



การพัฒนาชุดทดสอบเบื้องต้นสำหรับการตรวจวัดเหล็กที่ปนเปื้อน
ในแหล่งน้ำของจังหวัดภูเก็ต

**The Development of the Screening Test to Detect the Iron Contaminated
in Phuket Water Sources**

พีระพงศ์ กำไล

Pheerapong Kamlai

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Science in Technology and Environmental Management
Prince of Songkla University**

2556

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาชุดทดสอบเบื้องต้นสำหรับการตรวจวัดเหล็กที่ปนเปื้อนใน แหล่งน้ำของจังหวัดภูเก็ต
ผู้เขียน	นายพีระพงศ์ กำไล
สาขาวิชา	เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....

(ดร.วรวิทย์ วงศ์นิรามย์กุล)

..... ประธานกรรมการ

(ดร.วัชรวิดี ลิ้มสกุล)

..... กรรมการ

(ดร.วรวิทย์ วงศ์นิรามย์กุล)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สายธาร ทองพร้อม)

..... กรรมการ

(ดร.อารีย์ ชูคำ)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีและการ
จัดการสิ่งแวดล้อม

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีรพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(3)

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้เป็นผลมาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และขอขอบคุณผู้ที่มีส่วน
เกี่ยวข้องทุกท่านไว้ ณ ที่นี้

ลงชื่อ _____

(ดร.วรวิทย์ วงศ์นิรามัยกุล)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ _____

(นายพีระพงศ์ กำไล)

นักศึกษา

(4)

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ _____

(นายพีระพงศ์ กำไล)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาชุดทดสอบเบื้องต้นสำหรับการตรวจวัดเหล็กที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำของจังหวัดภูเก็ต
ผู้เขียน	นายพีระพงศ์ กำไล
สาขาวิชา	เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา	2555

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายดิจิทัลควบคู่ไปกับเทคนิคการวิเคราะห์สารโดยการวัดสี สำหรับใช้ในการตรวจวิเคราะห์ระดับความเข้มข้นของเหล็กในน้ำ ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมของปฏิกิริยา ได้แก่ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา เท่ากับ 5 นาที, ความเข้มข้นของสารละลาย 1, 10 - พีแนนโทลีน เท่ากับ 900 ppm ความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตต บัฟเฟอร์ เท่ากับ 0.20 M และพีเอช เท่ากับ 3.25 วิธีที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพในการนำไปใช้งานในการตรวจวัดภาคสนาม ด้วยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ช่วงความเป็นเส้นตรงที่กว้างตั้งแต่ 1.00 - 9.00 ppm ความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจพบได้มีค่าตั้งแต่ 0.028 - 0.045 ppm ความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถหาปริมาณได้มีค่าเท่ากับ 0.041 - 0.054 ppm มีความแม่นยำในการตรวจวัดและความเที่ยงในการทวนซ้ำที่ค่อนข้างสูงด้วยค่าร้อยละความแตกต่าง เท่ากับ 0.67 - 1.67 และ 0.10 - 1.81 ตามลำดับ นอกจากนี้แล้ววิธีที่พัฒนาขึ้นยังมีข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับวิธีมาตรฐาน ASTM E 394 - 04 ตรงที่ใช้สารเคมีในการทดลองที่ค่อนข้างน้อย สะดวกในการพกพา ใช้งานได้ง่ายไม่ซับซ้อน และให้ผลการวิเคราะห์ที่รวดเร็ว

คำสำคัญ: เหล็ก การวิเคราะห์สารโดยการวัดสี การวิเคราะห์ภาพถ่ายดิจิทัล สี RGB

Thesis Title	The development of the screening test to detect the iron contaminated in Phuket water sources
Author	Mr.Pheerapong Kamlai
Major Program	Technology and Environmental Management
Academic	2012

ABSTRACT

The aim of this study is to explore the use of the digital image analysis coupled with the colorimetric test to measure the iron (II) concentration in water. The optimization of color reaction was determined at 5 min reaction time, 900 ppm of 1, 10 - phenanthroline solution, 0.20 M of ammonium acetate buffer solution and pH 3.25 without acid adding. This developed method showed the potential to use as the field test with the large linear dynamic range between 1.00 - 9.00 ppm, low limit of detection (LOD) between 0.028 - 0.045 ppm, low limit of quantitative (LOQ) between 0.041 - 0.054 ppm as well as high accuracy and high precision of 0.67 - 1.67, 0.10 - 1.81 % difference from true concentration, in addition to the advantages of low volume reagent, portable device, not complicate to used and fast analysis.

Keywords: Iron Colorimetry Digital image analysis RGB color

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ดร.วรวิทย์ วงศ์นิรามัยกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยสนับสนุนตลอดมา และให้คำปรึกษาแนะนำที่ดีในการทำวิจัยจนเสร็จสิ้นสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ทุกท่านที่ได้สละเวลาอันมีค่าสำหรับการเป็นกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิในการสอบปกป้องวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำสำหรับการแก้ไขเล่มวิทยานิพนธ์จนเสร็จสิ้น

ขอขอบพระคุณ คณะเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตภูเก็ต ที่ได้ให้โอกาสในการเข้าศึกษา รวมถึงคณาจารย์ในคณะทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ตลอดระยะเวลาที่ได้ศึกษาในระดับปริญญาโท

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ สมาชิกครอบครัวที่น่ารัก เพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ทุกท่านที่ได้คอยสนับสนุนทั้งกำลังใจ และคำแนะนำอันมีค่าตลอดระยะเวลาในการทำวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้ได้อย่างสมบูรณ์

พีระพงศ์ กำไล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	(5)
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	(6)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(10)
รายการรูป	(11)
สัญลักษณ์คำย่อและคำย่อ	(13)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย	1
1.2 กรอบแนวความคิดของงานวิจัย	2
1.3 วัตถุประสงค์	4
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 การตรวจสอบเอกสาร	6
2.1 ข้อมูลทั่วไปของธาตุเหล็ก	6
2.2 วิธีการตรวจวัดปริมาณเหล็ก	6
2.3 การวิเคราะห์ปริมาณสารโดยการวัดสี	9
2.4 การวิเคราะห์ภาพถ่ายดิจิทัล	11
บทที่ 3 วิธีการวิจัย	13
3.1 วัสดุและสารเคมี	13
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	13
3.3 วิธีการวิจัย	14
3.3.1 การใช้กล้องดิจิทัลเป็นอุปกรณ์ตรวจวัด	14
3.3.2 การใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่และคอมพิวเตอร์แท็บเล็ตเป็นอุปกรณ์ตรวจวัด	18
บทที่ 4 ผลการศึกษา และการอภิปรายผล	22
4.1 การออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดเหล็ก	22

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 อิทธิพลของแสงภายนอก	23
4.3 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา	25
4.3.1 เวลาที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา	25
4.3.2 ความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลาย 1, 10 – ฟีนเทนโทรลีน	29
4.3.3 ความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายแอม โมเนียมอะซิเตตบัพเฟอร์	33
4.3.4 ความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก	36
4.4 กราฟมาตรฐาน	39
4.5 สมรรถนะและประสิทธิภาพของวิธีตรวจวัด	48
4.5.1 ความเข้มข้นต่ำสุดที่ตรวจพบได้และความเข้มข้นต่ำสุดที่หาปริมาณได้	48
4.5.2 ความแม่นยำในการตรวจวัดและความเที่ยงในการทำซ้ำของวิธีที่พัฒนา	52
4.5.3 ความไวในการวิเคราะห์ของวิธีที่พัฒนาขึ้น	53
4.6 ผลของไอออนอื่น ๆ ต่อการตรวจวัดหลัก	54
4.7 การวิเคราะห์ปริมาณหลักในน้ำตัวอย่าง	55
4.8 การวิเคราะห์ปริมาณหลักในยาเม็ดเสริมธาตุหลัก	57
บทที่ 5 บทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	60
5.1 บทสรุปผลการวิจัย	60
5.2 ข้อเสนอแนะ	62
เอกสารอ้างอิง	63
ภาคผนวก	70
ประวัติผู้เขียน	79

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ผลของแสงภายนอกที่มีต่อความเข้มแสงและการดูดกลืนแสงของผลิตภัณฑ์	24
4.2 สภาพะในการเกิดปฏิกิริยาสำหรับวิธีตรวจวัด	39
4.3 สมการเส้นตรง ช่วงความเป็นเส้นตรง และสหสัมพันธ์เชิงปริมาณ	46
4.4 ความเข้มข้นต่ำสุดที่ตรวจพบและความเข้มข้นต่ำสุดที่หาปริมาณได้	50
4.5 ความแม่นยำในการตรวจวิเคราะห์และความเที่ยงในการทวนซ้ำ	52
4.6 ความไวในการวิเคราะห์ของวิธีตรวจวัด	53
4.7 ผลของไอออนรบกวนในการวิเคราะห์	54
4.8 การวิเคราะห์ปริมาณเหล็กในแหล่งน้ำของจังหวัดภูเก็ต	57
4.9 การวิเคราะห์ปริมาณเหล็กในยาเม็ดเสริมธาตุเหล็ก	58
4.10 น้ำหนักของเฟอร์รัสซัลเฟตและเฟอร์รัสฟูมาเรตในยาเม็ดเสริมธาตุเหล็ก	59

รายการรูป

รูปที่	หน้า
1.1 กรอบแนวความคิดของงานวิจัย	3
2.1 การดูคลื่นพลังงานและกายพลังงานของอิเล็กทรอนิกส์	7
2.2 โครงสร้างสารที่นิยมใช้สำหรับการเกิดสารเชิงซ้อนกับไอออนของเหล็ก	10
3.1 ชุดทดสอบที่ใช้กล้องดิจิทัลเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มแสง	14
3.2 ชุดทดสอบที่ใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่และคอมพิวเตอร์แท็บเล็ตเป็นตัวตรวจวัดความเข้มแสง	21
3.3 กล้องอุปกรณ์ที่ใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่และคอมพิวเตอร์แท็บเล็ตในการตรวจวัด	21
3.4 การทดลองที่วิเคราะห์ความเข้มแสงจากโทรศัพท์เคลื่อนที่และคอมพิวเตอร์แท็บเล็ต	21
4.1 แผนภาพชุดอุปกรณ์ที่ออกแบบ	23
4.2 ผลของเวลาในการเกิดปฏิกิริยาต่อความเข้มแสงของผลิตภัณฑ์	27
4.3 ผลของเวลาในการเกิดปฏิกิริยาต่อการดูคลื่นแสงของผลิตภัณฑ์	28
4.4 แผนภาพสี่องค์ประกอบ	29
4.5 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย 1, 10 – พีแนนโทรีนต่อความเข้มแสงของผลิตภัณฑ์	31
4.6 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย 1, 10 – พีแนนโทรีนต่อการดูคลื่นแสงของผลิตภัณฑ์	32
4.7 ผลของความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตตบัฟเฟอร์ต่อความเข้มแสงของผลิตภัณฑ์	34
4.8 ผลของความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตตบัฟเฟอร์ต่อการดูคลื่นแสงของผลิตภัณฑ์ที่	35
4.9 ผลของความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกต่อความเข้มแสงของผลิตภัณฑ์	37
4.10 ผลของความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกต่อการดูคลื่นแสงของผลิตภัณฑ์	38
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง RGB กับความเข้มข้นของสารละลายเหล็กที่ใช้กล้องดิจิทัลในการตรวจวัด	41
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูคลื่นแสง RGB กับความเข้มข้นของสารละลายเหล็กที่ใช้กล้องดิจิทัลในการตรวจวัด	42

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนแสงสีน้ำเงินกับความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก ในช่วง 1.00 - 9.00 ppm ในวิธีการตรวจวัดความเข้มแสงด้วยกล้องดิจิทัล	42
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง/การดูดกลืนแสง RGB กับความเข้มข้นของสารละลายเหล็กในวิธีการตรวจวัดความเข้มแสงด้วยโทรศัพท์เคลื่อนที่ รุ่น Samsung Galaxy S 2	43
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง/การดูดกลืนแสง RGB กับความเข้มข้นของสารละลายเหล็กในวิธีการตรวจวัดความเข้มแสงด้วยโทรศัพท์เคลื่อนที่ รุ่น iPhone 5	44
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง/การดูดกลืนแสง RGB กับความเข้มข้นของสารละลายเหล็กในวิธีการตรวจวัดความเข้มแสงด้วยคอมพิวเตอร์แท็บเล็ต รุ่น iPad 3	45
4.17 โครงสร้างเซนเซอร์รับภาพชนิดซีมอส และชนิดบีเอสไอซีมอส	49
4.18 วิธีเติมสารมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนในการวิเคราะห์เชิงปริมาณที่มีผลกระทบจากตัวทำละลาย	56

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

US EPA	United State Environmental Protection Agency
ASTM	American Society for Testing and Materials
LOD	Limit of Detection
LOQ	Limit of Quantitation
LDR	Linear Dynamic Range
ppb	part per billion
ppm	part per million
MP	mega pixel
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
BSICMOS	Backside Illumination Complementary Metal Oxide Semiconductor

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ธาตุเหล็กเป็นธาตุที่พบได้ตามธรรมชาติ และมีปริมาณสูงเป็นอันดับที่สองของโลกรองจากอะลูมิเนียม (Rabinovich, 2000) ซึ่งธาตุเหล็กมีบทบาทสำคัญต่อชีวมณฑล (biosphere) เพราะเป็นส่วนที่ทำปฏิกิริยาของเอนไซม์หลายชนิด (active center of enzyme) และมีส่วนสำคัญต่อการถ่ายเทอิเล็กตรอนในปฏิกิริยาทางชีววิทยาต่าง ๆ ถึงแม้ไม่มีหลักฐานที่บ่งชี้ว่า เหล็กมีอันตรายต่อสุขภาพ แต่องค์กรปกป้องสิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (united states environmental protection agency, US EPA) ก็มีข้อกำหนดให้โลหะชนิดนี้อยู่ในกลุ่มของ secondary contaminant ซึ่งเป็นสารที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบด้านทัศนียภาพของสิ่งแวดล้อม (aesthetic effect) โดย US EPA ได้กำหนดให้มีระดับของโลหะเหล็กในน้ำให้สูงสุดได้ไม่เกิน 0.30 mg/L (Bureau of Drinking Water & Groundwater, 2011) ถ้ามีความเข้มข้นของโลหะเหล็กสูงกว่าระดับที่กำหนด ส่งผลให้น้ำมีปัญหาในเรื่อง สี กลิ่น และรสชาติ มีผลต่อการนำไปใช้ในการผลิตเครื่องดื่ม อาหาร การซักล้าง และก่อให้เกิดการอุดตันของท่อน้ำได้ (Colter and Mahler, 2006)

ด้วยเหตุนี้ นักวิจัยหลายคนจึงให้ความสำคัญต่อการตรวจวัดระดับของเหล็กที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำตามธรรมชาติ โดยเฉพาะแหล่งน้ำผิวดิน เช่น แม่น้ำ และทะเลสาบ (Kawai, *et al.* 1992; Balistrieri, *et al.* 1992; Jones, *et al.* 1993; Inaba, *et al.* 1997; Croot and Hunter, 2000; Rondeau, *et al.* 2005, McCleskey, *et al.* 2010; Stolpe, *et al.* 2010) สำหรับจังหวัดภูเก็ตยังไม่มี การวิจัยเกี่ยวกับปริมาณของเหล็กที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำ แต่มีรายงานการตรวจพบปริมาณเหล็กในตะกอนท้องน้ำคลองบางใหญ่ (Suteerasak and Bhongsuwan, 2008) ซึ่งเป็นหลักฐานชี้ชัดถึงความ เป็นไปได้ที่จะมีเหล็กปนเปื้อนอยู่ในแหล่งน้ำของจังหวัดภูเก็ตนอกจากนี้ มีงานวิจัยที่บ่งชี้ว่าโลหะ เหล็กสามารถถูกชะจากหิน ดิน และตะกอนลงสู่แหล่งน้ำต่างๆ ได้ (Lippiatt, *et al.* 2010) นอกจาก ตะกอนท้องน้ำแล้ว ยังมีการตรวจพบเหล็กในน้ำขุมเหมืองดีบุกเก่าที่มีกระจัดกระจายอยู่ทั่วทั้ง จังหวัดภูเก็ต (Suteerasak and Bhongsuwan, 2006) ซึ่งปัจจุบันมีการนำน้ำขุมเหมืองเหล่านี้มาใช้ในการผลิตน้ำประปา เพื่อช่วยแก้ปัญหาขาดแคลนน้ำดิบของจังหวัด (Department of Environmental

Quality Promotion and Mahidol University, 2011) ทำให้ยิ่งมีความจำเป็นต้องมีการตรวจวัดปริมาณเหล็กที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำ

โดยทั่วไปแล้ว การตรวจวัดเหล็กปริมาณน้อย (trace concentration) ในน้ำใช้วิธีมาตรฐาน ASTM E 394 - 04 หรือวิธี 1, 10 - ฟิแนนโทโรลีน โดยวิธีนี้จะเกี่ยวข้องกับการทำปฏิกิริยาระหว่างเหล็กเฟอร์รัส (Fe^{2+}) และสาร 1, 10 - ฟิแนนโทโรลีน ที่ pH ประมาณ 3.20 - 3.30 เกิดเป็นไอออนเชิงซ้อนที่มีสีส้มแดงและตรวจวัดความเข้มข้นของสารเชิงซ้อนนี้โดยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (Harris, 2003) นอกจากนี้ยังมีวิธีการวัดปริมาณเหล็กในน้ำอีกหนึ่งวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง คือ การวิเคราะห์โดยใช้เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS) ซึ่งให้ขีดจำกัดตรวจวัดต่ำสุดถึง $1 \mu\text{g/L}$ (International Organization for Standardization, 1998)

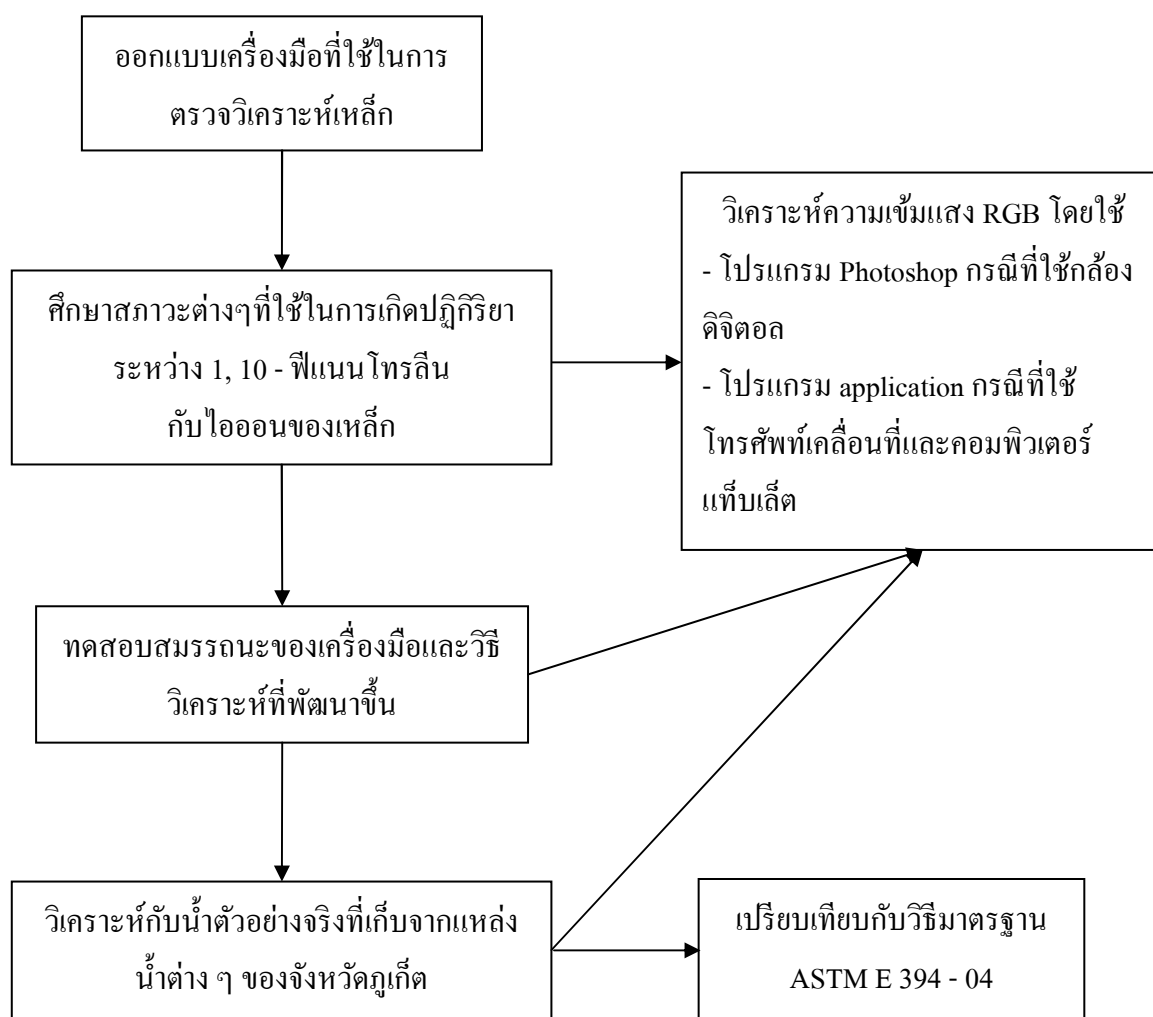
อย่างไรก็ตามวิธีการทั้งสองนี้จำเป็นต้องอาศัยกระบวนการเก็บตัวอย่างและการขนส่งตัวอย่าง เพื่อนำมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ยุ่งยาก ใช้เวลานาน และอาจทำให้ข้อมูลที่ได้มานั้นไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์หรือแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นได้อย่างทันทั่วที่ นอกจากนี้ อาจเกิดการสูญเสียตัวอย่างหรือเกิดการปนเปื้อนได้ง่ายในระหว่างกระบวนการขนส่งอีกด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงมุ่งเน้นการพัฒนาวิธีการตรวจวัดปริมาณเหล็กเบื้องต้น (screening test) ที่มีประสิทธิภาพ วิธีการวิเคราะห์ไม่ซับซ้อน ให้ผลการวิเคราะห์รวดเร็ว สามารถใช้ในงานภาคสนามได้ รวมถึงมีค่าใช้จ่ายต่ำ โดยประยุกต์ใช้หลักการการวัดสีของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเคมี (colorimetric method) เข้ากับการวิเคราะห์ภาพถ่ายดิจิทัล (digital image-based analysis) และตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีที่พัฒนาขึ้นกับการตรวจวัดเหล็กที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำของจังหวัดภูเก็ต

1.2 กรอบแนวความคิดของงานวิจัย

จากรูปที่ 1.1 แสดงกรอบแนวความคิดของงานวิจัยโดยเริ่มจากการออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้เป็นตัวกล่องสำหรับใส่หลอดปฏิกิริยา ที่สามารถลดอิทธิพลของแสงภายนอกที่ส่งผลต่อความเข้มสีของสารเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาการเกิดสีระหว่างไอออนของเหล็กกับ 1, 10 - ฟิแนนโทโรลีน โดยอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบต้องคำนึงถึงการนำไปใช้งานในภาคสนามที่สามารถหลีกเลี่ยงอิทธิพลของแสงภายนอก

จากนั้นศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งประกอบไปด้วย 4 ปัจจัย คือ เวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับสารเชิงซ้อน ความเข้มข้นของสารละลาย 1, 10 -

พีแนนโทรลิน ความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตตบัฟเฟอร์ และพีเอชที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา โดยการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมได้ใช้การวิเคราะห์ภาพถ่ายดิจิทัลจากกล้องถ่ายภาพ และใช้แอปพลิเคชันในโทรศัพท์เคลื่อนที่สมรรถนะสูงเพื่อวิเคราะห์ค่าความเข้มแสงในระบบสี RGB



รูปที่ 1.1 กรอบแนวความคิดของงานวิจัย

ศึกษาสมรรถนะของวิธีที่พัฒนาขึ้นด้วยการทำกราฟเทียบมาตรฐาน ซึ่งจะนำไปสู่การพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ช่วงความเป็นเส้นตรง (linear dynamic range) ความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจพบได้ (limit of detection) ความแม่นยำในการวิเคราะห์ (accuracy) และความเที่ยงในการทวนซ้ำ (precision) จากนั้นจึงนำวิธีที่พัฒนาขึ้นไปใช้ในการวิเคราะห์กับน้ำตัวอย่างจากแหล่ง

น้ำของจังหวัดภูเก็ต และเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน ASTM E 394 - 04 เพื่อทดสอบว่าสามารถนำไปใช้งานได้จริง และมีความถูกต้องที่ใกล้เคียงกับวิธีมาตรฐาน

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อพัฒนาวิธีการตรวจวัดเบื้องต้น (screening test) ที่มีประสิทธิภาพ วิธีการวิเคราะห์ไม่ซับซ้อน มีค่าใช้จ่ายต่ำ และให้ผลการวิเคราะห์รวดเร็วสำหรับการตรวจวัดเหล็กที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำประเภทต่างๆได้

1.4 ขอบเขตการวิจัย

- 1) ออกแบบอุปกรณ์เพื่อใช้ในการตรวจวิเคราะห์ภาคสนามที่มีขนาดกระทัดรัด น้ำหนักเบา พกพาได้สะดวก และลดอิทธิพลของแสงภายนอกที่มีต่อความเข้มสีของสารเชิงซ้อน
- 2) หาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา ได้แก่ เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา ความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ และพีเอช
- 3) ตรวจสอบสมรรถนะของระบบ (system performance) และความใช้ได้ของวิธีที่พัฒนาขึ้น (method validation) สำหรับการวิเคราะห์กึ่งปริมาณ (semi quantitative analysis)
- 4) ศึกษาอิทธิพลของไอออนตัวอื่น ๆ ที่มีผลกระทบต่อผลการตรวจวิเคราะห์
- 5) เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ของวิธีที่พัฒนากับวิธีมาตรฐาน
- 6) ประยุกต์ใช้วิธีการตรวจวัดที่พัฒนาขึ้นกับตัวอย่างน้ำประเภทต่างๆในจังหวัดภูเก็ต

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้รับชุดทดสอบที่สามารถนำไปใช้ในการตรวจวิเคราะห์ปริมาณเหล็กเบื้องต้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีขั้นตอนในการวิเคราะห์ไม่ยุ่งยาก ใช้สารเคมี และอุปกรณ์ไม่มาก ให้ผลการวิเคราะห์รวดเร็ว มีค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ต่ำ และมีศักยภาพสามารถนำมาใช้งานภาคสนาม ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อหน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชนที่มีหน้าที่รับผิดชอบหรือเกี่ยวข้องกับการตรวจวิเคราะห์เหล็กที่ปนเปื้อนในน้ำ อีกทั้งลดค่าใช้จ่ายในเรื่องงบประมาณการวิเคราะห์เหล็กลงได้

บทที่ 2

การตรวจสอบเอกสารที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้อมูลทั่วไปของธาตุเหล็ก

ธาตุเหล็กเป็น โลหะที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติในหินที่เกิดจากลาวา (igneous rock) และหินทราย โดยทั่วไปสามารถพบเหล็กได้ 2 รูป คือ เหล็กเฟอร์รัส (Fe^{2+}) สามารถละลายน้ำได้ดี มีเลขออกซิเดชัน +2 และเหล็กเฟอร์ริก (Fe^{3+}) ที่ไม่สามารถละลายในน้ำได้ มีเลขออกซิเดชัน +3 ธาตุเหล็กเป็นแร่ธาตุที่จำเป็นต่อร่างกายมนุษย์และต้องได้รับอย่างน้อย 5 mg ต่อวัน (Ityel, 2011) เพราะเหล็กเป็นส่วนประกอบสำคัญในการสร้างฮีโมโกลบินในเม็ดเลือดแดงเพื่อลำเลียงออกซิเจนและสารอาหารไปยังเซลล์

งานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาไม่ได้มีการกล่าวถึงระดับของเหล็กในน้ำที่ส่งผลกระทบต่อร่างกายมนุษย์ แต่ถ้าหาระดับของเหล็กในน้ำมีเกินข้อกำหนดขององค์กรปกป้องสิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (United State Environmental Protection Agency, US EPA) ซึ่งระบุไว้ว่า ระดับความเข้มข้นของเหล็กในน้ำดื่มที่มากเกินกว่า 0.30 ppm จะส่งผลเสียต่อการนำไปใช้ด้านอุปโภคและบริโภค เนื่องจากจะทำให้เกิดสีและรสที่ไม่พึงประสงค์ และทำให้เกิดคราบสีส้มเกาะตามเสื้อผ้า ภาชนะและครุภัณฑ์ได้ ซึ่งปัญหาการปนเปื้อนของเหล็กลงสู่แหล่งน้ำสามารถเกิดได้ง่าย เช่น จากการชะล้างจากหิน ดิน และตะกอน เป็นต้น (Lippiatt, *et al.* 2010) จึงทำให้มีโอกาในการตรวจพบเหล็กในแหล่งน้ำชนิดน้ำผิวดิน เช่น น้ำขุมเหมือง ซึ่งเป็นแหล่งน้ำที่สำคัญในจังหวัดภูเก็ต เพราะมีการแปรสภาพพื้นที่จากขุมเหมืองแร่ดิบบุกเก่ามาเป็นแหล่งน้ำผิวดิน และเหล็กยังเป็นธาตุที่พบได้มากบริเวณเปลือกโลก (Rabinovich, 2000) ทำให้มีโอกาสนปนเปื้อนลงสู่ลำน้ำใต้ดิน เช่น น้ำบาดาล โดยแหล่งน้ำประเภทนี้เป็นที่นิยมใช้ในครัวเรือนของจังหวัดภูเก็ต สำหรับการอุปโภคบริโภค ซึ่งทำให้เกิดความเสี่ยงของการตรวจพบปัญหาเรื่องการปนเปื้อนของเหล็กในน้ำได้

