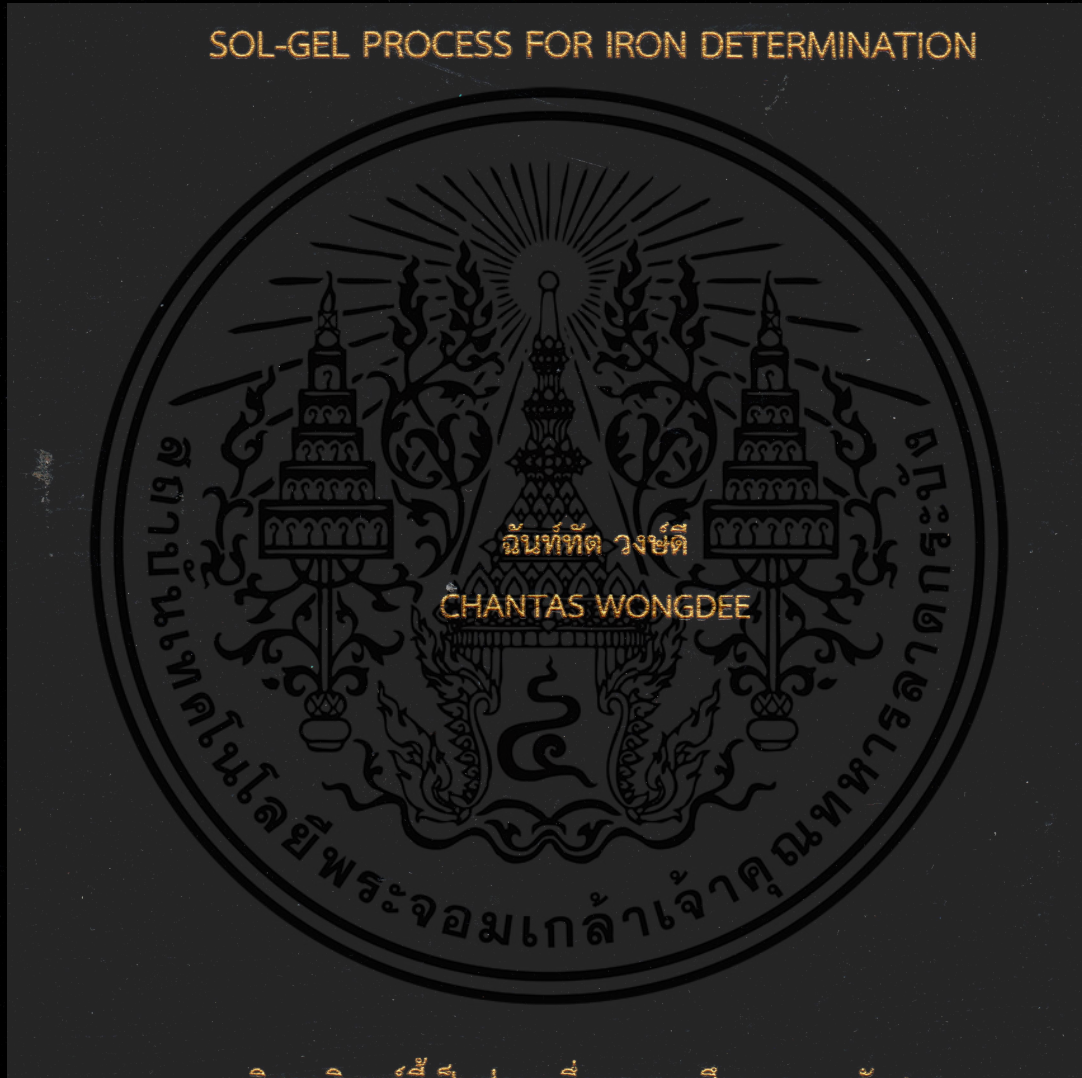


การพัฒนากระดาษทดสอบที่ตรึงออร์โธฟีนแอนทโรลีน
ด้วยกระบวนการโซล-เจลสำหรับวิเคราะห์ปริมาณเหล็ก

DEVELOPMENT OF PAPER TEST KIT DOPED ORTHOPHENANTHROLINE BY
SOL-GEL PROCESS FOR IRON DETERMINATION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-SC-M-012-003

การพัฒนากระดาษทดสอบที่ตรึงอโทฟีแนนโทรลีน
ด้วยกระบวนการโซล-เจลสำหรับวิเคราะห์ปริมาณเหล็ก

DEVELOPMENT OF PAPER TEST KIT DOPED ORTHOPHENANTHROLINE BY
SOL-GEL PROCESS FOR IRON DETERMINATION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2559

KMITL-2016-SC-M-012-003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF PAPER TEST KIT DOPED ORTHOPHENANTHROLINE BY
SOL-GEL PROCESS FOR IRON DETERMINATION



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN CHEMISTRY
DEPARTMENT OF CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2016
KMITL-2016-SC-M-012-003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

FACULTY OF SCIENCE

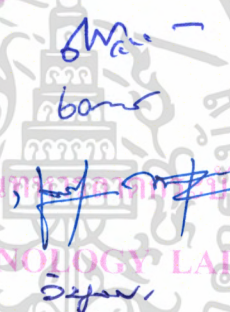
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ “การพัฒนากระดาษทดสอบที่ตรึงออร์โทฟีแนนโทรอลีนด้วยกระบวนการโซล-เจลสำหรับวิเคราะห์ปริมาณเหล็ก” (DEVELOPMENT OF PAPER TEST KIT DOPED ORTHOPHENANTHROLINE BY SOL-GEL PROCESS FOR IRON DETERMINATION)

ชื่อนักศึกษา นายฉันททัต วงษ์ดี
รหัสประจำตัว 54651001
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาเคมี)
ภาควิชา เคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม -

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ณัฐวุฒิ เชิงชัน ประธานกรรมการ ผศ.ดร.เสาวภาคย์ อีราทรง อาจารย์บัณฑิตประจำ (ในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง) ดร.งามเนตร วรกิจเจริญชัย ผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอกสถาบัน ผศ.ดร.วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	

วัน/ เดือน/ ปี ที่สอบ 24 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2559 เวลา 13.00-16.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้อง 306 อาคารปฏิบัติการใหม่ ชั้น 3

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ดุชนิ ธนะบริพัฒน์)
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
วันที่ 29 เดือน 12 พ.ศ. 59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนากระดาษทดสอบที่ตรึงอโทพีแนนนโทรลีนด้วย กระบวนการโซล-เจลสำหรับวิเคราะห์ปริมาณเหล็ก
ชื่อนักศึกษา	นายฉันททัต วงษ์ดี
รหัสประจำตัว	54651001
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เคมี)
ภาควิชา	เคมี
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาชุดทดสอบบนกระดาษสำหรับวิเคราะห์หาปริมาณเหล็ก ทำการเติมอโทพีแนนนโทรลีนเป็นส่วนผสมในสารละลายโซล-เจล แล้วหยดสารละลายนี้ 10 ไมโครลิตรลงบนกระดาษกรอง ตัดแผ่นกระดาษกรองเป็นรูปร่างกลมตามรอยขอบของสารละลายโซล-เจลได้เป็นกระดาษทดสอบ สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบปริมาณเหล็กคือทำการแช่แผ่นกระดาษทดสอบในสารละลายผสมระหว่างสารละลายเหล็กกับสารละลายไฮดรอกซีลามีนไฮโดรคลอไรด์ที่ปรับ pH เป็น 4.5 ปริมาตรในช่วง 0.10-0.40 มิลลิลิตร เป็นเวลา 15 นาที จะเกิดสารเชิงซ้อนระหว่างเหล็ก (II) กับอโทพีแนนนโทรลีนเป็นสีส้มบนกระดาษทดสอบ นำไปสแกนรูปสีด้วยเครื่องสแกน ตั้งค่าความละเอียดในการสแกนเท่ากับ 600 จุดต่อตารางนิ้ว และค่าความสว่างของหลอดไฟเท่ากับ -50 คำนวณหาค่าความแตกต่างความเข้มแสงด้วยโปรแกรม ImageJ วิธีวิเคราะห์หาปริมาณเหล็กด้วยการแช่แผ่นกระดาษทดสอบนี้สามารถใช้ตรวจสอบปริมาณเหล็กในตัวอย่งน้ำดื่มในระดับไม่เกิน 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยค่าร้อยละคืนกลับอยู่ในช่วง 97 % ถึง 106 % และขีดจำกัดในการตรวจวัด (LOD) อยู่ที่ 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร และขีดจำกัดของการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (LOQ) อยู่ที่ 0.45 มิลลิกรัมต่อลิตร

คำสำคัญ : โซล-เจล, เหล็ก, อโทพีแนนนโทรลีน, กระดาษทดสอบ

Thesis Title Development of Paper Doped Orthophenanthroline Test Kit by Sol-Gel Process for Iron Determination

Student Name Mr. Chantas Wongdee

Student ID 54651001

Degree Master of Science (Chemistry)

Department Chemistry

Year 2016

Thesis Advisor Asst.Prof.Dr. Wiboon Praditweangkum

Abstract

The paper test kit for determination of iron is developed. Orthophenanthroline is added as an ingredient in sol-gel solution. Each 10 μL of this solution is pipetted and dropped on a filter paper. This paper is cut as a circle around the edge of sol-gel and can be used as iron test paper. The optimum condition for iron testing is operated by soaking a test paper in mixing solution of iron and hydroxylaminehydrochloride adjusted pH = 4.5, volumes range from 0.10 to 0.40 mL and reaction time for 15 minutes. The orange color of Fe(II)-orthophenanthroline complex is developed on test paper. This paper strip is scanned by a scanner as a color picture at 600 dpi resolution and -50 brightness. The Euclidean distance is calculated by using the ImageJ program. The developed method for determination of iron by soaking of paper test kit can be applied to test and control iron content not over than 0.50 mg/L in water samples. The recovery of this method is in 97 % - 106 % range. The limit of detection (LOD) is 0.02 mg/L and the limit of quantitation (LOQ) is 0.45 mg/L.

Keyword: Sol-gel, Iron, Orthophenanthroline, Paper test kit

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่สนับสนุนค่าใช้จ่ายในการทำงานวิจัยนี้ ขอคุณ ผศ.ดร. วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ ที่ให้คำปรึกษางานวิจัยนี้ให้ราบรื่นไปด้วยดี และขอคุณ ผศ.ดร. ณัฐวดี เชิงชั้น, ผศ.ดร. เสาวภาคย์ ธีราทรง และ ดร. งามเนตร วรกิจเจริญชัย ที่เป็นกรรมการสอบ และช่วยตรวจสอบแก้ไขเล่มวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ถูกต้อง

นายฉันททัต วงษ์ดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ค

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 กระบวนการโซล-เจล.....	3
2.1.1 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสของเมทัลอัลค็อกไซด์.....	5
2.1.2 ปฏิกริยาการควบแน่นของเมทัลอัลค็อกไซด์.....	6
2.2 การเกิดสารเชิงซ้อนที่มีสีระหว่างอโเทพิแนนโทรลีนกับไอออนเหล็ก (II).....	9
2.3 ระบบสี.....	11
2.3.1 ระบบแถบแม่สี แดง เขียว และน้ำเงิน หรือ RGB.....	12
2.3.2 ระบบแถบแม่สี ฟ้า ชมพู เหลือง และดำ หรือ CMYK.....	12
2.3.3 ระบบแถบแม่สี ตัวสี ความสดของสี และ ความสว่างของสี หรือ HSB.....	13
2.3.4 ระบบแถบแม่สี Lab.....	14
2.4 ที่มาของสมการ Euclidean distance.....	15
2.5 หลักการทำงานของเครื่องสแกน.....	16
2.5.1 เครื่องสแกนแบบตั้งโต๊ะ.....	17
2.5.2 เครื่องสแกนแบบมีที่ป้อนเอกสาร.....	17
2.5.3 เครื่องสแกนแบบมือถือ.....	18
2.5.4 เครื่องสแกนฟิล์ม.....	18
2.5.5 เครื่องสแกนความละเอียดสูง.....	19
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ง

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	26
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์.....	26
3.1.1 สารเคมี.....	26
3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	26
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	27
3.3 วิธีดำเนินการทดลอง.....	29
3.3.1 ศึกษาการหาปริมาณไอออนเหล็ก (II) ที่ต่ำกว่า 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยวิธีฉีดสารละลายไหลผ่านและวิธีแซ่ในสารละลาย.....	29
3.3.2 ศึกษาผลของความสว่างที่ใช้สแกนที่มีต่อสีของสารเชิงซ้อน.....	33
3.3.3 ศึกษาผลของความสะอาดอุปกรณ์ที่ใช้พักแผ่นกระดาษทดสอบให้แห้งที่มีต่อจุดสีของสารเชิงซ้อน.....	34
3.3.4 ศึกษาผลของปริมาตรของสารละลายไอออนเหล็ก (II) ที่ใช้แซ่แผ่นกระดาษทดสอบ.....	35
3.3.5 ศึกษาผลของเวลาที่ใช้แซ่แผ่นกระดาษทดสอบ.....	36
3.3.6 การวิเคราะห์ตัวอย่างเปรียบเทียบผลกับวิธีมาตรฐาน.....	37
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	43
4.1 ศึกษาการหาปริมาณไอออนเหล็ก (II) ที่ต่ำกว่า 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยวิธีฉีดสารละลายไหลผ่านและวิธีแซ่ในสารละลาย.....	43
4.2 ศึกษาผลของความสว่างที่ใช้สแกนที่มีต่อสีของสารเชิงซ้อน.....	45
4.3 ศึกษาผลของความสะอาดอุปกรณ์ที่ใช้พักแผ่นกระดาษทดสอบให้แห้งที่มีต่อจุดสีของสารเชิงซ้อน.....	46
4.4 ศึกษาผลของปริมาตรของสารละลายไอออนเหล็ก (II) ที่ใช้แซ่แผ่นกระดาษทดสอบ... ..	48
4.5 ศึกษาผลของเวลาที่ใช้แซ่แผ่นกระดาษทดสอบ.....	49
4.6 การวิเคราะห์ตัวอย่างเปรียบเทียบผลกับวิธีมาตรฐาน.....	50
4.6.1 การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำด้วยวิธีแซ่แผ่นกระดาษทดสอบ.....	50
4.6.2 การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำด้วยวิธีสเปกโทรโฟโตเมทรี.....	51
4.6.3 การหาเปอร์เซ็นต์ recovery ของวิธีแซ่แผ่นกระดาษทดสอบ.....	53
4.7 การหาค่า LOQ และ LOD ของวิธีแซ่แผ่นกระดาษทดสอบ.....	56
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ๙

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	57
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	59
เอกสารอ้างอิง.....	61
ภาคผนวก.....	64
ประวัติผู้เขียน.....	ญ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ **ณ**

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงลิแกนด์ที่นิยมใช้เป็น precursor.....	4
4.1 ค่า Euclidean distance ที่ได้จากการทดลอง เพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก (II) ด้วยวิธีการต่างกัน.....	44
4.2 แสดงค่า ED ที่คำนวณได้จากตัวอย่างน้ำที่วิเคราะห์ด้วยวิธีแซ่แผ่นกระดาษทดสอบในสารละลาย.....	50
4.3 แสดงผลการทดลองสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) ที่ทำการวัดด้วยวิธีสเปกโทรโฟโตเมทรี.....	52
4.4 แสดงผลการทดลองสารตัวอย่างน้ำดื่มประเภทต่างๆ ที่ทำการวัดด้วยวิธีวัดด้วยวิธีสเปกโทรโฟโตเมทรี.....	53
4.5 แสดงเปอร์เซ็นต์ recovery ของเหล็กในน้ำดื่ม ซึ่งในการทดลองใช้น้ำดื่ม, น้ำกรอง และ น้ำประปาเป็นตัวอย่างน้ำโดยเติมสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) ลงไป.....	54
4.6 ค่า ED ที่ได้จากการทดลองวิธีแซ่แผ่นกระดาษทดสอบเพื่อหาค่า LOD และ LOQ.....	56
ข. ตารางแสดงการคำนวณค่า Euclidean Distance (ED) ของสารละลายมาตรฐานของไอออนเหล็ก (II).....	64

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง เวลาในการเกิดโซล-เจล กับ อัตราส่วนน้ำต่อซิลิกอน โดยกราฟแต่ละเส้นแสดงถึงอัตราส่วนปริมาณเอทานอลต่อปริมาณ TEOS.....	7
2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ pH ของโซล-เจล ที่มีผลต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์ซิลิกอนออกไซด์ที่ไม่ละลายตัว และเวลาที่เกิดโซล-เจล.....	8
2.3 แสดงโครงสร้างของสารเชิงซ้อนของเฟอร์รัส-ทริส-อโโทพีแนนโทรีน.....	9
2.4 ภาพแถบแม่สีของระบบ RGB.....	12
2.5 (a) แสดงสีต่างๆที่เกิดจากแถบแม่สี CMYK และ (b) แสดงสีต่างๆที่เกิดจากแถบแม่สี RGB...	13
2.6 แสดงแถบแม่สีของระบบ HSB.....	14
2.7 แสดงระบบแถบแม่สี Lab.....	15
2.8 แสดงลักษณะของลูกศรและขนาดของลูกศร.....	15
2.9 แสดงระบบคาร์ทีเซียนเอ็กวอยแซตในการหาสมการ Euclidean distance.....	16
2.10 ตัวอย่างเครื่องสแกนแบบตั้งโต๊ะ.....	17
2.11 ตัวอย่างเครื่องสแกนแบบมีที่ป้อนเอกสาร.....	18
2.12 ตัวอย่างเครื่องสแกนแบบมือถือ.....	18
2.13 ตัวอย่างเครื่องสแกนฟิล์ม.....	19
2.14 ตัวอย่างเครื่องสแกนความละเอียดสูง.....	19
2.15 ภาพของอุปกรณ์ CCD.....	20
2.16 แสดงตำแหน่งกระจกบนเครื่องสแกนแบบตั้งโต๊ะ.....	20
2.17 แสดงตำแหน่งของหัวสแกน, แท่งสเตปีลเซอร์, สายพาน และฟิลเตอร์ ของเครื่องสแกนแบบตั้งโต๊ะ.....	21
2.18 แสดงตำแหน่งหลอดไฟในเครื่องสแกนแบบตั้งโต๊ะ.....	21
2.19 แสดงการทำงานของเครื่องสแกน.....	22
3.1 แสดงลักษณะโปรแกรม ImageJ.....	32
3.2 แสดงตำแหน่งของรูปภาพวงกลมที่แถบรูปภาพด้านบนของโปรแกรม.....	33
3.3 แสดงตำแหน่งค่า w และ h ในการสร้างวงกลมสำหรับซูมแถบความเข้มสีไปใช้วิเคราะห์ผล...	33
3.4 แสดงตำแหน่งของ blank และสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) ในถาดหลุม.....	35
4.1 ตัวอย่างอุปกรณ์สำหรับกรองสารละลาย.....	43
4.2 ตัวอย่างถาดหลุมวิทยาศาสตร์ 24 ช่อง พร้อมฝาปิด.....	44

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 ค่า Euclidean distance ที่ได้จากการทดลองปรับค่าความสว่างของเครื่องสแกน (สารละลายไอออนเหล็ก (II) เข้มข้น 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาในการแช่ 30 นาที)..	46
4.4 กราฟแสดงค่า Euclidean distance เมื่อทดลองแช่แผ่นกระดาษทดสอบในสารละลาย Fe(II) ที่มีปริมาตรต่าง ๆ กัน เป็นเวลา 1 นาที แล้วนำแผ่นกระดาษทดสอบออกมา (ก) พักบนพื้นโต๊ะห้องปฏิบัติการ (ข) พักบนฝาของภาดหลุมที่สะอาด.....	47
4.5 กราฟแสดงค่า Euclidean distance เมื่อทดลองแช่แผ่นกระดาษทดสอบในสารละลายไอออนเหล็ก (II) ที่มีปริมาตร 0.1 ถึง 0.4 มิลลิกรัมต่อลิตร และตั้งแต่เวลา (ก) 1 นาที, (ข) 5 นาที, (ค) 10 นาที, (ง) 15 นาที, (จ) 20 นาที และ (ฉ) 30 นาที.....	48
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ED กับเวลาที่ใช้ในการแช่แผ่นกระดาษทดสอบในสารละลายไอออนเหล็ก (II) ปริมาตร 0.10 มิลลิกรัม.....	49
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอออนเหล็ก (II) ของตัวอย่างน้ำดื่ม 12 ตัวอย่างเทียบกับสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) ความเข้มข้น 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร....	51
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) กับค่า Euclidean distance สำหรับการวัดด้วยวิธี UV-Vis Spectrometry.....	52
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) กับค่า Euclidean distance สำหรับการหาเปอร์เซ็นต์ recovery ของน้ำกรอง, น้ำดื่ม และน้ำประปา.....	54

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เหล็กที่พบในหินและดินอยู่ในรูปสินแร่ที่ไม่ละลายน้ำ โดยที่ในดินมีแบคทีเรียสามารถย่อยสารอินทรีย์แล้วได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งละลายน้ำได้กรดคาร์บอนิก เมื่อกรดคาร์บอนิกไหลผ่านสินแร่เหล็กจะละลายเหล็กให้อยู่ในรูปเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ถ้าเป็นสภาวะที่ขาดออกซิเจน แบคทีเรียในชั้นดินที่มีสารอินทรีย์อยู่สามารถเปลี่ยนเหล็กเฟอร์ริก (Fe_2O_3) เป็นเหล็กเฟอร์รัส (FeO) ซึ่งถูกละลายด้วยกรดคาร์บอนิกเข้าสู่แหล่งน้ำได้เช่นกัน ถ้าในแหล่งน้ำมีปริมาณเหล็กเกิน 1 – 2 ppm จะมีรสหวานปนขม และขุ่น ไม่เหมาะกับการนำไปบริโภค นอกจากนี้เมื่อใช้ในการอุปโภค เช่น ชักผ้าก็จะเกิดรอยต่างบนเสื้อผ้าและคราบสนิม^[1] จากผลเสียเรื่องรสชาติของน้ำและความขุ่นของเฟอร์รัสไอออนที่ละลายในน้ำมากเกินไป ทำให้มีการควบคุมคุณภาพของไอออนเหล็กที่เจือปนในน้ำ เพื่อให้ได้น้ำที่สะอาดทั้งเรื่องสี กลิ่น รส และความปลอดภัยในน้ำดื่ม

การตรวจสอบไอออนเหล็กที่ละลายในน้ำทำได้หลายวิธี เช่น การวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยวิธีสเปกโทรโฟโตเมทรี^[2] วิธีอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโทรเมทรี^[3] วิธีการสกัดด้วยวัฏภาคของเหลว-ของเหลว^[4] วิธีโฟลอินเจกชันอะนาไลซิส^[5] วิธีอินดักทีฟลิคิ์บเป็ลพลาสติก-แมสสเปกโทรเมทรี^[6] วิธีคาพิลลารีอิเล็กโตรโฟรีซิส^[7] เป็นต้น วิธีการวิเคราะห์เหล่านี้ส่วนใหญ่จะใช้เครื่องมือที่มีราคาแพงและมีวิธีการใช้งานที่ยุ่งยาก ต้องอาศัยความชำนาญในการปฏิบัติงาน วิธีที่นิยมใช้มากที่สุด คือวิธี UV-VIS สเปกโทรโฟโตเมทรี เป็นวิธีที่วัดที่สะดวก รวดเร็ว เครื่องมือใช้งานง่าย มีอยู่ในห้องปฏิบัติการทั่วไปอยู่แล้ว การวิเคราะห์เหล็กในตัวอย่างน้ำโดยทั่วไปมีขั้นตอนการเก็บตัวอย่างใส่ลงในขวดพลาสติก แล้วนำส่งไปให้ทางห้องปฏิบัติการตรวจวัด ซึ่งทำให้เสียเวลาและเสียค่าใช้จ่าย นฤชิต ไพโรจน์^[8] ได้พัฒนาวิธีวิเคราะห์ปริมาณเหล็กในตัวอย่างยาที่สามารถทดสอบภาคสนามได้โดยใช้วิธีทดสอบแบบจุด (Spot test) บนกระดาษ ซึ่งเตรียมจุดรีเอเจนต์ด้วยกระบวนการโซล-เจลเป็นการตรึงอโทพีแนนนโทรลีนอยู่ในโซล-เจล เมื่อผสมสารละลายเหล็กกับไฮดรอกซีลามีนไฮโดรคลอไรด์ ในภาวะ pH = 4.5 เหล็ก (III) ที่มีในสารละลายจะเปลี่ยนเป็นเหล็ก (II) จากนั้นหยดลงบนจุดรีเอเจนต์ จะเกิดสารเชิงซ้อนสีส้มระหว่างเหล็ก (II) กับอโทพีแนนนโทรลีน (Ph) ดังสมการ



แล้วทำการสแกนรูปจุดสีด้วยเครื่องสแกน และใช้โปรแกรมวิเคราะห์ความเข้มของสี ซึ่งเป็นการทดสอบและตรวจวัดที่ทำได้ง่าย โดยที่วิธีนี้มีขีดจำกัดของการตรวจวัดอยู่ที่ 7.95 มิลลิกรัมต่อลิตร ในงานวิจัยนี้จะพัฒนาต่อยอดชุดทดสอบบนกระดาษให้สามารถตรวจวัดเหล็กในปริมาณที่ต่ำลงไปได้อีกโดยทำการตรึงอโทพีแนนนโทรลีนไว้บนแผ่นกระดาษทดสอบด้วยกระบวนการโซล-เจล แล้วนำไปแช่ในสารละลายที่ต้องการหาปริมาณเหล็ก ตรวจวัดความเข้มจุดสีโดยการสแกนรูปภาพและคำนวณค่า Euclidean distance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

พัฒนาชุดทดสอบแบบกระดาษโดยการตรึงรีโอเจนต์ไว้บนกระดาษด้วยวิธีโซล-เจล และนำไปตรวจวิเคราะห์เหล็กปริมาณต่ำในช่วง 0.10 – 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ศึกษาหลักการและระบบที่เหมาะสมที่มีความเป็นไปได้สำหรับพัฒนาชุดทดสอบบนกระดาษ จากที่ นฤชิต ไพโรจน์^[8] ได้ศึกษาไว้มีข้อจำกัดของการตรวจวิเคราะห์เชิงปริมาณของไอออนเหล็ก (II) อยู่ที่ 7.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้สามารถตรวจวัดเข้มข้นไอออนเหล็ก (II) ในช่วง 0.10 – 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อให้สามารถตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีปริมาณเหล็กน้อยๆ เช่น น้ำดื่ม ได้ ทดสอบหาสภาวะที่เหมาะสมในการวัด ไอออนเหล็ก (II) และประเมินความใช้ได้ของการทดสอบตรวจวิเคราะห์เชิงปริมาณของไอออนเหล็ก (II) ในตัวอย่างน้ำด้วยชุดทดสอบที่เตรียมขึ้นบนกระดาษกรอง

