

การพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษแบบสองชั้นสำหรับตรวจวัด
เหล็ก (II) และเหล็ก (III) ในตัวอย่างน้ำภายในคราวเดียวกัน

DOUBLE-LAYERED PAPER-BASED ANALYTICAL DEVICE
FOR SIMULTANEOUS DETERMINATION OF IRON(II) AND
IRON(III) IN WATER SAMPLES



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ปีการศึกษา 2565
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DOUBLE-LAYERED PAPER-BASED ANALYTICAL DEVICE
FOR SIMULTANEOUS DETERMINATION OF IRON(II) AND
IRON(III) IN WATER SAMPLES



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, SCHOOL OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ **ACADEMIC YEAR 2022** ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษแบบสองชั้นสำหรับตรวจวัดเหล็ก (II) และเหล็ก (III) ในตัวอย่างน้ำภายในคราวเดียวกัน
Double-Layered Paper-based Analytical Device for Simultaneous Determination of Iron(II) and Iron (III) in Water Samples

ชื่อนักศึกษา นายบุญญพัฒน์ สุขโพธารมณธ์ รหัสนักศึกษา 62050307
นายสุรเชษฐ์ ทองจันทร์ รหัสนักศึกษา 62050350

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา เคมี

ปีการศึกษา 2565

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. ดร. ณ์รัฐฉวี เจริญ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2565

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ. ดร. วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ ประธานกรรมการ	
รศ. ดร. เสาวภาคย์ อีราตรง กรรมการ	
ผศ. ดร. ณ์รัฐฉวี เจริญ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษแบบสองชั้นสำหรับตรวจวัดเหล็ก (II) และเหล็ก (III) ในตัวอย่างน้ำภายในคราวเดียวกัน
ชื่อนักศึกษา	นายบุญญพัฒน์ สุขโพธารมณีย์ รหัสนักศึกษา 62050307 นายสุรเชษฐ์ ทองจันทร์ รหัสนักศึกษา 62050350
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา	เคมี
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2565
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. ดร. ณัฐวดี เชิงชั้น

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ นำเสนอการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษแบบสองชั้นสำหรับตรวจวัดเหล็ก (II) ไอออน (Fe (II)) และ เหล็ก (III) ไอออน (Fe (III)) ในตัวอย่างน้ำภายในคราวเดียวกัน อุปกรณ์ตรวจวัดแต่ละชั้นประกอบด้วยส่วนขอบน้ำรูปวงกลม (เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร) ซึ่งอยู่ตรงกลางของอุปกรณ์รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส (ขนาด 25 x 25 ตารางมิลลิเมตร) ระบายสารละลายกาวกันน้ำลงบนกระดาษกรอง Whatman™ เบอร์ 1 เพื่อสร้างลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำ นำแต่ละชั้นมาประกบกันด้วยเทปกาวสองหน้าหนา 3 มิลลิเมตร จะได้อุปกรณ์ตรวจวัดแบบสองชั้น สำหรับวิเคราะห์ Fe (II) และ Fe (III) ด้วยชั้นบนและชั้นล่างตามลำดับ ใช้บาโรไฟแนนโทรีน (Bphen) และ สารอนุพันธ์ใหม่ของฟลูออเรสซิน (NFD) เป็นสารเคมี ในการตรวจวัด Fe (II) และ Fe (III) ขั้นตอนการวิเคราะห์ เริ่มจากปิเปตสารตัวอย่างซึ่งมีทั้ง Fe (II) และ Fe (III) ปะปนกัน หยดลงอุปกรณ์ตรวจวัดชั้นบน ซึ่งจะมีเพียง Fe (II) เท่านั้น ที่ทำปฏิกิริยากับ Bphen อย่างจำเพาะเจาะจง เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนสีแดง จากนั้นสารตัวอย่าง (ซึ่งเหลือเพียง Fe (III)) จะไหลผ่านอุปกรณ์ตรวจวัดชั้นบน ลงสู่อุปกรณ์ตรวจวัดชั้นล่าง ซึ่งได้หยดสารละลายบัฟเฟอร์ KHP พีเอช 7.0 ไว้ก่อนแล้ว ต่อไปจึงพลิกอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษแบบสองชั้น เพื่อหยดสารละลาย NFD บนด้านหลังของอุปกรณ์ตรวจวัดชั้นล่าง ซึ่งจะทำให้เกิดควีนซิงของ NFD จากการทำปฏิกิริยากับ Fe (III) การตรวจวัดทำได้โดยถ่ายรูปอุปกรณ์ตรวจวัดด้วยโทรศัพท์มือถือในกล่องสุติโอควมคุมแสง แล้วจึงประมวลผลความเข้มสีด้วยโปรแกรม ImageJ™ พบว่า ได้ช่วงใช้งานเท่ากับ 0 - 1.2 mg Fe (II) L⁻¹ และ 0 - 10 mg Fe (III) L⁻¹ โดยมีค่าความเป็นเส้นตรงที่ดี ($r^2 > 0.99$) ได้ค่าร้อยละการวิเคราะห์คืนกลับที่น่าพอใจ (ร้อยละ 98.8-106) และมีความเที่ยงสูง (ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ ~ ร้อยละ 5) ยังพบด้วยว่า ปริมาณ Fe (II) ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษแบบสองชั้นที่พัฒนาขึ้นในโครงการพิเศษนี้ และจากเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เมื่อประเมินด้วย Paired *t*-test ($n = 2$ samples, $t_{\text{stat}} = 1.03$, $t_{\text{cri}} = 12.7$) อย่างไรก็ตาม จะได้ทำการทดสอบความถูกต้องของวิธี ในการหาปริมาณ Fe (III) ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยไม่หวังผลตอบแทนใดๆ ในนามของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
คำสำคัญ : อุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษแบบสองชั้น, การวิเคราะห์ปริมาณ, เหล็ก (II), เหล็ก (III), ตัวอย่างน้ำใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Double-Layered Paper-based Analytical Device for Simultaneous Determination of Iron(II) and Iron (III) in Water Samples
Students	Mr.Punyapat Sookpotarom Student ID 62050307 Mr.Surachet Thongchan Student ID 62050350
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)
Department	Chemistry
School	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2022
Advisor	Asst. Prof. Dr. Nathawut Choengchan

Abstract

This work presents development of a double-layered paper-based analytical device (PAD) for the simultaneous determination of Fe (II) and Fe (III) in water. Each layer consists of a circular hydrophilic area (10 mm \varnothing), in the middle of the square PAD (25 x 25 mm²). The hydrophobic area is patterned by painting a “waterproof” glue solution onto a Whatman™ No.1 filter paper. Each layer is mounted together with two-sided tape (3.0 mm thickness) to create the double-layered PAD for the analyses of Fe (II) and Fe (III) on the top and the bottom layers, respectively. Bathophenanthroline (Bphen) and new fluorescein derivative (NFD) are employed as the reagents for the detections of Fe (II) and Fe (III). The measurement is started by pipetting the sample, containing Fe (II) and Fe (III) ions, onto the top layer. Only Fe (II) ions selectively form the stable, red-colored complex with Bphen. Later, the sample (with the remaining Fe (III) ions) flows vertically and penetrates the top platform to contact the bottom layer where KHP buffer (pH 7.0) is previously dropped. The PAD is flipped and the NFD solution is transferred onto the backside of the bottom layer where quenching reaction of NFD by Fe (III) occurs. The optical images of the PAD are captured by a smart phone under a light control studio. The color intensity of the product is evaluated via ImageJ™. Linear working ranges from 0 - 1.2 mg Fe (II) L⁻¹ and 0 - 10 mg Fe (III) L⁻¹ are observed with excellent linearity ($r^2 > 0.99$). Satisfied recovery is obtained (98.8-106 %) with high precision (RSD ~ 5 %). The Fe (II) contents in drinking and tap water samples, determined by the developed PAD

เอกสารนี้ and by uv-visible spectrophotometer, are not significant difference at 95 %
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

confidence by Paired t -test ($n = 2$ samples, $t_{\text{stat}} = 1.03$, $t_{\text{cri}} = 12.7$). Note that the method validation for the Fe (III) determination will be carried out in the next future.

Keywords: Double-layered PAD, Determination, Fe (II), Fe (III), Water samples.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้ สามารถดำเนินการจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับคำแนะนำ และข้อเสนอแนะต่างๆ จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐวุฒิ เจริญชัย อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ และ รองศาสตราจารย์ ดร. เสาวภาคย์ อีราทรง กรรมการสอบโครงการพิเศษที่ได้ให้คำแนะนำ ข้อชี้แนะ และตรวจสอบแก้ไข ข้อมูลต่าง ๆ เพื่อให้รูปเล่มโครงการพิเศษฉบับนี้ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ หน่วยวิจัยเคมีวิเคราะห์เชิงประยุกต์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือและอุปกรณ์วิทยาศาสตร์รวมถึง สถานที่ในการทำวิจัย รวมถึง ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่นักวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องแก้วและสารเคมี

ขอขอบพระคุณ คุณพงศ์พิเชฐ ศรีภักษ์ภูววงศ์ และคุณกัญญาภักดิ์ ตั้งจิตสิริสิน ที่ให้คำแนะนำ และความช่วยเหลือในการดำเนินงานจนสำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่สนับสนุนทางการศึกษาและเป็นกำลังใจให้โครงการพิเศษนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ เพื่อนๆ สาขาเคมีอุตสาหกรรม ที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจอยู่เสมอมา

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าโครงการพิเศษนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้สนใจไม่มากนักน้อย และหากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยขออภัยเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

บุญญพัฒน์ สุขโพธารมณ
สุรเชษฐ์ ทองจันทร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขต.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ข้อมูลทั่วไปของธาตุเหล็กและความเป็นพิษเมื่อปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำ.....	4
2.2 อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ.....	4
2.3 หลักการตรวจวัดธาตุเหล็กที่ใช้ในงานวิจัย.....	5
2.3.1 ปฏิกริยาที่ใช้ตรวจวัด Fe(II).....	5
2.3.2 ปฏิกริยาที่ใช้ตรวจวัด Fe(III).....	5
2.3.3 หลักการตรวจวัด Fe(II) และ Fe(III) ภายในคราวเดียวกันโดยใช้อุปกรณ์.....	6
ตรวจวัดแบบกระดาษแบบสองชั้น	
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.4.1 งานวิจัยที่ใช้วิธีวิเคราะห์เชิงเครื่องมือขนาดใหญ่สำหรับวิเคราะห์ Fe(II).....	7
และ Fe(III) เพียงตัวใดตัวหนึ่ง	
2.4.2 งานวิจัยที่ใช้วิธีวิเคราะห์เชิงเครื่องมือขนาดใหญ่สำหรับวิเคราะห์ Fe(II).....	10
และ Fe(III) เพียงตัวใดตัวหนึ่ง	
2.4.3 งานวิจัยที่ใช้ PAD ในการวิเคราะห์ Fe(II) หรือ Fe(III) เพียงตัวใดตัวหนึ่ง....	14
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	18
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์.....	18
3.1.1 สารเคมี.....	18
3.1.2 อุปกรณ์.....	18
3.2 การเตรียมอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ.....	19
3.2.1 การออกแบบลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำบนอุปกรณ์ตรวจวัด.....	19
3.2.2 การเตรียมอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษแบบชั้นเดียว.....	20
3.2.3 การเตรียมอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษแบบสองชั้น.....	21
3.3 การเตรียมสารละลาย.....	22
3.4 วิธีการทดลอง.....	26

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.1 การศึกษาการสร้างลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำบนกระดาษกรองด้วยกาวกันน้ำ.....	26
3.4.2 การศึกษาหลักการตรวจวัด Fe(II) อาศัยการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน..... ระหว่าง Fe(II)-Bphen	26
3.4.3 การศึกษาหลักการตรวจวัด Fe(III) อาศัยการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน..... ระหว่าง Fe(III)-NFD	27
3.4.4 การศึกษาปฏิกิริยาระหว่าง Bphen กับ Fe(II) บนอุปกรณ์ตรวจวัด..... แบบชั้นเดียว	28
3.4.5 การศึกษาอิทธิพลของ Fe(III) ที่มีผลต่อการทำปฏิกิริยาระหว่าง Fe(II)..... กับ Bphen บนอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษแบบชั้นเดียว	28
3.4.6 การศึกษาปฏิกิริยาระหว่าง NFD กับ Fe(III) บนอุปกรณ์ตรวจวัด..... แบบกระดาษแบบชั้นเดียว	30
3.4.7 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการตรวจวัด Fe(II) และ Fe(III)..... ภายในคราวเดียวกันโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษแบบสองชั้น	30
3.4.7.1 การศึกษาปริมาตรของสารตัวอย่าง.....	30
3.4.7.2 การศึกษาความหนาของเทปกาวที่ใช้แยกชั้นตรวจวัด Fe(II)..... และ Fe(III)	30
3.4.7.3 การศึกษาการเพิ่มความเข้มข้นในการตรวจวัด Fe(II) และ Fe(III).	31
3.4.8 การประเมินคุณลักษณะของวิธีในการตรวจวัด Fe(II) และ Fe(III)..... ภายในคราวเดียวกันโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษแบบสองชั้น	32
3.4.8.1 ความเที่ยง.....	32
3.4.8.2 ค่าร้อยละของการวิเคราะห์คืนกลับ.....	33
3.4.8.3 ความจำเพาะเจาะจงต่อการตรวจวัด Fe(II).....	33
3.4.8.4 ความจำเพาะเจาะจงต่อการตรวจวัด Fe(III).....	34
3.4.8.5 ระดับความเข้มข้นต่ำสุดที่ตรวจวัดได้.....	34
3.4.9 การวิเคราะห์หาปริมาณ Fe(II) และ Fe(III) ในตัวอย่าง.....	35
3.4.10 การทดสอบความถูกต้องของวิธี.....	37
3.4.10.1 วิธีวิเคราะห์ Fe(II) ด้วย UV-Vis.....	37
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	38
4.1 ผลการศึกษาการสร้างลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำบนกระดาษกรองด้วยกาวกันน้ำ.....	38
4.1.1 การทดสอบความสามารถในการกันน้ำของกาว.....	38
4.1.2 การทดสอบความสามารถการกักเก็บน้ำของอุปกรณ์ที่สร้างลวดลายส่วนที่.. ไม่ชอบน้ำด้วยสารละลายกาว	39
4.2 ผลการศึกษาหลักการตรวจวัด Fe(II) อาศัยการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน..... ระหว่าง Fe(II)-Bphen	40
4.3 ผลการศึกษาหลักการตรวจวัด Fe(III) อาศัยการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน..... ระหว่าง Fe(III)-NFD	41

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 ผลการศึกษาปฏิกิริยาระหว่าง Bphen กับ Fe(II) บนอุปกรณ์ตรวจวัดแบบชั้นเดียว	43
4.5 ผลการศึกษาอิทธิพลของ Fe(III) ที่มีผลต่อการทำปฏิกิริยาระหว่าง Fe(II) กับ Bphen บนอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษแบบชั้นเดียว	45
4.6 ผลการศึกษาปฏิกิริยาระหว่าง NFD กับ Fe(III) บนอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ. แบบชั้นเดียว	47
4.7 ผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการตรวจวัด Fe(II) และ Fe(III)..... ภายในคราวเดียวกันโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษแบบสองชั้น	48
4.7.1 ผลการศึกษาปริมาตรของสารตัวอย่าง.....	48
4.7.2 ผลการศึกษาความหนาของเทปกาวที่ใช้แยกชั้นตรวจวัด Fe(II) และ Fe(III)	49
4.7.3 ผลการศึกษาการเพิ่มความเข้มข้นในการตรวจวัด Fe(II) และ Fe(III).....	54
4.8 ผลการประเมินคุณลักษณะของวิธีในการตรวจวัด Fe(II) และ Fe(III) ภายในคราวเดียวกันโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษแบบสองชั้น	58
4.8.1 ความเที่ยง.....	58
4.8.2 ค่าร้อยละของการวิเคราะห์คืนกลับ	59
4.8.3 ความจำเพาะเจาะจงต่อการตรวจวัด Fe(II)	60
4.8.4 ความจำเพาะเจาะจงต่อการตรวจวัด Fe(III)	61
4.8.5 ระดับความเข้มข้นต่ำสุดที่ตรวจวัดได้.....	62
4.9 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณ Fe(II) และ Fe(III) ในตัวอย่าง	65
4.9.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณ Fe(II) และ Fe(III) ในตัวอย่างน้ำดื่ม.....	65
4.9.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณ Fe(II) และ Fe(III) ในตัวอย่างน้ำประปา	69
4.10 ผลการทดสอบความถูกต้องของวิธี.....	73
4.10.1 ผลวิธีการวิเคราะห์ Fe(II) ด้วย UV-Vis.....	73
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	76
เอกสารอ้างอิง	78
ภาคผนวก.....	81
ภาคผนวก ก.....	82
ภาคผนวก ข.....	89
ภาคผนวก ค.....	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางสรุปรวมผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการใช้วิธีวิเคราะห์เชิงเครื่องมือขนาดใหญ่.....	9
สำหรับวิเคราะห์ Fe(II) และ Fe(III) เพียงตัวใดตัวหนึ่ง	
2.2 ตารางสรุปรวมผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการใช้วิธีวิเคราะห์เชิงเครื่องมือขนาดใหญ่.....	13
สำหรับวิเคราะห์ Fe(II) และ Fe(III) ภายในคราวเดียวกัน	
2.3 ตารางสรุปรวมผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการใช้ PAD ในการวิเคราะห์ Fe(II) หรือ Fe(III)...	17
เพียงตัวใดตัวหนึ่ง	
3.1 แสดงการเตรียมสารละลายมาตรฐาน Fe(II) ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	23
3.2 แสดงการเตรียมสารละลายมาตรฐาน Fe(III) ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	24
3.3 แสดงการเตรียมสารละลายสต็อกไอออนโลหะ.....	24
3.4 แสดงการเตรียมสารละลายผสมระหว่าง Fe(II)/Fe(III) ในขวดวัดปริมาตรขนาด.....	29
10 มิลลิลิตร ในการศึกษาอิทธิพลของ Fe(III) ต่อปฏิกิริยาระหว่าง Fe(II) กับ Bphen บน single-layered PAD	
3.5 แสดงการเตรียมสารละลายผสมระหว่าง Fe(II)/Fe(III) ในขวดวัดปริมาตรขนาด.....	31
25 มิลลิลิตร ในการทดลองเพิ่มความเข้มข้นของ Fe	
3.6 แสดงการเตรียมสารละลายผสมระหว่าง Fe(II)/Fe(III) ในขวดวัดปริมาตรขนาด.....	32
10 มิลลิลิตร ในการประเมินหาความเที่ยง	
3.7 แสดงการเตรียมสารละลายผสมระหว่าง Fe(II)/Fe(III) ในขวดวัดปริมาตรขนาด.....	36
25 มิลลิลิตร ในการทดลองหาปริมาณ Fe ในตัวอย่าง	
4.1 แสดงผลการทดลองความหนาของกาวสองหน้าหนา 1 ชั้นที่ปริมาตรต่างๆ.....	50
4.2 แสดงผลการทดลองความหนาของกาวสองหน้าหนา 2 ชั้นที่ปริมาตรต่างๆ.....	50
4.3 แสดงผลการทดลองความหนาของกาวสองหน้าหนา 3 ชั้นที่ปริมาตรต่างๆ.....	51
4.4 แสดงค่า Green intensity ที่วัดซ้ำ 10 ครั้ง.....	58
4.5 ผลการศึกษาการหาปริมาณ Fe(II) และ Fe(III) ใน spiked sample จากการนำค่าสี.....	59
ที่วัดได้จากซอฟต์แวร์ ImageJ™ แทนลงในสมการเส้นตรงจากกราฟมาตรฐาน	
4.6 ผลการศึกษาการหาค่า LOD.....	64
4.7 ผลการศึกษาการหาปริมาณ Fe(II) และ Fe(III) ในตัวอย่างน้ำดื่ม จากการนำค่าสีที่วัด.....	68
ได้จากซอฟต์แวร์ ImageJ™ แทนลงในสมการเส้นตรงจากกราฟมาตรฐาน	
4.8 ผลการศึกษาการหาปริมาณ Fe(II) ในตัวอย่างน้ำดื่ม จากการนำค่าสีที่วัดได้จาก.....	68
ซอฟต์แวร์ ImageJ™ แทนลงในสมการเส้นตรงจากกราฟมาตรฐาน	
4.9 ผลการศึกษาการหาปริมาณ Fe(II) และ Fe(III) ในตัวอย่างน้ำประปา จากการนำ.....	72
ค่าสีที่วัดได้จากซอฟต์แวร์ ImageJ™ แทนลงในสมการเส้นตรงจากกราฟมาตรฐาน	
4.10 ผลการวิเคราะห์ปริมาณ Fe(II) ในตัวอย่างน้ำดื่ม (DW) และตัวอย่างน้ำประปา (TW)....	74
จาก UV-Vis Spectrophotometer	
4.11 แสดงผลเปรียบเทียบการวิเคราะห์ปริมาณ Fe(II) ในตัวอย่างระหว่างวิธีที่พัฒนาขึ้นใหม่	74
(PAD) กับวิธีมาตรฐานที่ใช้เครื่องมือ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้ในวงการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.12 แสดงการเปรียบเทียบผลวิเคราะห์โดยใช้การทดสอบ Paired t-test ที่ระดับ..... ความเชื่อมั่น 95%	75



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง Fe(II) กับ Bphen	5
2.2	แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง Fe(III) กับ NFD.....	5
2.3	แสดงหลักการตรวจวัด Fe(II) และ Fe(III) ภายในคราวเดียวกัน	6
3.1	แสดงลวดลายอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ ก) รูปแบบ PAD ที่ใช้ในการศึกษาเบื้องต้น โดยใช้ดินสอวาดบนกระดาษกรองและภาพถ่าย PAD จริง ข) PAD ที่ออกแบบโดยโปรแกรม Microsoft word และภาพถ่าย PAD จริง	20
3.2	แสดงอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษแบบชั้นเดียวเมื่อทำสารละลายกาวล้อมรอบวงกลม. ก) PAD ที่ใช้ในการศึกษาเบื้องต้นโดยใช้ดินสอวาดบนกระดาษกรอง ข) PAD ที่ออกแบบโดยโปรแกรม Microsoft word	21
3.3	แสดงอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษแบบสองชั้น.....	21
4.1	แสดงผลการทดสอบความสามารถในการกักเก็บน้ำของอุปกรณ์ที่สร้างลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำด้วยกาวกันน้ำที่ละลายในตัวทำละลายเอทานอลที่ความเข้มข้นต่างๆ ในอัตราส่วน 1:1	38
4.2	แสดงผลการทดสอบความสามารถในการกักเก็บน้ำของอุปกรณ์ที่สร้างลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำด้วยกาวกันน้ำที่ละลายในตัวทำละลายเอทานอลที่ความเข้มข้นต่างๆ ในอัตราส่วน 1:1	39
4.3	สเปกตรัมค่าการดูดกลืนแสงของ Bphen (300 μ M) ที่ทำปฏิกิริยากับ Fe(II) ที่ความเข้มข้นต่างๆ (0 – 1.5 mg/L)	40
4.4	แสดง ก) สีของผลิตภัณฑ์ Fe(II)-Bphen เมื่อความเข้มข้นของ Fe(II) เพิ่มสูงขึ้น ข) กราฟมาตรฐานระหว่างค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยที่ความยาวคลื่น 533 นาโนเมตรกับค่าความเข้มข้นของสารมาตรฐาน Fe(II) ที่ความเข้มข้นต่างๆ (0.15 – 1.5 mg/L)	41
4.5	กราฟแสดงค่าการเรืองแสงของ NFD ในสารละลายที่มี Fe(III) ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	42
4.6	แสดง Stern-Volmer's plot ของค่าการเรืองแสงของ NFD ในสารละลายที่มี Fe(III).....	42
4.7	แสดงภาพสีของผลิตภัณฑ์ Fe(II)-Bphen บน single-layered PAD ในช่วงความเข้มข้นของ Fe(II) 0 – 5 มิลลิกรัมต่อลิตร	43
4.8	แสดงกราฟมาตรฐานระหว่างค่าเฉลี่ย Green intensity ที่วัดได้จากซอฟต์แวร์ ImageJ™ กับค่าความเข้มข้นของสารมาตรฐาน Fe(II) (0 – 5 mg/L) บน single-layered PAD	43
4.9	แสดงกราฟมาตรฐานระหว่างค่าเฉลี่ย Green intensity ที่วัดได้จากซอฟต์แวร์ ImageJ™ กับค่าความเข้มข้นของสารมาตรฐาน Fe(II) (0.15 – 1.2 mg/L) บน single-layered PAD	44
4.10	แสดงภาพสีของผลิตภัณฑ์จากการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง Bphen กับ Fe(III) ช่วงความเข้มข้น 0 – 1.2 มิลลิกรัมต่อลิตร บน single-layered PAD	45
4.11	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ย Green intensity ที่วัดได้จากซอฟต์แวร์ ImageJ™ กับค่าความเข้มข้นของสารมาตรฐาน Fe(III) (0 – 1.2 mg/L) บน single-layered PAD	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 แสดงภาพสีของผลิตภัณฑ์ Fe(II)-Bphen บน single-layered PAD ในสภาวะที่มี Fe(III) ในสารละลาย	46
4.13 แสดงกราฟมาตรฐานระหว่างค่าเฉลี่ย Green intensity ที่วัดได้จากซอฟต์แวร์ ImageJ™ กับค่าความเข้มข้นของสารมาตรฐาน Fe(II) (0 – 1.2 mg/L) ในสภาวะที่มี Fe(III) อยู่ในสารละลาย บน single-layered PAD	46
4.14 ภาพถ่ายการเรืองแสงของ NFD เมื่อหยดสารมาตรฐาน Fe(III) ที่ความเข้มข้นต่างๆ (0 – 10.0 mg/L) บน single-layered PAD	47
4.15 แสดงกราฟมาตรฐานระหว่าง ก) ค่า Red intensity ที่วัดได้จากซอฟต์แวร์ ImageJ™ .. ข) ค่า Green intensity ที่วัดได้จากซอฟต์แวร์เดียวกันกับค่าความเข้มข้นของสารมาตรฐาน Fe(III) ที่ความเข้มข้นต่างๆ (0 – 10.0 mg/L) บน single-layered PAD	48
4.16 แสดงภาพถ่ายอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษแบบสองชั้นโดยใช้กาวสองหน้าแบบหนา..... แปะ 2 ชั้นเป็นตัวเพิ่ม Spacer ที่หยด Bphen แล้วทิ้งให้แห้งและหยดสารมาตรฐาน Fe(II) 2 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ปริมาตรต่างๆ (120 – 160 µL)	49
4.17 แสดงภาพถ่าย Double-layered PAD ที่ใช้กาวสองหน้าแบบหนาแปะ 1 ชั้น โดยหยด Bphen ลงด้านบนแล้วหยดสารมาตรฐาน Fe(II) 2 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ปริมาตรต่างๆ (80 – 120 µL)	52
4.18 แสดงภาพถ่าย Double-layered PAD ที่ใช้กาวสองหน้าแบบหนาแปะ 2 ชั้น โดยหยด Bphen ลงด้านบน แล้วหยดสารมาตรฐาน Fe(II) 2 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ปริมาตรต่างๆ (80 – 120 µL)	53
4.19 แสดงภาพถ่าย Double-layered PAD ที่ใช้กาวสองหน้าแบบหนาแปะ 3 ชั้น โดยหยด Bphen ลงด้านบนแล้วหยดสารมาตรฐาน Fe(II) 2 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ปริมาตร 120 ไมโครลิตร	53
4.20 แสดงภาพเปรียบเทียบภาพถ่ายสีของผลิตภัณฑ์ Fe(II)-Bphen บน PAD ชั้นบนของ Double-layered PAD หลังจากหยดสารละลายผสม Fe(II)/Fe(III) ที่ความเข้มข้นของ Fe(II) ต่างๆ (0 – 1.2 mg/L) โดยใช้ปริมาตร 120, 110 และ 100 ไมโครลิตรจำนวน 2 ครั้ง	54
4.21 แสดงกราฟมาตรฐานระหว่างค่า Green intensity ที่วัดค่าสีได้จากซอฟต์แวร์ ImageJ™ กับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน Fe(II) ที่ความเข้มข้นต่างๆ (0 – 1.2 mg/L) เมื่อทำ preconcentration โดยใช้ปริมาตร 120 , 110 และ 100 ไมโครลิตรจำนวน 2 ครั้ง บน Double-layered PAD	55
4.22 แสดงภาพเปรียบเทียบภาพถ่ายการเรืองแสงของ Fe(III)-NFD บน PAD ชั้นล่างของ Double-layered PAD หลังจากหยดสารละลายผสม Fe(II)/Fe(III) ที่ความเข้มข้นของ Fe(III) ต่างๆ (0 – 10.0 mg/L) โดยใช้ปริมาตร 100, 110 และ 120 ไมโครลิตรจำนวน 2 ครั้ง	56
4.23 แสดงกราฟมาตรฐาน ค่า Green intensity ที่วัดค่าสีได้จากซอฟต์แวร์ ImageJ™ กับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน Fe(III) ที่ความเข้มข้นต่างๆ (0 – 10.0 mg/L) เมื่อทำ preconcentration โดยใช้ปริมาตร 100, 110 และ 120 ไมโครลิตรจำนวน 2 ครั้ง บน Double-layered PAD	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้ภายในมหาวิทยาลัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ขออนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งนี้ถือลิขสิทธิ์และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.24 แสดงภาพสีของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาของ Bphen กับโลหะไอออนชนิดอื่น บน single-layered PAD	60
4.25 แสดงการเรืองแสงของ NFD หลังจาก NFD ทำปฏิกิริยากับโลหะไอออนชนิดอื่นบน single-layered PAD	61
4.26 แสดงภาพถ่ายสีของผลิตภัณฑ์ Fe(II)-Bphen ที่ชั้นบนของ Double-layered PAD หลังจากหยดสารละลายผสม Fe(II)/Fe(III) ที่ความเข้มข้นของ Fe(II) ต่างๆ (0 – 0.12 mg/L) จำนวน 2 ครั้ง	62
4.27 แสดงกราฟมาตรฐานระหว่างค่า Green intensity ที่วัดค่าสีได้จากซอฟต์แวร์ ImageJ™ กับ ก) ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน Fe(II) ในช่วงความเข้มข้น 0 – 0.6 มิลลิกรัมต่อลิตร ข) ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน Fe(II) ในช่วงความเข้มข้น 0 – 0.12 มิลลิกรัมต่อลิตร บน Double-layered PAD	62
4.28 แสดงภาพถ่ายการเรืองแสงของ NFD ที่ชั้นล่างของ Double-layered PAD หลังจาก หยดสารละลายผสม Fe(II)/Fe(III) ที่ความเข้มข้นของ Fe(III) ต่างๆ (0 – 1.0 mg/L) จำนวน 2 ครั้ง	63
4.29 แสดงภาพถ่ายสีของผลิตภัณฑ์ Fe(II)-Bphen ที่ชั้นบนของ Double-layered PAD หลังจากหยดสารละลายผสม Fe(II)/Fe(III) ที่ความเข้มข้นของ Fe(II) ต่างๆ (0 – 0.5 mg/L) จำนวน 2 ครั้ง สำหรับหาปริมาณ Fe(II) ในตัวอย่างน้ำดื่ม	65
4.30 แสดงกราฟมาตรฐานระหว่างค่า Green intensity ที่วัดค่าสีได้จากซอฟต์แวร์ ImageJ™ กับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน Fe(II) ที่ความเข้มข้นต่างๆ (0.1 – 0.5 mg/L) บน Double-layered PAD สำหรับหาปริมาณ Fe(II) ในตัวอย่างน้ำดื่ม	65
4.31 แสดงภาพถ่ายการเรืองแสงของ Fe(III)-NFD ที่ชั้นล่างของ Double-layered PAD หลังจากหยดสารละลายผสม Fe(II)/Fe(III) ที่ความเข้มข้นของ Fe(III) ต่างๆ (0 – 10.0 mg/L) จำนวน 2 ครั้ง สำหรับหาปริมาณ Fe(III) ในตัวอย่างน้ำดื่ม	66
4.32 แสดงกราฟมาตรฐานระหว่างค่า Green intensity ที่วัดค่าสีได้จากซอฟต์แวร์ ImageJ™ กับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน Fe(III) ที่ความเข้มข้นต่างๆ (0 – 10.0 mg/L) บน Double-layered PAD สำหรับหาปริมาณ Fe(III) ในตัวอย่างน้ำดื่ม	67
4.33 แสดงภาพถ่ายสีของผลิตภัณฑ์ Fe(II)-Bphen ที่ชั้นบนของ Double-layered PAD หลังจากหยดสารละลายผสม Fe(II)/Fe(III) ที่ความเข้มข้นของ Fe(II) ต่างๆ (0 – 0.5 mg/L) จำนวน 2 ครั้ง สำหรับหาปริมาณ Fe(II) ในตัวอย่างน้ำประปา	69
4.34 แสดงกราฟมาตรฐานระหว่างค่า Green intensity ที่วัดค่าสีได้จากซอฟต์แวร์ ImageJ™ กับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน Fe(II) ที่ความเข้มข้นต่างๆ (0.1 – 0.5 mg/L) บน Double-layered PAD สำหรับหาปริมาณ Fe(II) ในตัวอย่างน้ำประปา	69
4.35 แสดงภาพถ่ายการเรืองแสงของ Fe(III)-NFD ที่ชั้นล่างของ Double-layered PAD หลังจากหยดสารละลายผสม Fe(II)/Fe(III) ที่ความเข้มข้นของ Fe(III) ต่างๆ (0 – 10.0 mg/L) จำนวน 2 ครั้ง สำหรับหาปริมาณ Fe(III) ในตัวอย่างน้ำประปา	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สามารถใช้เพื่อการวิจัยและพัฒนาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.36	71
แสดงกราฟมาตรฐานระหว่างค่า Green intensity ที่วัดค่าสีได้จากซอฟต์แวร์ ImageJ™ กับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน Fe(III) ที่ความเข้มข้นต่างๆ (0 – 10.0 mg/L) บน Double-layered PAD สำหรับหาปริมาณ Fe(III) ในตัวอย่างน้ำประปา	
4.37	73
แสดง ก) สเปกตรัมแสดงค่าการดูดกลืนแสงของ Bphen (300 μ M) เมื่อความเข้มข้นของ Fe(II) เพิ่มสูงขึ้น (0 – 1.2 mg/L) ข) กราฟมาตรฐานระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารมาตรฐาน Fe(II) (0 – 1.2 mg/L)	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
PAD	Paper-based analytical device
Bphen	Bathophenanthroline
NFD	New-fluorescein derivative



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เหล็กมีความสำคัญต่อร่างกายมนุษย์ อาทิ เป็นองค์ประกอบในเม็ดเลือดมีหน้าที่ลำเลียงออกซิเจนและลำเลียงอิเล็กตรอนรวมถึงการสังเคราะห์ฮีโมโกลบิน อาจตรวจพบเหล็กปนเปื้อนได้ในแหล่งน้ำตามธรรมชาติจากการระบายน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดที่ไม่ได้มาตรฐานจากภาคอุตสาหกรรม ทำให้เกิดความเป็นพิษต่อแหล่งน้ำ นอกจากนี้ยังอาจพบเหล็กปนเปื้อนในน้ำประปาได้หากท่อประปาผุกร่อนและเป็นสนิม จากข้อมูลของการประปาส่วนภูมิภาคพบว่าควมมีธาตุเหล็กในน้ำไม่เกิน 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร [1] และเนื่องจากปัจจุบันสามารถบริโภคน้ำประปาเป็นน้ำดื่มได้ หากร่างกายได้รับเหล็กมากเกินไปจะทำให้เสี่ยงต่อโรคมะเร็ง โรคหัวใจ และโรคอื่นๆ โดยในธรรมชาติมีการพบเหล็กสองสปีชีส์ได้แก่ Fe(II) กับ Fe(III) การตรวจวัดธาตุเหล็กในแหล่งน้ำจึงต้องคำนึงถึงสปีชีส์ของเหล็กและความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นควรจะมีการตรวจวัดทั้ง Fe(II) และ Fe(III) ภายในคราวเดียวกันเพื่อเฝ้าระวังการปนเปื้อน

เครื่องมือที่วิเคราะห์ Fe(II) และ Fe(III) ได้แก่ UV-visible spectrophotometer [2], Fluorometer [3] เครื่องมือเหล่านี้มีทั้งความเที่ยง ความแม่นยำและความจำเพาะเจาะจงสูงแต่จากงานวิจัยข้างต้น [2,3] พบว่าเสนอวิธีการวิเคราะห์ Fe(II) หรือ Fe(III) เพียงตัวใดตัวหนึ่งเท่านั้น ถ้าหากต้องการทราบปริมาณทั้ง Fe(II) และ Fe(III) ภายในคราวเดียวกันจะต้องใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ตรวจวัด อาทิเช่น Flame atomic absorption Spectrometer (FAAS) [4] , HPLC-MIP OES , HPLC-ICP OES [5] , Potentiometer [6] , Flow injection [7] อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าเครื่องมือและอุปกรณ์เหล่านี้จะมีทั้งความเที่ยงและความแม่นยำสูงแต่ก็มีราคาแพง ต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญในการใช้งานและต้องวิเคราะห์ภายในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ไม่สามารถพกพาไปใช้งานภาคสนามได้ จึงจำเป็นต้องมีวิธีหรือเครื่องมือขนาดเล็กที่ใช้การตรวจวัด ณ แหล่งเก็บตัวอย่าง

อุปกรณ์การตรวจวัดบนกระดาษ (Paper-based analytical device, PAD) คืออุปกรณ์การตรวจวัดที่ใช้กระดาษเป็นวัสดุหลักในการประดิษฐ์ และสามารถกำหนดขอบเขตของบริเวณการตรวจวัดได้โดยการสร้างลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำเพื่อควบคุมทิศทางการไหลของของเหลวบนกระดาษ ซึ่งประวัติความเป็นมาของการตรวจวัดบนกระดาษมาจากแนวคิดของ J. P. Comer [8] ที่ริเริ่มนำกระดาษมาตรวจวัดกลูโคสในปัสสาวะ ต่อจากนั้นเริ่มมีการบัญญัติศัพท์โดยใช้คำ ‘อุปกรณ์การตรวจวัดบนกระดาษ’ อย่างชัดเจนจากงานวิจัยของ G. M. Whitesides [9] ที่ตรวจวัดกลูโคสและคลอรีนิน อุปกรณ์ตรวจวัดชนิดนี้สามารถผลิตและใช้งานง่ายไม่จำเป็นต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญในการใช้วิเคราะห์ ราคาถูก ตรวจวัดได้อย่างรวดเร็ว พกพาได้ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าสามารถใช้ PAD เพื่อลดข้อจำกัดของการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือในแง่ของการใช้งานภาคสนามได้ ในปัจจุบันได้มีการนำ PAD มาใช้ในการวิเคราะห์ Fe(II) และ Fe(III) [10] หรืออาจมีการเปลี่ยนเหล็กให้กลายเป็นตัวใดตัวหนึ่งแล้วตรวจวัดด้วย PAD [11,12] ซึ่งวิธีเหล่านี้มีความไวและความจำเพาะเจาะจงสูงแต่จะตรวจวัด Fe(II) หรือ Fe(III) ได้เพียงอย่างเดียวเท่านั้น เพราะฉะนั้นจึงต้องมีการพัฒนา PAD ที่สามารถตรวจวัดได้ทั้ง Fe(II) และ Fe(III) ในคราวเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยนี้จึงสนใจจะพัฒนา PAD เพื่อใช้ตรวจวัด Fe(II) และ Fe(III) ได้ในคราวเดียวกันบนอุปกรณ์ 1 ชั้นในแหล่งน้ำ จะออกแบบ PAD โดยประดิษฐ์จากกระดาษกรองที่ใช้ตามห้องปฏิบัติการทั่วไป แล้วนำมาประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแบบสองชั้น (Double-layered PAD) เพื่อให้เกิดการจำแนกการตรวจวัด Fe(II) กับ Fe(III) โดยจะสร้างลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำด้วยกาวกันน้ำโดยใช้พู่กันทา ลงบนกระดาษ ซึ่งการตรวจวัด Fe(II) อาศัยปฏิกิริยาการเกิดสารเชิงซ้อนระหว่าง Fe(II) กับบาโธฟีแนนทรีน (Bathophenanthroline, Bphen) และการตรวจวัด Fe(III) อาศัยปฏิกิริยาการเกิด Quenching ของสารอนุพันธ์ฟลูออเรสซินชนิดใหม่ (New-fluorescein derivative, NFD) ที่สังเคราะห์ขึ้นเองในห้องปฏิบัติการ โดยจะติดตามผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการบันทึกภาพด้วยกล้อง โทรศัพท์มือถือ แล้วประมวลผลภาพด้วย ImageJ™ ซึ่งงานวิจัยนี้มีข้อดีคือ PAD มีน้ำหนักเบา ราคาถูก ผลิตได้ง่าย ต้นทุนต่ำ และวิเคราะห์ได้รวดเร็วเมื่อเทียบกับการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ อีกทั้งยังสามารถตรวจวัด Fe(II) และ Fe(III) ในคราวเดียวกันได้ โดยคาดว่าจะสามารถประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุเหล็กในแหล่งน้ำได้อย่างถูกต้อง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาการเตรียม PAD โดยการสร้างลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำด้วยกาวกันน้ำ
- 2) เพื่อศึกษาการนำ Bphen มาใช้ในการตรวจวัด Fe(II) และศึกษาการนำ NFD มาใช้ในการตรวจวัด Fe(III)
- 3) เพื่อศึกษาการตรวจวัด Fe(II) และ Fe(III) พร้อมกันบน PAD โดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดแบบสองชั้น
- 4) เพื่อนำวิธีการตรวจวัดเหล็กที่พัฒนาขึ้นมาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดหาปริมาณเหล็กในตัวอย่างน้ำแบบภาคสนาม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