2.2 เทคนิคที่ใช้ในการตรวจวิเคราะห์ปริมาณเหล็ก

เทคนิคทางสเปกโทสโกปีเป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการตรวจวิเคราะห์ปริมาณเหล็ก เช่น อะตอมมิคแอบซอร์บชันสเปกโทรเมทรีและยูวี - วิชสเปกโทรเมทรี (Cave, *et al.* 2001) ซึ่งมีความแม่นยำในการวิเคราะห์สูง มีความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้ต่ำสุดถึงระดับหนึ่งในพันล้าน (part

per billion, ppb) หลักการโดยสังเขปของเทคนิคนี้ คือ อิเล็กตรอนที่อยู่ภายในอะตอม เมื่อได้รับพลังงานก็จะดูดกลืนพลังงานและเคลื่อนที่เปลี่ยนไปอยู่ระดับพลังงานที่สูงขึ้นกว่าเดิมเพียงชั่วขณะ (รูปที่ 2.1) ซึ่งพลังงานที่ให้กับอะตอมเป็นพลังงานแสงที่มีความจำเพาะกับธาตุแต่ละชนิด โดยค่าการดูดกลืนแสงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเข้มข้นของโลหะเป็นไปตามกฎของเบียร์ (beer's law) ดังสมการที่ 2.1 และ 2.2

$$T = I / I_0 \quad (2.1)$$

$$A = -\log I / I_0 = -\log T = \epsilon Ct \quad (2.2)$$

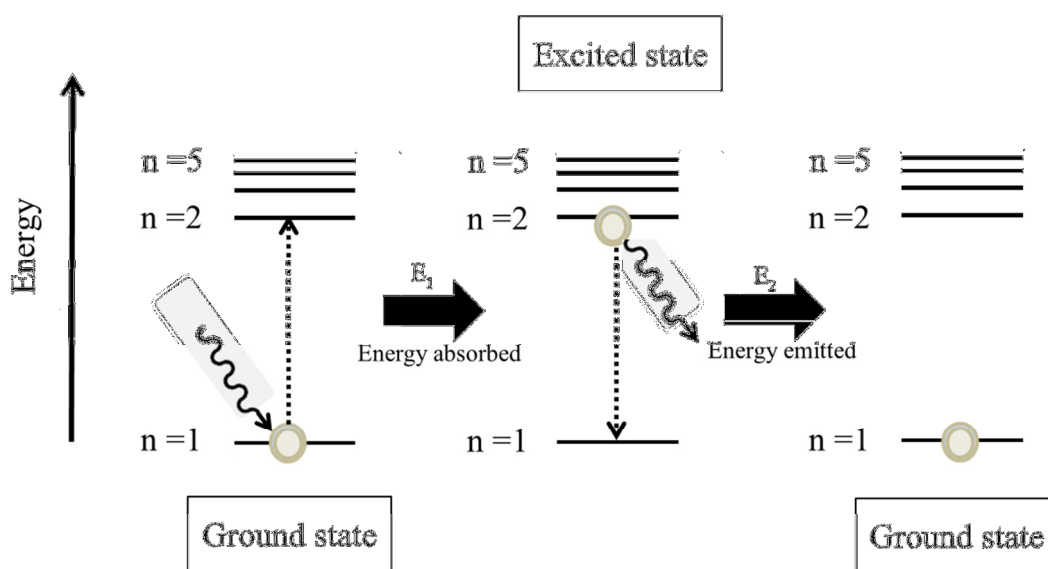
โดยที่

T = transmittance หมายถึง สัดส่วนปริมาณแสงที่ออกมา (I) ต่อปริมาณแสงที่ผ่านเข้าไปในตัวอย่าง (I_0)

A = absorbance หมายถึง แสงที่ถูกดูดกลืนในตัวอย่าง

C = ความเข้มข้นของสารในหน่วย mole/L, t = ความหนาของสารละลาย (cm)

ϵ = molar absorptivity สารแต่ละชนิดมีค่า ϵ คงที่ในแต่ละช่วงคลื่น (M^{-1}/cm)



รูปที่ 2.1 การดูดกลืนพลังงานและคายพลังงานของอิเล็กตรอน

ข้อจำกัดของเทคนิคทางสเปกโทรโฟโตเมตรี คือ เครื่องมือรวมถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีราคาสูง ต้องอาศัยผู้ที่มีความชำนาญในการวิเคราะห์ และการนำไปใช้ในงานในภาคสนามทำได้ไม่สะดวก เนื่องจากเครื่องมือมีขนาดใหญ่ เคลื่อนย้ายได้ยาก

ดังนั้นการพัฒนาเทคนิคการวิเคราะห์ขึ้นมาใหม่จึงต้องคำนึงถึงข้อจำกัดของเทคนิคทางสเปกโทรโฟโตเมตรี และสมรรถนะของระบบการวิเคราะห์ ซึ่งตัวชี้วัดที่บ่งบอกถึงสมรรถนะของระบบการวิเคราะห์ ได้แก่

ก) ความแม่นยำในการวิเคราะห์ (accuracy) หมายถึง ความใกล้เคียงระหว่างค่าที่แท้จริงกับค่าที่ได้จากการตรวจวัด (Betz, *et al.* 2011) ยิ่งค่าทั้งสองนี้มีค่าใกล้เคียงกันมากเท่าไร ความแม่นยำในการวิเคราะห์ก็สูงขึ้นเท่านั้น

ข) ความเที่ยงในการทวนซ้ำของวิธีวิเคราะห์ (precision) หมายถึง การวัดค่าตัวแปรเดียวกันหลาย ๆ ครั้งว่าได้ค่าใกล้เคียงกันเพียงใด (Betz, *et al.* 2011) หากได้ค่าใกล้เคียงกันมากในทุก ๆ ครั้งที่วัด ก็หมายความว่ามีความเที่ยงตรงในการวิเคราะห์สูง

ค) ความไวในการวิเคราะห์ (sensitivity) หมายถึง เครื่องมือวิเคราะห์หรือวิธีวิเคราะห์สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรเพียงเล็กน้อย หากเครื่องมือวิเคราะห์หรือวิธีวิเคราะห์สามารถตอบสนองได้ ก็หมายถึงความไวในการวิเคราะห์มีค่าสูง

ง) ความจำเพาะเจาะจงในการวิเคราะห์ (selectivity) หมายถึง ความสามารถของเครื่องมือวิเคราะห์หรือวิธีวิเคราะห์ในการตอบสนองต่อการวิเคราะห์สารที่ต้องการวิเคราะห์เพียงสารเดียว

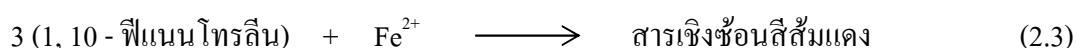
จ) ช่วงความเป็นเส้นตรง (linear dynamic range, LDR) หมายถึง ช่วงความเข้มข้นของสารที่ต้องการวัดซึ่งมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับความเข้มแสงหรือการดูดกลืนแสง ซึ่งช่วงความเป็นเส้นตรงที่ยอมรับได้ต้องมีค่าสหสัมพันธ์เชิงปริมาณ (R^2) มากกว่าหรือเท่ากับ 0.99 (Miller and Miller, 2005)

ฉ) ขีดจำกัดของการตรวจวัด (limit of detection, LOD) คือ ความเข้มข้นต่ำสุดของสารในตัวอย่างที่เครื่องมือหรือเทคนิคการวิเคราะห์ยังสามารถตรวจวัดได้โดยปราศจากการรบกวนของสัญญาณรบกวนอื่น (อัตราส่วนระหว่างสัญญาณของสารที่ต้องการวิเคราะห์ต่อสัญญาณรบกวนต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 3) (Thomsen, *et al.* 2003)

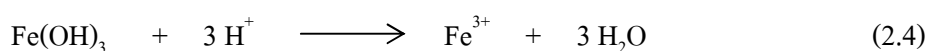
2.3 การตรวจวัดเหล็กด้วยเทคนิควิเคราะห์สารโดยการวัดสี

เทคนิควิเคราะห์สารโดยการวัดสี (colorimetric test) เป็นการวิเคราะห์ด้วยการเปรียบเทียบความเข้มสีของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารที่สนใจตรวจวัดและสารเคมีบางชนิด โดยชนิดของสีที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยา หลักการของวิธีนี้โดยสังเขป คือ การใช้สารเคมีที่มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยากับสารตัวอย่าง ซึ่งส่วนใหญ่เป็นโลหะหนักและสารอินทรีย์ ทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารเชิงซ้อนที่มีสี และอาศัยหลักการ คือ ความเข้มสีของสารเชิงซ้อนแปรผันตรงกับปริมาณของสารที่มีอยู่ในตัวอย่าง ทำให้สามารถกำหนดปริมาณสารที่มีในตัวอย่างจากสีที่เกิดขึ้นได้ และมีการประยุกต์ใช้เพื่อกำหนดปริมาณของสารชนิดต่างๆ เช่น เหล็ก แอมโมเนีย ไนโตรเจน ไนไตรต์ (APHA, AWWA, WOCF, 1989) สารระเบิด (ทีเอ็นที) (Almog and Zitrin, 2009) และยาเสพติด (แอมเฟตามีน ฟีน มอร์ฟิน เฮโรอีน) (United Nations International Drug Control Programme, 1994)

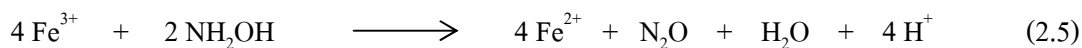
การตรวจวิเคราะห์เหล็กปริมาณน้อย (trace concentration) นิยมใช้วิธีมาตรฐาน 1, 10 - ฟิแนนโทรีน (ASTM E 394 - 04) ซึ่งอาศัยหลักการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเหล็กเฟอร์รัส (ferrous iron, Fe^{2+}) กับ 1, 10 - ฟิแนนโทรีน ในช่วง pH ระหว่าง 3.20 - 3.30 เกิดเป็นสารเชิงซ้อนสีส้มแดงที่ชื่อว่า เฟอโรอีน (ferroin) ดังแสดงในสมการที่ 2.3 ก่อนจะนำสารเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 510 nm ภายในเวลา 5 - 10 นาที (Harris, 2003)



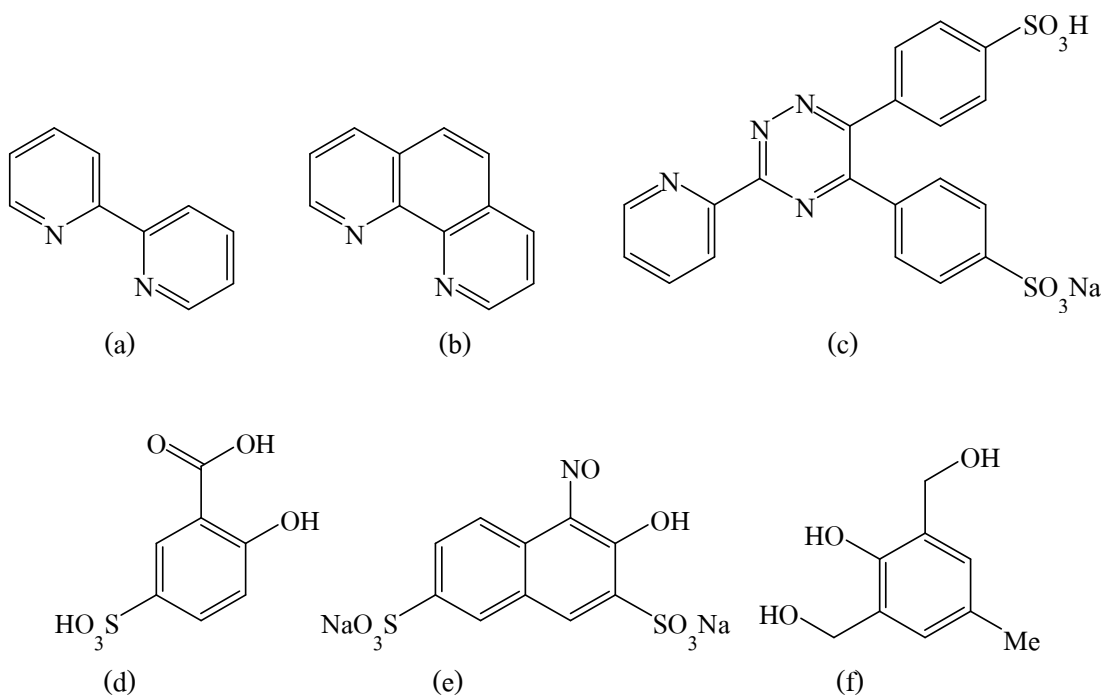
อย่างไรก็ตามเหล็กในน้ำมีทั้งในรูปเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) หากต้องการตรวจวัดปริมาณเหล็กทั้งหมดในน้ำจำเป็นต้องเปลี่ยนรูปเฟอร์ริกไอออนให้กลายเป็นเฟอร์รัสไอออน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเฟอร์ริกไอออนในน้ำอยู่ในรูปตะกอนของ $Fe(OH)_3$ ที่ไม่ละลายน้ำ จำเป็นต้องมีการเติมกรดไฮโดรคลอริกเพื่อเปลี่ยนรูป $Fe(OH)_3$ เป็นเฟอร์ริกไอออน ดังแสดงในสมการที่ 2.4



รีดิวส์เฟอร์ริกไอออนโดยใช้สารไฮดรอกซีลามีน ดังแสดงในสมการที่ 2.5 ก่อนที่จะนำไปทำปฏิกิริยาการเกิดสีกับสารละลาย 1, 10 - ฟิแนนโทรลีนดังสมการที่ 2.3



สารเคมีที่ใช้ในการเกิดเป็นสารเชิงซ้อนกับไอออนของเหล็ก นอกจากใช้ 1, 10 - ฟิแนนโทรลีน ยังมีสารอื่น ๆ ที่ใช้ในการเกิดเป็นสารเชิงซ้อนกับไอออนของเหล็กได้ เพียงแต่อาจจะให้สีของผลิตภัณฑ์ที่ต่างกันไป เช่น 5 - sulfosalicylic acid (Paipa, *et al.* 2006) Disodium - 1 - nitroso - 2 - naphthol - 3, 6 - disulphone และ 4 - methyl - 2, 6 - bis (hydroxymethyl) phenol (Abbaspour, *et al.* 2006) และมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างสารที่นิยมใช้สำหรับการเกิดสารเชิงซ้อนกับไอออนของเหล็ก ได้แก่ (a) 2,2 - bipyridyl (b) 1, 10 - phenanthroline (c) ferrozine (d) 5 - sulfosalicylic acid (e) Disodium - 1 - nitroso - 2 - naphthol - 3,6 - disulphone และ (f) 4 - methyl - 2,6 - bis - (hydroxymethyl) - phenol

2.4 การวิเคราะห์ภาพถ่ายดิจิทัล

การเทียบปริมาณของสารที่เกิดจากปฏิกิริยาการเกิดสีของการวิเคราะห์สีด้วยสายตามีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถแยกแยะความแตกต่างของสีได้มาก และมาตรฐานไม่ละเอียด ทำให้การรายงานปริมาณสารที่มีในตัวอย่างมีความคลาดเคลื่อนไปจากปริมาณสารที่มีอยู่จริงได้ จากข้อจำกัดดังกล่าวจึงได้มีการประยุกต์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายดิจิทัล (digital image-based analysis) ขึ้นมาช่วยในการเทียบสีของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการเกิดสี ซึ่งเทคนิคนี้ใช้หลักการวิเคราะห์ข้อมูลสีพื้นฐาน 3 สี ได้แก่ สีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน ที่ได้รับจากภาพถ่ายดิจิทัล (Byrne, *et al.* 2000) ซึ่งเกิดจากการสะท้อนแสงของผลิตภัณฑ์ผ่านตัวกรองแสง (filter) ที่แตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ สีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน ซึ่งแสงที่ผ่านตัวกรองแสงก็จะตกกระทบที่ตัวรับแสง (photodiode) ในเซนเซอร์รับภาพ โดยข้อมูลสีพื้นฐานที่ได้รับของแต่ละสีมีค่าอยู่ในช่วง 0 - 255 (Byrne, *et al.* 2000; Maleki, *et al.* 2004; Gaiao, *et al.* 2006; Lopez-Molinero, *et al.* 2010) ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณของสารที่เราต้องการศึกษาและช่วงความยาวคลื่นของแสงที่สารเชิงซ้อนดูดกลืนได้

การแปลผลข้อมูลสีในงานวิจัยของนักวิจัยได้มีการประยุกต์ใช้โปรแกรมเข้ามาช่วย เช่น MATLAB (Goddijn and White, 2006; Lopez-Molinero, *et al.* 2010) Visual Basic (Maleki, *et al.* 2004) และ Kylix version 3.0 (Gaiao, *et al.* 2006) ซึ่งการใช้งานที่ค่อนข้างยุ่งยาก ต้องอาศัยความชำนาญเฉพาะด้าน และจำเป็นต้องใช้เวลาในการศึกษาจึงไม่สะดวกต่อผู้ใช้งานทั่วไป งานวิจัยครั้งนี้จึงมุ่งเน้นโปรแกรมที่ซื้อได้ง่าย ราคาถูก และง่ายต่อการใช้งาน อย่างเช่น Adobe Photoshop และ Microsoft Excel

การใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายดิจิทัลสามารถใช้ได้กับงานหลายประเภท เช่น ด้านวัสดุศาสตร์ ที่ใช้ในการกำหนดปริมาณโลหะ Fe^{3+} และ Al^{3+} ในโลหะอัลลอยด์ (Maleki, *et al.* 2004) การวัดโลหะไทเทเนียมในพลาสติก (Lopez-Molinero, *et al.* 2010) ด้านเคมีโดยนำมาช่วยในการไตเตรทกรดไฮโดรคลอริกและกรดฟอสฟอริก (Gaiao, *et al.* 2006) และใช้สำหรับวัดระดับฟิเอชด้วยกระดาษฟิเอช (Abbaspour, *et al.* 2006) ด้านนิติวิทยาศาสตร์โดยใช้วิเคราะห์ปริมาณสารแอมเฟตามีน และเมทแอมเฟตามีน ในปัสสาวะ (Choodum and Nic Daeid, 2011) และด้านสิ่งแวดล้อมโดยการตรวจสอบคุณภาพน้ำชายฝั่งโดยประเมินจากอินทรีย์วัตถุที่ละลายน้ำ (dissolved organic matter) (Goddijn and White, 2006) ซึ่งการประยุกต์ใช้เทคนิคนี้กับงานทางสิ่งแวดล้อมยังมีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงให้ความสนใจในการนำเทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายดิจิทัลมาใช้

กับการตรวจวัดเหล็กในแหล่งน้ำประเภทต่าง ๆ ในจังหวัดภูเก็ต เพื่อให้ได้ข้อมูลที่รวดเร็วกว่าวิธีปกติ สามารถนำข้อมูลไปใช้ในการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมได้อย่างทัน่วงที

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

3.1 วัสดุและสารเคมี

- 3.1.1 กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (Conc. HCl)
- 3.1.2 กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (Conc. H₂SO₄)
- 3.1.3 กรดอะซิติก (CH₃COOH)
- 3.1.4 ไฮดรอกซีลามีน (NH₂OH.HCl)
- 3.1.5 แอมโมเนียมอะซิเตต (NH₄C₂H₃O₂)
- 3.1.6 1, 10 - ฟีนานโทรลีนโมโนไฮเดรต (C₁₂H₈N₂.H₂O)
- 3.1.7 เฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต (FeSO₄.7H₂O)

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

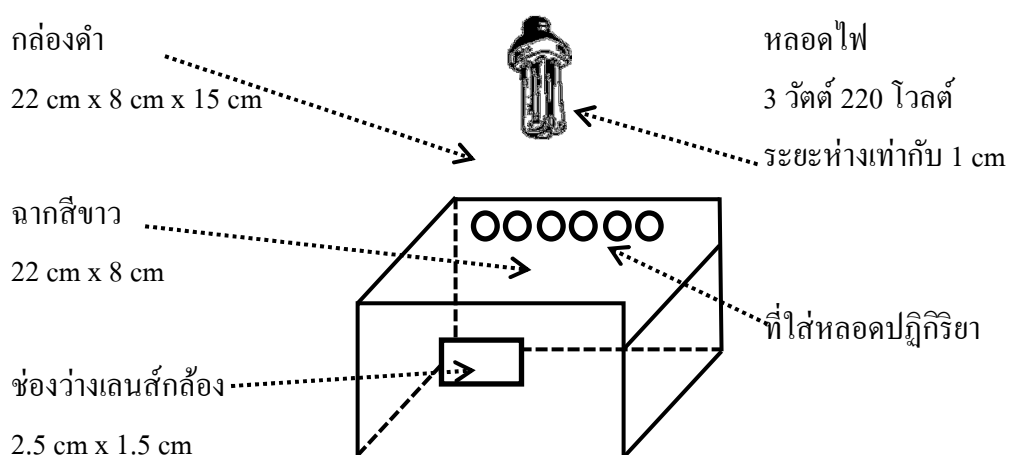
- 3.2.1 บีกเกอร์ ขนาด 25, 50, 100 , 250, 500 และ1,000 mL
- 3.2.2 ขวดวัดปริมาตร ขนาด 100, 250, 500 และ1,000 mL
- 3.2.3 กระจกตวง ขนาด 100 mL
- 3.2.4 หลอดหมุนเหวี่ยง (microcentrifuge tube) ขนาด 1.50 mL
- 3.2.5 ตะแกรงใส่หลอดหมุนเหวี่ยง (rack)
- 3.2.6 ไมโครปิเปต ขนาด 0.20, 1.00 และ5.00 mL
- 3.2.7 ทิปพลาสติก ขนาด 0.20, 1.00 และ5.00 mL
- 3.2.8 แท่งแก้ว
- 3.2.9 เครื่องชั่ง ความละเอียด 4 ตำแหน่ง
- 3.2.10 เครื่องสเปกโทโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer)
- 3.2.11 กล้องถ่ายรูปดิจิทัล SONY DSC-WX7
- 3.1.12 โทรศัพท์เคลื่อนที่ รุ่น Samsung Galaxy S 2 และรุ่น iPhone 5
- 3.1.13 คอมพิวเตอร์แท็บเล็ต รุ่น iPad 3

3.3 วิธีการวิจัย

3.3.1 การใช้กล้องดิจิทัลเป็นตัวตรวจวัดความเข้มสี

1) ออกแบบชุดทดสอบที่ใช้ในการตรวจวัดเหล็กในน้ำ

ชุดทดสอบที่แสดงในรูปที่ 3.1 จะถูกออกแบบให้สามารถป้องกันผลกระทบจากแสงภายนอกได้ และยังออกแบบให้มีน้ำหนักที่ไม่หนักมาก สามารถพกพาได้สะดวกนำไปใช้งานในการตรวจวัดเหล็กภาคสนามได้ โดยอิทธิพลของแสงภายนอกที่มีผลต่อความเข้มสีได้ ทำการศึกษาโดยเปรียบเทียบระหว่างสภาวะที่ไม่ได้รับอิทธิพลจากแสงภายนอก (ห้องมืด) และสภาวะที่ได้รับอิทธิพลจากแสงภายนอก (ห้องสว่าง)



รูปที่ 3.1 ชุดทดสอบที่ใช้กล้องดิจิทัลเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มแสง

2) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาการเกิดสีระหว่าง 1, 10 - ฟิแนนโทรีน และไอออนเหล็กโดยใช้กล้องถ่ายภาพดิจิทัลในการตรวจวัดโดยสภาวะในการเกิดปฏิกิริยาที่ศึกษาได้แก่

a) เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา

ศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไอออนของเหล็กกับสารละลาย 1,10 - ฟิแนนโทรีนต่อความเข้มสี โดยทำการทดลองที่เวลาต่างกันได้แก่ 1, 3, 5, 10, 15, 20 และ 30 นาที

b) ความเข้มข้นของสารละลาย 1, 10 - พีแนนโทรลีน

ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลาย 1, 10 - พีแนนโทรลีนที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาต่อความเข้มสี โดยทำการทดลองที่ความเข้มข้นที่ต่างกันของสารละลาย 1, 10 - พีแนนโทรลีน ได้แก่ 600, 700, 800, 900 และ 1,000 ppm

c) ความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตตบัฟเฟอร์

ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตตบัฟเฟอร์ที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาต่อความเข้มสี โดยทำการทดลองที่ความเข้มข้นที่ต่างกันของสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตตบัฟเฟอร์ ได้แก่ 0.15, 0.20, 0.25 และ 0.30 M

d) ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก

ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลาย กรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาต่อความเข้มสี โดยทำการทดลองที่ความเข้มข้นที่ต่างกันของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ได้แก่ 0, 0.10, 0.20, 0.30 และ 0.40 M

3) กราฟมาตรฐาน (calibration curve)

เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเหล็กเฟอรัสกับค่าความเข้มแสง (intensity) หรือ ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) โดยทำการศึกษาที่ความเข้มข้นของสารละลายเหล็กเฟอรัสที่ทราบความเข้มข้น ได้แก่ 0.01, 0.05, 0.10, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 1.00, 2.00, 3.00, 4.00, 5.00, 6.00, 7.00, 8.00, 9.00 และ 10.00 ppm

4) ตรวจสอบสมรรถนะของชุดทดสอบที่พัฒนาขึ้น

โดยพิจารณาจากพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้

a) ความแม่นยำในการตรวจวัด (accuracy)

ทำการทดลองโดยการวิเคราะห์สารละลายเหล็กที่ความเข้มข้น 2.50 และ 4.50 ppm และเปรียบเทียบผลที่ได้จากกราฟมาตรฐานกับความเข้มข้นของสารละลายจริง

b) ความเที่ยงในการทวนซ้ำ (precision)

ทำการทดลองโดยวิเคราะห์สารละลายเหล็กที่ความเข้มข้น 4.00 ppm ที่ช่วงเวลาแตกต่างกันเริ่มตั้งแต่ 1, 3, 6, 12, 24 และ 48 ชม. ทุกครั้งที่ทำการทดลองได้เตรียมสารละลายที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ใหม่ทุกครั้ง โดยพิจารณาทั้งแบบที่ทำการทดลองซ้ำภายในวันเดียวกัน (interday) และแบบที่ทำการทดลองซ้ำกันระหว่างวัน (intraday) และแสดงผลในรูปแบบของค่าร้อยละ

ของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (% relative standard deviation, % rsd) คำนวณได้ดังสมการที่ 3.1

$$\% \text{ RSD} = [(\text{SD}) / (\text{X})] \times 100 \quad (3.1)$$

โดยที่

% RSD คือ ค่าร้อยละของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์

SD คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation)

X คือ ค่าเฉลี่ย (mean)

c) ช่วงความเป็นเส้นตรง (linear range)

โดยพิจารณาจากช่วงความเป็นเส้นตรงทุกช่วงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงหรือการดูดกลืนแสง RGB กับความเข้มข้นของสารละลายเหล็กเฟอร์รัสที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) มากกว่าหรือเท่ากับ 0.99 และมีสมการเส้นตรงดังแสดงในสมการที่ 3.2 เพื่อนำไปใช้งานเชิงปริมาณวิเคราะห์ (quantative analysis)

$$y = m (x) + C \quad (3.2)$$

โดยที่

y คือ ความเข้มแสง (intensity) หรือการดูดกลืนแสง RGB

x คือ ความเข้มข้นของเหล็กในหน่วย ppm

m คือ ความชันของสมการเส้นตรง (slope)

C คือ จุดตัดแกน y (intercept)

d) ความไวในการวิเคราะห์ (sensitivity)

โดยพิจารณาความชัน (slope) ของสมการเส้นตรงที่สร้างขึ้นได้จากกราฟมาตรฐาน

e) ความเข้มข้นต่ำสุดที่ตรวจพบได้ (LOD)

เป็นการคำนวณความเข้มข้นต่ำสุดที่ตรวจพบได้ของวิธีวิเคราะห์ โดยอาศัยสมการเส้นตรง (calibration equation) ความเข้มแสงหรือการดูดกลืนแสง RGB และความเข้มข้นสารละลายเหล็กที่แต่ละความเข้มข้นในการคำนวณค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ตรวจพบได้ดังแสดงในสมการที่ 3.3

$$\text{LOD} = y_B + 3 S_B \quad (3.3)$$

โดยที่

LOD คือ ความเข้มข้นต่ำสุดของสารที่ตรวจพบได้ (limit of detection)

y_B คือ ความเข้มข้นของสารที่ทำให้ความเข้มแสงหรือการดูดกลืนแสงเท่ากับ ความเข้มแสงหรือการดูดกลืนแสงของสารละลายที่ไม่มีสารที่ต้องการวัด (blank)

S_B คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มแสงหรือการดูดกลืนแสง RGB ของสารละลายที่ไม่มีสารที่ต้องการวัด (blank)

5) ผลของไอออนตัวอื่น ๆ ต่อการวิเคราะห์

เป็นการศึกษาผลของไอออนตัวอื่น ๆ ที่มีต่อการตรวจวิเคราะห์โดยพิจารณาไอออนทั้งหมด 6 ไอออน ได้แก่ Ag^+ , Cu^{2+} , Sb^{3+} , NO_3^- , SO_4^{2-} และ PO_4^{3-} ศึกษาผลของไอออนดังกล่าวด้วยการเปรียบเทียบความเข้มแสงหรือการดูดกลืนแสง RGB สภาวะที่ไม่มีผลของไอออนรบกวนกับ สภาวะที่มีผลของไอออนรบกวน โดยพิจารณาค่าร้อยละความแตกต่าง (% difference) ดังแสดงใน สมการที่ 3.4

$$\text{ค่าร้อยละความแตกต่าง (\% difference)} = [(X_1 - X_2) / X_1] \times 100 \quad (3.4)$$

โดยที่

X_1 คือ ความเข้มแสง/การดูดกลืนแสง RGB ในสภาวะที่ไม่มีผลของไอออนรบกวน

X_2 คือ ความเข้มแสง/การดูดกลืนแสง RGB ในสภาวะที่มีผลของไอออนรบกวน

6) ทดสอบอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นกับน้ำตัวอย่างจริง

โดยการเก็บน้ำตัวอย่างจากแหล่งน้ำต่าง ๆ ในจังหวัดภูเก็ต ได้แก่ น้ำดิบที่ใช้ทำน้ำประปา (เขื่อนบางวาด ตำบลกะทู้ อำเภอกะทู้) น้ำดิบที่ใช้อุปโภคและบริโภค (น้ำตกละทู้ ตำบลกะทู้ อำเภอกะทู้) น้ำผิวดินที่มีการไหลต่อเนื่องจากคลองบางใหญ่ (หน้าโรงเรียนสตรีภูเก็ต ตำบลตลาดใหญ่ อำเภอมืองภูเก็ต) น้ำบ่อตื้น (บ้านพักในตำบลราไวย์ อำเภอมืองภูเก็ต) น้ำขุมเหมือง (หน้าปั๊มเชลล์ ตำบลกะทู้ อำเภอกะทู้) น้ำบาดาล (สนามฟุตบอลแหลมพรหมเทพ ตำบลราไวย์ อำเภอมืองภูเก็ต) น้ำประปา (คณะเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตภูเก็ต ตำบลกะทู้ อำเภอกะทู้) และน้ำแร่ยี่ห้อมินเนเร่ (ร้านสะดวกซื้อ ตำบลกะทู้ อำเภอกะทู้) โดย