ขั้นตอนการดำเนินการมีดังต่อไปนี้

1.3.1 สืบค้นข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

1.3.2 ศึกษาหลักการ ความเป็นไปได้ในการทดลองใช้ชุดทดสอบแบบกระดาษโดยการตรึงอโเทพี แนนไทรลีนด้วยระบบโซล-เจลให้สามารถตรวจเหล็กปริมาณน้อยๆ ได้ และทดลองเบื้องต้นตามระบบที่ออกแบบ

1.3.3 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณเหล็กด้วยกระดาษทดสอบตรึงอโเทพี แนนไทรลีน

1.3.4 ประยุกต์วิธีทดสอบด้วยกระดาษตรึงอโเทพี แนนไทรลีนที่พัฒนาขึ้นสำหรับวิเคราะห์หาปริมาณเหล็กในตัวอย่างน้ำ

1.3.5 ทดสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบด้วยกระดาษตรึงอโเทพี แนนไทรลีนที่พัฒนาขึ้นมาเทียบกับวิธีมาตรฐาน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

จะได้ชุดทดสอบบนกระดาษที่ตรวจวัดไอออนเหล็ก (II) ได้ในปริมาณเหล็กที่ต่ำในช่วง 0.10 – 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และสามารถประยุกต์ใช้ตรวจวิเคราะห์ปริมาณเหล็กในอุตสาหกรรมน้ำดื่มได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

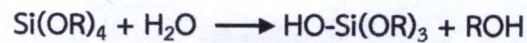
2.1 กระบวนการโซล-เจล (sol-gel process) ^[9]

คอลลอยด์ (Colloid) คืออนุภาคของสารชนิดหนึ่งที่สามารถแขวนลอยอยู่ในตัวกลาง มีขนาด 1 – 1,000 นาโนเมตร ถูกยึดโยงระหว่างอนุภาคด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์และแรงประจุบนผิวของอนุภาค พร้อมกับเคลื่อนที่ภายในตัวกลางอย่างอิสระ เรียกว่า Brownian motion ถ้าตัวกลางเป็นของเหลว เราจะเรียกตัวกลางนี้ว่า โซล (Sol) ถ้าตัวกลางเป็นก๊าซ เราจะเรียกตัวกลางนี้ว่า แอโรซอล (Aerosol) นอกจากนี้อนุภาคคอลลอยด์มีสถานะเป็นของเหลว เรียกอนุภาคคอลลอยด์นี้ว่า หมอก (fog) อนุภาคคอลลอยด์มีสถานะเป็นของแข็ง เรียกอนุภาคคอลลอยด์นี้ว่า ควัน (smoke) และอนุภาคคอลลอยด์มีสถานะเป็นของเหลวแขวนลอยอยู่ในตัวกลางที่เป็นของเหลวคนละชนิดกับอนุภาคคอลลอยด์ เรียกลักษณะการแขวนลอยนี้ว่า อิมัลชัน (emulsion) ^[10] เมื่ออนุภาคคอลลอยด์ที่มีอยู่ในตัวกลางมากจำนวนขึ้นจนเลยจุด Cloud point ซึ่งเป็นจุดที่อนุภาคคอลลอยด์เริ่มมีในตัวกลางมากเกินไป อนุภาคคอลลอยด์จะจับกันแน่นขึ้นและเชื่อมโยงระหว่างกันจนคล้ายกับสารที่มีรูพรุนในรูป เจล (gel)

กระบวนการโซล-เจลมีลักษณะเหมือนกับกระบวนการทำสารที่มีรูพรุนทั่วไป คือต้องมีตัวเริ่มต้นปฏิกิริยาเรียกว่า precursor เป็นสารที่มีโลหะหรือกึ่งโลหะเป็นแกนกลางล้อมรอบด้วยลิแกนด์ที่เป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ มักนิยมใช้สารในกลุ่มอะลูมิเนียมออกไซด์ (aluminium oxide) ล้อมรอบด้วยเกลืออนินทรีย์ (inorganic salt) เช่น อะลูมิเนียมไนเตรท ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3$) หรือสารอินทรีย์ตระกูลแอลค็อกไซด์ (alkoxide) เช่น อะลูมิเนียมบิวท็อกไซด์ ($\text{Al}(\text{OC}_4\text{H}_9)_3$) เป็นต้น ลิแกนด์ที่ล้อมรอบโลหะหรืออโลหะใน precursor ที่ใช้ในกระบวนการโซล-เจลแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ หมู่อัลคิล (alkyl group) ประกอบด้วยโมเลกุลอัลเคน (alkane) ที่โมเลกุลไฮโดรเจนหลุดไป 1 อะตอม เช่น เมทิล (methyl; $-\text{CH}_3$), เอทิล (ethyl; $-\text{C}_2\text{H}_5$) เป็นต้น มีสูตรโมเลกุลโดยทั่วไปเป็น $-\text{C}_n\text{H}_{2n+1}$ เมื่อ n คือ 1 เป็นต้นไป และ หมู่แอลค็อกซี (alkoxy group) ประกอบด้วยโมเลกุลของกลุ่มแอลกอฮอล์ที่โปรตอนหลุดไป 1 ตัว เช่น เมท็อกซี (methoxy; $-\text{OCH}_3$), เอท็อกซี (ethoxy; $-\text{OC}_2\text{H}_5$) เป็นต้น มีสูตรโมเลกุลโดยทั่วไปเป็น $-\text{OC}_n\text{H}_{2n+1}$ เมื่อ n คือ 1 เป็นต้นไป ตัวอย่างลิแกนด์ที่นิยมใช้แสดงในตารางที่ 2.1

เมทัลอัลค็อกไซด์ (metal alkoxide) เป็น precursor ในกลุ่มสารประกอบเชิงซ้อน metalorganic ซึ่งละลายน้ำได้ดีจากการมีอะตอมออกซิเจนในสารประกอบเชิงซ้อนที่สร้างพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ดีกว่าสารประกอบเชิงซ้อน Organometallic ที่มีแต่โลหะกับหมู่อัลคิล ตัวอย่างเช่น เตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต (tetraethyl orthosilicate; TEOS) มีสูตรโมเลกุล คือ $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ หลังจากที่สารกลุ่มเมทัลอัลค็อกไซด์ละลายน้ำได้ ก็จะทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis reaction) กับโมเลกุลของน้ำ ตามสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



โดยที่ R คือ โปรตอนหรือลิแกนด์ และ ROH คือ หมู่อัลกอฮอล์

เมื่อได้โมเลกุลของ precursor แล้วโมเลกุลของ precursor ก็จะทำปฏิกิริยากันเองจนเกิดเป็นสายยาวของพอลิเมอร์ และสายยาวของพอลิเมอร์เชื่อมโยงกันจนกลายเป็นสารที่มีรูพรุน เรียกปฏิกิริยาที่โมเลกุลของ precursor ที่ทำปฏิกิริยากันเองว่าปฏิกิริยาการควบแน่น (Condensation reaction) ตามสมการ



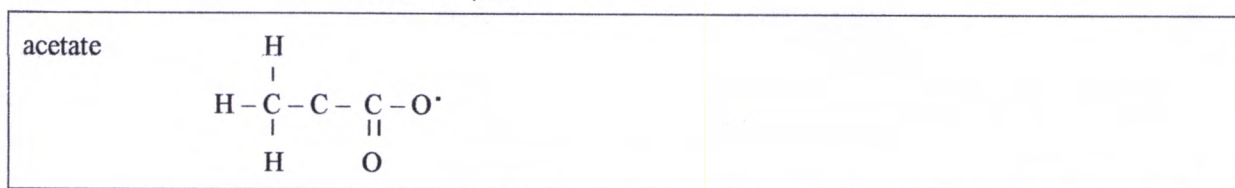
จากสมการของปฏิกิริยาควบแน่น จะเห็นว่าได้โมเลกุลน้ำเป็นผลพลอยได้ออกมาทำให้สามารถสร้าง precursor โมเลกุลใหม่ได้ตลอดเวลาจากน้ำเป็นสารตั้งต้นในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ส่งผลให้ปฏิกิริยาควบแน่นเกิดได้ต่อเนื่องจนกลายเป็นพอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เรียกปฏิกิริยานี้ว่าพอลิเมอไรเซชัน (polymerization)

ตารางที่ 2.1 แสดงลิแกนด์ที่นิยมใช้เป็น precursor ^[9]

Alkyl		Alkoxy	
methyl	$\cdot\text{CH}_3$	methoxy	$\cdot\text{OCH}_3$
ethyl	$\cdot\text{CH}_2\text{CH}_3$	ethoxy	$\cdot\text{OCH}_2\text{CH}_3$
n-propyl	$\cdot\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$	n-propoxy	$\cdot\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$
iso-propyl	$\text{H}_3\text{C}(\text{C}^\cdot)\text{HCH}_3$	iso-propoxy	$\text{H}_3\text{C}(\text{O}^\cdot)\text{CHCH}_3$
n-butyl	$\cdot\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$	n-butoxy	$\cdot\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$
sec-butyl	$\text{H}_3\text{C}(\text{C}^\cdot)\text{HCH}_2\text{CH}_3$	sec-butoxy	$\text{H}_3\text{C}(\text{O}^\cdot)\text{CHCH}_2\text{CH}_3$
iso-butyl	$\cdot\text{CH}_2\text{CH}(\text{CH}_3)_2$	iso-butoxy	$\cdot\text{OCH}_2\text{CH}(\text{CH}_3)_2$
tert-butyl	$\cdot\text{C}(\text{CH}_3)_3$	tert-butoxy	$\cdot\text{OC}(\text{CH}_3)_3$
Other			
acetylacetonate	$ \begin{array}{ccccccc} & \text{H} & & \text{H} & & \text{H} & \\ & & & & & & \\ \text{H} & - \text{C} & - \text{O} & - \text{C} & - \text{C} & - \text{C} & - \text{O} & - \text{C} & - \text{H} \\ & & & & & & & & \\ & \text{H} & & \text{O}^\cdot & \text{H} & \text{O}^\cdot & & \text{H} & \end{array} $		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

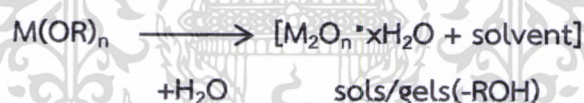
ตารางที่ 2.1 แสดงลิแกนด์ที่นิยมใช้เป็น precursor (ต่อ) ^[9]



หมายเหตุ: \cdot คือ แสดงการมีอิเล็กตรอนโดดเดี่ยวเหลือในอะตอม พร้อมสร้างพันธะ, n คือ normal chain, sec คือ secondary chain และ $tert$ คือ tertiary chain

2.1.1 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสของเมทัลอัลคอกไซด์ ^[10]

เมทัลอัลคอกไซด์ไม่สามารถทำปฏิกริยาไฮโดรไลซิสกับโมเลกุลของน้ำได้โดยตรง เนื่องจากความเป็นขั้วของเมทัลอัลคอกไซด์กับน้ำต่างกันมาก จึงต้องมีสารละลายตัวอื่นๆ ช่วยในการละลายเมทัลอัลคอกไซด์ และน้ำให้เป็นเนื้อเดียวกันพร้อมกับจับเมทัลอัลคอกไซด์และน้ำให้ใกล้พอที่จะทำปฏิกริยาได้ เรียกสารละลายนี้ว่า สารช่วยผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน (homogenizing agent) ที่นิยมใช้คือ สารที่มีออกซิเจนสามารถเกิดพันธะกับโลหะแกนกลางของเมทัลอัลคอกไซด์ และมีไฮโดรเจนสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำ ส่งผลให้สามารถประสานเมทัลอัลคอกไซด์กับน้ำให้อยู่ในวิญญูภาคเดียวกัน สามารถเขียนสมการได้ดังนี้



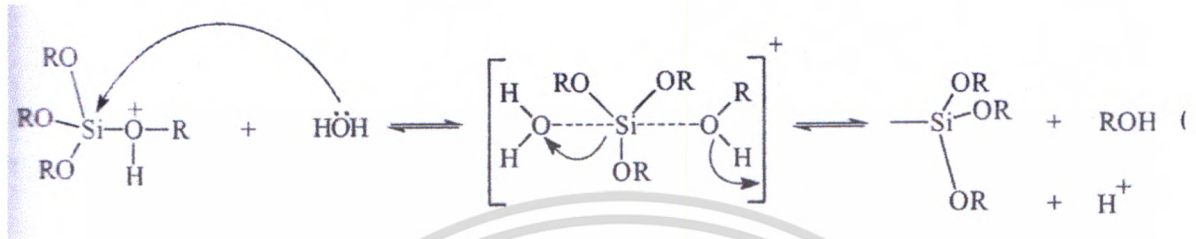
จากปฏิกริยาไฮโดรไลซิสของเมทัลอัลคอกไซด์โดยปรกติจะเกิดขึ้นช้ามาก ^[11] จึงต้องเติมตัวเร่งปฏิกริยา เนื่องจากปฏิกริยาไฮโดรไลซิสเป็นปฏิกริยาชนิดหนึ่งของกรดและเบส ดังนั้นตัวเร่งปฏิกริยาที่ใช้จึงเป็นสารที่มีฤทธิ์ที่เป็นกรดและเบส ตัวเร่งปฏิกริยาที่นิยมโดยทั่วไป คือ กรดไฮโดรคลอริก (HCl; hydrochloric acid), เกลือแอมโมเนียม (NH_4^+ ; ammonium), กรดอะซิติก (CH_3COOH ; acetic acid), โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH; potassium hydroxide) และโพแทสเซียมฟลูออไรด์ (KF; potassium fluoride) ที่ความเข้มข้น 0.01 ถึง 7 โมลาร์ แล้วแต่ pH ที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกริยาการควบแน่นของเมทัลอัลคอกไซด์ ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป 2.1.2 ถัดไป

กลไกการเกิดปฏิกริยาไฮโดรไลซิสของเมทัลอัลคอกไซด์ สามารถเกิดได้ 2 แบบ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

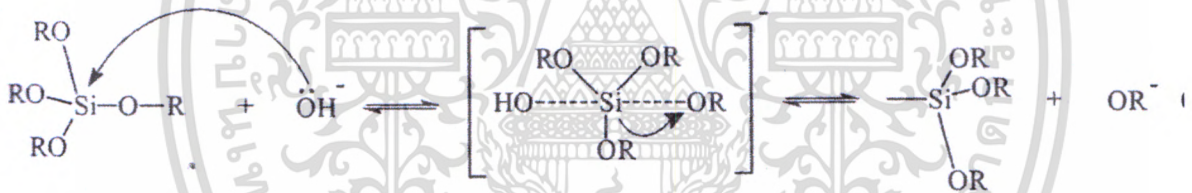
2.1.1.1 แบบใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

กรดจะเร่งน้ำให้ทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับเมทัลอัลค็อกไซด์ได้ดีกว่าใช้เบส^[11] จากการมีหมู่ RO^+H ซึ่งเป็น leaving group ที่ดี ดังสมการ



2.1.1.2 แบบใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เบสจะเร่งปฏิกิริยาการควบแน่นของเมทัลอัลค็อกไซด์ได้ดีกว่าใช้กรด^[11] โดยเบสช่วยเร่งหมู่อัลค็อกไซด์หลุดออกมาซึ่งเพิ่มความเร็วในการเชื่อมโยงโมเลกุลเมทัล อัลค็อกไซด์ดังสมการ



2.1.2 ปฏิกิริยาการควบแน่นของเมทัลอัลค็อกไซด์^[10]

เมทัลอัลค็อกไซด์ที่ผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะทำปฏิกิริยาระหว่างกันกลายเป็นพันธะสะพานอ็อกโซ (Oxo bridges) ดังสมการ



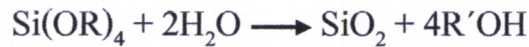
เมื่อ M คือ โลหะแกนกลาง และ R คือ หมู่อัลคิล และ > คือ สายโซ่ของโมเลกุลที่ไม่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยา

เมื่อใช้โลหะแกนกลางเป็นซิลิกอน พันธะสะพานอ็อกโซ่จึงถูกเรียกชื่อใหม่เป็น พันธะซิล็อกเซน (siloxane bond) ซึ่งพันธะซิล็อกเซนจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของลิแกนด์ใน precursor ในที่นี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

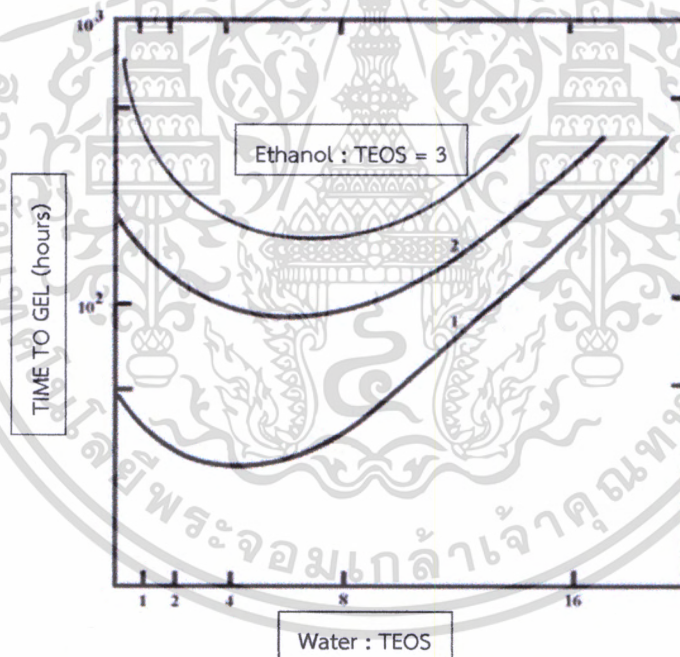
หมู่อัลค็อกไซด์ ซึ่งอัลค็อกไซด์ยังมีขนาดใหญ่เท่าไรการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสก็ยิ่งยากจากความเกาะกะของตัวลิแกนด์ที่ขัดขวางโมเลกุลน้ำมาทำปฏิกิริยาโลหะแกนกลาง

อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซิลิกอน (R) เป็นอัตราส่วนที่บ่งบอกถึงปริมาณต่อซิลิกอนอัลค็อกไซด์ที่ทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสตั้งสมการ



เมื่อ R' คือ หมู่อัลคิล จากสมการจะเห็นว่า น้ำ เมื่อเทียบกับ ซิลิกอน จะมีอัตราส่วนเป็น 2:1 เขียนเป็นสมการอัตราการทำปฏิกิริยาของปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับซิลิกอนเป็น

ค่า R ที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและปฏิกิริยาการควบแน่นที่สมบูรณ์ และไปด้วยกันได้ ในกระบวนการโซล-เจล ดังรูปที่ 2.1



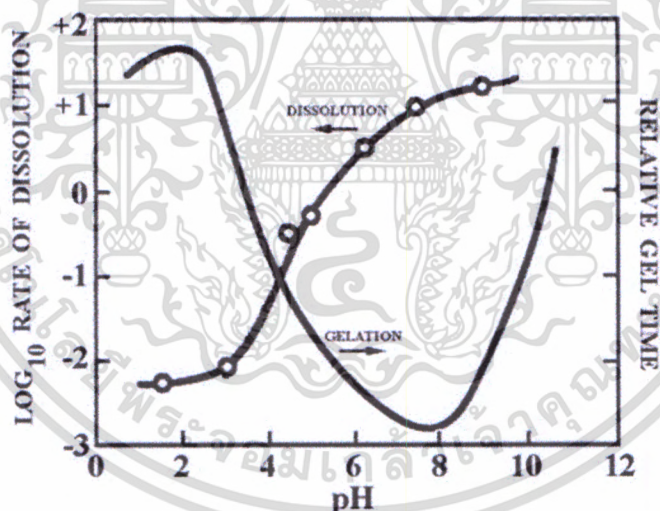
รูปที่ 2.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง เวลาในการเกิดโซล-เจล กับ อัตราส่วนน้ำต่อซิลิกอน โดยกราฟแต่ละเส้นแสดงถึงอัตราส่วนปริมาณเอทานอลต่อปริมาณ TEOS ^[11]

จากรูปที่ 2.1 เมื่อค่า R น้อยกว่า 4 ในอัตราส่วนปริมาณเอทานอลที่เป็นตัวเชื่อมวัญภาคน้ำกับเตตระเอทิลออคโทซิลิเกต (TEOS) กับปริมาณ TEOS ทุกอัตราส่วนโดย TEOS เป็นสารตัวอย่างในจำพวก ซิลิกอนอัลค็อกไซด์ เวลาการเกิดโซล-เจลจะลดลง จนเมื่อไรที่ค่า R มากกว่า 4 เวลาในการเกิดโซล-เจลก็จะเริ่มนานขึ้น ยิ่งค่า R เพิ่มจาก 4 มากขึ้นเท่าไร เวลาในการเกิดโซล-เจลก็นานขึ้น โดยที่อัตราส่วนเอทานอล ต่อ TEOS เป็น 1:1 ค่า R ที่เหมาะสมอยู่ช่วง 3-5, อัตราส่วนเอทานอล ต่อ TEOS เป็น 2:1 ค่า R ที่เหมาะสมอยู่ช่วง 4-6 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 8 และอัตราส่วนเอทานอล ต่อ TEOS เป็น 3:1 ค่า R ที่เหมาะสมอยู่ช่วง 5 - 8 โดยที่อัตราส่วนเอทานอล ต่อ TEOS เป็น 3:1 ให้ความเร็วในการเกิดโซล-เจลนานที่สุด รองลงมาเป็นอัตราส่วนเอทานอล ต่อ TEOS เป็น 2:1 และ 1:1 ตามลำดับ ส่งผลให้ปริมาณเอทานอลที่ใช้ต้องเท่ากับปริมาณของเตตระเอทิลอซิเลตและน้ำต้องมากกว่าเตตระเอทิลอซิเลต 4 เท่า

ชนิดของตัวทำละลายก็เป็นสาเหตุหนึ่งที่มีผลต่อปฏิกิริยาการควบแน่นของเมทัลอัลคอกไซด์ โดยเรื่องของความเป็นขั้วของตัวทำละลาย โมเมนต์ขั้วคู่ของตัวทำละลาย (dipolar moment) และความหนืดของตัวทำละลาย เช่น ถ้าตัวทำละลายมีขั้วจะช่วยรักษาสภาพการเป็นโซล-เจลได้ดีกว่าตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนช่วยพยุงโครงร่างตาข่ายของโซล-เจลที่เกิดขึ้นหลังทำปฏิกิริยาควบแน่น และตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วจะส่งผลต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเมทัลอัลคอกไซด์ให้เกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์

pH ของสารละลายขณะเกิดโซล-เจล ถือว่าเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อปฏิกิริยาการควบแน่นของเมทัลอัลคอกไซด์ สำหรับการใช้ซิลิกอนอัลคอกไซด์สามารถแสดงผลของ pH และการคงตัวของโซล-เจลดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ pH ของโซล-เจล ที่มีผลต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์ซิลิกอนออกไซด์ที่ไม่ละลายตัว และเวลาที่เกิดโซล-เจล^[11]

จากรูปที่ 2.2 แบ่งการผลของ pH ที่มีต่อปฏิกิริยาการควบแน่นของซิลิกอนอัลคอกไซด์ 3 ช่วง คือ pH ต่ำกว่า 2, pH 2 - 8 และ pH มากกว่า 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

pH น้อยกว่า 2 : เป็นช่วงที่เริ่มมีปฏิกิริยาการควบแน่นของซิลิกอนอัลค็อกไซด์ โดยความเร็วของปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับจำนวนโปรตรอน (H^+) ในสารละลาย ผลึกซิลิกอนออกไซด์ที่เป็นผลจากปฏิกิริยาการควบแน่นยังเป็นผลึกเล็กๆ เรียกว่า นิวคลีไอด์ ขนาดไม่เกิน 2 นาโนเมตร และสามารถคงตัวอยู่ในสารละลายได้

pH 2 – 8 : เป็นช่วงที่มีการแข่งขันของนิวคลีไอด์แต่ละผลึกที่เกิดขึ้น บางผลึกมีการเติบโตจากปฏิกิริยาการควบแน่นที่เพิ่มขึ้น บางผลึกละลายกลับไปสู่สภาพสารละลาย และบางผลึกไม่เกิดปฏิกิริยาใดๆเลย ความเร็วของปฏิกิริยาใน pH ช่วงนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ผลึกที่มีการเจริญเติบโตได้พัฒนาความยาวของพอลิเมอร์ในผลึกจากโมโนเมอร์เป็นไตรเมอร์ หรือเตตระเมอร์ แล้วแต่ผลึก ส่งผลให้ขนาดผลึกซิลิกอนออกไซด์แต่ละผลึกเริ่มไม่เท่ากัน และบริเวณผิวของผลึกจะสามารถให้สายพอลิเมอร์ของซิลิกอนออกไซด์เกิดปิดเป็นวงที่ปลายสาย ส่วนผลึกบางส่วนที่ละลายก็จะทำให้ไปลดค่าของกราฟส่วนที่ไม่เกิดการละลายของผลึกลง

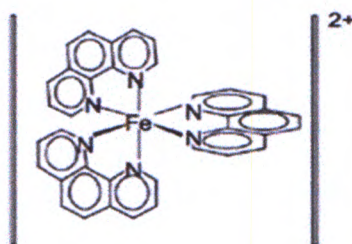
pH มากกว่า 8 : เป็นช่วงที่สายพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นในช่วง pH 2 – 8 ทำการเชื่อมโยงระหว่างสายพอลิเมอร์จนผลึกซิลิกอนออกไซด์โตขึ้นอย่างรวดเร็วจน pH เข้าใกล้ 8 ผลึกก็หยุดการเจริญเติบโต เนื่องจากสภาพความเป็นโซล-เจลได้หมดไปกลายเป็นสภาพของแข็งที่เป็นผลึกทั้งหมด ผลึกซิลิกอนออกไซด์ที่ได้มีขนาดเล็กและใหญ่ปนกันซึ่งเป็นผลมาจากช่วงเจริญเติบโตใน pH 2 – 8 ที่ผลึกเจริญเติบโตไม่พร้อมกัน

การเลือกใช้ pH = 4.5 เป็นช่วงที่กระบวนการโซล-เจลเกิดขึ้นได้โดยไม่สูญเสียผลึกซิลิกอนออกไซด์ที่ละลายกลับไปสู่สภาวะสารละลายมาก และโซล-เจลยังคงสภาพไม่กลายเป็นของแข็งจนเกินไป

ปัจจัยสุดท้ายที่มีผลต่อปฏิกิริยาการควบแน่นของเมทัลอัลค็อกไซด์ คือ อุณหภูมิระหว่างเกิดปฏิกิริยา โดยส่งผลในเรื่องอัตราส่วนของน้ำต่อซิลิกอนที่มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากซิลิกอนอัลค็อกไซด์ละลายในสารละลายดีขึ้น การแข็งตัวของผลึกซิลิกอนออกไซด์ที่เป็นผลของปฏิกิริยาจึงช้าลง [12, 13]

