักที่วัดได้ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ร้อยละการกลับคืน (n=5)
ข้าวหอมมะลิ	ตะกั่ว	-	ND*	-
		50.0	50.6±0.4	101.1±0.8
	แคดเมียม	-	ND*	-
		50.0	53.6±0.7	107.2±1.4
	ทองแดง	-	ND*	-
		50.0	51.2±0.4	103.4±0.9
	สังกะสี	-	7.5±0.3	-
		50.0	57.4±0.6	100.4±1.1
ข้าวกล้อง	ตะกั่ว	-	ND*	-
		50.0	49.6±0.8	98.4±3.1
	แคดเมียม	-	ND*	-
		50.0	54.6±0.7	100.7±1.6
	ทองแดง	-	ND*	-
		50.0	52.7±0.7	101.2±1.4
	สังกะสี	-	6.3±0.4	-
		50.0	56.8±0.3	101.1±0.9
ข้าวไรซ์เบอร์รี่	ตะกั่ว	-	ND*	-
		50.0	50.3±2.0	102.5±3.7
	แคดเมียม	-	ND*	-
		50.0	53.6±0.8	100.2±2.3
	ทองแดง	-	ND*	-
		50.0	52.8±0.6	101.3±1.4
	สังกะสี	-	8.4±0.2	-
		50.0	57.6±1.3	98.3±2.7

*ND= not detected

นำผลการหาปริมาณโลหะหนักต่าง ๆ ในตัวอย่างข้าวจากเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตเมตรี และเทคนิคดิจิทัลแคลเลอริเมตรี มาเปรียบเทียบกัน ได้ผลดังตาราง 40

ตาราง 40 การคำนวณ t-Test: Paired Two Sample for Means ของสังกะสีในตัวอย่างข้าวกล้อง โดยเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตเมตรี และเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรี

t-Test: Paired Two Sample for Means

	6.9	6.2
Mean	6.6	6.325
Variance	0.36	0.1625
Observations	4	4
Pearson Correlation	0.702863	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	3	
t Stat	1.287453	
P(T<=t) one-tail	0.144134	
t Critical one-tail	2.353363	
P(T<=t) two-tail	0.288268	
t Critical two-tail	3.182446	

เมื่อนำข้อมูลจากตาราง 38 และ 39 มาทำการทดสอบทางสถิติโดยใช้ t-Test: Paired Two Sample for Means เพื่อเปรียบเทียบปริมาณสังกะสี (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ในตัวอย่างข้าวกล้อง โดยเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตเมตรีและเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรี จากตาราง 40 จะเห็นว่าค่า t Stat มีค่าเท่ากับ 1.3 และค่า t Critical two-tail มีค่าเท่ากับ 3.2 ซึ่งค่า t Stat มีค่าน้อยกว่า t Critical two-tail แสดงว่าค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังนั้นจึงสามารถเลือกใช้เทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรีได้ เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและมีความถูกต้อง

4.7 ผลการศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดของเครื่องมือ (Limit of Detection; LOD และ Limit of Quantitation; LOQ)

เมื่อได้ทำการทดลองในหัวข้อ 3.6.7 ในบทที่ 3 ได้ผลของค่าการดูดกลืนแสงกับค่าสีแดง

ดังตาราง 41 และ 42

ตาราง 41 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายแบบลงค์ที่ได้จากเครื่องเฟลมอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เมื่อทำการทดลองจำนวน 20 ครั้ง

ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง
1	0.000
2	0.000
3	0.001
4	-0.000
5	0.000
6	0.000
7	-0.000
8	-0.000
9	-0.000
10	0.000
11	0.000
12	0.000
13	0.000
14	0.000
15	0.000
16	0.000
17	0.000
18	0.000
19	0.000
20	-0.000
เฉลี่ย	0.000
SD	0.0002
%RSD	141.77

4.7.1 ตะกั่ว

$$\text{จากสมการเส้นตรง } y = 0.0197x - 0.0014$$

เพราะฉะนั้น ความชันของกราฟ เท่ากับ 0.0197

ดังนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณดังสมการ 3.1 และ 3.2

การคำนวณค่า LOD และ LOQ ของเครื่องเฟลมอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ได้ผล ดังนี้

$$\text{LOD} = 0.0304 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร และ } \text{LOQ} = 0.1015 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร}$$