ทำการเก็บตัวอย่างด้วยวิธีจ้วงตัก (grab sampling) และรักษาอุณหภูมิไว้ที่ 4 °C ก่อนการวิเคราะห์ การตรวจวิเคราะห์ความเข้มข้นของเหล็กที่มีในน้ำตัวอย่างได้รับอิทธิพลของตัวทำละลายที่มีในน้ำ ตัวอย่าง (matrix effect) จึงจำเป็นต้องใช้วิธีเติมสารมาตรฐาน (standard addition) ซึ่งทำโดยการเติม สารละลายมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน ได้แก่ 2.00, 4.00, 6.00, 8.00 และ 10.00 ppm ลง ในตัวอย่าง นอกจากนี้แล้วได้มีการควบคุมคุณภาพด้วยการทำแบบลบล้างทดสอบ (blank test) ตลอด การทดลอง

7) ทดสอบอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นกับการวิเคราะห์เหล็กในยาเม็ดเสริมธาตุเหล็ก

ประยุกต์ใช้เทคนิคที่พัฒนาในการวิเคราะห์เหล็กในยาเม็ดเสริมธาตุเหล็กที่วางขาย ตามท้องตลาดจำนวน 2 ยี่ห้อ โดยนำยาเม็ดเสริมธาตุเหล็กละลายด้วยน้ำบริสุทธิ์คุณภาพสูงปริมาตร 100 mL ในบีกเกอร์ขนาดความจุ 250 mL และเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (37 %) ปริมาตร 100 mL และกวนให้ยาเม็ดเสริมธาตุเหล็กละลายจนหมด และนำไปปรับปริมาตรในขวดวัดปริมาตร ขนาดความจุ 1,000 mL ด้วยน้ำบริสุทธิ์คุณภาพสูง ก่อนจะนำสารละลายที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์หา ความเข้มข้นของเหล็กในสารละลายด้วยวิธีการตรวจวัดที่พัฒนาขึ้น

8) เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการตรวจวิเคราะห์ของอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นกับวิธี มาตรฐาน (ASTM E 394 - 04) ซึ่งใช้เครื่องมือสเปกโทรโฟโตมิเตอร์เป็นเครื่องมือวิเคราะห์

3.3.2 การใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่และคอมพิวเตอร์แท็บเล็ตในการตรวจวัด

1) ออกแบบชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดเหล็กในน้ำ

ชุดทดสอบของโทรศัพท์เคลื่อนที่และคอมพิวเตอร์แท็บเล็ต (รูปที่ 3.2) มีความ แตกต่างกับชุดทดสอบของกล้องถ่ายรูป (รูปที่ 3.1) เนื่องจากเลนส์สำหรับตัวกล้องใน โทรศัพท์เคลื่อนที่ และคอมพิวเตอร์แท็บเล็ตมีขนาดเล็กกว่าเลนส์ของกล้องดิจิทัลจึงมีการลด ขนาดช่องว่างเลนส์กล้องให้เหลือ 1.00 x 1.00 cm ตามขนาดความกว้างเลนส์กล้องของ โทรศัพท์เคลื่อนที่และคอมพิวเตอร์แท็บเล็ต ถึงแม้ว่า การใช้โปรแกรมสำเร็จรูปที่ติดตั้งบน โทรศัพท์เคลื่อนที่นั้น สามารถวิเคราะห์ค่าความเข้มสี RGB ได้ทันที โดยไม่จำเป็นต้องมีการ ถ่ายภาพเก็บไว้ แต่การวิเคราะห์ความเข้มสี RGB สามารถวิเคราะห์ได้ครั้งละ 1 หลอดเท่านั้น จึง ต้องลดจำนวนหลอดที่จะนำไปวางในชุดทดสอบ ทำให้ขนาดของชุดอุปกรณ์มีขนาดเล็กลงเมื่อ เปรียบเทียบกับชุดทดสอบของกล้องถ่ายรูป

2) ศึกษาสถานะที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาการเกิดสีระหว่าง 1, 10 - ฟีนานโทรีน กับ ไอออนเหล็ก

โดยใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่และคอมพิวเตอร์แท็บเล็ตในการตรวจวัดความเข้มข้น RGB ศึกษาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่

สถานะในการเกิดปฏิกิริยาที่ศึกษา ได้แก่

a) เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา

ศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไอออนของเหล็กกับ สารละลาย 1, 10 - ฟีนานโทรีนต่อความเข้มข้น โดยทำการทดลองที่เวลาต่างกัน ได้แก่ 1, 3, 5, 10, 15, 20 และ 30 นาที

b) ความเข้มข้นของสารละลาย 1, 10 - ฟีนานโทรีน

ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลาย 1, 10 - ฟีนานโทรีนที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาต่อความเข้มข้น โดยทำการทดลองที่ความเข้มข้นที่ต่างกันของสารละลาย 1, 10 - ฟีนานโทรีน ได้แก่ 600, 700, 800, 900 และ 1,000 ppm

c) ความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตตบัฟเฟอร์

ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตตบัฟเฟอร์ที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาต่อความเข้มข้น โดยทำการทดลองที่ความเข้มข้นที่ต่างกันของสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตตบัฟเฟอร์ ได้แก่ 0.15, 0.20, 0.25 และ 0.30 M

d) ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก

ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลาย กรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาต่อความเข้มข้น โดยทำการทดลองที่ความเข้มข้นที่ต่างกันของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ได้แก่ 0, 0.10, 0.20, 0.30 และ 0.40 M

3) กราฟมาตรฐาน (calibration curve)

เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเหล็กเฟอรัส กับค่าความเข้มแสง (intensity) หรือค่าการดูดกลืน (absorbance) โดยทำการศึกษาที่ความเข้มข้นของสารละลายเหล็กเฟอรัสที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ กัน ได้แก่ 0.01, 0.05, 0.10, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 1.00, 2.00, 3.00, 4.00, 5.00, 6.00, 7.00, 8.00, 9.00 และ 10.00 ppm

4) ตรวจสอบสมรรถนะของชุดทดสอบที่พัฒนาขึ้น

โดยพิจารณาจากค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เหมือนกับการทดลองในส่วนของกล้องดิจิทัล ได้แก่ ความถูกต้อง ความเที่ยงตรง ความไวในการวิเคราะห์ ช่วงความเป็นเส้นตรง และความเข้มข้นต่ำสุดที่ตรวจพบได้

5) ผลของไอออนตัวอื่น ๆ ต่อการวิเคราะห์

เป็นการศึกษาผลของไอออนตัวอื่น ๆ ที่มีต่อการตรวจวิเคราะห์โดยทำการศึกษา เช่นเดียวกับการศึกษาในส่วนของกล้องดิจิทัล

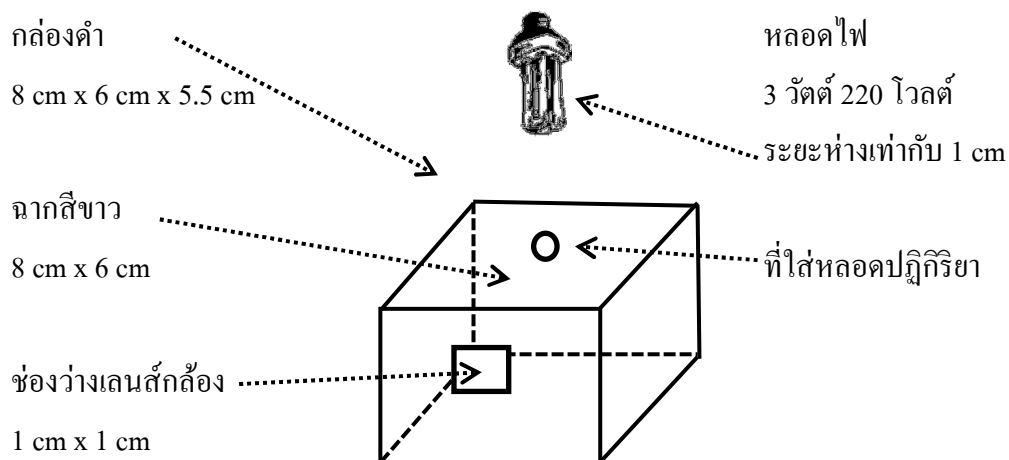
6) ทดสอบอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นกับน้ำตัวอย่างจริง

นำตัวอย่างน้ำที่เก็บจากแหล่งต่าง ๆ มาทดสอบหาปริมาณเหล็กที่ปนเปื้อนในน้ำด้วยวิธีที่พัฒนาขึ้น โดยทำการควบคุมคุณภาพของการวิเคราะห์ด้วยการทำแบลนค์ (blank test) ตลอดจนการทดลอง

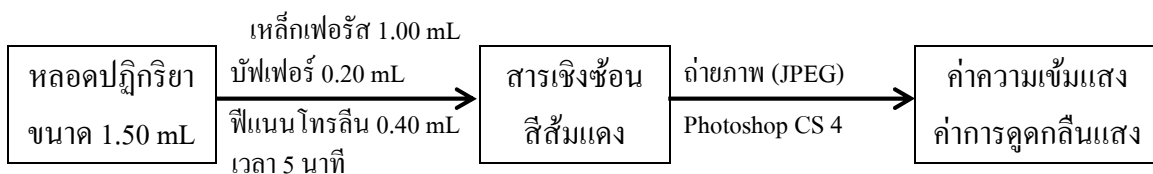
7) ทดสอบอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นกับการวิเคราะห์เหล็กในยาเม็ดเสริมธาตุเหล็ก

ประยุกต์ใช้เทคนิคที่พัฒนาในการวิเคราะห์เหล็กในยาเม็ดเสริมธาตุเหล็กที่วางขายตามท้องตลาดจำนวน 2 ยี่ห้อ

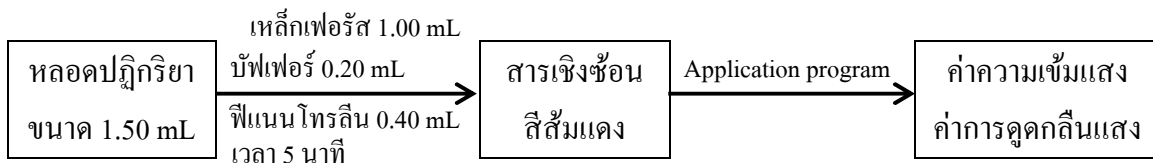
8) เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการตรวจวิเคราะห์ของอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นกับวิธีมาตรฐาน (ASTM E 394 - 04) ซึ่งใช้เครื่องมือสเปกโทรโฟโตมิเตอร์เป็นเครื่องมือวิเคราะห์



รูปที่ 3.2 ชุดทดสอบที่ใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่และคอมพิวเตอร์แท็บเล็ตเป็นตัวตรวจวัดความเข้มแสง



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการทดลองวิเคราะห์ปริมาณเหล็กด้วยวิธีวิเคราะห์ภาพถ่ายจากกล้องดิจิทัล



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการทดลองวิเคราะห์ปริมาณเหล็กด้วยการใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่ และคอมพิวเตอร์แท็บเล็ต

บทที่ 4

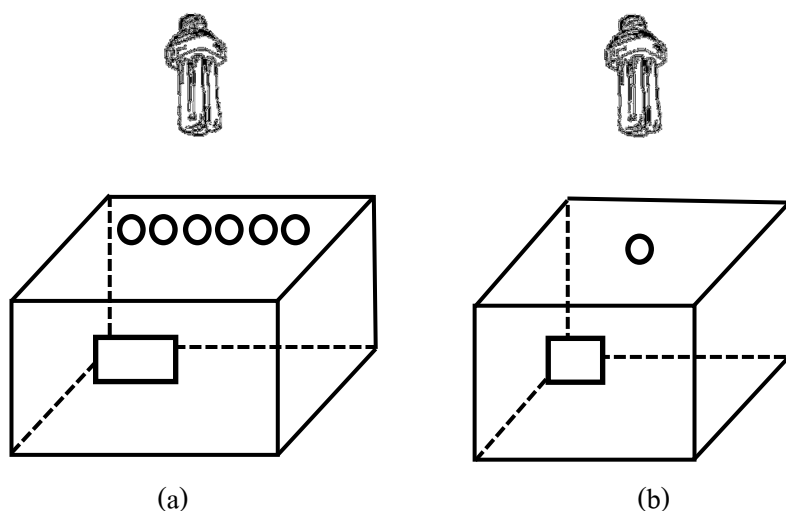
ผลการศึกษา และอภิปรายผล

4.1 การออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดหลัก

เป้าหมายในการออกแบบชุดทดสอบในการตรวจวัดหลักสำหรับการศึกษา คือ ความสะดวกในการนำออกไปใช้งานจริงในภาคสนาม ซึ่งต้องพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ น้ำหนักของชุดทดสอบไม่ควรมีน้ำหนักมาก พกพาได้สะดวก เคลื่อนย้ายได้ง่ายและสามารถลดอิทธิพลของแสงภายนอกที่อาจจะส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนต่อการวิเคราะห์ความเข้มแสงได้ เพราะการนำไปใช้งานจริงในภาคสนาม ถ้าชุดทดสอบหนักหรือมีขนาดใหญ่ ส่งผลให้การเคลื่อนย้ายทำได้ลำบาก ไม่มีความสะดวก ทำให้ชุดทดสอบที่พัฒนาขึ้นไม่สามารถลดข้อจำกัดของเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ชนิดพกพา (portable UV-Vis spectrophotometer) ในการใช้งานภาคสนามได้

ชุดทดสอบที่ใช้กล้องดิจิทัลเป็นตัวตรวจวัดความเข้มแสงประกอบด้วยกล่องป้องกันแสงภายนอก ทำจากพลาสติกแข็งสีดำ มีขนาดกว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 22.00 x 8.00 x 15.00 cm แสดงในรูปที่ 4.1 (a) และชุดทดสอบที่ใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่และคอมพิวเตอร์แท็บเล็ตในการตรวจวัดความเข้มแสง มีขนาด 8.00 x 6.00 x 5.50 cm แสดงในรูปที่ 4.1 (b) ด้านหน้ากล่องมีช่องว่างสำหรับถ่ายภาพมีขนาดเท่ากับขนาดของเลนส์กล้องดิจิทัลหรือมีขนาด 1.50 x 1.50 และ 1.00 x 1.00 cm สำหรับชุดทดสอบที่ใช้กล้องดิจิทัลและโทรศัพท์เคลื่อนที่ ตามลำดับ สำหรับกล่องป้องกันแสงภายนอกจะยึดติดมุมทุกมุมให้มิดชิดด้วยเทปกาวสีดำ เพื่อป้องกันไม่ให้แสงภายนอกส่องผ่านเข้าไปในตัวกล่อง ซึ่งอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนต่อการวิเคราะห์ความเข้มแสงได้

แหล่งกำเนิดแสงใช้หลอดไฟ ยี่ห้อ พานาโซนิค ชนิดตะเกียบ ขนาด 3 วัตต์ 220 โวลต์ ต่อพ่วงกับสวิตช์ที่ทำหน้าที่ปิด-เปิด ใช้กล้องดิจิทัลในการถ่ายภาพ ยี่ห้อ SONY รุ่น DSC WX 7 ขนาดความละเอียด 16.2 ล้านพิกเซล เซนเซอร์รับภาพชนิดซีมอส (complementary metal oxide semiconductor, CMOS) โทรศัพท์เคลื่อนที่ใช้ในการวัดความเข้มแสง รุ่น Samsung Galaxy S 2 และรุ่น iPhone 5 และคอมพิวเตอร์แท็บเล็ต รุ่น iPad 3 ซึ่งมีเซนเซอร์รับภาพชนิดบีเอสไอซีมอส (backside illumination complementary metal oxide semiconductor, BSI CMOS)



รูปที่ 4.1 แผนภาพชุดทดสอบที่ออกแบบ (a) ชุดทดสอบที่ใช้กล้องดิจิทัลในการตรวจวัดความเข้มแสง RGB (b) ชุดทดสอบที่ใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่และคอมพิวเตอร์แท็บเล็ตในการตรวจวัดความเข้มแสง RGB

4.2 อิทธิพลของแสงภายนอก

ชุดทดสอบที่ออกแบบขึ้นจำเป็นต้องทดสอบถึงความสามารถในการป้องกันอิทธิพลของแสงภายนอกที่มีต่อค่าความเข้มแสงและค่าการดูดกลืนแสง RGB โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่าง 2 สถานะ คือ สถานะที่ไม่มีแสงภายนอกรบกวน (ทดลองในห้องมืด) และสถานะที่มีแสงภายนอกรบกวน (ทดลองในห้องสว่าง) การศึกษานี้ใช้หลอดหมุนเหวี่ยงปริมาตรความจุ 1.50 mL เป็นหลอดสำหรับทำปฏิกิริยา เติมสารละลายเหล็กเฟอรัสความเข้มข้น 2.00 ppm ปริมาตร 1.00 mL สารละลายแอมโมเนียมอะซิเตตบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.30 M ปริมาตร 0.20 mL สารละลาย 1, 10 - ฟีนานโทรีน ความเข้มข้น 1,000 ppm ปริมาตร 0.40 mL เขย่าให้เข้ากัน นำไปวิเคราะห์ค่าความเข้มแสง RGB ที่เวลา 5 - 10 นาที และนำความเข้มสีที่ได้ไปคำนวณหาค่าการดูดกลืนแสงของแสง RGB โดยใช้สมการที่ 4.1 เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า การนำค่าความเข้มแสงไปใช้ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณมีความไวในการวิเคราะห์ไม่สูง จำเป็นต้องคำนวณเปลี่ยนความเข้มแสง RGB ไปเป็นค่าการดูดกลืนแสง RGB เพื่อให้ความไวในการวิเคราะห์รวมถึงสมรรถนะอื่น ๆ ดีขึ้นกว่าการนำความเข้มแสงไปใช้งานวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Choodum and Nic Daeid, 2011)

$$A_x = -\log(I_x / I_w) \quad (4.1)$$

โดยที่

A_x = ค่าการดูดกลืนแสง RGB

I_x = ค่าความเข้มแสง RGB (0-255)

I_w = ค่าความเข้มแสงขาว (255)

ความเข้มแสงและค่าการดูดกลืนแสง RGB ที่วิเคราะห์ได้จากภาพถ่ายนำมาคำนวณร้อยละความแตกต่างของความเข้มแสงและค่าการดูดกลืนแสงระหว่างสถานะที่มีแสงภายนอกครบถ้วนกับสถานะที่ไม่มีแสงภายนอกครบถ้วน ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่า ค่าความเข้มแสง RGB มีร้อยละความแตกต่างระหว่าง 2 สถานะ เท่ากับ 0.13, 0.56 และ 2.04 (Sony DSC WX 7) 0.34, 0.46 และ 2.02 (Samsung Galaxy S 2) 0.15, 0.57 และ 2.51 (iPhone 5) และ 0.26, 0.62 และ 1.67 (iPad 3)

ตารางที่ 4.1 ร้อยละความแตกต่างของความเข้มแสงและการดูดกลืนแสงที่ได้จากอุปกรณ์ถ่ายภาพชนิดต่าง ๆ ในสถานะที่มีแสงและไม่มีแสงภายนอกครบถ้วน

Parameters	ร้อยละความแตกต่าง (% difference)			
	Sony DSC WX 7	Samsung Galaxy S 2	iPhone 5	iPad 3
I_R	0.13	0.34	0.15	0.26
I_G	0.56	0.46	0.57	0.62
I_B	2.04	2.02	2.51	1.67
A_R	0.04	0.06	0.08	0.05
A_G	0.56	0.67	0.69	0.74
A_B	2.14	2.24	2.04	1.89

$$\% \text{ difference} = [(I_{\text{มืด}} - I_{\text{สว่าง}}) / I_{\text{มืด}}] \times 100$$

$I_{\text{มืด}}$ = ความเข้มแสงสี RGB ในสถานะไม่มีแสงภายนอกครบถ้วน

$I_{\text{สว่าง}}$ = ความเข้มแสงสี RGB ในสถานะที่มีแสงภายนอกครบถ้วน

สำหรับค่าการดูดกลืนแสง RGB มีร้อยละความแตกต่างระหว่าง 2 สภาวะเท่ากับ 0.04, 0.56 และ 2.14 (Sony DSC WX 7) 0.06, 0.67 และ 2.24 (Samsung Galaxy S 2) 0.08, 0.69 และ 2.04 (iPhone 5) และ 0.05, 0.74 และ 1.89 (iPad 3) และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างประชากรสองกลุ่ม ($n = 36$) พบว่า ค่าเฉลี่ยของความเข้มแสง RGB ระหว่าง 2 สภาวะไม่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($p < 0.05$) และให้ผลในทำนองเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสง RGB จึงสรุปว่าชุดทดสอบที่ได้ออกแบบสามารถป้องกันอิทธิพลของแสงภายนอกที่มีต่อความเข้มแสงและค่าการดูดกลืนแสง RGB และนำไปใช้งานในการตรวจวิเคราะห์เหล็กภายนอกห้องปฏิบัติการได้

4.3 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไอออนของเหล็กเฟอรัส กับ 1, 10 - ฟิแนนโทรีน เพื่อให้ได้สภาวะที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการเกิดสีนั้นมีความเข้มสีสูงสุด ซึ่งนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจวัดให้สูงสุด โดยสภาวะที่เหมาะสมของปฏิกิริยาที่ทำการศึกษา ได้แก่

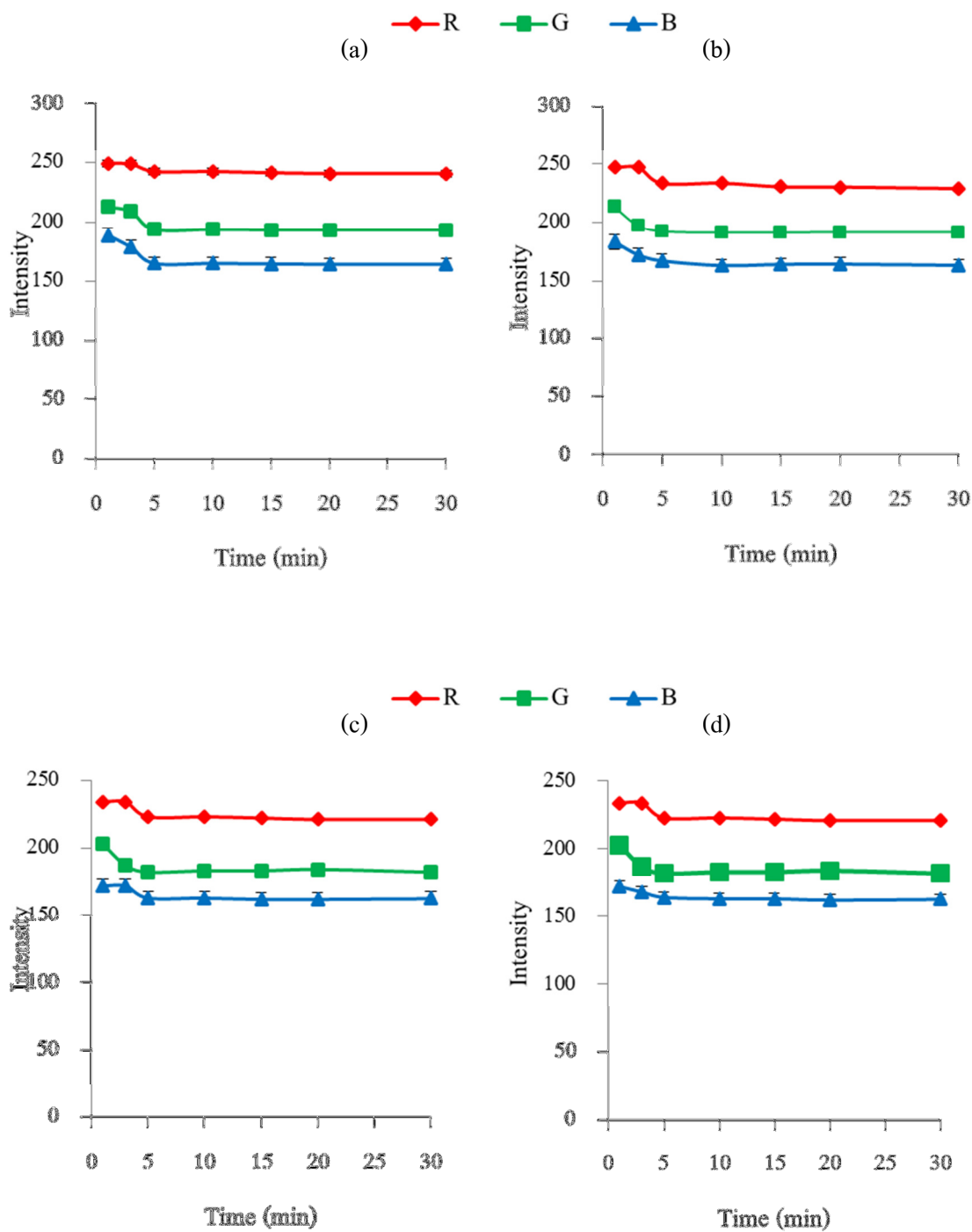
4.3.1 เวลาที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา

การศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยานั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของเวลาที่มีต่อเสถียรภาพของสารเชิงซ้อนที่ได้จากปฏิกิริยาการเกิดสี โดยจากการศึกษาผลของเวลาตั้งแต่ 1 - 30 นาที ในหลอดปฏิกิริยาขนาดความจุ 1.50 mL จำนวน 6 หลอด ซึ่งเติมสารละลายเหล็กเฟอรัส ความเข้มข้น 2.00 ppm ปริมาตร 1.00 mL สารละลายแอมโมเนียมอะซิเตตบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.30 M ปริมาตร 0.20 mL และสารละลาย 1, 10 - ฟิแนนโทรีน ความเข้มข้น 1,000 ppm ปริมาตร 0.40 mL ลงในหลอดปฏิกิริยาทั้ง 6 หลอด ปิดฝาแล้วเขย่าให้เข้ากัน ก่อนนำไปวางลงในชุดทดสอบ

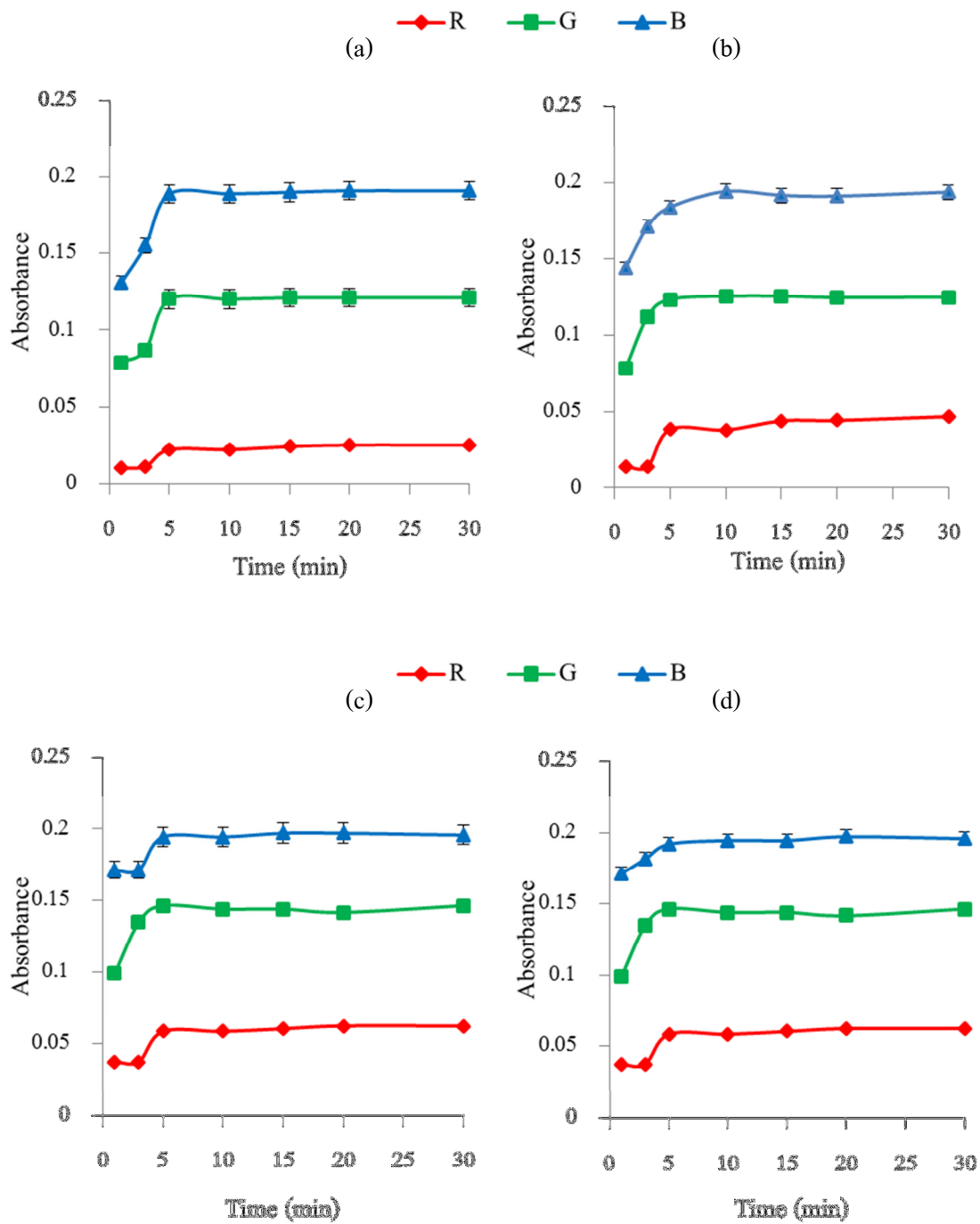
การศึกษาที่ใช้กล้องดิจิทัลเป็นตัวตรวจวัดความเข้มแสง RGB ใช้การถ่ายภาพหลอดปฏิกิริยาที่อยู่ภายในชุดทดสอบ ทำซ้ำ 6 ครั้งทุก ๆ เวลาที่ใช้ในการศึกษา โหมดการถ่ายภาพใช้โหมดอัตโนมัติอัจฉริยะ (intelligent auto mode) ฟิลล์ภาพเป็นชนิด JPEG ภาพที่ได้ทั้งหมดนำไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มแสง RGB ของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น โดยใช้โปรแกรม Adobe Photoshop CS 4 การศึกษาที่ใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่และคอมพิวเตอร์แท็บเล็ตในการตรวจวัดความเข้มแสง RGB จะใช้โปรแกรมสำเร็จรูป (application) ในการตรวจวิเคราะห์ความเข้มแสง RGB ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่าทุกอุปกรณ์ถ่ายภาพให้ผลการศึกษาสอดคล้องกัน กล่าวคือความเข้ม