2.2 การเกิดสารเชิงซ้อนที่มีสีระหว่างอโทพีแนนโทรลีนกับไอออนเหล็ก (II) [14]

สารเชิงซ้อนเฟอร์รัส-ทริส-อโทพีแนนโทรลีน (Ferrous-Tris-orthophenanthroline) หรือ เฟอร์โรอิน (Ferrouin) สามารถเขียนเป็นโครงสร้างทางเคมีได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างของสารเชิงซ้อนของเฟอร์รัส-ทริส-อโทพีแนนโทรลีน [15]
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นสารเชิงซ้อนที่มีสีแดงอมส้มจากพันธะคูในออร์โทฟีแนนโทรลีนเมื่อถูกรีดิวซ์ (Reduced) และสีน้ำเงินเข้มเมื่อถูกออกซิไดส์ (Oxidized) ทำให้สามารถมองเห็นผลการทดลองได้ด้วยตาเปล่า และหาค่าแถบแม่สี คือ แดง เขียว และน้ำเงิน เมื่อมาอยู่ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถแยกแยะสีเป็นแถบแม่สีได้ ได้แก่ โปรแกรม ImageJ^[16], โปรแกรม Adobe Photoshop^[8] และ โปรแกรม Mini Fast Color Converter^[17] เป็นต้น ส่งผลให้สามารถแปลงเป็นข้อมูลผลการวิจัยไว้วิเคราะห์ผลได้ จึงมีความสำคัญในงานวิจัย

สารเชิงซ้อนเฟอร์โรอิน เกิดจากการรวมตัวของไอออนเหล็ก (II) ทำปฏิกิริยากับ ออร์โทฟีแนนโทรลีน (Orthophenanthroline) ดังสมการ



เมื่อ Ph คือ ออร์โทฟีแนนโทรลีน อัตราการเกิดสารเชิงซ้อน (K_f) อยู่ที่ 2.5×10^6 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีค่าความเสถียร (K_s) ที่ 16.4 ^[15] ซึ่งถือว่าสูงมาก แต่ค่าความเสถียรสามารถลดลงได้ถ้ามีปัจจัยอื่นรบกวน โดยสามารถดูได้จากสมการ Nernst ดังนี้

$$E = E_0 - \left\{ \frac{RT}{nF} \right\} \ln Q$$

เมื่อ R = ค่าคงที่ของแก๊ส, F = ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (Faraday's constant), Q = ผลคูณไอออน (Reaction Quotient) และ E_0 = ค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชันพื้นฐาน (Standard oxidation potential)

โดยที่ Q จากสมการเคมีการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนเฟอร์โรอินเป็น $Q = \frac{[\text{PhH}^+]^3[\text{Fe}^{2+}]}{[\text{H}^+]^3[\text{FePh}^{2+}]}$

แทนค่าได้ $E = E_0 - \left\{ \frac{RT}{nF} \right\} \ln \left\{ \frac{[\text{PhH}^+]^3[\text{Fe}^{2+}]}{[\text{H}^+]^3[\text{FePh}^{2+}]} \right\}$

$$E = E_0 - \left\{ \frac{RT}{nF} \right\} \left[\ln \left\{ \frac{[\text{PhH}^+]^3}{[\text{H}^+]^3} \right\} + \ln \left\{ \frac{[\text{Fe}^{2+}]}{[\text{FePh}^{2+}]} \right\} \right]$$

$$E = E_0 - \left\{ \frac{RT}{nF} \right\} \left[[\ln [\text{PhH}^+]^3 - \ln [\text{H}^+]^3] + \ln \left\{ \frac{[\text{Fe}^{2+}]}{[\text{FePh}^{2+}]} \right\} \right]$$

$$E = E_0 - \left\{ \frac{RT}{nF} \right\} \left[[3 \ln [\text{PhH}^+] - 3 \ln [\text{H}^+]] + \ln \left\{ \frac{[\text{Fe}^{2+}]}{[\text{FePh}^{2+}]} \right\} \right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E = E_0 - \left\{ \frac{RT}{nF} \right\} \left[3 \left[\ln [\text{PhH}^+] - 2.302 \log [\text{H}^+] \right] + \ln \left\{ \frac{[\text{Fe}^{2+}]}{[\text{FePh}^{2+}]} \right\} \right]$$

$$E = E_0 - \left\{ \frac{RT}{nF} \right\} \left[3 \left[\ln [\text{PhH}^+] + 2.302 \text{pH} \right] + \ln \left\{ \frac{[\text{Fe}^{2+}]}{[\text{FePh}^{2+}]} \right\} \right] \text{ โดย } \text{pH} = -\log [\text{H}^+] \text{ -- (1)}$$

จากสมการที่ (1) จะเห็นว่าค่า pH ปรากฏอยู่ในสมการ Nernst ซึ่งสมการ Nernst บ่งบอกถึงความยากหรือง่ายของปฏิกิริยาที่จะเกิดขึ้นในธรรมชาติ จึงส่งผลต่อความเสถียรของสารเชิงซ้อน ดังนั้น pH จึงมีผลต่อความเสถียรของสารเชิงซ้อนเฟอร์โรอิน โดยสารเชิงซ้อนนี้จะรักษาความเสถียรได้ดีที่ $\text{pH} = 2 - 9$ แต่โดยทั่วไปมักรักษาความเสถียรที่ $\text{pH} = 3.5 - 4.0$ เพื่อป้องกันเกลือบางชนิดเช่น เกลือฟอสเฟต และเกลือซัลเฟต เป็นต้น ซึ่งจะดึงไอออนเหล็ก (II) ออกจากอโทพีแนนโทรลีน แล้วมาได้สารประกอบเป็นไอร์ออน (II) ซัลเฟต (Iron (II) Sulphate) ตกเป็นตะกอนสีเขียวอมน้ำเงิน หรือ ไอร์ออน (II) ฟอสเฟต (Iron (II) Phosphate) ตกตะกอนสีเหลืองเข้มให้สารเชิงซ้อนที่เสถียรกว่า

ไอออนเหล็กโดยธรรมชาติมีทั้งไอออนเหล็ก (II) และไอออนเหล็ก (III) ปนกัน แต่วิธีวัดปริมาณเหล็กโดยตรงใช้อโทพีแนนโทรลีนในโซล-เจลวัดได้แค่ ไอออนเหล็ก (II) เท่านั้น อาจส่งผลให้วัดปริมาณเหล็กผิดพลาดได้ โดยเฉพาะวัดปริมาณเหล็กที่มีปริมาณน้อยมากๆ ในน้ำดื่ม จึงต้องรีดิวซ์ไอออนเหล็กด้วยไฮโดรควิโนน (hydroquinone) หรือไฮดรอกไซลามีนไฮโดรคลอไรด์ (hydroxylamine hydrochloride)

อโทพีแนนโทรลีนสามารถจับโลหะแกนกลางตัวอื่นๆ ได้ ดังนั้นในการเตรียมตัวอย่างไอออนเหล็ก (II) ต้องปราศจากสารโลหะแกนกลางตัวอื่นๆ และสารประกอบอื่นๆ ที่เป็น แคทไอออน (Cation) เช่น ซิลเวอร์ และ บิสมัท (III) ที่มีสีของตัวเอง แคดเมียม (II) พรอท (II) และ สังกะสี (II) สามารถจับอโทพีแนนโทรลีนเกิดเป็นสารเชิงซ้อนที่ไม่มีสี ส่งผลให้อโทพีแนนโทรลีนเหลือจับกับไอออนเหล็ก (II) น้อยลง สีของของสารเชิงซ้อนเฟอร์โรอินที่ได้มีสีอ่อนลง ทำให้การวัดแถบแม่สีด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ได้ค่าน้อยกว่าจากความเป็นจริง เป็นต้น [18, 19, 20]

2.3 ระบบสี (Color System) [21]

แสงสี คือ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่คายพลังงานออกมาในช่วงที่สายตาสังเกตเห็น สิ่งมีชีวิตแต่ละชนิดย่อมมีเซลล์ที่ตอบสนองต่อพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่างกัน มนุษย์สามารถมองเห็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ที่มีความยาวคลื่น 400 - 700 นาโนเมตร โดยการมองเห็นเกิดจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปแสงสว่างไปตกกระทบกับวัตถุ วัตถุจะดูดกลืนพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นของสีอื่นที่ไม่ตรงกับสีของวัตถุ แล้วสะท้อนความยาวคลื่นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีสีตรงกับสีของวัตถุออกไป เมื่อแสงสีผ่านเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลนส์กระจกตาให้หักเหไปตกกระทบบนเรติน่าในลูกตากลายเป็นสีที่มนุษย์เห็นกัน ทางผู้ผลิตคอมพิวเตอร์ได้นำหลักการเห็นสีของมนุษย์ในธรรมชาติมาทำให้คอมพิวเตอร์สามารถแสดงภาพบนหน้าจอเป็นสีได้ หลังจากที่มีข้อมุก่อนหน้าคอมพิวเตอร์จะมีแต่ตัวหนังสือแบบโปรแกรม dot (โปรแกรม dot คือโปรแกรมที่แสดงผลทางหน้าจอเป็นตัวอักษรสีขาวในพื้นที่สีดำ) ในช่วงพ.ศ. 2488 - 2501^[22] โดยพัฒนามาพร้อมกับการกำเนิดทรานซิสเตอร์ (Transistor) ที่ใช้กระแสไฟฟ้าได้น้อยลง ประมวลผลได้แม่นยำและหลากหลายขึ้น สามารถแบ่งหลักการการเกิดสีในระบบทางคอมพิวเตอร์แบ่งออกเป็น 4 ประเภทหลักๆ ดังนี้

2.3.1 ระบบแถบแม่สี แดง เขียว และน้ำเงิน หรือ RGB (Red-Green-Blue Color System)

ระบบแถบแม่สี RGB ที่กำเนิดมาจากแม่สีในงานศิลปะ ถือว่าเป็นระบบแถบแม่สีแรกสุดและพื้นฐานที่สุดของคอมพิวเตอร์ โดยใช้การผสมแม่สี แดง เขียว และน้ำเงิน ที่ความเข้มสีต่างๆกันในแต่ละแม่สีจนเกิดเป็นสีอื่นๆ คอมพิวเตอร์ได้แบ่งความเข้มสีของแม่สีในแต่ละแม่สีออกเป็น 256 หน่วยความเข้มสี ตั้งแต่ระดับ 0 คือ ไม่มีสี ถึงระดับ 255 ที่มีความเข้มสีของวัตถุตรงกับความเข้มสีของแม่สี เรียกระดับความเข้มสีว่า “รหัสสี” เช่น วัตถุในภาพมีสีแดงมีรหัสสีเป็น 255-0-0 วัตถุในภาพมีสีน้ำเงินมีรหัสสีเป็น 0-0-255 วัตถุในภาพมีสีม่วงมีรหัสสีเป็น 125-0-255 และวัตถุในภาพมีสีชมพูมีรหัสสีเป็น 255-0-255 เป็นต้น แม่สีจากระบบสี RGB เมื่อผสมกันได้สีทั้งหมด 16.7 ล้านสี (เกิดจากการหาตัวคูณร่วมมากของความเข้มสีทั้งหมด 3 แม่สี คือ $256 \times 256 \times 256$ รหัสสี)



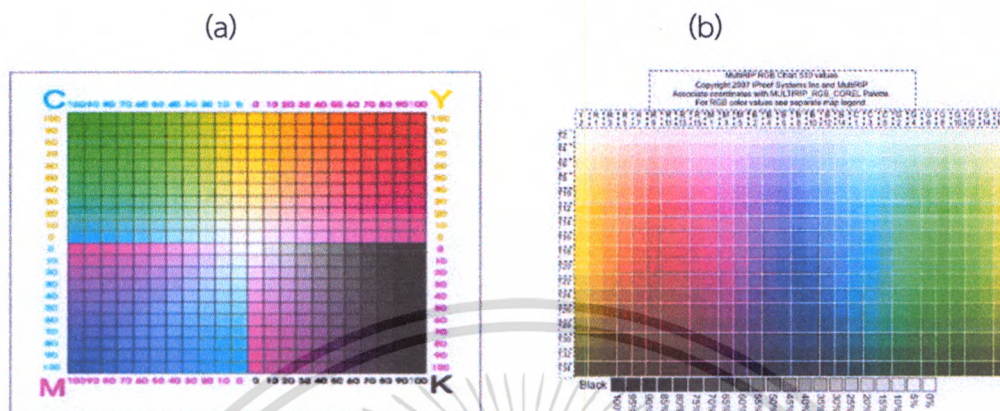
รูปที่ 2.4 ภาพแถบแม่สีของระบบ RGB^[23]

2.3.2 ระบบแถบแม่สี ฟ้า ชมพู เหลือง และดำ หรือ CMYK (Cyan-Magenta-Yellow-Black Color System)

ระบบแถบแม่สี CMYK กำเนิดจากหลักการเห็นสีของมนุษย์ในธรรมชาติ เป็นระบบที่พัฒนาขึ้นเพื่อให้ผู้ใช้คอมพิวเตอร์นำภาพลงบนกระดาษและวัสดุผิวเรียบอื่นๆ มองเห็นสีตรงกับภาพบนจอคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยใช้การผสมแม่สีเช่นเดียวกับระบบแถบแม่สี RGB แต่ใช้แม่สีถึง 4 แม่สี การผสมสีจึงได้สีหลากหลายกว่า แถบแม่สี RGB ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 (a) แสดงสีต่างๆที่เกิดจากแถบแม่สี CMYK และ (b) แสดงสีต่างๆที่เกิดจากแถบแม่สี RGB [23]

แต่สีที่ได้จะมีความเข้มสีน้อยกว่าแถบแม่สี RGB เนื่องจากใช้แม่สีที่สีอ่อนกว่า จึงนิยมใช้ระบบ แถบแม่สีนี้กับเครื่องพิมพ์เอกสาร เช่น เครื่องปริ้นท์ และเครื่องถ่ายภาพเอกสารสี เป็นต้น

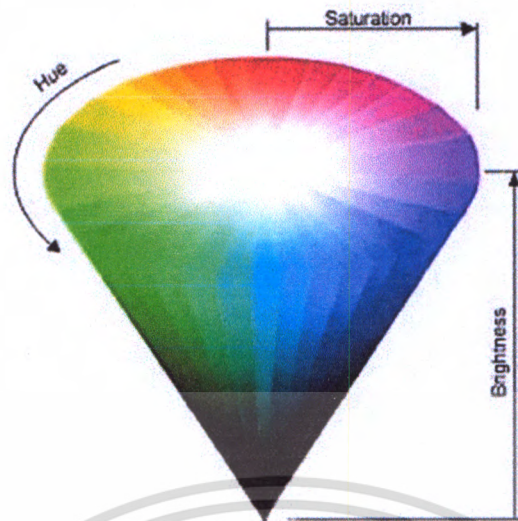
2.3.3 ระบบแถบแม่สี ตัวสี ความสดของสี และความสว่างของสี หรือ HSB (Hue-Saturation-Brightness Color System)

ระบบแถบแม่สี HSB กำเนิดเดียวกับระบบแถบแม่สี CMYK แต่มีสีเส้นทางกว้างและสูงให้ กลายเป็นระบบแถบแม่สี 3 มิติ แบ่งออกเป็น 3 ระบบย่อยดังนี้

ตัวสี (Hue) หมายถึง สีที่ตามนุษย์มองเห็นเมื่อแสงสว่างตกกระทบกับวัตถุแล้วสะท้อนกลับมาสู่นัยน์ตามนุษย์ จึงมีสีที่เหมือนสีของวัตถุจริงมาก โดยใช้วงสีที่เรียกว่า Standard Color Wheel เป็นสีมาตรฐานอ้างอิง ถ้าสีของวัตถุตรงกับสีใน Standard Color Wheel สีใด คอมพิวเตอร์ก็จะแสดงสีนั้นผ่านหน้าจอออกมา เช่น วัตถุมีสีตรงสีแดงใน Standard Color Wheel หน้าจอคอมพิวเตอร์ก็จะแสดงสีแดงของวัตถุออกมา แบ่งสีเป็น 360 สีตามองศาของวงสี Standard Color Wheel

ความสดของสี (Saturation) หมายถึง แม่สีทางด้านกว้างของวัตถุ 3 มิติ แบ่งเป็น 100 ระดับ ตั้งแต่ 0 ที่มีความสดน้อยที่สุด ถึง 100 ที่มีความสดสีมากที่สุด

ความสว่างของสี (Brightness) หมายถึง แม่สีทางด้านสูงของวัตถุ 3 มิติ แบ่งเป็น 100 ระดับเช่นกัน ตั้งแต่ 0 มีความสว่างน้อยที่สุด ถึง 100 มีความสว่างมากที่สุด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



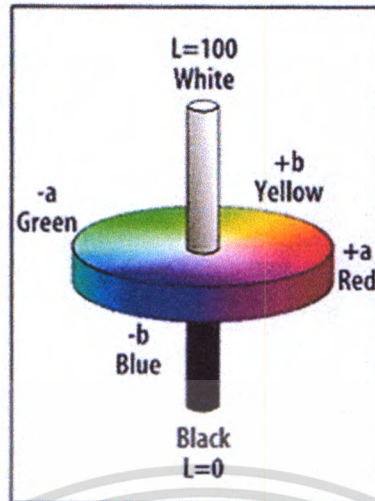
รูปที่ 2.6 แสดงแถบแม่สีของระบบ HSB [24]

จากแถบแม่สีระบบ HSB ใช้แสดงผลสีแบบ 3 มิติ จึงเหมาะกับอุปกรณ์ที่ตรวจวัดวัตถุที่ต้องการแสดงภาพที่เสมือนจริง เช่น เครื่องสแกน และเครื่องฮอโลแกรม เป็นต้น

2.3.4 ระบบแถบแม่สี Lab (Lab Color System)

ระบบแถบแม่สี Lab กำเนิดจากสถาบัน Commission Internationale d' Eclairage หรือ CIE ตั้งขึ้น เพื่อเป็นระบบแถบแม่สีมาตรฐานที่สามารถแสดงสีของวัตถุได้ทุกรูปแบบ ไม่ว่าจะ 2 มิติที่อยู่บนผิวกระดาษ หรือวัสดุผิวเรียบอื่นๆ และ 3 มิติ ก็สามารถใช้ระบบแถบแม่สีนี้แสดงผลได้ เป็นการพัฒนาระบบแถบแม่สี HSB ที่มีจำนวนสีน้อย ให้แสดงสีในภาพ 3 มิติได้หลากหลายและใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น ระบบแถบแม่สี Lab ใช้แถบแม่สี 2 สี คือ a และ b โดย a คือ แถบสีเขียวไล่ไปถึงสีแดง และ b คือ แถบสีน้ำเงินไล่ไปเหลือง ทั้ง a และ b ต่างผูกติดกับแกนกลางที่เรียกว่า Luminance ที่มีระดับความเข้ม ความชัด และความสว่างของสีที่ถูกนำมารวมโดยใช้สเกลเดียวกันตั้งแต่ 0 – 100 โดย 0 คือ สีจะมีความเข้มน้อยสุด ความชัดต่ำสุด และ ความสว่างน้อยสุด จนกลายเป็นสีดำ และ 100 คือ สีจะมีความเข้มมากที่สุด ความชัดสูงสุด และความสว่างมากที่สุด จนกลายเป็นสีขาว ดังรูปที่ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Lab model

รูปที่ 2.7 แสดงระบบแถบแม่สี Lab [24]

2.4 ที่มาของสมการ Euclidean distance [25]

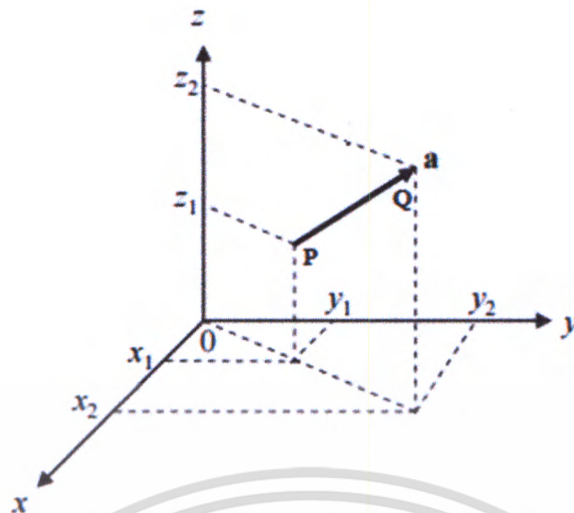
การอธิบายถึงสมการ Euclidean distance เริ่มต้นจากปริภูมิ (Space) โดย ปริภูมิ คือ ขอบเขตที่ทุกสรรพสิ่งไม่ว่าจะเป็นวัตถุ หรือเหตุการณ์อะไรก็ตามต้องอยู่ภายใต้ขอบเขตนี้ ซึ่งวัตถุ หรือเหตุการณ์ต่างมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน และมีทิศทางที่แน่นอน ปริภูมิที่คุ้นเคยจะเป็นปริภูมิ 2 มิติที่ทุกสรรพสิ่งต่างมีคู่อันดับ (x, y) เป็นตัวบอกตำแหน่งเท่านั้น แต่ปริภูมิ 3 มิติ ทุกสรรพสิ่งจะมีคู่อันดับ (x, y, z) เมื่อแกน Z คือ แกนความสูง ถ้าต้องการทราบระยะทางจากวัตถุชนิดนั้น ตำแหน่งนั้นห่างจากจุดกำเนิดที่คู่อันดับ $(0,0,0)$ ก็ต้องลากลูกศร (Vector) จากจุดกำเนิดไปถึงตำแหน่งบนวัตถุเดียวกัน แล้วหาขนาดลูกศร เรียกขนาดลูกศรบนปริภูมิ 3 มิติว่า Euclidean Norm มีสัญลักษณ์เป็น $||$ หรือ $||$



รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะของลูกศรและขนาดของลูกศร [26]

พิกัดบนปริภูมิ 3 มิติมีชื่อเรียกว่า ระบบคาร์ทีเซียนเอ็กวอยแซต (xyz Cartesian coordinate system) ซึ่งขนาดพิกัดเท่ากันทุกแกน โดยให้จุดเริ่มต้น (ไม่จำเป็นต้องเป็นจุดกำเนิด) มีพิกัด $P(x_1, y_1, z_1)$ แล้วลากลูกศรไปถึงตำแหน่งบนวัตถุที่พิกัด $Q(x_2, y_2, z_2)$ ดังรูปที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 แสดงระบบคาร์เทเซียนเอ็กวียาซซ์ในการหาสมการ Euclidean distance ^[26]

จากรูปที่ 2.9 เขียนสมการหาขนาดลูกศร a ได้

$$\|a\| = \|p - q\| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$$

โดย $x_2 - x_1 = \Delta x$, $y_2 - y_1 = \Delta y$ และ $z_2 - z_1 = \Delta z$ แทนค่าในสมการหาขนาดลูกศรได้

$$ED = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2}$$

เมื่อ ED = Euclidean distance, x = ความเข้มสีแกนสีแดง (I_R), y = ความเข้มสีแกนสีเขียว (I_G) และ z = ความเข้มสีแกนสีน้ำเงิน (I_B) นำไปแทนค่าในสมการ ED ได้

$$ED = \sqrt{(\Delta I_R)^2 + (\Delta I_G)^2 + (\Delta I_B)^2} \text{ ---- (2)}$$

ซึ่งสมการที่ (2) ใช้เป็นสมการคำนวณความเข้มสีของสารเชิงซ้อนเฟอร์โรอินในงานวิจัยนี้ เรียกสมการนี้ว่า “ความแตกต่างความเข้มแสง” (Euclidean distance RGB หรือ ED)

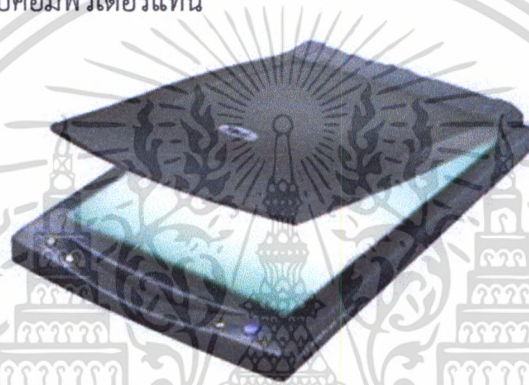
2.5 หลักการทำงานของเครื่องสแกน [27, 28, 29]

เครื่องสแกน คือ อุปกรณ์ทางดิจิทัลชนิดหนึ่งที่ใช้ต่อพ่วงกับเครื่องคอมพิวเตอร์ มีหน้าที่คัดลอกวัตถุต่างๆที่เป็น 3 มิติให้กลายเป็นรูปภาพ 2 มิติที่สามารถใช้งานในโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ได้ในแบบไฟล์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปภาพ นิยมใช้กับงานกราฟฟิกที่นำภาพไปตัดต่อ ตกแต่ง หรือนำมาเป็นส่วนประกอบของเอกสารได้โดยตรง แบ่งประเภทเครื่องสแกนได้ 5 ประเภทดังนี้

2.5.1 เครื่องสแกนแบบตั้งโต๊ะ (slide/transparency scanners หรืออีกชื่อหนึ่งว่า Flatbed scanners)

เป็นเครื่องสแกนประเภทแรกที่ทำขึ้นมา โดยอาศัยหลักการทำงานของเครื่องถ่ายภาพเอกสารที่มีกระจกเรียบวางบนหลอดไฟ backlight ที่เคลื่อนไปมาไว้วางวัตถุที่ต้องการสแกนบนกระจกเรียบ แล้วยกฝาครอบมากดทับวัตถุไว้ จึงเปรียบเสมือนเครื่องถ่ายภาพเอกสารแบบย่อบน แต่แทนที่ได้จะได้สิ่งพิมพ์บนกระดาษก็กลายเป็นภาพในรูปไฟล์ที่ใช้กับคอมพิวเตอร์แทน



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างเครื่องสแกนแบบตั้งโต๊ะ [31]

2.5.2 เครื่องสแกนแบบมีที่ป้อนเอกสาร (Sheet - fed scanners หรือ compact document scanners)