เริ่มจากออกแบบและเตรียม PAD อย่างง่ายแบบ 1 ชั้น (Single-layered PAD) เพื่อใช้ในการทดสอบการสร้างลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำบน PAD จากกาวกันน้ำ โดยละลายกาวในสารละลายเอทานอลและศึกษาความสามารถในการกันน้ำ หลังจากนั้นศึกษาการตรวจวัด Fe(II) จะอาศัยปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง Fe(II)-Bphen และการตรวจวัด Fe(III) ที่อาศัยการเกิด Quenching ของ NFD โดยใช้เครื่อง Fluorometer ทั้งสองปฏิกิริยาแล้วศึกษาอัตราส่วนจำนวนโมลที่ทำปฏิกิริยาพอดีระหว่าง Fe(II) กับ Bphen และ Fe(III) กับ NFD รวมถึงศึกษาความจำเพาะเจาะจงในการทำปฏิกิริยาเทียบกับไอออนโลหะอื่นๆ จากนั้นศึกษาการทำปฏิกิริยาระหว่าง Fe(II) กับ Bphen และ Fe(III) กับ NFD บน Single PAD โดยติดตามด้วยการถ่ายภาพผลิตภัณฑ์บนกระดาษและการประมวลผลรูปด้วย ImageJ™ ในลำดับถัดไปจะได้ออกแบบและสร้าง Double-layered PAD เพื่อให้สามารถตรวจวัดทั้ง Fe(II) กับ Fe(III) ในคราวเดียวกัน และหาสภาวะที่เหมาะสมในการตรวจวัด เช่น ปริมาณน้ำตัวอย่างและสารละลายเคมีที่จะหยดบน PAD เวลาในการทำปฏิกิริยา เอกสารนี้ ระยะเวลาในการถ่ายรูป และความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ทำปฏิกิริยา ขึ้นต่อไปจะประเมินไม่ว่าการ คุณลักษณะของวิธีการตรวจวัดและนำไปประยุกต์ใช้เพื่อตรวจวัดปริมาณ Fe(II) กับ Fe(III) ในตัวอย่าง

น้ำแล้วจึงทดสอบความถูกต้องของวิธีโดยเทียบผลวิเคราะห์ที่ได้จากวิธีมาตรฐานที่ผ่านเครื่องมือที่มีความแม่นยำและความเที่ยงสูง แล้วรวบรวมผลการวิจัยเพื่อเผยแพร่ต่อไป

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถสร้างลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำบน PAD ด้วยกาวกันน้ำได้เป็นผลสำเร็จ
- 2) สามารถนำ Bphen มาใช้ในการตรวจวัด Fe(II) และสามารถนำ NFD มาใช้ในการตรวจวัด Fe(III) บน PAD ได้อย่างจำเพาะเจาะจง
- 3) สามารถนำ Double-layered PAD มาใช้ในการตรวจวัดทั้ง Fe(II) กับ Fe(III) ที่มีความไวในการวิเคราะห์สูง
- 4) วิธีการตรวจวัดหลักที่พัฒนาขึ้นสามารถหาปริมาณหลักในตัวอย่างน้ำได้อย่างง่ายและมีประสิทธิภาพและให้ผลการวิเคราะห์ที่น่าพึงพอใจ และสามารถนำ PAD มาใช้ในภาคสนามได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้อมูลทั่วไปของธาตุเหล็กและความเป็นพิษเมื่อปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำ

ธาตุเหล็กเป็นธาตุโลหะทรานซิชัน ลักษณะเป็นสีเทาแวววาว มีสัญลักษณ์ธาตุ คือ Fe มีเลขอะตอม 26 น้ำหนักอะตอม 55.845 amu โดยในธรรมชาติมีการพบเหล็กสองสปีชีส์ได้แก่ Fe(II) กับ Fe(III) สามารถละลายน้ำได้ดี ในปัจจุบันธาตุเหล็กส่วนมากจะนำไปใช้กับอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมก่อสร้างใช้ผลิตเหล็กหล่อและเหล็กกล้า, อุตสาหกรรมประเภทการประปาใช้ผลิตท่อและข้อต่อต่างๆ ในการขนส่งน้ำประปา, อุตสาหกรรมยานยนต์ในการผลิตโครงรถ และอุตสาหกรรมยา ใช้เป็นยารักษาโรคและอาหารเสริม เป็นต้น

เนื่องจากธาตุเหล็กเป็นธาตุที่สามารถละลายน้ำได้และมีการใช้งานในภาคอุตสาหกรรมที่หลากหลาย ทำให้อาจเกิดการปนเปื้อนของธาตุเหล็กสู่แหล่งน้ำธรรมชาติจากการระบายน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมโดยไม่ผ่านการบำบัดหรือมีการบำบัดที่ไม่ได้มาตรฐาน ทำให้เกิดความเป็นพิษต่อแหล่งน้ำ จากข้อมูลของการนิคมอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย ธาตุเหล็กในน้ำเสียหลังบำบัดควรมีไม่เกิน 10 มิลลิกรัมต่อลิตร [13] นอกจากนี้ยังอาจพบเหล็กปนเปื้อนในน้ำประปาได้หากท่อประปาผู้กร่อนและเป็นสนิม จากข้อมูลของการประปาส่วนภูมิภาคและกรมอนามัยพบว่าควรมีธาตุเหล็กในน้ำไม่เกิน 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร [1] ถ้าหากน้ำที่มีปริมาณเหล็กสูงเกิน 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำจะมีกลิ่นคาวและมีรสชาติของเหล็ก และเนื่องจากปัจจุบันสามารถบริโภคน้ำประปาเป็นน้ำดื่มได้ หากร่างกายได้รับเหล็กมากเกินไปจะทำให้เสี่ยงต่อการเกิดภาวะพิษจากโลหะหนัก (heavy metal poisoning) เกิดอนุมูลอิสระที่ร่างกายกำจัดไม่หมด จนทำให้เกิดความเสียหายต่อโปรตีนต่างๆ ในร่างกาย แลส่งผลเสียต่อการทำงานของอวัยวะต่างๆ โดยเฉพาะอาการผิดปกติต่อหัวใจ ซึ่งสาเหตุเหล่านี้นำไปสู่ภาวะหัวใจล้มเหลว (heart failure) [14] นอกจากนี้ยังพบปัญหาทางสิ่งแวดล้อมในด้านการเพาะปลูก โดยหากมีปริมาณเหล็กในดินมากกว่า 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะส่งผลกับพืชทำให้มีอาการใบสีเหลือง หรือสีทองแดงโดยเฉพาะในข้าว [15]

2.2 อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ

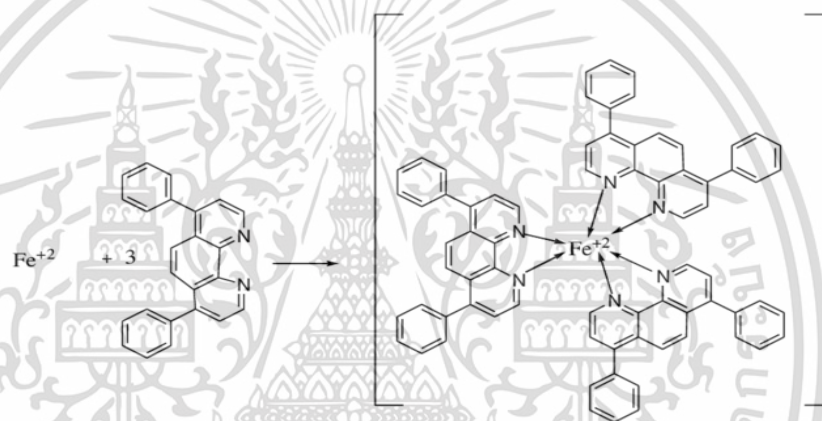
อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ (paper-based analytical devices, PAD) เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดที่ใช้วัสดุหลักในการสร้างคือกระดาษ โดยสามารถกำหนดขอบเขตของบริเวณการตรวจวัดได้ โดยการสร้างลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) เป็นลวดลายต่างๆ เพื่อควบคุมทิศทางการไหลของของเหลวบนกระดาษ และบริเวณที่เหลือซึ่งเป็นกระดาษที่มีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) จะใช้เป็นส่วนตรวจวัด วิธีการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษสามารถทำได้หลายวิธีเช่น การพิมพ์ด้วยแสง (Photolithography) [9,16] การพิมพ์ด้วยขี้ผึ้ง (Wax printing) [17] การพิมพ์ด้วยหมึกกันน้ำ (Automatic plotting) [18] การประทับตรา (Stamping) การวาดด้วยมือ (Manual plotting) การสกรีน (Screen printing) และการใช้สเปรย์ (Spraying) หลังจากเกิดผลิตภัณฑ์ที่มีสีบนกระดาษแล้ว สามารถนำไปอ่านค่าสีของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นด้วยการถ่ายรูปหรือการ

แสดกน แล้วใ้โปรแกรม Adobe® หรือ Photoshop® ในรูลแบบ greyscale หรือ CMYK colour [9] หรือใ้ซอฟต์แวร์ Image™ อ่านค่าสีในรูลแบบ greyscale [9,19] หรือ RGB colour [11] อุปกรณ์ตรวจวัดชนิดนี้ สามารถผลิตและใ้ใช้งานง่ายไม่จำเป็นต้งใ้ผู้เชี่ยวชาญในการใ้วิเคราะห์ราคาถูก ตรวจวัดได้อย่างรวดเร็ว พกพาได้ และสามารถใ้แล้วทั้งได้

2.3 หลักการตรวจวัดธาตุเหล็กที่ใ้ในงานวิจัย

2.3.1 ปฏิกริยาที่ใ้ตรวจวัด Fe(II)

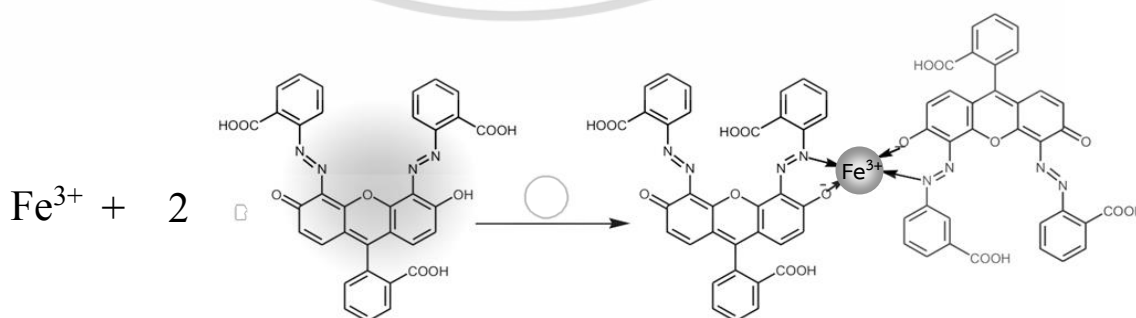
การวิเคราะห์หาปริมาณ Fe(II) จะอาศัยปฏิกริยาระหว่าง Fe(II) กับ Bphen ในอัตราส่วน 1:3 ผลิตภันท์ที่ได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีสีแสดกที่สามารกเห็นได้ด้วยตาเปล่า ปฏิกริยาที่เกิตขึ้นเป็นดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดกกลไกการเกิตปฏิกริยาระหว่าง Fe(II) กับ Bphen

2.3.2 ปฏิกริยาที่ใ้ตรวจวัด Fe(III)

การวิเคราะห์หาปริมาณ Fe(III) จะอาศัยการ Quenching ของ NFD ทำให้การเรืองแสงของ NFD ลดลง ในสภาวะปกติ NFD เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง UV จะเรืองแสงสีเขียวและเมื่อทำปฏิกริยากับ Fe(III) ในอัตราส่วน 1:2 การเรืองแสงสีเขียวจะลดลง ปฏิกริยาที่เกิตขึ้นเป็นดังรูปที่ 2.2

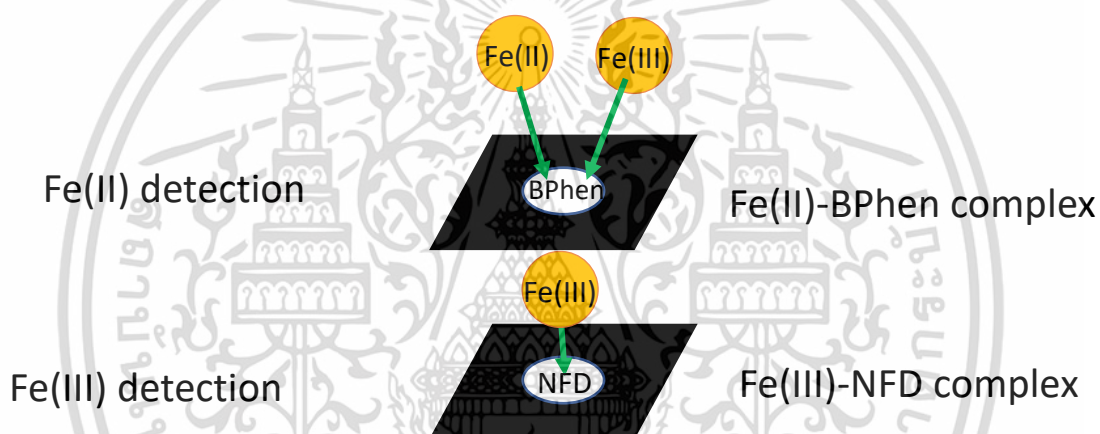


รูปที่ 2.2 แสดกกลไกการเกิตปฏิกริยาระหว่าง Fe(III) กับ NFD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ใ้รับการใ้ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุยวใ้ทำใ้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิใ้ดัดแปลงเนื้อหาและต้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใ้

2.3.3 หลักการตรวจวัด Fe(II) และ Fe(III) ภายในคราวเดียวกันโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษแบบสองชั้น

การหาปริมาณ Fe(II) และ Fe(III) จะใช้ PAD แบบ 2 ชั้นในการตรวจวัด โดยชั้นบนจะใช้สำหรับตรวจวัด Fe(II) ด้วย Bphen ที่มีความจำเพาะเจาะจงต่อ Fe(II) สูง และชั้นล่างจะใช้สำหรับตรวจวัด Fe(III) ด้วย NFD วิธีตรวจวัดจะทำ preconcentration คือหยดสารตัวอย่าง 2 ครั้ง เมื่อหยดสารตัวอย่างลงชั้นบน Fe(II) จะเกิดปฏิกิริยากับ Bphen ให้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีสีแดง ซึ่งสีแดงจะเข้มข้นเมื่อความเข้มข้นของ Fe(II) เพิ่มมากขึ้น จากนั้น Fe(III) ที่ไม่เกิดปฏิกิริยากับ Bphen จะไหลลงชั้นล่าง สุดท้ายจะหยด NFD ลงในชั้นล่างเพื่อให้เกิดปฏิกิริยากับ Fe(III) ซึ่งจะทำให้การเรืองแสงของ NFD ภายใต้แสงยูวีลดลงเมื่อความเข้มข้นของ Fe(III) เพิ่มมากขึ้น จากนั้นจะถ่ายรูปสีของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นและการเรืองแสงที่ลดลงด้วยกล้องโทรศัพท์มือถือ และนำไปประมวลผลภาพด้วยซอฟต์แวร์ ImageJ™ และนำค่าที่อ่านได้ไปสร้างกราฟมาตรฐาน



รูปที่ 2.3 แสดงหลักการตรวจวัด Fe(II) และ Fe(III) ภายในคราวเดียวกัน

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.4.1 งานวิจัยที่ใช้วิธีวิเคราะห์เชิงเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ Fe(II) หรือ Fe(III) เพียงตัวใดตัวหนึ่ง

A. S. Andreani และคณะ [2] ได้เสนอเซนเซอร์ตรวจวัดสีที่รวดเร็วและจำเพาะต่อ Fe(III) โดยใช้อนุภาคนาโนทองคำที่หุ้มด้วยออร์โธไฮดรอกซีเบนโซอิกแอซิด (Gold nanoparticles capped with ortho-hydroxybenzoic acid, o-HBA AuNPs) ซึ่งพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยยูวี-วิซิเบิล สเปกโตรสโกปี ฟลูออโรสโคปี อินฟราเรด สเปกโตรสโกปี (FTIR) เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็กโตเมตรี (XRD) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) โดยมีค่าการดูดกลืนแสงของคลื่นผิวพลาสมอน (Surface plasmon resonance, SPR) ที่ 534 นาโนเมตร เพิ่มขึ้นหลังจากหอด Fe(III) ซึ่งจากผลของการพิสูจน์เอกลักษณ์ทำให้ทราบว่า Fe(III) ทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมสารยึดเกาะ (Capping agent) ของ AuNPs และทำให้เกิดบริดจ์บล็อกของ AuNPs ซึ่งก่อให้เกิดการแจกแจงยูนิฟอร์มของ o-HBA AuNPs ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม เซนเซอร์ชนิดนี้ให้แนวโน้มความเป็นเส้นตรงที่ดีในช่วงความเข้มข้นของ Fe(III) 0 – 1000 ไมโครโมลาร์ ที่ความยาวคลื่น 534 นาโนเมตร พบ R^2 เท่ากับ 0.9994 โดยมีขีดจำกัดการตรวจวัด (LOD) ที่ 9.19 ไมโครโมลาร์ และขีดจำกัดการตรวจวัดเชิงปริมาณ (LOQ) อยู่ที่ 30.57 ไมโครโมลาร์ เซนเซอร์นี้ให้ความแม่นยำและความเที่ยงตรงในการตรวจวัด Fe(III) ในตัวอย่างน้ำในนาข้าว แม่น้ำ และน้ำทะเล และสามารถนำไปตรวจวัดตัวอย่างน้ำจริงที่เก็บจากหลากหลายพื้นที่ในแม่น้ำโค็ด เมืองยอกยาคารตา ประเทศอินโดนีเซีย

D. A. K. Senanayake และคณะ [3] ได้เสนอการใช้ Bathophenanthroline (Bphen) ในการตรวจวัด Fe(II) ด้วยเครื่องสเปกโตรฟลูออโรมิเตอร์ โดยจะศึกษาผลของ pH ที่มีต่อค่าความเข้มของการเรืองแสงของ Bphen และค่าคงที่การ quenching ของ Fe(II) ที่ค่า pH ต่างๆ โดยใช้อะซิเตตบัฟเฟอร์เป็นตัวปรับค่า pH ความเข้มของการเรืองแสงของสารละลาย Bphen 3.0 ไมโครโมลาร์ในเอทานอล 50% ที่มีอะซิเตตบัฟเฟอร์ pH 6.6 มีความจำเพาะเจาะจงอย่างมากในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับ Fe(II) ที่ 25 องศาเซลเซียส โดยมีขีดจำกัดการตรวจวัด (Limit of detection, LOD) ที่ 19 นาโนโมลาร์ที่ 3.3 σ และช่วงความเป็นเส้นตรงที่ 63 – 224 นาโนโมลาร์ โดยมี $R^2 = 0.9919$ วิธีนี้มีความไวมากกว่าวิธีวัดค่าสี (ช่วงการตรวจจับ = 1.8 – 18 ไมโครโมลาร์) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาอุณหภูมิที่มีผลต่อการ quenching ของสารเชิงซ้อน Fe(II)-Bphen และยังคงศึกษาการรบกวนจากไอออนอื่นๆ ต่อการเรืองแสงของสารเชิงซ้อน Fe(II)-Bphen การรบกวนจากไอออนบวก Ni(II) Co(II) และ Cu(II) ค่อนข้างสูง ในขณะที่ไอออนลบหรือไอออนอื่นๆ แสดงการรบกวนเพียงเล็กน้อย เวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเข้มของการเรืองแสงจะคงที่หลังจากผ่านไป 10 นาทีวิธีนี้จะรวดเร็วและแม่นยำกว่าวิธีวัดค่าสี เนื่องจากไม่มีขั้นตอนการสกัดด้วยตัวทำละลาย

A. Ullah และคณะ [20] ได้เสนอการใช้เฟอริน-เอส-คอนจูเกต อนุภาคนาโนเงิน (Ferene-S-conjugated silver nanoparticles, Ferene-S-AgNPs) ในการตรวจวัด Fe(II) ซึ่งพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยยูวี-วิซิเบิล สเปกโตรสโกปี ฟลูออโรสโคปี อินฟราเรด สเปกโตรสโกปี (FTIR) และเทคนิค Matrix-Assisted Laser Desorption/Ionization Time-of-Flight Mass spectrometry (MALDI-TOF MS) ขนาดอนุภาคของสารที่สังเคราะห์ได้จากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic-force microscopy, AFM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

และพบเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคในช่วง 10 – 90 นาโนเมตร Ferene-S-AgNPs ถูกใช้เป็นโครโมเซนซึ่งกับโลหะหลายชนิดและเมื่อทรีทกับ Fe(II) จะทำให้แถบการดูดกลืนแสงของคลื่นผิวพลาสมา (Surface plasmon resonance, SPR) ลดลงและเกิดบาโทโครมิกชิฟต์เล็กน้อย นอกจากนี้ โครโมเซนเซอร์ที่พัฒนาได้มีความจำเพาะต่อ Fe(II) ภายในสถานะที่มีโลหะไอออนชนิดอื่น ซึ่งคล้ายกับเฟอร์รินที่เป็นสารประกอบเดิม โดยใช้ความเข้มข้นของ Fe(II) ในช่วง 110 – 190 นาโนโมลาร์ โดยมีขีดจำกัดการตรวจวัด (LOD) เท่ากับ 110 นาโนโมลาร์

P. Siyal และคณะ [21] ได้เสนอเซนเซอร์ตรวจวัดสีสำหรับตรวจวัด Fe(II) โดยใช้อนุภาคทองคำที่สังเคราะห์ได้จากทางชีวภาพ โดยใช้พริกหยวกและสกัด capped gold nanoparticles (CA-AuNPs) ในตัวทำละลายที่เป็นกลาง โดยใช้ tetrachloroaurate ($\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) เป็นสารตั้งต้นและใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและปรับค่า pH ให้เหมาะสม ซึ่งโครงสร้างของ CA-AuNPs เปลี่ยนสีจากสีเหลืองเป็นแดงทับทิมจากการวัดค่าการดูดกลืนแสงของคลื่นผิวพลาสมอน (Surface plasmon resonance, SPR) ที่ 519 นาโนเมตร โดยใช้เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมตริ และพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยฟูเรียร์-ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโทรสโกปี (FTIR) กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic-force microscopy, AFM) เทคนิคการกระเจิงแสงแบบพลวัต (Dynamic light scattering, DLS) ร่วมกับการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าซีตา (Zeta-potential analysis, ZPA) และเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) ผลการทดลองพบว่า CA-AuNPs มีความจำเพาะเจาะจงต่อ Fe(II) ในสถานะที่มี Fe(III) เป็นตัวรบกวน และมีความเป็นเส้นตรงในช่วง 0.3 – 7.0 ppb โดยมีค่าความเข้มข้นของการดูดกลืนแสงที่เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นและมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9938 พบขีดจำกัดการตรวจวัด (LOD) อยู่ที่ 0.036 ppb และขีดจำกัดการตรวจวัดเชิงปริมาณ (LOQ) อยู่ที่ 0.12 ppb พบว่าสามารถนำเซนเซอร์ที่ได้ไปตรวจวัด Fe(II) ในตัวอย่างน้ำจริงได้

S. Okabe และคณะ [22] ได้เสนอวิธีการตรวจวัด Fe(II) ที่อยู่ร่วมกับ Fe(III) โดยใช้ electrospray ionization mass spectrometry (ESI-MS) ซึ่งแยก Fe(II) ออกจากเกลือของเหล็ก เช่น เกลือคลอไรด์ เกลือซัลเฟต และเกลือไฮยาไนด์ โดยใช้ระบบตรวจวัด 2 ระบบได้แก่ quadrupole mass spectrometer และ high-resolution magnetic mass spectrometer เพื่อหาความเสถียรของสารประกอบเชิงซ้อน โดย Fe(II) เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับ 1,10-phenanthroline (phen) เป็นรูปทรง tetrahedral ที่เสถียรในสถานะก๊าซภายใน ESI-MS และแยกออกจากกันในย่าน m/z ที่ 208 ซึ่งพบจุดยอดของพีกของสารประกอบ $[\text{Fe}(\text{phen})_2]^{2+}$ ในย่านดังกล่าวจากการตรวจวัดในตัวอย่างแม่น้ำธรรมชาติ มี R^2 เท่ากับ 0.9992 และนำไปตรวจวัด Fe(II) ในแม่น้ำทามะ ซึ่งพบ Fe(II) เท่ากับ 0.23 ไมโครโมลต่อลิตร มี R^2 เท่ากับ 0.9998 และพบความปริมาณของธาตุเหล็กรวมในแม่น้ำทามะอยู่ที่ 0.59 ไมโครโมลต่อลิตร โดยใช้เทคนิค Inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS) ซึ่งมีปริมาณ Fe(II) เป็น 40% ของปริมาณธาตุเหล็กรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ตารางสรุปรวมผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการใช้วิธีวิเคราะห์เชิงเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ Fe(II) หรือ Fe(III) เพียงตัวใดตัวหนึ่ง

Instrumental/Technique	Analyte	Sample	Working range	LOD	งานวิจัยที่อ้างอิง
UV-Vis spectrophotometer	Fe(III)	rice field, river, sea waters	30.57-1000 μM	9.19 μM	A. S. Andreani et al. J. Environ. Chem. Eng. 9 (2021) 105962
Spectrofluorometer	Fe(II)	-	1.8 – 18 μM	19.16 nM	D. A. K. Senanayake et al. Research square. (2021)
UV-Vis spectrophotometer	Fe(II)	-	110 – 190 nM	110 nM	A. Ullah et al. Coatings (2021) 11, 1293
UV-Vis spectrophotometer	Fe(II)	water	0.3 – 7.0 ppb	0.036 ppb	P. Siyal et al. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy 254 (2021) 119645
Electrospray ionization mass spectrometry (ESI-MS)	Fe(II)	Tama river	0 – 10 μM	-	S. Okabe et al. Journal of Molecular Liquids 329 (2021) 115532

2.4.2 งานวิจัยที่ใช้วิธีวิเคราะห์เชิงเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ Fe(II) และ Fe(III) ภายในคราวเดียวกัน

J. W. Dieker และคณะ [7] ได้เสนอระบบโพลอินเจกชันอะนาลิซิส (Flow injection analysis, FIA) เพื่อตรวจหาปริมาณของ Fe(II) และ Fe(III) พร้อมกันได้ด้วยหลักการแอมเพอโรเมทรี โดยสารไหลผ่านเซลล์ที่มีขั้วกลาสซีคาร์บอน แล้วคัดแยกด้วยเทคนิคโวลต์แอมเมตริก ซึ่งการเลือกขนาดของตัวอย่างและตำแหน่งบ่งบอกถึงศักยภาพการไหลของสาร วิธีนี้มีขีดจำกัดการตรวจวัด (LOD) ประมาณ 10^{-6} โมลาร์ กราฟมาตรฐานมีความเป็นเส้นตรงในช่วงความเข้มข้น $10^{-3} - 10^{-5}$ โมลาร์สำหรับ Fe(III) และ $5 \times 10^{-4} - 10^{-5}$ โมลาร์สำหรับ Fe(II) พบว่าสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างหินเพื่อหาปริมาณ Fe(II) และ Fe(III) ในองค์ประกอบ

P. Ugo และคณะ [6] ได้เสนอการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้โพเทนชิโอเมตริกและโวลต์แอมเมตริกในการตรวจวัด Fe(II) กับ Fe(III) ควบคู่กับการใช้ขั้วไฟฟ้ากลาสซีคาร์บอนที่เคลือบด้วยไอโอโนเมอร์ในการตรวจหาความเข้มข้นและการรวมตัวของไอออนที่ถูกกระตุ้นในปริมาณต่ำที่น้อยกว่าระดับไมโครโมลาร์ ตัวอย่างที่ศึกษาเป็นสารประกอบ $\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$ และ $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$ แรกเริ่มขั้วอิเล็กโทรดจะถูกเคลือบด้วย Nafion ขณะที่ด้านหลังขั้วเคลือบด้วย Tosflex ที่เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนลบ สามารถนำไอออนแอ็ทซ์เซนต์ของโวลต์แอมเมตริกที่เคลือบขั้วอิเล็กโทรดนำไปตรวจหาพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น สมประสิทธิผลการแลกเปลี่ยนไอออนได้ และใช้โวลต์แอมเมตริกที่เคลือบขั้วอิเล็กโทรดเพื่อตรวจวัดความเข้มข้นรวมของธาตุเหล็กทั้งสองสปีชีส์ และประยุกต์ใช้ได้เป็นผลสำเร็จในการหาปริมาณธาตุเหล็กและซัลเฟอร์ในน้ำในตะกอนดินจากทะเลสาบเวนิส ประเทศอิตาลี

M. Yaman และคณะ [4] ได้เสนอวิธีที่ Speciation ของ Fe(II) และ Fe(III) ในเนื้อสารตัวอย่างด้วยวิธีการสกัดและใช้สเปกโตรสโกปีของการดูดกลืนแสงของอะตอม (Flame atomic absorption spectrometry, FAAS) ซึ่งใช้สารประกอบ 1-(2-pyridylazo)-2-naphthol (PAN) เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับ Fe(II) ในชั้นคลอโรฟอร์มที่เป็นตัวทำละลายอินทรีย์และจะถูกสกัดออกในช่วง pH 0.75 - 4.0 ขณะเดียวกัน Fe(III) จะยังคงอยู่ในชั้นน้ำที่ pH 0.75 - 1.25 โดยสภาพที่เหมาะสมสำหรับการสกัดคือ pH = 1 ใช้เวลาปั่นกววน 20 นาที ใช้ปริมาณ PAN เท่ากับ 0.5 มิลลิกรัม ในคลอโรฟอร์มปริมาตร 8 มิลลิลิตร วิธีที่พัฒนาขึ้นนี้ถูกใช้ในการตรวจวัด Fe(II) และ Fe(III) ในตัวอย่างชาผง น้ำผลไม้ โคล่า และเปกเมซ (ผลิตภัณฑ์กาน้ำตาลของประเทศตุรกี) ซึ่งค้นพบปริมาณ Fe(II) ที่สูงมากในเปกเมซ วิธีที่พัฒนาขึ้นนี้มีความไวสูงและวิเคราะห์ตัวอย่างได้อย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับงานศึกษาอื่นที่คล้ายคลึงกัน

C. F. Wan และคณะ [23] ได้เสนอการสังเคราะห์ Multifunctional Schiff base fluorescent sensor (receptor L) สำหรับตรวจสอบคุณสมบัติการเกิดอันตรกิริยาระหว่างไอออนโลหะและไอออนลบ โดย receptor L ตอบสนองการเรืองแสงได้เป็นอย่างดีกับ Fe^{2+} และ F^- นอกจากนี้ยังแสดงการเปลี่ยนสีจากไม่มีสีเป็นสีเหลืองเมื่อจับกับ Fe^{3+} อย่างไรก็ตาม ขีดจำกัดการตรวจวัดของ receptor L สำหรับ Fe^{2+} และ F^- อยู่ที่ 0.3 ppm และ 25.7 ppb ตามลำดับ ซึ่งค่าต่ำที่สุดที่ตรวจวัดได้ทั้งสองค่ามีค่าต่ำพอที่จะสามารถตรวจวัดในระดับนาโนโมลาร์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

A. Iqbal และคณะ [24] ได้เสนอวิธีการใหม่ที่สะดวก ราคาถูก เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สำหรับสังเคราะห์คาร์บอนดอตที่จับด้วย 1,10-phenanthroline (Phen) สำหรับตรวจวัด Fe(II) และ Fe(III) จากกรดซิตริกที่ปราศจากน้ำและไม่ใช้ตัวทำละลายคือวิธีโซลิดสเตท (Solid state) ซึ่งมีเฉพาะ Fe(II) และ Fe(III) ที่สามารถลดการเรืองแสง (Quenching) ของคาร์บอนดอต (CDs) ซึ่งบ่งบอกว่ามี ความจำเพาะเจาะจงภายใต้สภาวะที่มีโลหะไอออนชนิดอื่น โดยมีขีดจำกัดการตรวจวัด (Detection limit) อยู่ที่ 20 นาโนโมลาร์ สำหรับ Fe(II) และ 35 นาโนโมลาร์สำหรับ Fe(III) คาร์บอนดอตที่ได้มีความเป็นพิษในเซลล์ที่มนุษย์ต่ำ นอกจากนี้ยังสามารถตรวจวัดธาตุเหล็กในนม เนื่องจากมีความไวสูง และความจำเพาะเจาะจงจึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจวัด Fe(II) และ Fe(III) ในตัวอย่างน้ำ ได้

X. Gong และคณะ [25] ได้เสนอเซนเซอร์ทางเคมีที่ทำมาจาก oxadiazole (เซนเซอร์ 1) ในการตรวจวัด Fe(II) และ Fe(III) โดยจะแสดงการเรืองแสงที่ลดลงในอัตราส่วนตัวทำละลายเทตราไฮโดรฟูแลนต่อน้ำ (THF:H₂O) เป็น 4:1 โดยปริมาตร โดยมีความจำเพาะและความไวที่สูงกว่า โลหะไอออนชนิดอื่น จากการศึกษา Job's plot การคำนวณ DFT สเปกตรัมของมวล (mass spectra) และไทเทรชันการเรืองแสง (Fluorescence titration) บ่งบอกถึงอัตราส่วนของ สารประกอบระหว่างไอออนเหล็กกับเซนเซอร์ 1 เป็น 1:1 ซึ่งเซนเซอร์ 1 ตอบสนองได้ว่องไวที่ค่า pH เท่ากับในร่างกายมนุษย์ และความเข้มของการเรืองแสงมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับความเข้มข้นของ ไอออนเหล็ก มีขีดจำกัดการตรวจวัด (Detection limit) เท่ากับ 7.78 ไมโครโมลาร์ของ Fe(II) และ เท่ากับ 6.95 ไมโครโมลาร์ของ Fe(III) เซนเซอร์ 1 ยังสามารถใช้เป็นแถบตรวจวัดธาตุเหล็กในตัวอย่าง น้ำได้ และยังจำเพาะเจาะจงต่อธาตุเหล็กในเซลล์สิ่งมีชีวิต

P. Lv และคณะ [26] ได้เสนอคาร์บอนดอต (Carbon dots, CDs) ชนิดใหม่ที่เจือด้วยแลนทาไนด์โคออร์ดิเนตกับพอลิเมอร์ (LnCPs) ในการตรวจวัดค่าการเรืองแสงแบบสัดส่วน (Fluorescence ratio-metric) ของ Fe(II) และ Fe(III) ซึ่ง CDs ที่สังเคราะห์ขึ้นจะเปล่งแสงสีน้ำเงิน และมีความไวต่อ Fe(II) ถูกรวมเข้ากับโพรบที่มีความไวต่อ Fe(III) กลายเป็นโพรบคอมโพสิต โพรบนี้มี ประสิทธิภาพสูงในการกระตุ้นด้วยความยาวคลื่นเดียวและเมื่อสัมผัส Fe(II) และ Fe(III) และจะทำให้ ค่าการเรืองแสงของโพรบลดลง (Quench) โดยเทียบกับโพรบอีกอันที่ใช้เป็นอ้างอิง ทำให้สามารถหา สัดส่วน (ratio-metric) ของ Fe(II) กับ Fe(III) ได้ นอกจากนี้กรดแอสคอร์บิกสามารถรีดิวซ์ Fe(III) เป็น Fe(II) และสามารถหาสัดส่วนของกรดแอสคอร์บิกได้เช่นกัน วิธีการทดสอบนี้สามารถนำไปหาอะ นาไลต์ได้หลากหลายชนิด รวมถึงวิเคราะห์อะนาไลต์ 2 ชนิดขึ้นไปภายในคราวเดียวกันได้

J. Proch และคณะ [5] ได้เสนอการประยุกต์ใช้เทคนิควิเคราะห์ 2 รูปแบบ ได้แก่ โครมาโตกราฟีของเหลวประสิทธิภาพสูง (High performance liquid chromatography, HPLC) ควบคู่ กับ microwave induced plasma optical emission spectroscopy (MIP OES) หรือ inductive coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES) ซึ่งใช้คอลัมน์ แลกเปลี่ยนไอออนบวกและใช้เฟสเคลื่อนที่เป็น pyridine-2,6-dicarboxylic acid (PDCA) โดยแยก Fe(II) และ Fe(III) ออกจากกันภายใน 300 วินาที นอกจากนี้ยังมีการปรับสถานะและตรวจสอบความ

ถูกต้องของทั้งสองวิธีควบคู่กันไป แล้วประยุกต์ใช้กับการตรวจวัดในตัวอย่างต่างๆ อาทิ ตะกอนธารน้ำแข็ง เครื่องปั้นดินเผา ตะกอนดินในพื้นที่อุตสาหกรรม ตะกอนดินจากแม่น้ำ และซาเยอบามาเต โดยใช้ HPLC-MIP OES และ HPLC-ICP OES วิเคราะห์หาปริมาณธาตุเหล็กทั้งสองสปีชีส์ พร้อมกับความแม่นยำที่สามารถควบคู่กันไปด้วย

N. N. Meeravali และคณะ [27] ได้เสนอการใช้โมเลกุลไมเซลล์ขนาดใหญ่ที่ผสมกับไอออนิกรีเวิร์สชนิดใหม่ (i-RMMs) ในการสกัดระดับจุลภาคเพื่อแยกสปีชีส์เหล็ก และใช้หลักการยูวี-วิสซิเบิลสเปกโทรโฟโตเมตรีวิเคราะห์หาปริมาณธาตุเหล็กในตัวอย่างน้ำธรรมชาติ โดยใช้แอนไอออนของ dioctylsulfosuccinate-capric acid (DOSS-CA) และแคทไอออนของ Aliquat-336-capric acid (Aliquat-336-CA) RMMs เป็นคู่ไอออนในการสกัดแยก Fe(II) และ Fe(III) ในการแยกสปีชีส์ Fe(II) จะฟอร์มโครงสร้างเป็น $\text{Fe(II)-(phen)}_3^{2+}$ ที่ไม่มีสีในระดับนาโนกรัมต่อมิลลิลิตรในตัวทำละลายที่เป็นกรดอ่อน และจะเกิดปฏิกิริยากับ anionic head group ของ RMMs และจับกันเป็น $\text{Fe(II)-(phen)}_3^{2+} \text{- (DOSS-CA)}_2$ ด้านในแกนกลางที่ชอบน้ำ แล้วรวมตัวกันที่ด้านบนของ coacervate ขณะเดียวกัน Fe(III) ที่ไม่ได้เกิดปฏิกิริยาในสารละลายจะถูกสกัดเหมือนกับ Fe(II) และฟอร์มโครงสร้างเป็น $\text{Fe(III)-(SCN)}_6^{3-} \text{- (Aliquat-336-CA)}_3$ ในกรดแก่ การสกัดข้างต้นนี้สามารถวิเคราะห์หา Fe(II) และ Fe(III) ได้ โดยนำ coacervate ไปวิเคราะห์กับเครื่องยูวี-วิสซิเบิลสเปกโทรโฟโตเมตรี ซึ่งหลังจากทำ pre-concentration แล้วพบปริมาณของ Fe(II) และ Fe(III) ในตัวอย่างน้ำอยู่ที่ 16 และ 28 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตรตามลำดับ และพบขีดจำกัดต่ำสุดที่ตรวจวัดได้อยู่ที่ 0.1 และ 0.4 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตรตามลำดับ พบค่าร้อยละการวิเคราะห์ที่คืนกลับสารละลายผสม Fe(II) กับ Fe(III) ที่ความเข้มข้น 100 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร ในระหว่าง 92 ถึง 100 ซึ่งสอดคล้องกับความเข้มข้นของเหล็กที่ได้รับการยืนยันจากตัวอย่างน้ำของ NIST CRMs 1643e และ NIST CRMs 1643f และสามารถนำไปใช้ตรวจวัดธาตุเหล็กในแหล่งน้ำจริงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ตารางสรุปรวมผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการใช้วิธีวิเคราะห์เชิงเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ Fe(II) และ Fe(III) ภายในคราวเดียวกัน