แสง RGB มีค่ามากที่สุดที่เวลา 1 นาที และลดลงในช่วงเวลา 1 - 5 นาที หลังจากนั้นคงที่จนถึงเวลา 30 นาที เนื่องจากผลิตภัณฑ์เกิดความเสถียร และพบว่าความเข้มแสงสีแดงมีค่ามากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแสงสีเขียวและสีน้ำเงิน เนื่องจากสารเชิงซ้อนซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์มีสีส้มแดงทำให้แสงที่สะท้อนออกมามากที่สุด คือ แสงสีแดง ขณะที่แสงสีน้ำเงินมีความเข้มแสงน้อยที่สุดหรือถูกดูดกลืนมากที่สุด เนื่องจากแสงสีน้ำเงินเป็นแสงองค์ประกอบ (compliment color) ของแสงสีส้มแดง แสดงดังรูปที่ 4.4

ข้อมูลความเข้มแสง RGB ที่วิเคราะห์ได้จากภาพถ่ายนำมาคำนวณค่าการดูดกลืนแสง RGB โดยใช้สมการที่ 4.1 ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 4.3 พบว่า การดูดกลืนแสงสีน้ำเงินมีค่ามากที่สุดในทุกช่วงเวลาที่ทำการทดลองและให้ผลเหมือนกันในทุกอุปกรณ์ถ่ายภาพ และการดูดกลืนแสง RGB เพิ่มขึ้นในช่วงเวลา 1 - 5 นาทีและคงที่ในช่วงเวลา 5 - 30 นาทีสอดคล้องกับความเข้มแสง RGB ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเวลาที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาซึ่งทำให้สีของผลิตภัณฑ์มีความเสถียรมากที่สุด คือ 5 นาที เพราะที่เวลา 5 นาทีการดูดกลืนแสง RGB ไม่แตกต่างกับการดูดกลืนแสง RGB ที่ช่วงเวลา 10 - 30 นาที สอดคล้องกับวิธีมาตรฐานซึ่งกำหนดให้เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเหล็กเฟอร์สกับ 1, 10 - พีแนนโทรลินอยู่ในช่วง 5 - 10 นาที เพื่อให้สารเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นมีเสถียรภาพสูงที่สุดก่อนนำไปสู่ขั้นตอนการตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Shyla, *et al.* 2012)



รูปที่ 4.2 ผลของเวลาในการเกิดปฏิกิริยาต่อความเข้มแสงของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอุปกรณ์ถ่ายภาพ
 (a) Sony DSC WX 7 (b) Samsung Galaxy S 2 (c) iPhone 5 และ (d) iPad 3



รูปที่ 4.3 ผลของเวลาในการเกิดปฏิกิริยาต่อค่าการดูดกลืนแสงของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอุปกรณ์ถ่ายภาพ (a) Sony DSC WX 7 (b) Samsung Galaxy S 2 (c) iPhone 5 และ (d) iPad 3



รูปที่ 4.4 แผนภาพสีองค์ประกอบ (complimentary diagram)

4.3.2 ความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลาย 1, 10 - ฟิแนนโทรลีน

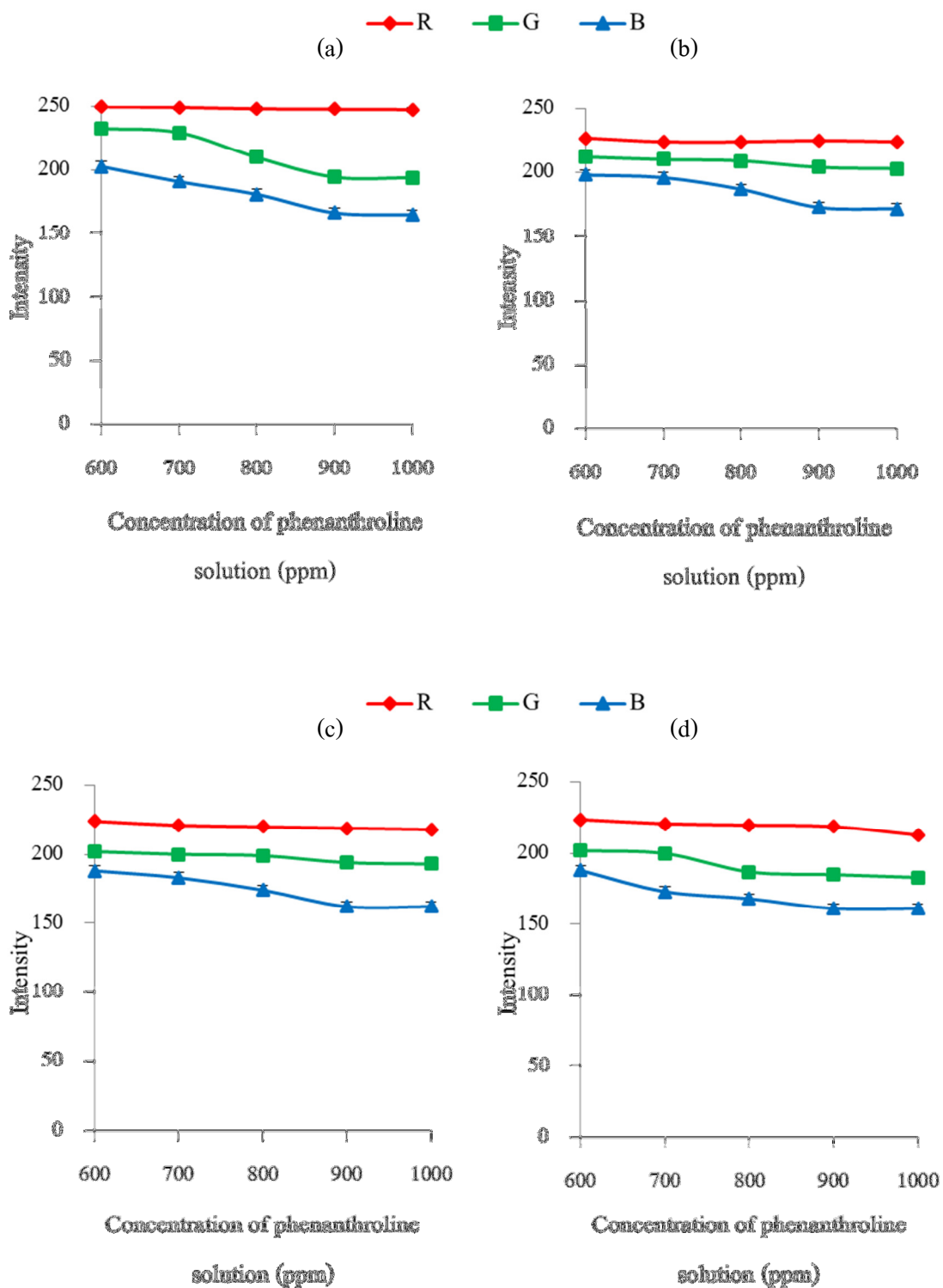
ฟิแนน โทรลีนเป็นสารที่เข้าทำปฏิกิริยากับไอออนของเหล็กโดยตรงเพื่อสร้างสารเชิงซ้อนที่มีสี ดังนั้นปริมาณสารฟิแนน โทรลีนจึงส่งผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์และความเข้มสีที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณเหล็กด้วยวิธี 1, 10 - ฟิแนนโทรลีน ส่วนใหญ่เป็นค่าใช้จ่ายที่มาจากราคาของ 1, 10 - ฟิแนนโทรลีนโมโนไฮเดรต ซึ่งเป็นสารเคมีที่มีราคาสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับสารเคมีตัวอื่นที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการศึกษหาปริมาณฟิแนน โทรลีนที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์

สำหรับการศึกษาจะคงที่สารละลายเหล็กเฟอร์รัสที่ความเข้มข้น 2.00 ppm ปริมาตร 1.00 mL และสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตตบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.30 M ปริมาตร 0.20 mL และทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลาย 1, 10 - ฟิแนน โทรลีนในช่วง 600 - 1,000 ppm ต่อความเข้มแสง RGB ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย 1, 10 - ฟิแนน โทรลีนจาก 600 - 1,000 ppm ทำให้ความเข้มแสงสีเขียวและสีน้ำเงินลดลง เพราะปริมาณสารตั้งต้นในปฏิกิริยา (1, 10 - ฟิแนน โทรลีน) มีมากขึ้นทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยามีจำนวนเพิ่มมากขึ้น ขณะที่แสงสีแดงมีความเข้มแสงคงที่ เนื่องจากสีของผลิตภัณฑ์ที่มีสีส้มแดง แสงสีแดงจึงเป็นแสงที่สะท้อนออกมามากที่สุด การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงสีแดงต่อความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์จึงมีค่าต่ำ

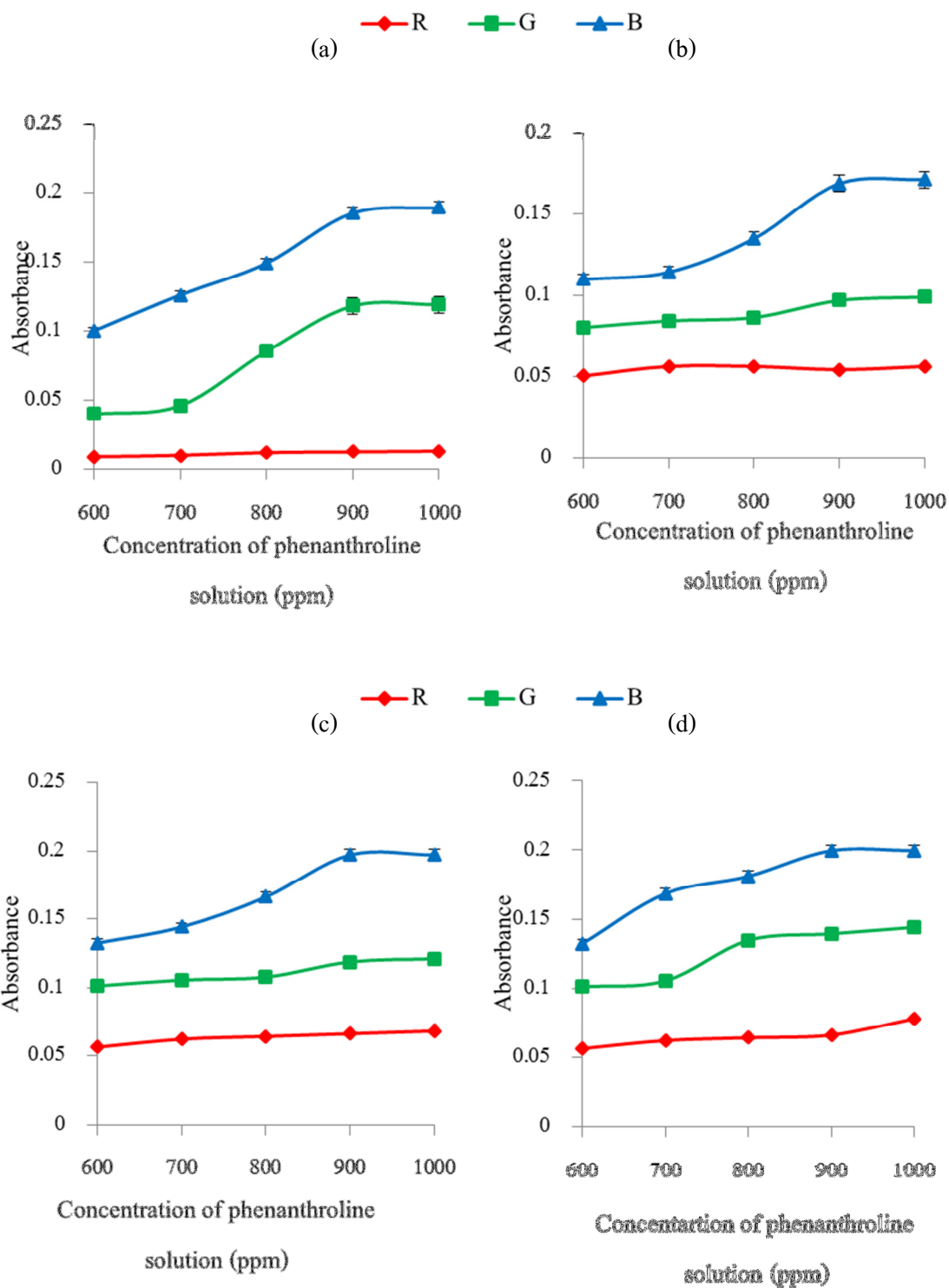
จากรูปที่ 4.6 พบว่า การดูดกลืนแสงสีเขียวและสีน้ำเงินจะเพิ่มขึ้นในช่วงความเข้มข้นของสารละลาย 1, 10 - ฟิแนน โทรลีน 600 - 900 ppm เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของฟิแนน โทรลีนโอกาสในการเข้าทำปฏิกิริยาเกิดเป็นสารเชิงซ้อนจึงมากขึ้น แต่ในช่วงความเข้มข้น 900 - 1,000

ppm พบว่า ค่าการดูดกลืนแสงสีเขียวและน้ำเงินเริ่มคงที่ เพราะปริมาณฟิแนนโทรลีนมีปริมาณที่มากเกินพอ

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างประชากร 2 กลุ่ม ($n = 36$) ของความเข้มแสง RGB ระหว่างความเข้มข้นที่ 900 ppm และ 1,000 ppm พบว่า ค่าเฉลี่ยของความเข้มแสง RGB ระหว่าง 2 ความเข้มข้น ไม่มีความแตกต่างอย่างนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($p < 0.05$) และให้ผลในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาในเทอมของค่าการดูดกลืนแสงในทุกอุปกรณ์ถ่ายภาพโดยมีค่าร้อยละความแตกต่างระหว่างความเข้มแสง RGB ของทั้ง 2 ความเข้มข้น ได้แก่ 0.44 - 0.92 (สีแดง) 0.49 - 1.09 (สีเขียว) และ 0.58 - 0.63 (สีน้ำเงิน) และมีค่าร้อยละความแตกต่างระหว่างค่าการดูดกลืนแสง RGB ของทั้ง 2 ความเข้มข้น ได้แก่ 2.96 - 5.82 (สีแดง) 1.85 - 3.27 (สีเขียว) และ 1.33 - 1.47 (สีน้ำเงิน) ซึ่งไม่ได้แตกต่างกันมาก ดังนั้นเพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายได้ความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลาย 1, 10 - ฟิแนนโทรลีน จึงถูกเลือกใช้ที่ 900 ppm ในทุกอุปกรณ์ถ่ายภาพ



รูปที่ 4.5 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย 1, 10 - พีแนนโทรลีนต่อความเข้มแสงของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอุปกรณ์ถ่ายภาพ (a) Sony DSC WX 7 (b) Samsung Galaxy S 2 (c) iPhone 5 และ (d) iPad 3



รูปที่ 4.6 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย 1, 10 - พีแนนโทรลีนต่อการดูดกลืนแสงของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอุปกรณ์ถ่ายภาพ (a) Sony DSC WX 7 (b) Samsung Galaxy S 2 (c) iPhone 5 และ (d) iPad 3

4.3.3 ความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตตบัฟเฟอร์

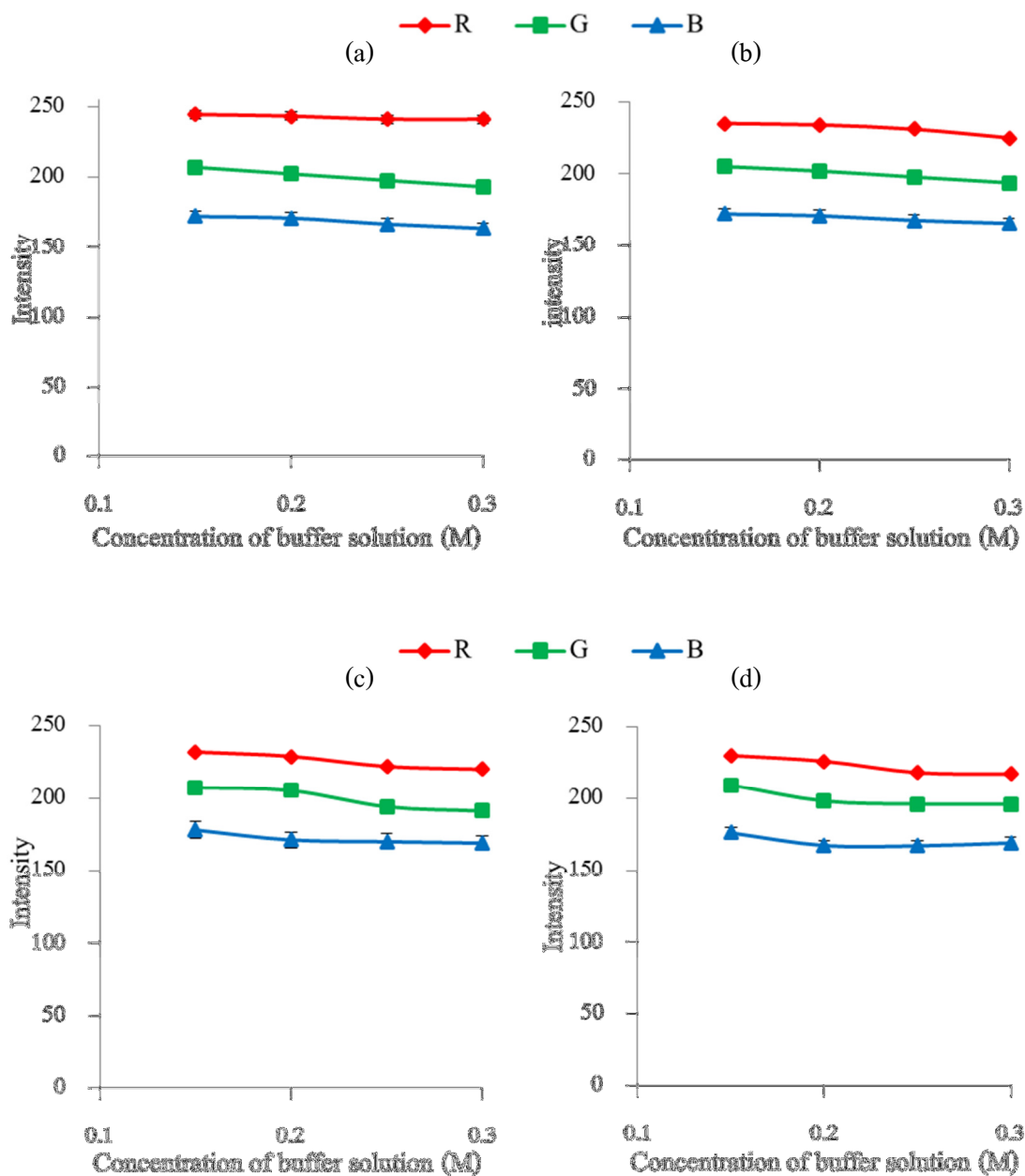
ในปฏิกิริยาการเกิดสีระหว่างเหล็กกับ 1, 10 - ฟิแนนโทรลีน ค่า pH มีผลต่อปริมาณและเสถียรภาพของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา (Harris, 2003) จึงจำเป็นต้องมีการเติมบัฟเฟอร์ เข้าไปในระบบเพื่อรักษาระดับ pH ของสารละลายไม่ให้เปลี่ยนแปลงมากจนเกินไป ซึ่งจะช่วยให้ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์คงที่ ทำให้การตรวจวัดมีความแม่นยำมากขึ้น

การศึกษาในส่วนนี้ใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 5 นาที ความเข้มข้นของสารละลาย 1, 10 - ฟิแนนโทรลีน 900 ppm และความเข้มข้นของสารละลายเหล็กเฟอร์รัส 2.00 ppm โดยจะทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตตบัฟเฟอร์ ในช่วงความเข้มข้น 0.15 - 0.30 M

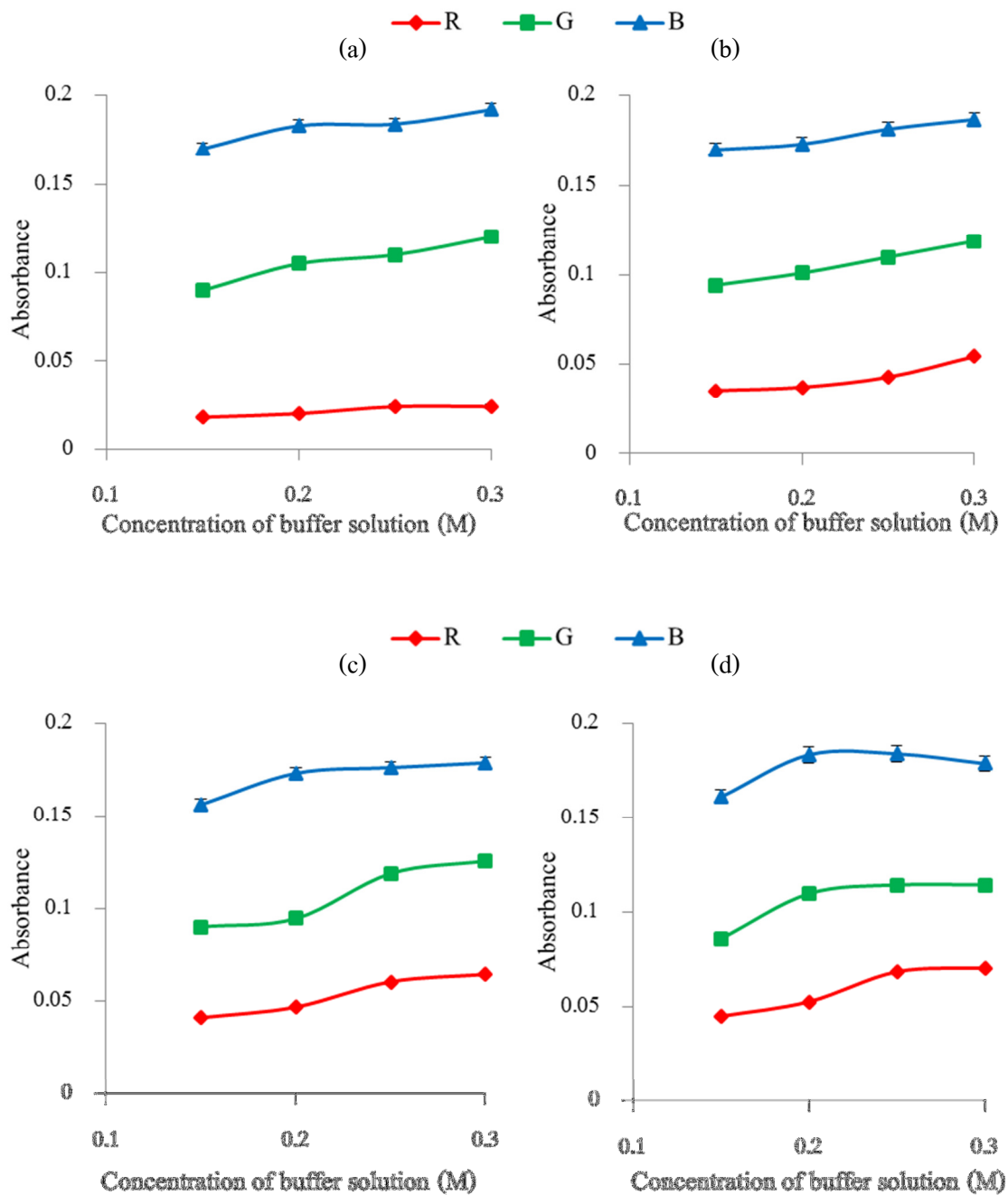
จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตตบัฟเฟอร์ และความเข้มแสงสี RGB แสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่า ความเข้มแสง RGB จะเพิ่มขึ้นตามสีของผลิตภัณฑ์ที่เข้มข้นในช่วงความเข้มข้น 0.15 - 0.30 M เนื่องจากบัฟเฟอร์ที่เติมเข้าไปในระบบช่วยรักษาระดับ pH ให้อยู่ในช่วงที่ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีเสถียรภาพมากที่สุด และให้ผลที่สอดคล้องกับการพิจารณาค่าการดูดกลืนแสง RGB ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งพบว่า ความเข้มข้นของบัฟเฟอร์ที่เพิ่มขึ้นทำให้การดูดกลืนแสงของผลิตภัณฑ์มีค่าสูงขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างประชากรสองกลุ่ม ($n = 36$) ระหว่างความเข้มแสง RGB ที่ความเข้มข้น 0.30 M และความเข้มแสง RGB ที่ความเข้มข้น 0.15 M 0.20 M และ 0.25 M พบว่า ที่ความเข้มข้น 0.15 M มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($p > 0.05$) ขณะที่ความเข้มข้น 0.20 M และ 0.25 M พบว่า มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($p < 0.05$) โดยมีค่าร้อยละความแตกต่างระหว่างความเข้มแสง RGB ที่ความเข้มข้น 0.20 และ 0.30 M ได้แก่ 0.43 - 0.46 (สีแดง) 0.55 - 0.58 (สีเขียว) และ 0.78 - 1.31 (สีน้ำเงิน) และมีค่าร้อยละความแตกต่างระหว่างค่าการดูดกลืนแสง RGB ได้แก่ 2.86 - 4.55 (สีแดง) 1.98 - 2.23 (สีเขียว) และ 1.92 - 3.16 (สีน้ำเงิน) และมีร้อยละความแตกต่างระหว่างความเข้มแสง RGB ที่ความเข้มข้น 0.25 และ 0.30 M ได้แก่ 0.32 - 0.44 (สีแดง) 0.45 - 0.57 (สีเขียว) และ 0.67 - 1.21 (สีน้ำเงิน) และมีค่าร้อยละความแตกต่างระหว่างค่าการดูดกลืนแสงสี RGB ได้แก่ 2.46 - 3.25 (สีแดง) 1.78 - 2.03 (สีเขียว) และ 1.42 - 3.03 (สีน้ำเงิน) ซึ่งมีค่าไม่ได้แตกต่างกันมาก เนื่องจาก pH ในหลอดปฏิกิริยาในการศึกษาที่ใช้สารละลายแอมโมเนียมอะซิเตตบัฟเฟอร์ 0.20 และ 0.25 M พบว่า มีค่าเท่ากับ 3.25 และ 3.22 ตามลำดับ ซึ่งเป็น pH ที่สารเชิงซ้อนจะมีเสถียรภาพมากที่สุดสอดคล้องกับวิธีมาตรฐานที่มีค่า pH อยู่ในช่วง 3.20 - 3.30 (Tarafder and Thakur, 2012) ดังนั้นเพื่อเป็นการลด

ค่าใช้จ่ายในการนำไปใช้งานจริงความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตตบัฟเฟอร์จึงถูกเลือกใช้ที่ 0.20 M ในทุกอุปกรณ์ถ่ายภาพ



รูปที่ 4.7 ผลของความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตตบัฟเฟอร์ต่อค่าความเข้มแสงของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอุปกรณ์ถ่ายภาพ (a) Sony DSC WX 7 (b) Samsung Galaxy S 2 (c) iPhone 5 และ (d) iPad 3

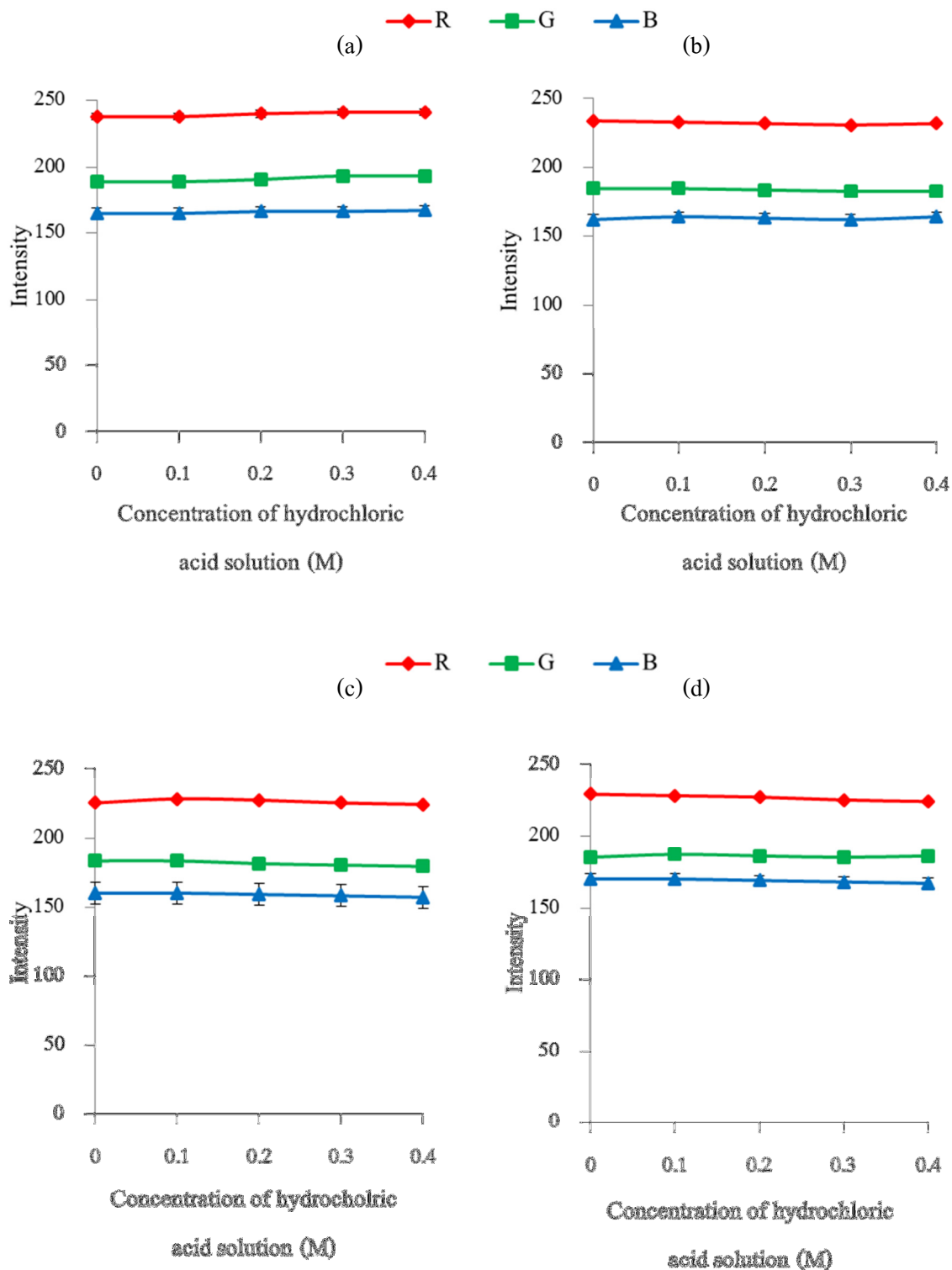


รูปที่ 4.8 ผลของความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตตบัฟเฟอร์ต่อค่าการดูดกลืนแสงของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอุปกรณ์ถ่ายภาพ (a) Sony DSC WX 7 (b) Samsung Galaxy S 2 (c) iPhone 5 และ (d) iPad 3