เป็นเครื่องสแกนที่พัฒนาขึ้นมาจากเครื่องสแกนแบบตั้งโต๊ะ โดยเพิ่มที่วางกระดาษขึ้นมา เพื่อให้เครื่องสแกนดึงวัตถุที่มีลักษณะคล้ายกระดาษไปทำการสแกนทันที ไม่ต้องเปิดฝาครอบแล้วสแกนทีละแผ่นแบบเครื่องสแกนแบบตั้งโต๊ะ จึงเพิ่มความเร็วในการสแกน แต่มีข้อเสีย คือ ไม่สามารถสแกนวัตถุอื่นที่ไม่ได้อยู่ในรูปกระดาษได้และความละเอียดในการสแกนน้อยกว่าแบบเครื่องมือสแกนแบบตั้งโต๊ะ เครื่องสแกนแบบนี้จึงเหมาะกับสื่อสิ่งพิมพ์ และกระดาษที่ผ่านการทดลอง เป็นต้น การเพิ่มที่วางกระดาษมีที่มาจากเครื่องถ่ายภาพเอกสารที่มีที่วางกระดาษไว้ถ่ายภาพเอกสารคราวละหลายๆโดยการกดปุ่มคำสั่งแค่ครั้งเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างเครื่องสแกนแบบมีที่ป้อนเอกสาร ^[32]

2.5.3 เครื่องสแกนแบบมือถือ (Handheld scanners)

เป็นเครื่องสแกนที่พัฒนาขึ้นมาจากเครื่องสแกนแบบตั้งโต๊ะ โดยย่อขนาดเครื่องสแกนให้เล็กลงจนสามารถพกพาเครื่องสแกนไปได้ทุกที่ตามแต่ใจปรารถนา ส่งผลให้เพิ่มความสะดวกในการสแกนมากยิ่งขึ้น ไม่ต้องพกวัตถุที่ต้องการสแกนกลับบ้าน และสามารถสแกนวัตถุที่พกกลับมาบ้านไม่ได้ เช่น หนังสือในห้องสมุดที่ห้ามยืม ภาพโปสเตอร์หายาก และลายนิ้วมือ เป็นต้น แต่มีข้อเสีย คือ ภาพหลังการสแกนมีความละเอียดต่ำมาก จึงเหมาะกับวัตถุที่มีความคมชัดของสีมากพอควร ภาพที่ได้จึงชัดเจนพอที่นำไปทำงานอื่นต่อได้



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างเครื่องสแกนแบบมือถือ

2.5.4 เครื่องสแกนฟิล์ม (Dedicated photo scanners)

เป็นเครื่องสแกนที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ให้สามารถสแกนฟิล์มเก่าๆ ให้อยู่ในรูปแบบไฟล์วิดีโอได้ เนื่องจากฟิล์มเก่าๆหลายครั้งถูกบันทึกไว้เป็นเหตุการณ์สำคัญทั้งในชีวิตและประวัติศาสตร์ที่ต่างๆแต่สภาพฟิล์มย่อมเสื่อมไปตามเวลา จึงพัฒนาเครื่องสแกนภาพฟิล์มเพื่อช่วยยืดอายุภาพสำคัญเหล่านั้นให้คงอยู่ต่อไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างเครื่องแสกนฟิล์ม^[33]

2.5.5 เครื่องสแกนความละเอียดสูง (high-end drum scanners)

เป็นเครื่องสแกนที่พัฒนาขึ้นมาจากเครื่องสแกนแบบตั้งโต๊ะให้สามารถถ่ายภาพได้คมชัดขึ้น ด้วยความละเอียดการสแกนภาพที่สูงกว่าเครื่องสแกนแบบตั้งโต๊ะมาก (มีความละเอียดในการสแกน 4,000 dpi^[30]) เนื่องจากต้องสแกนให้ได้ภาพคมชัดสูง เครื่องสแกนนี้จึงมีขนาดใหญ่โต ส่งผลให้เคลื่อนย้ายลำบาก เครื่องสแกนใช้หลอด PMT (Photo multiplier tube) ตรวจวัดภาพวัตถุที่ใช้สแกน พร้อมกับเปลี่ยนสัญญาณภาพในรูปแสงให้กลายเป็นสัญญาณไฟฟ้า เพื่อนำไปแปลงเป็นไฟล์ภาพในคอมพิวเตอร์ต่อไป พร้อมกับขยายสัญญาณไฟฟ้าเมื่อผ่าน node แต่ละ node ในหลอด PMT ส่งผลให้ภาพมีความคมชัดสูงขึ้น



รูปที่ 2.14 ตัวอย่างเครื่องแสกนความละเอียดสูง^[34]

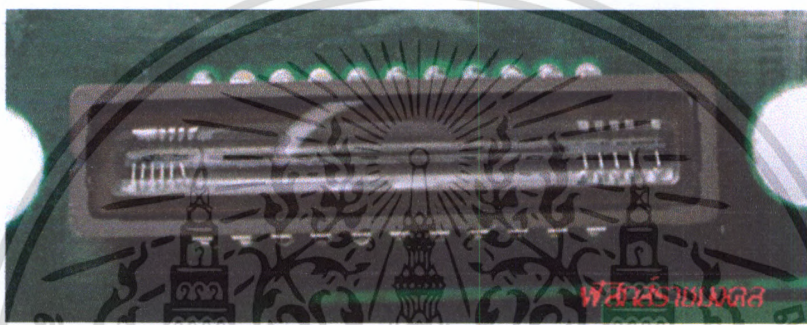
เครื่องสแกนที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือ เครื่องสแกนแบบตั้งโต๊ะ เพราะสามารถพกพาได้ มีความละเอียดในการสแกนสูงพอจนได้ภาพคมชัด สามารถสแกนได้วัตถุหลายรูปแบบทั้งกระดาษ หนังสือ ของชิ้นเล็กๆ และภาพถ่าย เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องค์ประกอบภายในเครื่องสแกนแบบตั้งโต๊ะ ภายในมี 12 องค์ประกอบ ดังนี้

- Charge - couple device array (CCD)

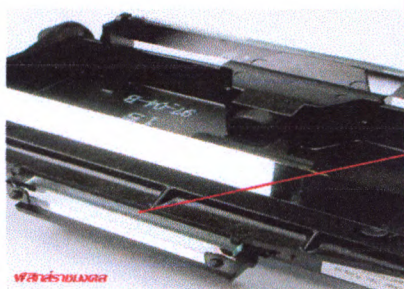
ไดโอดที่แปลงพลังงานของแสงหลังการสแกนเป็นพลังงานทางไฟฟ้า โดยพลังงานไฟฟ้าจากไดโอดจะให้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความเข้มแสงที่ตกกระทบบนตัวไดโอด แล้วถึงค่อยนำพลังงานทางไฟฟ้าไปแปลงเป็นไฟล์ภาพในคอมพิวเตอร์ต่อไป เป็นเครื่องตรวจวัด (detector) ของเครื่องสแกนแบบตั้งโต๊ะ ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ภาพของอุปกรณ์ CCD [27]

- หัวสแกน กระจก เลนส์ และ ฟิลเตอร์

หัวสแกน ประกอบด้วย กระจก เลนส์ และฟิลเตอร์อยู่ภายใน ทำหน้าที่อ่านวัตถุที่ใช้สแกน โดยนำแสงจากหลอดไฟที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงผ่านตัววัตถุที่ต้องการสแกน ก่อนลำแสงไปตกกระทบบนกระจก ซึ่งมีจำนวน 2 – 3 บานแล้วแต่ผู้ผลิต เครื่องสแกนจะออกแบบผิวกระจกโค้งเล็กน้อยเพื่อสามารถใช้งานในที่แคบๆ ได้ กระจกบานสุดท้ายจะสะท้อนลำแสงเข้าสู่เลนส์ ก่อนที่เลนส์จะหมุนไปมาเพื่อแบ่งลำแสงออกเป็น 3 ลำส่งผ่านฟิลเตอร์ 3 อันที่แต่ละอันตอบสนองต่อแสงต่างกัน โดยฟิลเตอร์อันแรกตอบสนองต่อแสงสีแดง ฟิลเตอร์อันที่สองตอบสนองต่อแสงสีเขียว และฟิลเตอร์อันสุดท้ายตอบสนองต่อแสงสีน้ำเงิน ซึ่งล้วนแต่เป็นแถบแม่สีของ RGB แล้วลำแสงที่ผ่านการตอบสนองก็จะส่งไปที่ CCD เป็นขั้นตอนต่อไป



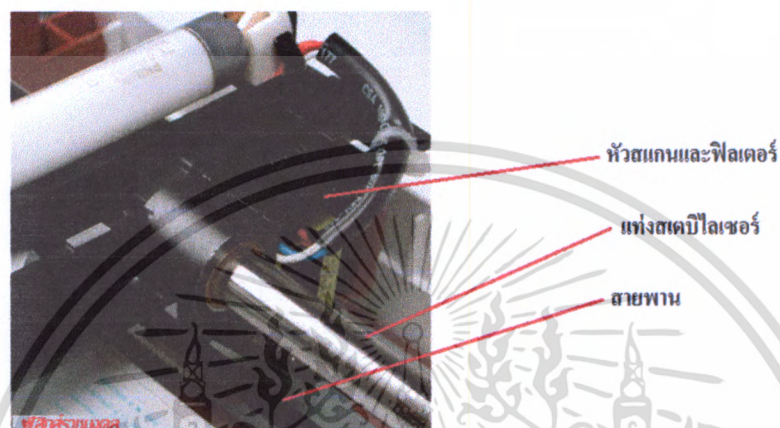
กระจก

รูปที่ 2.16 แสดงตำแหน่งกระจกบนเครื่องสแกนแบบตั้งโต๊ะ [27]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้กับโรงเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สเตปป์มอเตอร์, แท่งสเตปป์ไลเซอร์ และสายพาน

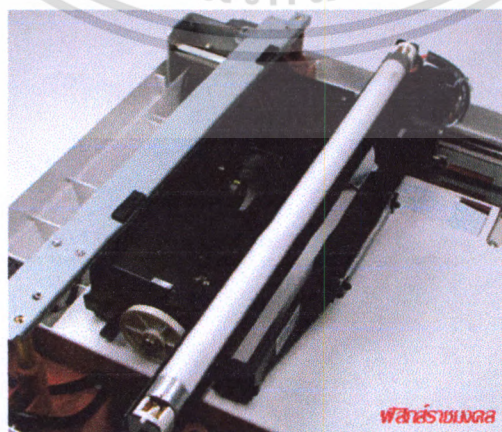
แท่งสเตปป์ไลเซอร์ ทำหน้าที่เป็นรางให้หัวสแกนเคลื่อนที่ พร้อมมีสายพานช่วยแท่งสเตปป์ไลเซอร์ยึดหัวสแกนไม่ให้เกิดการสั่นระหว่างเคลื่อนที่ ส่วนสเตปป์มอเตอร์เป็นตัวผลักดันให้หัวสแกนเคลื่อนที่ได้



รูปที่ 2.17 แสดงตำแหน่งของหัวสแกน, แท่งสเตปป์ไลเซอร์, สายพาน และฟิลเตอร์ ของเครื่องสแกนแบบตั้งโต๊ะ [27]

- หลอดไฟ

ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในการสแกน เดิมใช้หลอดไฟลูออเรสเซนต์เหมือนหลอดไฟตามบ้านแต่ต่อมาพัฒนามาใช้หลอดไฟลูออเรสเซนต์ชนิด Cold cathode หรือ หลอดไฟซีนอน ที่ให้ความสว่างมากกว่า เวลาสแกนจะได้ภาพชัดเจนมากกว่า

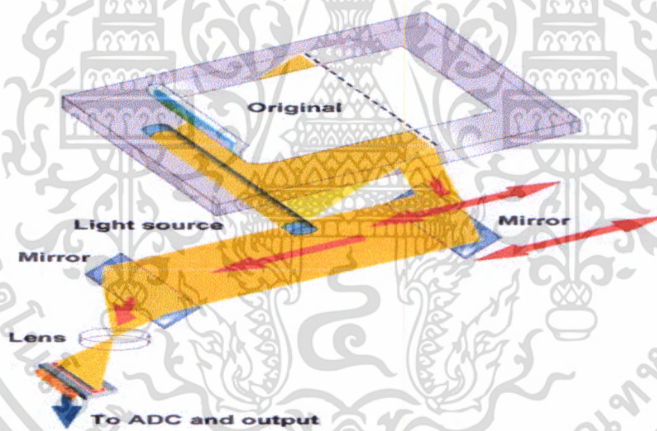


รูปที่ 2.18 แสดงตำแหน่งหลอดไฟในเครื่องสแกนแบบตั้งโต๊ะ [27]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ฝาปิดเครื่องสแกน : ฝาปิดเครื่องสแกนมักบุฟองน้ำอยู่ข้างใต้ สามารถปรับขึ้นลงและถอดได้ตามแต่วัตถุที่นำมาสแกน
- แหล่งจ่ายไฟ : เป็นแหล่งจ่ายไฟให้เครื่องสแกนทำงาน
- พอร์ตสื่อสาร และวงจรควบคุม : เป็นแผงวงจรไฟฟ้าควบคุมการทำงานของเครื่องสแกน

การทำงานของเครื่องสแกนเริ่มจากหลอดไฟที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงฉายลำแสงไปสู่วัตถุที่ต้องการสแกน ลำแสงจะทะลุผ่านกระจกที่เป็นแท่นวางไปชนกับวัตถุที่สแกนก่อนจะสะท้อนลำแสงเข้าสู่กระจกบานแรก แล้วกระจกบานแรกก็จะสะท้อนลำแสงไปสู่บานที่ 2 และบานที่ 3 ตามลำดับ ถ้ามีกระจก 3 บาน ก่อนที่กระจกบานสุดท้ายจะสะท้อนไปสู่เลนส์ แล้วเลนส์จะหมุนไปมาเพื่อแบ่งลำแสงออกเป็น 3 ลำ พร้อมทั้งหักเหลำแสงที่แบ่งไปสู่ฟิลเตอร์ในแต่ละแถบแม่สี RGB ฟิลเตอร์แต่ละอันต่างตอบสนองต่อแสงสีต่างกัน โดยอันแรกตอบสนองต่อแสงสีแดง อันที่สองตอบสนองต่อแสงสีเขียว และอันสุดท้ายตอบสนองต่อแสงสีน้ำเงิน จากนั้นลำแสงที่ผ่านฟิลเตอร์จะถูกส่งไปส่วนตรวจวัดลำแสงเป็นหลอด PMT หรือ CCD แล้วแต่ชนิดเครื่องต่อไป ภาพการทำงานของเครื่องสแกนแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แสดงการทำงานของเครื่องสแกน ^[28]

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นฤชิต ไพโรจน์ ^[8] ศึกษาการวิเคราะห์เชิงปริมาณของไอออนเหล็ก (II) ด้วยชุดทดสอบแบบจุดโดยใช้โซล-เจลเจือออปโทไฟแนนโทรลีน สามารถเตรียมได้จากการหยดสารละลายโซล-เจลเจือด้วยออปโทไฟแนนโทรลีน 10.00 ไมโครลิตรลงบนกระดาษกรอง แล้วนำตัวอย่างกระดาษกรองมาเติมด้วยสารละลายไฮดรอกซีลามีนไฮโดรคลอไรด์ 10.00 ไมโครลิตร ณ บริเวณจุดทดสอบ จะเกิดสารเชิงซ้อนสีแดงอมส้มในรูปเฟอร์โรอิน จากนั้นตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงด้วยเครื่องสแกนได้ภาพสแกนในรูปไฟล์ภาพไปตรวจวัดค่ารหัสสี RGB ด้วยโปรแกรม ImageJ ก่อนนำวิเคราะห์ค่า ED ต่อด้วยสมการ Euclidean distance ใน microsoft excel จากนั้นนำค่า ED มาสร้างสมการเชิงเส้นกับความเข้มข้นไอออนเหล็ก (II) ในช่วง 10.00 – 100.00 มิลลิกรัมต่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้ณาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลิตร ได้เป็น $y = 0.00139x + 0.02860$ ($r^2 = 0.9971$) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) อยู่ที่ 0.48 – 1.65 เปอร์เซ็นต์ ก่อนนำมาตรวจหาธาตุเหล็กในตัวอย่างเม็ดยา แล้วเปรียบเทียบความแม่นยำกับวิธีมาตรฐานอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโทรโฟโตเมทรีโดยใช้ t-test พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

I. Durukan, Ç.A. Şahin, N. Şatiroğlu และ S. Bektaş^[3] ศึกษาการวิเคราะห์เชิงปริมาณของเหล็กและทองแดงในตัวอย่างอาหารเช่น ผัก ถั่วเฮลเซล และขนมปัง ด้วยวิธีอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโทรโฟโตเมทรี สามารถเตรียมได้จากสารเชิงซ้อนของเหล็กและทองแดงกับ Eriochrome Cyanine R โดยใช้ Triton[®] X-114 มาสกัดด้วยวิธี Cloud point extraction ก่อนนำไปวัดด้วยวิธีอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโทรโฟโตเมทรี เพื่อหาผลกระทบของอัตราการป้อนตัวอย่างอาหาร ความกว้างของคอลัมน์ ชนิดของวัสดุที่ใช้ Triton[®] X-114 ยึดเหนี่ยว (packing material) และอัตราการไหลของตัวกลางที่ใช้สารเชิงซ้อนของเหล็กและทองแดง พร้อมทั้งหาข้อดีและข้อเสียของวิธีนี้ ค่า LOD ของการวัดปริมาณเหล็กต่อค่า LOD ของการวัดปริมาณทองแดงด้วยวิธีอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโทรโฟโตเมทรีอยู่ที่ 0.33:0.57 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตรตามลำดับ ส่วน LOQ อยู่ที่ 1.1:1.9 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตรตามลำดับ กราฟมาตรฐานของเหล็กและทองแดงเมื่อวัดด้วยวิธีอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโทรโฟโตเมทรีตรงความเป็นเส้นตรงอยู่ที่ 1.5 ถึง 25.0 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร และ 1.0 ถึง 35.0 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตรตามลำดับ ใช้ใบไม้ NCS DC 73349 และน้ำ TM-23.2 เป็นสารมาตรฐานอ้างอิง

F. Ayadin และ M. Soylak^[6] ศึกษาการวิเคราะห์เชิงปริมาณของไอออนเหล็ก (II) ไอออนทอร์เรียม (IV) ไอออนไททาเนียม (IV) ตะกั่ว (II) และโครเมียม (III) ด้วยการสกัดด้วย 2-nitroso-1-naphthol ที่เคลือบอยู่บนเรซิน MCI GEL CHP20P ภายใต้วิธีสกัดด้วยของแข็ง (solid phase extraction) ก่อนนำมาตรวจวัดด้วยวิธี ICP-MS เพื่อหาผลกระทบของ pH ของสารละลาย 2-nitroso-1-naphthol ที่ใช้สกัด อัตราการป้อนตัวอย่างไอออน ประสิทธิภาพของตัวชะตัวอย่างไอออน และปริมาณของตัวอย่างไอออนที่ใช้ในรูปของเปอร์เซ็นต์ recovery และรายงานผลกระทบของไอออนอัลคาไล และอัลคาไล เอิร์ทใน matrix ใช้โคลน BCR-144R เป็น matrix ควบคุมอ้างอิง ผงหินปูน BCR-144R แป้งข้าวเจ้า NIST 1568a และตับวัว NIST 1577b เป็นสารมาตรฐานอ้างอิง ตัวอย่างไอออนใช้น้ำที่อยู่ภายในประเทศตุรกี

V.S. Anusuya Devi และ V. Krishna Reddy^[5] ศึกษาการวิเคราะห์เชิงปริมาณของเหล็กและโคบอลต์ ด้วยวิธีเทคนิคทางสเปกโทรโฟโตเมทรีแบบ batch และต่อเนื่อง สามารถเตรียมได้จากไอออนเหล็ก (II) ทำปฏิกิริยาเกิดสารเชิงซ้อนสีน้ำตาลอมแดง และไอออนโคบอลต์ (II) ทำปฏิกิริยาเกิดสารเชิงซ้อนสีเหลืองกับ 2-hydroxy-1-naphthaldehyde-p-hydroxybenzoic hydrazine (HNAHBH) แล้วนำไปวัดด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 405 นาโนเมตรสำหรับไอออนเหล็ก (II) และ 425 นาโนเมตรสำหรับไอออนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โคบอลต์ (II) พบว่า ตรวจวัดปริมาณสารเชิงซ้อนไอออนเหล็ก (II) ที่ช่วงความเข้มข้น 0.005 ถึง 1.373 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร LOD อยู่ที่ 0.095 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร Molar absorptivity (ϵ) อยู่ที่ $5.6 \times 10^4 \text{ L mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ และตรวจวัดปริมาณสารเชิงซ้อนไอออนโคบอลต์ (II) ช่วงความเข้มข้น 0.118 ถึง 3.534 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร LOD อยู่ที่ 0.04 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร Molar absorptivity (ϵ) อยู่ที่ $2.3 \times 10^4 \text{ L mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งถือว่ามีประสิทธิภาพในการตรวจจับที่ดีและมีความจำเพาะเจาะจงในการเลือก

P. Nowak และคณะ^[7] ศึกษาการวิเคราะห์เชิงคุณภาพของไอออนเหล็กอิสระ และไอออนเหล็กที่อยู่ในรูป transferrin และ lactoferrin ให้แยกออกจากกันได้ด้วยวิธีอิเล็กโตรโฟรีซิสได้มีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับอัลบูมินในเลือดของมนุษย์ เตรียมตัวอย่างไอออนเหล็กที่มีทั้งอิสระ ไอออนเหล็กที่อยู่ในรูป transferrin และไอออนเหล็กที่อยู่ในรูป lactoferrin ปนกันในรูปแบบ internal standard แล้วนำไปแยกในหลอด fused silica และหลอด capillary ด้วยคุณสมบัติของ migration time ที่ต่างกันของไอออนแต่ละตัว ว่าหลอดแบบใดมีประสิทธิภาพการแยกดีกว่ากัน ผลปรากฏว่าการแยกไอออนเหล็กอิสระ และไอออนเหล็กที่อยู่ในรูป transferrin และ lactoferrin แยกด้วยวิธีอิเล็กโตรโฟรีซิสได้มีประสิทธิภาพ และหลอด fused silica แยกได้ชัดเจนกว่าหลอด capillary

Y-N. Huang, D-X. Yuan, M-H. Dai และ Y-X. Liu^[5] ศึกษาการวิเคราะห์เชิงปริมาณของเหล็กในน้ำทะเลด้วยวิธี Reverse FIA โดยใช้ Catalytic Spectrophotometry ในการตรวจวัดปริมาณ โดยทำการดูดตัวอย่างน้ำทะเลหรือสารละลายมาตรฐานเข้าสู่ mixing coil จากนั้นฉีด *N,N*-dimethyl-*p*-phenylenediamine dihydrochloride (DPD) เข้าไปผสมกับตัวอย่างน้ำทะเล หรือ สารละลายมาตรฐานที่อยู่ใน mixing coil แล้วไหลไปผสมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เพื่อออกซิไดส์ DPD ให้อยู่ในรูปสารเชิงซ้อนสีชมพู เซมิควินอน (semiquinone) แล้วตรวจวัดด้วย Catalytic Spectrophotometry ที่ความยาวคลื่น 514 นาโนเมตร พบว่าค่า LOD ของเหล็กในน้ำทะเลวัดได้ 0.4 นาโนโมลต่อลิตร วัดได้ต่ำกว่าวิธีอินอร์มัลโฟลอินเจกชันเคยทำเอาไว้ สามารถวัดตัวอย่างน้ำทะเลได้ 10 ตัวอย่างต่อ 1 ชั่วโมง มากกว่าวิธีอินอร์มัลโฟลอินเจกชันเคยทำเอาไว้ที่ 4 ตัวอย่างต่อ 1 ชั่วโมง สารมาตรฐานที่ใช้เป็นสารละลายที่จำลองสภาวะให้เสมือนจริงเรียกว่า certificate material ในงานวิจัยนี้ใช้น้ำทะเล CASS-4 ความเข้มข้น 12.33 ± 0.18 นาโนโมลต่อลิตร และน้ำทะเล NASS-5 ความเข้มข้น 3.47 ± 0.23 นาโนโมลต่อลิตร สามารถวัดปริมาณเหล็กในน้ำทะเลได้แม่นยำที่ 2.97 นาโนโมลต่อลิตร โดยวัดซ้ำ 8 ครั้ง สิ่งที่รบกวนการวัดปริมาณเหล็กในน้ำเกลือ คือ ทองแดง และเกลือที่เจือปนในน้ำทะเล ส่งผลให้วิธี reverse FIA ที่เสนอขึ้นใหม่ดีกว่าวิธีอินอร์มัลโฟลอินเจกชันในการวัดปริมาณเหล็กในน้ำทะเลที่ใช้อยู่ปัจจุบันในเรื่องประหยัดตัวอย่างน้ำทะเล เพิ่มความเร็วในการวัด และท่อที่ลำเลียงสารเข้าและออกมีหลายทาง ลดความสกปรกที่เกิดในท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

B. Peng, Y-P. Shen, Z-T. Gao, M. Zhou และ Y-J. Ma^[4] ศึกษาการวิเคราะห์เชิงปริมาณของเหล็กในน้ำและอาหารที่มีปริมาณน้อยระดับไมโครด้วยวิธีสเปกโทรเมทรีจึงต้องมีวิธีขจัดสิ่งรบกวนในการวัดก่อนด้วยวิธีดิสเพอร์ซิฟลิกควิก-ลิกควิก ไมโครเอ็กแทกชัน (DLLME) โดยนำไอออนเหล็ก (II) ไปทำปฏิกิริยาเกิดสารเชิงซ้อนกับ 2-(5-bromo-2-pyridylazo)-5-(diethyl amino) phenol หรือ (5-Br-PADAP) และเปลี่ยนไอออนเหล็ก (III) ให้กลายเป็นไอออนเหล็ก (II) ทั้งหมดด้วยกรดแอสคอบิก (ascorbic acid) ปัจจัยที่มีผลต่อการใช่วิธี DLLME ในการสกัดปริมาณเหล็กจากน้ำและอาหารอยู่ที่ pH ความเข้มข้นของสารเชิงซ้อน อัตราส่วนปริมาตรของการกระจายตัวของตัวทำละลาย และปริมาตรการสกัดของตัวทำละลาย เมื่อหาสภาวะที่เหมาะสมตามปัจจัยที่มีผลกระทบในการใช้ DLLME ได้แล้ว จึงทำการวัดค่าดูดกลืนแสงหาปริมาณเหล็กในน้ำและอาหาร ได้กราฟมาตรฐานของสารละลายเหล็กความเข้มข้น 5 – 400 ไมโครกรัมต่อลิตร ได้ค่า R เป็น 0.9993 มีค่า LOD ที่ 1.5 ไมโครกรัมต่อลิตร และ LOQ ที่ 5.2 ไมโครกรัมต่อลิตร %RSD ของตัวอย่างอยู่ที่ 1.37 – 4.42 % ทำซ้ำ 3 ครั้ง มีเปอร์เซ็นต์ recovery ที่ 95.4–103.2% สำหรับตัวอย่างเหล็กในน้ำ 96.9–103.6% สำหรับเหล็กในอาหาร และ 98.8–102.3% สำหรับสารละลายเหล็กมาตรฐาน ซึ่งวิธีดิสเพอร์ซิฟลิกควิก-ลิกควิก ไมโครเอ็กแทกชันช่วยให้การหาเหล็กปริมาณน้อยๆ ในตัวกลางที่มีสิ่งเจือปนสูงได้ดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์