Instrumental/Technique	Samples	Working range	LOD	งานวิจัยที่อ้างอิง
Flow Injection Analysis / Amperometric	rocks	Fe(II) $(5 \times 10^{-5}) - 10^{-4}$ M Fe(III) $10^{-5} - 10^{-3}$ M	$10^{-7} - (5 \times 10^{-6})$ M	J. W. Dieker et al. Anal. Chim. Acta. 114 (1980) 267-274
Potentiometer / Voltammeter	sediment porewaters	-	$\leq 1 \mu\text{M}$	P. Ugo et al. Anal. Chim. Acta. 474 (2002) 147-160
Flame atomic absorption spectrometry	tea infusion, cola, fruit juice	-	9 ng/mL	M. Yaman et al. Anal. Chim. Acta. (2005) 540 77-81
Spectrofluorometer	-	-	Fe(II) 0.3 ppm	C. F. Wan et al. Journal of Luminescence 178 (2016) 115-120
Spectrofluorometer	milk	Fe(II) 0 - 32 μM Fe(III) 0 - 50 μM	Fe(II) 20 nM Fe(III) 35 nM	A. Iqbal et al. Sensors and Actuators B
Spectrofluorometer	tap water, drinking water	-	Fe(II) 7.78 μM Fe(III) 6.95 μM	X. Gong et al. Microchemical Journal 145 (2019) 435-443
Spectrofluorometer	tap water	Fe(II) 50 - 100 nM Fe(III) 100 nM - 80 μM	Fe(II) 23 nM Fe(III) 88 nM	P. Lv et al. Microchemical Journal 152 (2020) 104255
HPLC	post-glacial sediments, archaeological pottery, soils, river sediments, yerba mate	0.1 - 20.0 mg/L	Fe(II) 6.31 $\mu\text{g/L}$ Fe(III) 5.41 $\mu\text{g/L}$	J. Proch et al. Talanta. 231 (2021) 122403
UV-Vis spectrophotometer	drinking water, urban lake water, ground water	-	Fe(II) 0.1 ng/mL Fe(III) 0.4 ng/mL	N. N. Meeravali et al. Microchemical Journal 164 (2021) 105986

2.4.3 งานวิจัยที่ใช้ PAD ในการวิเคราะห์ Fe(II) หรือ Fe(III) เพียงตัวใดตัวหนึ่ง

M. M. Mentele และคณะ [19] ได้พัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ (PAD) ที่ประดิษฐ์ โดยการพิมพ์ด้วยหมึกซีดีสำหรับประเมินละอองอากาศที่มีโลหะเป็นส่วนประกอบ วิธีนี้จะใช้กระดาษแผ่นละอองที่มีโลหะด้วยปริมาณระดับไมโครลิตรบนกระดาษทรงขนาดเล็ก (Punch) ที่มาจากตัวกรองอากาศ ก่อนจะวางบน PAD และหยดน้ำตามเพื่อให้ละอองโลหะที่ถูกย่อยไหลไปยังอ่างเก็บสารตัวอย่าง (Sample reservoirs) ซึ่งอ่างเก็บสารตัวอย่างจะมีส่วนที่บรรจุรีเอเจนต์สำหรับตรวจวัดสีของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจาก Fe Cu และ Ni มีการใช้บัฟเฟอร์ที่เหมาะสมในการปรับค่า pH ของแต่ละสถานะในโซนตรวจวัด (Detection zone) รวมถึงมีการใช้สารก่อสารประกอบเชิงซ้อน (Precomplexation agent) ในระหว่างอ่างเก็บสารตัวอย่างและโซนตรวจวัดเพื่อลดการรบกวนจากไอออนโลหะชนิดอื่น ความเข้มข้นของโลหะหาได้จากความเข้มสีจากการสแกนภาพร่วมกับซอฟต์แวร์ประมวลผลภาพ พบความเป็นเส้นตรงของกราฟมาตรฐานของโลหะแต่ละชนิดอยู่ที่ 1.0 – 1.5 ไมโครกรัม ท้ายที่สุดตัวอย่างแผ่นละอองมาตรฐานถูกกรองและถูกวิเคราะห์หาโลหะสามชนิดโดยใช้ PAD ซึ่งพบความสัมพันธ์เชิงเส้นที่ดี บ่งบอกว่าวิธีนี้สามารถตรวจวัดหาปริมาณโลหะในแผ่นละอองได้อย่างรวดเร็ว และพบในปริมาณที่ต่ำกว่าที่วิธีทั่วไปสามารถตรวจวัดได้

H. Asano และคณะ [16] ได้เสนอการสร้างอุปกรณ์ PAD ในการตรวจวัดธาตุเหล็กโดยใช้การพิมพ์แบบกระจกต้นแบบ (Photomask) กับเครื่องพิมพ์สามมิติในการสร้างลวดลายส่วนที่ไม่ชอบน้ำบนกระดาษ มีการออกแบบกระจกต้นแบบหลากหลายรูปแบบที่สามารถพิมพ์บนกระดาษโดยใช้เครื่องพิมพ์สามมิติได้ง่าย รวดเร็ว และราคาถูก กระดาษที่ใช้จะชุบด้วยสารละลาย octadecyltrichlorosilane *n*-hexane และ hydrophobized หลังจากส่วนไม่ชอบน้ำของกระดาษถูกแสงอัลตราไวโอเล็ตผ่านกระจกต้นแบบจะเกิดส่วนที่ชอบน้ำขึ้น ซึ่งขนาดที่เล็กที่สุดส่วนที่ชอบน้ำและความหนาของส่วนที่ไม่ชอบน้ำอยู่ที่ 500 ไมโครเมตรและ 100 ไมโครเมตรตามลำดับ กระดาษที่พัฒนาขึ้นถูกนำไปวิเคราะห์ปริมาณธาตุเหล็กในตัวอน้ำโดยใช้การวัดค่าสีจาก phenanthroline

K. Ogawa และคณะ [12] ได้พัฒนาอุปกรณ์ PAD ที่นำมาตรวจวัดปริมาณไอออนของเหล็กในน้ำของน้ำพุร้อนธรรมชาติ ในงานวิจัยนี้ PAD ถูกสร้างขึ้นโดยใช้เครื่องพิมพ์ซีดี และหยดไฮดรอกซีลามีนลงในแหล่งกักเก็บเพื่อเปลี่ยน Fe(III) เป็น Fe(II) และใช้ 1,10-ฟีแนนโทรีนสำหรับให้เกิดสารเชิงซ้อนกับ Fe(III) ซึ่งให้สีเป็นสีแดง บัฟเฟอร์อะซิเตต (pH 4.7) สำหรับปรับค่าพีเอช กราฟมาตรฐานที่ได้มีความเป็นเส้นตรงอยู่ในช่วง 100 ถึง 1000 ppm เมื่อพล็อตระหว่างค่า semi-log กับความเข้มข้นของ Fe(III) เมื่อพล็อตระหว่างค่าความเข้มของสีกับความเข้มข้นของ Fe(III) มีความเป็นเส้นตรงอยู่ในช่วง 40 ถึง 350 ppm กราฟมาตรฐานที่ได้ในแต่ละวันมีความผันผวนดังนั้นจึงมีการสร้างกราฟมาตรฐานเป็นรายวันสำหรับการวิเคราะห์ เมื่อเปรียบเทียบ PAD ที่เตรียมขึ้นใหม่กับที่สร้างแล้วเก็บไว้ไม่พบความแตกต่างที่มีนัยสำคัญในการวิเคราะห์หาธาตุเหล็กในช่วงเวลา 4 วัน PAD ถูกนำไปใช้ในการหาค่า Fe(III) ในตัวอย่างน้ำจากบ่อน้ำพุร้อนธรรมชาติ โดยทั้งความแม่นยำและความแม่นยำของวิธีการวิเคราะห์โดยใช้ PAD จะสอบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีสเปกโตรโฟโตเมทรีที่เป็นวิธีมาตรฐาน ผลลัพธ์ที่ได้คือการวิเคราะห์ด้วย PAD มีความเที่ยงต่ำกว่าวิธีสเปกโตรโฟโตเมทรี แต่ PAD ก็มีข้อดีคือสามารถวิเคราะห์ได้รวดเร็วมีขนาดเล็กและมีราคาถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนสิทธิ์ในทรัพย์สิน เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

L. Jun-Jie และคณะ [28] ได้เสนอการตรวจวัด Fe(III) โดยตรง โดยใช้ PAD ที่ทำจากกระดาษเซลลูโลสที่ใส่ชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์คั่นกลางระหว่างชั้นกระดาษ เคลือบด้วยลวดลายส่วนที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำเพื่อทำให้การแพร่บนกระดาษมีความสม่ำเสมอ และตัดแต่งหมู่อะมิโนกับหมู่ซัลไฟด์สำหรับตรึงอนุภาคนาโนทองคำ ซึ่งหลังจากผลิตขึ้นและทราบสภาวะที่เหมาะสมแล้วก็จะนำไปตรวจวัดสีของ Fe(III) และพบความเป็นเส้นตรงในช่วงความเข้มข้น 1.0 ถึง 37 ไมโครโมลาร์ โดยมี R^2 มากกว่า 0.98 อีกทั้งยังมีความจำเพาะเจาะจงที่ดีและมีขีดจำกัดการตรวจวัด (Detection limit) เท่ากับ 0.85 ไมโครโมลาร์ นอกจากนี้เซนเซอร์ยังมีความต้านทานต่อการรบกวนของอนุภาคนาโนทองคำในสารละลาย และสามารถนำไปตรวจวัด Fe(III) ในตัวอย่างเลือดและตัวอย่างทางสิ่งแวดล้อมได้

T. Moniz และคณะ [29] ได้เสนอการพัฒนาอุปกรณ์ PAD ที่สามารถพกพา ใช้ในภาคสนาม และราคาถูกลงสำหรับการตรวจวัดปริมาณ Fe(III) ในน้ำธรรมชาติ โดยใช้รีเอเจนต์ให้สี 3-hydroxy-4-pyridinone (3,4-HPO) ที่มีความเป็นพิษต่ำกว่ารีเอเจนต์แบบดั้งเดิม ซึ่ง 3,4-HPO จัดเป็นหนึ่งในกลุ่มคีเลเตอร์ที่ชอบน้ำที่แตกตัวมาจากสายโซ่อิเทอร์ในโครงสร้าง ความสามารถในการละลายน้ำของมันช่วยให้มีขีดจำกัดต่ำสุดที่ตรวจวัดได้ (Detection limit) ลดลงและนำไปใช้เป็นรีเอเจนต์สำหรับ PAD ได้ โดยในสภาวะที่เหมาะสม PAD สามารถตรวจวัดความเข้มข้นที่ดีได้ในช่วง 0.25 – 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีขีดจำกัดต่ำสุดที่ตรวจวัดได้อยู่ที่ 55 ไมโครกรัมต่อลิตร และใช้เวลาภายใน 15 นาที ผลที่ได้มีความเสถียรภายใน 4 ชั่วโมงและอุปกรณ์มีความเสถียรภายใน 1 เดือน และใช้ปริมาตรรีเอเจนต์ต่ำกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อการวิเคราะห์หนึ่งครั้ง ผลที่ได้นำไปเปรียบเทียบกับสเปกโตรสโกปีของการดูดกลืนแสงของอะตอม (Flame atomic absorption spectrometry, FAAS) ที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (RD) น้อยกว่า 10% และสามารถนำอุปกรณ์นี้ไปตรวจวัดธาตุเหล็กในแม่น้ำ น้ำบ่อ และน้ำประปาได้โดยไม่ต้องผ่านการพรีทรีทเมนต์

F. T. S. M. Ferreira และคณะ [11] ได้เสนอการพัฒนาอุปกรณ์ PAD ที่มีความเรียบง่าย และใช้แล้วทิ้งเพื่อวัดปริมาณธาตุเหล็กในตัวอย่างปัสสาวะ การตรวจวัดโดยใช้การวัดค่าสีที่เพิ่มขึ้นของปฏิกิริยาระหว่าง Fe(II) และ bathophenanthroline (Bphen) โดยเปลี่ยน Fe(III) เป็น Fe(II) ด้วยไฮดรอกซิลามีน PAD ที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจวัดธาตุเหล็กได้ในช่วง 0.07–1.2 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีขีดจำกัดการตรวจวัดต่ำสุด (Limit of detection, LOD) ที่ 20 ไมโครกรัมต่อลิตร และขีดจำกัดการตรวจวัดเชิงปริมาณต่ำสุด (Limit of quantification, LOQ) ที่ 65 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งช่วยที่เหมาะสมในปัสสาวะของมนุษย์ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการรบกวนของสีในปัสสาวะที่มีผลต่อการวิเคราะห์โดยการนำไปลบกับค่าสารละลายแบลนด์ การศึกษาความเสถียรพบว่าอุปกรณ์มีความเสถียรเป็นเวลา 15 วันก่อนการใช้งาน และผลิตภัณฑ์สีที่เกิดขึ้นมีความเสถียรสำหรับการตรวจวัดนานถึง 3 ชั่วโมง ความแม่นยำของอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นจะทดสอบโดยการนำไปวิเคราะห์ตัวอย่างปัสสาวะด้วย PAD ที่พัฒนาขึ้นและด้วยวิธีใช้สเปกโตรสโกปีของการดูดกลืนแสงของอะตอม (Flame atomic absorption spectrometry, FAAS) ซึ่งค่าเบี่ยงเบนสัมพัทธ์ระหว่างผลลัพธ์ทั้งสองชุดต่ำกว่า 9.5%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

D. A. Wazuddin และคณะ [30] ได้เสนอการพัฒนาการตรวจวัดสีแบบจุดในการทดสอบ โดยตรงกับ Fe(III) ในน้ำ โดยใช้กระดาษที่ดัดแปลงจากซีฟิ่งที่มีราคาต่ำ และใช้ 2-(5-Bromo-2-pyridylazo)-5-(diethylamino)phenol (5-Br-PADAP) เป็นรีเอเจนต์ให้สีเมื่อทำปฏิกิริยากับ Fe(III) โดยกระดาษที่ดัดแปลงด้วยซีฟิ่งมีความไม่ชอบน้ำ ทำให้สามารถคงความเป็นหยดน้ำได้ และความแตกต่างทางสัญญาณวิทยาของเส้นใยเซลลูโลสในเนื้อกระดาษได้รับการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic-force microscopy, AFM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) การทดสอบนี้ทำได้ง่ายและสามารถเห็นสีที่เกิดขึ้นได้ด้วยตาเปล่าภายในระยะเวลาไม่ถึง 10 นาที และพบช่วงความเป็นเส้นตรงของ Fe(III) บนกระดาษที่ดัดแปลงด้วยซีฟิ่งในช่วง 0.1 – 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีขีดจำกัดที่ตรวจวัดได้ (Detection limit) อยู่ที่ 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร คุณลักษณะเด่นของการทดสอบด้วยวิธีนี้คือ ใช้ง่าย รวดเร็ว ราคาถูก ใช้ปริมาณสารน้อย และไม่ต้องการอุปกรณ์ขนาดใหญ่ในการประมวลผล ดังนั้นอุปกรณ์นี้สามารถนำไปใช้งานในพื้นที่ที่จำกัด โดยเฉพาะในพื้นที่ที่พบการปนเปื้อนของธาตุเหล็ก

J. I. S. Aguirra และคณะ [10] ได้เสนอการตรวจวัดเหล็กโดยใช้เซนเซอร์บนอุปกรณ์ PAD ในแหล่งน้ำธรรมชาติ โดยใช้ลิแกนด์ naphthalene-3-hydroxy-4-pyridione (D-3,4-HPO) เป็นรีเอเจนต์ให้สีส้มเมื่อเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับเหล็ก เนื่องจากเป็นรีเอเจนต์ที่สังเคราะห์ขึ้นจึงมีการศึกษาพารามิเตอร์ทางกายภาพและทางเคมีหลายอย่าง ได้แก่ ปริมาตรของสารตัวอย่างและรีเอเจนต์ ความเข้มข้นของรีเอเจนต์ที่ส่งผลกับสีของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น และ PAD ที่ใช้ในการศึกษาประกอบจากกระดาษกรองหลากหลายชนิดและจำนวนชั้นที่แตกต่างกันเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมพบความสัมพันธ์เชิงเส้นในช่วงความเข้มข้นเหล็ก 0.25 – 2.00 มิลลิกรัมต่อลิตร มีขีดจำกัดการตรวจวัดต่ำสุด (Minimum detectable value, MDV) อยู่ที่ 0.07 มิลลิกรัมต่อลิตร และนำ PAD ที่เตรียมได้ไปตรวจวัดหาปริมาณธาตุเหล็กในสารละลายมาตรฐานเทียบกับเทคนิค Inductively Coupled Plasma (ICP) จากนั้นจะนำ PAD ไปตรวจวัดเหล็กในตัวอย่างน้ำประปา น้ำบ่อ น้ำจากแม่น้ำ และน้ำทะเลโดยไม่ต้องผ่านการพรีทรีทเมนต์ และมีการศึกษาร้อยละการคืนกลับด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ตารางสรุปรวมผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการใช้ PAD ในการวิเคราะห์ Fe(II) หรือ Fe(III) เพียงตัวใดตัวหนึ่ง

Analyte	Sample	Working range	LOD	งานวิจัยที่อ้างอิง
Fe(II)	aerosoil	1.5 – 10 µg	1.5 µg	M. M. Mentele et al. Anal. Chem. 2012, 84, 4474-4480
Fe	river water, tap water	0 – 180 µM	3.96 µM	H. Asano et al. Analytical Chimica Acta (2015)
Fe(III)	natural hot spring water	40 – 350 ppm	40 ppm (LOQ)	K. Ogawa et al. ANALYTICAL SCIENCES JANUARY 2016, VOL. 32
Fe(III)	serum	1.0 – 37 µM	0.85 µM	L. Jun-jie et al. Sensors and Actuators B
Fe(III)	river, well water, tap water	0.25 – 2.0 mg/L	55 µg/L	T. Moniz et al. Talanta 214 (2020) 120887
Fe(III)	urine	0.07 – 1.2 mg/L	20 µg/L	F. T. S. M. Ferreira et al. Analytical and Bioanalytical Chemistry. 413 (2021) 7463-7472
Fe(III)	Umluj beach water, Makkah Pond water	0.1 – 100 ppm	0.01 ppm	D. A. Wazuddin et al. Microchemical Journal 170 (2021) 106723
Fe(III)	tap water, well water, river water, sea water	0.25 – 2 mg/L	0.07 mg/L (MDV)	J. I. S. Aguirra et al. Chemosensors 2023, 11, 101

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์

3.1.1 สารเคมี

ชื่อสารเคมี	สูตรเคมี	ยี่ห้อและประเทศผู้ผลิต
BPhen	$C_{24}H_{16}N_2$	SIGMA-ALDRICH / Switzerland
NFD	$C_{34}H_{20}O_9N_4$	สารสังเคราะห์ขึ้นในห้องปฏิบัติการ
เอทานอล	C_2H_5OH	QRëC® / New Zealand
เมทานอล	CH_3OH	LOBA Chemie / India
กาวกันน้ำ	N/A	GALEN® / China
แอมโมเนียม ไอรอน (II) ซัลเฟต เฮกซะไฮเดรต	$Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$	
ไอรอน (III) คลอไรด์ เฮกซะไฮเดรต	$FeCl_3 \cdot 6H_2O$	SIGMA-ALDRICH / Germany
สีผสมอาหารสีแดงสตรอเบอร์รี่ (ปองโซ 4 อาร์)	$C_{20}H_{11}N_2Na_3O_{10}S_3$	BEST ODOUR / Thailand

3.1.2 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือตรวจวัด

1. กระดาษกรอง Whatman® เบอร์ 1
2. ฟู่กันเบอร์ 0 และ 1
3. ไม้บรรทัดแม่แบบสำหรับวัดรูป
4. ดินสอ
5. ปีกเกอร์
6. ขวดวัดปริมาตรขนาด 5 – 50 มิลลิลิตร
7. หลอดหยดสาร
8. แ่งแก้วคนสาร
9. ขวดสีขาขนาด 5 – 25 มิลลิลิตร
10. ขวดไวอัลขนาด 5 มิลลิลิตร
11. ไมโครปิเปตขนาด 1 ไมโครลิตร ถึง 5 มิลลิลิตร
12. ซ้อนตักสารพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่วางไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น

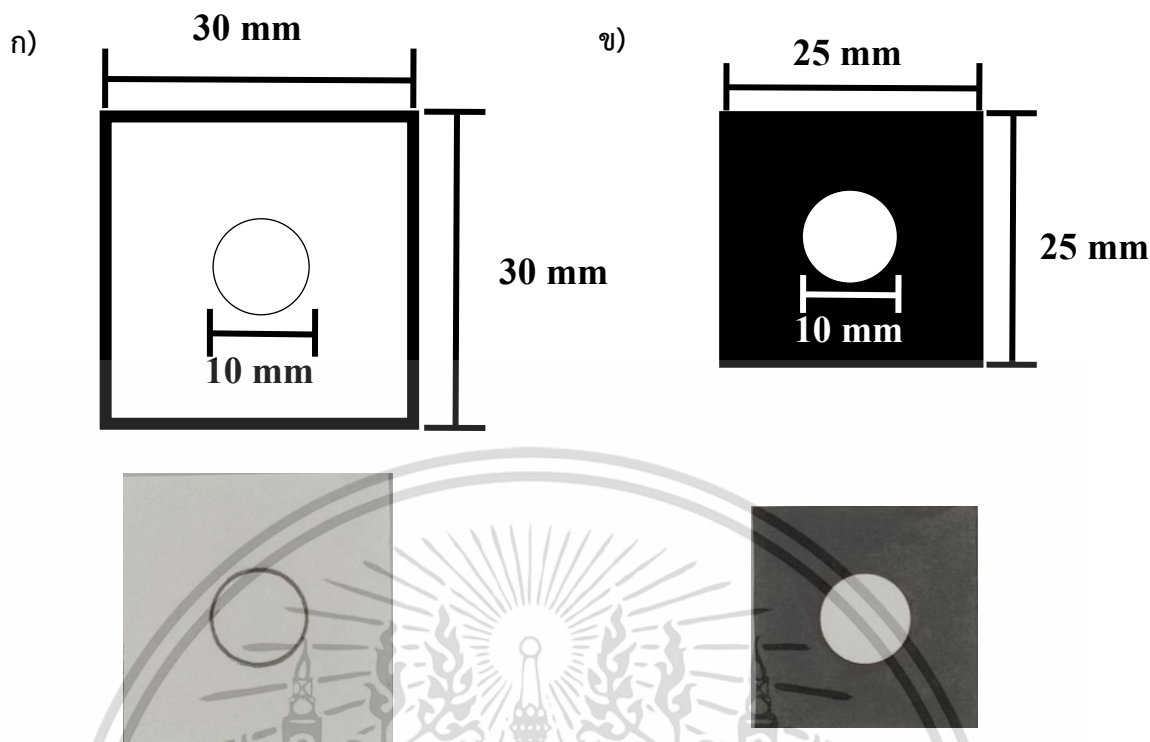
13. นาฬิกาจับเวลา
 14. เครื่องชั่งสาร 4 ตำแหน่ง
- หาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15. หลอด Dark light 20 W
16. กล้องถ่ายภาพทีบแสง ยี่ห้อ Puluz ขนาด 40x40x40 เซนติเมตร
17. แผ่นทีบแสง
18. ตะแกรงวางหลอดทดลอง
19. เทปกาว 2 หน้า หนา 1.6 เซนติเมตร
20. กรรไกร
21. ไดรฟ์เป่าลม ยี่ห้อ Panasonic รุ่น EH-ND51 กำลังไฟ 1200 W
22. โทรศัพท์มือถือ POCO X3 Pro
23. แทปเล็ต Samsung Galaxy Tab S
24. ซอฟต์แวร์ประมวลผลภาพ ImageJ™
25. เครื่องพิมพ์กระดาษยี่ห้อ HP Color LaserJet CP3525n
26. Spectrofluorometer ยี่ห้อ Jasco รุ่น FP-8200
27. Spectrophotometer ยี่ห้อ Jasco รุ่น V-630

3.2 การเตรียมอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ

3.2.1 การออกแบบลดทลายส่วนไม่ชอบน้ำบนอุปกรณ์ตรวจวัด

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบลดทลายอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษเบื้องต้นโดยใช้ดินสอวาดลงบนกระดาษกรองและไม้บรรทัดแม่แบบในการกำหนดลดทลาย PAD จะมีขนาด 30x30 มิลลิเมตร และมีวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.1ก) ต่อมาเปลี่ยนรูปแบบ PAD ใหม่โดยใช้โปรแกรม Microsoft word และพิมพ์ลงบนกระดาษกรอง Whatman® เบอร์ 1 ขนาด A4 โดยใช้หมึก Laser ในการพิมพ์ ซึ่ง PAD 1 ชิ้น จะออกแบบให้มีขนาดเล็กลงเป็น 25x25 มิลลิเมตร และมีวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร และบริเวณรอบนอกวงกลมให้เป็นสีดำเพื่อให้เกิดความทึบแสงและลดการรบกวนการตรวจวัด Fe(III) ด้วย NFD ดังแสดงในรูปที่ 3.1ข)

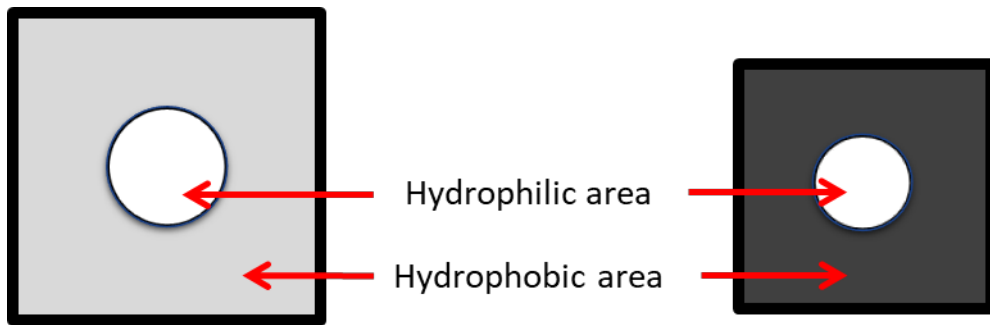


รูปที่ 3.1 แสดงลวดลายอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ ก) รูปแบบ PAD ที่ใช้ในการศึกษาเบื้องต้นโดยใช้ดินสอวาดบนกระดาษกรงและภาพถ่าย PAD จริง ข) PAD ที่ออกแบบโดยโปรแกรม Microsoft word และภาพถ่าย PAD จริง

3.2.2 การเตรียมอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษแบบชั้นเดียว

การเตรียมอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษแบบชั้นเดียว (single-layered PAD) จะสร้างลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำโดยใช้สารละลายกาวที่ละลายด้วยเอทานอลเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร แล้วใช้ฟู่กันเบอร์ 1 หรือ 0 ทาล้อมรอบวงกลมบนกระดาษกรง ในข้อที่ 3.2.1 จากนั้นรอให้กาวแห้งเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทำให้เรียบสนิทจะได้อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษแบบชั้นเดียวสำหรับ PAD ที่ออกแบบโดยโปรแกรม Microsoft word และมีความทึบแสงจะทาสารละลายกาวทั้งด้านหน้าและหลังโดยจะทาด้านหลังก่อนแล้วทิ้งไว้ให้แห้งจึงค่อยทาด้านหน้าเพื่อป้องกันไม่ให้หมึกพิมพ์หลุดลอกออกจากกระดาษกรง

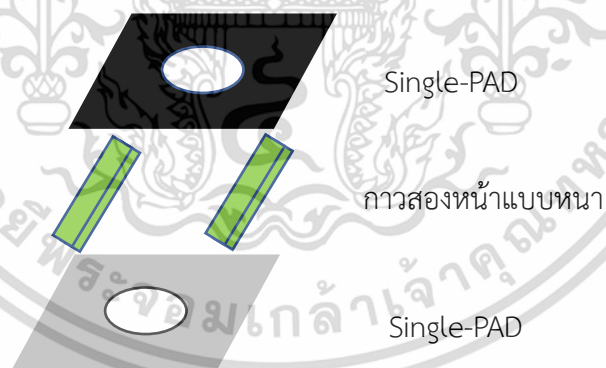
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดงอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษแบบชั้นเดียวเมื่อทาสารละลายกาวล้อมรอบวงกลม ก) PAD ที่ใช้ในการศึกษาเบื้องต้นโดยใช้ดินสอวาดบนกระดาษกราฟ ข) PAD ที่ออกแบบโดยโปรแกรม Microsoft word

3.2.3 การเตรียมอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษแบบสองชั้น

การเตรียมอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษแบบสองชั้น (Double-layered PAD) จะใช้อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษแบบชั้นเดียวที่ออกแบบโดยโปรแกรม Microsoft word จากข้อ 3.3.2 มาประกบกันด้วยเทปกาวสองหน้าสองชั้นโดยแต่ละชั้นมีความหนา 1.6 มิลลิเมตร ซึ่งจะให้ด้านที่บ่งชี้ของ PAD หันออกจากกัน



รูปที่ 3.3 แสดงอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษแบบสองชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การเตรียมสารละลาย

3.3.1 สารละลายเอทานอลที่ความเข้มข้น 5, 10, 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์

ปิเปตเอทานอลเข้มข้น 99.99 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 0.5, 1.0, 2.5 และ 5 มิลลิลิตร ตามลำดับ ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตรและปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน

3.3.2 สารละลายกาวย

ชั่งกาว 5 กรัมในปิกเกอร์ 50 มิลลิลิตร ตามด้วยปิเปตสารละลายเอทานอลที่ความเข้มข้นต่างๆ ในข้อ 3.3.1 ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ใช้แท่งแก้วคนสารคนให้เป็นเนื้อเดียวกันจะได้สารละลายกาวที่มีอัตราส่วนของกาวต่อตัวทำละลายเป็น 1:1 จากนั้นถ่ายใส่ขวดสีชาขนาด 15 มิลลิลิตร และตั้งทิ้งไว้ 2 ชั่วโมง

3.3.3 สารละลาย Bphen เข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร

ชั่งน้ำหนักสาร Bphen 0.0100 กรัม ละลายด้วยเอทานอลในปิกเกอร์ 50 มิลลิลิตร และเทใส่ขวดวัดปริมาตร 10 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้ถึงขีดบอกรับปริมาตรด้วยเอทานอล 100 เปอร์เซ็นต์ แล้วถ่ายใส่ขวดสีชาขนาด 15 มิลลิลิตร

3.3.4 สารละลาย Bphen เข้มข้น 300 ไมโครโมลาร์

ชั่ง Bathophenanthroline 0.0025 กรัม ละลายด้วยเอทานอลเข้มข้น 100 เปอร์เซ็นต์ในปิกเกอร์ 50 มิลลิลิตร เทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้ถึงขีดวัดปริมาตรด้วยเอทานอลเข้มข้น 100 เปอร์เซ็นต์ แล้วถ่ายใส่ขวดสีชาขนาด 50 มิลลิลิตร

3.3.5 สารละลาย NFD เข้มข้น 2000 ไมโครโมลาร์

ชั่ง NFD 0.0126 กรัม ละลายด้วยเอทานอลเข้มข้น 100 เปอร์เซ็นต์ในปิกเกอร์ 50 มิลลิลิตร เทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้ถึงขีดวัดปริมาตรด้วยเอทานอลเข้มข้น 100 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นถ่ายใส่ขวดสีชาขนาด 15 มิลลิลิตร

3.3.6 สารละลายสต็อก Fe(II) ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

ชั่งน้ำหนักสาร $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.0702 กรัม ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนและกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 18.4 โมลาร์ ปริมาตร 100 ไมโครลิตร ในปิกเกอร์ 150 มิลลิลิตร และเทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.7 สารละลายมาตรฐาน Fe(II) ที่ความเข้มข้น 0.1, 0.15, 0.3, 0.6, 0.9, 1.0, 1.2, 2.0, 3.0, 4.0 และ 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

ปิเปตสารละลายจากข้อ 3.3.6 ตามปริมาตรที่แสดงในตารางที่ 3.1 ในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน

ตารางที่ 3.1 แสดงการเตรียมสารละลายมาตรฐาน Fe(II) ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นสุดท้ายของ Fe(II) (mg/L)	ปริมาตรจากความเข้มข้น Fe(II) 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ใช้ (mL)
0.1	0.0250
0.15	0.0375
0.3	0.0750
0.6	0.1500
0.9	0.2250
1.0	0.2500
1.2	0.3000
1.5	0.3750
2.0	0.5000
3.0	0.7500
4.0	1.0000
5.0	1.2500

3.3.8 สารละลายสต็อก Fe(III) ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

ชั่งน้ำหนักสาร $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.0240 กรัม ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนในปิเปต 50 มิลลิลิตร เทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้ถึงขีดวัดปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน

3.3.9 สารละลายมาตรฐาน Fe(III) ที่ความเข้มข้น 1, 3, 5, 8 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

ปิเปตสารละลายจากข้อ 3.2.8 ตามปริมาตรที่แสดงในตารางที่ 3.2 ในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 แสดงการเตรียมสารละลายมาตรฐาน Fe(III) ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นสุดท้ายของ Fe(III) (mg/L)	ปริมาตรจากความเข้มข้น Fe(III) 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ใช้ (mL)
1.0	0.5
3.0	1.5
5.0	2.5
8.0	4.0
10.0	5.0

3.3.10 สารละลายบัฟเฟอร์ KHP (pH 7) เข้มข้น 500 ไมโครโมลาร์

ชั่งบัฟเฟอร์โพแทสเซียมไฮโดรเจนพาทาเลต (KHP) 0.0026 กรัม และละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนในบีกเกอร์ 50 มิลลิลิตร แล้วเทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน

3.3.11 สารละลายสต็อกไอออนโลหะเข้มข้น 4000 ไมโครโมลาร์

ชั่งสารประกอบโลหะตามที่แสดงในตารางที่ 3.3 และละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนในบีกเกอร์ 50 มิลลิลิตร แล้วเทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน

ตารางที่ 3.3 แสดงการเตรียมสารละลายสต็อกไอออนโลหะ

ชนิดไอออนโลหะ	สารประกอบโลหะ	มวลของสารประกอบโลหะ (g/mol)	มวลของไอออนโลหะ (g/mol)	น้ำหนักที่ใช้ในการเตรียม (g)	ความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลาย (μM)	ความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลาย (mg/L)
Cr ³⁺	Cr(NO ₃) ₃ · 9H ₂ O	400.75	52.00	0.0400	4000	208
Fe ²⁺	Fe(NH ₄) ₂ (SO ₄) ₂ · 6H ₂ O	392.139	55.85	0.0392		223.4
Zn ²⁺	ZnSO ₄ · 7H ₂ O	287.579	65.39	0.0287		261.56
Mn ²⁺	MnSO ₄ · H ₂ O	169.016	54.94	0.0171		219.76
Cd ²⁺	Cd(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O	308.47	112.40	0.0308		449.6
Ag ⁺	AgNO ₃	169.87	107.90	0.0169		431.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์อื่นได้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 (ต่อ) แสดงการเตรียมสารละลายสต็อกไอออนโลหะ

ชนิดไอออนโลหะ	สารประกอบโลหะ	มวลของสารประกอบโลหะ (g/mol)	มวลของไอออนโลหะ (g/mol)	น้ำหนักที่ใช้ในการเตรียม (g)	ความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลาย (μM)	ความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลาย (mg/L)
Mg^{2+}	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	246.474	24.31	0.0246	4000	97.24
Cu^{2+}	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	249.685	63.55	0.0247		254.2
Hg^{2+}	HgCl_2	271.50	200.60	0.0273		802.4
Na^+	NaCl	58.443	22.99	0.0058		91.96
K^+	KCl	74.55	39.10	0.0074		156.4
Ba^{2+}	BaCl_2	208.23	137.33	0.0206		832.92
Fe^{3+}	$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	270.30	55.85	0.0270		223.4
Bi^{3+}	BiCl_3	315.38	208.98	0.0315		835.92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 การศึกษาการสร้างลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำบนกระดาษกรอง ด้วยกาวยันน้ำ

3.4.1.1 การทดสอบความสามารถในการกันน้ำของกาว

- 3.4.1.1.1 วาดวงกลมโดยใช้ไม้บรรทัดแม่แบบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ลงบนกระดาษกรองและตัดเป็นแผ่นเล็ก
- 3.4.1.1.2 ปิเปตสารละลายกาวจากข้อที่ 3.3.1 ที่ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 50 ไมโครลิตรลงในขวดแก้วใส ใช้ฟู่กันเบอร์ 1 หรือ 0 ทาสารละลายกาวลงในวงกลมบนกระดาษกรองด้านหน้าให้เต็มวง ซึ่งจะทาสารละลายกาวให้แพร่ผ่านไปถึงด้านหลังของกระดาษกรอง
- 3.4.1.1.3 อบกระดาษกรองที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที
- 3.4.1.1.4 เมื่อครบ 5 นาที ให้นำออกจากเตาอบและวางทิ้งไว้ 5 นาที เพื่อให้กาวแห้งสนิท
- 3.4.1.1.5 หยดน้ำสีผสมอาหารโดยใช้ไมโครปิเปตปริมาตร 15 ไมโครลิตร ลงไปบริเวณวงกลมด้านหน้าของกระดาษกรอง ทิ้งไว้ 15 นาที
- 3.4.1.1.6 ทำ 3.4.1.1.1 – 3.4.1.1.5 ซ้ำ 2 ครั้ง
- 3.4.1.1.7 ทำ 3.4.1.1.1 – 3.4.1.1.6 ซ้ำโดยเปลี่ยนความเข้มข้นของตัวทำละลายเอทานอลเป็น 10, 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์

3.4.1.2 การทดสอบความสามารถการกักเก็บน้ำของอุปกรณ์ที่สร้างลวดลายส่วนที่ไม่ชอบน้ำด้วยสารละลายกาว

- 3.4.1.2.1 ทำการทดลองเหมือนในข้อที่ 3.4.1.1 โดยเปลี่ยนขั้นตอนที่ 2) โดยปิเปตสารละลายกาว 250 ไมโครลิตรลงในขวดแก้วใส แล้วใช้ฟู่กันเบอร์ 1 หรือ 0 ทากาวล้อมรอบวงกลมบนกระดาษกรองด้านหน้า

3.4.2 การศึกษาหลักการตรวจวัด Fe(II) อาศัยการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง Fe(II)-Bphen

3.4.2.1 การเตรียมสารละลายผสมระหว่าง Bphen กับ Fe(II) ที่ความเข้มข้น 0.15, 0.3, 0.6, 0.9, 1.2 และ 1.5 มิลลิกรัมต่อลิตร

- 3.4.2.1.1 ปิเปตสารละลาย Bphen เข้มข้น 300 ไมโครโมลาร์ ปริมาตร 0.4 มิลลิลิตรในขวดไว้อัลขนาด 4 มิลลิลิตร
- 3.4.2.1.2 ปิเปตสารละลายเหล็กมาตรฐานตามลงไปที่มีความเข้มข้น 0.15, 0.3, 0.6, 0.9, 1.2 และ 1.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.6 มิลลิลิตร
- 3.4.2.1.3 ใช้เครื่องวอร์เท็กซ์เขย่าสารละลาย 10 วินาที สังเกตสีที่เกิดขึ้น แล้วถ่ายใส่ควิวเวตต์ขนาด 0.35 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ 5 นาทีและวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วย UV-Vis spectrophotometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2.2 การศึกษาการดูดกลืนแสงของ Bphen

- 3.4.2.2.1 วัดค่าการดูดกลืนแสงของ เอทานอลเข้มข้น 100 เปอร์เซ็นต์ และตั้งเป็น Auto Zero
- 3.4.2.2.2 วัดค่า Absorbance ของสารละลาย Bphen ที่ความเข้มข้น 300 และสร้างกราฟระหว่างค่า Absorbance กับความยาวคลื่น

3.4.2.3 การศึกษาอันตรกิริยาระหว่าง Bphen กับ Fe(II)