4.7.2 แคดเมียม

$$\text{จากสมการเส้นตรง } y = 0.3548x - 0.0007$$

เพราะฉะนั้น ความชันของกราฟ เท่ากับ 0.3548

ดังนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณดังสมการ 3.1 และ 3.2

การคำนวณค่า LOD และ LOQ ของเครื่องเฟลมอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ได้ผล ดังนี้

$$\text{LOD} = 0.0017 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร และ } \text{LOQ} = 0.0057 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร}$$

4.7.3 ทองแดง

$$\text{จากสมการเส้นตรง } y = 0.2098x - 0.0001$$

เพราะฉะนั้น ความชันของกราฟ เท่ากับ 0.2098

ดังนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณดังสมการ 3.1 และ 3.2

การคำนวณค่า LOD และ LOQ ของเครื่องเฟลมอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ได้ผล ดังนี้

$$\text{LOD} = 0.0029 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร และ } \text{LOQ} = 0.0095 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร}$$

4.7.4 สังกะสี

$$\text{จากสมการเส้นตรง } y = 0.6979x - 0.0027$$

เพราะฉะนั้น ความชันของกราฟ เท่ากับ 0.6979

ดังนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณดังสมการ 3.1 และ 3.2

การคำนวณค่า LOD และ LOQ ของเครื่องเฟลมอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ได้ผล ดังนี้

$$\text{LOD} = 0.0009 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร และ } \text{LOQ} = 0.0029 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร}$$

ตาราง 42 ค่าสีแดงของสารละลายแบลนด์ ที่ได้จากเครื่องดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริมิเตอร์ ที่ใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่ในการถ่ายภาพ เมื่อทำการทดลองจำนวน 20 ครั้ง

ครั้งที่	ค่าสีแดง
1	51.67
2	51.67
3	51.67
4	52.33
5	51.67
6	52.00
7	52.33
8	51.33
9	51.00
10	51.33
11	51.67
12	51.33
13	51.67
14	51.67
15	52.33
16	51.67
17	52.00
18	52.33
19	51.33
20	51.00
เฉลี่ย	51.70
SD	0.42
%RSD	0.81

4.7.1 ตะกั่ว

$$\text{จากสมการเส้นตรง } y = 107.98x - 121.25$$

เพราะฉะนั้น ความชันของกราฟ เท่ากับ 107.98

ดังนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณดังสมการ 3.1 และ 3.2

การคำนวณค่า LOD และ LOQ ของเครื่องดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริมิเตอร์ ได้ผลดังนี้

$$\text{LOD} = 0.0117 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร และ } \text{LOQ} = 0.0389 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร}$$

4.7.2 แคดเมียม

$$\text{จากสมการเส้นตรง } y = 65.19x - 174.63$$

เพราะฉะนั้น ความชันของกราฟ เท่ากับ 65.19

ดังนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณดังสมการ 3.1 และ 3.2

การคำนวณค่า LOD และ LOQ ของเครื่องดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริมิเตอร์ ได้ผลดังนี้

$$\text{LOD} = 0.0193 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร และ } \text{LOQ} = 0.0644 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร}$$

4.7.3 ทองแดง

$$\text{จากสมการเส้นตรง } y = 147.57x - 66.13$$

เพราะฉะนั้น ความชันของกราฟ เท่ากับ 147.57

ดังนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณดังสมการ 3.1 และ 3.2

การคำนวณค่า LOD และ LOQ ของเครื่องดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริมิเตอร์ ได้ผลดังนี้

$$\text{LOD} = 0.0085 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร และ } \text{LOQ} = 0.0284 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร}$$