3.1.1 สารเคมี

1. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid; A.R. grade – Carlo Erba Codice Daccisa)
2. กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid; A.R. grade – Carlo Erba Codice Daccisa)
3. โซเดียมซิเตรต (Sodium citrate; A.R. grade – Carlo Erba Codice Daccisa)
4. เตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต (Tetraethyl Orthosilicate; A.R. grade – Aldrich Chemistry)
5. ไตรตัน เอ็กซ์ 100 (Triton[®] X-100; A.R. grade – Aldrich Chemistry)
6. น้ำปราศจากไอออน (Deionized water – Milli Q)
7. ออโทฟีแนนโทรลีนโมโนไฮเดรต (Orthophenanthroline monohydrate; A.R. grade – Carlo Erba Codice Daccisa)
8. เอทานอลปราศจากน้ำ (Absolute ethanol; A.R. grade – Carlo Erba Codice Daccisa)
9. แอมโมเนียมเฟอร์รัสซัลเฟตเฮกซะไฮเดรต (Ammonium ferrous sulfate hexahydrate; A.R. grade – UCARE Pharma solution)
10. ไฮดรอกซีลามีนไฮโดรคลอไรด์ (Hydroxylamine hydrochloride; A.R. grade – Carlo Erba Codice Daccisa)

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible spectrophotometer: Shimadzu UV-160)
2. เครื่องพีเอชมิเตอร์ (pH meter: Model type 827, Metrohm)
3. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง (Analysis balance: Mode type ED244S, Sartorius)
4. เครื่องสแกนแบบตั้งโต๊ะ (Flatbed Scanner: Canon LiDE 210)
5. กระดาษกรอง (Filter paper: Advantec No.2)
6. เครื่องกวนแม่เหล็กพร้อมแท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสาร (Magnetic stirrer and Magnetic bar: Model type MS3, Bosstech)
7. เครื่องแก้ว (Glassware laboratory)
8. คีมสำหรับหนีบแผ่นกระดาษกรอง (Forceps)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. ไมโครพอร์ (Micropore syringe: Model type MPSA0001301*5, Swinnex)
10. ถาดหลุมพร้อมฝาปิด (Hole tray) จำนวน 24 หลุมต่อถาด
11. ไมโครปิเปตขนาด 10.00 ไมโครลิตร (Micropipette 10.00 μ l: Model type F3, Thermo scientific)
12. ไมโครปิเปตขนาด 20.00 – 200.00 ไมโครลิตร (Micropipette 20.00 – 200.00 μ l: Model type AO-200, Ohaus corporation)
13. ไมโครปิเปตขนาด 1,000.00 ไมโครลิตร (Micropipette 1,000.00 μ l: Rainin)
14. ที่จับบิวเรต (Buretts clamp)
15. เซลล์ควอทซ์ (Quartz cell: Model type Essex IG6 3UT, Starna scientific)
16. กระบอกฉีดยาพลาสติก (Syringe) ขนาด 10 มิลลิลิตร
17. กาว (Glue)

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2.1 ศึกษาการหาปริมาณไอออนเหล็ก (II) ที่ต่ำกว่า 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยวิธีนิตสารละลายไหลผ่านและวิธีแซนสารละลาย

3.2.1.1 การเตรียมสารละลายที่ใช้ในหัวข้อ 3.2.1

3.2.1.2 การเตรียมสารละลายโซล-เจลเจือด้วยอโทพีแนโนโทรลีน

3.2.1.3 การทดสอบหาปริมาณเหล็กด้วยวิธีนิตสารละลายไหลผ่าน

3.2.1.4 การทดสอบหาปริมาณเหล็กด้วยการแซนแผ่นกระดาษทดสอบในสารละลาย

3.2.1.5 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารเชิงซ้อน

3.2.2 ศึกษาผลของความสว่างที่ใช้สแกนที่มีต่อสีของสารเชิงซ้อน

3.2.2.1 การเตรียมสารละลายที่ใช้ในหัวข้อ 3.2.2

3.2.2.2 การทดสอบหาผลของความสว่างที่ใช้สแกนเมื่อทดลองด้วยวิธีแซนแผ่นกระดาษทดสอบในสารละลาย

3.2.3 ศึกษาผลของความสะอาดอุปกรณ์ที่ใช้พับแผ่นกระดาษทดสอบให้แห้งที่มีต่อจุดสีของสารเชิงซ้อน

3.2.4 ศึกษาผลของปริมาตรของสารละลายไอออนเหล็ก (II) ที่ใช้แซนแผ่นกระดาษทดสอบ

3.2.4.1 การทดสอบหาผลกระทบบริมาตรของสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) 0.20 มิลลิกรัมต่อลิตรที่มีต่อความเข้มข้นของสารเชิงซ้อน ด้วยปริมาตรที่ใช้ในการแซน 100.00 ไมโครลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4.2 การทดสอบหาผลกระทบปริมาณของสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) ในความเข้มข้นมากกว่า 0.20 มิลลิกรัมต่อลิตรที่มีต่อความเข้มข้นของสารเชิงซ้อน ด้วยปริมาตรที่ใช้ในการแช่ 100.00 ไมโครลิตร

3.2.5 ศึกษาผลของเวลาที่ใช้แช่แผ่นกระดาษทดสอบ

3.2.5.1 การทดสอบหาผลกระทบเวลาที่ใช้แช่แผ่นกระดาษทดสอบในสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) ความเข้มข้น 0.20, 0.50 และ 1.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยเวลาการแช่แผ่นกระดาษทดสอบ 1 นาที

3.2.5.2 การทดสอบหาผลกระทบเวลาที่ใช้แช่แผ่นกระดาษทดสอบในสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) ความเข้มข้น 0.20, 0.50 และ 1.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยเวลาการแช่แผ่นกระดาษทดสอบ 5, 10, 15, 20 และ 30 นาที

3.2.6 การวิเคราะห์ตัวอย่างเปรียบเทียบผลกับวิธีมาตรฐาน

3.2.6.1 การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำด้วยวิธีแช่แผ่นกระดาษทดสอบ

3.2.6.2 การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำด้วยวิธีสเปกโทรโฟโตเมตรี

3.2.6.3 การหาเปอร์เซ็นต์ recovery ของวิธีแช่แผ่นกระดาษทดสอบ

3.2.7 การหาค่า LOD และ LOQ ของวิธีแช่แผ่นกระดาษทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วิธีดำเนินการทดลอง

3.3.1 ศึกษาการหาปริมาณไอออนเหล็ก (II) ที่ต่ำกว่า 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยวิธีฉีดสารละลายไหลผ่านและวิธีแคปซูลในสารละลาย

3.3.1.1 การเตรียมสารละลายที่ใช้ในหัวข้อ 3.3.1

1) สารละลายโซเดียมซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 25.0 %w/v

ชั่งโซเดียมซัลเฟต 25.0 กรัม ด้วยเครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 50 มิลลิลิตร ภายในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วเทใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจนถึงขีดบอกปริมาตร เขย่าให้เข้ากัน

2) สารละลายไฮดรอกซีลามีโนไฮโดรคลอไรด์

ชั่งไฮดรอกซีลามีโนไฮโดรคลอไรด์ 10.0 กรัม ด้วยเครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 100 มิลลิลิตร ภายในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตรที่วางอยู่บนเครื่องกวนแม่เหล็ก แล้วหย่อนแท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสารลงไป ปรับ pH ของสารละลายโดยค่อยๆ หยดสารละลายโซเดียมซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 25.0 %w/v ลงไปที่ละหยดจนได้ pH = 4.5 ก่อนนำสารละลายไปเก็บในขวดสีชาขนาด 250 มิลลิลิตร

3) สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.10 M

ตวงน้ำปราศจากไอออน 200 มิลลิลิตรด้วยกระบอกตวง ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร ก่อนตวงกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 4.10 มิลลิลิตรด้วยกระบอกตวง เทใส่ลงในขวดวัดปริมาตรที่เตรียมใส่น้ำไว้ แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนให้ถึงขีดวัดปริมาตร เขย่าให้เข้ากัน (ทำในตู้ควัน)

4) สารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) เข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (Stock Solution)

ชั่งแอมโมเนียมเพอร์สัลเฟตเฮกซะไฮเดรต 0.7021 กรัม ด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 25 มิลลิลิตร ภายในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วตวงสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้นปริมาตร 1.00 มิลลิลิตรด้วยกระบอกตวง เทใส่ผสมลงในบีกเกอร์ที่มีสารละลายไอออนเหล็ก (II) คนให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นเทใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจนถึงขีดบอกปริมาตร เขย่าให้เข้ากัน (ทำในตู้ควัน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) สารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) (Working solution)

ปิเปตสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) ที่เป็น Stock solution ปริมาตร 100.0 และ 200.0 ไมโครลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตรแต่ละใบ เติมสารละลายไฮดรอกซีลามีโนไฮโดรคลอไรด์ ปริมาตร 1.00 มิลลิลิตร ใส่ตามลงไป ในขวดวัดปริมาตรแต่ละใบจนครบทุกขวด แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนให้ถึงขีดบอกปริมาตร เขย่าให้เข้ากัน จะได้สารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) (Working solution) ความเข้มข้น 1.0 และ 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

3.3.1.2 การเตรียมสารละลายโซล-เจลเจือด้วยอโทพีแนนโทรลีน^[8]

1. ชั่งอโทพีแนนโทรลีนโมโนไฮเดรต 0.0100 กรัม ด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งใส่ลงในบีกเกอร์พลาสติกขนาด 10 มิลลิลิตร
2. ปิเปตเอทานอลปราศจากน้ำปริมาตร 2.0 มิลลิลิตรใส่ตามลงไปลงในบีกเกอร์ที่มีอโทพีแนนโทรลีนโมโนไฮเดรต เพื่อละลายอโทพีแนนโทรลีนโมโนไฮเดรตให้เป็นสารละลาย
3. ปิเปตสารละลายเตตระอโทซิลิกเกต 2.0 มิลลิลิตร และ สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.10 โมลาร์ 1.0 มิลลิลิตรใส่ลงในบีกเกอร์ใบเดิม
4. หยอนแท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสารลงไป นำไปวางบนเครื่องกวนแม่เหล็ก
5. นำที่จับบิวเรตมาจับบีกเกอร์ที่วางบนเครื่องกวนแม่เหล็ก
6. หยดไตรตัน เอ็กซ์ 100 จำนวน 7 หยดลงในบีกเกอร์ที่วางบนเครื่องกวนแม่เหล็ก ทำการปั่นกวนสารละลายเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะได้สารละลายโซล-เจลเจือด้วยอโทพีแนนโทรลีนเข้มข้นร้อยละ 0.20 %w/v

3.3.1.3 การทดสอบหาปริมาณเหล็กด้วยวิธีฉีดสารละลายไหลผ่าน

1. ปิเปตสารละลายโซล-เจลเจือด้วยอโทพีแนนโทรลีนเข้มข้นร้อยละ 0.20 %w/v ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร หยดลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 จำนวน 3 หยด
2. ทิ้งไว้ให้แห้งเป็นเวลาประมาณ 30 นาที ก่อนนำมาตัดตามรอยขอบเขตโซล-เจลที่แห้ง
3. ใส่แผ่นกระดาษทดสอบที่ตัดเป็นรูปร่างกลมแล้ว 1 แผ่น วางบนตะแกรงของอุปกรณ์สำหรับกรองสารละลาย (micropore) แล้วปิดฝาให้เรียบร้อย
4. เตรียมสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) ความเข้มข้น 2.00 มิลลิกรัมต่อลิตรในขวดวัดปริมาตร ถ่ายใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตรจนเต็ม นำกระบอกฉีดยาขนาด 10 มิลลิลิตรดูดสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาตรฐานไอออนเหล็ก (II) แล้วฉีดสารละลายให้ไหลผ่านอุปกรณ์ micropore อย่างช้าๆ เป็นจังหวะสม่ำเสมอ ครั้งละ 10 มิลลิลิตร

5. ทิ้งให้สารละลายที่ไหลออกจากปลายอุปกรณ์ micropore เป็นเวลา 2 นาที แล้วเปิดฝาดอกมา

6. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 4 และขั้นตอนที่ 5 จนครบปริมาตรสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) ที่เตรียมไว้ 50 มิลลิลิตร

7. นำคีมหนีบแผ่นกระดาษทดสอบออกมาผึ่งให้แห้งบนฝาของภาดหลุม

8. นำแผ่นกระดาษทดสอบอีก 2 แผ่นมาทำซ้ำในขั้นตอนที่ 1 ถึง 6

9. นำแผ่นกระดาษทดสอบที่ผ่านการทดลองในขั้นตอนที่ 1 ถึง 7 ที่ได้ติดลงบนแผ่นกระดาษกรองเบอร์ 2 อีกแผ่นด้วยกาว ก่อนนำไปสแกนด้วยเครื่องสแกนแบบตั้งโต๊ะ

3.3.1.4 การทดสอบหาปริมาณเหล็กด้วยการแช่แผ่นกระดาษทดสอบในสารละลาย

1. นำกระดาษกรองเบอร์ 2 ที่ผ่านการหยดสารละลายโซล-เจลเจือด้วยออปติฟ้านบนโพลีเมอร์ในหัวข้อที่ 3.3.1.3 มาตัดตามรอยขอบเขตโซล-เจลที่แห้งจำนวน 3 แผ่น แล้วนำไปวางในหลุมของภาดหลุม

2. เปิดสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) เข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 ไมโครลิตรใส่ลงในหลุมที่มีแผ่นกระดาษทดสอบ แล้วปล่อยให้แห้ง 1 นาที

3. นำคีมหนีบแผ่นกระดาษทดสอบขึ้นมาทิ้งไว้ให้แห้งบนฝาของภาดหลุม (ประมาณ 5 นาที)

4. นำแผ่นกระดาษทดสอบติดลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 อีกแผ่นด้วยกาว จากนั้นนำไปสแกนด้วยเครื่องสแกนแบบตั้งโต๊ะ

3.3.1.5 การวิเคราะห์ความเข้มสีของสารเชิงซ้อน

1. คลิกที่ File ในโปรแกรม ImageJ บนคอมพิวเตอร์

2. คลิกที่ Open ในโปรแกรม ImageJ บนคอมพิวเตอร์

3. คลิกที่รูปวงกลมตรงแถบรูปภาพด้านบนของโปรแกรม แล้วนำมาสร้างวงกลมที่รูปภาพโดยกำหนดค่า h เป็น 144 และ w เป็น 144 ตลอดการวิเคราะห์ เพราะ เป็นค่าที่ใช้กำหนดขนาดพื้นที่ใช้สุ่มหาค่า ED (ถ้าขนาดพื้นที่ไม่เท่ากันจะมีผลต่อค่า ED ที่คำนวณในแต่ละครั้งมีค่าเปลี่ยนแปลงไป)

4. เลื่อนรูปวงกลมที่สร้างให้อยู่กึ่งกลางของแถบวงกลมสีในรูปภาพแผ่นกระดาษทดสอบ

5. คลิกที่ปุ่ม Plugins, Analyze และ RGB measure ตามลำดับ แล้วบันทึกค่า I_R I_G และ I_B

6. นำค่า I_R I_G และ I_B ที่บันทึกได้ไปคำนวณค่า ED ด้วยสูตรการหาค่าความแตกต่างความเข้มสี

ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$ED = \sqrt{(\Delta I_R)^2 + (\Delta I_G)^2 + (\Delta I_B)^2}$$

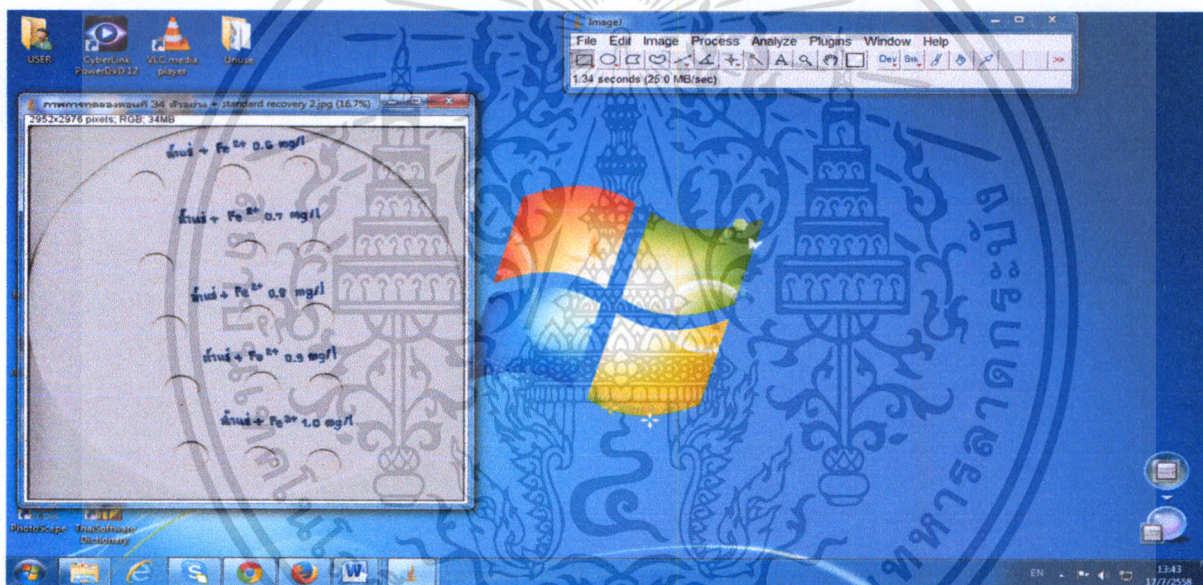
โดยที่ Δ คือ ความแตกต่างความเข้มสีในแต่ละจุดของแผ่นกระดาษทดสอบที่เทียบกับ blank

I_R คือ ความเข้มสีแสงสีแดง

I_G คือ ความเข้มสีแสงสีเขียว

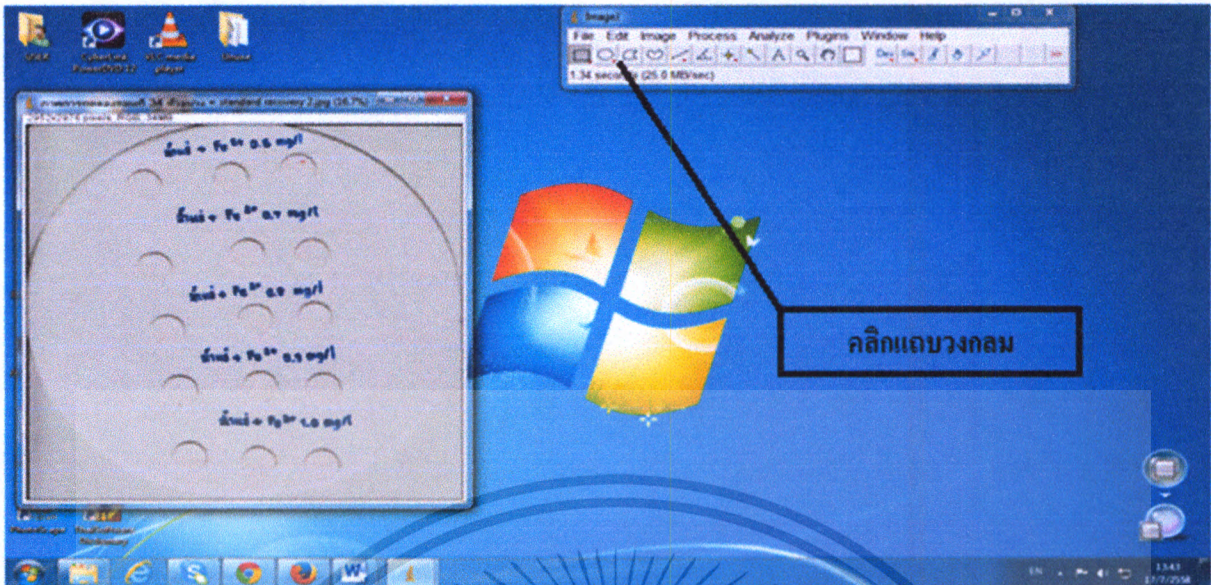
I_B คือ ความเข้มสีแสงสีน้ำเงิน

ซึ่งสูตรการหาค่าความแตกต่างความเข้มสีสามารถคำนวณด้วยโปรแกรม Microsoft Excel จะได้ค่า ED มาวิเคราะห์ผลการทดลองต่อไป

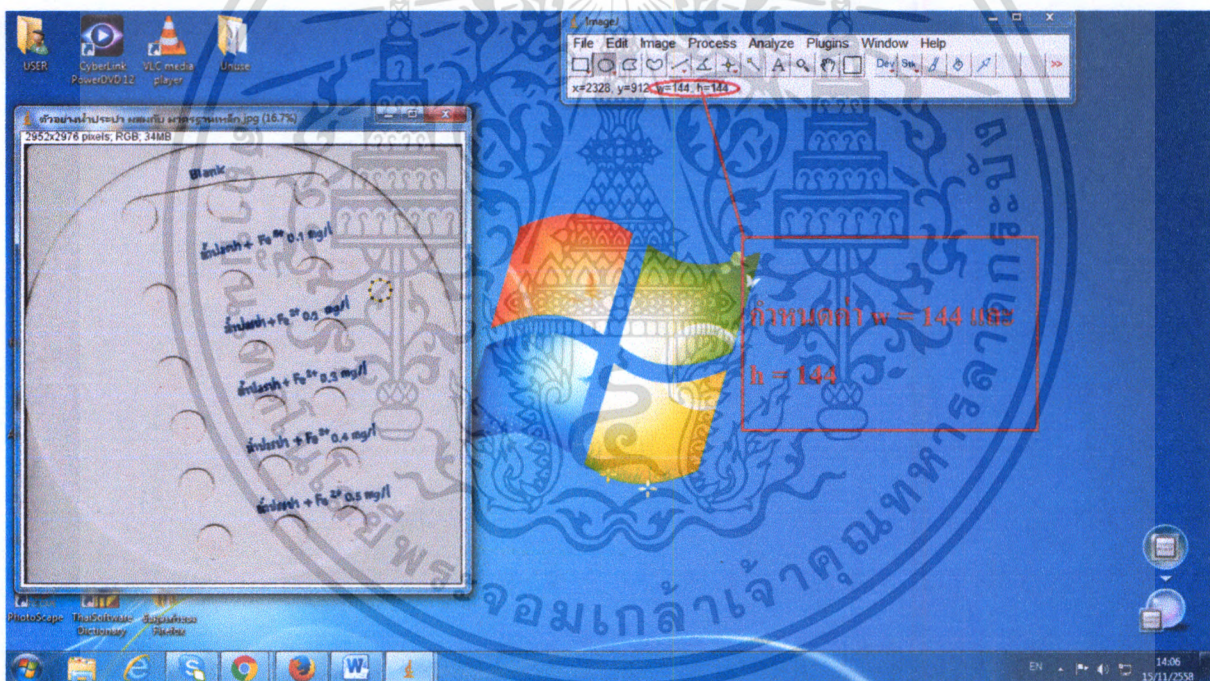


รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะโปรแกรม ImageJ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดงตำแหน่งของรูปภาพวงกลมที่แถบรูปภาพด้านบนของโปรแกรม



รูปที่ 3.3 แสดงตำแหน่งค่า w และ h ในการสร้างวงกลมสำหรับช่อมแถบความเข้มสีไปใช้วิเคราะห์ผล

3.3.2 ศึกษาผลของความสว่างที่ใช้สแกนที่มีต่อสีของสารเชิงซ้อน

3.3.2.1 การเตรียมสารละลายที่ใช้ในหัวข้อ 3.3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) สารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) ที่เป็น Working solution

1. ปิเปตสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) จาก Stock Solution ปริมาตร 10.00, 20.00, 30.00, 40.00, 50.00, 60.00, 70.00, 80.00, 90.00 และ 100.00 ไมโครลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตรแต่ละใบ
2. เติมสารละลายไฮดรอกซีลามีนิไฮดรอกไซด์ปริมาตร 1.00 มิลลิลิตร ใส่ตามลงไปลงในขวดวัดปริมาตรแต่ละใบจนครบทุกขวด แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนให้ถึงขีดบอกปริมาตร เขย่าให้เข้ากัน จะได้สารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) (Working solution) ความเข้มข้น 0.10, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70, 0.80, 0.90 และ 1.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

3.3.2.2 การทดสอบหาผลของความสว่างที่ใช้สแกนเมื่อทดลองด้วยวิธีแผ่นกระดาษทดสอบในสารละลาย

1. ปิเปตสารละลายโซล-เจลเจือด้วยออปโทไฟแนนโทรลีนเข้มข้นร้อยละ 0.20 %w/v ที่เตรียมเหมือนในหัวข้อ 3.3.1.2 ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร หยดลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 จำนวน 6 หยด ทิ้งไว้ให้แห้งเป็นเวลาประมาณ 30 นาที
2. ตัดแผ่นกระดาษกรองตามรอยขอบเขตโซล-เจลที่แห้ง แล้วนำไปวางในหลุมของถาดหลุม 3 แผ่น
3. ปิเปตสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) ความเข้มข้น 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตรปริมาตร 100.00 ไมโครลิตรใส่ลงในหลุมที่มีแผ่นกระดาษทดสอบวางอยู่ แล้วปล่อยให้แห้งเป็นเวลา 30 นาที
4. นำคีมคีบแผ่นกระดาษทดสอบขึ้นมาทิ้งไว้ให้แห้งบนฝาของถาดหลุม (ประมาณ 5 นาที)
5. นำแผ่นกระดาษทดสอบที่ได้ติดลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 อีกแผ่นด้วยกาว จากนั้นนำไปสแกนด้วยเครื่องสแกนแบบตั้งโต๊ะที่ความสว่างในการสแกน 0, -10, -20, -30, -40 และ -50 ตามลำดับ
6. นำไฟล์ภาพที่ได้จากการสแกนมาวิเคราะห์ผลการทดลองตามหัวข้อ 3.3.1.5
7. ทำการทดลองซ้ำข้อ 2 ถึง 6 โดยใช้ น้ำปราศจากไอออนเติมไฮดรอกซีลามีนิไฮดรอกไซด์ปริมาตร 1.00 มิลลิตรเป็น blank แทนสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II)

3.3.3 ศึกษาผลของความสะอาดอุปกรณ์ที่ใช้พักแผ่นกระดาษทดสอบให้แห้งที่มีต่อจุดสีของสารเชิงซ้อน