- 3.4.2.3.1 วัดค่าการดูดกลืนแสงของเอทานอลเข้มข้น 100 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 0.4 มิลลิลิตร กับน้ำปราศจากไอออน ปริมาตร 0.6 มิลลิลิตร และตั้งเป็น auto zero
- 3.4.2.3.2 วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย blank สังเกตสัญญาณที่อ่านได้
- 3.4.2.3.3 วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายผสมระหว่าง Bphen กับ Fe(II) ที่ความเข้มข้น 0.15, 0.3, 0.6, 0.9, 1.2 และ 1.5 มิลลิกรัมต่อลิตรแล้วนำสัญญาณที่ได้ไปสร้างกราฟมาตรฐาน

3.4.3 การศึกษาหลักการตรวจวัด Fe(III) อาศัยการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง Fe(III)-NFD

- 3.4.3.1 ปิเปต KHP บัฟเฟอร์เข้มข้น 500 ไมโครโมลาร์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงในขวดไวอัลขนาด 10 มิลลิลิตร
- 3.4.3.2 ปิเปตน้ำปราศจากไอออน ปริมาตร 1 มิลลิลิตร และสารละลายมาตรฐาน Fe(III) ที่ความเข้มข้น 0 ไมโครโมลาร์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ตามลำดับ ลงในขวดไวอัล
- 3.4.3.3 ปิเปต NFD เข้มข้น 10 ไมโครโมลาร์ ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ตามลงไป และวอร์เท็กซ์เป็นเวลา 1 นาที
- 3.4.3.4 ถ่ายใส่คิวเวตต์ขนาด 0.35 มิลลิลิตร และนำไปวัดค่าการเรืองแสงด้วย spectrofluorometer โดยกระตุ้นที่ความยาวคลื่น 485 นาโนเมตร
- 3.4.3.5 ทำ 3.4.3.1 – 3.4.3.4 ซ้ำ 2 ครั้ง
- 3.4.3.6 ทำ 1.4.3.1 – 1.4.3.5 ซ้ำ โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน Fe(III) ในช่วง 1 - 100 ไมโครโมลาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.4 การศึกษาปฏิกิริยาระหว่าง Bphen กับ Fe(II) บนอุปกรณ์การตรวจวัดแบบชั้นเดียว

- 3.4.4.1 หยด Bphen ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ลงบน single-layered PAD ปริมาตร 10 ไมโครลิตร
- 3.4.4.2 นำ PAD ไว้ในที่ที่บสแสงเป็นเวลา 7 นาที
- 3.4.4.3 หยดสารละลายเหล็กมาตรฐาน 0 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 ไมโครลิตร ลงบน single-layered PAD แล้วทิ้งไว้ 5 นาที
- 3.4.4.4 ใช้ไทร์เป่าลมเป่า single-layered PAD ที่หยดสารละลายเหล็กเป็นเวลา 10 นาที บันทึกผลโดยการถ่ายภาพด้วยกล้องโทรศัพท์มือถือ POCO X3 Pro ภายใต้แสงขาวในโหมดอัตโนมัติ
- 3.4.4.5 นำไปวัดค่าสีโดยใช้โปรแกรม ImageJ™ และอ่านค่า Green intensity จากโปรแกรมเพื่อนำไปสร้างกราฟมาตรฐาน
- 3.4.4.6 ทำ 3.4.4.1 – 3.4.4.5 ซ้ำอีก 2 ครั้ง
- 3.4.4.7 ทำ 3.4.4.1 – 3.4.4.6. ซ้ำโดยเปลี่ยนโดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายเหล็กมาตรฐานในช่วง 0.15 - 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.4.5 การศึกษาอิทธิพลของ Fe(III) ที่มีผลต่อการทำปฏิกิริยาระหว่าง Fe(II) และ Bphen บนอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษแบบชั้นเดียว

- 3.4.5.1 การศึกษาปฏิกิริยาระหว่าง Fe(III) กับ Bphen
 - 3.4.5.1.1 หยด Bphen ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ลงบน single-layered PAD ปริมาตร 10 ไมโครลิตร
 - 3.4.5.1.2 นำ single-layered PAD ไว้ในที่ที่บสแสงเป็นเวลา 7 นาที
 - 3.4.5.1.3 หยดสารละลายมาตรฐาน Fe(III) 0 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 ไมโครลิตร ลงบน single-layered PAD แล้วทิ้งไว้ 5 นาที
 - 3.4.5.1.4 ใช้ไทร์เป่าลมเป่าเป็นเวลา 10 นาที บันทึกผลโดยการถ่ายภาพด้วยกล้องโทรศัพท์มือถือ POCO X3 Pro ภายใต้แสงขาวในโหมดอัตโนมัติ
 - 3.4.5.1.5 นำภาพที่ถ่ายได้ไปวัดค่าสีโดยใช้โปรแกรม ImageJ™ และอ่านค่า Green intensity จากโปรแกรมเพื่อนำไปสร้างกราฟมาตรฐาน
 - 3.4.5.1.6 ทำ 3.4.5.1.1 – 3.4.5.1.4 ซ้ำ 2 ครั้ง
 - 3.4.5.1.7 ทำ 3.4.5.1.1 – 3.4.5.1.5 ซ้ำโดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน Fe(III) เป็น 0.6 และ 1.2 มิลลิกรัมต่อลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.5.2 การศึกษาปฏิกิริยาระหว่าง Fe(II) กับ Bphen ในสถานะที่มี Fe(III) ในสารละลาย

- 3.4.5.2.1 หยด Bphen เข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 ไมโครลิตร ลงบน single-layered PAD
- 3.4.5.2.2 นำ single-layered PAD ไว้ในที่ที่บดแสงเป็นเวลา 7 นาที
- 3.4.5.2.3 หยดสารละลายเหล็กผสม Fe(II)/Fe(III) ปริมาตร 100 ไมโครลิตร ลงบน single-layered PAD และทิ้งไว้ 5 นาที โดยความเข้มข้นของสารละลายผสม ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 แสดงการเตรียมสารละลายผสมระหว่าง Fe(II)/Fe(III) ในขวดวัด ปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร ในการศึกษาอิทธิพลของ Fe(III) ต่อปฏิกิริยาระหว่าง Fe(II) กับ Bphen บน single-layered PAD

ความเข้มข้นสุดท้ายของ Fe(II) (mg/L)	ความเข้มข้นสุดท้ายของ Fe(III) (mg/L)	ปริมาตรจากความเข้มข้น Fe(II) 3 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ใช้ (mL)	ปริมาตรจากความเข้มข้น Fe(III) 3 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ใช้ (mL)
0.15	1.2	0.5	4
0.3		1	
0.6		2	
0.9		3	
1.2		4	

- 3.4.5.2.4 ใช้ไดร์เป่าผมเป่า PAD ที่หยดสารละลายเหล็กเป็นเวลา 10 นาที และบันทึกผลด้วยกล้องโทรศัพท์มือถือ POCO X3 Pro ภายใต้แสงขาวในโหมดอัตโนมัติ
- 3.4.5.2.5 นำภาพที่บันทึกได้ไปวัดค่าสีโดยใช้โปรแกรม ImageJTM และอ่านค่า Green intensity จากโปรแกรมเพื่อนำไปสร้างกราฟมาตรฐาน
- 3.4.5.2.6 ทำ 3.4.5.2.1 – 3.4.5.2.5 ซ้ำ 2 ครั้ง
- 3.4.5.2.7 ทำ 3.4.5.2.1 – 3.4.5.2.6 ซ้ำ โดยเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเหล็กมาตรฐานดังแสดงในตารางที่ 3.4

3.4.6 การศึกษาปฏิกิริยาระหว่าง NFD กับ Fe(III) บนอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษแบบชั้นเดียว

- 3.4.6.1 หยดสารละลายเหล็กมาตรฐาน 0 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 130 ไมโครลิตร ลงบน single-layered PAD และทิ้งไว้ 5 นาที
- 3.4.6.2 หยด KHP บัฟเฟอร์จากข้อที่ 3.3.10 ลงบน single-layered PAD ปริมาตร 15 ไมโครลิตร
- 3.4.6.3 ใช้ไดร์เป่าผม เป่าสารละลายให้แห้งเป็นเวลา 10 นาที
- 3.4.6.4 หยด NFD จากข้อที่ 3.3.5 ลงบน single-layered PAD ปริมาตร 7 ไมโครลิตร ภายในกล่องที่บดแสงที่ฉายแสง UV ตลอดเวลา 3 ครั้ง แต่ละครั้งห่างกัน 1 นาที
- 3.4.6.5 สังเกตการเรืองแสงของปฏิกิริยาเป็นเวลา 8 นาที และถ่ายรูปบันทึกผลด้วยกล้องแท็บเล็ต Samsung Galaxy Tab S โดยเปิดโหมดอัตโนมัติในการถ่ายรูป
- 3.4.6.6 นำภาพที่บันทึกได้ไปวัดค่าสีโดยใช้โปรแกรม ImageJ™ และอ่านค่า Green intensity จากโปรแกรมเพื่อนำไปสร้างกราฟมาตรฐาน
- 3.4.6.7 ทำ 3.4.6.1 – 3.4.6.6 ซ้ำ 2 ครั้ง
- 3.4.6.8 ทำ 3.4.6.1 – 3.4.6.7 ซ้ำ โดยเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเหล็กมาตรฐานในช่วง 1 - 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.4.7 การศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการตรวจวัด Fe(II) และ Fe(III) ภายในครวเดียวกันโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษแบบสองชั้น

3.4.7.1 การศึกษาปริมาตรของสารตัวอย่าง

- 3.4.7.1.1 หยด Bphen เข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 ไมโครลิตร ลงบน Double-layered PAD ที่ใช้กาบสอบหน้าแบบหนา 2 ชั้น และเก็บในที่ที่บดแสงและรอให้แห้งเป็นเวลา 10 นาที
- 3.4.7.1.2 หยดสารละลายมาตรฐาน Fe(II) ความเข้มข้น 2 ppm ปริมาตร 120 ไมโครลิตร แล้วทิ้งไว้ 15 นาทีจึงบันทึกผล
- 3.4.7.1.3 ทำ 3.4.7.1.1. - 3.4.7.1.2. ซ้ำอย่างน้อย 2 ครั้ง
- 3.4.7.1.4 ทำ 3.4.7.1.1. - 3.4.7.1.3. โดยเปลี่ยนปริมาตรที่ใช้หยดเป็นปริมาตร 130, 140, 150 และ 160 ไมโครลิตร

3.4.7.2 การศึกษาความหนาของเทปกาวที่ใช้แยกชั้นตรวจวัด Fe(II) และ Fe(III)

- 3.4.7.2.1 หยด Bphen เข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 ไมโครลิตร ลงบน Double-layered PAD ที่ใช้กาบสอบหน้าแบบหนา 1 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาคณะเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ให้ผู้อื่นใช้ประโยชน์โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแต่ง และทิ้งไว้ 2 นาทีจึงบันทึกผล ค่าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3.4.7.2.3 ถ้าสารละลายไม่ไหลลงไปชั้นล่างจึงจะใช้ใช้ไทร์เป่าลมเป่าด้านบนของ PAD เพื่อช่วยให้สารหยดจากชั้นบนไปชั้นล่าง
- 3.4.7.2.4 ทำซ้ำอีก 2 ครั้ง
- 3.4.7.2.5 ทำ 3.4.7.2.1 - 3.4.7.2.4 ซ้ำโดยใช้ปริมาตร 90, 100, 110 และ 120 ไมโครลิตร
- 3.4.7.2.6 ทำ 3.4.7.2.1 - 3.4.7.2.5 ซ้ำโดยเปลี่ยนชั้นของ Double-layered PAD เป็น 2 และ 3 ชั้น

3.4.7.3 การศึกษาการเพิ่มความเข้มข้นในการตรวจวัด Fe(II) และ Fe(III)

- 3.4.7.3.1 หยดบัฟเฟอร์ KHP จาก 3.3.10 ปริมาตร 15 ไมโครลิตร ลงบนด้านหนึ่งของ Double-layered PAD และใช้ไทร์เป่าลม เป่าให้แห้งเป็นเวลา 2 นาที
- 3.4.7.3.2 พลิกด้านหยด Bphen เข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 ไมโครลิตร ลงด้านบนของ Double-layered PAD และทิ้งไว้ 30 วินาที
- 3.4.7.3.3 หยดสารละลายเหล็กผสม ตามความเข้มข้นที่แสดงในตารางที่ 3.5 ปริมาตร 120 ไมโครลิตร ทิ้งไว้ 2 นาที

ตารางที่ 3.5 แสดงการเตรียมสารละลายผสมระหว่าง Fe(II)/Fe(III) ในขวดวัด ปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร ในการทดลองเพิ่มความเข้มข้นของ Fe

ความเข้มข้นสุดท้ายของ Fe(II) (mg/L)	ความเข้มข้นสุดท้ายของ Fe(III) (mg/L)	ปริมาตรจากความเข้มข้น Fe(II) 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ใช้ (μL)	ปริมาตรจากความเข้มข้น Fe(III) 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ใช้ (mL)
0.15	1.0	37.5	0.5
0.3	3.0	75	1.5
0.6	5.0	150	2.5
0.9	8.0	225	4
1.2	10.0	300	5

- 3.4.7.3.4 จากนั้นหยดสารละลายเหล็กผสม ลงบนด้านบนของ PAD ซ้ำอีกหนึ่งครั้ง (preconcentration) และทิ้งไว้ 2 นาที
- 3.4.7.3.5 ใช้ไทร์เป่าลม เป่าให้แห้งเป็นเวลา 10 นาที
- 3.4.7.3.6 พลิกด้านของ Double-layered PAD และใช้ไทร์เป่าลม เป่าให้แห้งเป็นเวลา 8 นาที
- 3.4.7.3.7 หยด NFD จาก 3.3.5 ปริมาตร 7 ไมโครลิตร ภายในกล่องที่บัสแสงที่ฉายแสง UV ตลอดเวลา 3 ครั้ง แต่ละครั้งห่างกัน 1 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ไปยังสื่ออื่นโดยไม่ผ่านการคัดค้าน
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3.4.7.3.8 สังเกตการเรืองแสงของปฏิกิริยาเป็นเวลา 8 นาที และถ่ายรูปบันทึกผลด้วยกล้องแท็บเล็ต Samsung Galaxy Tab S ในโหมดอัตโนมัติ
- 3.4.7.3.9 ถ่ายรูปบันทึกผลของผลิตภัณฑ์ Fe(II)-Bphen ภายใต้แสงขาวด้วยกล้องโทรศัพท์มือถือ POCO X3 Pro ในโหมดอัตโนมัติ
- 3.4.7.3.10 นำภาพที่บันทึกได้ไปวัดค่าสีโดยใช้โปรแกรม ImageJTM และอ่านค่า Green intensity จากโปรแกรมเพื่อนำไปสร้างกราฟมาตรฐาน
- 3.4.7.3.11 ทำ 3.4.7.3.1 – 3.4.7.3.10 ซ้ำอย่างน้อย 2 ครั้ง โดยเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเหล็กมาตรฐานดังแสดงในตารางที่ 3.5
- 3.4.7.3.12 ทำ 3.4.7.3.1 – 3.4.7.3.11 ซ้ำ โดยเปลี่ยนปริมาตรที่ใช้หยดสารละลายผสมเป็น 110 และ 100 ไมโครลิตร ตามลำดับ

3.4.8 การประเมินคุณลักษณะของวิธีการตรวจวัด Fe(II) และ Fe(III) ภายในคร่าวเดียวกันโดยใช้อุปกรณ์การตรวจวัดบนกระดาษแบบสองชั้น

3.4.8.1 ความเที่ยง

- 3.4.8.1.1 หยด KHP บัฟเฟอร์ จากข้อที่ 3.3.10 ปริมาตร 15 ไมโครลิตร ลงบนชั้นล่างของ Double-layered PAD และใช้ไม้ขีดไฟเผาไหม้เป่าให้แห้งเป็นเวลา 2 นาที
- 3.4.8.1.2 หยด Bphen เข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 ไมโครลิตร ลงบนอีกด้านของ Double-layered PAD และทิ้งไว้ 30 วินาที
- 3.4.8.1.3 หยดสารละลายเหล็กผสม 0.15 มิลลิกรัมต่อลิตร ของ Fe(II) ผสมกับ 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ของ Fe(III) ที่เตรียมได้จากตารางที่ 3.6 ปริมาตร 120 ไมโครลิตร ลงชั้นบนของ Double-layered PAD ที่มี Bphen และทิ้งไว้ 2 นาที

ตารางที่ 3.6 แสดงการเตรียมสารละลายผสมระหว่าง Fe(II)/Fe(III) ในขวดวัดปริมาตรขนาด 10 มิลลิตร ในการประเมินหาความเที่ยง

ความเข้มข้นสุดท้ายของ Fe(II) (mg/L)	ความเข้มข้นสุดท้ายของ Fe(III) (mg/L)	ปริมาตรจากความเข้มข้น Fe(II) 3 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ใช้ (mL)	ปริมาตรจากความเข้มข้น Fe(III) 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ใช้ (mL)
0.15	1.0	0.5	0.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3.4.8.1.4 หยดสารละลายเหล็กผสม 0.15 มิลลิกรัมต่อลิตร ของ Fe(II) กับ 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ของ Fe(III) ลงบนด้านบนของ Double-layered PAD ซ้ำอีกหนึ่งครั้ง (preconcentration) และทิ้งไว้ 2 นาที
- 3.4.8.1.5 ใช้ไทร์เป่าลม เป่าให้แห้งเป็นเวลา 10 นาที
- 3.4.8.1.6 พลิกด้านของ PAD และใช้ไทร์เป่าลม เป่าสารละลายให้แห้งเป็นเวลา 8 นาที
- 3.4.8.1.7 หยด NFD ที่เตรียมจากข้อที่ 3.3.5 ปริมาตร 7 ไมโครลิตร ลงบน Double-layered PAD ที่พลิกด้านแล้ว ภายในกล่องที่ปิดแสงที่ฉายแสง UV ตลอดเวลา 3 ครั้ง แต่ละครั้งห่างกัน 1 นาที
- 3.4.8.1.8 สังเกตการเรืองแสงของปฏิกิริยาเป็นเวลา 8 นาที และถ่ายรูปบันทึกผลด้วยกล้องแท็บเล็ต Samsung Galaxy Tab S ในโหมดอัตโนมัติ
- 3.4.8.1.9 ถ่ายรูปบันทึกผลของผลิตภัณฑ์ Fe(II)-Bphen ภายใต้แสงขาวด้วยกล้องโทรศัพท์มือถือ POCO X3 Pro ในโหมดอัตโนมัติ
- 3.4.8.1.10 นำภาพที่บันทึกได้ไปวัดค่าสีโดยใช้โปรแกรม ImageJ™ และอ่านค่า Green intensity จากโปรแกรมเพื่อนำไปหาค่า %RSD
- 3.4.8.1.11 ทำ 3.4.8.1.1 – 3.4.8.1.10 ซ้ำอีก 9 ครั้ง

3.4.8.2 ค่าร้อยละของการวิเคราะห์คืนกลับ

ทำการทดลองเหมือนกับในหัวข้อ 3.4.9 การวิเคราะห์หาปริมาณ Fe(II) และ Fe(III) ในตัวอย่าง โดยนำผลที่คำนวณได้จากกราฟมาตรฐานเทียบกับปริมาณ Fe(II)/Fe(III) ในตัวอย่างที่เตรียมได้จาก 3.4.9.3.2 แล้วคำนวณหาค่าร้อยละของการวิเคราะห์คืนกลับ

3.4.8.3 ความจำเพาะเจาะจงต่อการตรวจวัด Fe(II)

- 3.4.8.3.1 ปิเปตสารละลายสต็อกโลหะไอออนจากข้อ 3.3.11 ปริมาตร 25 ไมโครลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 5 มิลลิลิตร
- 3.4.8.3.2 ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จะได้สารละลายโลหะไอออนเข้มข้น 1.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 3.4.8.3.3 หยด Bphen เข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ลงบน single-layered PAD และทิ้งไว้ในที่ที่ปิดแสงเป็นเวลา 7 นาที
- 3.4.8.3.4 หยดสารละลายโลหะไอออนจากข้อ 3.4.8.3.2 ปริมาตร 100 ไมโครลิตร ลงบน single-layered PAD จากข้อ 3.4.8.3.3
- 3.4.8.3.5 นำ single-layered PAD เก็บไว้ในที่ที่ปิดแสงเป็นเวลา 5 นาที และใช้ไทร์เป่าลม เป่าให้แห้งเป็นเวลา 10 นาที
- 3.4.8.3.6 ถ่ายรูปบันทึกผล แล้วนำไปวัดค่าสีด้วยโดยใช้โปรแกรม ImageJ™ และอ่านค่า Green intensity จากโปรแกรมเพื่อนำไปสร้างกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ทางการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.8.4 ความจำเพาะเจาะจงต่อการตรวจวัด Fe(III)

- 3.4.8.4.1 ปิเปตสารละลายสต็อกโลหะไอออนจากข้อ 3.3.11 ปริมาตร 225 ไมโครลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 5 มิลลิลิตร
- 3.4.8.4.2 ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จะได้สารละลายโลหะไอออนเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 3.4.8.4.3 หยดสารละลายโลหะไอออนจากข้อ 3.4.8.4.2 ปริมาตร 130 ไมโครลิตร ลงบน single-layered PAD และนำไปไว้ในที่ที่บแสงเป็นเวลา 5 นาที
- 3.4.8.4.4 หยดบัฟเฟอร์ KHP จากข้อ 3.3.10 ปริมาตร 15 ไมโครลิตร ลงบน single-layered PAD จากข้อ 3.4.8.4.3
- 3.4.8.4.5 ใช้ไคร์เป่าลม เป่าให้แห้งเป็นเวลา 10 นาที
- 3.4.8.4.6 หยด NFD ที่เตรียมจากข้อที่ 3.3.5 ปริมาตร 7 ไมโครลิตร ลงบน single-layered PAD ภายในกล่องที่บแสงที่ฉายแสง UV ตลอดเวลา 3 ครั้ง แต่แต่ละครั้งห่างกัน 1 นาที
- 3.4.8.4.7 ทิ้งไว้เป็นเวลา 8 นาที ถ่ายรูปบันทึกผล แล้วนำไปวัดค่าสีด้วยโดยใช้โปรแกรม ImageJ™ และอ่านค่า Green intensity จากโปรแกรมเพื่อนำไปสร้างกราฟมาตรฐาน

3.4.8.5 ระดับความเข้มข้นต่ำสุดที่ตรวจวัดได้

- 3.4.8.5.1 หยด KHP บัฟเฟอร์จาก 3.3.10 ลงบนด้านหลังของ Double-layered PAD ปริมาตร 15 ไมโครลิตร และทำให้แห้งด้วยไคร์เป่าลมเป็นเวลา 2 นาที
- 3.4.8.5.2 พลิกด้านของ Double-layered PAD หยด Bphen เข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 ไมโครลิตร และทิ้งไว้ 30 วินาที
- 3.4.8.5.3 หยดสารละลายเหล็กมาตรฐาน 0 ppm ปริมาตร 120 ไมโครลิตร ตามลงไป และทิ้งไว้ 2 นาที
- 3.4.8.5.4 จากนั้นหยดสารละลายเหล็กมาตรฐาน 0 ppm ลงบนด้านบนของ PAD ซ้ำอีกหนึ่งครั้ง (preconcentration) และทิ้งไว้ 2 นาที
- 3.4.8.5.5 ใช้ไคร์เป่าลม เป่าสารละลายให้แห้งเป็นเวลา 10 นาที
- 3.4.8.5.6 พลิกด้านของ Double-layered PAD และใช้ไคร์เป่าลม เป่าสารละลายให้แห้งเป็นเวลา 8 นาที
- 3.4.8.5.7 หยด NFD ปริมาตร 7 ไมโครลิตร ภายในกล่องที่บแสงที่ฉายแสง UV ตลอดเวลา 3 ครั้ง แต่แต่ละครั้งห่างกัน 1 นาที
- 3.4.8.5.8 สังเกตการเรืองแสงของปฏิกิริยาเป็นเวลา 8 นาที และถ่ายรูปบันทึกผลด้วยกล้องแท็บเล็ต Samsung galaxy Tab S โดยเปิดโหมดอัตโนมัติในการถ่ายรูป
- 3.4.8.5.9 ถ่ายรูปบันทึกสีของผลิตภัณฑ์ Fe(II)-Bphen ด้วยกล้องโทรศัพท์มือถือ POCO X3 Pro

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ระบุเฉพาะเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3.4.8.5.10 นำภาพที่บันทึกได้ไปวัดค่าสีด้วยซอฟต์แวร์ ImageJ™ แล้วนำค่าสีที่ได้ไปสร้างกราฟมาตรฐาน
- 3.4.8.5.11 ทำ 3.4.8.5.1 – 3.4.8.5.10 ซ้ำ โดยเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเหล็กมาตรฐานในช่วงสารละลายผสม Fe(II) 0.015 มิลลิกรัมต่อลิตรกับ Fe(III) 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึง สารละลายผสม Fe(II) 0.6 มิลลิกรัมต่อลิตรกับ Fe(III) 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.4.8.6 ค่าต่ำสุดที่สามารถวิเคราะห์ได้

- 3.4.8.6.1 นำผลการทดลองจากการศึกษาการเพิ่มความเข้มข้นในการตรวจวัด Fe(II) และ Fe(III) ที่ปริมาตร 120/120 ไมโครลิตร มาหาค่าต่ำสุดที่สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและความชันของกราฟมาตรฐานในการคำนวณ

3.4.9 การวิเคราะห์หาปริมาณ Fe(II) และ Fe(III) ในตัวอย่าง

3.4.9.1 วิธีการเตรียม mix spiked sample

- 3.4.9.1.1 ปิเปตสารละลายสต็อก Fe(II) จาก 3.3.6 ปริมาตร 3.5 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร
- 3.4.9.1.2 ปิเปตสารละลายสต็อก Fe(III) จาก AAS ปริมาตร 9.0 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรที่มี Fe(II)
- 3.4.9.1.3 ปรับปริมาตรด้วยน้ำดื่ม จะได้สารละลายตัวอย่างเข้มข้น 7 มิลลิกรัมต่อลิตร ของ Fe(II) ผสมกับ 180 มิลลิกรัมต่อลิตร ของ Fe(III)
- 3.4.9.1.4 ทำ 3.4.9.1.1 – 3.4.9.1.3 ซ้ำ โดยปรับปริมาตรด้วยน้ำประปา

3.4.9.2 วิธีการเตรียม non spiked sample

- 3.4.9.2.1 ปิเปตกรดซัลฟิวริก 0.0184 โมลาร์ ปริมาตร 3.5 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร
- 3.4.9.2.2 ปิเปตกรดไนตริก 0.5 โมลาร์ ปริมาตร 9.0 มิลลิลิตร ตามลงไป และปรับปริมาตรด้วยน้ำดื่ม
- 3.4.9.2.3 ทำ 3.4.9.2.1 – 3.4.9.2.2 ซ้ำ โดยปรับปริมาตรด้วยน้ำประปา

3.4.9.3 วิธีการเจือจาง mix spiked sample

- 3.4.9.3.1 ปิเปตสารละลายจาก 3.4.9.1.3 ปริมาตร 500 ไมโครลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร
- 3.4.9.3.2 ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จะได้สารละลายตัวอย่างเข้มข้น 0.35 มิลลิกรัมต่อลิตร ของ Fe(II) ผสมกับ 9 มิลลิกรัมต่อลิตร ของ Fe(III)

3.4.9.4 วิธีการทดลอง

- 3.4.9.4.1 หยด Bphen เข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 ไมโครลิตร ลงในตัวอย่าง ปริมาตร 10 ไมโครลิตร และปล่อยให้ปฏิกิริยาเกิดจนสมบูรณ์ นำไปวัดค่าสีที่ความยาวคลื่น 680 นาโนเมตร โดยใช้ Double-layered PAD และทิ้งไว้ 30 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอก
หรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจาก
เจ้าของเอกสาร

- 3.4.9.4.2 หยตสารละลายเหล็กผสม Fe(II)/Fe(III) ปริมาตร 120 ไมโครลิตร ลงด้านบนของ Double-layered PAD และทิ้งไว้ 2 นาที โดยสารละลายผสม Fe(II)/Fe(III) เตรียมได้ดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 แสดงการเตรียมสารละลายผสมระหว่าง Fe(II)/Fe(III) ในขวดวัด ปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร ในการทดลองหาปริมาณ Fe ในตัวอย่าง

ความเข้มข้นสุดท้ายของ Fe(II) (mg/L)	ความเข้มข้นสุดท้ายของ Fe(III) (mg/L)	ปริมาตรจากความเข้มข้น Fe(II) 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ใช้ (μ L)	ปริมาตรจากความเข้มข้น Fe(III) 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร จาก AAS ที่ใช้ (μ L)
0.1	1.0	25	25
0.2	3.0	50	75
0.3	5.0	75	125
0.4	8.0	100	200
0.5	10.0	125	225

- 3.4.9.4.3 จากนั้นหยตสารละลายเหล็กผสม Fe(II)/Fe(III) ปริมาตร 120 ไมโครลิตร ลงด้านบนของ Double-layered PAD ซ้ำอีกหนึ่งครั้ง (preconcentration) และทิ้งไว้ 2 นาที
- 3.4.9.4.4 ใช้ไดร์เป่าผม เป่าให้แห้งเป็นเวลา 10 นาที
- 3.4.9.4.5 พลิกด้านของ Double-layered PAD และใช้ไดร์เป่าผม เป่าสารละลายให้แห้งเป็นเวลา 8 นาที
- 3.4.9.4.6 หยต NFD จากข้อที่ 3.3.5 บน Double-layered PAD ที่พลิกด้านแล้ว ปริมาตร 7 ไมโครลิตร ภายในกล่องที่บแสงที่ฉายแสง UV ตลอดเวลา 3 ครั้ง แต่ละครั้งห่างกัน 1 นาที
- 3.4.9.4.7 สังเกตการเรืองแสงของปฏิกิริยาเป็นเวลา 8 นาที และถ่ายรูปบันทึกผลด้วยกล้องแท็บเล็ต Samsung Galaxy Tab S ในโหมดอัตโนมัติ
- 3.4.9.4.8 ถ่ายรูปบันทึกผลของผลิตภัณฑ์ Fe(II)-Bphen ภายใต้แสงขาวด้วยกล้องโทรศัพท์มือถือ POCO X3 Pro ในโหมดอัตโนมัติ
- 3.4.9.4.9 นำภาพที่บันทึกได้ไปวัดค่าสีโดยใช้โปรแกรม ImageJTM และอ่านค่า Green intensity จากโปรแกรมเพื่อนำไปสร้างกราฟมาตรฐาน
- 3.4.9.4.10 ทำ 3.4.9.4.1 – 3.4.9.4.9 ซ้ำ 2 ครั้ง
- 3.4.9.4.11 ทำ 3.4.9.4.1 – 3.4.9.4.10 ซ้ำ โดยเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเหล็กผสมดังแสดงในตารางที่ 3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3.4.9.4.12 ทำ 3.4.9.4.1 – 3.4.9.4.11 ซ้ำ 3 ครั้ง โดยเปลี่ยนสารละลายผสม Fe(II)/Fe(III) เป็นตัวอย่างน้ำดื่ม และน้ำประปาที่เตรียมได้จาก 3.4.9.3.2 ตามลำดับ

3.4.10 การทดสอบความถูกต้องของวิธี

3.4.10.1 วิธีวิเคราะห์ Fe(II) ด้วย UV-Vis

- 3.4.10.1.1 หยด Bphen จากข้อ 3.3.4 ปริมาตร 400 ไมโครลิตร ลงในขวดไว้อัลขนาด 4 มิลลิลิตร
- 3.4.10.1.2 ปิเปตสารละลายมาตรฐาน Fe(II) 0 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 600 ไมโครลิตร ตามลงไป
- 3.4.10.1.3 ผสมละลายด้วยเครื่องวอร์เท็กซ์ 1 นาที แล้วถ่ายใส่ควิเวตต์ขนาด 0.35 มิลลิลิตร
- 3.4.10.1.4 นำไปวัด ค่า การ ดู ด ก ลี น แ ส ง ด้วย เครื่อง UV-Vis spectrophotometer ในนาที่ที่ 5
- 3.4.10.1.5 ทำ 3.4.10.1.1 – 3.4.10.1.4 ซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง โดยเพิ่มความเข้มข้นของ Fe(II) ในช่วง 0.15 – 1.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 3.4.10.1.6 ทำ 3.4.10.1.1 – 3.4.10.1.5 ซ้ำ โดยเปลี่ยนสารละลายมาตรฐาน Fe(II) เป็นตัวอย่างน้ำดื่ม และน้ำประปาที่เตรียมได้จาก 3.4.9.1.4 ตามลำดับ

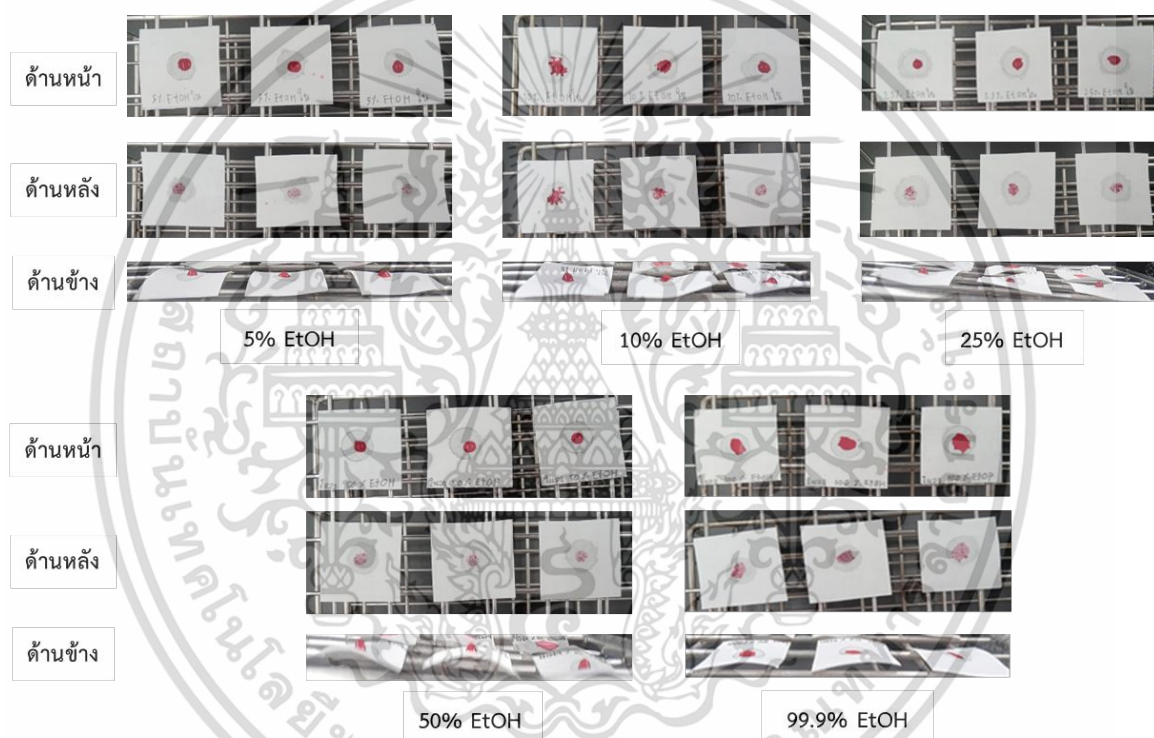
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 ผลศึกษาการสร้างลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำบนกระดาษกรองด้วยกาวกันน้ำ

4.1.1 ผลการทดสอบความสามารถในการกันน้ำของกาว

ทำการทดสอบการกันน้ำของอุปกรณ์ที่สร้างลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำด้วยกาว เพื่อดูประสิทธิภาพของการกันน้ำเมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที ซึ่งทำการทดสอบโดยการหยดน้ำสีลงบนบริเวณส่วนที่ชอบน้ำและส่วนที่ไม่ชอบน้ำปริมาตร 15 ไมโครลิตร ผลการทดลองที่ได้แสดงดังต่อไปนี้



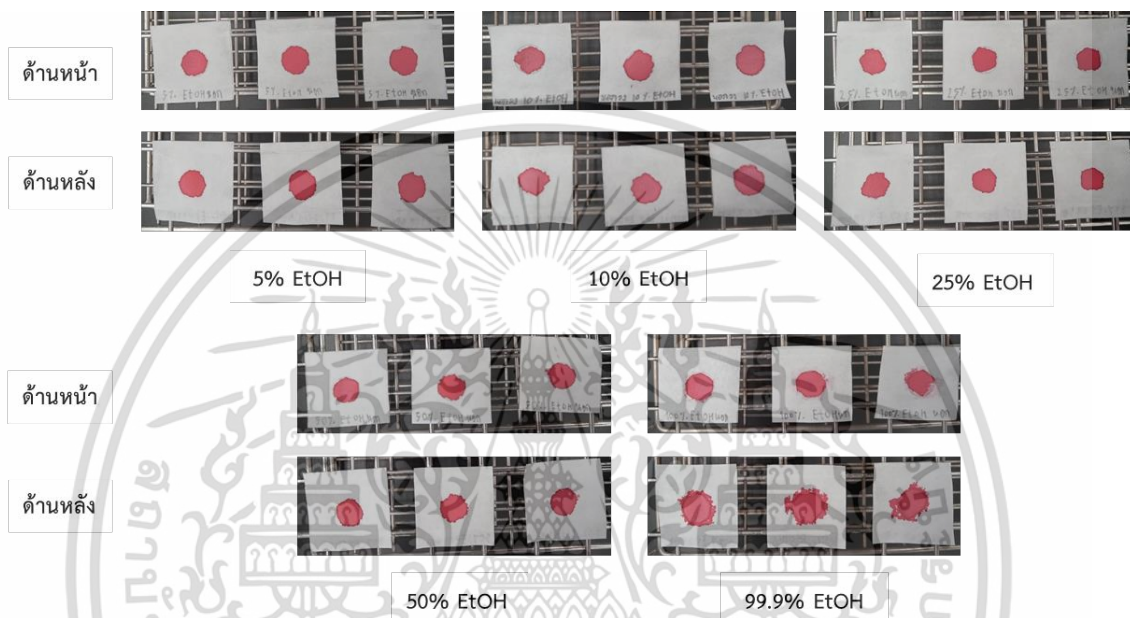
รูปที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบความสามารถในการกันน้ำของอุปกรณ์ที่สร้างลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำด้วยกาวกันน้ำที่ละลายในตัวทำละลายเอทานอลที่ความเข้มข้นต่างๆ ในอัตราส่วน 1:1

จากรูปที่ 4.1 พบว่า เมื่อทดสอบความสามารถในการกันน้ำของกาวโดยใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลายที่ความเข้มข้น 5 10 และ 25 เปอร์เซ็นต์ไม่สามารถกันน้ำให้แพร่ผ่านไปยังด้านหลังได้เมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที แต่ที่ความเข้มข้น 5 และ 25 เปอร์เซ็นต์ มีการซึมของน้ำสีที่น้อยกว่าที่ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่เอทานอลเข้มข้น 99.9 เปอร์เซ็นต์ สามารถกันน้ำแพร่ผ่านได้เล็กน้อย และที่เอทานอลเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์สามารถกันน้ำได้และให้ผลที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับความเข้มข้นอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ผลการทดสอบความสามารถการกักเก็บน้ำของอุปกรณ์ที่สร้างลวดลายส่วนที่ไม่ชอบน้ำด้วยสารละลายกาวยา

ทำการทดสอบการกักเก็บน้ำของอุปกรณ์ที่สร้างลวดลายส่วนที่ไม่ชอบน้ำด้วยกาวยา เพื่อดูประสิทธิภาพของการกักเก็บน้ำเมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที ซึ่งทำการทดสอบโดยการหยดน้ำสีลงบนบริเวณส่วนที่ชอบน้ำและส่วนที่ไม่ชอบน้ำปริมาตร 15 ไมโครลิตร ผลการทดลองที่ได้แสดงดังต่อไปนี้