4.7.4 สังกะสี

$$\text{จากสมการเส้นตรง } y = 80.72x - 121.42$$

เพราะฉะนั้น ความชันของกราฟ เท่ากับ 80.72

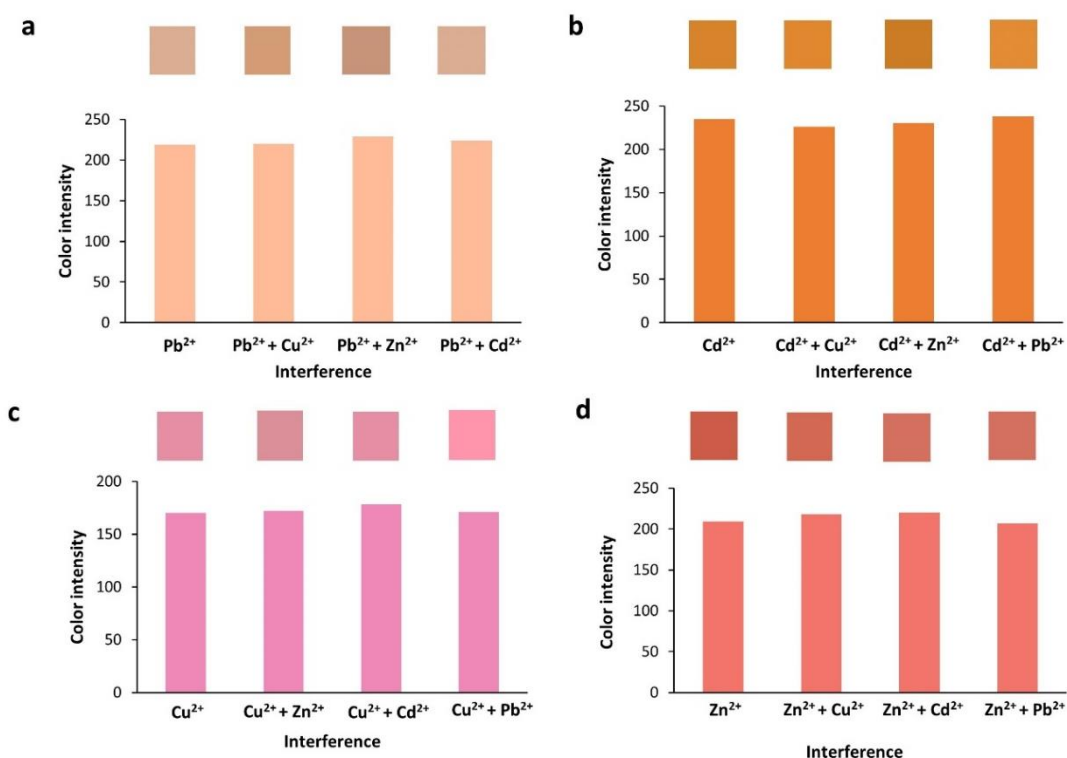
ดังนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณดังสมการ 3.1 และ 3.2

การคำนวณค่า LOD และ LOQ ของเครื่องดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริมิเตอร์ ได้ผลดังนี้

$$\text{LOD} = 0.0156 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร และ } \text{LOQ} = 0.0520 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร}$$

4.8 ผลการศึกษาตัวรบกวน (Interference)

ได้ทำการทดลองดังหัวข้อ 3.6.8 ข้อที่ 1 2 3 และ 4 ในบทที่ 3 โดยการถ่ายภาพสีของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโลหะหนักที่มีตัวรบกวนอื่น ๆ กับไดโคโนนด้วยเครื่องดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริมิเตอร์ และนำค่าสีที่ได้ไปสร้างกราฟแท่ง ได้ผลดังภาพ 38



ภาพ 38 การศึกษาตัวรบกวน โดยการเปรียบเทียบค่าสี RGB ของสารประกอบเชิงซ้อนโลหะหนักกับสารประกอบเชิงซ้อนโลหะหนักที่มีตัวรบกวน (รูปภาพสีของสารละลายโลหะหนักความเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ต่างๆ ที่มีโลหะหนักอื่น ๆ รบกวนและแผนภาพแท่งแสดงค่าสี RGB ของการรบกวน) (A) ตะกั่วที่มีโลหะหนักอื่นรบกวน, (B) แคดเมียมที่มีโลหะหนักอื่นรบกวน, (C) ทองแดงที่มีโลหะหนักอื่นรบกวน และ (D) สังกะสีที่มีโลหะหนักอื่นรบกวน

จากภาพ 38 จะเห็นว่าภาพถ่ายสีของสารประกอบเชิงซ้อนโลหะหนักกับสารประกอบเชิงซ้อนโลหะหนักที่มีตัวรบกวนมีสีที่อยู่ในโทนเดียวกันและมีความเข้มของสีต่างกันเล็กน้อย และจากค่าสี RGB พบว่า สารประกอบเชิงซ้อนโลหะหนักกับสารประกอบเชิงซ้อนโลหะหนักที่มีตัวรบกวน มีค่าสี RGB อยู่ในช่วงเดียวกัน ดังนั้นตัวรบกวนจึงไม่มีผลรบกวนต่อการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะหนักกับไดโคโนนที่อยู่ในสภาวะการทดลองที่เหมาะสม