1. ปิเปตสารละลายโซล-เจลเจือด้วยออปโทไฟแนนโทรลีนเข้มข้นร้อยละ 0.20 %w/v ที่เตรียมเหมือนในหัวข้อ 3.3.1.2 ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร หยดลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 จำนวน 9 หยด ทิ้งไว้ให้แห้งเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

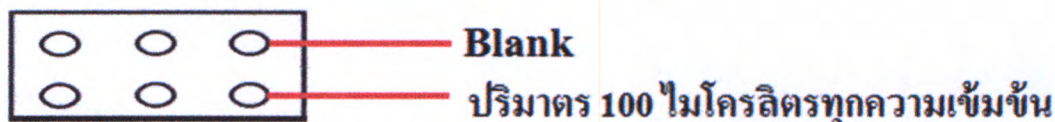
เวลาประมาณ 30 นาที

2. ตัดแผ่นกระดาษกรองตามรอยขอบเขตโซล-เจลที่แห้ง แล้วนำไปวางในหลุมของถาดหลุม 6 แผ่น
3. ปิเปตสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) ความเข้มข้น 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตรปริมาตร 100.00 ไมโครลิตรใส่ลงในหลุมที่มีแผ่นกระดาษทดสอบวางอยู่ แล้วปล่อยให้แห้ง 1 นาที
4. นำคีมคีบแผ่นกระดาษทดสอบขึ้น 3 แผ่น มาทิ้งไว้ให้แห้งบนฝาของถาดหลุม และอีก 3 แผ่นตั้งไว้ให้แห้งบนโต๊ะของห้องปฏิบัติการ
5. นำแผ่นกระดาษทดสอบที่ได้ติดลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 อีกแผ่นด้วยกาว จากนั้นนำไปสแกนด้วยเครื่องสแกนแบบตั้งโต๊ะ
6. นำไฟล์ภาพที่ได้จากการสแกนมาวิเคราะห์ผลการทดลองตามหัวข้อ 3.3.1.5
7. ทำการทดลองซ้ำข้อ 2 ถึง 6 โดยใช้น้ำปราศจากไอออนเติมไฮดรอกซีลามีนไฮโดรคลอไรด์ปริมาตร 1.00 มิลลิตรเป็น blank แทนสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II)

3.3.4 ศึกษาผลของปริมาตรของสารละลายไอออนเหล็ก (II) ที่ใช้แช่แผ่นกระดาษทดสอบ

3.3.4.1 การทดสอบหาผลกระทบปริมาตรของสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) 0.20 มิลลิกรัมต่อลิตรที่มีต่อความเข้มสีของสารเชิงซ้อน ด้วยปริมาตรที่ใช้ในการแช่ 100.00 ไมโครลิตร

1. ปิเปตสารละลายโซล-เจลเจือด้วยอโทพีแนนโทรีนเข้มข้นร้อยละ 0.20 %w/v ที่เตรียมเหมือนในหัวข้อ 3.3.1.2 ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร หยดลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 จำนวน 24 หยด ทิ้งไว้ให้แห้งเป็นเวลาประมาณ 30 นาที
2. ตัดแผ่นกระดาษกรองตามรอยขอบเขตโซล-เจลที่แห้ง แล้วนำไปวางในหลุมของถาดหลุม 6 แผ่น
3. ปิเปตสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) ความเข้มข้น 0.20 มิลลิกรัมต่อลิตรจำนวน 100.00 ไมโครลิตรใส่ลงในหลุมที่มีแผ่นกระดาษทดสอบวางไว้อยู่อย่างละ 3 หลุม ตามรูปที่ 3.4 แล้วปล่อยให้แห้ง 1 นาที



รูปที่ 3.4 แสดงตำแหน่งของ blank และสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) ในถาดหลุม

4. นำคีมคีบแผ่นกระดาษทดสอบขึ้นมาทิ้งไว้ให้แห้งบนฝาของถาดหลุม (ประมาณ 5 นาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. นำแผ่นกระดาษทดสอบที่ได้ติดลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 อีกแผ่นด้วยกาว จากนั้นนำไปสแกนด้วยเครื่องสแกนแบบตั้งโต๊ะ

6. นำไฟล์ภาพที่ได้จากการสแกนมาวิเคราะห์ผลการทดลองตามหัวข้อ 3.3.1.5

7. ทำการทดลองซ้ำข้อ 2 ถึง 6 โดยใช้น้ำปราศจากไอออนเต็มไฮดรอกซีลาอิมไฮโดรคลอไรด์เป็น blank แทนสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II)

8. ทำการทดลองซ้ำข้อ 2 ถึง 6 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) จากความเข้มข้น 0.20 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็น 0.50 และ 1.00 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ

3.3.4.2 การทดสอบหาผลกระทบปริมาณของสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) ในความเข้มข้นมากกว่า 0.20 มิลลิกรัมต่อลิตรที่มีต่อความเข้มข้นของสารเชิงซ้อน ด้วยปริมาตรที่ใช้ในการแช่ มากกว่า 100.00 ไมโครลิตร

ทำซ้ำในหัวข้อใหญ่ 3.3.4.1 แต่เปลี่ยนปริมาตรของสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) จาก 100.00 ไมโครลิตรเป็น 200.00, 300.00 และ 400.00 ไมโครลิตรตามลำดับ

3.3.5 ศึกษาผลของเวลาที่ใช้แช่แผ่นกระดาษทดสอบ

3.3.5.1 การทดสอบหาผลกระทบเวลาที่แช่แผ่นกระดาษทดสอบในสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) ความเข้มข้น 0.20, 0.50 และ 1.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยเวลาการแช่แผ่นกระดาษทดสอบ 1 นาที

1. ปิเปตสารละลายโซล-เจลเจือด้วยออปโทพีแนนโทรลีนเข้มข้นร้อยละ 0.20 %w/v ที่เตรียมเหมือนในหัวข้อ 3.3.1.2 ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร หยดลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 จำนวน 12 หยด ทิ้งไว้ให้แห้งเป็นเวลาประมาณ 30 นาที

2. ตัดแผ่นกระดาษกรองตามรอยขอบเขตโซล-เจลที่แห้ง แล้วนำไปวางในหลุมของถาดหลุม 12 แผ่น

3. ปิเปตสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) ความเข้มข้น 0.20, 0.50 และ 1.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 200.00 ไมโครลิตรใส่ลงในหลุมที่มีแผ่นกระดาษทดสอบวางอยู่ความเข้มข้นละ 3 หลุม แล้วปล่อยให้แห้ง 1 นาที

4. นำคีมคีบแผ่นกระดาษทดสอบขึ้นมาทิ้งไว้ให้แห้งบนผ้าของถาดหลุม (ประมาณ 5 นาที)

5. นำแผ่นกระดาษทดสอบที่ได้ติดลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 อีกแผ่นด้วยกาว จากนั้นนำไปสแกนด้วยเครื่องสแกนแบบตั้งโต๊ะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. นำไฟล์ภาพที่ได้จากการสแกนมาวิเคราะห์ผลการทดลองตามหัวข้อ 3.3.1.5
7. ทำการทดลองซ้ำข้อ 2 ถึง 6 โดยใช้น้ำปราศจากไอออนเต็มไฮดรอกซีลามีนไฮโดรคลอไรด์ ปริมาตร 1.00 มิลลิตรเป็น blank แทนสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II)
8. ทำการทดลองซ้ำข้อ 2 ถึง 6 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) จากความเข้มข้น 0.20 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็น 0.50 และ 1.00 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ

3.3.5.2 การทดสอบหาผลกระทบเวลาที่ใช้แช่แผ่นกระดาษทดสอบในสารละลายมาตรฐาน ไอออนเหล็ก (II) ความเข้มข้น 0.20, 0.50 และ 1.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยเวลาการแช่แผ่นกระดาษ ทดสอบ 5, 10, 15, 20 และ 30 นาที

ทำซ้ำในหัวข้อใหญ่ 3.3.5.1 แต่เปลี่ยนเวลาที่ใช้แช่แผ่นกระดาษทดสอบเป็น 5, 10, 15, 20 และ 30 นาที ตามลำดับ หลังการทดลองเสร็จในแต่ละความเข้มข้น

3.3.6 การวิเคราะห์ตัวอย่างเปรียบเทียบผลกับวิธีมาตรฐาน

3.3.6.1 การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำด้วยวิธีแช่แผ่นกระดาษทดสอบ

1. เตรียมตัวอย่างน้ำโดยปิเปตสารละลายไฮดรอกซีลามีนไฮโดรคลอไรด์ปริมาตร 1.00 มิลลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิตร จำนวน 10 ขวด ปรับปริมาตรด้วยน้ำดื่ม 10 ตัวอย่างจนถึงขีด บอกปริมาตร เขย่าให้เข้ากัน จะได้ตัวอย่างน้ำดื่มที่ใช้ในการวัดปริมาณเหล็ก
2. ปิเปตสารละลายโซล-เจลเจ็ดด้วยออตโทพีเพนไนโตรเจนเข้มข้นร้อยละ 0.20 %w/v ที่เตรียม เหมือนในหัวข้อ 3.3.1.2 ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร หยดลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 จำนวน 9 หยด ทิ้งไว้ให้ แห้งเป็นเวลาประมาณ 30 นาที
3. ตัดแผ่นกระดาษทดสอบตามรอยขอบเขตโซล-เจลที่แห้ง แล้วนำไปวางในหลุมของถาดหลุม 9 แผ่น
4. ปิเปตน้ำปราศจากไอออนที่เต็มไฮดรอกซีลามีนไฮโดรคลอไรด์เป็น blank ปริมาตร 200.00 ไมโครลิตรใส่ลงในหลุมที่มีแผ่นกระดาษทดสอบวางอยู่ 3 หลุม
5. ปิเปตสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) ความเข้มข้น 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 200.00 ไมโครลิตรใส่ลงในหลุมที่มีแผ่นกระดาษทดสอบวางอยู่ 3 หลุม
6. ปิเปตตัวอย่างน้ำดื่มที่เตรียมไว้ข้อ 1 ปริมาตร 200.00 ไมโครลิตรใส่ลงในหลุมที่มี แผ่นกระดาษทดสอบวางอยู่ 3 หลุม
7. แช่แผ่นกระดาษทดสอบทั้งหมดทิ้งไว้ 15 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. นำคีมคีบแผ่นกระดาษทดสอบขึ้นมาทิ้งไว้ให้แห้งบนผ้าของภาดหลุม (ประมาณ 1 ชั่วโมง)
9. นำแผ่นกระดาษทดสอบที่ได้ติดลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 อีกแผ่นด้วยกาว จากนั้นนำไปสแกนด้วยเครื่องสแกนแบบตั้งโต๊ะ
10. นำไฟล์ภาพที่ได้จากการสแกนมาวิเคราะห์ผลการทดลองตามหัวข้อ 3.3.1.5

3.3.6.2 การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำด้วยวิธีสเปกโทรโฟโตเมทรี

1) การเตรียมสารละลายไฮดรอกซีลามีโนไฮโดรคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 10.0 %w/v สำหรับการวัดด้วยวิธีสเปกโทรโฟโตเมทรี

ชั่งไฮดรอกซีลามีโนไฮโดรคลอไรด์ 10.00 กรัม ด้วยเครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 50 มิลลิลิตร ภายในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วเทใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจนถึงขีดบอกปริมาตร เขย่าให้เข้ากัน

2) การเตรียมสารละลายอโทพีแนนโทรีนเข้มข้นร้อยละ 0.5 %w/v สำหรับการวัดด้วยวิธีสเปกโทรโฟโตเมทรี

ชั่งอโทพีแนนโทรีนโมโนไฮเดรตมา 0.50 กรัม ด้วยเครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง ละลายด้วยเอทานอลปราศจากน้ำปริมาตร 50 มิลลิลิตร ภายในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วเทใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจนถึงขีดบอกปริมาตร เขย่าให้เข้ากัน

3) การเตรียมสารละลายมาตรฐานสำหรับการวัดด้วยวิธีสเปกโทรโฟโตเมทรี

1. ปิเปตสารละลายโซเดียมซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 25.0 %w/v ปริมาตร 10.0 มิลลิลิตร สารละลายไฮดรอกซีลามีโนไฮโดรคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 10.0 %w/v สำหรับการวัดด้วยวิธีสเปกโทรโฟโตเมทรี ปริมาตร 1.0 มิลลิลิตร และสารละลายอโทพีแนนโทรีนเข้มข้นร้อยละ 0.5 %w/v สำหรับการวัดด้วยวิธีสเปกโทรโฟโตเมทรี ปริมาตร 2.0 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร จำนวน 15 ขวด

2. ปิเปตสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) (Stock Solution) ลงในขวดวัดปริมาตรที่ผ่านขั้นตอนที่ 1. ลงไป 100.00, 200.00, 300.00, 400.00, 500.00, 600.00, 700.00, 800.00 และ 900.00 ไมโครลิตร และ 1.00, 2.00, 4.00, 6.00, 8.00 และ 10.00 มิลลิลิตร ตามลำดับ

3. ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจนถึงขีดบอกปริมาตร เขย่าให้เข้ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) การเตรียมตัวอย่างน้ำสำหรับการวัดด้วยวิธีสเปกโทรโฟโตเมทรี

1. ปิเปตสารละลายโซเดียมซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 25.0 %w/v ปริมาตร 10.0 มิลลิลิตร สารละลายไฮดรอกซีลามีนไฮโดรคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 10.0 %w/v สำหรับการวัดด้วยวิธีสเปกโทรโฟโตเมทรี ปริมาตร 1.0 มิลลิลิตร และสารละลายอโทพีแนมโทรสีนเข้มข้นร้อยละ 0.5 %w/v สำหรับการวัดด้วยวิธีสเปกโทรโฟโตเมทรี ปริมาตร 2.0 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร จำนวน 11 ขวด
2. ปรับปริมาตรด้วยตัวอย่างน้ำจนถึงขีดบอกปริมาตรจนครบทั้ง 10 ขวด เขย่าให้เข้ากัน จะได้ตัวอย่างน้ำดื่มสำหรับการวัดด้วยวิธีสเปกโทรโฟโตเมทรี จำนวน 10 ตัวอย่าง
3. ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจนถึงขีดบอกปริมาตร เขย่าให้เข้ากัน จะได้ blank สำหรับการวัดด้วยวิธีสเปกโทรโฟโตเมทรี
4. ปิเปตสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) จาก Stock Solution ปริมาตร 10.00, 20.00, 30.00, 40.00, 50.00, 60.00, 70.00, 80.00, 90.00 และ 100.00 ไมโครลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรที่ผ่านการเตรียมในข้อ 1
5. ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจนถึงขีดบอกปริมาตร เขย่าให้เข้ากัน จะได้สารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) สำหรับวัดด้วยวิธีสเปกโทรโฟโตเมทรีความเข้มข้น 0.10, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70, 0.80, 0.90 และ 1.00 มิลลิกรัมต่อลิตร

5) การวัดด้วยวิธีสเปกโทรโฟโตเมทรี

1. นำตัวอย่างน้ำสำหรับการวัดด้วยวิธีสเปกโทรโฟโตเมทรีทั้ง 10 ตัวอย่าง และ blank สำหรับการวัดด้วยวิธีสเปกโทรโฟโตเมทรีเทใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 10 มิลลิลิตรจนเต็ม บีกเกอร์ละ 1 ขวด
2. เท blank สำหรับการวัดด้วยวิธีสเปกโทรโฟโตเมทรีลงในเซลล์ควอทซ์ 2 เซลล์ ปริมาตร 3 ใน 4 ของเซลล์ควอทซ์
3. นำเซลล์ควอทซ์ทั้ง 2 เซลล์ไปเช็ดศูนย์ในเครื่องยูวี-วิซิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 508 นาโนเมตร
4. หยิบเซลล์ควอทซ์ในช่อง Sample มาทดสอบที่เป็น blank ทั้งใส่อย่างล้างหน้า
5. เทตัวอย่างน้ำสำหรับการวัดด้วยวิธีสเปกโทรโฟโตเมทรีลงในเซลล์ควอทซ์ที่ทดสอบที่เป็น blank ทั้ง แล้วกลั้วพร้อมตัวอย่างน้ำสำหรับการวัดด้วยวิธีสเปกโทรโฟโตเมทรีทั้ง
6. เทตัวอย่างน้ำสำหรับการวัดด้วยวิธีสเปกโทรโฟโตเมทรีตัวเดิมมาปริมาณใกล้เคียงกับขั้นตอนที่ 2 ใส่ลงในเซลล์ควอทซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. นำเซลล์ควอทซ์ในขั้นตอนที่ 6 ไปวัดด้วยเครื่องยูวี-วิชิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ในช่อง Sample ที่ความยาวคลื่น 508 นาโนเมตร อ่านค่าพร้อมบันทึกผลค่าดูดกลืนแสง
8. หยิบเซลล์ควอทซ์ในช่อง Sample มาเทตัวอย่างน้ำสำหรับการวัดด้วยวิธีสเปกโทรโฟโตเมทรี ที่ใส่อย่างล้าหน้า
9. เทตัวอย่างน้ำสำหรับการวัดด้วยวิธีสเปกโทรโฟโตเมทรีตัวใหม่ ปริมาตร 3 ใน 4 ของเซลล์ควอทซ์ แล้วกลั้วพร้อมเทตัวอย่างน้ำดื่มทิ้ง
10. ทำซ้ำตามขั้นตอนที่ 6, 7, 8 และ 9 จนวัดตัวอย่างน้ำดื่มได้หมดทุกขวด

3.3.6.3 การหาเปอร์เซ็นต์ recovery ของวิธีแช่แผ่นกระดาษทดสอบ

1) การเตรียมสารละลายตัวอย่างแบบ standard addition

1. ปิเปิดตัวอย่างน้ำปริมาตร 10 มิลลิลิตรใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตรจนครบ 10 ใบ แล้วปิเปิดสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) ที่เป็น Working solution ความเข้มข้น 0.10, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70, 0.80, 0.90 และ 1.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ความเข้มข้นละ 10 มิลลิลิตรใส่ลงในขวดวัดปริมาตรแต่ละใบที่มีตัวอย่างน้ำอยู่ จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจนถึงขีดบอกปริมาตร เขย่าให้เข้ากัน
2. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 1 แต่เปลี่ยนสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) ที่เป็น Working solution เป็นน้ำปราศจากไอออน เพื่อทำเป็น blank สำหรับสารละลายตัวอย่างแบบ standard addition

2) การเตรียมกราฟมาตรฐานของวิธีแช่แผ่นกระดาษทดสอบ

1. ปิเปิดสารละลายโซล-เจลเจือด้วยอโทพีแนนโทรลีนเข้มข้นร้อยละ 0.20 %w/v ที่เตรียมเหมือนในหัวข้อ 3.3.1.2 ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร หยดลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 จำนวน 33 หยด ทิ้งไว้ให้แห้งเป็นเวลาประมาณ 30 นาที
2. ตัดแผ่นกระดาษทดสอบตามรอยขอบเขตโซล-เจลที่แห้ง แล้วนำไปวางในหลุมของถาดหลุม 33 หลุม
3. ปิเปิดสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) ความเข้มข้น 0.10, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70, 0.80, 0.90 และ 1.00 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ปริมาตร 200.00 ไมโครลิตรใส่ลงในหลุมที่มีแผ่นกระดาษทดสอบวางอยู่ ความเข้มข้นละ 3 หลุม แช่ไว้ 15 นาที
4. นำคีมคีบแผ่นกระดาษทดสอบขึ้นมาทิ้งไว้ให้แห้งบนฝาของถาดหลุม (ประมาณ 1 ชั่วโมง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. นำแผ่นกระดาษทดสอบที่ได้ติดลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 อีกแผ่นด้วยกาว จากนั้นนำไปสแกนด้วยเครื่องสแกนแบบตั้งโต๊ะ
6. นำไฟล์ภาพที่ได้จากการสแกนมาวิเคราะห์ผลการทดลองตามหัวข้อ 3.3.1.5
7. ทำการทดลองซ้ำข้อ 2 ถึง 6 โดย blank แทนสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II)

3) การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำของวิธีแช่แผ่นกระดาษทดสอบ

1. ปิเปตสารละลายโซล-เจสเจือด้วยอโทพีแนนโทรลีนเข้มข้นร้อยละ 0.20 %w/v ที่เตรียมเหมือนในหัวข้อ 3.3.1.2 ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร หยดลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 จำนวน 6 หยด ทิ้งไว้ให้แห้งเป็นเวลาประมาณ 30 นาที
2. ตัดแผ่นกระดาษทดสอบตามรอยขอบเขตโซล-เจสที่แห้ง แล้วนำไปวางในหลุมของถาดหลุม 6
3. ปิเปตตัวอย่างน้ำ ปริมาตร 200.00 ไมโครลิตรใส่ลงในหลุมที่มีแผ่นกระดาษทดสอบวางอยู่ แช่ไว้ 15 นาที
4. นำคีมคีบแผ่นกระดาษทดสอบขึ้นมาทิ้งไว้ให้แห้งบนฝาของถาดหลุม (ประมาณ 1 ชั่วโมง)
5. นำแผ่นกระดาษทดสอบที่ได้ติดลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 อีกแผ่นด้วยกาว จากนั้นนำไปสแกนด้วยเครื่องสแกนแบบตั้งโต๊ะ
6. นำไฟล์ภาพที่ได้จากการสแกนมาวิเคราะห์ผลการทดลองตามหัวข้อ 3.3.1.5

4) การวิเคราะห์สารละลายตัวอย่างแบบ standard addition

1. ปิเปตสารละลายโซล-เจสเจือด้วยอโทพีแนนโทรลีนเข้มข้นร้อยละ 0.20 %w/v ที่เตรียมเหมือนในหัวข้อ 3.3.1.2 ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร หยดลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 จำนวน 36 หยด ทิ้งไว้ให้แห้งเป็นเวลาประมาณ 30 นาที
2. ตัดแผ่นกระดาษทดสอบตามรอยขอบเขตโซล-เจสที่แห้ง แล้วนำไปวางในหลุมของถาดหลุม 36 แผ่น
3. ปิเปตสารละลายตัวอย่างแบบ standard addition ปริมาตร 200.00 ไมโครลิตรใส่ลงในหลุมที่มีแผ่นกระดาษทดสอบวางอยู่ ตัวอย่างละ 3 หลุม แช่ไว้ 15 นาที
4. นำคีมคีบแผ่นกระดาษทดสอบขึ้นมาทิ้งไว้ให้แห้งบนฝาของถาดหลุม (ใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง)
5. นำแผ่นกระดาษทดสอบที่ได้ติดลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 อีกแผ่นด้วยกาว จากนั้นนำไปสแกนด้วยเครื่องสแกนแบบตั้งโต๊ะ
6. นำไฟล์ภาพที่ได้จากการสแกนมาวิเคราะห์ผลการทดลองตามหัวข้อ 3.3.1.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ทำการทดลองซ้ำข้อ 2 ถึง 6 โดยใช้สารละลาย blank สำหรับสารละลายตัวอย่างแบบ standard addition แทนสารละลายตัวอย่างแบบ standard addition

3.3.7 การหาค่า LOD และ LOQ ของวิธีแช่แผ่นกระดาษทดสอบ

1. ปิเปิดสารละลายโซล-เจลเจือด้วยอโทพีแนนโทรลีนเข้มข้นร้อยละ 0.20 %w/v ที่เตรียมเหมือนในหัวข้อ 3.3.1.2 ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร หยดลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 จำนวน 24 หยด ทิ้งไว้ให้แห้งเป็นเวลาประมาณ 30 นาที
2. ตัดแผ่นกระดาษทดสอบตามรอยขอบเขตโซล-เจลที่แห้ง แล้วนำไปวางในหลุมของภาตหลุม 24 แผ่น
3. ปิเปิดสารละลายตัวอย่างแบบ standard addition ที่เติมสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 200.00 ไมโครลิตรใส่ลงในหลุมที่มีแผ่นกระดาษทดสอบวางอยู่ ตัวอย่างละ 3 หลุม แช่ไว้ 15 นาที
4. นำคีมคีบแผ่นกระดาษทดสอบขึ้นมาทิ้งไว้ให้แห้งบนฝาของภาตหลุม (ใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง)
5. นำแผ่นกระดาษทดสอบที่ได้ติดลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 อีกแผ่นด้วยกาว จากนั้นนำไปสแกนด้วยเครื่องสแกนแบบตั้งโต๊ะ
6. นำไฟล์ภาพที่ได้จากการสแกนมาวิเคราะห์ผลการทดลองตามหัวข้อ 3.3.1.5
7. ทำการทดลองซ้ำข้อ 2 ถึง 6 อีก 6 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

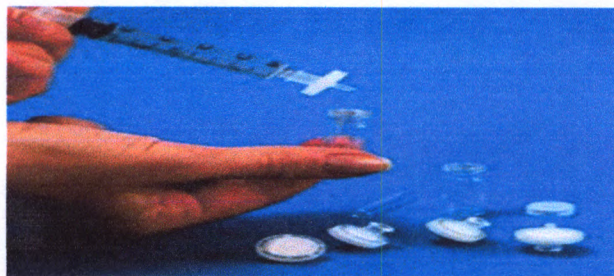
บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

นฤชิต ไพโรจน์^[8] ได้นำชุดทดสอบแบบจุดบนกระดาษที่เตรียมจุดรีเอเจนต์ด้วยวิธีโซล-เจลมาวิเคราะห์ปริมาณไอออนเหล็ก (II) ในเม็ดยา ซึ่งมีความสะดวกในการทดลองและสามารถวิเคราะห์ผลได้รวดเร็ว โดยที่ชุดทดสอบนี้มีขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์เชิงปริมาณเท่ากับ (LOQ = 10SD) 7.95 มิลลิกรัมต่อลิตร ในงานวิจัยนี้ต้องการปรับปรุงชุดทดสอบดังกล่าวให้สามารถตรวจวัดปริมาณเหล็กในตัวอย่างน้ำดื่มที่มีการควบคุมคุณภาพตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 332 (พ.ศ. 2521) ที่มีเกณฑ์อนุโลมให้มีปริมาณเหล็กได้สูงสุดไม่เกิน 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.1 ศึกษาการหาปริมาณไอออนเหล็ก (II) ที่ต่ำกว่า 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยวิธีฉีดสารละลายไหลผ่านและวิธีแซนในสารละลาย