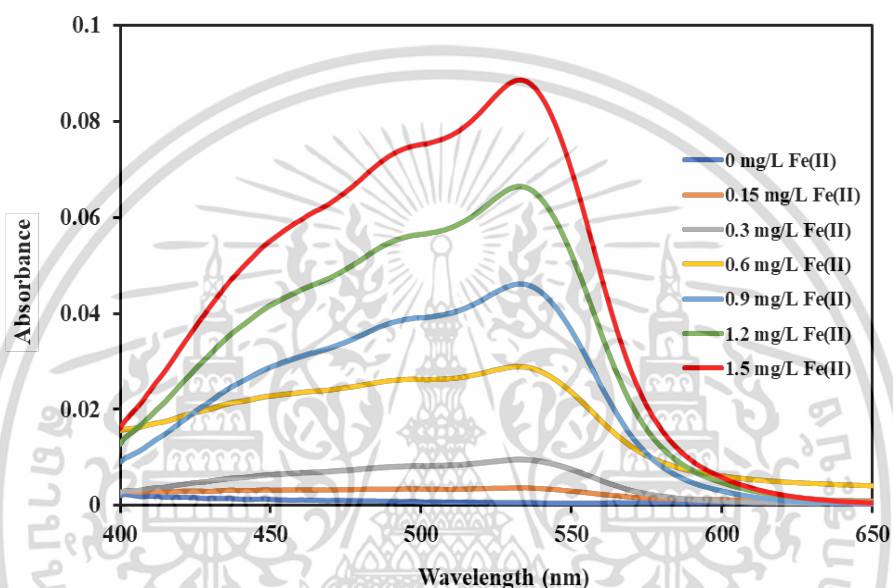


รูปที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบความสามารถในการกักเก็บน้ำของอุปกรณ์ที่สร้างลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำด้วยกาวยาที่ละลายในตัวทำละลายเอทานอลที่ความเข้มข้นต่างๆ ในอัตราส่วน 1:1

จากรูปที่ 4.2 พบว่า เมื่อทดสอบความสามารถการกักเก็บน้ำของอุปกรณ์ที่สร้างลวดลายส่วนที่ไม่ชอบน้ำด้วยกาวยาที่ใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลายให้ผลที่ไม่แตกต่างกัน โดยที่เอทานอลเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์มีการแพร่ผ่านของน้ำสีออกนอกขอบเขตที่กำหนดน้อยที่สุด และแพร่ออกมากที่สุดที่เอทานอลเข้มข้น 99.9 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นเมื่อพิจารณาทั้งรูปที่ 4.1 และ 4.2 แล้วจึงใช้สารละลายกาวยาที่มีตัวทำละลายเอทานอล 50 เปอร์เซ็นต์ในการประดิษฐ์ PAD ไว้ใช้ในงานวิจัยนี้

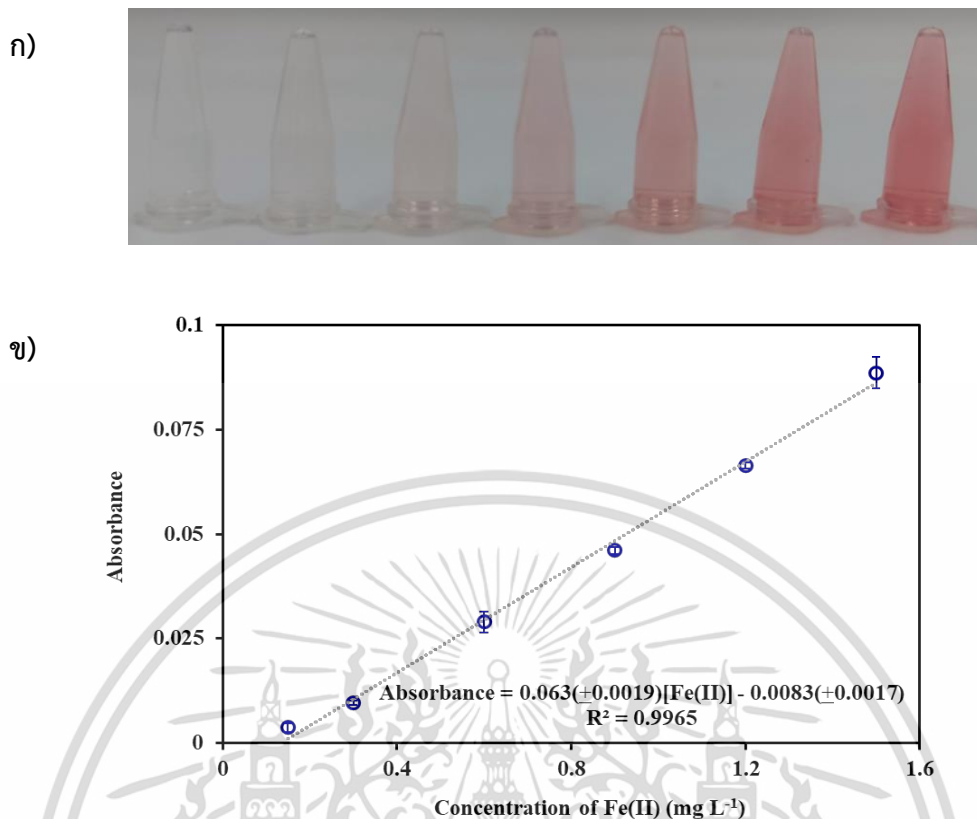
4.2 ผลการศึกษาหลักการตรวจวัด Fe(II) อาศัยการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง Fe(II)-Bphen

ทำการทดลองโดยปิเปตสารละลาย Bphen ที่ความเข้มข้น 300 ไมโครโมลาร์ ปริมาตร 0.4 มิลลิลิตร กับสารละลายมาตรฐาน Fe(II) ที่ความเข้มข้น 0 – 1.5 ppm ปริมาตร 0.6 มิลลิลิตร ลงในขวดไวโอลขนาด 4 มิลลิลิตร ผสมสารละลายด้วยเครื่องวอร์เท็กซ์ 10 วินาที และถ่ายใส่คิวเวตต์ขนาด 0.35 มิลลิลิตร ก่อนจะนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 สเปกตรัมค่าการดูดกลืนแสงของ Bphen (300 μ M) ที่ทำปฏิกิริยากับ Fe (II) ที่ความเข้มข้นต่างๆ (0 – 1.5 mg/L)

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่า เมื่อปิเปตสารละลายเหล็กมาตรฐานลงไป Bphen เกิดปฏิกิริยากับ Fe(II) ได้สารประกอบเชิงซ้อน Fe(II)-Bphen เกิดขึ้น และสารประกอบนี้ดูดกลืนแสงสีเขียวที่ความยาวคลื่น 533 นาโนเมตรและสะท้อนสีแดงออกมาจึงเห็นสารละลายเป็นสีแดง และเมื่อความเข้มข้นของ Fe(II) เพิ่มขึ้น ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 533 นาโนเมตรของสารประกอบนี้ก็มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย



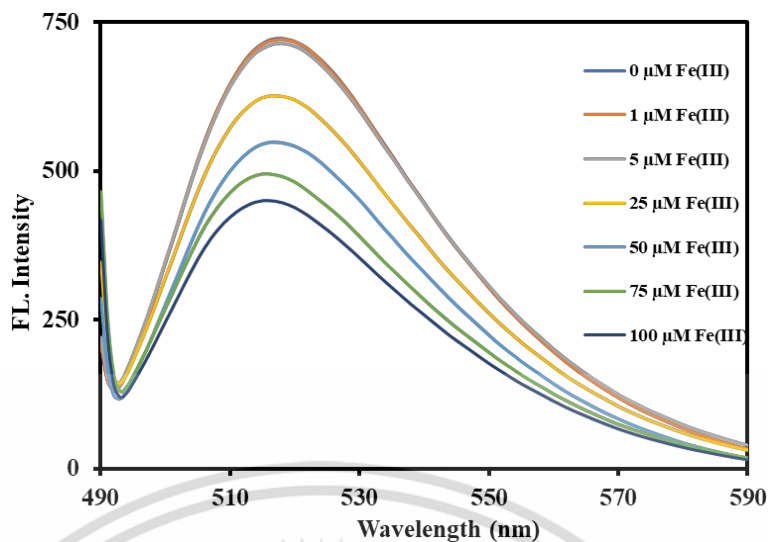
รูปที่ 4.4 แสดง ก) สีของผลิตภัณฑ์ Fe(II)-Bphen เมื่อความเข้มข้นของ Fe(II) เพิ่มขึ้น ข) กราฟมาตรฐานระหว่างค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยที่ความยาวคลื่น 533 นาโนเมตร กับค่าความเข้มข้นของสารมาตรฐาน Fe(II) ที่ความเข้มข้นต่างๆ (0.15 – 1.5 mg/L)

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่า เมื่อความเข้มข้น Fe(II) เพิ่มขึ้น สีของสารละลายก็จะเพิ่มขึ้นไปด้วยซึ่งสามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่า ส่วนกราฟมาตรฐานที่ได้มีความเป็นเส้นตรงที่ดีโดยสังเกตได้จากค่า R² ที่มีค่าเข้าใกล้ 1 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเมื่อ Bphen ทำปฏิกิริยากับ Fe(II) ที่ความเข้มข้นมากขึ้นจะทำให้ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 533 นาโนเมตรเพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้ที่ความเข้มข้น 0 มิลลิกรัมต่อลิตรของ Fe(II) มีค่าที่คลาดเคลื่อนสูงจึงตัดค่าที่ความเข้มข้นนี้ออกเพื่อให้กราฟมาตรฐานมีแนวโน้มความเป็นเส้นตรงที่ดี

4.3 ผลการศึกษาหลักการตรวจวัด Fe(III) อาศัยการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง Fe(III)-NFD

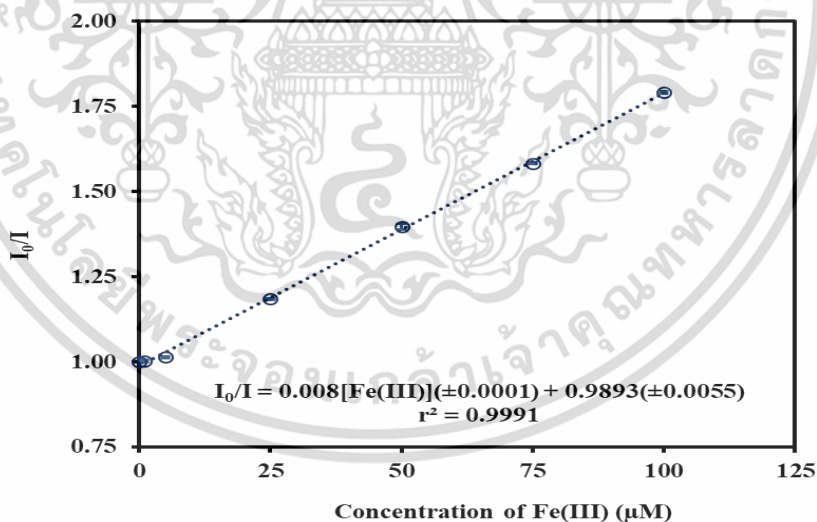
ทำการทดลองโดยปิเปตบัฟเฟอร์ KHP ที่ความเข้มข้น 500 ไมโครโมลาร์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงในขวดไวอัล ตามด้วยน้ำปราศจากไอออน 1 มิลลิลิตร กับสารละลายมาตรฐาน Fe(III) ในช่วงความเข้มข้น 0 – 100 ไมโครโมลาร์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร และ NFD ที่ความเข้มข้น 10 ไมโครโมลาร์ ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ผสมสารละลายด้วยเครื่องวอร์เท็กซ์ 1 นาทีและถ่ายใส่ควีเวตต์ขนาด 0.35 มิลลิลิตร ก่อนจะนำไปวัดค่าการเรืองแสงที่ความยาวคลื่น 485 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หากท่านใดประสงค์จะนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ผ่านการอนุญาตจากทางมหาวิทยาลัยฯ ขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏ และขอสงวนความรับผิดชอบหากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ผ่านการอนุญาตจากทางมหาวิทยาลัยฯ



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่าการเรืองแสงของ NFD ในสารละลายที่มี Fe(III) ที่ความเข้มข้นต่างๆ (0 – 100 μM)

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่า เมื่อความเข้มข้นของ Fe(III) เพิ่มขึ้น ค่าการเรืองแสงของ NFD ที่ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร มีแนวโน้มที่ลดลงซึ่งสวนทางกับค่าการดูดกลืนแสงของ Bphen จากรูปที่ 4.3

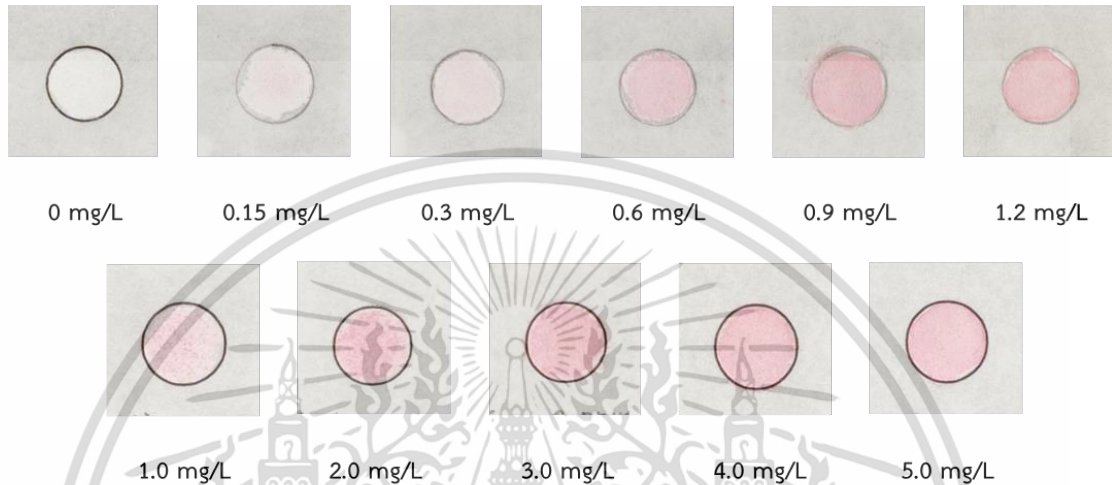


รูปที่ 4.6 แสดง Stern-Volmer's plot ของค่าการเรืองแสงของ NFD ในสารละลายที่มี Fe(III) ที่ความเข้มข้นต่างๆ (0 – 100 μM)

จากรูปที่ 4.6 พบว่า เมื่อนำสัญญาณที่ได้มาพลอตแบบ Stern-Volmer's ก็พบแนวโน้มความเป็นเส้นตรงที่ดีด้วย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

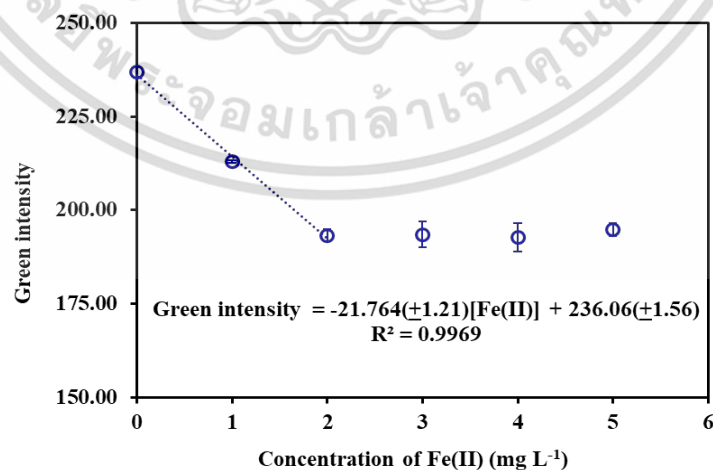
4.4 ผลการศึกษาปฏิกิริยาระหว่าง Bphen กับ Fe(II) บนอุปกรณ์การตรวจวัดแบบชั้นเดียว

ทำการทดสอบปฏิกิริยาระหว่าง Bphen เข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 ไมโครลิตรกับ Fe(II) 100 ไมโครลิตรบน single-layered PAD และถ่ายรูปบันทึกสีที่เกิดขึ้นหลังจาก PAD แห้งสนิทแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 4.7



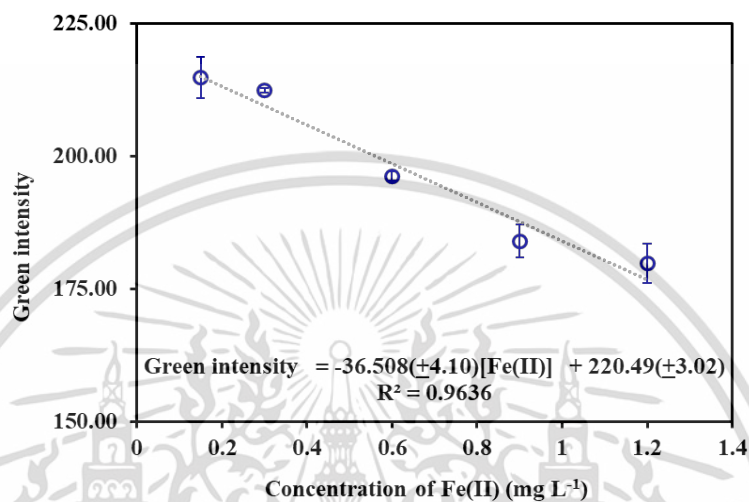
รูปที่ 4.7 แสดงภาพสีของผลิตภัณฑ์ Fe(II)-Bphen บน single-layered PAD ในช่วงความเข้มข้นของ Fe(II) 0 – 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากรูปที่ 4.7 พบว่า เมื่อความเข้มข้นของเหล็ก Fe(II) เพิ่มขึ้น สีที่เกิดขึ้นจะมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งสังเกตได้จากความเข้มข้นของสารละลายเหล็กมาตรฐานตั้งแต่ 0 - 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 3 - 5 มิลลิกรัมต่อลิตร สีมืดใกล้เคียงกันมากเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า



รูปที่ 4.8 แสดงกราฟมาตรฐานระหว่างค่าเฉลี่ย Green intensity ที่วัดได้จากซอฟต์แวร์ ImageJ™ เอกสารนี้กับค่าความเข้มข้นของสารมาตรฐาน Fe(II) (0-5 mg/L) บน single-layered PAD โดยขั้นตอนการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.8 พบว่า กราฟมาตรฐานมีความเป็นเส้นตรงที่ดีในช่วงความเข้มข้น 0 - 2 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่า Green intensity มีความใกล้เคียงกันมากจนไม่สามารถแสดงแนวโน้มความเป็นเส้นตรงได้ ดังนั้นที่ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นค่าสูงสุดที่สามารถตรวจวัด Fe(II) บน single-layered PAD ทำให้ต้องสร้างกราฟมาตรฐานเพื่อหาแนวโน้มความเป็นเส้นตรงภายในช่วงความเข้มข้นดังกล่าวในรูปที่ 4.9

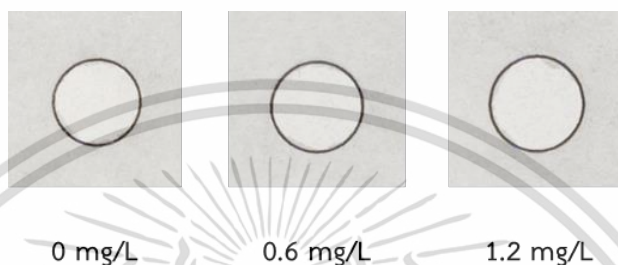


รูปที่ 4.9 แสดงกราฟมาตรฐานระหว่างค่าเฉลี่ย Green intensity ที่วัดได้จากซอฟต์แวร์ ImageJ™ กับค่าความเข้มข้นของสารมาตรฐาน Fe(II) (0.15 – 1.2 mg/L) บน single-layered PAD

จากรูปที่ 4.9 พบว่า เมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นของ Fe(II) กราฟมาตรฐานยังคงความเป็นเส้นตรงอยู่ ทั้งนี้ถ้าสังเกตจากรูปที่ 4.7 ที่ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานเหล็กต่ำยังคงให้สีที่ไม่เต็มวง โดยเฉพาะที่ความเข้มข้น 0.15, 0.9 และ 1.2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีภาพถ่ายหนึ่งภาพที่มีดีกว่าตัวอย่างอื่นๆ ทำให้มีแถบคลาดเคลื่อนที่สูง

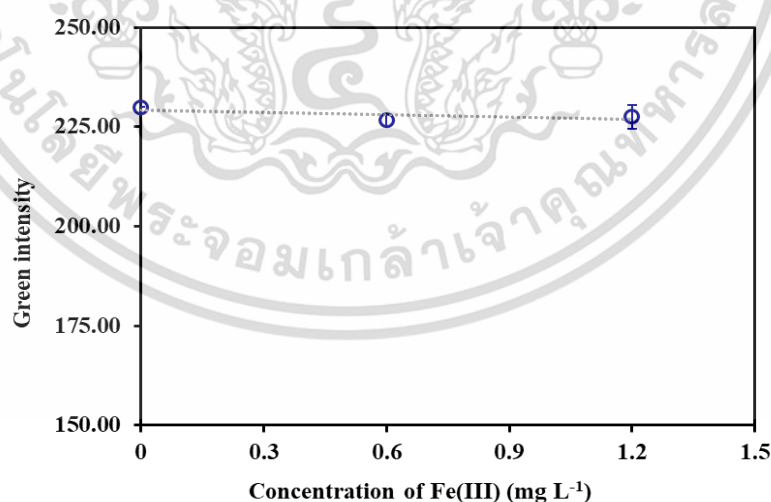
4.5 ผลการศึกษาอิทธิพลของ Fe(III) ที่มีผลต่อการทำปฏิกิริยาระหว่าง Fe(II) และ Bphen บนอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษแบบชั้นเดียว

เริ่มต้นได้มีการศึกษาปฏิกิริยาระหว่าง Bphen กับ Fe(III) เพื่อดูการรบกวนที่จะเกิดขึ้นถ้าสารละลายประกอบด้วย Fe(II) และ Fe(III) โดยใช้ Bphen ปริมาตร 10 ไมโครลิตรทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐาน Fe(III) ที่ความเข้มข้นต่างๆ ปริมาตร 100 ไมโครลิตร บน single-layered PAD ดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 แสดงภาพสีของผลิตภัณฑ์จากการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง Bphen กับ Fe(III) ช่วงความเข้มข้น 0 – 1.2 มิลลิกรัมต่อลิตร บน single-layered PAD

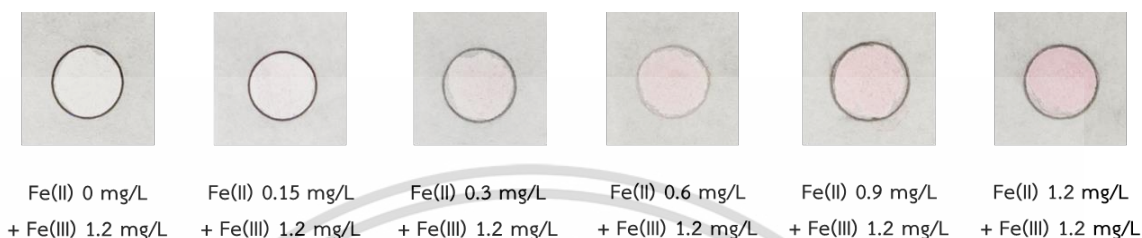
จากรูปที่ 4.10 พบว่า เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า ทุกความเข้มข้นของ Fe(III) ที่ทำปฏิกิริยากับ Bphen ไม่พบสีเกิดขึ้นหลังจาก PAD แห้งสนิทแล้ว และเพื่อยืนยันสิ่งที่เกิดขึ้นจึงได้นำไปวัดค่าสีด้วยซอฟต์แวร์ ImageJ™ ดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ย Green intensity ที่วัดได้จากซอฟต์แวร์ ImageJ™ กับค่าความเข้มข้นของสารมาตรฐาน Fe(III) (0 – 1.2 mg/L) บน single-layered PAD

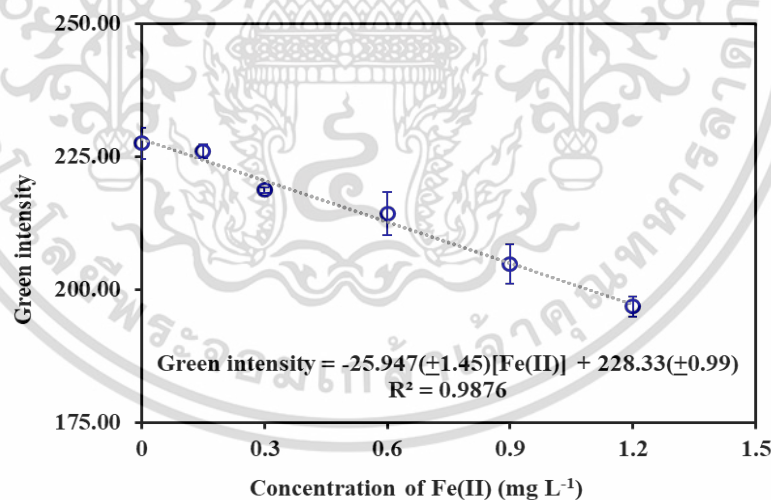
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าค่าสีที่วัดมีความใกล้เคียงกับสารละลายเปล่าแม้จะเพิ่มความเข้มข้นของ Fe(III) เป็น 0.6 และ 1.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งค่าสีที่วัดได้สอดคล้องกับที่สังเกตได้จากตาเปล่าในรูปที่ 4.10 ซึ่งอาจหมายความว่า ไม่มีการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง Bphen กับ Fe(III) ขึ้นบน PAD ทำให้ต้องมีการทดสอบกับสารละลายมาตรฐานที่คงความเข้มข้นของ Fe(III) ไว้ที่ 1.2 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ยังเพิ่มความเข้มข้นของ Fe(II) ที่แสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 แสดงภาพสีของผลิตภัณฑ์ Fe(II)-Bphen บน single-layered PAD ในสถานะที่มี Fe(III) ในสารละลาย

จากรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่า ที่ความเข้มข้นของ Fe(III) คงที่และความเข้มข้นของ Fe(II) เพิ่มขึ้นสีที่เกิดขึ้นจะเข้มขึ้นด้วย เพื่อเป็นการยืนยันจึงได้นำภาพไปวัดค่าสี ดังแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 แสดงกราฟมาตรฐานระหว่างค่าเฉลี่ย Green intensity ที่วัดได้จากซอฟต์แวร์ ImageJ™ กับค่าความเข้มข้นของสารมาตรฐาน Fe(II) (0 – 1.2 mg/L) ในสถานะที่มี Fe(III) อยู่ในสารละลายบน single-layered PAD

จากรูปที่ 4.13 พบว่า กราฟที่ได้มีแนวโน้มความเป็นเส้นตรงที่ดี แต่ก็มีค่าความชันที่ต่ำกว่ากราฟมาตรฐานของ Fe(II) เพียงอย่างเดียว ซึ่งหมายความว่า Fe(III) อาจไปขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง Fe(II)-Bphen ทำให้ความไวในการตรวจวัด Fe(II) ลดลง แต่ถึงกระนั้นไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fe(III) ก็ไม่ได้เกิดปฏิกิริยากับ Bphen จนมีสีที่เพี้ยนไปในรูปที่ 4.12 และจากรูปนี้ก็ยังมีความไวต่อ Fe(II) เป็นเส้นตรงที่ดี จึงอนุมานได้ว่า Bphen มีความไวและมีความจำเพาะเจาะจงต่อ Fe(II) ซึ่งสามารถนำไปเป็นรีเอเจนต์สำหรับ PAD ชั้นบนในการทำ Double-layered PAD เพื่อตรวจจับ Fe(II) ก่อนได้

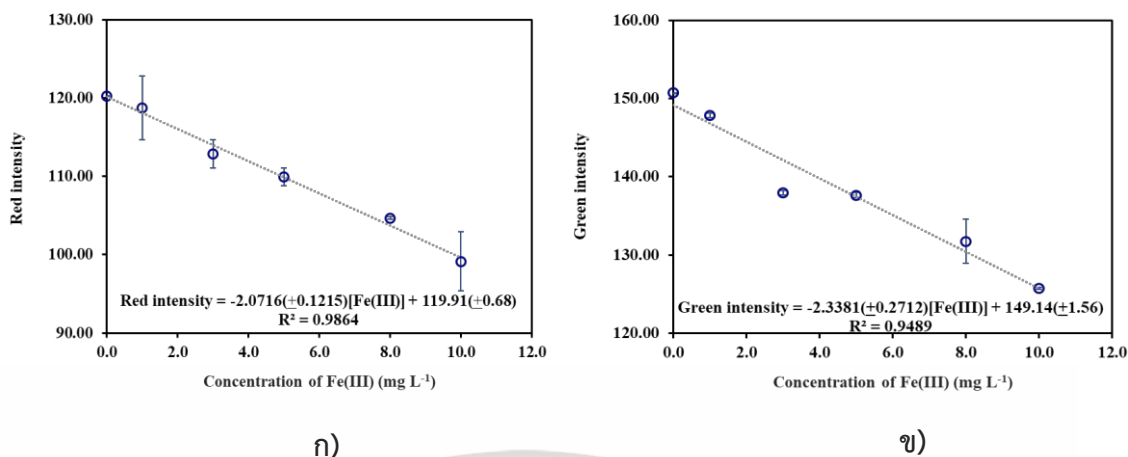
4.6 ผลการศึกษาปฏิกิริยาระหว่าง NFD กับ Fe(III) บนอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษแบบชั้นเดียว

ทำการทดสอบการเรืองแสงโดยใช้ NFD เข้มข้น 2000 ไมโครโมลาร์ ปริมาตร 7 ไมโครลิตร จำนวน 3 หยดกับสารละลายเหล็กมาตรฐานปริมาตร 130 ไมโครลิตร และใช้สารละลายบัฟเฟอร์ KHP ปรับค่า pH ลงบน single-layered PAD แล้วการถ่ายรูปภายใต้แสงยูวีด้วยกล้องแท็บเล็ต Samsung galaxy Tab S ดังแสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายการเรืองแสงของ NFD เมื่อหยดสารมาตรฐาน Fe(III) ที่ความเข้มข้นต่างๆ (0 – 10.0 mg/L) บน single-layered PAD

จากรูปที่ 4.14 พบว่า ภาพการเรืองแสงที่ได้สามารถสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงได้ด้วยตาเปล่าอย่างชัดเจนคือ เมื่อความเข้มข้นของ Fe(III) เพิ่มขึ้น การเรืองแสงสีเขียวของ NFD ภายใต้แสงยูวีอ่อนลงอย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 4.15 แสดงกราฟมาตรฐานระหว่าง ก) ค่า Red intensity ที่วัดได้จากซอฟต์แวร์ ImageJ™ ข) ค่า Green intensity ที่วัดได้จากซอฟต์แวร์เดียวกันกับค่าความเข้มข้นของสารมาตรฐาน Fe(III) ที่ความเข้มข้นต่างๆ (0 – 10.0 mg/L) บน single-layered PAD

จากรูปที่ 4.15 ตามทฤษฎีสีเติมเต็ม [11] เนื่องจากการเรืองแสงของ NFD เป็นแสงสีเขียว ภายใต้แสงยูวี โดยมีสีตรงกันข้ามคือสีแดง ทำให้ต้องวัดค่าสี ด้วย Red intensity ในกราฟ 4.15ก) ซึ่งก็พบว่าเมื่อความเข้มข้นของ Fe(III) เพิ่มขึ้นค่า Red intensity จะลดลงและกราฟมาตรฐานที่ได้ก็มีความเป็นเส้นตรงที่ดี และที่ความเข้มข้นที่ 1 กับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร มีแถบคาดเคลื่อนที่สูง เนื่องจากการถ่ายภาพภายใต้แสงยูวีในแต่ละข้อต่ออาจให้แสงสว่างภาพและความคมชัดไม่เท่ากัน ทำให้ค่า Red intensity ที่วัดได้แตกต่างกัน ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากความชันกลับพบว่า ค่า Green intensity จากกราฟ 4.15ข) มีความชันที่สูงกว่า ทำให้มีความไว (Sensitivity) ในการตรวจวัดสูงกว่า แม้จะมีความเป็นเส้นตรงที่น้อยกว่าก็ตาม แต่ค่า Green intensity มีแถบคาดเคลื่อนที่น้อยกว่า โดยมีความคลาดเคลื่อนสูงที่ความเข้มข้นเดียวกันคือ 8 มิลลิกรัมต่อลิตร แม้ที่ความเข้มข้น 3 มิลลิกรัมต่อลิตรจะหลุดจากเส้นแนวโน้ม เมื่อพิจารณาแล้วจึงสรุปว่า ในการทดสอบตัวอย่างจริง จึงเลือกค่า Green intensity ในการตรวจวัด

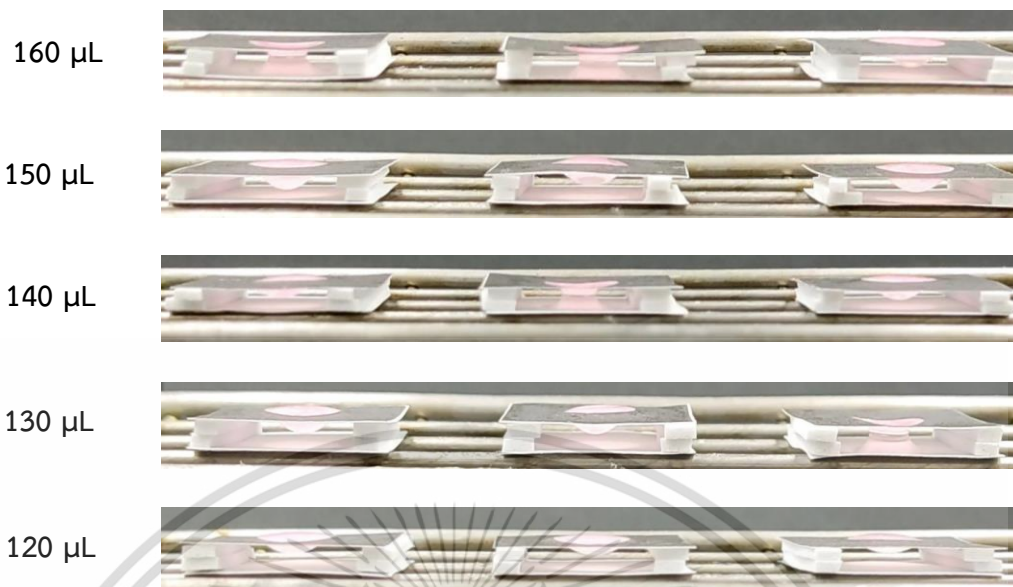
4.7 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตรวจวัด Fe(II) และ Fe(III) ภายในครวเดียวกันโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษแบบสองชั้น

4.7.1 การศึกษาปริมาตรของสารตัวอย่าง

ได้ทำการศึกษาปริมาตรของสารตัวอย่างที่ใช้หยดลงบนอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษแบบสองชั้นโดยใช้กาวสองหน้าแบบหนาแปะ 2 ชั้นเป็นตัวเพิ่ม Spacer ซึ่งศึกษาโดยการหยดสารมาตรฐาน Fe(II) 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปริมาตรต่างๆ ลงบนลงบนอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษชั้นบนซึ่งหยด Bphen และทิ้งไว้ให้แห้งเป็นเวลา 10 นาที แล้วสังเกตการณ์สัมผัสของหยดน้ำกับแผ่นด้านล่างภายในระยะเวลา 15 นาที ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 แสดงภาพถ่ายอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษแบบสองชั้นโดยใช้กาวสองหน้าแบบหนาแปะ 2 ชั้นเป็นตัวเพิ่ม Spacer ที่หยด Bphen แล้วทิ้งให้แห้งและหยดสารมาตรฐาน Fe(II) 2 มิลลิกรัมต่อ ลิตรที่ปริมาตรต่างๆ (120 – 160 μL)

จากรูปที่ 4.16 จะเห็นได้ว่าเมื่อหยดสารมาตรฐาน Fe(II) 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงไปโดยปล่อยให้ สารไหลเองตามธรรมชาติซึ่งพบว่า สารละลายส่วนมากไม่สามารถหยดจากชั้นแรกไปยังชั้นที่ 2 ได้ โดยมีส่วนน้อยที่สามารถหยดลงไปได้ โดยที่ปริมาตรมาตรฐาน 160 ไมโครลิตร สามารถหยดลงมาได้ 2 ชั้นและ 120 ไมโครลิตร ไม่สามารถหยดลงมาได้เลยแม้แต่ชั้นเดียว ดังนั้นการหยดสารตัวอย่างและ ปล่อยให้สารไหลเองตามธรรมชาติอาจไม่ใช่สภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ธาตุเหล็ก

4.7.2 การศึกษาความหนาของเทปกาวที่ใช้แยกชั้นตรวจวัด Fe(II) และ Fe(III)

ได้ทำการศึกษาหาปริมาตรและความหนาของกาวสองหน้าที่เหมาะสมที่จะให้สาร ตัวอย่างซึมผ่านชั้นด้านบนมาสัมผัสชั้นด้านล่าง โดยพยายามให้มีการปนเปื้อนสีของผลิตภัณฑ์ Fe(II)-Bphen จากชั้นด้านบนให้น้อยที่สุด

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดลองความหนาของกาวสองหน้าหนา 1 ชั้นที่ปริมาตรต่างๆ

สถานะในการทดลอง	สถานะของ Bphen บน PAD (ปริมาตร 10 μL)	ปริมาตรที่ใช้ศึกษา (μL)	การซึมถึงชั้นล่าง (ภายใน 2 นาที)	Blowing	การซึมถึงชั้นล่างหลังจาก blowing
1	เปียก	80	✓	×	-
2	เปียก	90	✓	×	-
3	เปียก	100	✓	×	-
4	เปียก	110	✓	×	-
5	เปียก	120	✓	×	-
6	เปียก	80	✓	✓	✓
7	เปียก	90	✓	✓	×
8	เปียก	100	✓	✓	✓
9	เปียก	110	✓	✓	✓
10	เปียก	120	✓	✓	✓

จากตารางที่ 4.1 พบว่า เมื่อใช้ความหนาของกาวสองหน้าหนา 1 ชั้น ที่ปริมาตร 80 ไมโครลิตรพบ 2 PAD ที่หยดน้ำซึมถึงชั้นล่างได้โดยไม่ต้องใช้ไดร์เป่า แต่มีหนึ่ง PAD ที่หยดน้ำซึมถึงชั้นล่างหลังจากใช้ไดร์เป่า และที่ปริมาตร 90 ไมโครลิตรก็พบการซึมถึงชั้นล่างเช่นเดียวกับที่ปริมาตร 80 ไมโครลิตร แต่เมื่อนำ PAD ดังกล่าวมาใช้ไดร์เป่ากลับแห้งก่อนที่หยดน้ำจะสัมผัสถึงชั้นล่าง ทั้งนี้ อาจมีสาเหตุเพิ่มเติมจากความโค้งงอของกระดาษหลังหยดสารตัวอย่าง ส่วนที่ปริมาตร 100 – 120 ไมโครลิตรสามารถซึมถึงชั้นล่างได้โดยไม่ต้องใช้ไดร์เป่าช่วย เป็นเพราะว่าปริมาตรที่ใช้มีมากพอสำหรับ Spacer ที่สร้างจากกาวสองหน้าหนา 1 ชั้น

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดลองความหนาของกาวสองหน้าหนา 2 ชั้นที่ปริมาตรต่างๆ

สถานะในการทดลอง	สถานะของ Bphen บน PAD (ปริมาตร 10 μL)	ปริมาตรที่ใช้ศึกษา (μL)	การซึมถึงชั้นล่าง (ภายใน 2 นาที)	Blowing	การซึมถึงชั้นล่างหลังจาก blowing
1	เปียก	80	×	×	-
2	เปียก	90	×	×	-
3	เปียก	100	✓	×	-
4	เปียก	110	×	×	-
5	เปียก	120	✓	×	-
6	เปียก	80	×	✓	×
7	เปียก	90	×	✓	×
8	เปียก	100	✓	✓	✓
9	เปียก	110	×	✓	✓
10	เปียก	120	✓	✓	✓

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้ในงานวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ขออนุญาต
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