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และสังกะสี ได้ผลดังตาราง 43

ตาราง 43 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และสังกะสี

โลหะหนัก	สภาวะการทดลองที่เหมาะสม				
	ความเข้มข้น ของไดไฮโซน (%w/v)	ปริมาตรของ ไดไฮโซน (มิลลิลิตร)	บัฟเฟอร์ที่ ระดับพีเอช	ปริมาตรของ บัฟเฟอร์ (มิลลิลิตร)	สารละลาย ที่ใช้ปรับ ปริมาตร
ตะกั่ว	0.0025	0.5	-	-	เอทานอล
แคดเมียม	0.0050	1.5	5	1.5	เอทานอล
ทองแดง	0.0050	1.5	2	1.5	เอทานอล
สังกะสี	0.0050	1.25	4.5	1.5	เอทานอล

จากนั้นได้ทำการหาค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (LOD) และค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (LOQ) ของเครื่องดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริมิเตอร์ที่ออกแบบและสร้างขึ้น โดยวัดจากค่าสีแดงของแบลงค์และเครื่องเฟลมอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยวัดจากแบลงค์ ได้ผลดังตาราง 44

ตาราง 44 ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดของเครื่องมือ (Limit of Detection; LOD และ Limit of Quantitation; LOQ)

โลหะหนัก	เครื่องดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริมิเตอร์		เครื่องเฟลมอะตอมมิกแอบซอร์พ- ชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์	
	LOD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	LOQ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	LOD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	LOQ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
ตะกั่ว	0.0117	0.0389	0.0304	0.1015
แคดเมียม	0.0193	0.0644	0.0017	0.0057
ทองแดง	0.0085	0.0284	0.0029	0.0095
สังกะสี	0.0156	0.0520	0.0009	0.0029

จากการหาปริมาณโลหะหนักทั้ง 4 ชนิด ในตัวอย่างข้าวหอมมะลิ ข้าวกล้อง และข้าวไรซ์เบอร์รี่ โดยการนำสมการเส้นตรงที่ได้ของตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และสังกะสี มาคำนวณหาค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในตัวอย่างข้าวหอมมะลิที่ไม่มีการเติมสารละลายมาตรฐานโลหะหนัก ผลเฉลี่ยการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง ไม่พบ ตะกั่ว แคดเมียม และทองแดง ในตัวอย่างข้าวหอมมะลิ แต่พบสังกะสีเท่ากับ 0.081 มิลลิกรัมต่อลิตร และตัวอย่างที่มีการเติมสารละลายมาตรฐานโลหะหนักทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และสังกะสี ความเข้มข้น 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลเฉลี่ยการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง ได้เท่ากับ 0.516, 0.527, 0.507 และ 0.592 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และเมื่อคำนวณหาค่าร้อยละการกลับคืน ผลที่ได้เท่ากับ 103, 105, 101 และ 102 ตามลำดับ คำนวณหาค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในตัวอย่างข้าวกล้องที่ไม่มีการเติมสารละลายมาตรฐานโลหะหนัก ผลเฉลี่ยการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง ไม่พบ ตะกั่ว แคดเมียม และทองแดง ในตัวอย่างข้าวกล้อง แต่พบสังกะสีเท่ากับ 0.067 มิลลิกรัมต่อลิตร และตัวอย่างที่มีการเติมสารละลายมาตรฐานโลหะหนักทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และสังกะสี ความเข้มข้น 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลเฉลี่ยการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง ได้เท่ากับ 0.489, 0.539, 0.533 และ 0.577 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และเมื่อคำนวณหาค่าร้อยละการกลับคืน ผลที่ได้เท่ากับ 100, 105, 105 และ 102 ตามลำดับ และคำนวณหาค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในตัวอย่างข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่ไม่มีการเติมสารละลายมาตรฐานโลหะหนัก ผลเฉลี่ยการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง ไม่พบ ตะกั่ว แคดเมียม และทองแดง ในตัวอย่างข้าวไรซ์เบอร์รี่ แต่พบสังกะสีเท่ากับ 0.082 มิลลิกรัมต่อลิตร และตัวอย่างที่มีการเติมสารละลายมาตรฐานโลหะหนักทั้ง 4

ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และสังกะสี ความเข้มข้น 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลเฉลี่ยการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง ได้เท่ากับ 0.501, 0.527, 0.510 และ 0.587 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในข้าวทั้ง 3 ชนิด พบสังกะสี ซึ่งไม่เกินมาตรฐานอาหารที่มีสารปนเปื้อนโลหะที่ได้กำหนดไว้ โดยมาตรฐานอาหารกำหนดไว้ไม่เกิน 100 มิลลิกรัมต่ออาหาร 1 กิโลกรัม และเมื่อคำนวณหาค่าร้อยละการกลับคืน ผลที่ได้เท่ากับ 103, 99, 101 และ 101 ตามลำดับ

จากผลการทดลองที่ได้สามารถบอกได้ว่าการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และสังกะสีในตัวอย่างข้าวหอมมะลิ ข้าวกล้อง และข้าวไรซ์เบอร์รี่ ด้วยเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรี และเทคนิคเฟลมอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตเมตรี ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากผลการศึกษาตัวรบกวน พบว่า ภาพถ่ายสีมีสีที่อยู่ในโทนเดียวกันและมีความเข้มของสีต่างกันเล็กน้อย และจากค่าสี RGB พบว่า สารประกอบเชิงซ้อนโลหะหนักกับสารประกอบเชิงซ้อนโลหะหนักที่มีตัวรบกวน มีค่าสี RGB อยู่ในช่วงเดียวกัน ดังนั้นตัวรบกวนจึงไม่มีผลรบกวนต่อการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะหนักกับไดโอรันที่อยู่ในสภาวะการทดลองที่เหมาะสม

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ก่อนการใช้เครื่องดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริมิเตอร์ในแต่ละครั้ง ควรทำการตรวจเช็คแบตเตอรี่ก่อนการใช้งานทุกครั้งและควรเช็คค่าความสว่างของหลอดไฟทุกครั้ง เพื่อให้การทดลองเป็นสถานะเดียวกันทั้งหมด
2. ไม่ควรให้สารไดโอรันหรือสารประกอบเชิงซ้อนอยู่ในสภาวะที่มีน้ำแม้แต่น้อย เพื่อป้องกันการเกิดตะกอนของไดโอรันซึ่งจะมีผลต่อความถูกต้องของการวิเคราะห์ในแต่ละครั้ง
3. ควรเตรียมสารละลายไดโอรันใหม่ทุกวันที่ทำการศึกษาและเก็บในขวดสีชา
4. สำหรับเครื่องแก้วที่ใช้ในการทดลองทุกชนิดต้องทำความสะอาดอย่างดี และต้องแช่ในกรดไนตริกเข้มข้น 12 %v/v เป็นระยะเวลาอย่างน้อย 1 คืน เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของโลหะหนักในภาชนะดังกล่าว เนื่องจากโลหะจะดูดซึมกับแก้วได้
5. สำหรับการวิเคราะห์หาโลหะหนักต่าง ๆ ที่มีไดโอรันเป็นลิแกนด์ จำเป็นต้องทำการศึกษาตัวรบกวน (Interference) เนื่องจากไดโอรันสามารถทำปฏิกิริยากับโลหะหนักต่าง ๆ ได้หลายชนิด