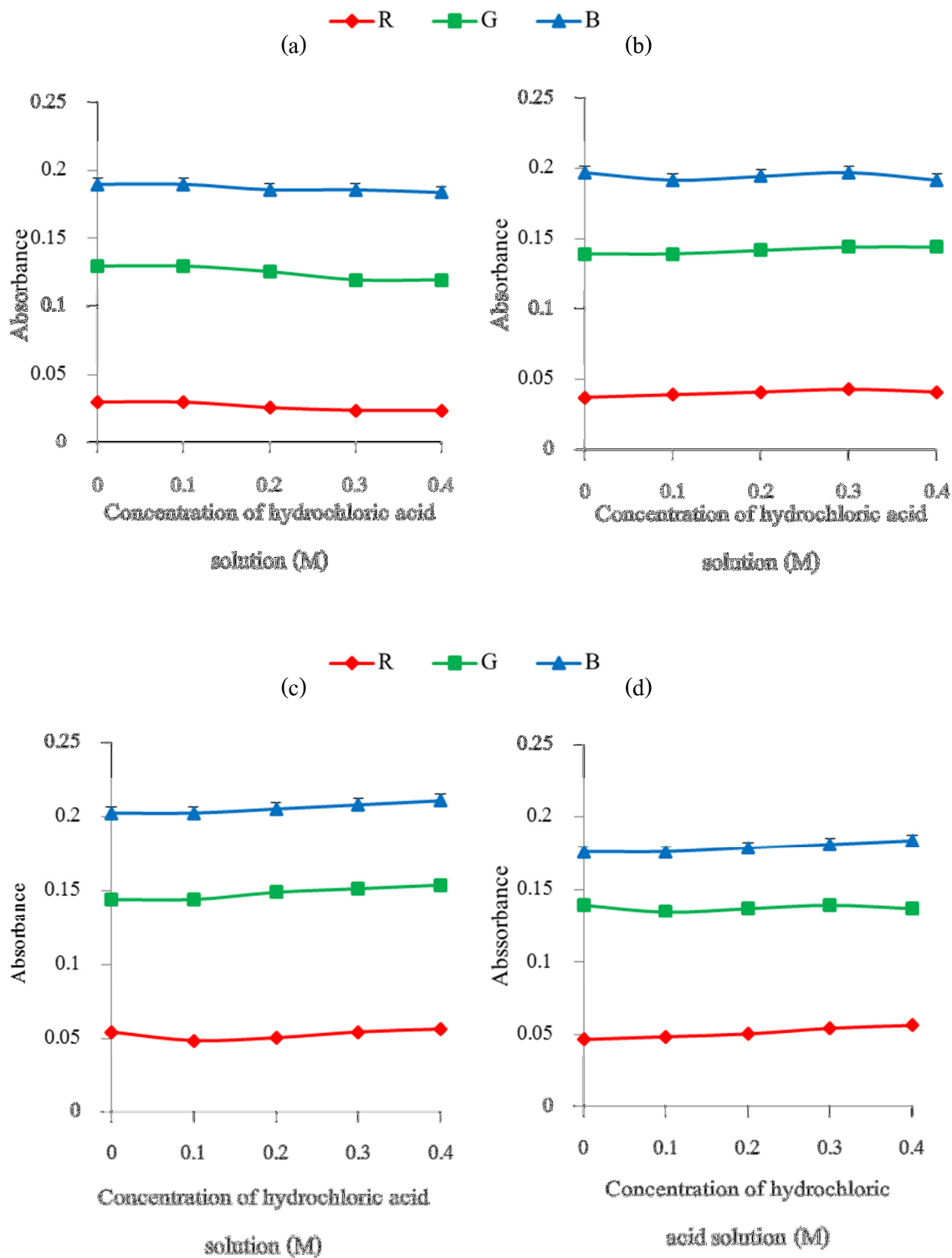
4.3.4 ความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.3.3 ว่าช่วงของ pH ที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาระหว่างไอออนของเหล็กกับ 1, 10 - ฟิแนนโทรีนคือช่วง pH ระหว่าง 3.20 - 3.30 ซึ่งเป็นช่วง pH ที่ทำให้สารเชิงซ้อนมีเสถียรภาพมากที่สุด โดยการปรับค่า pH นั้น โดยทั่วไปจะใช้กรดไฮโดรคลอริกในการปรับ pH ซึ่งในการศึกษานี้ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ คือ 0 - 0.40 M ใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 5 นาที ความเข้มข้นของสารละลาย 1, 10 - ฟิแนนโทรีน 900 ppm ความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตตบัฟเฟอร์ 0.20 M และคงที่ความเข้มข้นของสารละลายเหล็กเฟอรัสที่ความเข้มข้น 2.00 ppm ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10 พบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกไม่ส่งผลต่อความเข้มสีและค่าการดูดกลืนแสง RGB ตลอดช่วงความเข้มข้นของกรดที่ศึกษาและเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างค่าเฉลี่ยของความเข้มแสง RGB ที่แต่ละความเข้มข้นกับความเข้มแสง RGB ของสถานะที่ไม่ได้มีการเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (0 M) พบว่า ค่าความเข้มแสง RGB ของทุกความเข้มข้นไม่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % และให้ผลทำนองเดียวกันกับค่าการดูดกลืนแสง RGB

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้าไปในระบบไม่ได้มีผลต่อความเข้มแสง RGB เนื่องจากการเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเพิ่มเติมเข้าไปไม่ทำให้ค่า pH เปลี่ยนแปลงไปมากนัก และค่า pH ยังคงอยู่ในช่วง 3.20 - 3.30 แม้จะไม่ได้มีการเติมกรดลงไป ดังนั้นความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่เหมาะสม คือ 0 M หรือไม่มีการเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกลงไปในตัวอย่างนั่นเอง



รูปที่ 4.9 ผลของความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกต่อค่าความเข้มแสงของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอุปกรณ์ถ่ายภาพ (a) Sony DSC WX 7 (b) Samsung Galaxy S 2 (c) iPhone 5 และ (d) iPad 3



รูปที่ 4.10 ผลของความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกต่อค่าการดูดกลืนแสงของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอุปกรณ์ถ่ายภาพ (a) Sony DSC WX 7 (b) Samsung Galaxy S 2 (c) iPhone 5 และ (d) iPad 3

จากผลการศึกษาเปรียบเทียบอุปกรณ์ถ่ายภาพชนิดต่าง ๆ ในการกำหนดสภาวะที่เหมาะสมของปฏิกิริยาการเกิดสี (สรุปดังตารางที่ 4.2) พบว่า แต่ละชนิดของอุปกรณ์ถ่ายภาพให้สภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาเดียวกัน คือ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 5 นาที ความเข้มข้นของสารละลาย 1, 10 - ฟีนแอนโทโรลีน 900 ppm ความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตตบัฟเฟอร์ 0.20 M ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0 M และ pH ในหลอดปฏิกิริยาเท่ากับ 3.25

ดังนั้นการศึกษาดังกล่าวได้แก่ การสร้างกราฟมาตรฐาน (calibration curve) ทดสอบสมรรถนะของวิธีตรวจวัด (system performance) และการนำไปใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณเหล็กในแหล่งน้ำในจังหวัดภูเก็ตจะนำสภาวะในการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวมาใช้ในการศึกษา

ตารางที่ 4.2 สภาวะเหมาะสมที่ใช้ในการทดลองในวิธีที่พัฒนาขึ้นและวิธีมาตรฐาน

Methods	Phenanthroline (ppm)	Buffer (M)	HCl (M)	pH	Reaction time (min)
Digital camera	900	0.20	0	3.25	5
Samsung Galaxy S 2	900	0.20	0	3.25	5
iPhone 5	900	0.20	0	3.25	5
iPad 3	900	0.20	0	3.25	5
UV - Vis*	900	0.20	0	3.25	5
UV - Vis**	1,000	0.20	0	3.20	5-10

* ใช้สภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสี
** ใช้สภาวะจากวิธีมาตรฐานในการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสี

4.4 กราฟมาตรฐาน

การสร้างกราฟมาตรฐานเป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสง และค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของเหล็กในสารละลาย เพื่อให้ได้ช่วงความเป็นเส้นตรงที่สามารถนำไปใช้งานในการวิเคราะห์ได้ และได้ความสัมพันธ์ในรูปสมการเส้นตรงอย่างง่าย เพื่อนำไปใช้งานด้านการวิเคราะห์เชิงปริมาณได้

สำหรับการศึกษาในส่วนนี้จะใช้ช่วงความเข้มข้นของสารละลายเหล็กตั้งแต่ 0.01 - 10.00 ppm และใช้สภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาจากตารางที่ 4.1 ผลที่ได้แสดงดังในรูปที่ 4.11 พบว่า ความเข้มแสง RGB แปรผกผันกับความเข้มข้นของเหล็กในสารละลาย เนื่องจากผลิตภัณฑ์มีปริมาณมากขึ้น สีของผลิตภัณฑ์จึงเข้มขึ้น ส่งผลให้การสะท้อนแสง RGB ลดลง และพบว่า ช่วงความเป็นเส้นตรงมี 2 ช่วง เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาการเกิดสี มีสีของสารละลายที่แตกต่างกัน โดยช่วงความเข้มข้นที่มากกว่า 0.50 ppm เป็นต้นไป สีของผลิตภัณฑ์ในหลอดปฏิกิริยาเริ่มมีสีส้มแดงที่เข้มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึง 10.00 ppm ทำให้สะท้อนสีแดงได้มากกว่าสีเขียวและน้ำเงิน และช่วงความเข้มข้นระหว่าง 0.01 - 0.50 ppm สีของผลิตภัณฑ์ในสารละลายมีสีที่จางกว่าสีของผลิตภัณฑ์ในช่วงความเข้มข้น 0.50 - 10.00 ppm เพราะผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีจำนวนน้อยกว่า ทำให้สะท้อนสีแดงได้น้อยลงและทำให้มีความเข้มสีที่ใกล้เคียงกับสีเขียวและน้ำเงิน

สำหรับช่วงความเข้มข้นของสารละลายเหล็กที่ต่ำกว่า 0.50 ppm นั้นพบว่า ความสัมพันธ์ของค่าความเข้มแสง RGB กับค่าความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก มีค่าสหสัมพันธ์เชิงปริมาณ (R^2) เท่ากับ 0.9933, 0.9954 และ 0.9976 ตามลำดับ ซึ่งครอบคลุมความเข้มข้นต่ำสุดของเหล็กในน้ำที่ US EPA กำหนดไว้ที่ความเข้มข้น 0.30 ppm อย่างไรก็ตาม การนำค่าการดูดกลืนแสง RGB ไปใช้ในการวิเคราะห์จะให้ความไวในการวิเคราะห์ (sensitivity) ที่ดีกว่าการนำค่าความเข้มแสง RGB ไปใช้ในการวิเคราะห์ ดังนั้นต้องคำนวณเปลี่ยนค่าความเข้มแสง RGB ให้เป็นค่าการดูดกลืนแสง RGB (Choodum and Nic Daeid, 2011) ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.12

จากรูปที่ 4.12 พบว่า ความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงสีน้ำเงินและเขียวกับความเข้มข้นของสารละลายเหล็กในช่วงความเข้มข้นระหว่าง 0.01 - 0.50 ppm มีค่าสหสัมพันธ์เชิงปริมาณ (R^2) เท่ากับ 0.9914 และ 0.9910 มีสมการเส้นตรงดังแสดงในสมการที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ แต่ช่วงความเป็นเส้นตรงค่อนข้างแคบ การนำไปใช้วิเคราะห์จึงมีความไม่สะดวก เนื่องจากอาจต้องมีการเจือจางหลายครั้งเมื่อนำไปวัดน้ำตัวอย่างที่มีเหล็กละลายอยู่ในปริมาณมากกว่า 0.50 ppm

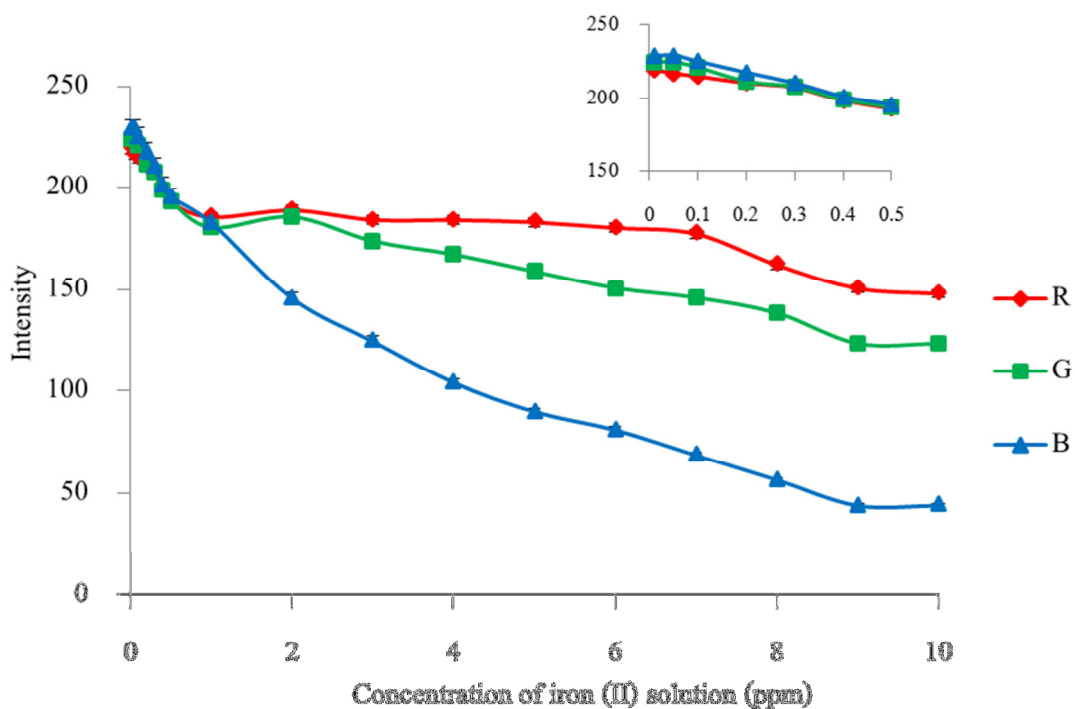
$$y = (0.144 \pm 0.004) x + (0.030 \pm 0.004) \quad (4.2)$$

$$y = (0.149 \pm 0.003) x + (0.024 \pm 0.003) \quad (4.3)$$

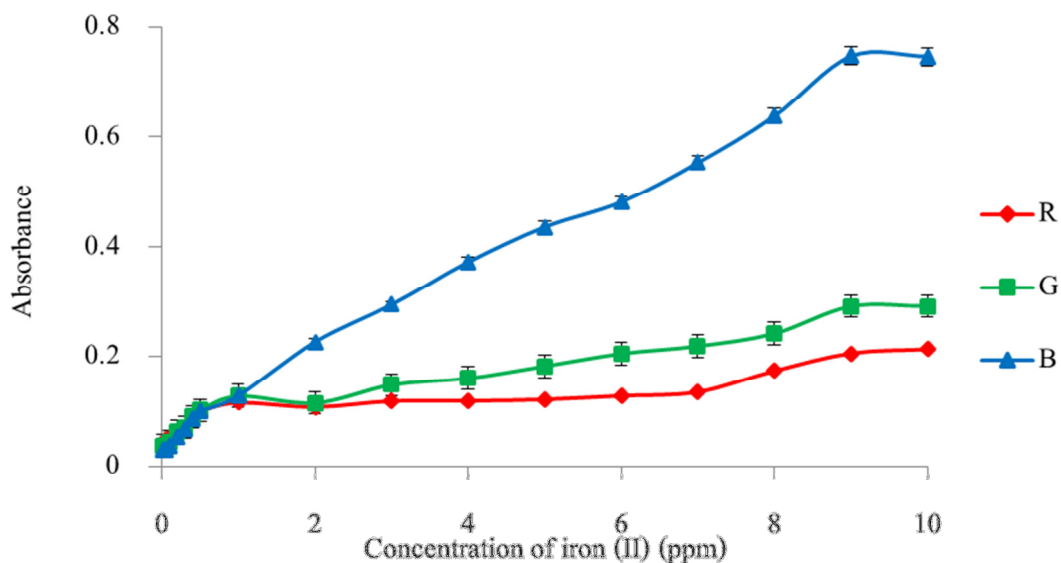
ช่วงความเป็นเส้นตรงที่กว้างพบที่ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงสีน้ำเงินกับความเข้มข้นของเหล็กในสารละลาย มีช่วงความเป็นเส้นตรงระหว่าง 1.00 - 9.00 ppm (รูปที่ 4.13) มีค่าสหสัมพันธ์เชิงปริมาณ (R^2) เท่ากับ 0.9924 มีสมการเส้นตรงดังแสดงในสมการที่ 4.4

$$y = (0.072 \pm 0.006) x + (0.070 \pm 0.001) \quad (4.4)$$

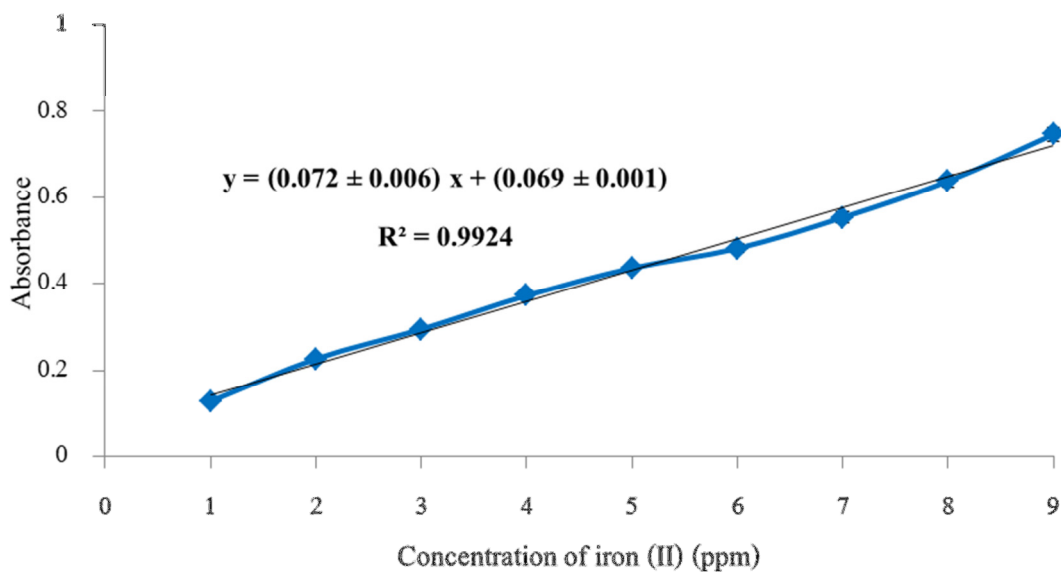
ช่วงความเป็นเส้นตรงดังกล่าวกว้างเพียงพอ ทำให้การนำไปใช้สำหรับวิเคราะห์เชิงปริมาณมีความสะดวกมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการนำความสัมพันธ์ของค่าความเข้มแสงสี RGB กับความเข้มข้นของเหล็กในสารละลาย สำหรับชุดอุปกรณ์ถ่ายภาพชนิดต่าง ๆ ทำการศึกษาในทำนองเดียวกันแต่เปลี่ยนวิธีตรวจวัดจากการใช้กล้องดิจิทัลในการตรวจวัดความเข้มแสง RGB เป็นการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปในโทรศัพท์เคลื่อนที่ รุ่น Samsung Galaxy S 2 และรุ่น iPhone 5 และคอมพิวเตอร์แท็บเล็ต รุ่น iPad 3 ในการตรวจวัดความเข้มแสง RGB ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.14 - 4.16 พบว่า ให้ผลการศึกษาที่สอดคล้องกันกับการใช้กล้องดิจิทัล คือ ที่ช่วงความเข้มข้นสูงกว่า 0.50 ppm สะท้อนแสงสีแดงได้ดีที่สุดและที่ช่วงความเข้มข้นต่ำกว่า 0.50 ppm แสงสีแดงสะท้อนแสงได้ในระดับที่ใกล้เคียงกันกับแสงสีเขียวและน้ำเงิน



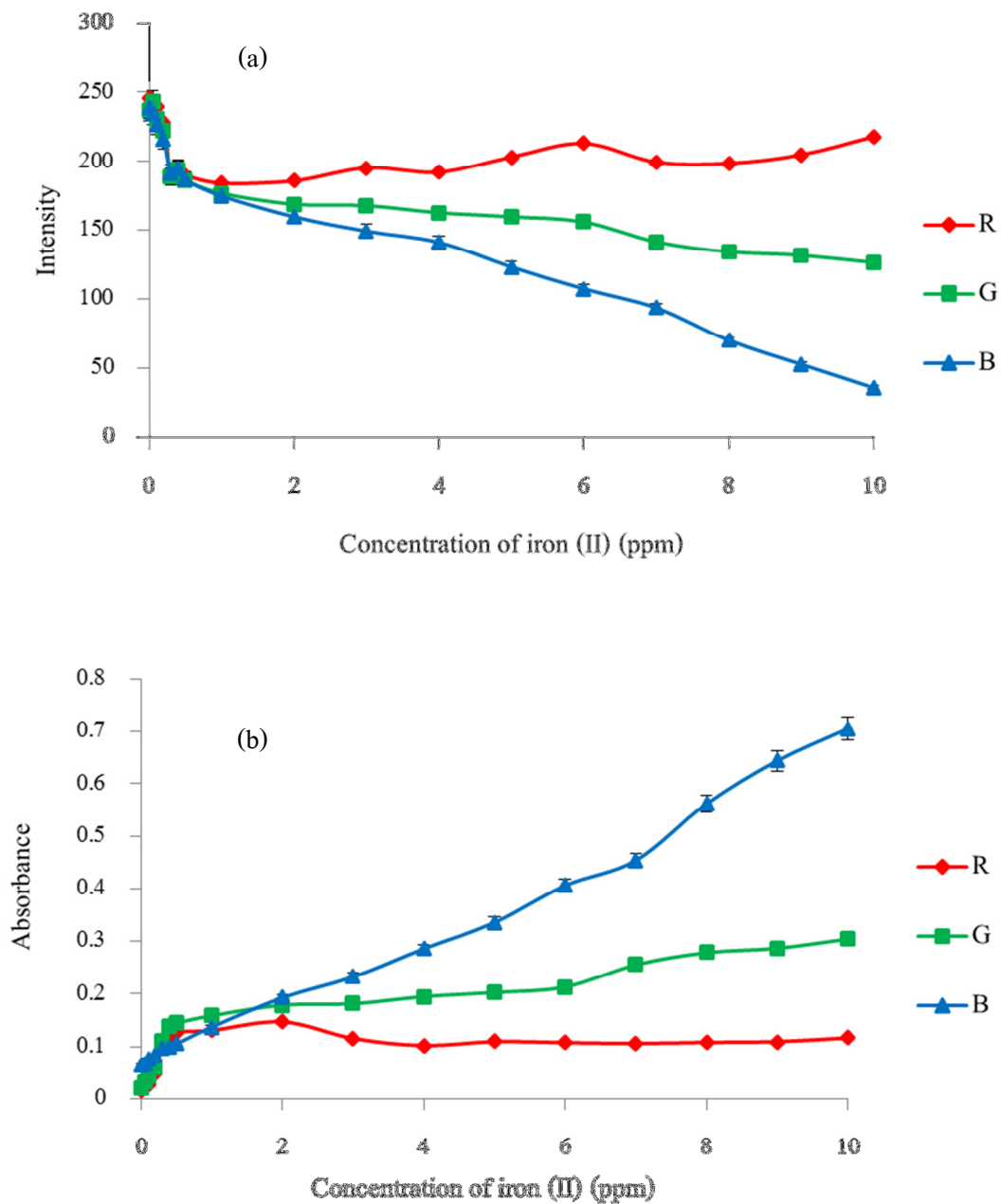
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสง RGB กับความเข้มข้นของสารละลายเหล็กด้วยการใช้กล้องดิจิทัลในการตรวจวัด



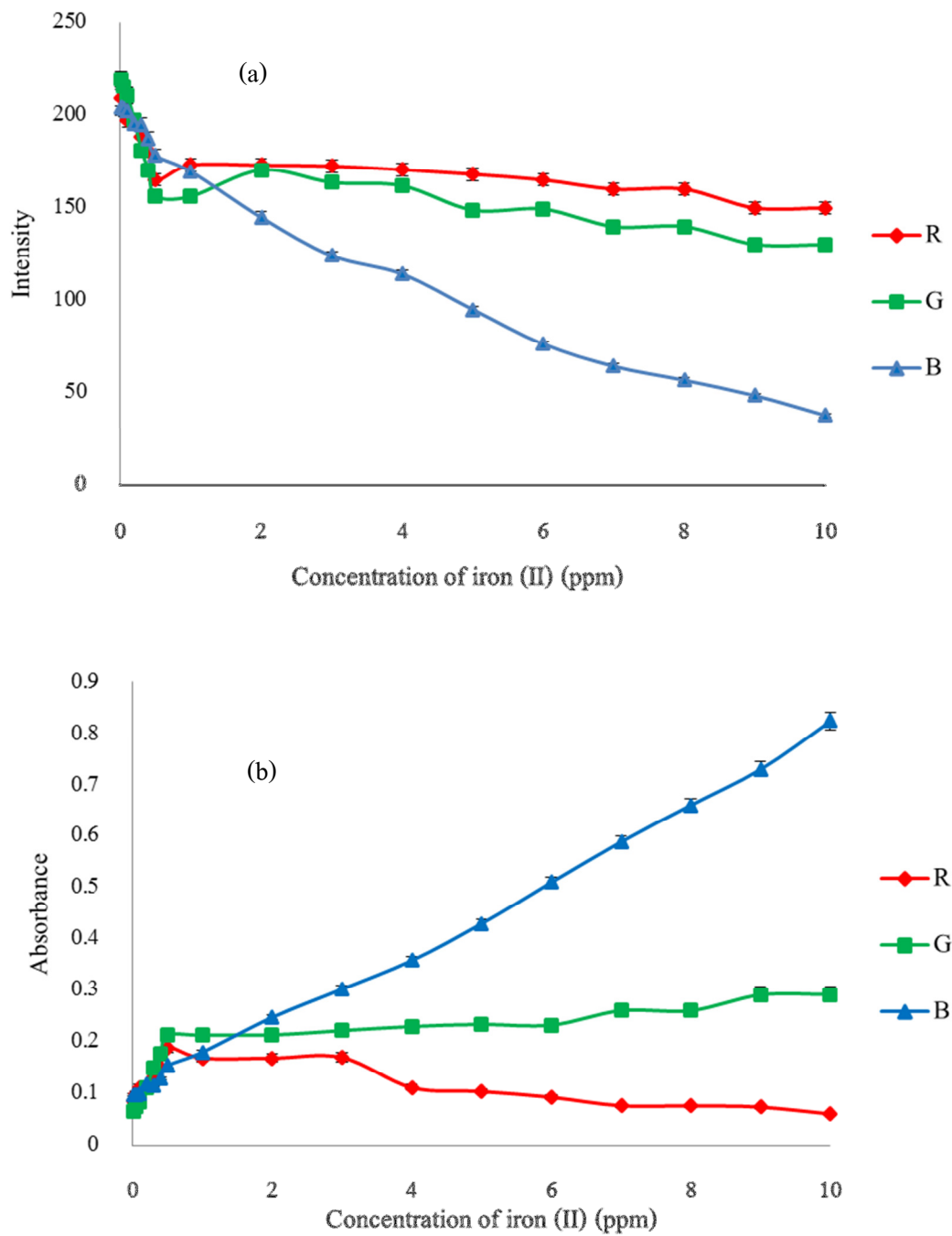
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง RGB กับความเข้มข้นของสารละลายเหล็กด้วยการใช้กล้องดิจิทัลในการตรวจวัด