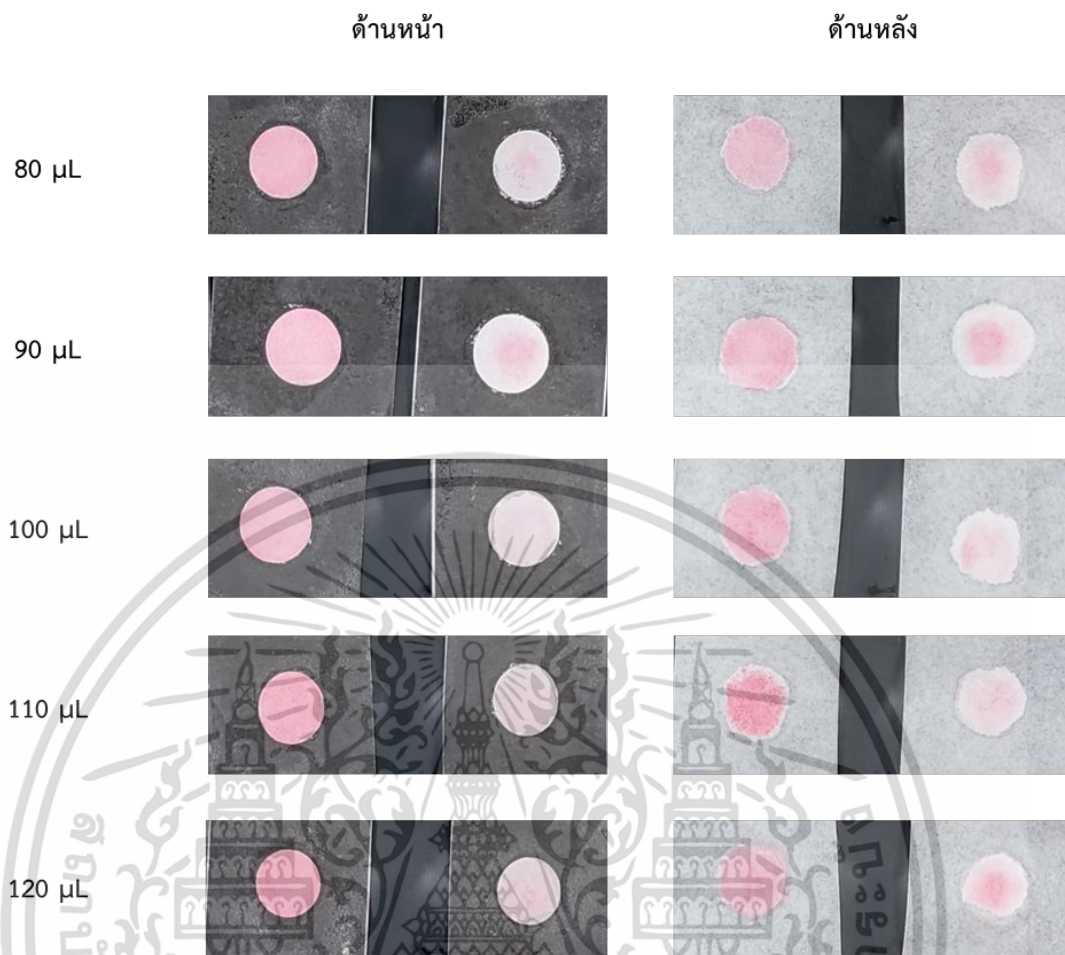
จากตารางที่ 4.2 พบว่า เมื่อใช้ความหนาของกาวสองหน้าหนา 2 ชั้น ที่ปริมาตร 80 และ 90 ไมโครลิตรไม่สามารถซึมถึงชั้นล่างไม่ว่าจะปล่อยให้ไหลเองหรือใช้ใช้ไทร์เป่าช่วย ที่ปริมาตร 100 ไมโครลิตรมี 1 PAD ที่สามารถซึมถึงชั้นล่างได้โดยไม่ต้องใช้ไทร์เป่าช่วยและมี 2 PAD ที่ไม่สามารถซึมถึงชั้นล่างได้ เมื่อใช้ไทร์เป่าช่วยก็พบว่า มี 1 PAD ที่หยดน้ำซึมถึงชั้นล่างและอีก 1 PAD ที่ไม่สัมผัสชั้นล่าง ส่วนที่ปริมาตร 110 ไมโครลิตรไม่พบการซึมถึงชั้นล่างทั้ง 3 PAD และเมื่อใช้ไทร์เป่าพบว่า มี 1 PAD ที่หยดน้ำไม่สัมผัสถึงชั้นล่าง แต่ที่ปริมาตร 120 ไมโครลิตรสามารถซึมถึงชั้นล่างได้ด้วยตัวเองโดยไม่ต้องใช้ไทร์เป่าช่วย

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดลองความหนาของกาวสองหน้าหนา 3 ชั้นที่ปริมาตรต่างๆ

สถานะในการทดลอง	สถานะของ Bphen บน PAD (ปริมาตร 10 μ L)	ปริมาตรที่ใช้ศึกษา (μ L)	การซึมถึงชั้นล่าง (ภายใน 2 นาที)	Blowing	การซึมถึงชั้นล่างหลังจาก blowing
1	เปียก	80	×	×	-
2	เปียก	90	×	×	-
3	เปียก	100	×	×	-
4	เปียก	110	×	×	-
5	เปียก	120	×	×	-
6	เปียก	80	×	✓	×
7	เปียก	90	×	✓	×
8	เปียก	100	×	✓	×
9	เปียก	110	×	✓	×
10	เปียก	120	×	✓	×

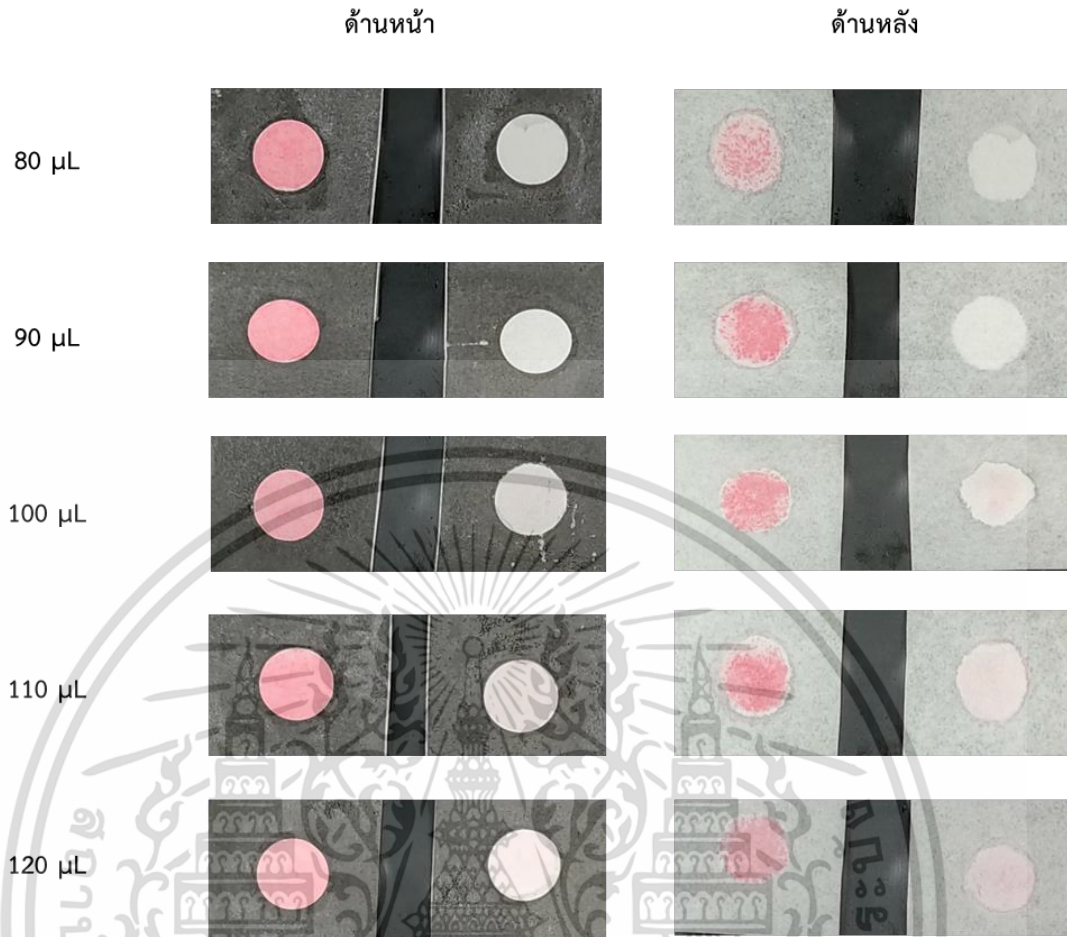
จากตารางที่ 4.3 พบว่า เมื่อใช้ความหนาของกาวสองหน้าหนา 3 ชั้น ไม่พบปริมาตรไหนเลยที่จะสามารถซึมถึงชั้นล่างถึงแม้จะใช้ไทร์เป่าช่วยก็ไม่สามารถทำให้ซึมถึงชั้นล่างได้เลยในช่วงปริมาตรที่ศึกษา เป็นเพราะว่าปริมาตรที่ใช้มีน้อยและมี Space มาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 แสดงภาพถ่าย Double-layered PAD ที่ใช้กาวสองหน้าแบบหนาแปะ 1 ชั้น โดยหยด Bphen ลงด้านบนแล้วหยดสารมาตรฐาน Fe(II) 2 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ปริมาตรต่างๆ (80 – 120 μL)

จากรูปที่ 4.17 พบว่า เมื่อใช้ความหนาของกาวสองหน้าหนา 1 ชั้น ชั้นล่างของ PAD ทั้งด้านหน้าและด้านหลังมีสีแดงที่เกิดจากสีของผลิตภัณฑ์ Fe(II)-Bphen โดยสีจะมีความเข้มขึ้นตามปริมาตรที่หยดสารมาตรฐาน Fe(II) 2 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.18 แสดงภาพถ่าย Double-layered PAD ที่ใช้กาวสองหน้าแบบหนาแปะ 2 ชั้น โดยหยด Bphen ลงด้านบน แล้วหยดสารมาตรฐาน Fe(II) 2 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ปริมาตรต่างๆ (80 – 120 μL)

จากรูปที่ 4.18 พบว่า เมื่อใช้ความหนาของกาวสองหน้าหนา 2 ชั้น ที่ปริมาตร 80 และ 90 ไมโครลิตร ชั้นล่าง ของ PAD ไม่พบสีแดงที่เกิดจากสีของผลิตภัณฑ์ Fe(II)-Bphen เนื่องจากสารละลายไม่สามารถซึมถึงชั้นล่างได้ ที่ปริมาตร 100 - 120 ไมโครลิตร มีสีแดงที่เกิดจากสีของผลิตภัณฑ์ Fe(II)-Bphen โดยสีจะมีความเข้มขึ้นตามปริมาตรที่หยดสารมาตรฐาน Fe(II) 2 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่มีสีเข้มน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการที่ใช้กาวสองหน้าแบบหนาแปะ 1 ชั้น



รูปที่ 4.19 แสดงภาพถ่าย Double-layered PAD ที่ใช้กาวสองหน้าแบบหนาแปะ 3 ชั้น โดยหยด Bphen ลงด้านบนแล้วหยดสารมาตรฐาน Fe(II) 2 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ปริมาตร 120 ไมโครลิตร

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

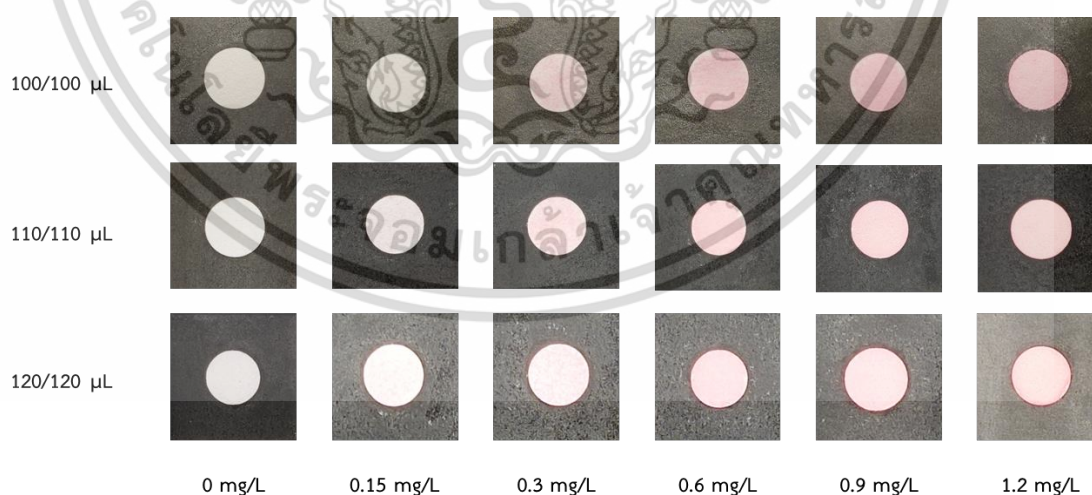
จากรูปที่ 4.19 เนื่องจากผลการทดลองที่ใช้กาวสองหน้าแบบหนาแปะ 3 ชั้นให้ผลการทดลองที่เหมือนกันคือไม่มี PAD ขึ้นใดเลยที่จะสามารถซึมถึงชั้นล่าง จึงขอยกตัวอย่างภาพถ่ายที่หดยดสารมาตรฐาน Fe(II) 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 120 ไมโครลิตร ซึ่งจะพบสีแดงที่เกิดจากสีของผลิตภัณฑ์ Fe(II)-Bphen ในชั้นบนของ PAD เพียงชั้นเดียว

จากตารางที่ 4.1 – 4.3 และจากรูปที่ 4.17 – 4.19 เมื่อพิจารณาแล้วจึงใช้ Double-layered PAD ที่ใช้กาวสองหน้าแบบหนาสองชั้นในการวิจัยต่อไป

4.7.3 การศึกษาการเพิ่มความเข้มข้นในการตรวจวัด Fe(II) และ Fe(III)

เนื่องจากพบปัญหาการตรวจวัด Fe(III) ที่ไม่สามารถตรวจวัดได้จากการหดยดสารตัวอย่างเพียง 1 ครั้งซึ่งเกิดจากผลิตภัณฑ์ Fe(II)-Bphen ชัดขวางการแพร่ของไอออน Fe(III) ทำให้ไม่สามารถแพร่ลงไปยังชั้นที่ 2 ของ PAD เพื่อตรวจวัดได้ดังนั้นจึงมีศึกษาปริมาณของสารตัวอย่างในการทำ preconcentration เพื่อให้สามารถตรวจวัด Fe(III) ได้

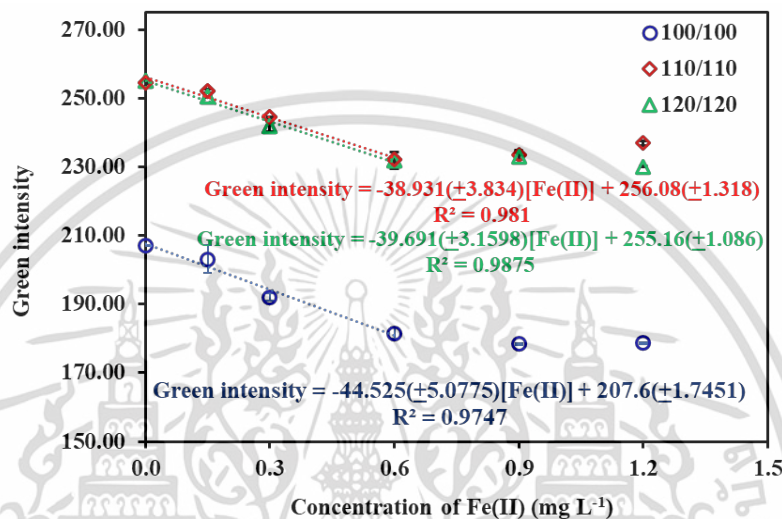
ได้ทำการทดสอบปฏิกิริยาระหว่าง Bphen กับ Fe(II) ที่ด้านบนของ PAD แบบ 2 ชั้น โดยหดยด Bphen เข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 ไมโครลิตรลงบน PAD ตามด้วยทำ preconcentration โดยหดยดสารละลายเหล็กมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่างๆ ปริมาตร 120 , 110 และ 100 ไมโครลิตรจำนวน 2 ครั้ง แต่ละครั้งห่างกัน 2 นาที จากนั้นใช้ไทร์เป่า PAD จนแห้งสนิทและบันทึกภาพของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นด้วยกล้องโทรศัพท์มือถือ POCO X3 Pro ดังแสดงในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 แสดงภาพเปรียบเทียบภาพถ่ายสีของผลิตภัณฑ์ Fe(II)-Bphen บน PAD ชั้นบนของ Double-layered PAD หลังจากหดยดสารละลายผสม Fe(II)/Fe(III) ที่ความเข้มข้นของ Fe(II) ต่างๆ (0 – 1.2 mg/L) โดยใช้ปริมาตร 120, 110 และ 100 ไมโครลิตร จำนวน 2 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.20 พบว่า ผลการทดลองทำ preconcentration โดยหยดสารละลายเหล็กมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่างๆ ปริมาตร 120 , 110 และ 100 ไมโครลิตรจำนวน 2 ครั้ง ให้ผลการทดลองที่เหมือนกันคือ เมื่อความเข้มข้นของ Fe(II) เพิ่มขึ้น ในช่วง 0.15 - 0.6 มิลลิกรัมต่อลิตร สีที่เกิดขึ้นจากผลิตภัณฑ์ Fe(II)-Bphen ก็เข้มข้นด้วยเช่นกันโดยสามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่าและช่วงความเข้มข้นที่ 0.6 - 1.2 ppm สีที่สังเกตได้มีความใกล้เคียงกัน ต่อมาจึงนำไปวัดค่าสีและสร้างกราฟมาตรฐานดังรูปที่ 4.21



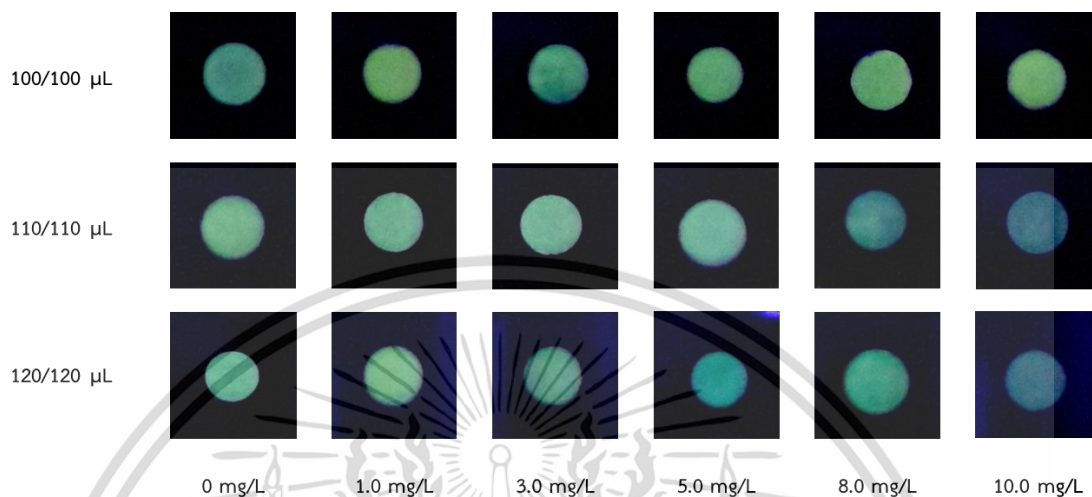
รูปที่ 4.21 แสดงกราฟมาตรฐานระหว่างค่า Green intensity ที่วัดค่าสีได้จากซอฟต์แวร์ ImageJ™ กับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน Fe(II) ที่ความเข้มข้นต่างๆ (0 – 1.2 mg/L) เมื่อทำ preconcentration โดยใช้ปริมาตร 120 , 110 และ 100 ไมโครลิตรจำนวน 2 ครั้ง บน Double-layered PAD

จากรูปที่ 4.21 เมื่อนำผลการทดลองการตรวจวัด Fe(II) ด้วย Bphen จากรูปที่ 4.20 มาวัดค่า Green intensity ด้วยซอฟต์แวร์ ImageJ และนำไปสร้างกราฟมาตรฐาน พบว่าในช่วง 0 – 0.6 มิลลิกรัมต่อลิตร กราฟมาตรฐานที่ได้มีแนวโน้มความเป็นเส้นตรงที่ดีในทุกการทดลอง และค่า Green intensity ในช่วง 0.6 – 1.2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีความใกล้เคียงกันเนื่องจากเกิดการอิ่มตัวของสีผลิตภัณฑ์ Fe(II)-Bphen นอกจากนี้ยังพบว่าความชันของสมการเส้นตรงมีค่าที่ใกล้เคียงกันแสดงให้เห็นว่ามีความไวที่ไม่แตกต่างกัน และค่า Green intensity ในการทำ preconcentration ที่ปริมาตร 120 และ 110 ไมโครลิตร มีความใกล้เคียงกันแต่แตกต่างจากการทำ preconcentration ที่ปริมาตร 100/100 ไมโครลิตร เนื่องจากใช้กล้องถ่ายภาพต่างกัน

นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบปฏิกิริยาระหว่าง NFD กับ Fe(III) ที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยหลังจากใช้ไคร์เป่าสารละลายชั้นบนจนแห้งแล้วก็พลิกด้านของ PAD แล้วหยด KHP บัฟเฟอร์ที่ความเข้มข้น 500 ไมโครโมลาร์ ปริมาตร 15 ไมโครลิตร แล้วใช้ไคร์เป่าต่อจนสารละลายบน PAD ชั้นล่างแห้งสนิท ก่อนจะนำเข้าสู่ชุดไอทีฉายแสง UV ตลอดเวลา จากนั้นหยด NFD ที่ความเข้มข้น 2000 ไมโครลิตร

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เด็ดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มาใช้

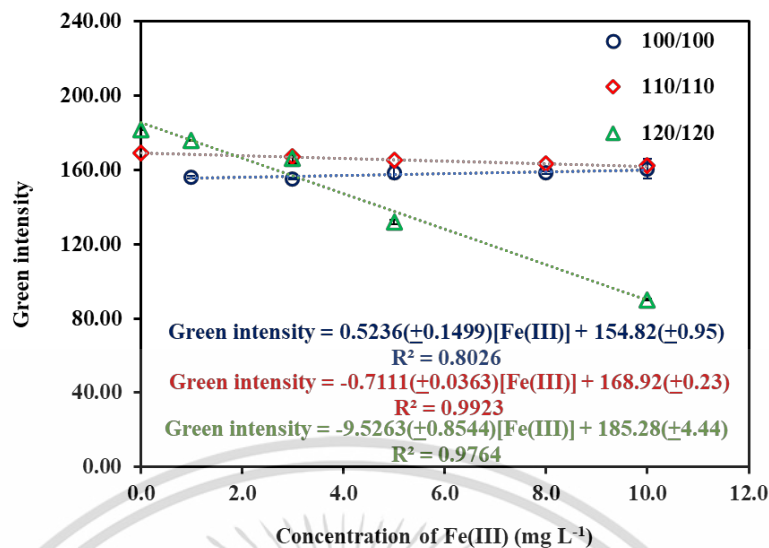
โครโมลา์ ปริมาตร 7 ไมโครลิตรในสตูดิโอทั้งหมด 3 ครั้ง แต่ครั้งห่างกัน 1 นาที แล้วทิ้งไว้ในสตูดิโอเป็นเวลา 8 นาที และบันทึกการเรืองแสงของ NFD ด้วยกล้องแท็บเล็ต Samsung galaxy Tab S ดังแสดงในรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 แสดงภาพเปรียบเทียบภาพถ่ายการเรืองแสงของ Fe(III)-NFD บน PAD ชั้นล่างของ Double-layered PAD หลังจากหยดสารละลายผสม Fe(II)/Fe(III) ที่ความเข้มข้นของ Fe(III) ต่างๆ (0 – 10.0 mg/L) โดยใช้ปริมาตร 100, 110 และ 120 ไมโครลิตรจำนวน 2 ครั้ง

จากรูปที่ 4.22 พบว่าการทดลองการทำ preconcentration ที่ปริมาตร 120 ไมโครลิตร เกิด quenching ของ NFD ที่สามารถสังเกตด้วยตาเปล่าได้อย่างชัดเจนในช่วงความเข้มข้น 0 – 10 มิลลิกรัมต่อลิตร การทำ preconcentration ที่ปริมาตร 100 และ 110 ไมโครลิตร พบว่าการเรืองแสงของ NFD จากทุกความเข้มข้นแทบไม่แตกต่างกันเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า จึงได้สร้างกราฟมาตรฐานเพื่อศึกษาการ quenching ของ NFD ดังรูปที่ 4.23 ทั้งนี้ผลการทดลองที่ 0 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าสีที่ได้แตกต่างจากเส้นแนวโน้มอย่างมากจึงไม่นำไปสร้างเป็นกราฟมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 แสดงกราฟมาตรฐาน ค่า Green intensity ที่วัดค่าสีได้จากซอฟต์แวร์ ImageJ™ กับ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน Fe(III) ที่ความเข้มข้นต่างๆ (0 – 10.0 mg/L) เมื่อทำ pre-concentration โดยใช้ปริมาตร 100, 110 และ 120 ไมโครลิตรจำนวน 2 ครั้ง บน Double-layered PAD

จากรูปที่ 4.23 พบว่าเมื่อนำผลการทดลองจากรูปที่ 4.22 มาหาค่า Green intensity พบว่า กราฟมาตรฐานที่ได้มีแนวโน้มความเป็นเส้นตรงที่ดีในการทำ pre-concentration ที่ปริมาตร 120 และ 110 ไมโครลิตร ส่วนการทำ pre-concentration ที่ปริมาตร 100 ไมโครลิตร พบว่าค่าสีมีความใกล้เคียงกันมากซึ่งอาจหมายความว่าไม่มี Fe(III) ไหลลงมาชั้นล่างหรือไหลลงมาน้อยมากจนไม่เกิด quenching ของ NFD นอกจากนี้ยังพบว่าความชันของสมการเส้นตรงจากการทำ pre-concentration ที่ปริมาตร 120 ไมโครลิตร มากกว่าการทำ pre-concentration ที่ปริมาตร 110 ไมโครลิตร แสดงว่าให้เห็นถึงความไวที่สูงกว่า แม้ R^2 จะไม่ดีเท่า 110 ไมโครลิตร ดังนั้นจึงเลือกใช้ ปริมาตรที่ 120 ไมโครลิตรในการทำ pre-concentration

4.8 ผลการประเมินคุณลักษณะของวิธีการตรวจวัด Fe(II) และ Fe(III) ภายในคร่าวเดียวกันโดยใช้อุปกรณ์การตรวจวัดบนกระดาษแบบสองชั้น

4.8.1 ความเที่ยง

ศึกษาความเที่ยงของวิธีวิเคราะห์โดยการนำ PAD ที่พัฒนาขึ้นมาตรวจวัดสารมาตรฐานเหล็กผสมที่มีความเข้มข้นของ Fe(II) 0.15 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของ Fe(III) 1 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยจะทำการตรวจวัดซ้ำ 10 ครั้ง แล้วนำไปวัดค่าสี จากนั้นนำผลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และ % ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงค่า Green intensity ที่วัดซ้ำ 10 ครั้ง

Analyte	ค่า Green intensity	ค่าเฉลี่ย (n=10)	% RSD
Fe(II) 0.15 mg/L	181.573	181.26 ± 0.58	0.32
	181.413		
	180.537		
	181.201		
	180.999		
	181.093		
	182.318		
	180.524		
	181.853		
	181.103		
Fe(III) 1.0 mg/L	139.506	151.03 ± 5.33	3.527
	157.839		
	151.239		
	146.450		
	155.703		
	151.033		
	152.506		
	151.832		
	152.511		
	151.688		

จากตารางที่ 4.4 พบว่า ค่า Green intensity ของ Fe(II) มีค่าสีที่ได้มีความใกล้เคียงกันมาก และ % RSD ต่ำมากๆ ส่วนค่า Green intensity ของ Fe(III) มีค่าสีที่ได้มีความแตกต่างกันเล็กน้อยและค่า % RSD ค่อนข้างต่ำ (น้อยกว่า 4 %) แสดงให้เห็นว่าการตรวจวัด Fe(II) และ Fe(III) ด้วยวิธีการนี้มีความเที่ยงสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8.2 ค่าร้อยละของการวิเคราะห์คืนกลับ

ค่าร้อยละของการวิเคราะห์คืนกลับ เป็นตัวแปรในการประเมินความแม่นยำของวิธี เพื่อศึกษาอิทธิพลขององค์ประกอบในตัวอย่างที่มีผลต่อการวิเคราะห์ โดยค่าร้อยละของการวิเคราะห์คืนกลับสามารถหาได้จาก

$$\% \text{ Recovery} = \frac{C_{\text{spike}} - C_{\text{sample}}}{C_{\text{standard}}} \times 100$$

C_{spike} คือ ความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่างที่เติมสารละลายมาตรฐาน
 C_{sample} คือ ความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่างที่ไม่เติมสารละลายมาตรฐาน
 C_{standard} คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานที่เติม

ค่าร้อยละของวิธีคืนกลับของ PAD ที่พัฒนาขึ้นได้ใช้ตัวอย่างน้ำประปาที่เติมสารมาตรฐานลงไปให้ความเข้มข้นของ Fe(II) 0.35 มิลลิกรัมต่อลิตร และ Fe(III) 9 มิลลิกรัมต่อลิตร และนำไปตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษที่พัฒนาขึ้นโดยวิธีการตรวจวัดแบบเดียวกัน กับวิธีสร้างกราฟมาตรฐาน และนำค่าที่ได้ไปแทนค่าลงในสมการเส้นตรงที่ได้จากกราฟมาตรฐาน จะได้ความเข้มข้นของ Fe(II) และ Fe(III) ในน้ำตัวอย่างที่เติมสารมาตรฐานลงไป ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการศึกษาการหาปริมาณ Fe(II) และ Fe(III) ใน spiked sample จากการนำค่าที่วัดได้จากซอฟต์แวร์ ImageJ™ แทนลงในสมการเส้นตรงจากกราฟมาตรฐาน

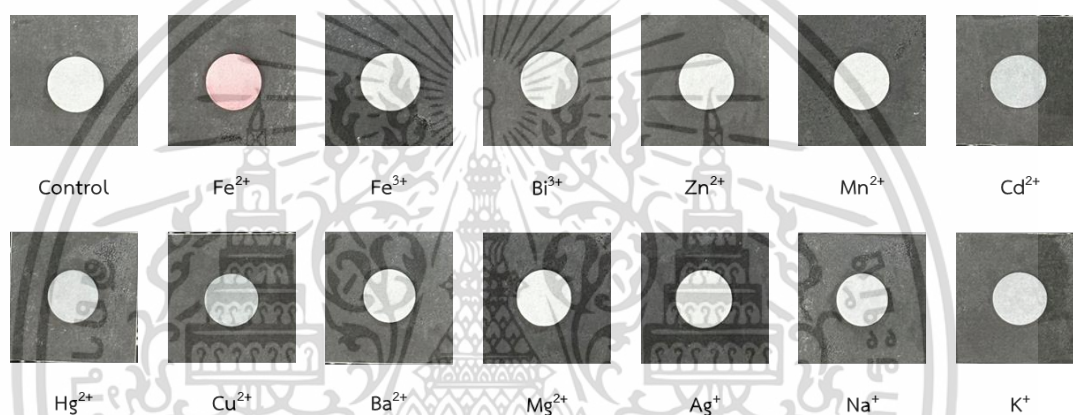
สมการเส้นตรงจากกราฟมาตรฐาน (จากรูปที่ 4.31 และ 4.33)	ค่าที่วัดได้จากซอฟต์แวร์			ความเข้มข้น Fe(II) และ Fe(III) จากการแทนค่าลงในสมการ (mg/L)	ความเข้มข้น Fe(II) และ Fe(III) ใน spiked sample (mg/L)	ค่าร้อยละการวิเคราะห์คืนกลับ
Green intensity = -14.163(±1.094)[Fe(II)] + 216.82(±0.3737)	211.321	211.470	212.145	Fe(II) 0.36 ± 0.01	Fe(II) 0.35	102.9
Green intensity = -8.4848(±0.3523)[Fe(III)] + 146.15(±1.977)	70.893	69.667	70.331	Fe(III) 9.05 ± 0.16	Fe(III) 9.0	100.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.5 พบว่า เมื่อเทียบกับความเข้มข้น Fe(II) กับ Fe(III) จากการคำนวณกับความเข้มข้นที่แน่นอนใน spiked sample ก็ทำให้ทราบว่าทั้งสองวิธีแทบไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งมีค่าร้อยละการวิเคราะห์คืนกลับน้อย โดยเฉพาะ Fe(III) ที่ความเข้มข้นที่คำนวณได้ใกล้เคียงกันมาก

4.8.3 ความจำเพาะเจาะจงต่อการตรวจวัด Fe(II)

ทำการทดลองโดยปิเปต Bphen เข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 ไมโครลิตร ลงบน single-layered PAD แล้วทิ้งไว้ในที่มืด 7 นาที เพื่อให้สารแห้ง จากนั้นปิเปต 100 ไมโครลิตร ของ 20 ไมโครโมลาร์ของสารละลายโลหะไอออนตามลงไป ทิ้งให้เกิดปฏิกิริยา 5 นาที แล้วนำมาเป่าแห้งด้วยไดร์ 10 นาที และถ่ายรูปสีของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.24

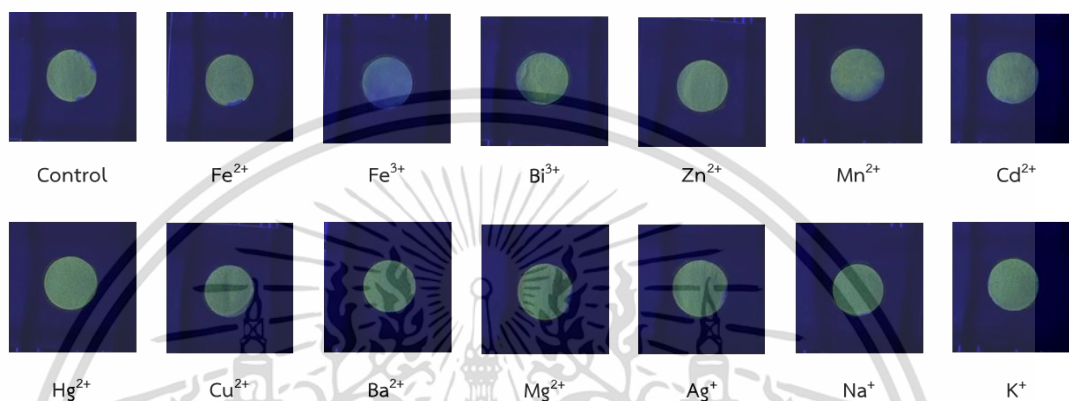


รูปที่ 4.24 แสดงภาพสีของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาของ Bphen กับโลหะไอออนชนิดอื่นบน single-layered PAD

จากรูปที่ 4.24 พบว่า รีเอเจนต์อย่าง Bphen ที่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะก็จะมีสีเกิดขึ้น ซึ่งจะเกิดสีแดงอมชมพูก็ต่อเมื่อจับกับ Fe(II) เท่านั้น ส่วนโลหะไอออนชนิดอื่นกลับไม่มีสีเกิดขึ้นเมื่อเทียบกับชิ้น control ที่ไม่ได้หยดโลหะใดๆ ลงไป ซึ่งเป็นการยืนยันจากรูปที่ 4.11 แล้วว่า Bphen ไม่ทำปฏิกิริยากับ Fe(III) และไม่ทำปฏิกิริยากับไอออนโลหะชนิดอื่นนอกจาก Fe(II) จึงสรุปได้ว่า Bphen มีความจำเพาะเจาะจงต่อ Fe(II)

4.8.4 ความจำเพาะเจาะจงต่อการตรวจวัด Fe(III)

ทำการทดลองโดยปิเปต 130 ไมโครลิตร ของ 180 ไมโครโมลาร์ของสารละลายโลหะไอออนลงบน single-layered PAD และทิ้งไว้ 5 นาที ตามด้วยปิเปตบัฟเฟอร์ KHP 15 ไมโครลิตร ตามลงไปแล้วเป่าแห้งด้วยไดร์ 10 นาที ก่อนจะนำเข้าที่มืดที่ฉายแสงยูวี และหยด NFD เข้มข้น 2000 ไมโครโมลาร์ ปริมาตร 7 ไมโครลิตร จำนวน 3 ครั้ง ทิ้งให้เกิดปฏิกิริยา 8 นาที แล้วถ่ายภาพการเรืองแสงของ NFD ดังแสดงในรูปที่ 4.25

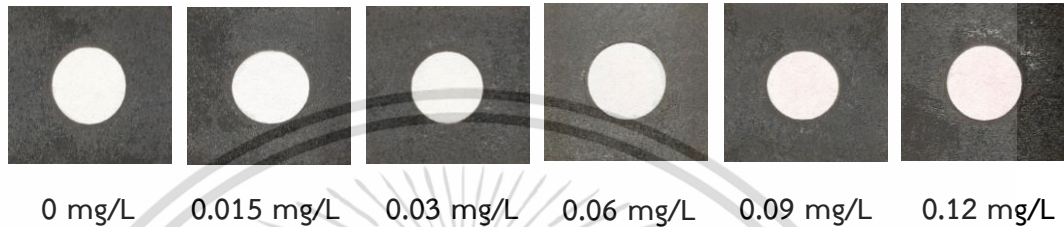


รูปที่ 4.25 แสดงการเรืองแสงของ NFD หลังจาก NFD ทำปฏิกิริยากับโลหะไอออนชนิดอื่นบน single-layered PAD

จากรูปที่ 4.25 พบว่า เมื่อ NFD อยู่ในที่มืดและมีแสงยูวีส่องถึง NFD จะเรืองแสงสีเขียวขึ้น และการเรืองแสงก็จะลดลงตามความเข้มข้นของไอออนโลหะที่เพิ่มสูงขึ้น แต่จากรูปจะเห็นว่าหลังจาก NFD จับกับ Fe(III) จะเกิดการเรืองแสงที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับ control ในขณะที่ไอออนโลหะชนิดอื่นแทบไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง จึงอนุมานได้ว่า NFD มีความจำเพาะเจาะจงต่อ Fe(III)

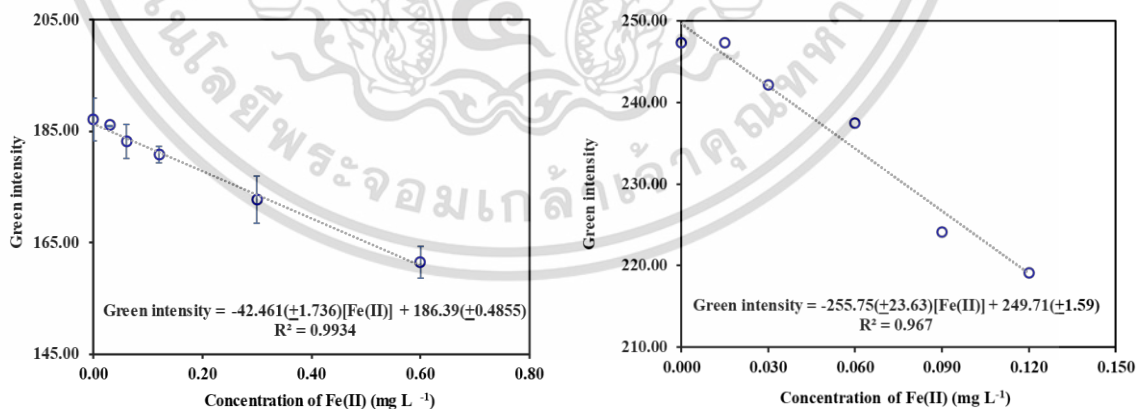
4.8.5 ระดับความเข้มข้นต่ำสุดที่ตรวจวัดได้

ทำการทดสอบปฏิกิริยาระหว่าง Bphen กับ Fe(II) ที่ด้านบนของ PAD แบบ 2 ชั้น โดยหยด Bphen เข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 ไมโครลิตรลงบน PAD ตามด้วยทำ preconcentration โดยหยดสารละลายเหล็ก มาตรฐานที่ความเข้มข้นต่างๆ ปริมาตร 120 ไมโครลิตรจำนวน 2 ครั้ง แต่ละครั้งห่างกัน 2 นาที จากนั้นใช้ไทร์เป่า PAD จนแห้งสนิท และบันทึกภาพของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นด้วยกล้องโทรศัพท์มือถือ POCO X3 Pro ดังแสดงในรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 แสดงภาพถ่ายสีของผลิตภัณฑ์ Fe(II)-Bphen ที่ชั้นบนของ Double-layered PAD หลังจากหยดสารละลายผสม Fe(II)/Fe(III) ที่ความเข้มข้นของ Fe(II) ต่างๆ (0 – 0.12 mg/L) จำนวน 2 ครั้ง

จากรูปที่ 4.26 พบว่าสีของผลิตภัณฑ์ Fe(II)-Bphen เข้มขึ้นตามความเข้มข้น ในขณะที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 0 – 0.06 มิลลิกรัมต่อลิตร สังเกตเห็นสีด้วยตาเปล่าได้ยาก แต่ยังสังเกตเห็นสีที่เกิดขึ้นด้วยตาเปล่าที่ความเข้มข้น 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ที่ความเข้มข้น 0.015 มิลลิกรัมต่อลิตรไม่สามารถสังเกตเห็นสีของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นแล้ว



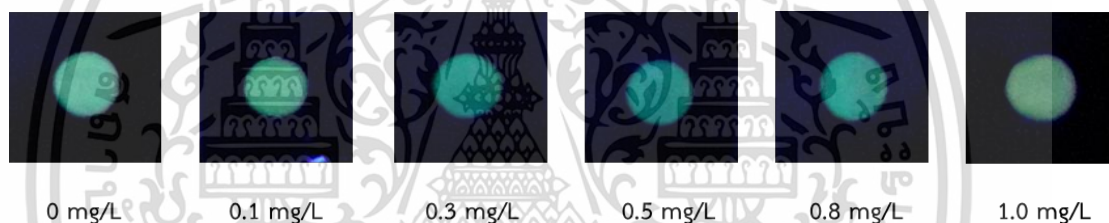
ก)