ในเบื้องต้นได้ใช้อุปกรณ์สำหรับกรองสารละลาย (micropore) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 เพื่อทดลองเพิ่มความเข้มข้นด้วยการกักเก็บสารเชิงซ้อนเฟอร์โรอินไว้บนกระดาษทดสอบที่ตรึงอโทพีแนนโทรลีนด้วยกระบวนการโซล-เจล เพื่อให้สามารถตรวจวิเคราะห์เหล็กปริมาณต่ำกว่า 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วหยดสารละลายโซล-เจลเจือด้วยอโทพีแนนโทรลีนเข้มข้น 0.20 % w/v ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตรลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 แล้วทิ้งไว้ให้แห้ง (ตามสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมจุดรีเอเจนต์จากงานวิจัยของ นฤชิต ไพโรจน์^[8]) จากนั้นตัดกระดาษกรองเบอร์ 2 เป็นรูปวงกลมตามรอยขอบเขตของโซล-เจล นำไปวางบนตะแกรงของอุปกรณ์ micropore ปิดผนึกฝาครอบให้เรียบร้อย แล้วนำกระบอกฉีดยาคูดสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) ความเข้มข้น 2.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ครั้งละ 10 มิลลิลิตร จำนวน 5 ครั้ง ค่อยๆฉีดสารละลายผ่านอุปกรณ์ micropore อย่างช้าๆ และสม่ำเสมอ เพื่อให้ไอออนเหล็ก (II) ค่อยๆเกิดเป็นสารเชิงซ้อนสีส้มกับอโทพีแนนโทรลีนสะสมอยู่บนแผ่นกระดาษทดสอบ เมื่อฉีดสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) ครบ 50 มิลลิลิตร แล้วจึงถอดฝาครอบของอุปกรณ์ micropore ออก เพื่อเอาแผ่นกระดาษทดสอบที่มีสีส้มจากการสะสมของสารเชิงซ้อนสีส้มของเฟอร์โรอินไปสแกนด้วยเครื่องสแกนแบบตั้งโต๊ะ จากจุดสีที่สแกนได้หาค่า I_R , I_G และ I_B แล้วนำไปคำนวณค่า ED ได้ผลตามตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างอุปกรณ์สำหรับกรองสารละลาย (micropore)^[36]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อมาได้พัฒนาเป็นวิธีแซ้ในสารละลาย โดยนำแผ่นกระดาษทดสอบที่ผ่านการหยดโซล-เจลที่เจือออกโทพีแนนโทรีนความเข้มข้น 0.20 % w/v ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตรเช่นเดียวกับตอนทดสอบการหาปริมาณไอออนเหล็ก (II) ด้วยวิธีฉีดสารละลายไหลผ่าน มาแซ้ในหลุมของถาดหลุมที่แต่ละหลุมบรรจุสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) แซ้ทิ้งไว้ 1 นาที เพื่อให้ไอออนเหล็ก (II) มีเวลาในการทำปฏิกิริยาเกิดสารเชิงซ้อนกับออกโทพีแนนโทรีนได้นานมากขึ้น ส่งผลให้เห็นสีของสารเชิงซ้อนเฟอร์โรอินเป็นสีส้มบนกระดาษทดสอบ จากนั้นใช้คีมคีบเอาแผ่นกระดาษทดสอบ และพับไว้บนฝาของถาดหลุมจนแห้ง (เวลาประมาณ 10 นาที) แล้วจึงสแกนจุดสีด้วยเครื่องสแกนแบบตั้งโต๊ะ เพื่อหาค่า I_R , I_G และ I_B ไปคำนวณค่า ED ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างถาดหลุมวิทยาศาสตร์ 24 ช่อง พร้อมฝาปิด

ตารางที่ 4.1 ค่า Euclidean distance ที่ได้จากการทดลอง เพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก (II) ด้วยวิธีการต่างกัน

การทดลองครั้งที่	ค่า Euclidean distance	
	วิธีฉีดสารละลายไหลผ่าน ^a	วิธีแซ้ในสารละลาย ^b
1	10.337	6.420
2	1.829	6.412
3	12.139	6.427
ค่าเฉลี่ย	8.102	6.420
SD	5.507	0.006
%RSD	67.97	0.09

หมายเหตุ ความเข้มข้นสารละลาย Fe(II) ที่ใช้ทดลองคือ 2.00^a และ 1.00^b มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ, ความสว่างที่ใช้ในการสแกนเป็น -50

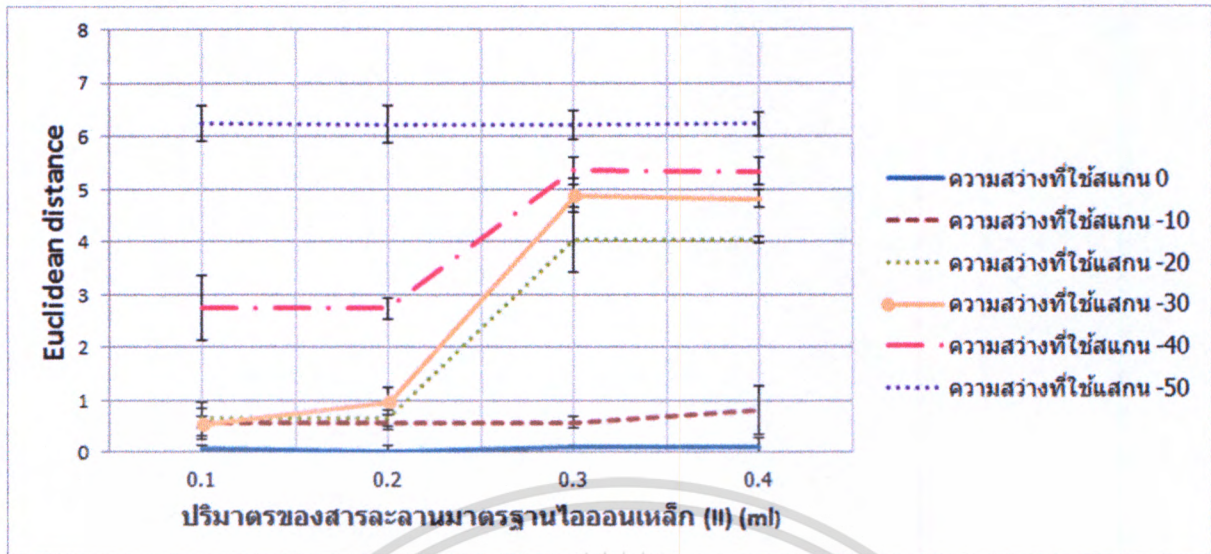
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.1 พบว่าการหาปริมาณไอออนเหล็ก (II) ในสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) ด้วยวิธีให้สารละลายไหลผ่านอุปกรณ์ micropore ให้ค่า %RSD สูงถึง 67.97 แสดงว่าผลการทดลองในแต่ละครั้งมีการเบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยมาก โดยที่การดูดสารละลายมาตรฐานไว้ในหลอดฉีดยาแล้วฉีดผ่านแผ่นกระดาษทดสอบที่บรรจุไว้ในอุปกรณ์ micropore แต่ละครั้งจะใช้เวลาในการฉีดผ่านไปไม่เท่ากัน บางช่วงกระบอกลูกสูบฉีดทำให้ต้องออกแรงกดมากและสารละลายผ่านเร็วเกินไป ไม่สามารถควบคุมอัตราการไหลให้คงที่ได้ ส่งผลให้ไอออนเหล็ก (II) ที่กักอยู่บนแผ่นกระดาษทดสอบแต่ละครั้งใช้เวลาไม่เท่ากันในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไอออนเหล็ก (II) กับออร์โทโทปีแวนโตน โดยที่ปฏิกิริยาระหว่างไอออนเหล็ก (II) กับออร์โทโทปีแวนโตนนี้ต้องใช้เวลาระยะหนึ่งจึงจะเกิดปฏิกิริยาได้สมบูรณ์ ถ้าไม่สามารถควบคุมเวลาในการฉีดสารละลายไหลผ่านอุปกรณ์ micropore แต่ละครั้งให้เท่ากันได้ก็จะส่งผลถึงความเข้มข้นจุดทดสอบที่ได้แต่ละครั้งมีความแตกต่างกันไป วิธีการต่อมาได้ทดลองแช่แผ่นกระดาษทดสอบในสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) เป็นเวลา 1 นาที พบว่าค่า %RSD ได้เพียง 19.80 แสดงว่าผลการทดลองในแต่ละครั้งมีความเบี่ยงเบนน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีให้สารละลายไหลผ่านอุปกรณ์ micropore โดยการทดลองด้วยการแช่กระดาษทดสอบซึ่งใช้สารละลายเหล็กความเข้มข้นต่ำกว่า (1.00 มิลลิกรัมต่อลิตร) สามารถให้ค่าความเบี่ยงเบนน้อยกว่าวิธีให้สารละลายไหลผ่านอุปกรณ์ micropore ที่ใช้สารละลายเหล็กความเข้มข้นสูงกว่า (2.00 มิลลิกรัมต่อลิตร) จึงเลือกวิธีการแช่กระดาษทดสอบในสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) เพื่อทำการทดลองต่อไป

4.2 ศึกษาผลของความสว่างที่ใช้สแกนที่มีต่อสีของสารเชิงซ้อน

หลังจากทิ้งแผ่นกระดาษทดสอบให้แห้ง แล้วนำไปเข้าเครื่องสแกนแบบตั้งโต๊ะ เพื่อบันทึกภาพสีของจุดทดสอบบนแผ่นกระดาษทดสอบ เก็บไฟล์ภาพที่ได้จากการสแกนไว้ในคอมพิวเตอร์ เมื่อทำการพิมพ์ภาพจุดสี สัมบนกระดาษทดสอบในไฟล์ภาพด้วยเครื่องพิมพ์สี พบว่า ภาพจุดสีบนกระดาษทดสอบที่พิมพ์ออกมา มีความเข้มสีของจุดทดสอบน้อยกว่าภาพที่บันทึกในไฟล์คอมพิวเตอร์ ความแตกต่างนี้เกิดจากการใช้ระบบแถบแม่สีไม่เหมือนกัน โดยเครื่องพิมพ์ใช้ระบบแถบแม่สี CMYK ซึ่งเป็นระบบที่ไม่มีมีการปรับความสว่างของสี ในขณะที่เครื่องสแกนแบบตั้งโต๊ะที่ใช้ในการวิจัยเป็น Canon ใช้ระบบแถบแม่สี Lab ซึ่งเป็นระบบที่มีการปรับความสว่างของสีได้ จึงทดลองปรับค่าความสว่างที่ใช้ในการสแกนภาพจุดสี เพื่อให้รูปที่สแกนได้เห็นสีส้มของสารเชิงซ้อนชัดเจนขึ้น โดยทดลองปรับค่าความสว่างในช่วงสเกล 0 ถึง -50 ให้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ค่า Euclidean distance ที่ได้จากการทดลองปรับค่าความสว่างของเครื่องสแกน (สารละลาย ไอออนเหล็ก (II) เข้มข้น 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาในการแช่ 30 นาที)

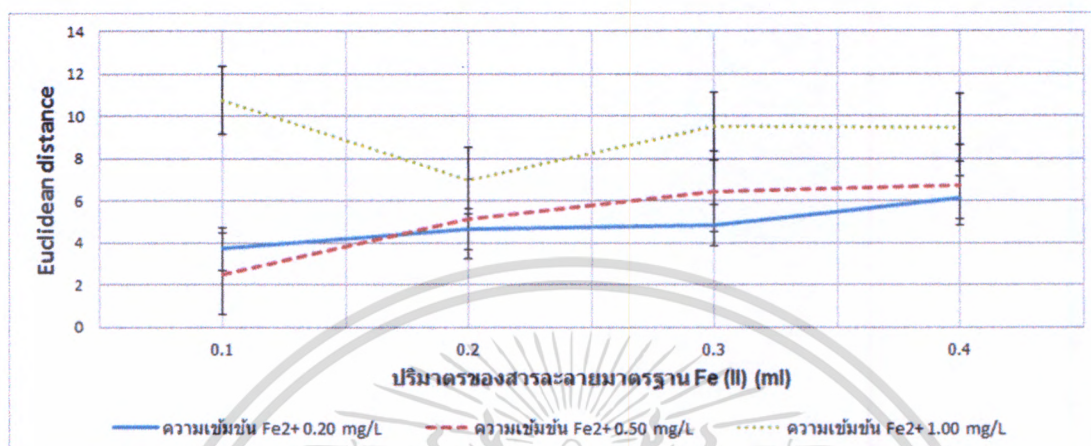
จากผลการทดลองในรูปที่ 4.3 พบว่า ความสว่างของสีในระบบแถบแม่สี Lab ของเครื่องสแกน สามารถปรับได้จากความสว่างของหลอดไฟที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงของเครื่องสแกน โดยค่าความสว่างเป็น 0 คือ ความสว่างของแสงจากหลอดไฟที่ไม่มีการลดความสว่างลง ค่า ED ที่คำนวณได้ในแต่ละปริมาณของ สารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) มีค่าน้อยใกล้เคียงกับค่า blank ที่ ED = 0 ในขณะที่การสังเกตด้วยตาเปล่าสามารถแยกแยะความแตกต่างจาก blank ได้ดีกว่านี้ แสดงว่าแสงสว่างจากหลอดไฟสว่างมากเกินไปทำให้รูปสีที่สแกนได้แสดงความเข้มของสีสารเชิงซ้อนไม่ชัดเจน เมื่อปรับลดค่าความสว่างลงเรื่อย ๆ จนถึงค่า ความสว่าง -50 ค่า ED ที่คำนวณได้ในแต่ละปริมาณของสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) เริ่มมีค่าห่าง จากค่า ED = 0 มากขึ้น จนแยกจากค่า ED ของ blank ที่ 0 ชัดเจน ทำให้รูปสีที่สแกนได้แสดงความเข้มสีสาร เชิงซ้อนชัดเจนขึ้นและสามารถคำนวณค่า ED ได้ละเอียดมากขึ้น เมื่อค่าความสว่างลดลงมากกว่าค่า -50 เป็นต้นไป รูปภาพที่สแกนได้จะค่อย ๆ มีดลงเป็นสีเทาดำซึ่งไม่สามารถมองเห็นสีของสารประกอบเชิงซ้อนได้อีก จึงเลือกใช้ค่าความสว่างที่ -50 ในการสแกนรูปสีของกระดาษทดสอบ

4.3 ศึกษาผลของความสะอาดอุปกรณ์ที่ใช้ปักแผ่นกระดาษทดสอบให้แห้งที่มีต่อจุดสีของสารเชิงซ้อน

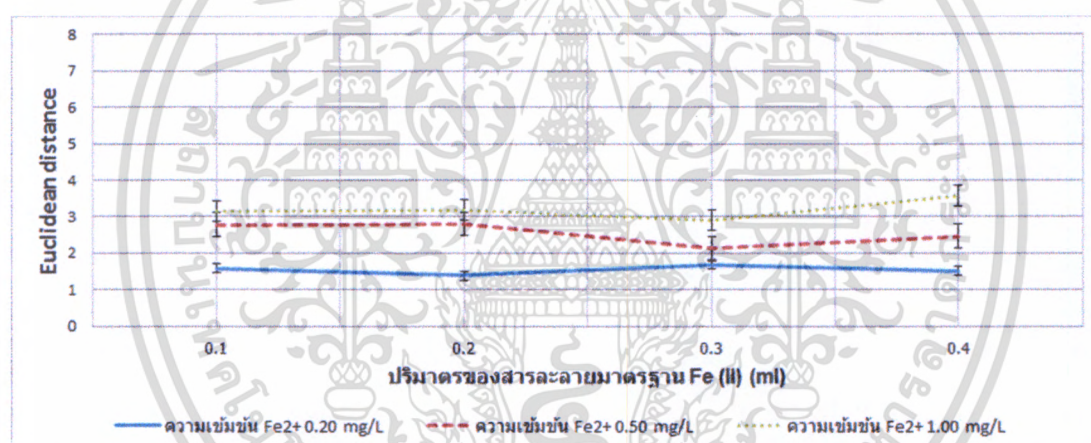
เมื่อนำแผ่นกระดาษทดสอบที่ปักทิ้งให้แห้งบนโต๊ะห้องปฏิบัติการมาตรวจวัดความเข้มสีของสาร เชิงซ้อนในรูปค่า ED พบว่าผลการทดลองที่ได้มีการเบี่ยงเบนมาก จึงทดลองหาสาเหตุพบว่าพื้นโต๊ะ ห้องปฏิบัติการไม่สะอาด มีร่องรอยคราบสกปรกของสารเคมีอยู่ เมื่อปักแผ่นกระดาษทดสอบไว้บนโต๊ะ ห้องปฏิบัติการบางครั้งพบว่า จุดทดสอบมีสีส้มที่เข้มขึ้นเนื่องจากไปวางแผ่นกระดาษทดสอบที่รอยคราบ สกปรก จึงทำการเปลี่ยนที่ปักแผ่นกระดาษทดสอบใหม่ เป็นปักไว้บนฝาของภาดกลมที่ผ่านการทำความสะอาด เป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นแจ้งขอระงับขั้นตอนการดำเนินการ ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สะอาดอยู่เสมอ ผลการทดสอบเปรียบเทียบการฟักแผ่นกระดาษทดสอบไว้บนพื้นโต๊ะห้องปฏิบัติการกับฟักไว้บนฝาของภาดหลุมที่สะอาด ดังรูปที่ 4.3

(ก)



(ข)



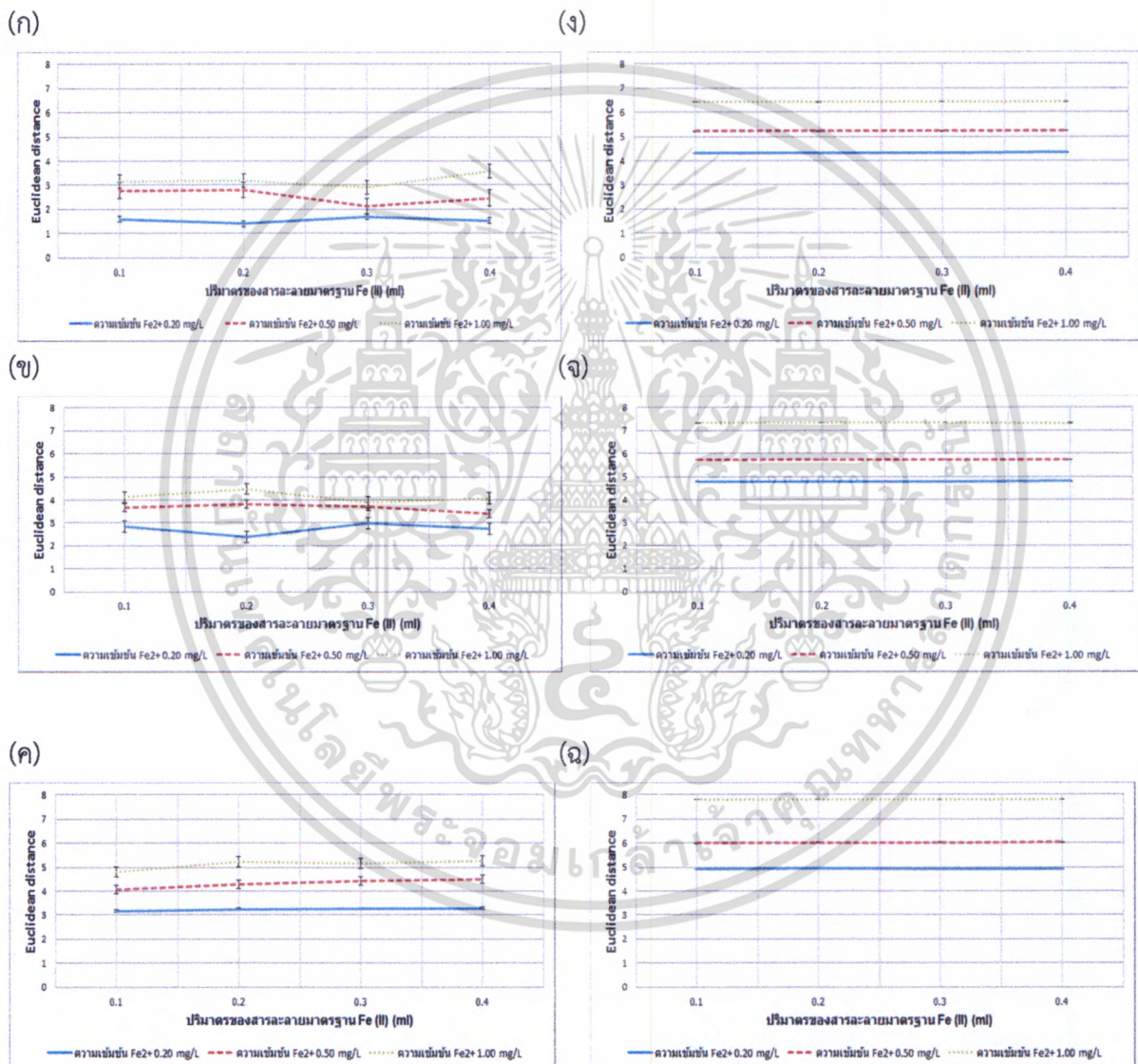
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่า Euclidean distance เมื่อทดลองแช่แผ่นกระดาษทดสอบในสารละลาย Fe(II) ที่มีปริมาณต่าง ๆ กัน เป็นเวลา 1 นาที แล้วนำแผ่นกระดาษทดสอบออกมา (ก) ฟักบนพื้นโต๊ะห้องปฏิบัติการ (ข) ฟักบนฝาของภาดหลุมที่สะอาด

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าหลังจากการแช่แผ่นกระดาษทดสอบเป็นเวลา 1 นาที แล้วนำขึ้นมาฟักทิ้งไว้ให้แห้งบนพื้นโต๊ะห้องปฏิบัติการที่ไม่สะอาดนัก อาจมีการปนเปื้อนของสารเคมีที่มีผลกระทบต่อการศึกษาเชิงซ้อน ส่งผลให้ค่า ED ที่ได้มีการเบี่ยงเบนอย่างมาก แต่เมื่อนำแผ่นกระดาษทดสอบขึ้นมาฟักทิ้งไว้ให้แห้งบนฝาของภาดหลุมที่สะอาด ค่า ED ที่ได้จะเบี่ยงเบนน้อยมาก ดังนั้นต้องให้ความสำคัญระดับระวางในเรื่องความสะอาดของบริเวณที่จะวางแผ่นกระดาษทดสอบเพื่อทิ้งไว้ให้แห้งด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ศึกษาผลของปริมาณของสารละลายไอออนเหล็ก (II) ที่ใช้แช่แผ่นกระดาษทดสอบ

ปริมาณของสารตั้งต้น เป็นปัจจัยพื้นฐานที่ส่งผลต่อความสมบูรณ์ในการเกิดปฏิกิริยา จึงศึกษาผลของปัจจัยนี้ โดยให้ปริมาณของสารตั้งต้น คือ ปริมาตรของสารละลายไอออนเหล็ก (II) ในการทดลองห้วข้อนี้ได้แช่แผ่นกระดาษทดสอบในของสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) ปริมาตร 0.10 ถึง 0.40 มิลลิลิตร ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.4



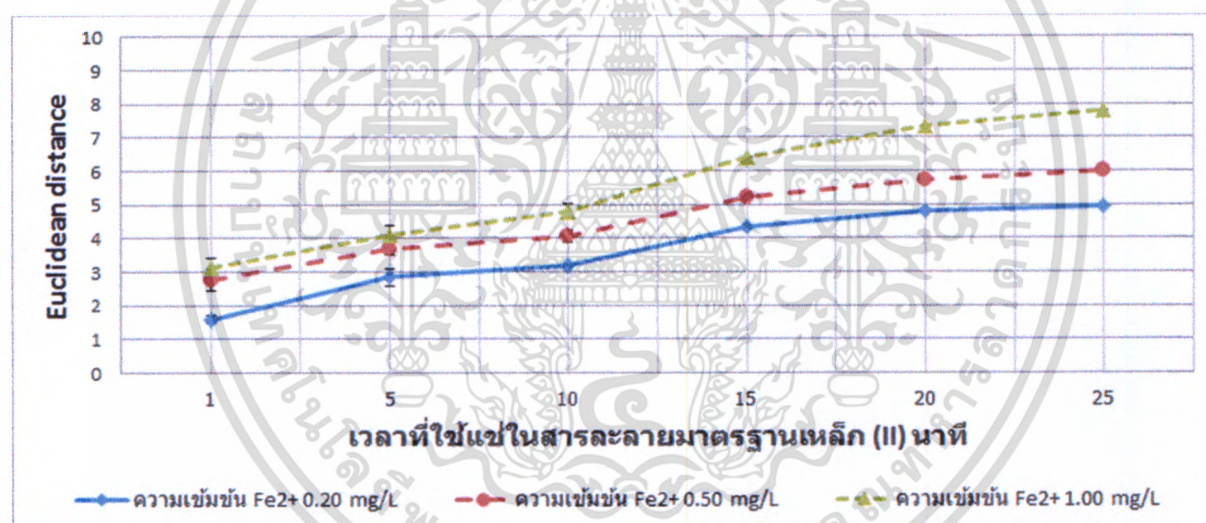
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่า Euclidean distance เมื่อทดลองแช่แผ่นกระดาษทดสอบในสารละลายไอออนเหล็ก (II) ที่มีปริมาตร 0.1 ถึง 0.4 มิลลิกรัมต่อลิตร และ ตั้งแต่เวลา (ก) 1 นาที, (ข) 5 นาที, (ค) 10 นาที, (ง) 15 นาที, (จ) 20 นาที และ (ฉ) 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.4 และ รูปที่ 4.5 พบว่าแต่ละความเข้มข้นของสารละลายไอออนเหล็ก (II) ที่ใช้ทดลองเมื่อใช้ปริมาตรเพิ่มขึ้นในช่วง 0.10 ถึง 0.40 มิลลิลิตร ค่า ED ที่ได้มีค่าคงที่ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาตรไม่ได้เป็นการเพิ่มปริมาณของไอออนเหล็ก (II) ที่จะทำปฏิกิริยาเกิดเป็นสารเชิงซ้อนบนแผ่นกระดาษทดสอบ การเพิ่มขึ้นของค่า ED ไม่ขึ้นกับปริมาตรของสารละลายที่ใช้ในการแช่แผ่นกระดาษทดสอบ

4.5 ศึกษาผลของเวลาที่ใช้แช่แผ่นกระดาษทดสอบ

เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเป็นปัจจัยพื้นฐานที่ส่งผลต่อความสมบูรณ์ในการเกิดปฏิกิริยา จึงศึกษาผลของปัจจัยนี้ โดยให้เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาในงานวิจัยนี้ คือ เวลาที่ใช้แช่แผ่นกระดาษทดสอบในสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) ในการทดลองหัวข้อนี้ได้แช่แผ่นกระดาษทดสอบเป็นเวลาต่าง ๆ กัน ตั้งแต่ 1 นาที ถึง 30 นาที ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ED กับเวลาที่ใช้ในการแช่แผ่นกระดาษทดสอบในสารละลายไอออนเหล็ก (II) ปริมาตร 0.10 มิลลิลิตร