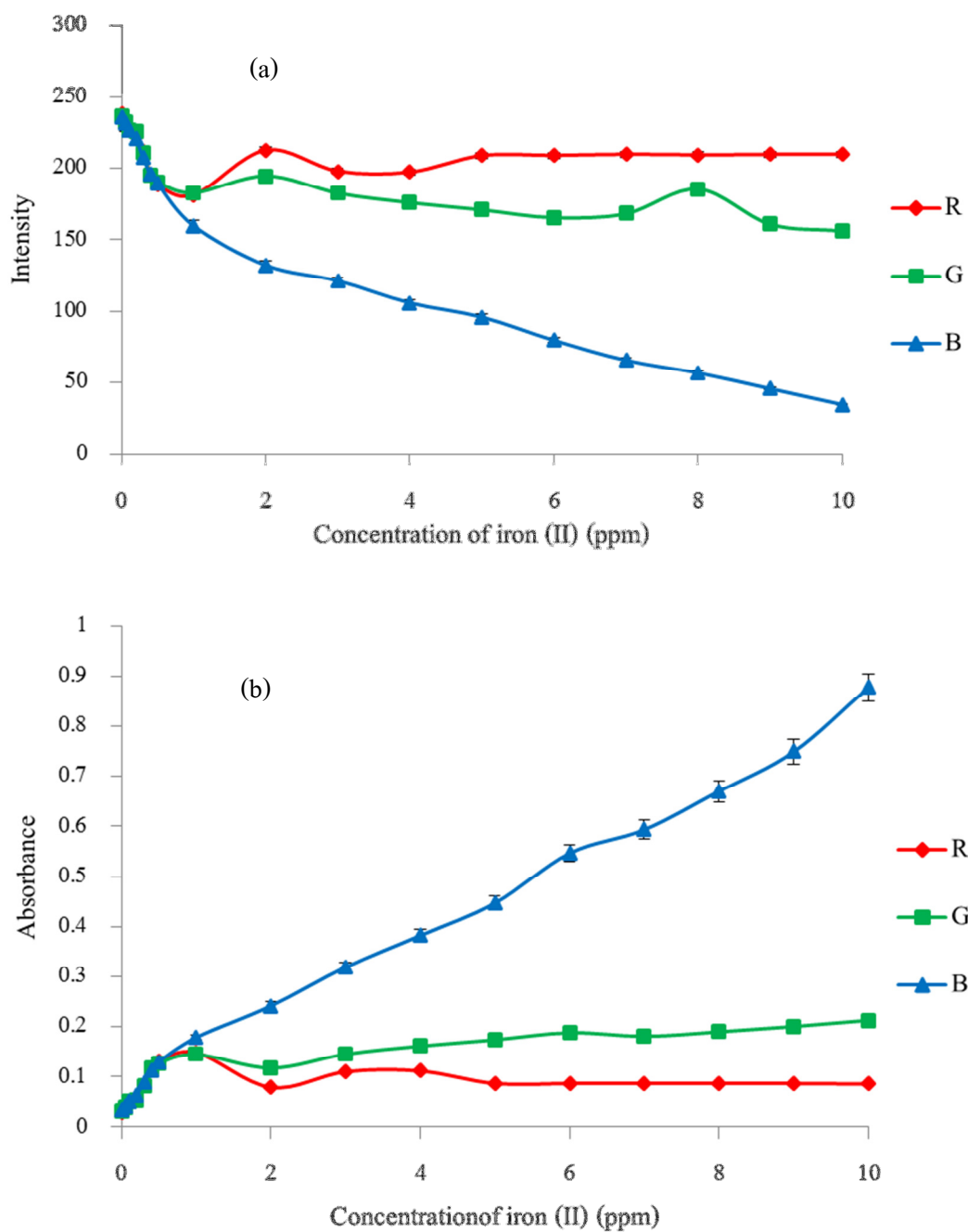
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงสีน้ำเงินกับความเข้มข้นของสารละลายเหล็กในช่วง 1.00 - 9.00 ppm สำหรับวิธีการตรวจวัดความเข้มแสงด้วยกล้องดิจิทัล



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง (a) ความเข้มแสง (b) ค่าการดูดกลืนแสง RGB กับความเข้มข้นของสารละลายเหล็กสำหรับวิธีการตรวจวัดความเข้มแสงด้วยโทรศัพท์เคลื่อนที่ รุ่น Samsung Galaxy S 2



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง (a) ความเข้มแสง (b) ค่าการดูดกลืนแสง RGB กับความเข้มข้นของสารละลายเหล็กสำหรับวิธีการตรวจวัดความเข้มแสงด้วยโทรศัพท์เคลื่อนที่ รุ่น iPhone 5



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง (a) ความเข้มแสง (b) ค่าการดูดกลืนแสง RGB กับความเข้มข้นของสารละลายเหล็กสำหรับวิธีการตรวจวัดความเข้มแสงด้วยคอมพิวเตอร์แท็บเล็ต รุ่น iPad 3

ตารางที่ 4.3 สมการเส้นตรง ช่วงความเป็นเส้นตรง และค่าสหสัมพันธ์เชิงปริมาณของวิธีตรวจวัด

Methods	Parameter	Calibration curve equation	R ²	Linear range (ppm)
Digital camera	I _R and C	$y = (-47.023 \pm 0.006) x + (219.470 \pm 0.006)$	0.9927	0.01 - 0.20
	I _R and C	$y = (-0.080 \pm 0.006) x + (0.043 \pm 0.006)$	0.9933	0.05 - 0.30
	I _G and C	$y = (-88.620 \pm 0.006) x + (229.210 \pm 0.006)$	0.9954	0.05 - 0.20
	I _G and C	$y = (-7.623 \pm 0.006) x + (198.280 \pm 0.006)$	0.9900	2.00 - 8.00
	I _B and C	$y = (-76.128 \pm 0.006) x + (232.610 \pm 0.006)$	0.9976	0.05 - 0.50
	I _B and C	$y = (-11.621 \pm 0.006) x + (149.310 \pm 0.006)$	0.9965	5.00 - 9.00
	A _R and C	$y = (0.007 \pm 0.006) x + (0.087 \pm 0.006)$	0.9999	5.00 - 7.00
	A _G and C	$y = (0.144 \pm 0.004) x + (0.030 \pm 0.004)$	0.9910	0.05 - 0.50
	A _G and C	$y = (0.020 \pm 0.006) x + (0.080 \pm 0.006)$	0.9945	4.00 - 8.00
	A _B and C	$y = (0.149 \pm 0.003) x + (0.024 \pm 0.003)$	0.9914	0.01 - 0.50
	A _B and C	$y = (0.072 \pm 0.006) x + (0.070 \pm 0.006)$	0.9924	1.00 - 9.00
Samsung Galaxy S 2	I _R and C	$y = (-94.348 \pm 0.006) x + (246.800 \pm 0.006)$	0.9962	0.01 - 0.20
	I _G and C	$y = (-131.060 \pm 0.006) x + (222.040 \pm 0.006)$	0.9969	0.01 - 0.50
	I _B and C	$y = (-31.602 \pm 4.392)x + (218.350 \pm 18.407)$	0.9973	0.05 - 0.40
	I _B and C	$y = (-16.779 \pm 0.006) x + (205.760 \pm 0.006)$	0.9925	3.00 - 6.00
	A _R and C	$y = (0.171 \pm 0.006) x + (0.013 \pm 0.006)$	0.9901	0.05 - 0.40
	A _G and C	$y = (0.312 \pm 0.009)x + (0.009 \pm 0.003)$	0.9955	0.05 - 0.50
	A _G and C	$y = (0.010 \pm 0.006) x + (0.051 \pm 0.152)$	0.9901	3.00 - 6.00
	A _B and C	$y = (0.110 \pm 0.006) x + (0.062 \pm 0.006)$	0.9925	0.01 - 0.30
	A _B and C	$y = (0.065 \pm 0.006) x + (0.081 \pm 0.006)$	0.9961	1.00 - 7.00
iPhone 5	I _R and C	$y = (-132.510 \pm 0.006) x + (210.290 \pm 0.006)$	0.9908	0.01 - 0.10
	I _R and C	$y = (-2.750 \pm 0.006) x + (181.580 \pm 0.006)$	0.9973	4.00 - 6.00
	I _G and C	$y = (-131.060 \pm 0.006) x + (222.040 \pm 0.006)$	0.9975	0.01 - 0.50
	I _B and C	$y = (-81.600 \pm 0.006) x + (219.290 \pm 0.006)$	0.9966	0.30 - 0.50
	I _B and C	$y = (-17.199 \pm 0.006) x + (181.490 \pm 0.006)$	0.9904	1.00 - 7.00

ตารางที่ 4.3 (ต่อ) สมการเส้นตรง ช่วงความเป็นเส้นตรง และสหสัมพันธ์เชิงปริมาณของวิธีตรวจวัด

Methods	Parameters	Calibration curve equation	R ²	Linear range (ppm)
iPhone 5	A _R and C	$y = (0.2833 \pm 0.006) x + (0.084 \pm 0.006)$	0.9923	0.01 - 0.10
	A _R and C	$y = (0.006 \pm 0.006) x + (0.150 \pm 0.006)$	0.9909	3.00 - 6.00
	A _G and C	$y = (0.3032 \pm 0.006) x + (0.057 \pm 0.006)$	0.9946	0.01 - 0.50
	A _B and C	$y = (0.074 \pm 0.006) x + (0.079 \pm 0.006)$	0.9980	0.05 - 0.40
	A _B and C	$y = (0.071 \pm 0.005) x + (0.089 \pm 0.007)$	0.9966	2.00 - 9.00
iPad 3	I _R and C	$y = (-126.090 \pm 0.006) x + (239.570 \pm 0.006)$	0.9996	0.01 - 0.10
	I _G and C	$y = (-151.670 \pm 0.006) x + (256.010 \pm 0.006)$	0.9996	0.20 - 0.40
	I _G and C	$y = (-5.650 \pm 0.006) x + (199.050 \pm 0.006)$	0.9964	3.00 - 6.00
	I _B and C	$y = (-97.880 \pm 0.006) x + (237.050 \pm 0.006)$	0.9921	0.05 - 0.50
	I _B and C	$y = (-13.420 \pm 0.006) x + (160.450 \pm 0.006)$	0.9901	0.01 - 0.20
	A _R and C	$y = (0.2355 \pm 0.006) x + (0.027 \pm 0.006)$	0.9993	0.05 - 0.40
	A _G and C	$y = (0.014 \pm 0.006) x + (0.104 \pm 0.006)$	0.9975	3.00 - 6.00
	A _B and C	$y = (0.199 \pm 0.006) x + (0.030 \pm 0.006)$	0.9924	0.01 - 0.50
	A _B and C	$y = (0.068 \pm 0.004) x + (0.108 \pm 0.022)$	0.9981	1.00 - 7.00
UV-Vis	A and C *	$y = (0.099 \pm 0.004) x + (0.003 \pm 0.002)$	0.9991	0.05 - 10.00
	A and C **	$y = (0.098 \pm 0.006) x + (0.0034 \pm 0.006)$	0.9982	0.05 - 10.00

* ใช้สภาวะมาตรฐานในการเกิดปฏิกิริยา

** ใช้สภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา

จากตารางที่ 4.3 พบว่า ช่วงความเป็นเส้นตรงในวิธีมาตรฐาน ซึ่งใช้เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ในการตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงของผลิตภัณฑ์ มีช่วงความเป็นเส้นตรงที่กว้างที่สุดอยู่ในช่วง 0.05 - 10.00 ppm เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีที่พัฒนาเนื่องจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ในวิธีมาตรฐาน วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 nm (Shyla, *et al.*, 2012) ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่ผลิตภัณฑ์ดูดกลืนแสงได้มากที่สุด จึงทำให้ช่วงความเป็น

เส้นตรงกว้างกว่าวิธีการตรวจวัดที่พัฒนาขึ้น เนื่องจากวิธีที่พัฒนาขึ้นอาศัยข้อมูลความเข้มแสงและการดูคลื่นแสง RGB ในการสร้างกราฟเทียบมาตรฐาน

สำหรับวิธีที่พัฒนาขึ้นมีช่วงความเป็นเส้นตรงที่กว้างที่สุดเป็นความสัมพันธ์ระหว่างการดูคลื่นแสงสีน้ำเงินกับความเข้มขึ้นของเหล็ก อยู่ในช่วง 1.00 - 9.00 ppm (SONY DSC WX 7) 1.00 - 7.00 ppm (Samsung Galaxy S 2) 2.00 - 9.00 ppm (iPhone 5) และ 1.00 - 7.00 ppm (iPad 3) ซึ่งแคบกว่าช่วงความเป็นเส้นตรงในวิธีมาตรฐาน (0.05 - 10.00 ppm) เนื่องจากแสงสีน้ำเงินมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 450 - 500 nm (Varona, *et al.*, 2006) ส่งผลให้การวัดค่าการดูคลื่นแสงทำได้ไม่ดีเท่ากับวิธีมาตรฐานซึ่งวัดที่ความยาวคลื่น 510 nm

4.5 สมรรถนะและประสิทธิภาพของวิธีตรวจวัด

ในการตรวจสอบสมรรถนะและประสิทธิภาพของวิธีตรวจวัดที่พัฒนาขึ้นใด ๆ ก็ตาม จะต้องพิจารณาพารามิเตอร์ที่สำคัญต่าง ๆ ได้แก่ ความเข้มข้นต่ำสุดที่ตรวจวัดได้ (LOD) ความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถหาปริมาณได้ (LOQ) ความแม่นยำในการตรวจวัด (accuracy) ความเที่ยงในการทวนซ้ำ (precision) เป็นต้น

4.5.1 ความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้ และความเข้มข้นต่ำสุดที่หาปริมาณได้

การคำนวณหาความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้และความเข้มข้นต่ำสุดที่หาปริมาณได้ คำนวณจากวิธีของ Miller Miller (Miller and Miller, 2005) ดังแสดงในสมการ 4.3 และ 4.4 (Venkatasami, *et al.*, 2010)

$$\text{LOD} = y_B + 3 S_B \quad (4.3)$$

$$\text{LOQ} = y_B + 10 S_B \quad (4.4)$$

โดยที่

S_B = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มแสงหรือการดูคลื่นแสงสี RGB ของสารละลายที่ไม่มีสารที่ต้องการวัด (blank)

y_B = ความเข้มข้นของสารที่ให้ความเข้มแสงหรือการดูคลื่นแสงเท่ากับความเข้มแสงหรือการดูคลื่นแสงของสารละลายที่ไม่มีสารที่ต้องการวัด (blank)

LOD = ความเข้มข้นต่ำสุดของสารที่ตรวจพบได้ (limit of detection)

LOQ = ความเข้มข้นต่ำสุดของสารที่ตรวจวัดได้ (limit of quantitation)

ผลที่ได้จากการตรวจวัดโดยใช้อุปกรณ์ถ่ายภาพชนิดต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4.4 พบว่า ความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้ (จากค่าการดูดกลืนแสงสีน้ำเงิน) คือ 0.028 ppm (SONY DSC WX 7) 0.045 ppm (Samsung Galaxy S 2) 0.032 (iPhone 5) และ 0.042 (iPad 3) ซึ่งใกล้เคียงกับความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้ในวิธีมาตรฐาน (0.020 ppm) เนื่องจากในวิธีมาตรฐาน วัดค่าการดูดกลืนแสงของผลิตภัณฑ์ที่ความยาวคลื่น 510 nm (Shyla, *et al.*, 2012) ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่ผลิตภัณฑ์ดูดกลืนแสงได้ดีที่สุด จึงทำให้ตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่ำ ๆ ได้ดีกว่าวิธีที่พัฒนาขึ้น ซึ่งใช้ค่าความเข้มแสงและการดูดกลืนแสงในช่วงสีแดง สีเขียวและสีน้ำเงินซึ่งไม่ใช่ความยาวคลื่นที่ผลิตภัณฑ์ดูดกลืนแสงได้ดีที่สุด

อุปกรณ์ตรวจวัดที่ใช้กล้องดิจิทัลรุ่น Sony DSC WX 7 ซึ่งมีเซนเซอร์รับภาพชนิดซีมอสมีค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ตรวจวัดได้ (limit of detection, LOD) และความเข้มข้นต่ำสุดที่ตรวจหาปริมาณได้ (limit of quantitation, LOQ) ใกล้เคียงกันกับอุปกรณ์ตรวจวัดซึ่งใช้เซนเซอร์รับภาพชนิดบีเอสไอซีมอสในโทรศัพท์เคลื่อนที่รุ่น iPhone 5 Samsung Galaxy S 2 และคอมพิวเตอร์แท็บเล็ตรุ่น iPad 3 แม้ว่าเซนเซอร์ชนิดซีมอส (complementary metal oxide semiconductor, CMOS) ในกล้องดิจิทัลรุ่น Sony DSC WX 7 มีประสิทธิภาพในการตรวจจับแสงได้น้อยกว่าเซนเซอร์รับภาพชนิดบีเอสไอซีมอสซึ่งใช้ใน iPhone 5 Samsung Galaxy S 2 และคอมพิวเตอร์แท็บเล็ต รุ่น iPad 3 เพราะแสงที่ตกกระทบบนโฟโตไดโอดมีปริมาณน้อยลง ดังแสดงในรูปที่ 4.17 เพราะเซนเซอร์รับภาพชนิดซีมอสมีแผงวงจรวางทางด้านหน้าของโฟโตไดโอด แต่ด้วยขนาดของเซนเซอร์รับภาพที่มีขนาดใหญ่กว่าเซนเซอร์รับภาพที่ใช้ในอุปกรณ์ตรวจวัดชนิดอื่น ๆ จึงทำให้การตรวจจับแสงทำได้ดีขึ้นจนมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับเซนเซอร์รับภาพชนิดบีเอสไอซีมอส



รูปที่ 4.17 โครงสร้างเซนเซอร์รับภาพชนิดซีมอส และชนิดบีเอสไอซีมอส

ตารางที่ 4.4 ความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้และความเข้มข้นต่ำสุดที่หาปริมาณได้ของวิธีตรวจวัด

Methods	Relationship	Linear range (ppm)	LOD (ppm)	LOQ (ppm)
Digital camera	I _R and C	0.01 - 0.20	0.035 ± 0.002	0.042 ± 0.001
	I _R and C	0.05 - 0.30	0.047 ± 0.013	0.053 ± 0.010
	I _G and C	0.05 - 0.20	0.029 ± 0.001	0.043 ± 0.003
	I _G and C	2.00 - 8.00	1.524 ± 0.046	1.834 ± 0.055
	I _B and C	0.05 - 0.50	0.028 ± 0.002	0.041 ± 0.004
	I _B and C	5.00 - 9.00	4.450 ± 0.023	5.540 ± 0.044
	A _R and C	5.00 - 7.00	4.235 ± 0.033	5.430 ± 0.054
	A _G and C	0.05 - 0.50	0.039 ± 0.004	0.063 ± 0.006
	A _G and C	4.00 - 8.00	3.852 ± 0.053	4.130 ± 0.064
	A _B and C	0.01 - 0.50	0.039 ± 0.003	0.043 ± 0.004
	A _B and C	1.00 - 9.00	0.904 ± 0.064	1.063 ± 0.054
Samsung Galaxy S 2	I _R and C	0.01 - 0.20	0.050 ± 0.002	0.060 ± 0.005
	I _G and C	0.10 - 0.50	0.082 ± 0.003	0.121 ± 0.004
	I _B and C	0.05 - 0.40	0.042 ± 0.001	0.054 ± 0.001
	I _B and C	3.00 - 6.00	2.780 ± 0.053	3.056 ± 0.045
	A _R and C	0.05 - 0.40	0.045 ± 0.004	0.058 ± 0.006
	A _G and C	0.05 - 0.50	0.045 ± 0.008	0.063 ± 0.009
	A _G and C	3.00 - 6.00	2.680 ± 0.063	3.086 ± 0.054
	A _B and C	0.01 - 0.30	0.048 ± 0.002	0.059 ± 0.004
	A _B and C	1.00 - 7.00	0.844 ± 0.069	1.093 ± 0.074

ตารางที่ 4.4 (ต่อ) ความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้ และความเข้มข้นต่ำสุดที่หาปริมาณได้ของวิธีตรวจวัด

Methods	Relationship	Linear range (ppm)	LOD (ppm)	LOQ (ppm)
iPhone 5	I _R and C	0.01 - 0.10	0.035 ± 0.002	0.044 ± 0.001
	I _R and C	4.00 - 6.00	3.745 ± 0.013	4.053 ± 0.040
	I _G and C	0.01 - 0.50	0.037 ± 0.001	0.043 ± 0.003
	I _B and C	0.30 - 0.50	0.290 ± 0.006	0.320 ± 0.005
	I _B and C	1.00 - 7.00	0.951 ± 0.052	1.073 ± 0.084
	A _R and C	0.01 - 0.10	0.035 ± 0.002	0.039 ± 0.004
	A _G and C	3.00 - 6.00	2.945 ± 0.023	3.083 ± 0.052
	A _G and C	0.01 - 0.50	0.039 ± 0.005	0.050 ± 0.005
	A _B and C	0.05 - 0.40	0.032 ± 0.008	0.043 ± 0.006
	A _B and C	2.00 - 9.00	1.875 ± 0.053	2.083 ± 0.072
iPad 3	I _R and C	0.01 - 0.10	0.043 ± 0.023	0.053 ± 0.043
	I _R and C	0.20 - 0.40	0.180 ± 0.063	0.213 ± 0.052
	I _G and C	3.00 - 6.00	2.801 ± 0.035	3.013 ± 0.052
	I _B and C	0.05 - 0.50	0.041 ± 0.003	0.063 ± 0.002
	I _B and C	0.05 - 0.40	0.043 ± 0.002	0.064 ± 0.004
	A _R and C	0.01 - 0.20	0.043 ± 0.023	0.056 ± 0.043
	A _R and C	0.05 - 0.40	0.042 ± 0.006	0.057 ± 0.007
	A _G and C	3.00 - 6.00	2.910 ± 0.033	3.130 ± 0.062
	A _B and C	0.01 - 0.50	0.043 ± 0.023	0.053 ± 0.043
	A _B and C	1.00 - 7.00	0.946 ± 0.023	1.053 ± 0.053
UV - Vis	A and C *	0.05-10.00	0.020 ± 0.002	0.040 ± 0.004
	A and C **	0.05-10.00	0.023 ± 0.004	0.039 ± 0.003

* ใช้สภาวะมาตรฐานในการเกิดปฏิกิริยา
 ** ใช้สภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา

4.5.2 ความแม่นยำในการตรวจวัด และความเที่ยงของการทวนซ้ำของวิธีที่พัฒนา

สำหรับการทดสอบความแม่นยำในการตรวจวัด (accuracy) นั้นจะทำโดยการวิเคราะห์น้ำสังเคราะห์ที่ทราบความเข้มข้นของเหล็กที่แน่นอน เปรียบเทียบกับความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดที่พัฒนาขึ้น โดยในงานวิจัยนี้จะเตรียมน้ำสังเคราะห์ที่มีเหล็กความเข้มข้น 2.50 และ 4.50 ppm ผลจากการวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ถ่ายภาพชนิดต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.5 พบว่า ค่าร้อยละความแตกต่าง (% difference) ระหว่างความเข้มข้นที่ได้จากตรวจวัดและความเข้มข้นจริงอยู่ 0.40 - 1.60 % ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ เพราะน้อยกว่า 5.00 % (AWWA, APHA, WOCF, 1998) และใกล้เคียงกับวิธีมาตรฐาน จึงสรุปว่าวิธีวิเคราะห์นี้มีความแม่นยำในการตรวจวัดเป็นที่ยอมรับได้เมื่อเทียบกับวิธีมาตรฐาน ASTM E 394 - 04

ตารางที่ 4.5 ความแม่นยำในการวัด (accuracy) และความเที่ยงในการทวนซ้ำ (precision)

Methods	Accuracy (% difference)		Precision (% relative standard error)	
	2.50 ppm	4.50 ppm	Interday	Intraday
Digital Camera	2.52 (0.80)	4.48 (0.44)	0.59 - 3.52	0.26
Samsung Galaxy S 2	2.54 (1.60)	4.51 (0.22)	1.53 - 2.46	1.81
iPhone 5	2.51 (0.40)	4.53 (0.67)	1.75 - 3.54	0.65
iPad 3	2.48 (1.20)	4.45 (1.10)	1.51 - 1.88	0.65
UV - Vis*	2.49 (0.40)	4.51 (0.22)	0.04	0.07
UV - Vis**	2.48 (0.80)	4.51 (0.22)	0.05	0.08

* ใช้สภาวะมาตรฐานในการเกิดปฏิกิริยา

** ใช้สภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา

สำหรับการศึกษาความเที่ยงการทวนซ้ำ (precision) จะทำการศึกษาโดยวิเคราะห์น้ำสังเคราะห์ที่มีเหล็กความเข้มข้น 4.00 ppm ทั้งแบบระหว่างวัน (interday) และแบบภายในวันเดียวกัน (intraday) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่า ร้อยละของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (% RSD) สำหรับการทดสอบความเที่ยงในการทวนซ้ำแบบระหว่างวัน มีค่าเท่ากับ 0.59 - 3.54 % และแบบภายในวันเดียวกัน มีค่าเท่ากับ 0.26 - 1.81 % ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ เพราะมีค่าน้อยกว่า 8.00 % (Greffeuille, *et al.* 2011) จึงสรุปได้ว่าวิธีวิเคราะห์ที่พัฒนามีความเที่ยงของการทวนซ้ำ

4.5.3 ความไวในการวิเคราะห์ของวิธีที่พัฒนา

โดยทั่วไปแล้วความไวในการวิเคราะห์ (sensitivity) ของวิธีที่พัฒนาขึ้นจะพิจารณาจากค่าความชัน (slope) ของสมการเส้นตรงจากกราฟเทียบมาตรฐาน ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.6 พบว่า ความไวในการวิเคราะห์ของวิธีที่พัฒนาขึ้นทั้ง 4 วิธีมีค่าความชันของสมการเส้นตรง เท่ากับ 0.072 ± 0.006 (SONY DSC WX 7), 0.065 ± 0.004 (Samsung Galaxy S 2), 0.071 ± 0.002 (iPhone 5) และ 0.068 ± 0.003 (iPad 3)

ตารางที่ 4.6 ความไวในการวิเคราะห์ของวิธีตรวจวัด

Methods	Parameters	Calibration curve equation	LDR (ppm)
Digital camera	A _B and C	$y = (0.072 \pm 0.006) x + (0.070 \pm 0.001)$	1.00 - 9.00
Samsung Galaxy S 2	A _B and C	$y = (0.065 \pm 0.007) x + (0.081 \pm 0.004)$	1.00 - 7.00
iPhone 5	A _B and C	$y = (0.071 \pm 0.005) x + (0.089 \pm 0.007)$	2.00 - 9.00
iPad 3	A _B and C	$y = (0.068 \pm 0.004) x + (0.108 \pm 0.022)$	1.00 - 7.00
UV - Vis*	A and C	$y = (0.099 \pm 0.004) x + (0.003 \pm 0.002)$	0.05-10.00

* ใช้สภาวะมาตรฐานในการเกิดปฏิกิริยา

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความไวในการวิเคราะห์ของอุปกรณ์ตรวจวัด พบว่า อุปกรณ์ถ่ายภาพแต่ละชนิดมีความไวในการวิเคราะห์ในระดับที่เทียบเท่ากัน เนื่องจากเซนเซอร์รับภาพของอุปกรณ์ถ่ายภาพในโทรศัพท์เคลื่อนที่ รุ่น iPhone 5 รุ่น Samsung Galaxy S 2 และคอมพิวเตอร์แท็บเล็ต รุ่น iPad 3 เป็นชนิดบีเอสไอซีมอสเหมือนกันความสามารถในการตรวจจับแสงมีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกัน ตอบสนองต่อความเข้มแสงของผลิตภัณฑ์ที่เปลี่ยนไปได้ในระดับเดียวกัน ความไวในการวิเคราะห์ของอุปกรณ์ตรวจวัดทั้ง 3 จึงไม่แตกต่างกัน

ขณะที่กล้องดิจิทัล รุ่น Sony DSC WX 7 มีเซนเซอร์ชนิดซีมอส ซึ่งมีประสิทธิภาพในการตรวจจับแสงน้อยกว่าเซนเซอร์ชนิดบีเอสไอซีมอส แต่ขนาดของเซนเซอร์ในกล้องดิจิทัลที่มีขนาดใหญ่กว่าอุปกรณ์ถ่ายภาพชนิดอื่น ๆ ส่งผลให้มีโฟโตไดโอดมากขึ้นการตรวจจับความเข้มแสงของผลิตภัณฑ์ทำได้จึงมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับเซนเซอร์ชนิดบีเอสไอซีมอสในโทรศัพท์เคลื่อนที่ รุ่น iPhone 5 รุ่น Samsung Galaxy S 2 และคอมพิวเตอร์แท็บเล็ต รุ่น iPad 3 จึงทำให้กล้องดิจิทัลมีความไวในการวิเคราะห์อยู่ในระดับเดียวกันกับอุปกรณ์ถ่ายภาพชนิดอื่น ๆ

4.6 ผลของไอออนอื่น ๆ ต่อการตรวจวัดเหล็ก

จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า ไอออนบางไอออนสามารถรบกวนต่อการวัดเหล็กด้วยวิธีพีแวนโทโรลีนได (APHA, AWWA, WOCF, 1998) ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องศึกษาผลของไอออนอื่น ๆ ที่มีต่อการวัดเหล็ก โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาทั้งหมด 6 ไอออน ได้แก่ Ag^+ , Cu^{2+} , Sb^{3+} , NO_3^- , SO_4^{2-} และ PO_4^{3-} ซึ่งไอออนทั้งหมดเป็นตัวแทนของไอออนบวก (+1, +2 และ +3) และไอออนลบ (-1, -2 และ -3) โดยการเติมไอออนที่ต้องการศึกษา ความเข้มข้น 40.00 ppm ปริมาตร 0.50 mL ลงในหลอดปฏิบัติการที่มีสารละลายเหล็กเฟอรัส ความเข้มข้น 4.00 ppm ปริมาตร 0.50 mL สารละลายบัฟเฟอร์ 0.20 M 0.20 mL และสารละลาย 1, 10 - พีแวนโทโรลีน 900 ppm 0.40 mL เขย่าหลอดปฏิบัติการ และวิเคราะห์ความเข้มแสงสีน้ำเงิน ที่เวลา 5 นาที ซึ่งผลของไอออนอื่น ๆ ที่มีต่อการวิเคราะห์เหล็ก จะพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (relative error) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 4.5 ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.7

$$\text{Relative error} = [(\text{measured value} - \text{true value}) / \text{true value}] \times 100 \quad (4.5)$$

ตารางที่ 4.7 ผลของไอออนรบกวนในการวิเคราะห์

Methods	Foreienge Ions (relative error)					
	Ag^+	Cu^{2+}	Sb^{3+}	NO_3^-	SO_4^{2-}	PO_4^{3-}
Digital camera	-7.19 %	-5.15 %	-1.06 %	-1.06 %	-1.06 %	-1.19 %
Samsun S 2	-7.20 %	-5.38 %	-1.18 %	-2.11 %	-0.95 %	-1.11 %
iPhone 5	-6.20 %	-5.69 %	+0.46 %	-0.45 %	-1.02 %	-1.18 %
iPad 2	-6.17 %	-6.14 %	+0.59 %	-0.94 %	-0.54 %	-1.61 %
UV - Vis *	-5.89 %	-5.56 %	+0.43 %	-0.47 %	-1.02 %	-1.89 %
UV - Vis **	-5.67 %	-5.66 %	+0.51 %	-0.56 %	-1.01 %	-1.72 %