ข)

รูปที่ 4.27 แสดงกราฟมาตรฐานระหว่างค่า Green intensity ที่วัดค่าสีได้จากซอฟต์แวร์ ImageJTM กับ ก) ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน Fe(II) ในช่วงความเข้มข้น 0 – 0.6 มิลลิกรัมต่อลิตร (ข) ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน Fe(II) ในช่วงความเข้มข้น 0 – 0.12 มิลลิกรัมต่อลิตร บน Double-layered PAD ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.27 พบว่า ในช่วงความเข้มข้นดังกล่าว ทำให้กราฟที่ได้มีแนวโน้มความเป็นเส้นตรงที่ดีในรูป 4.27ก) ทำให้ต้องลด working range ของ Fe(II) ในการประเมินดังรูปที่ 4.27ข) และก็พบว่าที่ความเข้มข้น 0 มิลลิกรัมต่อลิตรและ 0.015 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่า Green intensity ที่ใกล้เคียงกันมากจนทำให้ไม่สามารถอ่านค่าได้ ขณะที่ความเข้มข้น 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าสีที่อ่านค่าได้และมีแนวโน้มที่เป็นเส้นตรง ดังนั้นที่ความเข้มข้นของ Fe(II) 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นความเข้มข้นต่ำสุดที่วิธีนี้จะสามารถตรวจวัดได้ด้วยวิธีนี้

ต่อมาทำการทดสอบปฏิกิริยาระหว่าง NFD กับ Fe(III) ที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยหลังจากใช้ ไตรเปปทาสรละลายชั้น บนจนแห้งแล้วก็พลิกด้านของ PAD แล้วหยด KHP บัฟเฟอร์ที่ความเข้มข้น 500 ไมโครโมลาร์ ปริมาตร 15 ไมโครลิตร แล้วใช้ไตรเปปทาต่อจนสารละลายบน PAD ชั้นล่างแห้งสนิท ก่อนจะนำเข้าสู่สตูดิโอที่ฉายแสงยูวีตลอดเวลา จากนั้นหยด NFD ที่ความเข้มข้น 2000 ไมโครโมลาร์ ปริมาตร 7 ไมโครลิตรในสตูดิโอทั้งหมด 3 ครั้ง แต่ละครั้งห่างกัน 1 นาที แล้วทิ้งไว้ในสตูดิโอเป็นเวลา 8 นาที และบันทึกการเรืองแสงของ NFD ด้วยกล้องแท็บเล็ต Samsung galaxy Tab S ดัง แสดงในรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 แสดงภาพถ่ายการเรืองแสงของ NFD ที่ชั้นล่างของ Double-layered PAD หลังจากหยดสารละลายผสม Fe(II)/Fe(III) ที่ความเข้มข้นของ Fe(III) ต่างๆ (0 – 1.0 mg/L) จำนวน 2 ครั้ง

จากรูปที่ 4.28 พบว่า ในช่วงความเข้มข้น 0 – 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ใช้ในการทดลองนี้ พบการเรืองแสงของ NFD ที่ใกล้เคียงกันจนไม่สามารถนำไปวัดค่าสีเพื่อสร้างกราฟมาตรฐานได้ อย่างไรก็ตาม จากรูปที่แสดงพบว่าการเรืองแสงของ NFD เริ่มลดลงตั้งแต่ความเข้มข้นของ Fe(III) ที่ 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงอาจบอกได้ว่า ที่ความเข้มข้น 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้ด้วยวิธีการนี้

นอกจากนี้ได้มีการคำนวณค่า Limit of detection (LOD) เพื่อหาขีดจำกัดการตรวจวัดซึ่งสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$LOD = \frac{3\sigma}{S}$$

เมื่อ LOD คือ ขีดจำกัดการตรวจวัดต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้

σ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Blank

S คือ ความชันของกราฟมาตรฐาน

การคำนวณหาค่า LOD จะใช้ผลการศึกษาในรูปที่ 4.23 ซึ่งเป็นกราฟมาตรฐานในการตรวจวัด Fe(II) และ Fe(III) ด้วย PAD แบบ 2 ชั้นโดยทำ preconcentration ที่หยดสารมาตรฐาน ปริมาตร 120 ไมโครลิตร 2 ครั้ง

ตารางที่ 4.6 ผลการศึกษาการหาค่า LOD

การตรวจวัด	สมการเส้นตรงจากกราฟมาตรฐาน	ค่าที่วัดได้จาก Blank		SD	LOD
Fe(II)	Green intensity = - 39.691(+3.1598)[Fe(II)] + 255.16(+1.086) R ² = 0.9875	255.00	254.64	0.26	0.02
Fe(III)	Green intensity = - 9.5112(+0.5833)[Fe(III)] + 184.27(+2.9997) R ² = 0.9888	181.49	180.57	0.65	0.21

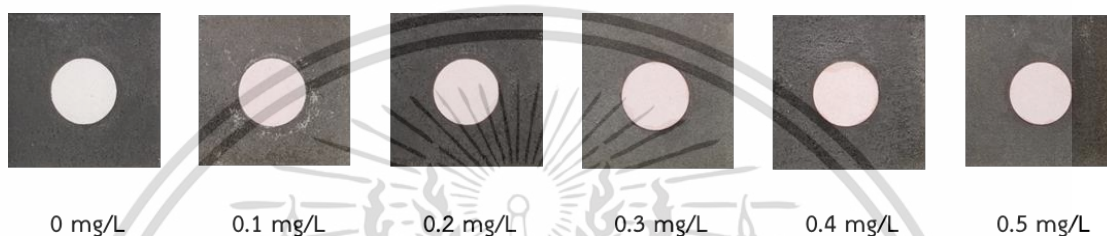
จากการคำนวณพบว่าค่าต่ำสุดที่สามารถวิเคราะห์ได้ในการตรวจวัด Fe(II) คือ 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร และ การตรวจวัด Fe(III) อยู่ที่ 0.21 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าต่ำกว่าระดับความเข้มข้นต่ำสุดที่ตรวจวัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.9 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณ Fe(II) และ Fe(III) ในตัวอย่าง

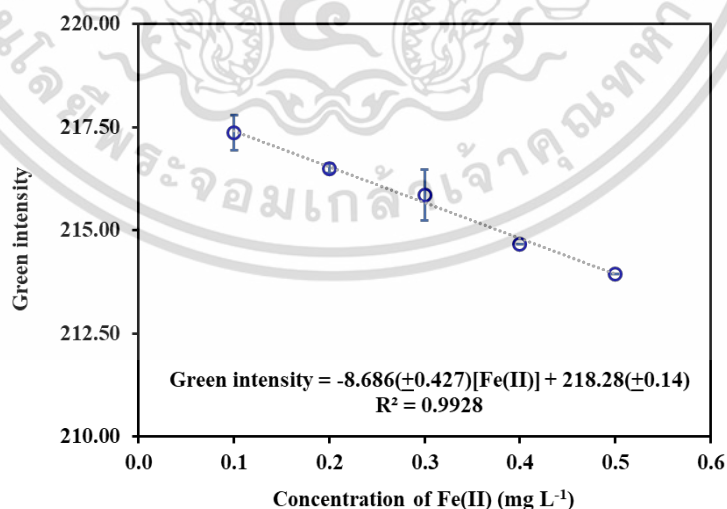
4.9.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณ Fe(II) และ Fe(III) ในตัวอย่างน้ำดื่ม

ในการตรวจวัด Fe(II) ได้ทำการสร้างกราฟมาตรฐานของ Bphen กับ Fe(II) ที่ด้านบนของ Double-layered PAD โดยหยด Bphen เข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 ไมโครลิตรลงบน Double-layered PAD ชั้นบน ตามด้วยทำ preconcentration โดยหยดสารละลายเหล็กมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่างๆ ปริมาตร 120 ไมโครลิตรจำนวน 2 ครั้ง แต่ละครั้งห่างกัน 2 นาที จากนั้นใช้ไดร์เป่าจนแห้งสนิท และบันทึกภาพของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นด้วยกล้องโทรศัพท์มือถือ POCO X3 Pro ดังแสดงในรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.29 แสดงภาพถ่ายสีของผลิตภัณฑ์ Fe(II)-Bphen ที่ชั้นบนของ Double-layered PAD หลังจากหยดสารละลายผสม Fe(II)/Fe(III) ที่ความเข้มข้นของ Fe(II) ต่างๆ (0 – 0.5 mg/L) จำนวน 2 ครั้ง สำหรับหาปริมาณ Fe(II) ในตัวอย่างน้ำดื่ม

จากรูปที่ 4.29 พบว่า เมื่อความเข้มข้นของ Fe(II) เพิ่มขึ้น ในช่วง 0.1 - 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร สีที่เกิดขึ้นจากผลิตภัณฑ์ Fe(II)-Bphen มีความเข้มใกล้เคียงกันเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า ดังนั้นจึงต้องวัดค่าสีเพื่อใช้ออกความแตกต่างดังรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.30 แสดงกราฟมาตรฐานระหว่างค่า Green intensity ที่วัดค่าสีได้จากซอฟต์แวร์ ImageJTM กับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน Fe(II) ที่ความเข้มข้นต่างๆ (0.1 – 0.5 mg/L) บน Double-layered PAD สำหรับหาปริมาณ Fe(II) ในตัวอย่างน้ำดื่ม

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

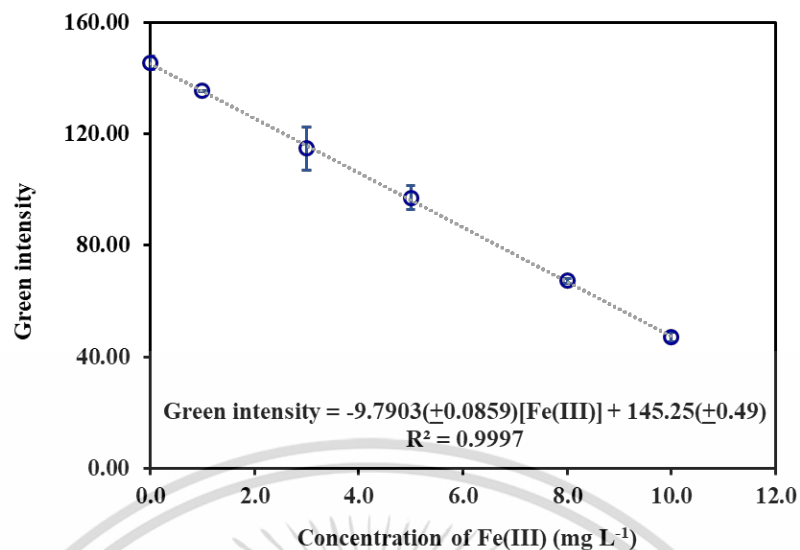
จากรูปที่ 4.30 พบว่า กราฟมาตรฐานมีแนวโน้มความเป็นเส้นตรงที่ดี แต่ค่า Green intensity มีค่าที่ใกล้เคียงกันมากและมีความชันของกราฟที่ต่ำกว่าจากในรูปที่ 4.21 ที่พบความเป็นเส้นตรงในช่วงความเข้มข้น 0 – 0.6 มิลลิกรัมต่อลิตร

ต่อมา ได้สร้างกราฟมาตรฐานของ NFD กับ Fe(III) ที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยหลังจากใช้ไตร์เป่า สารละลายชั้นบนจนแห้งแล้วก็พลิกด้านของ Double-layered PAD แล้วหยด KHP บัฟเฟอร์ที่ความเข้มข้น 500 ไมโครโมลาร์ ปริมาตร 15 ไมโครลิตร แล้วใช้ไตร์เป่าต่อจน สารละลาย ชั้นล่างแห้งสนิท ก่อนจะนำเข้าสตูดิโอที่ฉายแสงยูวีตลอดเวลา จากนั้นหยด NFD ที่ความเข้มข้น 2000 ไมโครโมลาร์ ปริมาตร 7 ไมโครลิตรในสตูดิโอทั้งหมด 3 ครั้ง แต่ ละครั้งห่างกัน 1 นาที แล้วทิ้งไว้ในสตูดิโอเป็นเวลา 8 นาที และบันทึกการเรืองแสงของ NFD ด้วยกล้องแท็บเล็ต Samsung galaxy Tab S ดังแสดงในรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 แสดงภาพถ่ายการเรืองแสงของ Fe(III)-NFD ที่ชั้นล่างของ Double-layered PAD หลังจากหยดสารละลายผสม Fe(II)/Fe(III) ที่ความเข้มข้นของ Fe(III) ต่างๆ (0 – 10.0 mg/L) จำนวน 2 ครั้ง สำหรับหาปริมาณ Fe(III) ในตัวอย่างน้ำดื่ม

จากรูปที่ 4.31 พบว่าการเกิด quenching ของ NFD ที่สามารถสังเกตด้วยตาเปล่าได้อย่างชัดเจนในช่วงความเข้มข้น 0 – 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ต่อมาจึงนำไปวัดค่าสีและนำไปสร้างกราฟมาตรฐานการ quenching ของ NFD ดังรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 แสดงกราฟมาตรฐานระหว่างค่า Green intensity ที่วัดค่าสีได้จากซอฟต์แวร์ ImageJ™ กับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน Fe(III) ที่ความเข้มข้นต่างๆ (0 – 10.0 mg/L) บน Double-layered PAD สำหรับหาปริมาณ Fe(III) ในตัวอย่างน้ำดื่ม

จากรูปที่ 4.32 พบว่าเมื่อนำผลการทดลองจากรูปที่ 4.31 มาหาค่า Green intensity พบว่ากราฟมาตรฐานที่ได้มีแนวโน้มความเป็นเส้นตรงที่ดี แต่มี แฉกคลาดเคลื่อนสูงที่ความเข้มข้น 3.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากนั้น ทำการทดสอบหาความเข้มข้น Fe(II) และ Fe(III) ในตัวอย่างน้ำดื่ม โดยใช้ตัวอย่างน้ำดื่มที่เติมสารมาตรฐานลงไปให้มีความเข้มข้นของ Fe(II) 0.35 มิลลิกรัมต่อลิตร และ Fe(III) 9 มิลลิกรัมต่อลิตร และนำไปตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษที่พัฒนาขึ้นโดยวิธีการตรวจวัดแบบเดียวกันกับวิธีสร้างกราฟมาตรฐาน และนำค่าสีที่ได้ไปแทนค่าลงในสมการเส้นตรงที่ได้จากกราฟมาตรฐานจะได้ความเข้มข้นของ Fe(II) และ Fe(III) ในน้ำตัวอย่างที่เติมสารมาตรฐานลงไป

ตารางที่ 4.7 ผลการศึกษาการหาปริมาณ Fe(II) และ Fe(III) ในตัวอย่างน้ำดื่ม จากการนำค่าสีที่วัดได้จากซอฟต์แวร์ ImageJ™ แทนลงในสมการเส้นตรงจากกราฟมาตรฐาน

สมการเส้นตรงจากกราฟมาตรฐาน	ค่าสีที่วัดได้จากตัวอย่างน้ำดื่ม			ความเข้มข้น Fe(II) และ Fe(III) ที่ได้จากการแทนค่าลงสมการ (mg/L)	ความเข้มข้น Fe(II) และ Fe(III) ในตัวอย่างน้ำดื่ม (mg/L)	ค่าร้อยละการวิเคราะห์คืนกลับ
Green intensity = - 8.686(±0.427)[Fe(II)] + 218.28(±0.14)	214.527	215.425	214.432	Fe(II) 0.40 ± 0.06	Fe(II) 0.35	114.3
Green intensity = - 9.7903(±0.0859)[Fe(III)] + 145.25(±0.49)	55.407	57.794	58.575	Fe(III) 8.99 ± 0.17	Fe(III) 9.0	99.9

จากตารางที่ 4.7 พบว่า เมื่อนำค่า Green intensity ที่ตรวจวัดได้ไปแทนค่าในสมการเส้นตรงจากกราฟมาตรฐานเพื่อหาความเข้มข้นของ Fe(II) และ Fe(III) โดยปริมาณ Fe(II) ที่วิเคราะห์ได้มีค่าเท่ากับ 0.40 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีค่าห่างจากปริมาณ Fe(II) ใน spike sample ที่มีค่าเท่ากับ 0.35 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าร้อยละการวิเคราะห์คืนกลับเท่ากับ 114.3 ที่ค่าสูงเกินไป ส่วน Fe(III) วิเคราะห์ได้มีค่าเท่ากับ 8.99 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีค่าใกล้เคียงจากปริมาณ Fe(III) ใน spike sample ที่มีค่าเท่ากับ 9 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าร้อยละการคืนกลับเท่ากับ 99.9

ค่าร้อยละการวิเคราะห์คืนกลับของ Fe(II) ที่สูงเกินไปนี้ ทำให้มีการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำดื่มซ้ำอีกครั้ง โดยคำนวณจากสมการเส้นตรงจากรูปที่ 4.34 ซึ่งวิเคราะห์ออกมาแล้วว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าความเข้มข้นใน spiked sample และมีค่าร้อยละการวิเคราะห์คืนกลับใกล้เคียง 100 ทำให้วิธีนี้สามารถหาปริมาณ Fe(II) ในตัวอย่างน้ำดื่มได้ ดังตารางที่ 4.8

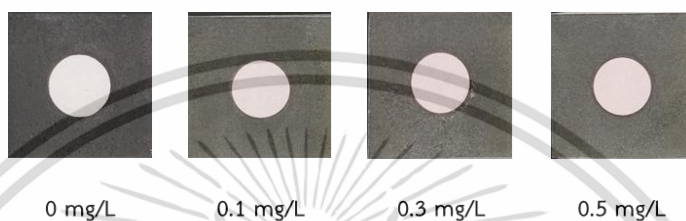
ตารางที่ 4.8 ผลการศึกษาการหาปริมาณ Fe(II) ในตัวอย่างน้ำดื่ม จากการนำค่าสีที่วัดได้จากซอฟต์แวร์ ImageJ™ แทนลงในสมการเส้นตรงจากกราฟมาตรฐาน

สมการเส้นตรงจากกราฟมาตรฐาน	ค่าสีที่วัดได้จากตัวอย่างน้ำดื่ม			ความเข้มข้น Fe(II) และ Fe(III) ที่ได้จากการแทนค่าลงสมการ (mg/L)	ความเข้มข้น Fe(II) และ Fe(III) ในตัวอย่างน้ำดื่ม (mg/L)	ค่าร้อยละการวิเคราะห์คืนกลับ
Green intensity = - 14.163(±1.094)[Fe(II)] + 216.82(±0.3737)	211.498	211.514	211.8	Fe(II) 0.37 ± 0.001	Fe(II) 0.35	105.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

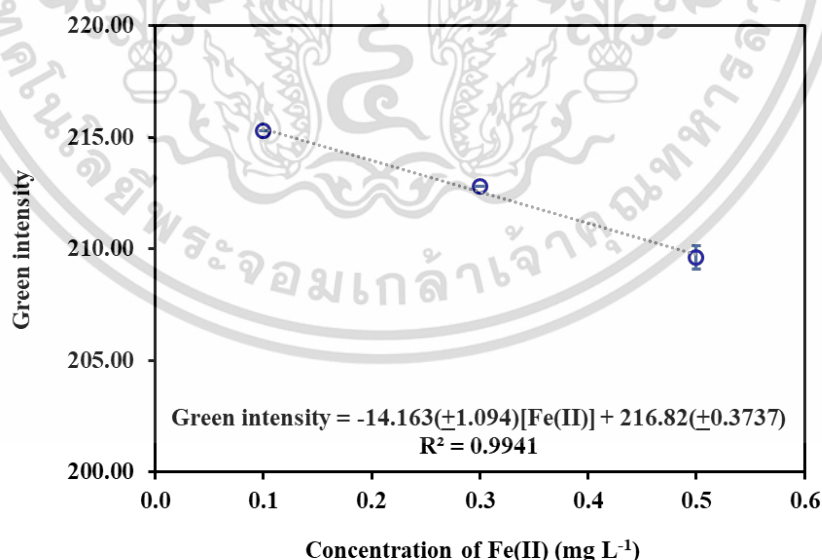
4.9.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณ Fe(II) และ Fe(III) ในตัวอย่างน้ำประปา

ได้ศึกษาการหาปริมาณของ Fe(II) โดยสร้างกราฟมาตรฐานของ Bphen กับ Fe(II) ที่ด้านบนของ Double-layered PAD โดยหยด Bphen เข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 ไมโครลิตรลงบน Double-layered PAD ชั้นบน ตามด้วยทำ preconcentration โดยหยด สารละลายเหล็กมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่างๆ ปริมาตร 120 ไมโครลิตรจำนวน 2 ครั้ง แต่ละครั้ง ห่างกัน 2 นาที จากนั้นใช้ไดร์เป่าจนแห้งสนิท และบันทึกภาพของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นด้วยกล้อง โทรศัพท์มือถือ POCO X3 Pro ดังแสดงในรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33 แสดงภาพถ่ายสีของผลิตภัณฑ์ Fe(II)-Bphen ที่ชั้นบนของ Double-layered PAD หลังจากหยดสารละลายผสม Fe(II)/Fe(III) ที่ความเข้มข้นของ Fe(II) ต่างๆ (0 – 0.5 mg/L) จำนวน 2 ครั้ง สำหรับหาปริมาณ Fe(II) ในตัวอย่างน้ำประปา

จากรูปที่ 4.33 พบว่า เมื่อความเข้มข้นของ Fe(II) เพิ่มขึ้น ในช่วง 0.1 - 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร สีที่เกิดขึ้นจากผลิตภัณฑ์ Fe(II)-Bphen มีความเข้มใกล้เคียงกันเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าเช่นเดียวกับในรูปที่ 4.26 ดังนั้นจึงต้องวัดค่าสีเพื่อใช้บอกความแตกต่างดังรูปที่ 4.34

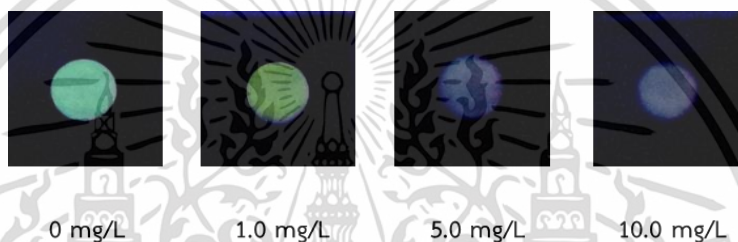


รูปที่ 4.34 แสดงกราฟมาตรฐานระหว่างค่า Green intensity ที่วัดค่าสีได้จากซอฟต์แวร์ ImageJ™ กับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน Fe(II) ที่ความเข้มข้นต่างๆ (0.1 – 0.5 mg/L) บน Double-layered PAD สำหรับหาปริมาณ Fe(II) ในตัวอย่างน้ำประปา

เอกสารนี้เป็นเอกสารของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ มีลิขสิทธิ์และสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาและข้อมูลทั้งหมด การใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

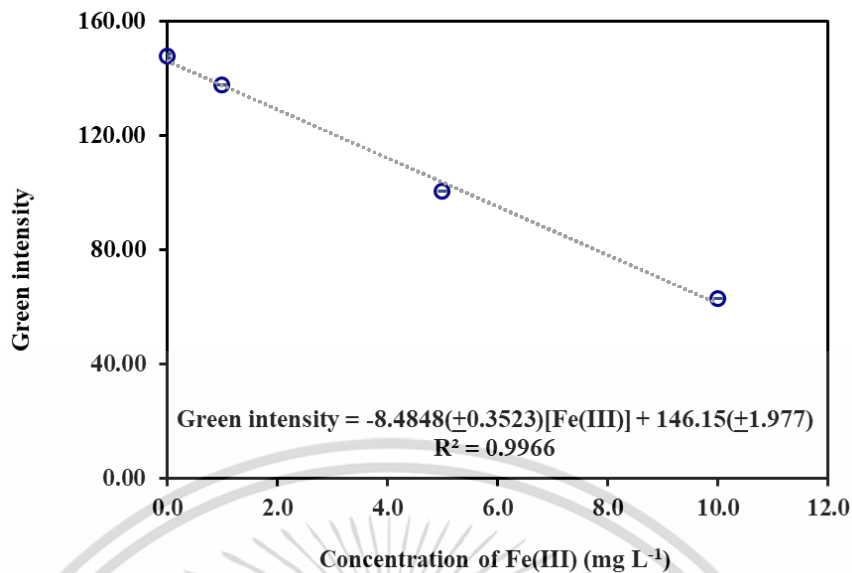
จากรูปที่ 4.34 พบว่า กราฟมาตรฐานมีแนวโน้มความเป็นเส้นตรงที่ดี และเมื่อเทียบกับรูปที่ 4.27 จะสังเกตได้ว่าความชันและสมการเส้นตรงของกราฟมาตรฐานแตกต่างกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องสร้างกราฟมาตรฐานใหม่เมื่อต้องการวัด Fe(II) ในแต่ละวัน

ต่อมาทำการสร้างกราฟมาตรฐานของ NFD กับ Fe(III) ที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยหลังจากใช้ ไตรเปปทาสรละลายชั้นบนจนแห้งแล้วก็พลิกด้านของ Double-layered PAD แล้วหยด KHP บัฟเฟอร์ที่ความเข้มข้น 500 ไมโครโมลาร์ ปริมาตร 15 ไมโครลิตร แล้วใช้ไตรเปปทาต่อจนสารละลาย ชั้นล่างแห้งสนิท ก่อนจะนำเข้าสู่ตู้อบที่ฉายแสงยูวีตลอดเวลา จากนั้นหยด NFD ที่ความเข้มข้น 2000 ไมโครโมลาร์ ปริมาตร 7 ไมโครลิตรในสตูดิโอทั้งหมด 3 ครั้ง แต่แต่ละครั้งห่างกัน 1 นาที แล้วทิ้งไว้ในสตูดิโอเป็นเวลา 8 นาที และบันทึกการเรืองแสงของ NFD ด้วยกล้องแท็บเล็ต Samsung galaxy Tab S ดังแสดงในรูปที่ 4.35



รูปที่ 4.35 แสดงภาพถ่ายการเรืองแสงของ Fe(III)-NFD ที่ชั้นล่างของ Double-layered PAD หลังจากหยดสารละลายผสม Fe(II)/Fe(III) ที่ความเข้มข้นของ Fe(III) ต่างๆ (0 – 10.0 mg/L) จำนวน 2 ครั้ง สำหรับหาปริมาณ Fe(III) ในตัวอย่างน้ำประปา

จากรูปที่ 4.35 พบว่าเกิด quenching ของ NFD ที่สามารถสังเกตด้วยตาเปล่าได้อย่างชัดเจนในช่วงความเข้มข้น 0 – 10 ppm ต่อมาจึงนำไปวัดค่าสีและนำไปสร้างกราฟมาตรฐานการ quenching ของ NFD ดังรูปที่ 4.36



รูปที่ 4.36 แสดงกราฟมาตรฐานระหว่างค่า Green intensity ที่วัดค่าสีได้จากซอฟต์แวร์ ImageJ™ กับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน Fe(III) ที่ความเข้มข้นต่างๆ (0 – 10.0 mg/L) บน Double-layered PAD สำหรับหาปริมาณ Fe(III) ในตัวอย่างน้ำประปา

จากรูปที่ 4.36 พบว่า กราฟมาตรฐานที่ได้มีแนวโน้มความเป็นเส้นตรงที่ดี นอกจากนี้ความชันและสมการของกราฟมาตรฐานที่ได้มีค่าที่ต่างกักันเล็กน้อยเมื่อเทียบกับรูปที่ 4.32 ดังนั้นจึงจำเป็นต้องสร้างกราฟมาตรฐานใหม่เมื่อต้องการวัด Fe(III) ในแต่ละวัน

จากนั้นได้ทำการตรวจหาปริมาณ Fe(II) และ Fe(III) ในตัวอย่างน้ำประปา โดยเติมสารมาตรฐานลงไปให้น้ำประปาให้มีความเข้มข้นของ Fe(II) 0.35 มิลลิกรัมต่อลิตร และ Fe(III) 9 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วนำไปตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษที่พัฒนาขึ้นโดยวิธีการตรวจวัดแบบเดียวกันกับวิธีสร้างกราฟมาตรฐาน และนำค่าสีที่ได้ไปแทนค่าลงในสมการเส้นตรงที่ได้จากกราฟมาตรฐานจะได้ความเข้มข้นของ Fe(II) และ Fe(III) ในน้ำตัวอย่างที่เติมสารมาตรฐานลงไป ดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.9 ผลการศึกษาการหาปริมาณ Fe(II) และ Fe(III) ในตัวอย่างน้ำประปา จากการนำค่าสีที่วัดได้จากซอฟต์แวร์ ImageJ™ แทนลงในสมการเส้นตรงจากกราฟมาตรฐาน

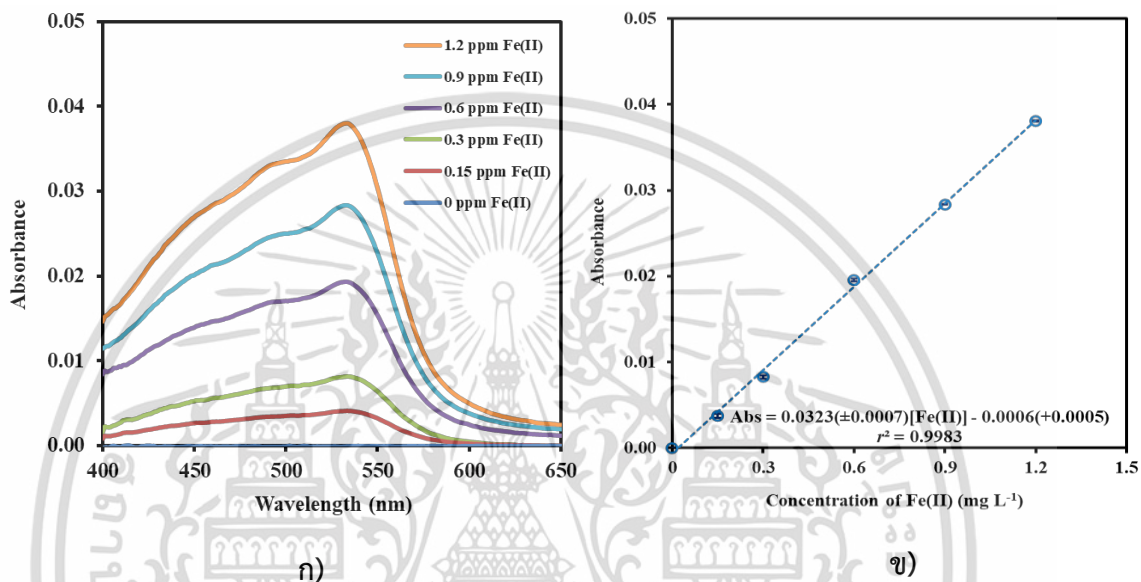
สมการเส้นตรงจากกราฟมาตรฐาน	ค่าสีที่วัดได้จากตัวอย่างน้ำประปา			ความเข้มข้น Fe(II) และ Fe(III) ที่ได้จากสมการค่าสี (mg/L)	ความเข้มข้น Fe(II) และ Fe(III) ในตัวอย่างน้ำประปา (mg/L)	ค่าร้อยละการวิเคราะห์คืนกลับ
Green intensity = -14.163(±1.094)[Fe(II)] + 216.82(±0.3737)	211.321	211.470	212.145	Fe(II) 0.36 ± 0.01	Fe(II) 0.35	102.9
Green intensity = -8.4848(±0.3523)[Fe(III)] + 146.15(±1.977)	70.893	69.667	70.331	Fe(III) 9.05 ± 0.16	Fe(III) 9.0	100.6

จากตารางที่ 4.9 พบว่า ค่าความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้ในตัวอย่างน้ำประปามีค่าใกล้เคียงกับความเข้มข้นที่แน่นอนในการเตรียม spiked sample ซึ่งมีค่าร้อยละการวิเคราะห์คืนกลับที่ใกล้เคียงกับ 100 มาก ดังนั้นวิธีนี้สามารถตรวจหาปริมาณ Fe(II) และ Fe(III) ในตัวอย่างน้ำประปาได้

4.10 ผลการทดสอบความถูกต้องของวิธี

4.10.1 วิธีวิเคราะห์ Fe(II) ด้วย UV-Vis

หลังจากใช้ Double-layered PAD วิเคราะห์หาปริมาณ Fe(II) และ Fe(III) ในตัวอย่างน้ำดื่มและน้ำปะปาแล้ว จึงได้ทดสอบความถูกต้องของวิธีที่พัฒนาขึ้นใหม่ด้วยเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์หาปริมาณ Fe(II) ด้วย UV-Vis Spectrophotometer ที่เป็นวิธีที่ได้รับมาตรฐาน และได้แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.37



รูปที่ 4.37 แสดง ก) สเปกตรัมแสดงค่าการดูดกลืนแสงของ Bphen (300 μ M) เมื่อความเข้มข้นของ Fe(II) เพิ่มขึ้น (0 – 1.2 mg/L) ข) กราฟมาตรฐานระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารมาตรฐาน Fe(II) (0 – 1.2 mg/L)

จากรูปที่ 4.37ก) พบว่า สเปกตรัมมีพีคสูงสุดที่ความยาวคลื่น 533 นาโนเมตร และมีแนวโน้มของพีคที่เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ Fe(II) เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับในรูปที่ 4.3 และจากรูปที่ 4.37ข) ก็พบแนวโน้มความเป็นเส้นตรงที่ดี ที่จะคำนวณหาความเข้มข้นของ Fe(II) ในตัวอย่างจริงได้ ดังที่แสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ปริมาณ Fe(II) ในตัวอย่างน้ำดื่ม (DW) และตัวอย่างน้ำประปา (TW) จาก UV-Vis Spectrophotometer

Sample	Abs						Conc. of Fe (20X diluted), mg/L	Conc. of Fe, mg/L	% Recovery
	1	2	3	Mean	SD	RSD			
Non-spiked DW	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	105.65
7 mg/L Fe(II)-spiked DW	0.012	0.012	0.012	0.012	0.000	1.29	0.37	7.40	
Non-spiked TW	0.000	0.000	0.0000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	98.81
7 mg/L Fe(II)-spiked TW	0.011	0.011	0.011	0.011	0.000	1.88	0.35	6.92	

จากตารางที่ 4.10 พบว่า ค่าความเข้มข้นของ Fe(II) จากตัวอย่างน้ำดื่ม (DW) และน้ำประปา (TW) ที่วิเคราะห์ได้จาก UV-Vis Spectrophotometer มีค่าเท่ากับ 7.40 ± 0.0002 และ 6.92 ± 0.0002 ตามลำดับ มีค่าที่เจือจางลงแล้ว 20 เท่าอยู่ที่ 0.37 ± 0.0002 และ 0.35 ± 0.0002 ตามลำดับ โดยมีค่าร้อยละการวิเคราะห์คืนกลับที่ไม่ได้คิดจากค่าความเข้มข้นที่เจือจางลง 20 เท่า อยู่ที่ 105.65 และ 98.81 ที่ยังอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้

จากนั้น นำผลการวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่องมือเทียบกับผลการวิเคราะห์บน Double-layered PAD ดังแสดงในตารางที่ 4.10 และได้ทดสอบความถูกต้องของวิธีโดยใช้ Paired t-test แบบ Two-tail ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังแสดงในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 แสดงผลเปรียบเทียบการวิเคราะห์ปริมาณ Fe(II) ในตัวอย่างระหว่างวิธีที่พัฒนาขึ้นใหม่ (PAD) กับวิธีมาตรฐานที่ใช้เครื่องมือ

ตัวอย่าง	วิธีที่พัฒนาขึ้นใหม่ (PAD)	วิธีมาตรฐาน
น้ำดื่ม	Fe(II) 0.37 ± 0.001	Fe(II) 0.37 ± 0.0002
	Fe(III) 8.99 ± 0.17	-
น้ำประปา	Fe(II) 0.36 ± 0.01	Fe(II) 0.35 ± 0.0002
	Fe(III) 9.05 ± 0.16	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 แสดงการเปรียบเทียบผลวิเคราะห์โดยใช้การทดสอบ Paired t-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

t-test: Paired Two Sample for Means		
Analyte	T _{Stat}	T _{Critical} (two-tail)
Fe(II)	1.0285	12.70620474
Fe(III)	-	-

จากตารางที่ 4.12 การเปรียบเทียบผลลัพธ์วิเคราะห์โดยใช้การทดสอบ Paired t-test ของ Fe(II) จะเห็นได้ว่าเป็นการเปรียบเทียบข้อมูล 2 กลุ่มตัวอย่างโดยใช้วิธีวิเคราะห์ 2 วิธีระหว่างวิธีวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษที่พัฒนาขึ้น (PAD) กับวิธีวิเคราะห์ที่ตรวจวัดด้วยเครื่องยูวี-วิชิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งไม่ได้มีข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างหนึ่งมากกว่าอีกกลุ่มตัวอย่างหนึ่งเสมอ จากตารางที่ 4.10 ทำให้ทำ Paired t-test แบบ two-tail เพื่อหา T_{Cri} ไว้เปรียบเทียบ แล้วก็พบว่า T_{Stat} < T_{Cri} จึงสรุปได้ว่าทั้งสองวิธีวิเคราะห์นี้ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษแบบสองชั้นสำหรับตรวจวัดเชิงปริมาณของ Fe(II) และ Fe(III) ในคราวเดียวกัน โดยนำไปใช้วิเคราะห์กับตัวอย่างน้ำดื่มและน้ำประปา อุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ (PAD) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Microsoft word โดยจะพิมพ์ลงบนกระดาษกรอง Whatman® เบอร์ 1 ขนาด A4 ต่อมาสร้างลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำด้วยสารละลายกาวยที่ละลายด้วยเอทานอลเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จากนั้นนำ PAD ที่ได้มาประกบกันด้วยเทปกาวสองหน้าแบบหนาสองชั้นโดยที่ให้ด้านที่บ่งแสงของ PAD หันออกจากกัน จะได้ PAD แบบสองชั้น วิธีการตรวจวัดจะอาศัยการทำ preconcentration โดยการหยดสารตัวอย่างปริมาตร 120 ไมโครลิตร 2 ครั้งลงบน PAD ชั้นบนซึ่งชั้นบนจะใช้ตรวจวัด Fe(II) ด้วย Bphen ส่วนชั้นล่างใช้ตรวจวัด Fe(III) ด้วย NFD และยังมี การใช้ KHP บัฟเฟอร์เพื่อปรับค่า pH ของสารตัวอย่าง การตรวจวัดทำโดยใช้กล้องโทรศัพท์มือถือในการถ่ายภาพผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นบน PAD แล้วนำไปวัดค่าสีด้วยซอฟต์แวร์ ImageJ™

การตรวจวัด Fe(II) จะอาศัยสีของผลิตภัณฑ์ Fe(II)-Bphen ที่เกิดขึ้นในการตรวจวัด โดยสามารถตรวจวัดได้ในช่วงความเข้มข้น 0.1-0.6 มิลลิกรัมต่อลิตร และสามารถตรวจวัดความเข้มข้นได้ต่ำสุดที่ 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเที่ยงของวิธีประเมินจากค่าร้อยละความเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (RSD) มีค่าเท่ากับ 0.32 และความแม่นยำของวิธีประเมินได้จากค่าร้อยละการวิเคราะห์คืนกลับ (%recovery) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 102.9 – 105.7

การตรวจวัด Fe(III) จะอาศัยการ Quenching ของ NFD โดยสามารถตรวจวัดได้ในช่วงความเข้มข้น 1 - 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และสามารถตรวจวัดความเข้มข้นได้ต่ำสุดที่ 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเที่ยงของวิธีประเมินจากค่าร้อยละความเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (RSD) มีค่าเท่ากับ 3.53 และความแม่นยำของวิธีประเมินได้จากค่าร้อยละการวิเคราะห์คืนกลับ (%recovery) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 99.9 – 100.6

โดยอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถตรวจวัดได้ทั้ง Fe(II) และ Fe(III) ภายในคราวเดียวกันอีกทั้งยังผลิตได้ง่าย ราคาถูก สามารถพกพาได้ และสามารถนำไปใช้ในภาคสนามได้อีกด้วย เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของ Fe(II) ที่วิเคราะห์โดย PAD ที่พัฒนาขึ้นนี้กับวิธียูวี-วิซิเบิลสเปกโตรสโกปี พบว่าทั้งสองวิธีวิเคราะห์นี้ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อประเมินด้วยวิธี Paired-t Test