บรรณานุกรม



บรรณานุกรม

1. Siringkhawut W, Sittichan P, Ponhong K, Chantiratikul P. Stripping voltammetric determination of trace cadmium and lead in Thai organic unpolished rice after ultrasound-assisted digestion. *J Food Compost Anal.* 2017;59:145-52.
2. de Oliveira RM, Antunes ACN, Vieira MA, Medina AL, Ribeiro AS. Evaluation of sample preparation methods for the determination of As, Cd, Pb, and Se in rice samples by GF AAS. *Microchem. J.* 2016;124:402-9.
3. Omar NA, Praveena SM, Aris AZ, Hashim Z. Health risk assessment using in vitro digestion model in assessing bioavailability of heavy metal in rice: A preliminary study. *Food Chem.* 2015;188:46-50.
4. Rahimi E. Lead and cadmium concentrations in goat, cow, sheep, and buffalo milks from different regions of Iran. *Food Chem.* 2013;136(2):389-91.
5. Binns JA, Maconachie RA, Tanko AI. Water, land and health in urban and peri-urban food production: the case of Kano, Nigeria. *Land Degrad Dev.* 2003;14(5):431-44.
6. ชาคริต หริมพานิช, และปัญญาวุฒิ ลิ้มสุขวัฒน์. (2563). ทองแดงแร่ธาตุมากประโยชน์ทั้งคุณและโทษที่ทุกคนควรรู้. สืบค้น 25 กันยายน 2563 จาก <https://www.honestdocs.co/copper-mine-rals-very-beneficial>
7. (ไม่ปรากฏชื่อผู้แต่ง). (ไม่ปรากฏปีพิมพ์). สังกะสี (Zn) ประโยชน์และพิษสังกะสี, สืบค้นเมื่อ 5 ตุลาคม 2563 จาก <https://www.siamchemi.com/สังกะสี/>
8. อนุทิน ชาญวีรกุล. ประกาศกระทรวงสาธารณสุข สืบค้นเมื่อ 07 พฤศจิกายน 2563 จาก http://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2563/E/118/T_0017.PDF
9. Jom. (2560). ข้าว. สืบค้นเมื่อ 07 พฤศจิกายน 2563 จาก <https://www.thai-thaifood.com/th/ข้าว/>
10. สุภาภรณ์ อินทรเพชร และ น้ำฝน กาญจนนา. (2556). คำว่าข้าว. สืบค้นเมื่อ 07 พฤศจิกายน 2563 จาก <https://sites.google.com/site/61thungkhaw2556/khwam-m-sakhay-khxng-khaw>
11. My Home. (2564). ชนิดข้าวที่คนไทยนิยมรับประทาน. สืบค้นเมื่อ 07 พฤศจิกายน 2563 จาก <https://www.baanlaesuan.com/150360/diy/7-types-of-rice/4>

12. ข้าวปลั่งกร. (2562). ข้าวหอมมะลิ. สืบค้นเมื่อ 27 มกราคม 2565 จาก <https://www.paphungkornrice.com/TH/news/factoryrice.html>
13. BlueSky. (2559). ข้าวกล้อง. สืบค้นเมื่อ 27 มกราคม 2565 จาก <https://www.thaihealth.or.th/blog/myblog/topic/570/Happy-Life/776>
14. Meet Thank. (2561). ข้าวไรซ์เบอร์รี่. สืบค้นเมื่อ 27 มกราคม 2565 จาก <https://www.meetthinks.com/zuper-rice>
15. Pongsagon Pothavorn. (2562). ภัยร้ายจากโลหะหนักไม่รู้. สืบค้นเมื่อ 28 มกราคม 2565 จาก <https://www.scispec.co.th/learning/index.php/blog/elemental/2019-03-26-02-47-01>
16. เอ็นดู ตันกุล. (2543). การพัฒนาวิธีวิเคราะห์ตะกั่วในสนาม. สืบค้นเมื่อ 28 มกราคม 2565. จาก [http://www.library.dmr.go.th/Document\("<ref21.pdf>,"\)/DMR_Technical_Reports/2543](http://www.library.dmr.go.th/Document()
17. วินัย วนานุกูล. (ไม่ปรากฏปีพิมพ์). ภาวะเป็นพิษจากสารตะกั่ว. สืบค้นเมื่อ 28 มกราคม 2565 จาก <https://med.mahidol.ac.th/poisoncenter/th/pois-cov/Lead>
18. เขมชาติ ธนาภิชาตเจริญ, นงนาด เมฆรังสิมันต์ และ สุรชัย ศิลามณีโชติ. (2551). ประโยชน์และความเป็นพิษของโลหะหนักแคดเมียม. สืบค้นเมื่อ 28 มกราคม 2565. จาก http://www.dss.go.th/images/starticle/cp_4_2551_Cadmium.pdf
19. Wikipedia contributors. ทองแดง. Wikipedia, The Free Encyclopedia. Wikipedia, The Free Encyclopedia, สืบค้นเมื่อ 28 มกราคม 2565. จาก <https://th.wikipedia.org/wiki/ทองแดง>
20. กิตติพันธุ์ บางยี่ขัน. (2551) โลหะกับการพัฒนาประเทศ. สำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, หน้า 57-58.
21. Ali JK, Kadoomm MR. Determination of zinc (II) ion using dithizone by flow injection and sequential injection techniques. Int. J. Chem. Sci. 2017;16(1):1-18.
22. (ไม่ปรากฏชื่อผู้แต่ง). (ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์). Dithizone. สืบค้นเมื่อ 28 มกราคม 2565 จาก <https://www.wikiwand.com/en/Dithizone>
23. Ruengsitagoon W, Chisvert A, Liawruangrath S. Flow injection spectrophotometric determination of lead using 1,5-diphenylthiocarbazon in aqueous micellar. Talanta. 2010;81(1-2):709-713.