* สภาวะมาตรฐานในการเกิดปฏิกิริยา

** สภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา

ไอออนที่มีผลกระทบต่อวิเคราะห์ จะพิจารณาค่า relative error ที่มากกว่า ± 5 % (Katsumata, *et al.* 2000) จากตารางที่ 4.7 พบว่า Ag^+ และ Cu^{2+} มีผลกระทบต่อวิเคราะห์

เหล็กในสารละลาย โดยมีค่า relative error มากกว่า $\pm 5\%$ เนื่องจาก Ag^+ สามารถตกตะกอนกับสาร 1, 10 - ฟิแนนโทโรลีนได้ (APHA, AWWA, WOCF, 1998) และทำให้ปริมาณสารตั้งต้นที่เข้าทำปฏิกิริยาการเกิดสีกับไอออนของเหล็กมีจำนวนลดลง ขณะที่ Cu^{2+} มีผลต่อการวิเคราะห์เช่นเดียวกัน เนื่องจากในหลอดปฏิกิริยาที่ใช้ในการศึกษาผลของไอออน มีความเข้มข้นของ Cu^{2+} ที่สูงกว่า 5.00 ppm ซึ่งเป็นค่าความเข้มข้นที่ Cu^{2+} สามารถส่งผลกระทบต่อผลการวิเคราะห์เหล็กด้วยวิธี 1, 10 - ฟิแนนโทโรลีนได้ (Eaton, *et al.* 2005)

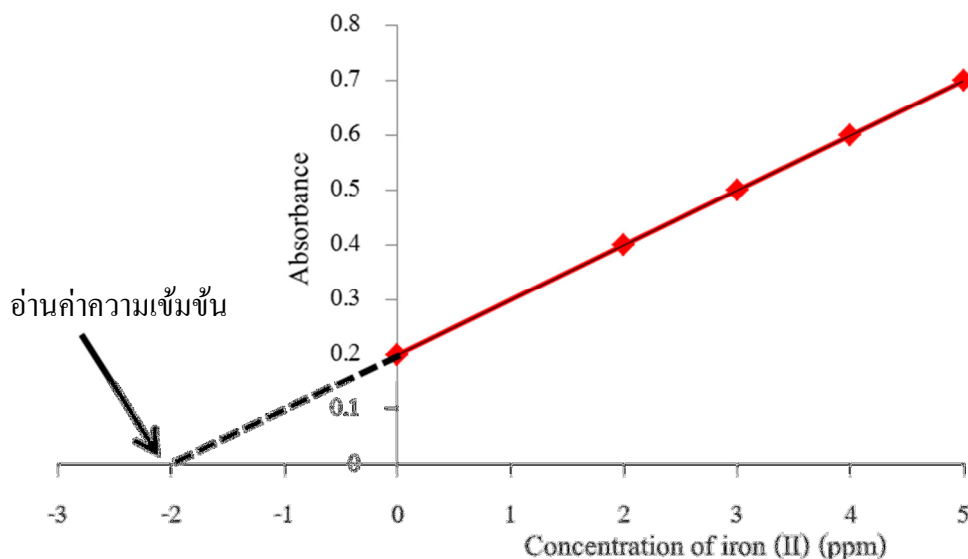
จากผลการศึกษา พบว่า ไอออนที่รบกวนการวิเคราะห์เป็นโลหะหนัก การลดผลกระทบสามารถทำได้โดยเติมสารละลาย 1, 10 - ฟิแนนโทโรลีนให้มีปริมาณมากเกินไป เพื่อทดแทนส่วนที่สูญเสียในการเกิดปฏิกิริยากับโลหะหนักบางไอออน (Eaton, *et al.* 2005)

4.7 การวิเคราะห์ปริมาณเหล็กในน้ำตัวอย่าง

การวิเคราะห์ปริมาณเหล็กในน้ำตัวอย่างที่เก็บจากแหล่งน้ำประเภทต่าง ๆ นั้น หลีกเลียงไม่ได้ที่ต้องพบกับผลของตัวทำละลาย (matrix effect) ทำให้ไม่สามารถใช้วิธีกราฟเทียบมาตรฐานเพื่อหาปริมาณเหล็กได้โดยตรงหรือบางครั้งปริมาณเหล็กในตัวอย่างจริงอาจมีปริมาณต่ำกว่าขีดจำกัดการตรวจวัดของระบบ เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว จึงมีการใช้วิธีเติมสารมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน (standard addition) ลงในตัวอย่างน้ำ (Harris, 2003) โดยขั้นตอนในการทดลองแสดงในรูปที่ 4.18 ซึ่งเติมสารมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นทั้งหมด 5 ความเข้มข้นแล้วสร้างสมการเส้นตรง เพื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นของเหล็กที่มีในน้ำตัวอย่าง โดยอ่านค่าความเข้มข้นจากจุดตัดแกน x ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.8 พบว่า น้ำคลอง น้ำขุมเหมือง และน้ำบาดาล ตรวจพบความเข้มข้นของเหล็กในตัวอย่างน้ำเกินเกณฑ์ที่ US EPA กำหนดไว้ที่ความเข้มข้น 0.30 ppm โดยมีค่าความเข้มข้น เท่ากับ 2.45 - 2.74 ppm 0.058 - 0.093 ppm และ 0.106 - 0.136 ppm ตามลำดับ และมีค่าใกล้เคียงกับความเข้มข้นของเหล็กในตัวอย่างน้ำที่ตรวจวิเคราะห์ได้จากวิธีมาตรฐาน

สาเหตุที่ตัวอย่างน้ำทั้ง 3 ชนิดนี้มีระดับของเหล็กที่มากนั้นเป็นผลมาจากในน้ำคลองเกิดการชะของหน้าดินด้วยน้ำ ทำให้เหล็กละลายลงสู่แหล่งน้ำ (Lippiatt, *et al.* 2010) จึงทำให้มีการตรวจพบปริมาณเหล็กในน้ำเป็นปริมาณมาก ขณะที่น้ำบาดาลมีความเข้มข้นของเหล็กมากเป็นอันดับที่สอง เนื่องจากเหล็กเป็นธาตุที่พบมากบริเวณเปลือกโลกและมีปริมาณมากถึง 5% (Rabinovich, 2000; Colter and Mahler, 2006) จึงทำให้เหล็กละลายอยู่ในน้ำบาดาลได้มากเช่นกัน และน้ำขุมเหมืองก็ตรวจพบเหล็กได้ในระดับสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด เนื่องจากแหล่งน้ำชนิดนี้

ได้มีการตัดแปลงมาจากขุมเหมืองดินบุกเก่าที่ปิดการใช้งาน (Suteerasak and Bhongsuwan, 2006) ซึ่งมีลักษณะเป็นบ่อดินซึ่งสามารถทำให้เกิดการละลายของเหล็กลงสู่แหล่งน้ำประเพณีนี้ (Lippiatt, *et al.* 2010)



รูปที่ 4.18 วิธีเติมสารมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนสำหรับการวิเคราะห์เชิงปริมาณที่มีผลกระทบจากตัวทำละลาย

ระดับความเข้มข้นของเหล็กในน้ำดิบที่ใช้ทำน้ำประปา น้ำตก น้ำบ่อ น้ำประปา และน้ำดื่ม มีความเข้มข้นที่ไม่เกิน 0.03 ppm สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการอุปโภค และบริโภค ได้โดยไม่มีปัญหาเรื่องสี กลิ่น และรสชาติ เนื่องจากน้ำดื่มและน้ำประปาได้มีกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำให้มีเหล็กอยู่ในระดับที่สามารถนำไปใช้ในการอุปโภคและบริโภคได้ เช่น วิธีเติมอากาศ (aeration) เพื่อทำให้เหล็กในรูปที่ละลายน้ำได้ตกตะกอน และวิธีเติมคลอรีน (chlorination) ซึ่งอาศัยการเติมสารออกซิไดซ์เซอร์ (chemical oxidizer) เพื่อออกซิไดซ์เหล็กที่ละลายน้ำให้กลายเป็นรูปที่ไม่ละลายน้ำ (Bureau of Drinking Water & Groundwater, 2010) เป็นต้น

ขณะที่น้ำบ่อเป็นแหล่งน้ำที่อาศัยการซึมของน้ำผิวดินผ่านชั้นดิน ซึ่งขณะที่ซึมผ่านชั้นดินได้สัมผัสกับอากาศที่อยู่ระหว่างอนุภาคของดิน ส่งผลให้เหล็กในรูปที่ละลายน้ำได้บางส่วนอยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ และเหล็กก็เป็นธาตุที่รากของพืชดูดซึมไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ (Briat, 2009) จึงทำให้มีปริมาณเหล็กในรูปที่ละลายน้ำอยู่ในระดับต่ำ ในส่วนของน้ำดิบที่ใช้ทำน้ำประปาเป็นแหล่งน้ำผิวดินที่ไม่มีการไหลเหมือนกับน้ำคลอง การละลายของเหล็กลงสู่แหล่งน้ำจึงมีไม่มาก และน้ำตกเป็นแหล่งน้ำธรรมชาติที่นำมาใช้ในการอุปโภคบริโภค ซึ่งในการเก็บน้ำตัวอย่างจาก

ครัวเรือน ซึ่งใช้วิธีแกว่งสารส้ม (allum) จึงทำให้ตรวจพบเหล็กในระดับที่ต่ำ เนื่องจากเหล็กในรูปที่ละลายน้ำบางส่วนได้ตกตะกอนไปบ้างแล้วจากขั้นตอนแกว่งสารส้ม

ตารางที่ 4.8 ปริมาณเหล็กในตัวอย่างน้ำที่เก็บจากแหล่งน้ำประเภทต่าง ๆ ใน จ. ภูเก็ต

Sample	Methods				
	Digital camera	Samsung Galaxy S 2	iPhone 5	iPad 3	UV - Vis*
Raw water for tap water	0.016 ± 0.003	0.015 ± 0.004	0.019 ± 0.002	0.018 ± 0.002	0.016 ± 0.003
Water fall (precipitation)	0.021 ± 0.004	0.017 ± 0.002	0.017 ± 0.002	0.025 ± 0.004	0.022 ± 0.002
Canal water	2.741 ± 0.008	2.452 ± 0.005	2.531 ± 0.002	2.534 ± 0.005	2.720 ± 0.004
Shallow well	0.018 ± 0.002	0.014 ± 0.004	0.017 ± 0.002	0.018 ± 0.004	0.019 ± 0.003
Abundant mine	0.071 ± 0.003	0.058 ± 0.003	0.083 ± 0.005	0.084 ± 0.002	0.093 ± 0.003
Ground water	0.121 ± 0.005	0.126 ± 0.004	0.136 ± 0.002	0.114 ± 0.003	0.106 ± 0.004
Tap water	0.028 ± 0.002	0.044 ± 0.004	0.029 ± 0.004	0.020 ± 0.006	0.020 ± 0.003
Drinking water	0.021 ± 0.004	0.022 ± 0.003	0.020 ± 0.005	0.024 ± 0.003	0.024 ± 0.002

* เท่ากับ ใช้สภาวะในการเกิดปฏิกิริยาตามวิธีมาตรฐาน

4.8 การวิเคราะห์ปริมาณเหล็กในยาเม็ดเสริมธาตุเหล็ก

นอกจากการวิเคราะห์เหล็กในน้ำตัวอย่างที่เก็บจากแหล่งน้ำประเภทต่าง ๆ ได้มีการประยุกต์ไปใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณเหล็กที่มีอยู่ในยาเม็ดเสริมธาตุเหล็กที่วางขายตามท้องตลาดทั้งหมด 2 ยี่ห้อ ศึกษาเปรียบเทียบกับกันระหว่างวิธีที่พัฒนามากับวิธีมาตรฐาน ASTM E 394 -

นำสารละลายที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์ความเข้มข้นเหล็กด้วยวิธีการตรวจวัดที่พัฒนาขึ้น พบว่า ความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้อยู่นอกช่วงความเป็นเส้นตรง จึงมีความจำเป็นที่ต้องนำสารละลายเหล็กที่เตรียมได้มาเจือจาง 10 เท่า และนำไปวิเคราะห์ได้ผลออกมาแสดงในตารางที่ 4.9 พบว่า ตัวอย่างหมายเลข 1 ความเข้มข้นของเหล็กของที่วิเคราะห์ด้วยวิธีที่พัฒนาขึ้น เท่ากับ 4.759 ppm (Samsung Galaxy S 2) 4.869 ppm (iPad 3) 4.882 ppm (iPhone 5) และ 4.892 ppm (Digital camera) วิธีมาตรฐานวิเคราะห์ได้ เท่ากับ 4.921 ppm ตัวอย่างหมายเลข 2 ความเข้มข้นของเหล็กที่วิเคราะห์ด้วยวิธีที่พัฒนาขึ้น เท่ากับ 6.492 ppm (Digital camera) 6.502 ppm (Samsung Galaxy S 2) 6.508 ppm (iPad 3) และ 6.520 ppm (iPhone 5) วิธีมาตรฐานวิเคราะห์ได้เท่ากับ 6.512 ppm

ตารางที่ 4.9 การวิเคราะห์ปริมาณเหล็กในยาเสริมธาตุเหล็กที่วางขายในท้องตลาด

Sample	Concentration of Iron (II) (ppm)				
	Digital Camera	Samsung Galaxy S 2	iPhone 5	iPad 3	UV - Vis *
1	4.892 ± 0.080	4.759 ± 0.040	4.882 ± 0.054	4.869 ± 0.065	4.921 ± 0.035
2	6.492 ± 0.042	6.502 ± 0.048	6.520 ± 0.034	6.508 ± 0.054	6.512 ± 0.032

* เท่ากับ ความเข้มข้นสารเคมีตามวิธีมาตรฐาน

ผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.9 มาจากการเจือจางสารละลายลง 10 เท่า ดังนั้นความเข้มข้นจริงจึงสรุปได้ว่าตัวอย่างที่ 1 ความเข้มข้นจริงที่วิธีที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจวัดได้ เท่ากับ 47.59 ppm (Samsung Galaxy S 2) 48.69 ppm (iPad 3) 48.82 ppm (iPhone 5) และ 48.92 ppm (Digital camera) และใกล้เคียงกับวิธีมาตรฐานที่วิเคราะห์ได้ เท่ากับ 49.21 ppm ตัวอย่างที่ 2 ความเข้มข้นจริงที่วิธีที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจวัดได้ เท่ากับ 64.92 ppm (Digital camera) 65.02 ppm (Samsung Galaxy S 2) 65.08 ppm (iPad 3) และ 65.20 ppm (iPhone 5) และใกล้เคียงกับวิธีมาตรฐานที่วิเคราะห์ได้ เท่ากับ 65.12 ppm

ความเข้มข้นจริงของเหล็กในสารละลายที่วิเคราะห์ได้นำไปคำนวณกลับเป็นน้ำหนักของ ferrous sulphate (FeSO_4) ในยาเม็ดตัวอย่างที่ 1 และน้ำหนักของ ferrous fumarate ($\text{C}_4\text{H}_2\text{FeO}_4$) ในยาเม็ดตัวอย่างที่ 2 ด้วยสมการที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.10

$$\text{น้ำหนักของ ferrous sulphate} = (\text{น้ำหนักของเหล็กในหน่วย mg}) \times (151.85 / 55.85) \quad (4.6)$$

$$\text{น้ำหนักของ ferrous furmarate} = (\text{น้ำหนักของเหล็กในหน่วย mg}) \times (169.90 / 55.85) \quad (4.7)$$

ตารางที่ 4.10 การวิเคราะห์น้ำหนักของเฟอร์รัสซัลเฟตและเฟอร์รัสฟูมาเรตในยาเสริมธาตุเหล็กที่วางขายในท้องตลาด

Sample	Weight of ferrous sulphate and ferrous furmarate (mg) in pharmaceutical samples				
	Digital Camera	Samsung Galaxy S 2	iPhone 5	iPad 3	UV - Vis *
1	133.08 ± 0.84	129.39 ± 0.87	132.73 ± 0.54	132.38 ± 0.65	133.79 ± 0.35
2	197.49 ± 0.46	197.79 ± 0.78	198.34 ± 0.34	197.97 ± 0.54	198.10 ± 0.32

* เท่ากับ ความเข้มข้นสารเคมีตามวิธีมาตรฐาน

จากตารางที่ 4.10 พบว่าน้ำหนักของ ferrous sulphate ที่วิเคราะห์ได้จากการใช้ข้อมูลความเข้มข้นจริงที่วิเคราะห์ได้มาคำนวณด้วยสมการ 4.6 สำหรับยี่ห้อที่ 1 มีค่าอยู่ในช่วง 129.39 - 133.79 mg ซึ่งใกล้เคียงกับน้ำหนักที่ฉลากกำกับที่กำหนดไว้ว่ามีน้ำหนักของ ferrous sulphate เท่ากับ 135 mg ต่อเม็ด และใช้สมการ 4.7 สำหรับยี่ห้อที่ 2 พบว่า มีน้ำหนักของ ferrous furmarate ที่วิเคราะห์ได้อยู่ในช่วง 197.49 - 198.10 mg ต่อเม็ดซึ่งใกล้เคียงกับน้ำหนัก ferrous furmarate ที่ระบุไว้ที่ฉลากกำกับยาเท่ากับ 200 mg ต่อเม็ด

จึงสรุปได้ว่าวิธีตรวจวัดที่พัฒนาสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดหาปริมาณเหล็กในตัวอย่างยาเสริมธาตุเหล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพ และใกล้เคียงกับการตรวจวัดด้วยวิธีมาตรฐาน

บทที่ 5

บทสรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุปผลการวิจัย

ชุดทดสอบเบื้องต้นสำหรับการตรวจวิเคราะห์ปริมาณเหล็กที่ได้พัฒนาขึ้นในการศึกษานี้ สามารถลดผลกระทบของแสงภายนอกที่มีผลต่อค่าความเข้มแสงและการดูดกลืนแสง RGB ของผลิตภัณฑ์ได้ และการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสี พบว่า มีสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา ได้แก่ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 5 นาที ความเข้มข้นของสารละลาย 1, 10 - พีแนนโทรีน 900 ppm ความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตตบัฟเฟอร์ 0.20 M และ pH ในหลอดปฏิกิริยาเท่ากับ 3.25 และนำสภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวไปใช้ในการสร้างกราฟมาตรฐานและทดสอบสมรรถนะของวิธีตรวจวัด

วิธีตรวจวัดที่พัฒนาขึ้นมีสมรรถนะใกล้เคียงกับวิธีมาตรฐาน ASTM E 394 - 04 ดังแสดงในตารางที่ 5.1 พิจารณาจากพารามิเตอร์ที่สำคัญ ๆ ได้แก่ ช่วงความเป็นเส้นตรงที่กว้างที่สุดอยู่ระหว่าง 1.00 - 9.00 ppm ความเข้มข้นที่ต่ำสุดที่ตรวจพบได้ เท่ากับ 0.029 - 0.045 ppm และมีความแม่นยำในการตรวจวัดใกล้เคียงกับวิธีมาตรฐาน โดยมีค่าร้อยละความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นที่ตรวจวิเคราะห์ได้กับความเข้มข้นจริง มีค่าเท่ากับ 0.22 - 1.60 ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้เพราะน้อยกว่า 5 % (AWWA, APHA, WOCF, 1989) สำหรับความเที่ยงในการทวนซ้ำของวิธีตรวจวัดแบบระหว่างวัน (interday) และแบบภายในวันเดียวกัน (intraday) มีค่า % RSD เท่ากับ 0.26 - 3.54 ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้เพราะน้อยกว่า 8 % (Greffeuille, *et al.* 2012) นอกจากนี้วิธีตรวจวัดที่พัฒนาขึ้นมีความไวในการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับวิธีมาตรฐานด้วยค่าความชันของสมการเส้นตรงเท่ากับ 0.065 - 0.071

แต่อย่างไรวิธีมาตรฐานก็มีสมรรถนะที่ดีกว่าวิธีตรวจวัดที่พัฒนา เพราะใช้การวัดการดูดกลืนแสงของผลิตภัณฑ์ที่ความยาวคลื่น 510 nm (Shyla, *et al.* 2012) ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่ผลิตภัณฑ์ดูดกลืนแสงได้สูงสุด ทำให้ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเพียงเล็กน้อยได้ดีกว่า ส่งผลให้ช่วงความเป็นเส้นตรงกว้างกว่า ความเข้มข้นต่ำสุดที่ตรวจพบได้มีค่าต่ำกว่า ขณะที่วิธีตรวจวัดที่พัฒนาขึ้นใช้การตรวจวิเคราะห์ความเข้มแสงและการดูดกลืนแสงของสีแดง เจียว และ

น้ำเงิน ซึ่งความยาวคลื่นแสงแต่ละสีไม่ได้เป็นความยาวคลื่นแสงที่ผลิตกันที่จุดคลื่นแสงได้สูงสุด สมรรถนะของวิธีตรวจวัดที่พัฒนาจึงดีกว่าวิธีมาตรฐาน

วิธีการตรวจวัดที่พัฒนาขึ้นสามารถนำมาวิเคราะห์ปริมาณเหล็กในน้ำตัวอย่างจากแหล่งน้ำของจังหวัดภูเก็ตได้ และประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดหาปริมาณเหล็กในยาเม็ดเสริมธาตุเหล็กได้ ให้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับวิธีมาตรฐาน จึงสรุปได้ว่าวิธีที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้งานได้จริง และมีข้อดีกว่าการนำเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรสโกปีขนาดพกพา (portable UV-Vis spectroscopy) ในการตรวจวิเคราะห์เหล็กภาคสนามได้ เนื่องจากชุดอุปกรณ์มีขนาดกระทัดรัด น้ำหนักเบา พกพาได้สะดวก วิธีการวิเคราะห์ไม่ยุ่งยาก ลดผลกระทบที่เกิดจากการปนเปื้อนระหว่างการขนส่งไปยังห้องปฏิบัติการได้ และสามารถลดค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์หลังได้

ตารางที่ 5.1 ประสิทธิภาพและสมรรถนะของวิธีตรวจวัดที่พัฒนา

Methods	Parameters				
	LDR (ppm)	LOD (ppm)	LOQ (ppm)	Accuracy (% difference)	Precision (% RSD)
Digital camera	1.00 - 9.00	0.028 ± 0.002	0.041 ± 0.004	0.44, 0.80	0.26 - 3.52
Samsung Galaxy S 2	1.00 - 7.00	0.042 ± 0.001	0.054 ± 0.001	0.22, 1.60	1.53 - 2.46
iPhone 5	2.00 - 9.00	0.032 ± 0.008	0.043 ± 0.006	0.40, 0.67	0.65 - 3.54
iPad 3	1.00 - 7.00	0.042 ± 0.003	0.056 ± 0.003	1.10, 1.20	0.65 - 1.88
UV-Vis*	0.05 - 10.00	0.020 ± 0.002	0.060 ± 0.002	0.22, 0.40	0.04 - 0.07
UV-Vis**	0.05 - 10.00	0.023 ± 0.004	0.059 ± 0.004	0.22, 0.80	0.05 - 0.08

* ใช้สภาวะมาตรฐานในการเกิดปฏิกิริยา
** ใช้สภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การใช้งานจริงขององค์กรหรือผู้ที่สนใจ ควรสร้างกราฟมาตรฐานใหม่ เพราะอาจมีการใช้กล้องดิจิทัลหรือแอปพลิเคชันในการวัดความเข้มแสงที่ต่างกัน อาจทำให้มีความผิดพลาดในการวิเคราะห์ภาพถ่ายและนำไปสู่การรายงานผลความเข้มข้นของเหล็กที่ผิดพลาดได้

5.2.2 ควรศึกษาผลของไอออนตัวอื่นเพิ่มเติม โดยเน้นไปที่ไอออนของโลหะหนักที่พบได้ทั่วไปในแหล่งน้ำ เพราะโลหะหนักส่วนใหญ่มีผลกระทบต่อค่าการดูดกลืนแสงของสารเชิงซ้อน เช่น เข้าไปรวมตัวกับสาร 1, 10 - ฟิแนนโทรีนแทนไอออนของเหล็กรวมไปถึงทำให้สาร 1, 10 - ฟิแนนโทรีน ตกตะกอนได้

5.2.3 การวิเคราะห์ปริมาณเหล็กจากน้ำตัวอย่าง ควรวิเคราะห์ด้วยวิธีเดิมสารมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบที่เกิดจากตัวทำละลายที่มีอยู่ในน้ำตัวอย่าง

5.2.3 วิธีที่พัฒนาขึ้นใช้แสงสว่างจากหลอดไฟเป็นแหล่งกำเนิดแสง มีปัญหาในการวิเคราะห์ภาคสนามที่ไม่มีแหล่งจ่ายไฟ การพัฒนาในลำดับถัดไปควรแก้ปัญหาในจุดดังกล่าวให้สามารถนำไปใช้งานในการวิเคราะห์ภาคสนามที่ไม่มีแหล่งจ่ายไฟได้

5.2.4 วิธีวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นจำเป็นต้องใช้ความรู้เบื้องต้นทางด้านเคมีวิเคราะห์ ทำให้มีปัญหาในการใช้งานกรณีที่ผู้ใช้งานไม่มีความรู้เบื้องต้นด้านเคมีวิเคราะห์

เอกสารอ้างอิง

- Abbaspour, A., Mehrgardi, M. A., Noori, A., Kamyabi, M. A., Khalafi-Nezhad, A., and Soltani Rad, M. N. (2006). "Speciation of iron(II), iron(III) and full-range pH monitoring using paptode: A simple colorimetric method as an appropriate alternative for optodes." *Sensors and Actuators B: Chemical*, 113(2), 857-865.
- Almog, J., and Zitrin, S. (2009). "Chapter 4 - Colorimetric Detection of Explosives." *Aspects of Explosives Detection*, M. Maurice, and C. O. Jimmie, eds., Elsevier, Amsterdam, 41-58.
- Álvarez, M. A., and Carrillo, G. (2012). "Simultaneous determination of arsenic, cadmium, copper, chromium, nickel, lead and thallium in total digested sediment samples and available fractions by electrothermal atomization atomic absorption spectroscopy (ET AAS)." *Talanta*, 97(0), 505-512.
- APHA, AWWA-WPCF. (1989). *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*, 20th, American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation, Washington, D.C.
- Becker, E. M., Dessuy, M. B., Boschetti, W., Vale, M. G. R., Ferreira, S. L. C., and Welz, B. (2012). "Development of an analytical method for the determination of arsenic in gasoline samples by hydride generation–graphite furnace atomic absorption spectrometry." *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 71–72(0), 102-106.
- Behari, J. R., and Prakash, R. (2006). "Determination of total arsenic content in water by atomic absorption spectroscopy (AAS) using vapour generation assembly (VGA)." *Chemosphere*, 63(1), 17-21.
- Betz, J. M., Brown, P. N., and Roman, M. C. (2011). "Accuracy, precision, and reliability of chemical measurements in natural products research." *Fitoterapia*, 82(1), 44-52.
- Borai, E. H., and Soliman, A. A. (2001). "Monitoring and statistical evaluation of heavy metals in airborne particulates in Cairo, Egypt." *Journal of Chromatography A*, 920(1–2), 261-269.
- Briat, J.-F. (2009). "Mechanisms of iron homeostasis in plants and their regulations."
- Byrne, L., Barker, J., Pennarun-Thomas, G., Diamond, D., and Edwards, S. (2000). "Digital imaging as a detector for generic analytical measurements." *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 19(8), 517-522.

- Capitán-Vallvey, L. F., and Palma, A. J. (2011). "Recent developments in handheld and portable optosensing—A review." *Analytica Chimica Acta*, 696(1–2), 27-46.
- Casana, J. (2008). "Mediterranean valleys revisited: Linking soil erosion, land use and climate variability in the Northern Levant." *Geomorphology*, 101(3), 429-442.
- Červený, V., Horváth, M., and Broekaert, J. A. C. (2013). "Determination of mercury in water samples by electrochemical cold vapor generation coupled to microstrip microwave induced helium plasma optical emission spectrometry." *Microchemical Journal*, 107(0), 10-16.
- Choodum, A., and Nic Daeid, N. (2011). "Rapid and semi-quantitative presumptive tests for opiate drugs." *Talanta*, 86(0), 284-292.
- Colter, A., and Mahler, R. L. (2006). "Iron in Drinking Water. A Pacific Northwest Extension Publication."
- Croot, P. L., and Hunter, K. A. (2000). "Determination of Fe(II) and total iron in natural waters with 3-(2-pyridyl)-5,6-diphenyl-1,2,4-triazine (PDT)." *Analytica Chimica Acta*, 406(2), 289-302.
- Duran, A., Tuzen, M., and Soylak, M. (2010). "Trace element concentrations of some pet foods commercially available in Turkey." *Food and Chemical Toxicology*, 48(10), 2833-2837.
- Eaton, A. D., Franson, M. A. H., Associati, A. P. H., Association, A. W. W., and Federation, W. E. (2005). *Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater*, Amer Public Health Assn.
- Emmanuelle, B., Virginie, M., Fabienne, S., Isabelle, I., Martine, P.-G., Bernard, L., and Sylvie, R. (2012). "Selenium exposure in subjects living in areas with high selenium concentrated drinking water: Results of a French integrated exposure assessment survey." *Environment International*, 40(0), 155-161.
- EURACHEM (1998). "The Fitness for Purpose of Analytical Methods: A Laboratory Guide to Method Validation and Related Topics."
- Farzana Akter, K., Chen, Z., Smith, L., Davey, D., and Naidu, R. (2005). "Speciation of arsenic in ground water samples: A comparative study of CE-UV, HG-AAS and LC-ICP-MS." *Talanta*, 68(2), 406-415.