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การเก็บสารละลาย Bphen ควรเก็บในขวดสีชาและไม่ควรเก็บในตู้เย็นเพราะจะทำให้สารละลายตกตะกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของโรงเรียนพิษณุพนาลัย และผู้จัดทำเอกสารนี้ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น หากมีการนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย ผู้ที่ฝ่าฝืนให้ดำเนินการตามกฎหมายที่เกี่ยวข้อง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การเติมสารละลายกาวเมื่อเตรียมเสร็จควรทิ้งไว้ 2 ชั่วโมงเพื่อให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วจึงนำไปใช้และไม่ควรเก็บสารละลายกาวนานเกินไปเพราะจะทำให้ประสิทธิภาพการกั้นน้ำลดลง
4. หลังจากเตรียม PAD เสร็จ PAD ที่ได้จะมีความโค้งงอซึ่งอาจทำให้เกิดความยากในการใช้งาน ดังนั้นจึงควรทำให้ PAD เรียบสนิทก่อนจะนำไปใช้ โดยใช้หนังสือหลายๆ เล่มทับ PAD ที่ต้องการใช้งานอย่างน้อยหนึ่งวัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] การประปาส่วนภูมิภาค. 2561. **คู่มือกระบวนการหลัก ด้านกระบวนการผลิตน้ำประปา และควบคุมคุณภาพน้ำภาคทฤษฎี.**
- [2] A. S. Andreani, E. S. Kunarti, T. Hashimoto, T. Hayashita, S. J. Santosa. 2021. “Fast and selective colorimetric detection of Fe³⁺ based on gold nanoparticles capped with ortho-hydroxybenzoic acid.” *J. Environ. Chem. Eng.* 9: 105962
- [3] D. A. K. Senanayake, P. P. P. Perera, M. D. P. De Costa, R. Senthilnithy. 2021. “Bathophenanthroline as Turn-off Fluorescence Sensors for Selective and Sensitive Tetection of Fe(II).” *Research square.*
- [4] M. Yaman and G. Kaya. 2005. “Speciation of iron (II) and (III) by using solvent extraction and flame atomic absorption spectrometry.” *Anal. Chim. Acta.* 540: 77-81.
- [5] J. Proch and P. Niedzielski. 2021. “Iron species determination by high performance liquid chromatography with plasma based optical emission detectors: HPLC–MIP OES and HPLC–ICP OES.” *Talanta.* 231: 122403.
- [6] P. Ugo, L. M. Moretto, A. De Boni, P. Scopece, G. A. Mazzocchin. 2002. “Iron(II) and iron(III) determination by potentiometry and ionexchange voltammetry at ionomer-coated electrodes.” *Anal. Chim. Acta.* 474: 147-160.
- [7] J. W. Dieker and W. E. Van Der Linden. 1980. “Determination of iron(II) and iron(III) by flow injection and amperometric detection with a glassy carbon electrode.” *Anal. Chim. Acta.* 114: 267-274.
- [8] J. P. Comer. 1956. “Semiquantitative Specific Test Paper for Glucose in Urine.” *ANALYTICAL CHEMISTRY.* Volume 28, No. 11: 1748-1750
- [9] A. W. Martinez, S. T. Phillips, M. J. Butte and G M. Whitesides 2007. “Patterned Paper as a Platform for Inexpensive, Low-Volume, Portable Bioassays”. *Angew. Chem.* 119: 1340-1342
- [10] J. I. S. Aguirra, S. O. Ribeiro, A. Leite, M. Rangel, A. O. S. S. Rangel and R. B. R. Mesquita. 2023. “Iron Determination in Natural Waters Using a Synthesised 3-Hydroxy-4-Pyridione Ligand in a Newly Developed Microfluidic Paper-Based Device.” *Chemosensors* 2023, 11, 101.
- [11] F. T. S. M. Ferreira, K. T. Catalao, R. B. R. Mesquita and A. O. S. S. Rangel. 2021. “New microfluidic paper-based analytical device for iron determination in urine samples.” *Analytical and Bioanalytical Chemistry.* 413: 7463-7472
- [12] K. OGAWA and T. KANETA. 2016. “Determination of Iron Ion in the Water of a Natural Hot Spring Using Microfluidic Paper-based Analytical Devices.” *ANALYTICAL SCIENCES* JANUARY 2016, VOL. 32: 31-34

- [13] ประกาศการนิคมอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย ที่ 76/2560. เรื่อง กำหนดมาตรฐานทั่วไปในการระบายน้ำเสียลงสู่ระบบบำบัดน้ำเสียส่วนกลางในนิคมอุตสาหกรรม
- [14] สุรศักดิ์ วิชัยโย. 2553. “พื้นฐานระดับโมเลกุลของการเกิดพิษต่อหัวใจเนื่องจากภาวะเหล็กเกิน และบทบาทยาขับเหล็กในผู้ป่วยเบต้าธาลัสซีเมีย” *ไทยเภสัชศาสตร์และวิทยาการสุขภาพ*. 2553. 5(4): 363-371
- [15] วรันทกร รัตนการุณจิต, รัฐพล มีลาภสม, ศักดิ์ศรี สุภาจร และปฐิม จารุจรัส. 2563. “การใช้สมาร์ตโฟนเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดทางสีสำหรับการหาปริมาณ ไอออนเหล็กในน้ำโดยใช้แอนโทไซยานินเป็นรีเอเจนต์” *วารสารหน่วยวิจัยวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อมเพื่อการเรียนรู้ ปีที่ 11 ฉบับที่ 1 (2563)*
- [16] H. Asano and Y. Shiraishi. 2015. “Development of paper-based microfluidic analytical device for iron assay using photomask printed with 3D printer for fabrication of hydrophilic and hydrophobic zones on paper by photolithography.” *Anal. Chem. Acta*, 2015, 883, 55.
- [17] Y. Lu, W. Shi, J. Qin and B. Lin. 2010. “Fabrication and characterization of paper-based microfluidics prepared in nitrocellulose membrane by wax printing.” *Anal. Chem.* 2010, 82: 329-335
- [18] J. Sitanurak, N. Fukana, T. Wongpakdee, Y. Thepchuay, N. Ratanawimarnwong, T. Amornsakchai and D. Nacapricha. 2019. “T-shirt ink for one-step screen-printing of hydrophobic barriers for 2D- and 3D-microfluidic paper-based analytical devices.” *Talanta*. 205. 2019. 120113
- [19] M. M. Mentele, J. Cunningham, K. Koehler, J. Volckens and C. S. Henry. 2012. “Microfluidic Paper-Based Analytical Device for Particulate Metals.” *Anal. Chem.* 2012. 84:4474-4480
- [20] A. Ullah, P. Fazil, G. Rukh, M. T. Muhammad, M. Rahim, M. Ateeq, R. Khattak, M. S. Khan, O. A. A. Ali and D. I. Saleh. 2021. “A Novel Colorimetric Chemosensor Based on Ferene-S-Conjugated Silver Nanoparticles for Selective Recognition of Fe²⁺.” *Coatings 2021*, 11, 1293.
- [21] P. Siyal, A. Nafady, Sirajuddin, R. Memon, S. T. H. Sherazi, J. Nisar, A. A. Siyal, M. R. Shah, S. A. Mahesar and S. Bhagat. 2021. “Highly selective, sensitive and simpler colorimetric sensor for Fe²⁺ detection based on biosynthesized gold nanoparticles.” *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 254: 119645
- [22] S. Okabe, K. Oda, M. Muto, Y. V. Sahoo and M. Tanaka. 2021. “Speciation and determination of iron in aqueous solution and river water by high-resolution electrospray ionization mass spectrometry.” *Journal of Molecular Liquids*. 329: 115532

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [23] C. F. Wan, Y. J. Chang, C. Y. Chien, Y. W. Sie, C. H. Hu and A. T. Wu. 2016. "A new multifunctional Schiff base as a fluorescence sensor for Fe^{2+} and F^- ions, and a calorimetric sensor for Fe^{3+} ." *Journal of Luminescence*. 178: 115-120
- [24] A. Iqbal, Y. Tain, X. Wang, D. Gong, Y. Guo, K. Iqbal, W. Liu and W. Qin. 2016. "Carbon dots prepared by solid state method via citric acid and 1,10-phenanthroline for selective and sensing detection of Fe^{2+} and Fe^{3+} ." *Sensors and Actuators B*
- [25] X. Gong, H. Zhang, N. Jiang, L. Wang and G. Wang. 2019. "Oxadiazole-based 'on-off' fluorescence chemosensor for rapid recognition and detection of Fe^{2+} and Fe^{3+} in aqueous solution and in living cells." *Microchemical Journal*. 145: 435-443
- [26] P. Lv, Y. Xu, Z. Liu, G. Li and B. Ye. 2020. "Carbon dots doped lanthanide coordination polymers as dual-function fluorescent probe for ratio sensing Fe^{2+} and Fe^{3+} and ascorbic acid." *Microchemical Journal*. 152: 104255
- [27] N. N. Meeravali, K. Madhavi and A. C. Sahayam. 2021. "Novel ionic reverse mixed micelle supramolecules in dispersive liquid-liquid microextraction for the successive/individual sensitive speciation analysis of iron in natural water by UV-Vis spectrophotometry." *Microchemical Journal*. 164: 105986
- [28] L. Jun-Jie, W. Xian-feng, H. Dan-qun, H. Chang-jun, F. Huan-bao, Y. Mei and Z. Liang. 2016. "Colorimetric measurement of Fe^{3+} using a functional paper-based sensor based on catalytic oxidation of gold nanoparticles." *Sensors and Actuators B*
- [29] T. Moniz, C. R. Bassett, M. I. G. S. Almeida, S. D. Kolev, M. Rangel and R. B. R. Mesquita. 2020. "Use of an ether-derived 3-hydroxy-4-pyridinone chelator as a new chromogenic reagent in the development of a microfluidic paper-based analytical device for Fe(III) determination in natural waters." *Talanta*. 2020. 214, 120887
- [30] D. A. Wazuddin, L. H. Mujawar, T. N. Abduljabbar and M. S. El-Shahawi. 2021. "In-situ droplet assay on wax-modified paper for rapid and trace determination of Fe^{3+} in water." *Microchemical Journal*. 170. 2021. 106723

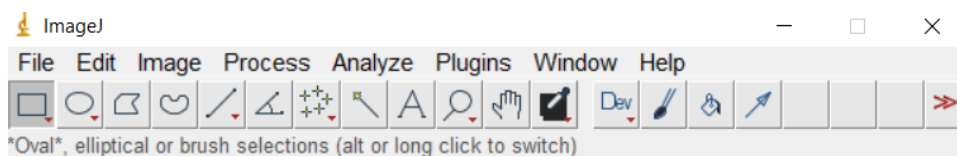


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

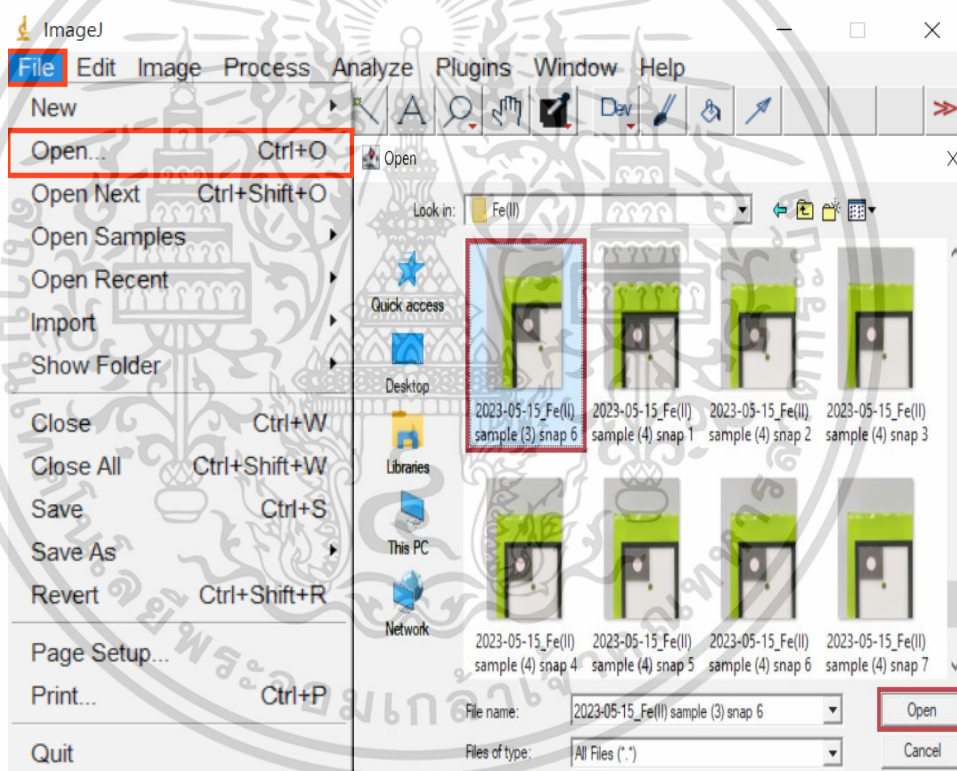
ภาคผนวก ก

วิธีการหาค่าสี RGB color ด้วยโปรแกรม ImageJ™

1. เปิดโปรแกรม ImageJ™

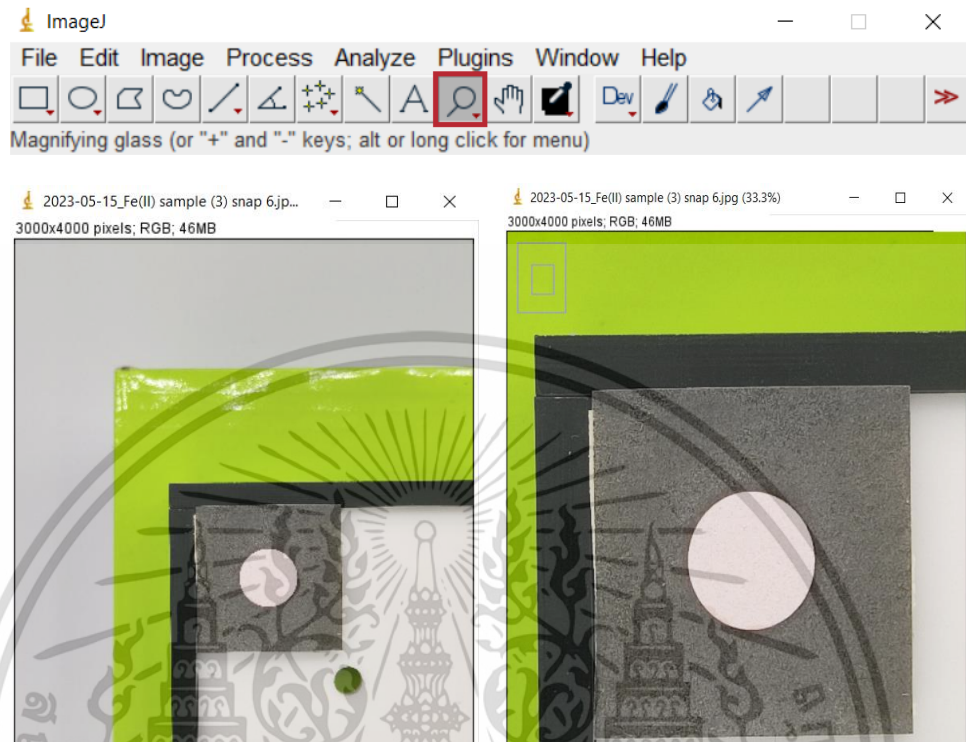


2. เลือกรูปภาพที่ต้องการหาค่าความเข้มสี RGB color โดยไปที่ File > Open > หาที่อยู่ของรูปภาพและเลือกภาพที่ต้องการหาค่าความเข้มสี

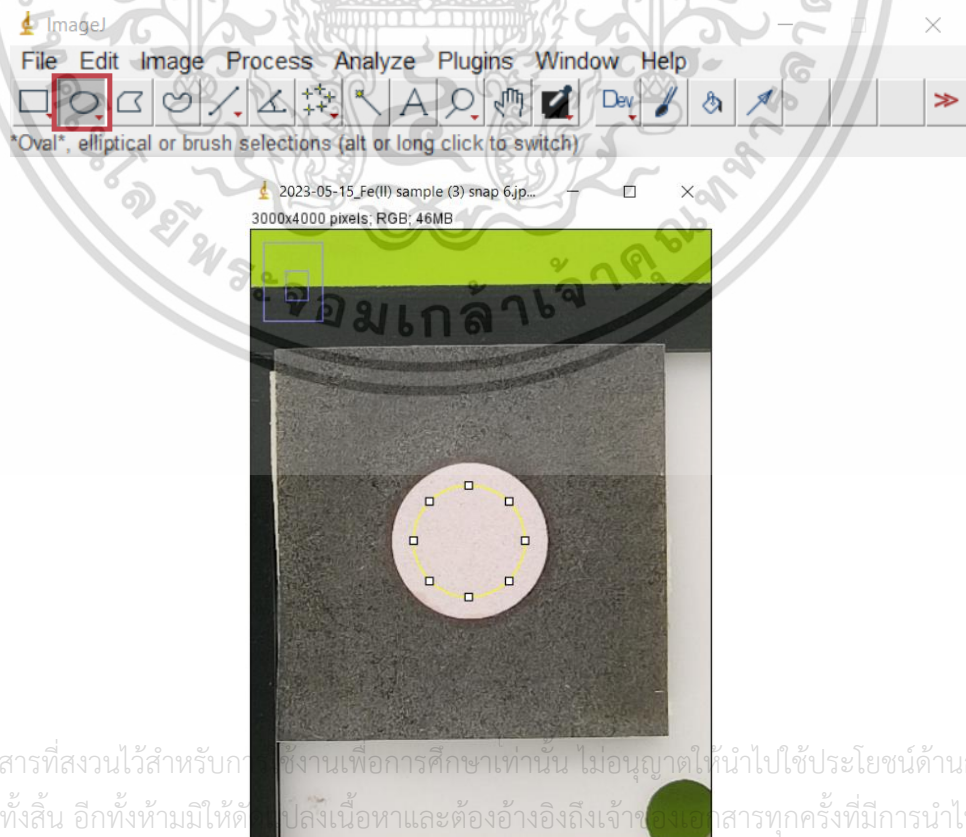


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ถ้าต้องการขยายภาพให้ใหญ่ขึ้นสามารถกด + ที่คีย์บอร์ดหรือกด Magnifying glass ที่โปรแกรมเพื่อขยายภาพ

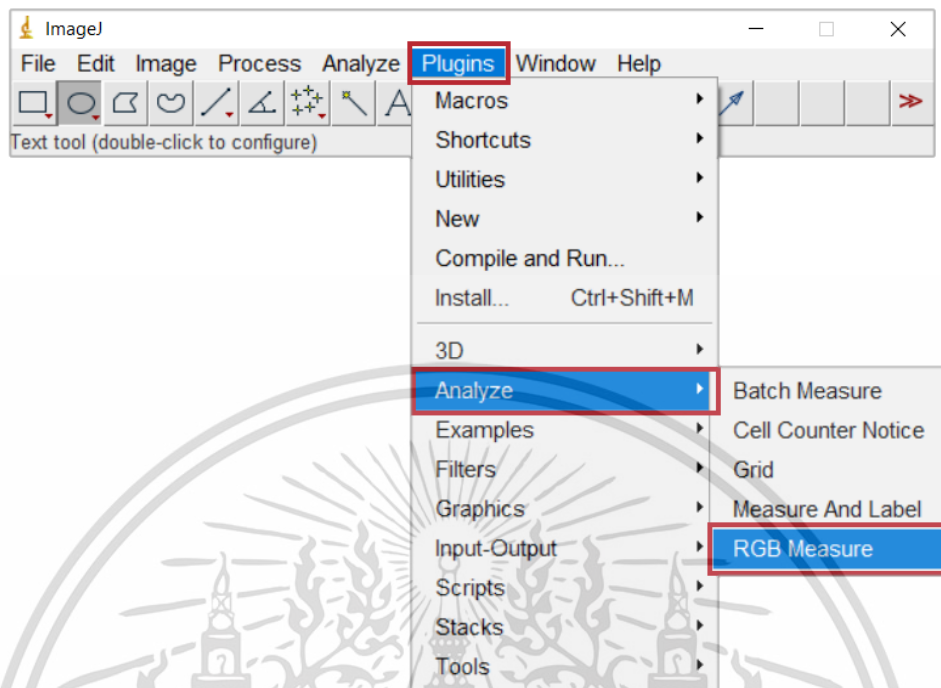


4. เลือก Oval เพื่อใช้กำหนดพื้นที่ในการค่าความเข้มสี RGB color



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. จากนั้นไปที่ Plugins > Analyze > RGB measure



6. จะได้ค่าสีออกมา

The screenshot shows the 'Results' window in ImageJ. The table displays the following data:

	Label	Area	Mean	Min
1	Red	58963	228.152	203
2	Green	58963	213.581	184
3	Blue	58963	210.454	185
4	(R+G+B)/3	58963	217.413	191
5	0.299R+0.587G+0.114B	58963	217.585	190

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. เมื่อต้องการกำหนดค่าพื้นที่ในการหาค่าสีให้เท่ากันให้กลับไปภาพเดิมที่หาค่าสีจากนั้นกด Ctrl C ที่คีย์บอร์ด (ในภาพเดิมต้องมีวงที่กำหนดพื้นที่หาค่าสีก่อนหน้านี้ด้วย)

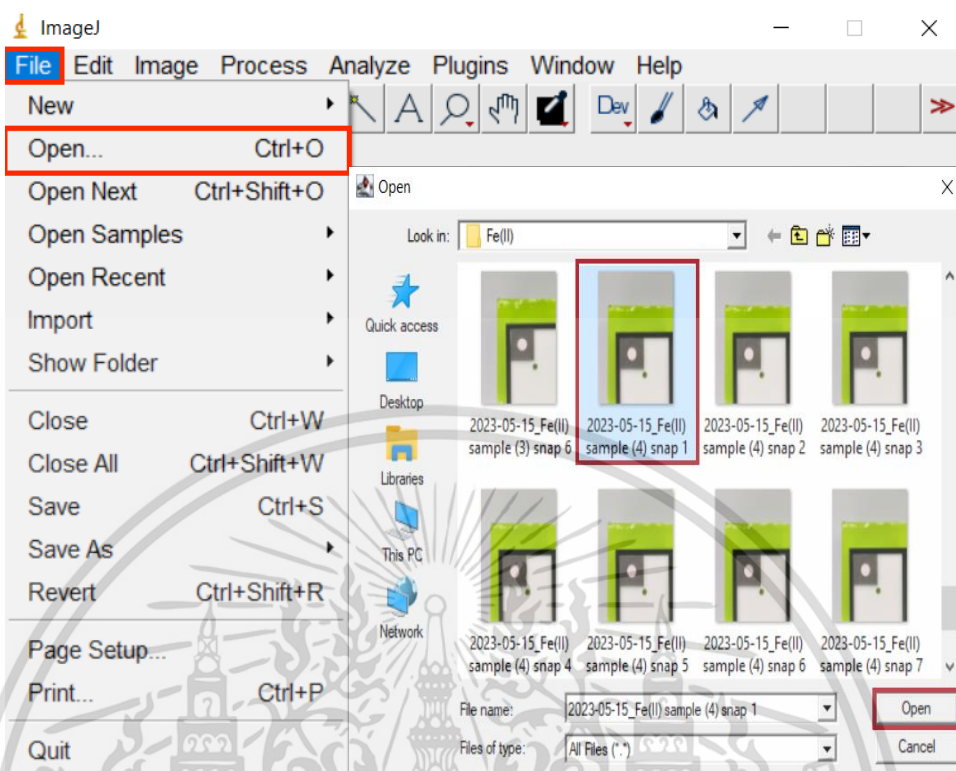


8. กดปิดรูปเดิมที่วัดค่าสีไปแล้วหรือย่อรูปลงไปที่ทาสก์บาร์ (ถ้าหากมีรูปต้องการวัดค่าสีเป็นจำนวนมากแนะนำให้ย่อรูปลงไปที่ทาสก์บาร์ในรูปแรกทีหาค่าสีและรูปถัดไปให้ปิดรูปเพื่อป้องกันความสับสนและป้องกันโปรแกรมหยุดทำงานเอง)

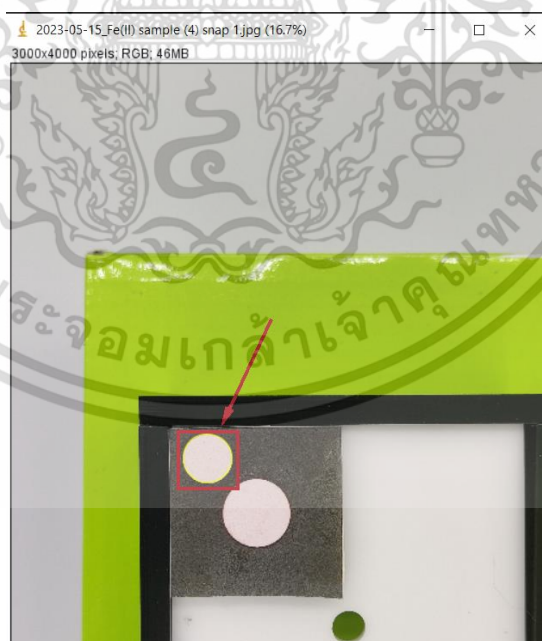


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. กดเปิดภาพใหม่ที่ต้องการหาค่าสี

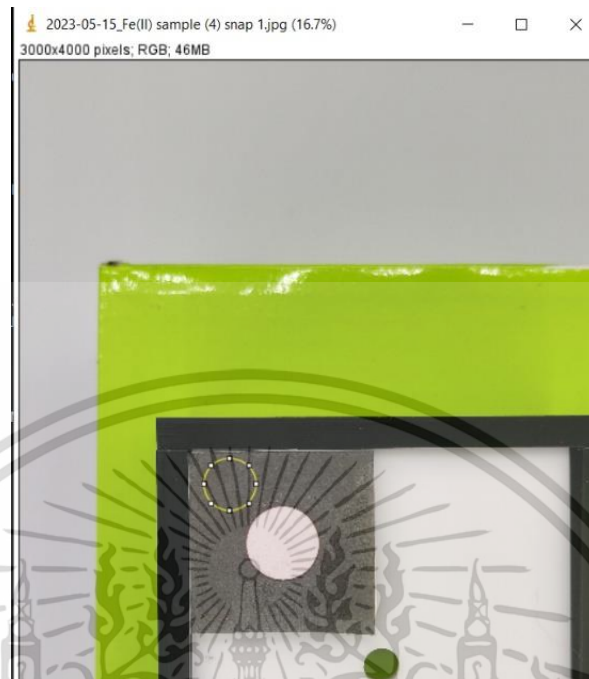


10. จากนั้นกด Ctrl + V ที่คีย์บอร์ดบนรูปภาพใหม่ จะได้วงกลมซึ่งมีภาพเดิมที่มีขนาดพื้นที่เท่าภาพก่อนหน้าที่หาค่าสี

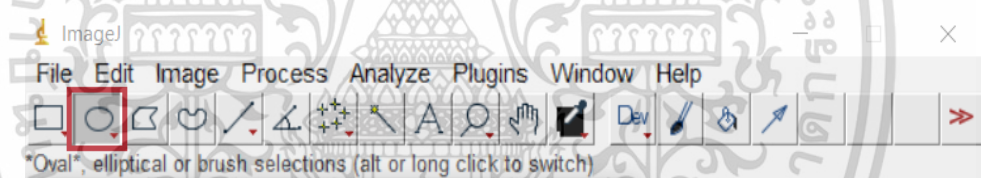


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. จากนั้นกด Ctrl Z ที่คีย์บอร์ดเพื่อลบภาพเก่าที่อยู่ในวงพื้นที่หาค่าสีออก

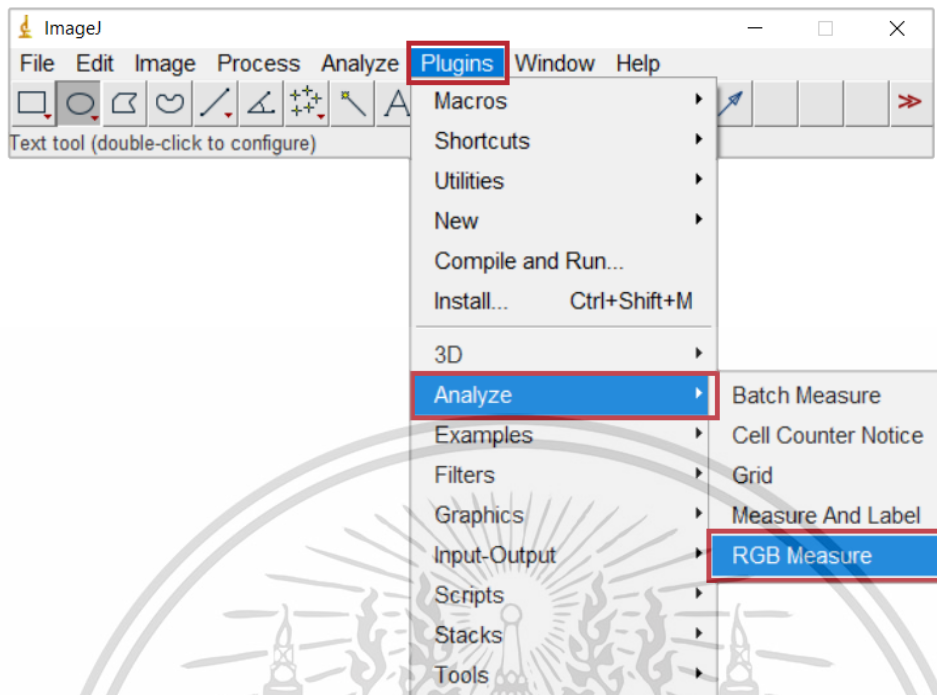


12. ไปที่ Oval อีกครั้งและเลื่อนวงกลมไปที่พื้นที่ที่ต้องการวัดค่าสี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. จากนั้นจากนั้นไปที่ Plugins > Analyze > RGB measure อีกครั้ง



14. จะได้ค่าสีของรูปต่อมาที่มีพื้นที่เท่ากับรูปก่อนหน้า

	Label	Area	Mean	Min
1	Red	58963	228.152	203
2	Green	58963	213.581	184
3	Blue	58963	210.454	185
4	(R+G+B)/3	58963	217.413	191
5	0.299R+0.587G+0.114B	58963	217.585	190
6	Red	58963	227.840	205
7	Green	58963	212.060	183
8	Blue	58963	210.737	183
9	(R+G+B)/3	58963	216.726	191
10	0.299R+0.587G+0.114B	58963	216.610	190

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การทดสอบความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ Fe(III)

1. การเตรียมสารเคมี

- 1.1 ปิเปตสารละลายสต็อก Fe(III) เข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร จาก AAS ตามปริมาตรที่แสดงดังตาราง จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน

ความเข้มข้น Fe(III) ที่ต้องการ (mg L ⁻¹)	ปริมาตรที่ปิเปตจากสต็อก Fe(III) (μL)
0	0
1	25
2	50
4	100
6	150
8	200
10	250

- 1.2 ปิเปตตัวอย่างน้ำจาก 3.4.9.1.3 ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จะได้ตัวอย่างน้ำสำหรับวิเคราะห์ด้วย AAS

2. การทดลอง

- 2.1 วิเคราะห์สารละลายมาตรฐาน Fe แล้วสร้างกราฟมาตรฐาน
- 2.2 วิเคราะห์สารตัวอย่าง แล้วนำค่าการดูดกลืนแสงไปแทนค่าหาค่าความเข้มข้นของเหล็กรวมในตัวอย่างน้ำ
- 2.3 นำค่าความเข้มข้นของเหล็กในตัวอย่างที่คำนวณได้จาก AAS ลบกับค่าความเข้มข้นของ Fe(II) ที่คำนวณได้จาก UV-Vis จะได้ค่าความเข้มข้นของ Fe(III) ในตัวอย่างน้ำ

ภาคผนวก ค

การคำนวณอัตราส่วนจำนวนโมลของรีเอเจนต์กับ Fe

สำหรับปฏิกิริยาระหว่าง Fe(II) กับ Bphen จะใช้อัตราส่วนระหว่างโลหะไอออนกับรีเอเจนต์ เป็น 1:3 ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งสามารถคำนวณอัตราส่วนจำนวนโมลที่ใช้ทำปฏิกิริยาได้จาก

$$n = CV$$

เมื่อ	n	คือ จำนวนโมลของสาร
	C	คือ ความเข้มข้นของสาร
	V	คือ ปริมาตรของสาร

การคำนวณจำนวนโมลของ Bphen กับ Fe(II) ที่ใช้ในการทดลองนี้ หาได้จาก

mol Bphen

$$n_{\text{Bphen}} = CV = \left(1000 \frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) (10 \times 10^{-6} \text{ L}) \left(\frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}}\right) \left(\frac{1 \text{ mol}}{332.40 \text{ g}}\right)$$

$$n_{\text{Bphen}} = 3.00 \times 10^{-8} \text{ mol}$$

mol Fe(II)

$$n_{\text{Fe(II)}} = CV = \left(1.2 \frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) (240 \times 10^{-6} \text{ L}) \left(\frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}}\right) \left(\frac{1 \text{ mol}}{55.847 \text{ g}}\right)$$

$$n_{\text{Fe(II)}} = 5.16 \times 10^{-9} \text{ mol}$$

$$\frac{n_{\text{Bphen}}}{n_{\text{Fe(II)}}} = \frac{3.00 \times 10^{-8}}{5.16 \times 10^{-9}} \approx 5.81 \text{ equiv.}$$

จากการคำนวณพบว่า เมื่อสารละลายมี Fe(II) อยู่ 1.2 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราส่วนระหว่าง Bphen กับ Fe(II) มีค่าประมาณ 5.81 เท่า หรือก็คือในการทำปฏิกิริยากับ Fe(II) 1 โมล ต้องใช้ Bphen 5.81 โมล ที่มีค่ามากกว่าอัตราส่วนที่ต้องใช้ทำปฏิกิริยา ความเข้มข้นของ Bphen ที่ใช้จึงมากเกินไป

สำหรับปฏิกิริยาระหว่าง Fe(III) กับ NFD จะใช้อัตราส่วนระหว่างโลหะไอออนกับรีเอเจนต์ เป็น 1:2 ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งมีวิธีการคำนวณดังต่อไปนี้

Concentration of NFD (mg L^{-1})

$$\frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{NFD} = \frac{1000 \text{ mg NFD}}{1 \text{ g NFD}} \times \frac{628 \text{ g NFD}}{1 \text{ mol NFD}} \times \frac{2000 \times 10^{-6} \text{ mol NFD}}{1 \text{ L}}$$

$$\frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{NFD} = 1256 \text{ mg/L}$$

mol NFD

$$n_{\text{NFD}} = CV = (1256 \frac{\text{mg}}{\text{L}})(21 \times 10^{-6} \text{ L})(\frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}})(\frac{1 \text{ mol}}{628 \text{ g}})$$

$$n_{\text{NFD}} = 4.2 \times 10^{-8} \text{ mol}$$

mol Fe(III)

$$n_{\text{Fe(III)}} = CV = (10.0 \frac{\text{mg}}{\text{L}})(240 \times 10^{-6} \text{ L})(\frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}})(\frac{1 \text{ mol}}{55.847 \text{ g}})$$

$$n_{\text{Fe(III)}} = 4.29 \times 10^{-8} \text{ mol}$$

$$\frac{n_{\text{NFD}}}{n_{\text{Fe(III)}}} = \frac{4.2 \times 10^{-8}}{4.29 \times 10^{-8}} \approx 1 \text{ equiv.}$$

จากการคำนวณพบว่า เมื่อสารละลายมี Fe(III) อยู่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราส่วนระหว่าง NFD กับ Fe(III) มีค่าประมาณ 1 เท่า ซึ่งน้อยกว่าอัตราส่วนระหว่างโลหะไอออนกับรีเอเจนต์ที่จะทำปฏิกิริยากัน แต่ว่าอุปกรณ์ตรวจวัดที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถตรวจวัดได้เนื่องจาก Fe(III) ที่ไหลจาก PAD ชั้นบนลงล่างมีน้อยกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณเพราะว่า Fe(III) บางส่วนตกค้างอยู่ในชั้นบนที่ใช้ในการตรวจวัด Fe(II) ด้วย Bphen ซึ่งผู้ทำวิจัยคาดว่า Bphen ซึ่งละลายน้ำได้ยากขัดขวางการไหลของ Fe(III)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อจำกัดของการตรวจวัด Fe(II)

อุปกรณ์ตรวจวัดที่พัฒนาขึ้นนี้ถ้ามีปริมาณ Fe(II) ที่มากเกินไปอาจทำให้เกิดความผิดพลาดในการตรวจวัดได้เนื่องจาก ปฏิกิริยาระหว่าง Fe(II) กับ Bphen จะใช้อัตราส่วนระหว่างโลหะไอออนกับรีเอเจนต์เป็น 1:3 เมื่อ Fe(II) มีมากเกินไปอัตราส่วนจะทำให้ Fe(II) ไหลลงไปในชั้นล่างพร้อมกับ Fe(III) ซึ่งจะทำให้รบกวนการวิเคราะห์ Fe(III) ทั้งนี้ในธรรมชาติจะพบ Fe(III) มากกว่า Fe(II) เนื่องจาก Fe(III) มีความเสถียรมากกว่า ดังนั้นอุปกรณ์ตรวจวัดที่พัฒนาขึ้นนี้คาดว่าสามารถใช้ตรวจวัดตัวอย่างน้ำได้อย่างหลากหลาย วิธีการคำนวณความเข้มข้น Fe(II) สูงสุดที่จะไม่รบกวนการตรวจวัด Fe(III) มีดังต่อไปนี้

mol Bphen

$$n_{\text{Bphen}} = CV = \left(1000 \frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) (10 \times 10^{-6} \text{ L}) \left(\frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}}\right) \left(\frac{1 \text{ mol}}{332.40 \text{ g}}\right)$$

$$n_{\text{Bphen}} = 3.00 \times 10^{-8} \text{ mol}$$

mol Bphen/mol Fe(II)

$$\frac{n_{\text{Bphen}}}{n_{\text{Fe(II)}}} = \frac{1}{3} = \frac{3.00 \times 10^{-8}}{n_{\text{Fe(II)}}}$$

$$n_{\text{Fe(II)}} = 9 \times 10^{-8} \text{ mol}$$

mg/L Fe(II)

$$n_{\text{Fe(II)}} = CV = \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{ Fe(II)}\right) (240 \times 10^{-6} \text{ L}) \left(\frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}}\right) \left(\frac{1 \text{ mol}}{55.847 \text{ g}}\right) = 9 \times 10^{-8} \text{ mol}$$

$$\frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{ Fe(II)} = 20.94$$

จากการคำนวณพบว่าอุปกรณ์ตรวจวัดที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถตรวจวัด Fe(III) ในสถานะที่มีความเข้มข้นของ Fe(II) ได้สูงสุด 20.94 มิลลิกรัมต่อลิตร



งานทะเบียนคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษา

วันที่ 20 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2566

ข้าพเจ้า นายบุญญพัฒน์ สุขโพธารมณธ์ รหัสนักศึกษา 62050307
นายสุรเชษฐ์ ทองจันทร์ รหัสนักศึกษา 62050350

นักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี
ขอรับรองว่าโครงการพิเศษ เรื่อง

ชื่อภาษาไทย การพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษแบบสองชั้นสำหรับตรวจวัดเหล็ก (II)
และเหล็ก (III) ในตัวอย่างน้ำภายในคราวเดียวกัน

ชื่อภาษาอังกฤษ Double-Layered Paper-based Analytical Device for Simultaneous
Determination of Iron(II) and Iron (III) in Water Samples

ปีการศึกษา 2565

เป็นผลงานวิจัยที่ได้คัดลอกหรือละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่นและได้ผ่านการตรวจสอบความซ้ำซ้อนเรียบร้อยแล้ว
และได้แนบเอกสารการตรวจสอบการลอกเลียนงานวรรณกรรมที่ตรวจสอบจากเล่มโครงการพิเศษฉบับ
สมบูรณ์แล้ว

โปรแกรมอักขราวิสุทธิ์ 0.00 %

ลงชื่อ.....บุญพัฒน์.....

(นายบุญญพัฒน์ สุขโพธารมณธ์)
นักศึกษา

ลงชื่อ.....สุรเชษฐ์.....

(นายสุรเชษฐ์ ทองจันทร์)
นักศึกษา

ข้าพเจ้า ผศ.ดร. ณัฐวุฒิ เชิงชั้น อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ได้ตรวจสอบโครงการพิเศษของนักศึกษา
ข้างต้น แล้ว ขอรับรองว่าเป็นผลงานวิจัยของนักศึกษาจริงและมีเนื้อหาสมบูรณ์ จึงลงชื่อไว้เป็นหลักฐาน

ลงชื่อ.....ณัฐวุฒิ.....

(ผศ.ดร. ณัฐวุฒิ เชิงชั้น)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้