24. Ismael, F.H. (2014). Surfactant Mediated Cadmium Determination with Dithizone in Aqueous Solution. สืบค้นเมื่อ 2 พฤษภาคม 2565, จาก <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.921.3196&rep=rep1&type=pdf>
25. Halili J, Mele A, Arbnesi T, Halili AN, Mazreku I, Berisha A, Jusuf K, Mehmeti V. Preliminary studies for the supercritical CO₂ extraction of Cu(II) and Zn(II) ions by using dithizone as chelating agent. *Fresenius Environ. Bull.* 2015;24(12a):4492-4495.
26. Sundstrom DW, Weir BA, Klei HE. Destruction of aromatic pollutants by UV light catalyzed oxidation with hydrogen peroxide. *Environ. Prog.* 1989;8(1):6-11.
27. Wongthanyakram J, Masawat P. Rapid low-cost determination of lead(II) in cassava by an iPod-based digital imaging colorimeter. *Anal. Lett.* 2018;52(3):550-61.
28. อิศเรน ปัญญา. การพัฒนาวิธีการวิเคราะห์หาตะกั่วในข้าวโดยเทคนิคดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรี. [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต]. พิษณุโลก:มหาวิทยาลัยนเรศวร;2563.
29. (ไม่ปรากฏชื่อผู้แต่ง). (ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์). เครื่องอะตอมมิคแอบซอร์พชัน สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ สืบค้นเมื่อ 28 มกราคม 2565 จาก http://science.skru.ac.th/ShowToolCame.php?id_skru=SKRU0987654321
30. (ไม่ปรากฏชื่อผู้แต่ง). (ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์). องค์ประกอบเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์พชัน สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ สืบค้นเมื่อ 28 มกราคม 2565 จาก <https://chemistry.stackexchange.com/questions/115895/why-should-aas-use-element-lamps>
31. ปริญา มาสวัสดิ์. (2556). ดิจิทัลอิมเมจคัลเลอริเมตรี:เทคนิคใหม่สำหรับงานด้านเคมีวิเคราะห์. พิมพ์ครั้งที่ 1. พิษณุโลก: โฟกัส พรินติ้ง.
32. Ghazanfarirad N, Dehghan K, Fakhernia M, Rahmanpour F, Bolouki M, Zeynali F, et al. Determination of lead, cadmium and arsenic metals in imported rice into the west Azerbaijan province, northwest of Iran. *J. nov. appl. sci.* 2014;3(5): 452-456.
33. Mataveli LR, Buzzo ML, de Arauz LJ, Carvalho MF, Arakaki EE, Matsuzaki R, et al. Total arsenic, cadmium, and lead determination in Brazilian rice samples using ICP-MS. *J Anal Methods Chem.* 2016;2016:3968786.
34. Mathew L, Rao T, Iyer CSP, Damodaran AD. Simultaneous determination of copper, mercury and lead by first-order derivative spectrophotometry using dithizone

as reagent. *Mikrochim Acta*. 1995;118:249-256.

35. Duarte RF, Prom-u-thai C, Amaral DC, Faquin V, Guilherme LRG, Reis AR, et al. Determination of zinc in rice grains using DTZ staining and ImageJ software. *J. Cereal Sci.* 2016;68:53-8.

36. Wang Z, Wang H, Zhang Z, Liu G. Electrochemical determination of lead and cadmium in rice by a disposable bismuth/electrochemically reduced graphene/ionic liquid composite modified screen-printed electrode. *Sens. Actuators B Chem.* 2014;199:7-14.

37. Yu H, Ai X, Xu K, Zheng C, Hou X. UV-assisted Fenton digestion of rice for the determination of trace cadmium by hydride generation atomic fluorescence spectrometry. *Analyst.* 2016;141(4):1512-8.

38. Kheamphet P, Masawat P. A simple and cost-effective smartphone-based digital imaging device for the quantification of selected heavy metals in Thai rice. *Anal Methods.* 2022;14(2):165-73.