- Gaiao, E. d. N., Martins, V. L., Lyra, W. d. S., Almeida, L. F. d., Silva, E. C. d., and Araújo, M. C. U. (2006). "Digital image-based titrations." *Analytica Chimica Acta*, 570(2), 283-290.
- Goddijn, L. M., and White, M. (2006). "Using a digital camera for water quality measurements in Galway Bay." *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 66(3-4), 429-436.
- Greffeuille, V., Polycarpe Kayodé, A. P., Icard-Vernière, C., Gnimadi, M., Rochette, I., and Mouquet-Rivier, C. (2011). "Changes in iron, zinc and chelating agents during traditional African processing of maize: Effect of iron contamination on bio accessibility." *Food Chemistry*, 126(4), 1800-1807.
- Harris, D. C. (2003). *Quantitative Chemical Analysis, Sixth Edition*, W. H. Freeman.
- Hatfield, R. G., Cioppa, M. T., and Trenhaile, A. S. (2010). "Sediment sorting and beach erosion along a coastal foreland: Magnetic measurements in Point Pelee National Park, Ontario, Canada." *Sedimentary Geology*, 231(3-4), 63-73.
- Ieggli, C. V. S., Bohrer, D., do Nascimento, P. C., de Carvalho, L. M., and Garcia, S. C. (2010). "Determination of sodium, potassium, calcium, magnesium, zinc, and iron in emulsified egg samples by flame atomic absorption spectrometry." *Talanta*, 80(3), 1282-1286.
- Ityel, D. (2011). "Ground water: Dealing with iron contamination." *Filtration & Separation*, 48(1), 26-28.
- Kabadayi, F., and Cesur, H. (2010). "Determination of Cu, Pb, Zn, Ni, Co, Cd, and Mn in road dusts of Samsun City." *Environmental Monitoring and Assessment*, 168(1), 241-253.
- Kazi, T. G., Wadhwa, S. K., Afridi, H. I., Kazi, N., Kandhro, G. A., Baig, J. A., Shah, A. Q., Kolachi, N. F., and Arain, M. B. (2010). "Interaction of cadmium and zinc in biological samples of smokers and chewing tobacco female mouth cancer patients." *Journal of Hazardous Materials*, 176(1-3), 985-991.
- Kelter, P. B., Carr, J. D., and Scott, A. (2003). *Chemistry: A World of Choices*, McGraw-Hill.
- Kremling, K., Andreae, M. O., Brüggemann, L., van den Berg, C. M. G., Prange, A., Schirmacher, M., Koroleff, E., and Kus, J. (2007). "Determination of trace elements." *Methods of Seawater Analysis*, Wiley-VCH Verlag GmbH, 253-364.
- Lippiatt, S. M., Brown, M. T., Lohan, M. C., Berger, C. J. M., and Bruland, K. W. (2010). "Leachable particulate iron in the Columbia River, estuary, and near-field plume." *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 87(1), 33-42.

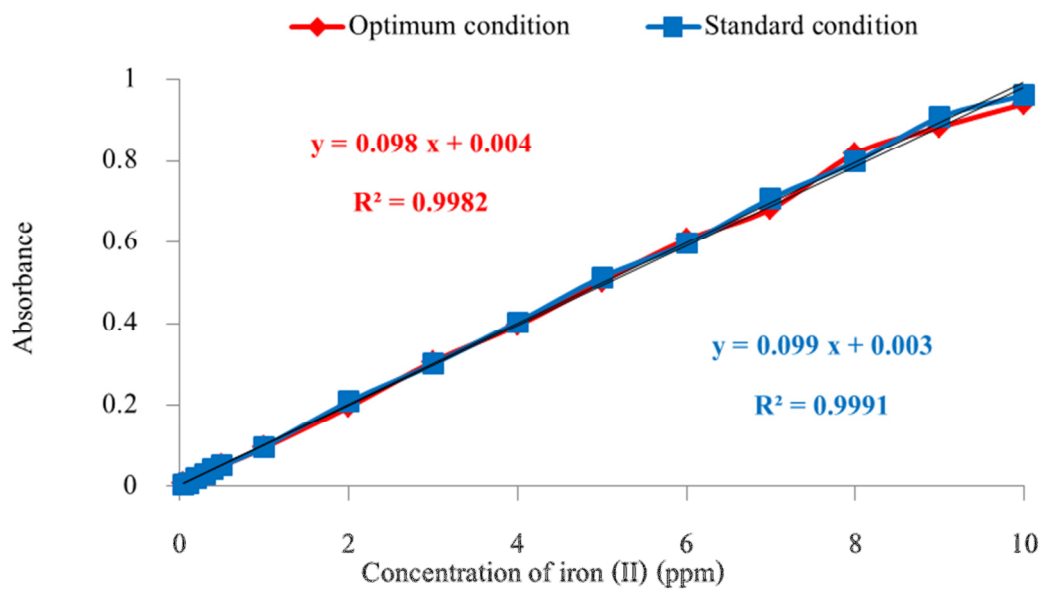
- Lopez-Molinero, A., Liñan, D., Sipiera, D., and Falcon, R. (2010). "Chemometric interpretation of digital image colorimetry. Application for titanium determination in plastics." *Microchemical Journal*, 96(2), 380-385.
- Luo, X.-T., Li, C.-J., and Yang, G.-J. (2013). "Correlations between milling conditions and iron contamination, microstructure and hardness of mechanically alloyed cubic BN particle reinforced NiCrAl matrix composite powders." *Journal of Alloys and Compounds*, 548(0), 180-187.
- Maleki, N., Safavi, A., and Sedaghatpour, F. (2004). "Single-step calibration, prediction and real samples data acquisition for artificial neural network using a CCD camera." *Talanta*, 64(4), 830-835.
- Maranhão, T. d. A., Silva, J. S. A., de Andrade, R. M., Bascuñan, V. L. A. F., de Oliveira, F. J. S., and Curtius, A. J. (2013). "Determination of As and Hg in acetic acid extract by vapor generation coupled to atomic spectrometry for solid waste classification." *Microchemical Journal*, 106(0), 139-146.
- McCleskey, R. B., Nordstrom, D. K., Susong, D. D., Ball, J. W., and Taylor, H. E. (2010). "Source and fate of inorganic solutes in the Gibbon River, Yellowstone National Park, Wyoming, USA. II. Trace element chemistry." *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 196(3-4), 139-155.
- Miller, J. N., and Miller, J. C. (2005). *Statistics and Chemometrics for Analytical Chemistry*, Pearson/Prentice Hall.
- Moreda-Piñeiro, J., López-Mahía, P., Muniategui-Lorenzo, S., Fernández-Fernández, E., and Prada-Rodríguez, D. o. (2002). "Direct As, Bi, Ge, Hg and Se(IV) cold vapor/hydride generation from coal fly ash slurry samples and determination by electrothermal atomic absorption spectrometry." *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 57(5), 883-895.
- Mortazavi Moghaddam, S., Khalaj, P., Bahmanabadi, M., Purmohammad, D., and Abdollahi, S. (2012). "Optimization of dimensions and inner surface of water Cherenkov detector with one photomultiplier tube (PMT) for the Alborz observatory air shower array." *Astroparticle Physics*, 35(12), 792-796.

- Narin, İ., Soylak, M., Elçi, L., and Doğan, M. (2000). "Determination of trace metal ions by AAS in natural water samples after preconcentration of pyrocatechol violet complexes on an activated carbon column." *Talanta*, 52(6), 1041-1046.
- Nollet, L. M. L. (2007). *Handbook of Water Analysis*, CRC Press.
- Oliveira, A. P., Neto, J. A. G., Nóbrega, J. A., Correia, P. R. M., and Oliveira, P. V. (2005). "Determination of selenium in nutritionally relevant foods by graphite furnace atomic absorption spectrometry using arsenic as internal standard." *Food Chemistry*, 93(2), 355-360.
- Paipa, C., Poblete, E., and Toral, M. I. (2006). "Simultaneous determination of iron and copper in pregnant liquid solutions." *Minerals Engineering*, 19(14), 1465-1468.
- Pepper, S. E., Borkowski, M., Richmann, M. K., and Reed, D. T. (2010). "Determination of ferrous and ferric iron in aqueous biological solutions." *Analytica Chimica Acta*, 663(2), 172-177.
- Pereira, L. d. A., de Amorim, I. G., and da Silva, J. B. B. (2004). "Development of methodologies to determine aluminum, cadmium, chromium and lead in drinking water by ET AAS using permanent modifiers." *Talanta*, 64(2), 395-400.
- Poboży, E., Halko, R., Krasowski, M., Wierzbicki, T., and Trojanowicz, M. (2003). "Flow-injection sample preconcentration for ion-pair chromatography of trace metals in waters." *Water Research*, 37(9), 2019-2026.
- Rabinovich, D. (2000). "Advanced Inorganic Chemistry, 6th Edition (Cotton, F. A.; Wilkinson, G.; Murillo, C. A.; Bochmann, M.)." *Journal of Chemical Education*, 77(3), 311.
- Rodríguez, E. M., Fernández, G., Alvarez, P. M., and Beltrán, F. J. (2012). "TiO₂ and Fe (III) photocatalytic ozonation processes of a mixture of emergent contaminants of water." *Water Research*, 46(1), 152-166.
- Savvides, L. (11 September 2011). "Sony Cyber-shot DSC-WX 7". Archived from the original on 8 March July 2012. Retrieved 3 August 2011. < <http://www.cnet.com.au/sony-cyber-shot-dsc-wx7-339309143.htm> >
- Schulin, R., Curchod, F., Mondeshka, M., Daskalova, A., and Keller, A. (2007). "Heavy metal contamination along a soil transect in the vicinity of the iron smelter of Kremikovtzi (Bulgaria)." *Geoderma*, 140(1-2), 52-61.

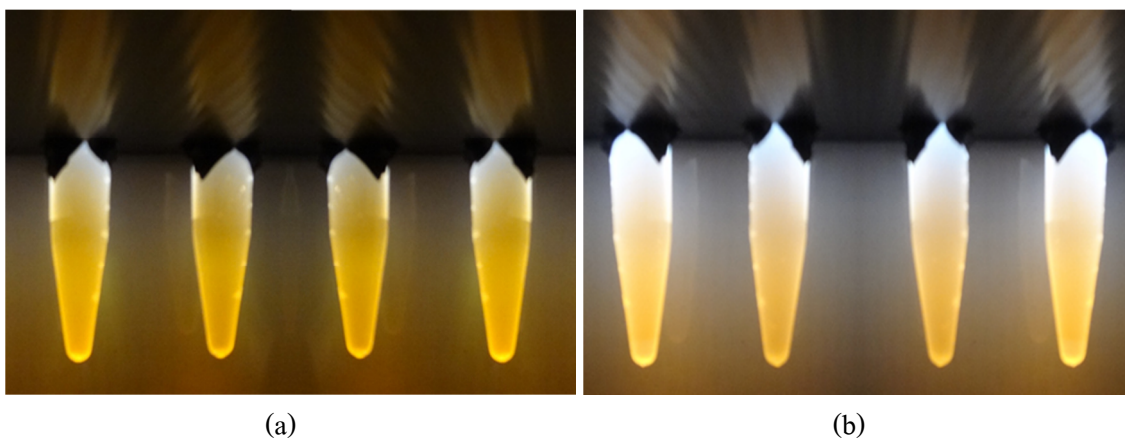
- Shah, A. Q., Kazi, T. G., Baig, J. A., Afridi, H. I., Kandhro, G. A., Khan, S., Kolachi, N. F., and Wadhwa, S. K. (2010). "Determination of total mercury in chicken feed, its translocation to different tissues of chicken and their manure using cold vapour atomic absorption spectrometer." *Food and Chemical Toxicology*, 48(6), 1550-1554.
- Shaw, M. J., and Haddad, P. R. (2004). "The determination of trace metal pollutants in environmental matrices using ion chromatography." *Environment International*, 30(3), 403-431.
- Shyla, B., Bhaskar, C. V., and Nagendrappa, G. (2012). "Iron(III) oxidized nucleophilic coupling of catechol with o-tolidine/p-toluidine followed by 1,10-phenanthroline as new and sensitivity improved spectrophotometric methods for iron present in chemicals, pharmaceutical, edible green leaves, nuts and lake water samples." *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 86(0), 152-158.
- Sohaili, K. (2010). "The Impact of Improvement in Iran Iron and Steel Production Technology on Environment Pollution." *Procedia Environmental Sciences*, 2(0), 262-269.
- Sola-Larrañaga, C., and Navarro-Blasco, I. (2009). "Optimization of a slurry dispersion method for minerals and trace elements analysis in infant formulae by ICP OES and FAAS." *Food Chemistry*, 115(3), 1048-1055.
- Stolpe, B., Guo, L., Shiller, A. M., and Hassellöv, M. (2010). "Size and composition of colloidal organic matter and trace elements in the Mississippi River, Pearl River and the northern Gulf of Mexico, as characterized by flow field-flow fractionation." *Marine Chemistry*, 118(3-4), 119-128.
- Suzuki, T., Moribe, M., Oyama, Y., and Niinae, M. (2012). "Mechanism of nitrate reduction by zero-valent iron: Equilibrium and kinetics studies." *Chemical Engineering Journal*, 183(0), 271-277.
- Tarafder, P. K., and Thakur, R. (2012). "An Optimised 1,10-Phenanthroline Method for the Determination of Ferrous and Ferric oxides in Silicate Rocks, Soils and Minerals." *Geostandards and Geoanalytical Research*, n/a-n/a.
- Tsalev, D. L. (2000). "Vapor generation or electrothermal atomic absorption spectrometry? — Both!" *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 55(7), 917-933

- Thomsen, V., Schatzlein, D., and Mercurio, D. (2003). "Limits of detection in spectroscopy." *Spectroscopy*, 18(12), 112-114.
- Tirez, K., Silversmit, G., Bleux, N., Adriaensens, E., Roekens, E., Servaes, K., Vanhoof, C., Vincze, L., and Berghmans, P. (2011). "Determination of hexavalent chromium in ambient air: A story of method induced Cr(III) oxidation." *Atmospheric Environment*, 45(30), 5332-5341.
- Titretir, S., Şık, A. İ., Arslan, Y., and Ataman, O. Y. (2012). "Sensitivity improvement for antimony determination by using in-situ atom trapping in a slotted quartz tube and flame atomic absorption spectrometry." *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 77(0), 63-68.
- Tufegdizic, P. (3 September 2010). "iPhone 4 Drives Adoption of BSI Image Sensors in Smart Phones". iSuppli. Archived from the original on 19 July 2011. Retrieved 3 August 2011
- Varona, C., Loiseau, P., Aka, G., Ferrand, B., and Lupei, V. "450 nm Blue Laser Emission by Frequency Doubling of CW Oscillation of Neodymium Doped Strontium and Lanthanum Aluminate (Nd:ASL)." Optical Society of America, MD3.
- Venkatasami, G., and Sowa Jr, J. R. (2010). "A rapid, acetonitrile-free, HPLC method for determination of melamine in infant formula." *Analytica Chimica Acta*, 665(2), 227-230.
- Yamanishi, T., Hara, Y., Morita, R., Azuma, K., Fujiwara, E., and Yatsuzuka, M. (2001). "Profile of implanted nitrogen ions in Al alloy for mold materials." *Surface and Coatings Technology*, 136(1-3), 223-225.
- Yıldız, O., Citak, D., Tuzen, M., and Soylak, M. (2011). "Determination of copper, lead and iron in water and food samples after column solid phase extraction using 1-phenylthiosemicarbazide on Dowex Optipore L-493 resin." *Food and Chemical Toxicology*, 49(2), 458-463.

ภาคผนวก



รูปภาคผนวกที่ 1 เปรียบเทียบความไวในการวิเคราะห์ของวิธีที่ใช้สภาวะที่เหมาะสมกับสภาวะมาตรฐานในวิธี UV-Vis spectrometry



รูปภาคผนวกที่ 2 ตัวอย่างภาพถ่ายจากกล้องดิจิทัลเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ความเข้มสี RGB ไปใช้สร้างกราฟมาตรฐาน (a) ความเข้มข้นของเหล็ก 10.00 ppm (b) ความเข้มข้นของเหล็ก 5.00 ppm



รูปภาคผนวกที่ 3 ภาพตัวอย่างชุดทดสอบที่พัฒนา

ตารางภาคผนวกที่ 1. ความเข้มแสงและการดูดกลืนแสง RGB ในการศึกษาผลของเวลาต่อเสถียรภาพของผลิตภัณฑ์

Methods	Time	I_R	I_G	I_B	A_R	A_G	A_B
Digital camera	1	249.19	212.58	188.59	0.0119	0.0791	0.1315
	5	248.62	208.7	178.46	0.0117	0.0872	0.1553
	10	242.4	193.43	165.02	0.0225	0.123	0.1893
	15	242.4	193.43	165.02	0.0225	0.1233	0.1893
	20	241.29	192.99	164.64	0.0243	0.1211	0.1902
	25	240.74	192.99	164.26	0.0254	0.1211	0.1914
	30	240.74	192.99	164.26	0.0254	0.1211	0.1914
Samsung Galaxy S 2	1	247.00	213.00	183.34	0.0138	0.0781	0.1440
	5	247.00	197.03	172.23	0.0138	0.1120	0.1710

ตารางภาคผนวกที่ 1. (ต่อ) ความเข้มแสงและการดูดกลืนแสง RGB ในการศึกษาผลของเวลาต่อเสถียรภาพของผลิตภัณฑ์

Methods	Time	I _R	I _G	I _B	A _R	A _G	A _B
Samsung Galaxy S 2	10	233.44	192.12	167.56	0.0383	0.1232	0.1838
	15	233.67	191.24	163.54	0.0379	0.1255	0.1943
	20	230.50	191.26	164.34	0.0438	0.1255	0.1916
	25	230.33	191.47	164.22	0.0441	0.1245	0.1911
	30	229.00	191.31	163.25	0.0467	0.1248	0.1938
iPhone 5	1	234.24	203.34	172.49	0.0373	0.0990	0.1710
	5	234.12	187.23	172.45	0.0375	0.1346	0.1709
	10	223.05	182.23	163.25	0.0582	0.1464	0.1943
	15	223.56	183.05	163.34	0.0580	0.1440	0.1944
	20	222.81	183.23	162.56	0.0601	0.1432	0.1970
	25	221.74	184.09	162.45	0.0621	0.1417	0.1972
	30	221.65	182.05	162.51	0.0622	0.1467	0.1967
iPad 3	1	234.35	203.34	172.54	0.0373	0.0990	0.1710
	5	234.12	187.45	168.67	0.0372	0.1346	0.1812
	10	223.45	182.53	164.90	0.0582	0.1464	0.1916
	15	223.34	183.33	163.56	0.0583	0.1441	0.1943
	20	222.05	183.66	163.45	0.0601	0.1440	0.1943
	25	221.00	184.33	162.34	0.0621	0.1417	0.1970
	30	221.00	182.66	162.55	0.0621	0.1464	0.1956

ตารางภาคผนวกที่ 2. ความเข้มแสงและการดูดกลืนแสง RGB ในการศึกษาผลของความเข้มข้นสารละลาย 1, 10 - พีแนนโทรลีนต่อเสถียรภาพของผลิตภัณฑ์

Methods	C (ppm)	I _R	I _G	I _B	A _R	A _G	A _B
Digital camera	600	249.77	232.56	202.55	0.0091	0.0411	0.1030
	700	249.19	229.37	190.78	0.0103	0.0462	0.1262
	800	248.05	209.67	180.94	0.0124	0.0852	0.1493
	900	247.76	194.33	166.54	0.0125	0.1181	0.1853
	1000	247.48	193.88	165.02	0.0134	0.1192	0.1892
Samsung Galaxy S 2	600	227.05	212.67	198.33	0.0505	0.0802	0.1098
	700	224.55	210.37	196.67	0.0562	0.0843	0.1142
	800	224.45	209.67	187.66	0.0562	0.0863	0.1346
	900	225.53	204.33	173.33	0.0543	0.0969	0.1684
	1,000	224.67	203.33	172.67	0.0562	0.0990	0.1710
iPhone 5	600	249.77	232.56	202.55	0.0091	0.0411	0.1030
	700	249.19	229.37	190.78	0.0103	0.0462	0.1262
	800	248.05	209.67	180.94	0.0124	0.0852	0.1493
	900	247.76	194.33	166.54	0.0125	0.1181	0.1853
	1,000	247.48	193.88	165.02	0.0134	0.1192	0.1892
iPad 3	600	227.05	212.67	198.33	0.0505	0.0802	0.1098
	700	224.55	210.37	196.67	0.0562	0.0843	0.1142
	800	224.45	209.67	187.66	0.0562	0.0863	0.1346
	900	225.53	204.33	173.33	0.0543	0.0969	0.1684
	1,000	224.67	203.33	172.67	0.0562	0.0990	0.1710

ตารางภาคผนวกที่ 3. ความเข้มแสงและการดูดกลืนแสง RGB ในการศึกษาผลของความเข้มข้นสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตตบัฟเฟอร์ต่อเสถียรภาพของผลิตภัณฑ์

Methods	C (M)	I _R	I _G	I _B	A _R	A _G	A _B
Digital camera	0.15	244.64	207.27	172.40	0.0181	0.0902	0.1703
	0.20	243.52	200.23	167.31	0.0201	0.1052	0.1830
	0.25	241.29	197.943	166.93	0.0241	0.1123	0.1841
	0.30	241.29	193.43	163.88	0.0241	0.1223	0.1923
Samsung Galaxy S 2	0.15	235.25	205.21	172.41	0.0354	0.0943	0.1700
	0.20	233.25	200.12	171.21	0.0391	0.1053	0.1730
	0.25	231.33	198.05	167.93	0.0429	0.1098	0.1814
	0.30	232.25	199.06	169.88	0.0410	0.1076	0.1763
iPhone 5	0.15	232.33	207.25	178.67	0.0410	0.0901	0.1561
	0.20	229.33	192.1.67	171.50	0.0467	0.1230	0.1730
	0.25	222.67	194.67	170.33	0.0601	0.1187	0.1760
	0.30	230.67	191.33	169.50	0.0448	0.1255	0.1786
iPad 3	0.15	220.55	209.23	176.67	0.0641	0.0859	0.1610
	0.20	216.33	198.13	167.21	0.0720	0.1096	0.1832
	0.25	218.67	196.67	167.33	0.0680	0.1142	0.1838
	0.30	217.33	197.67	169.67	0.0700	0.1120	0.1786

ตารางภาคผนวกที่ 4. ความเข้มแสงและการดูดกลืนแสง RGB ในการศึกษาผลของความเข้มข้นสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตตบัฟเฟอร์ต่อเสถียรภาพของผลิตภัณฑ์

Methods	C (M)	I _R	I _G	I _B	A _R	A _G	A _B
Digital camera	0.00	237.97	189.03	164.64	0.0304	0.1312	0.1921
	0.10	237.97	189.03	164.64	0.0304	0.1312	0.1921
	0.20	240.18	190.78	166.16	0.0261	0.1262	0.1863
	0.30	241.29	193.43	166.16	0.0242	0.1212	0.1863
	0.40	241.29	193.43	166.93	0.0242	0.1212	0.1845
Samsung Galaxy S 2	0.00	234.67	185.67	162.67	0.0373	0.1393	0.1970
	0.10	233.33	185.67	164.67	0.0391	0.1393	0.1916
	0.20	232.33	184.33	163.55	0.0410	0.1417	0.1943
	0.30	231.67	183.45	162.55	0.0429	0.14408	0.1970
	0.40	232.67	183.55	164.67	0.0410	0.14428	0.1916
iPhone 5	0.00	225.67	183.33	160.67	0.0543	0.1441	0.2024
	0.10	228.67	183.33	160.67	0.0486	0.1441	0.2024
	0.20	227.67	181.23	159.33	0.0505	0.1488	0.2051
	0.30	225.33	180.67	158.67	0.0543	0.1512	0.2078
	0.40	224.33	179.55	157.33	0.0562	0.1536	0.2106
iPad 3	0.00	229.67	185.33	170.35	0.0467	0.1393	0.1760
	0.10	228.33	187.33	170.33	0.0486	0.1346	0.1760
	0.20	227.67	186.67	169.67	0.0505	0.1370	0.1786
	0.30	225.33	185.67	168.67	0.0543	0.1393	0.1812
	0.40	224.67	186.67	167.67	0.0562	0.1370	0.1838

ตารางภาคผนวกที่ 5. ความเข้มแสงและการดูดกลืนแสง RGB ของสารละลายเหล็กที่มีความเข้มข้น ตั้งแต่ 0.01 - 10.00 ppm

Methods	C (M)	I _R	I _G	I _B	A _R	A _G	A _B
Digital camera	0.01	219.37	224.33	228.76	0.0417	0.0363	0.0301
	0.05	216.70	224.43	228.96	0.0470	0.0361	0.0297
	0.10	214.70	220.87	224.96	0.0510	0.0431	0.0373
	0.20	210.19	211.31	217.30	0.0602	0.0623	0.0524
	0.30	207.16	207.65	210.19	0.0666	0.0699	0.0668
	0.40	198.16	198.75	200.98	0.0858	0.0889	0.0863
	0.50	192.45	193.42	195.26	0.0985	0.1007	0.0988
	1.00	185.43	180.41	182.75	0.1147	0.1264	0.1276
	2.00	188.79	185.62	145.64	0.1069	0.1142	0.2262
	3.00	184.12	173.84	124.45	0.1178	0.1471	0.2944
	4.00	183.99	167.32	104.33	0.1181	0.1593	0.3724
	5.00	182.93	159.00	89.833	0.1206	0.1815	0.4360
	6.00	180.15	150.80	80.91	0.1272	0.2044	0.4814
	7.00	177.30	146.07	68.62	0.1346	0.2183	0.5530
	8.00	162.14	138.49	56.48	0.1729	0.2414	0.6375
9.00	150.51	123.46	43.94	0.2053	0.2913	0.7465	
10.00	147.93	123.46	43.97	0.2128	0.2913	0.7463	
Samsung Galaxy S 2	0.01	246.16	237.17	238.83	0.0153	0.0204	0.0638
	0.05	242.16	243.33	234.12	0.0224	0.0314	0.0670
	0.10	236.67	231.33	227.33	0.0269	0.0429	0.0750
	0.20	228.25	221.83	215.92	0.0482	0.0606	0.0823
	0.30	189.08	188.58	191.75	0.1095	0.1108	0.0963
	0.40	194.75	193.83	194.83	0.1171	0.1391	0.0984
	0.50	190.08	186.58	186.75	0.1276	0.1446	0.1053

ตารางภาคผนวกที่ 5. (ต่อ) ความเข้มแสงและการดูดกลืนแสง RGB ของสารละลายเหล็กที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 0.01 - 10.00 ppm

Methods	C (M)	I _R	I _G	I _B	A _R	A _G	A _B
Samsung Galaxy S 2	1.00	184.25	176.92	174.92	0.1311	0.1587	0.1372
	2.00	185.92	168.92	159.83	0.1472	0.1788	0.1928
	3.00	195.33	167.92	149.33	0.1157	0.1814	0.2323
	4.00	192.25	162.75	141.25	0.1022	0.1950	0.2858
	5.00	203.33	159.83	123.25	0.1098	0.2028	0.3358
	6.00	213.17	156.08	107.42	0.1077	0.2133	0.4060
	7.00	199.67	141.67	93.58	0.1062	0.2552	0.4537
	8.00	198.75	134.33	70.67	0.1083	0.2784	0.5615
	9.00	204.92	131.75	52.75	0.1094	0.2867	0.64411
	10.00	218.00	126.53	36.33	0.1168	0.3044	0.7058
iPhone 5	0.01	209.33	219.33	204.33	0.0857	0.0654	0.0964
	0.05	203.33	215.33	203.53	0.0990	0.0734	0.0979
	0.10	197.33	210.55	202.33	0.1113	0.0832	0.0996
	0.20	197.33	197.17	195.59	0.1114	0.1117	0.11651
	0.30	188.55	181.17	194.54	0.1312	0.1484	0.1142
	0.40	180.83	170.67	187.23	0.1493	0.1760	0.1290
	0.50	165.67	156.33	178.22	0.1891	0.2125	0.1534
	1.00	173.83	156.17	169.53	0.1685	0.2130	0.1800
	2.00	173.83	170.33	144.84	0.1685	0.2135	0.2473
	3.00	172.53	163.67	124.33	0.1698	0.2219	0.3021
	4.00	170.53	161.83	114.33	0.1748	0.1974	0.3581
	5.00	168.33	148.83	95.23	0.1812	0.2338	0.4301
	6.00	16567	149.33	76.43	0.1890	0.2323	0.5107
7.00	160.67	140.67	64.33	0.2024	0.2604	0.5892	

ตารางภาคผนวกที่ 5. (ต่อ) ความเข้มแสงและการดูดกลืนแสง RGB ของสารละลายเหล็กที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 0.01 - 10.00 ppm

Methods	C (M)	I _R	I _G	I _B	A _R	A _G	A _B
iPhone 5	8.00	160.83	140.67	56.83	0.2024	0.2604	0.6606
	9.00	150.83	130.56	48.53	0.2304	0.2909	0.7308
	10.00	150.67	130.33	37.83	0.2304	0.29148	0.8247
iPad 3	0.01	238.33	236.67	236.17	0.0293	0.0324	0.0333
	0.05	233.57	232.55	231.33	0.0382	0.0401	0.0423
	0.10	227.67	226.67	226.53	0.0505	0.0511	0.0514
	0.20	222.67	225.55	220.55	0.0588	0.0534	0.0631
	0.30	211.83	210.83	207.33	0.0805	0.0826	0.0898
	0.40	195.17	195.17	195.83	0.1161	0.1161	0.1124
	0.50	188.33	190.33	189.67	0.1316	0.1270	0.1301
	1.00	181.17	182.67	159.67	0.1484	0.1448	0.1786
	2.00	212.83	194.67	132.34	0.0785	0.1172	0.2413
	3.00	198.33	182.50	121.33	0.1099	0.1452	0.3188
	4.00	197.33	175.83	105.85	0.1113	0.1615	0.3821
	5.00	209.67	170.83	95.833	0.0864	0.1740	0.4468
	6.00	209.13	165.33	79.50	0.0864	0.1882	0.5463
	7.00	209.98	168.17	65.50	0.0864	0.1809	0.5932
8.00	209.5	185.33	56.50	0.0864	0.1899	0.6700	
9.00	209.87	160.83	45.50	0.0864	0.2005	0.7490	
10.00	210.33	156.17	34.45	0.0854	0.2130	0.8772	

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายพีระพงษ์ กำไล		
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5430220007		
วุฒิการศึกษา			
	วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมี)		มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2552

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Pheerapong Kamlai and Worawit Wongniramaikul. (2012). "Optimization of digital image-based colorimetric test for the detection of iron in water", the 1st Annual PSU Phuket International Conference 2012. Prince of Songkla University, Phuket: 10-12 January, 2013.