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.4 และ รูปที่ 4.5 พบว่าในการทดลองแช่แผ่นกระดาษทดสอบเป็นเวลา 1, 5 และ 10 นาที จะให้ค่า ED ของแต่ละจุดที่ทดลองมีความเบี่ยงเบนมากกว่าแช่แผ่นกระดาษทดสอบเป็นเวลา 15, 20 และ 30 นาที ดังนั้นการใช้เวลาในการแช่แผ่นกระดาษทดสอบที่นานขึ้น มีผลทำให้ค่า ED มีความเบี่ยงเบนลดลง และ พบว่าการแช่ในช่วงเวลา 15, 20 และ 30 นาทีให้ความแตกต่างของเส้นกราฟในแต่ละความเข้มข้นอย่างชัดเจนขึ้น นอกจากนี้พบอีกว่าเมื่อเวลาที่ใช้ในการแช่นานขึ้น ค่า ED จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย แสดงให้เห็นว่าต้องให้ระยะเวลาช่วงหนึ่งในเกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ระหว่างไอออนเหล็ก (II) กับออร์โทฟอสเฟตเพื่อเกิดเป็นสารเชิงซ้อนที่มีสีแดงอมส้มบนแผ่นกระดาษทดสอบ ในการทดลองนี้จึงเลือกใช้เวลาในการแช่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15 นาที เพื่อให้การวิเคราะห์มีความรวดเร็ว แต่ยังคงผลการทดลองที่แยกแยะความแตกต่างของความเข้มข้นของไอออนเหล็ก (II) (0.20, 0.50 และ 1.00 มิลลิกรัมต่อลิตร) ไว้ได้ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของค่า ED จะแปรผันตามความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน Fe(II)

4.6 การวิเคราะห์ตัวอย่างเปรียบเทียบผลกับวิธีมาตรฐาน

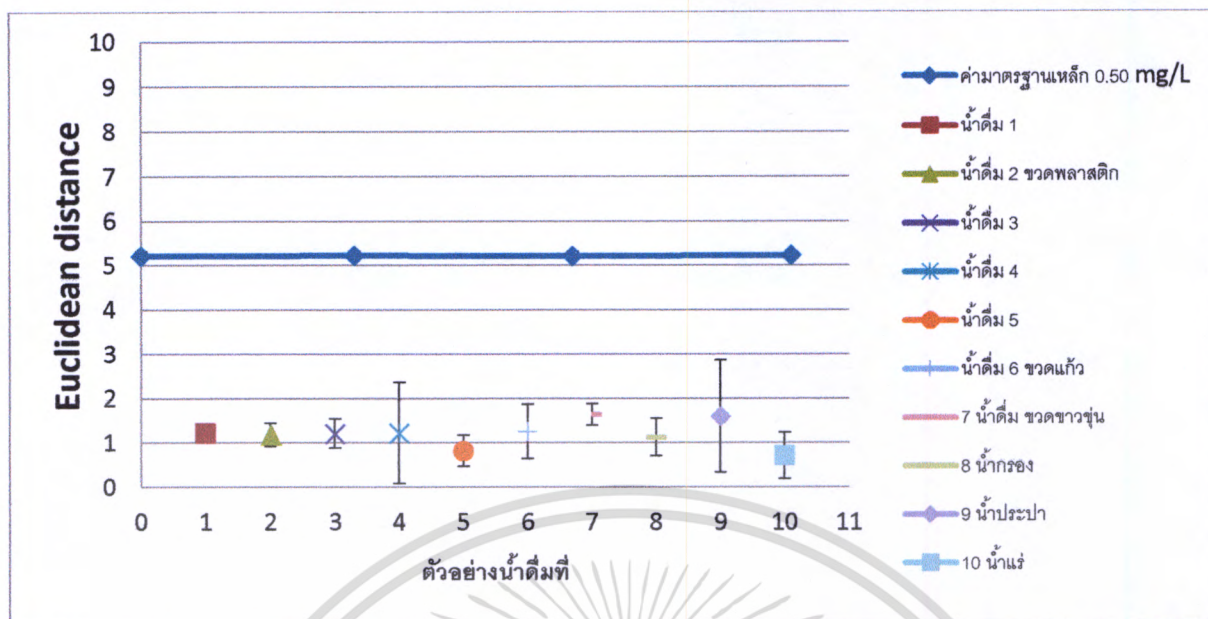
4.6.1 การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำด้วยวิธีแซ่แผ่นกระดาษทดสอบ

ประยุกต์วิธีวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้น ซึ่งเป็นการตรวจสอบโดยแซ่แผ่นกระดาษทดสอบที่ตรึงรีเอเจนต์คือ ออโทพีนเนนโทรลีน ความเข้มข้น 0.20 % w/v ไว้ด้วยกระบวนการโซล-เจล นำไปใช้วิเคราะห์ปริมาณเหล็กในตัวอย่างน้ำ โดยนำน้ำดื่มมาผ่านกระบวนการเตรียมตัวอย่างน้ำดื่ม แล้วทำการวิเคราะห์เชิงกึ่งปริมาณ โดยแซ่แผ่นกระดาษทดสอบในตัวอย่างน้ำ หรือ สารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) ได้ผลการทดลองไปเปรียบเทียบค่า ED ของตัวอย่างน้ำแต่ละตัวอย่างกับค่า ED ของสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) ความเข้มข้น 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตรแสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.6

ตารางที่ 4.2 แสดงค่า ED ที่คำนวณได้จากตัวอย่างน้ำที่วิเคราะห์ด้วยวิธีแซ่แผ่นกระดาษทดสอบในสารละลาย

ตัวอย่างน้ำ	ค่า Euclidean Distance
น้ำดื่ม 1	1.221 ± 0.171
น้ำดื่ม 2	1.177 ± 0.259
น้ำดื่ม 3	1.207 ± 0.326
น้ำดื่ม 4	1.220 ± 1.137
น้ำดื่ม 5	0.820 ± 0.349
น้ำดื่ม 6 ขวดแก้ว	1.256 ± 0.617
น้ำดื่ม 7 ขวดขวด	1.644 ± 0.248
น้ำกรอง	1.124 ± 0.426
น้ำประปา	1.599 ± 1.267
น้ำแร่	0.711 ± 0.521
สารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) เข้มข้น 0.50 mg/L	5.133 ± 0.323

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



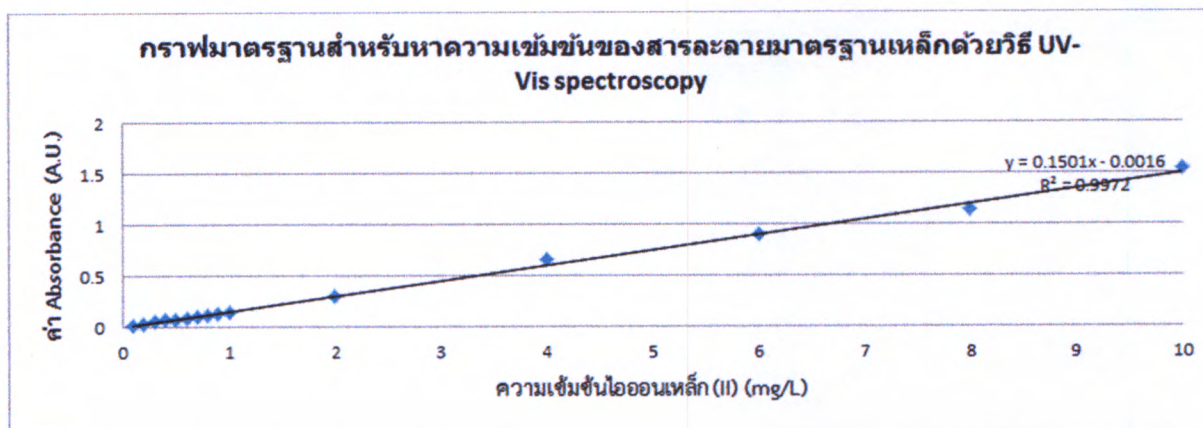
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอออนเหล็ก (II) ของตัวอย่างน้ำดื่ม 12 ตัวอย่างเทียบกับสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) ความเข้มข้น 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่า ค่า ED ที่คำนวณได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำทั้งหมดมีค่าต่ำกว่าค่า ED ของสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) ความเข้มข้น 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยค่า ED ของสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) ความเข้มข้น 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ± 0.009 ส่วนตัวอย่างน้ำมีค่า ED ที่มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในช่วง ± 0.171 ถึง ± 1.137 แผนภูมิในรูปที่ 4.6 สามารถแสดงการควบคุมคุณภาพน้ำดื่มตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 332 (พ.ศ.2521) ได้ ซึ่งกำหนดให้มีปริมาณเหล็กในน้ำดื่มได้ไม่เกิน 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.6.2 การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำด้วยวิธีสเปกโทรโฟโตเมทรี

ในงานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐานคือ วิธีสเปกโทรโฟโตเมทรี ซึ่งใช้หลักการเกิดสารเชิงซ้อนสีส้มระหว่างไอออนเหล็ก (II) กับออร์โทฟีแนนโทรีน และตรวจวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 508 นาโนเมตร ได้ผลการทดลองที่วิเคราะห์ตัวอย่างน้ำด้วยวิธีสเปกโทรโฟโตเมทรี แสดงในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) กับค่า Euclidean distance สำหรับการวัดด้วยวิธี UV-Vis Spectrophotometry ที่ความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) ช่วง 0.10 – 10.0 mg/L

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดลองสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) ที่ทำการวัดด้วยวิธีสเปกโทรโฟโตเมทรี

สารละลายมาตรฐาน ไอออนเหล็ก (II) (mg/L)	ค่าดูดกลืนแสง			ค่าดูดกลืนแสง โดยเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
0.10	0.014	0.014	0.017	0.0150 ± 0.002
0.20	0.031	0.031	0.031	0.0310 ± 0.000
0.30	0.060	0.060	0.060	0.0600 ± 0.000
0.40	0.063	0.062	0.062	0.0623 ± 0.001
0.50	0.067	0.064	0.065	0.0653 ± 0.002
0.60	0.082	0.082	0.085	0.0830 ± 0.002
0.70	0.089	0.094	0.094	0.0923 ± 0.003
0.80	0.110	0.116	0.116	0.1140 ± 0.003
0.90	0.125	0.129	0.129	0.1277 ± 0.002
1.00	0.141	0.144	0.146	0.1437 ± 0.003
2.00	0.288	0.296	0.297	0.2937 ± 0.005
4.00	0.651	0.651	0.649	0.6503 ± 0.001
6.00	0.894	0.895	0.896	0.8950 ± 0.001
8.00	1.134	1.134	1.136	1.1347 ± 0.001
10.00	1.534	1.535	1.536	1.5350 ± 0.001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดลองสารตัวอย่างน้ำดื่มประเภทต่างๆ ที่ทำการวัดด้วยวิธีวัดด้วยวิธีสเปกโทรโฟโตเมทรี

ตัวอย่างน้ำดื่ม	ค่าดูดกลืนแสง			ค่าดูดกลืนแสง โดยเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
น้ำดื่ม 1	0.003	0.004	0.004	0.0037 ± 0.001
น้ำดื่ม 2 ขวด พลาสติก	0.005	0.005	0.003	0.0043 ± 0.001
น้ำดื่ม 3	0.002	0.000	0.001	0.0010 ± 0.001
น้ำดื่ม 4	0.000	0.002	0.005	0.0023 ± 0.002
น้ำดื่ม 5	0.005	0.005	0.000	0.0033 ± 0.003
น้ำดื่ม 6 ขวดแก้ว	0.003	0.003	0.002	0.0027 ± 0.001
น้ำดื่ม ขวดชาขุน	0.013	0.011	0.002	0.0087 ± 0.006
น้ำกรอง	0.007	0.006	0.008	0.0070 ± 0.001
น้ำประปา	0.010	0.001	0.012	0.0077 ± 0.006
น้ำแร่	0.008	0.008	0.005	0.0070 ± 0.002

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.3 และ 4.4 พบว่าค่า ED ของวิธีแช่แผ่นกระดาษทดสอบที่พัฒนาขึ้นสามารถวัดปริมาณเหล็กในระดับต่ำกว่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ ในขณะที่วิธีสเปกโทรโฟโตเมทรีไม่สามารถวัดปริมาณเหล็กในระดับเดียวกันได้ จากการที่บางตัวอย่างวัดได้บ้างไม่ได้บ้าง และบางตัวอย่างวัดได้ค่าผันผวนสูง ถ้าต้องการให้วัดปริมาณเหล็กด้วยวิธีสเปกโทรโฟโตเมทรีได้ ต้องเตรียมตัวอย่างน้ำดื่มวิธีการสกัดด้วย normal-benzoyl alcohol หรือ isoamyl alcohol และเติม บาโทพีแนนโทรลีน (Bathophenanthroline; BPA) เป็นบัฟเฟอร์ให้สีตามวิธีมาตรฐาน ASTM-D-1068^[30]

4.6.3 การหาเปอร์เซ็นต์ recovery ของวิธีแช่แผ่นกระดาษทดสอบ

เปอร์เซ็นต์ recovery คือ ร้อยละการได้กลับคืนของสารตัวอย่างในวิธีที่ใช้วิเคราะห์ เพื่อสังเกตวิธีที่คิดขึ้นมาใหม่ว่า มีการทำให้สารตัวอย่างเกิดการสูญเสียไประหว่างการวิเคราะห์หรือไม่ ถ้ามี แล้วสารตัวอย่างสูญเสียไปเท่าใด ถ้ามีการสูญเสียของสารตัวอย่างมากจะหมายถึงว่า วิธีวิเคราะห์ที่คิดขึ้นมาใหม่ไม่ดี วัดผลได้ต่ำกว่าความเป็นจริงเพราะสารได้สูญเสียไประหว่างการทดลอง แต่ถ้ามีการสูญเสียของสารตัวอย่างน้อยจะหมายถึงว่าวิธีวิเคราะห์ที่คิดขึ้นมาใหม่ดี วัดผลได้ตรงกับความเป็นจริง นิยมใช้กับการทดลองทางกายภาพของสารตัวอย่าง ซึ่งมีสูตรคำนวณดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

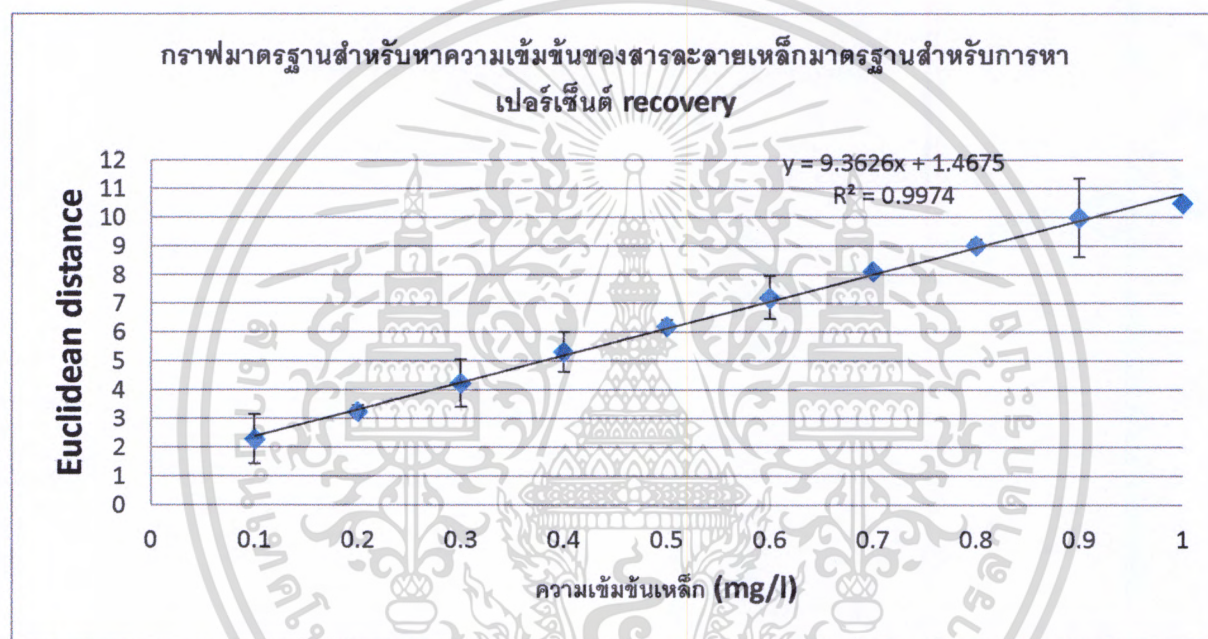
$$\% \text{ recovery} = [(C_{sp} - C_s)/C_a] \times 100$$

โดย C_{sp} คือ ความเข้มข้นของสารตัวอย่างที่ผ่านการเติมสารละลายมาตรฐาน

C_s คือ ความเข้มข้นของสารตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านการเติมสารละลายมาตรฐาน

C_a คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน

สำหรับการวิจัยนี้ สารตัวอย่างที่ใช้ คือ น้ำดื่ม ตรา คริสตัล, น้ำกรอง, น้ำประปา และ สารละลายมาตรฐาน คือ สารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) ได้ผลการคำนวณ เปอร์เซ็นต์ recovery ดังนี้



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) กับค่า Euclidean distance สำหรับการหาเปอร์เซ็นต์ recovery ของน้ำกรอง, น้ำดื่ม และ น้ำประปา

ตารางที่ 4.5 แสดงเปอร์เซ็นต์ recovery ของเหล็กในน้ำดื่ม ซึ่งในการทดลองใช้น้ำดื่ม, น้ำกรอง และ น้ำประปาเป็นตัวอย่างน้ำโดยเติมสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) ลงไป

ตัวอย่าง	สารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) เข้มข้น (mg/L)	ED	ความเข้มข้นเหล็ก ที่ทำได้ (mg/L)	% recovery
น้ำกรอง	0.00	1.168 ± 0.427	ND	-
	0.10	3.456 ± 0.358	0.21 ± 0.12	97.49
	0.20	4.450 ± 0.331	0.32 ± 0.12	97.94
	0.30	5.319 ± 0.979	0.41 ± 0.05	100.99
	0.40	6.367 ± 0.327	0.52 ± 0.12	98.08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง	สารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) เข้มข้น (mg/L)	ED	ความเข้มข้นเหล็ก ที่หาได้ (mg/L)	% recovery
น้ำกรอง	0.50	7.301 ± 0.281	0.62 ± 0.13	105.63
	0.60	8.386 ± 0.985	0.739 ± 0.05	106.38
	0.70	9.482 ± 0.539	0.86 ± 0.10	103.66
	0.80	10.398 ± 1.092	0.95 ± 0.04	102.57
	0.90	11.114 ± 0.555	1.03 ± 0.10	100.93
	1.00	11.804 ± 0.296	1.10 ± 0.13	100.04
น้ำดื่ม	0.00	0.774 ± 0.650	ND	-
	0.10	3.003 ± 1.312	0.16 ± 0.02	100.02
	0.20	3.961 ± 0.437	0.27 ± 0.11	100.82
	0.30	5.051 ± 0.452	0.38 ± 0.11	97.81
	0.40	5.988 ± 1.265	0.48 ± 0.02	98.08
	0.50	7.342 ± 0.448	0.63 ± 0.11	98.64
	0.60	8.442 ± 0.822	0.74 ± 0.07	100.14
	0.70	9.211 ± 0.526	0.83 ± 0.10	102.15
	0.80	10.028 ± 1.022	0.91 ± 0.05	102.30
	0.90	10.862 ± 0.518	1.00 ± 0.10	99.50
	1.00	11.277 ± 0.471	1.05 ± 0.11	101.32
น้ำประปา	0.00	1.707 ± 0.471	ND	-
	0.10	3.928 ± 0.690	0.26 ± 0.08	97.10
	0.20	4.865 ± 0.557	0.36 ± 0.10	97.04
	0.30	5.909 ± 0.818	0.47 ± 0.07	99.24
	0.40	6.919 ± 0.468	0.58 ± 0.11	98.05
	0.50	7.989 ± 0.699	0.70 ± 0.08	101.03
	0.60	8.949 ± 0.278	0.80 ± 0.13	100.47
	0.70	9.956 ± 0.308	0.91 ± 0.12	101.35
	0.80	10.963 ± 0.213	1.01 ± 0.13	102.59
	0.90	11.682 ± 0.554	1.06 ± 0.10	99.80
	1.00	12.148 ± 0.149	1.14 ± 0.14	99.46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.5 พบว่า เปอร์เซ็นต์ recovery ของเหล็กในน้ำดื่มในตัวอย่างน้ำดื่มและน้ำประปามีค่าอยู่ในช่วง 97 – 106 % ซึ่งมีค่าใกล้เคียง 100 % แสดงว่าวิธีการพัฒนากระดาษทดสอบที่ตรึงออปโทไฟแนนโตรีนด้วยกระบวนการโซล-เจล สามารถวิเคราะห์หาปริมาณเหล็กในตัวอย่างน้ำได้

4.7 การหาค่า LOD และ LOQ ของวิธีแช่แผ่นกระดาษทดสอบ

ในการทดลองที่ใช้สารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) ความเข้มข้น 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตรใส่ลงไปใน sample blank แล้วนำไปทดลองด้วยวิธีแช่แผ่นกระดาษทดสอบได้ผลการทดลองตามตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่า ED ที่ได้จากการทดลองวิธีแช่แผ่นกระดาษทดสอบเพื่อหาค่า LOD และ LOQ

ครั้งที่	ค่า ED ของสารละลายมาตรฐานเหล็กไอออน (II) ความเข้มข้น 0.20 mg/L
1	2.190
2	1.558
3	3.279
4	2.286
5	2.396
6	2.910
7	2.070
SD	0.564

จากสูตร LOD ที่ใช้สารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) เป็น $3SD^{[37]} = 1.70$ เมื่อเทียบกับสมการเส้นตรงในกราฟสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) รูปที่ 4.9 เพื่อหาเป็นปริมาณเหล็กได้ 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร และ LOQ ที่ใช้สารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) เป็น $10SD^{[37]} = 5.64$ เมื่อเทียบกับสมการเส้นตรงในกราฟสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) รูปที่ 4.9 เพื่อหาเป็นปริมาณเหล็กได้ 0.45 มิลลิกรัมต่อลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

นฤชิต ไพโรจน์^[8] ได้พัฒนาการตรวจวัดปริมาณเหล็กในเม็ดยาด้วยชุดกระดาษทดสอบแบบจุดที่เตรียมจากออปโทไฟแนนโทรลีน ความเข้มข้น 0.20 % w/v ในรูปโซล-เจล โดยอาศัยปฏิกิริยาการเกิดสารเชิงซ้อนของไอออนเหล็ก (II) ที่ผ่านการเตรียมสารด้วยไฮดรอกซีลามีนไฮโดรคลอไรด์ที่มากเกินไป เพื่อเปลี่ยนไอออนเหล็กในเม็ดยาที่มีทั้งไอออนเหล็ก (II) และไอออนเหล็ก (III) เป็นไอออนเหล็ก (II) ทั้งหมด ทำปฏิกิริยากับออปโทไฟแนนโทรลีนในชุดกระดาษทดสอบกลายเป็นสารเชิงซ้อนเฟอร์โรอินที่มีสีแดงส้ม แล้วนำมาสแกนให้ได้ไฟล์ภาพในคอมพิวเตอร์ ก่อนตรวจวัดความเข้มข้นของสารเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นด้วยโปรแกรม imageJ แล้วคำนวณเป็นค่า ED เพื่อหาความเข้มข้นเหล็กในเม็ดยาโดยอาศัยเทียบกับกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) กับค่า ED เป็นวิธีที่สะดวก และวัดได้ผลปริมาณเหล็กที่รวดเร็ว แต่มีข้อเสียที่วัดปริมาณไอออนเหล็ก (II) ได้ต่ำสุดเพียงความเข้มข้น 7.95 มิลลิกรัมต่อลิตร ในงานวิจัยนี้จึงนำงานของ นฤชิต ไพโรจน์ มาปรับปรุงให้สามารถตรวจวัดปริมาณเหล็กในน้ำดื่มที่มีการควบคุมคุณภาพตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 332 (พ.ศ.2521) ที่มีเกณฑ์ให้มีปริมาณเหล็กในน้ำดื่มไม่เกิน 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร

เริ่มแรกได้ใช้วิธีฉีดสารละลายไหลผ่านโดยใช้อุปกรณ์สำหรับกรองสารละลายที่เรียกว่า micropore เพื่อดักจับปริมาณไอออนเหล็ก (II) ให้สะสมบนแผ่นกระดาษทดสอบให้มากพอจนเห็นสีส้มของสารเชิงซ้อน แล้วนำไปสแกนให้ได้ไฟล์ภาพในคอมพิวเตอร์ ก่อนนำตรวจวัดความเข้มข้นของสารเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นด้วยโปรแกรม imageJ แล้วคำนวณเป็นค่า ED พบว่า วิธีฉีดสารละลายไหลผ่านอุปกรณ์ micropore ให้ค่า %RSD สูงถึง 67.97 แสดงว่าผลการทดลองในแต่ละครั้งมีการเบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยมาก จากการดูสารละลายมาตรฐานไว้ในหลอดฉีดยา แล้วฉีดผ่านแผ่นกระดาษทดสอบที่บรรจุไว้ในอุปกรณ์ micropore แต่ละครั้งจะใช้เวลาในการฉีดผ่านไปไม่เท่ากัน ปริมาณไอออนเหล็ก (II) ที่เก็บกักบนแผ่นกระดาษกรองในอุปกรณ์ micropore สำหรับการฉีดด้วยหลอดฉีดยาในแต่ละครั้งไม่เท่ากัน ส่งผลถึงความเข้มข้นของสารเชิงซ้อนบนแผ่นกระดาษทดสอบที่ได้แต่ละครั้งมีความแตกต่างกันไป

ต่อมาได้เปลี่ยนเป็นวิธีแช่แผ่นกระดาษทดสอบ ซึ่งแช่แผ่นกระดาษทดสอบลงในสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) ที่บรรจุลงในหลอดฉีดยา ไอออนเหล็ก (II) จะทำปฏิกิริยากับออปโทไฟแนนโทรลีนที่ถูกตรึงอยู่ในโซล-เจลบนแผ่นกระดาษทดสอบเกิดเป็นสารเชิงซ้อนสีส้ม แล้วนำไปสแกนให้ได้ไฟล์ภาพในคอมพิวเตอร์ ก่อนนำตรวจวัดความเข้มข้นของสารเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นด้วยโปรแกรม imageJ แล้วคำนวณเป็นค่า ED พบว่า วิธีแช่แผ่นกระดาษทดสอบให้ค่า %RSD ได้เพียง 19.80 ซึ่งต่ำกว่าวิธีฉีดสารละลายไหลผ่าน แสดงว่าผลการทดลองในแต่ละครั้งมีความเบี่ยงเบนน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีฉีดสารละลายไหลผ่านอุปกรณ์ micropore และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในวิธีแช่แผ่นกระดาษทดสอบทำการทดลองกับสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) ที่ความเข้มข้นต่ำกว่าวิธีฉีดสารละลายไหลผ่านอีกด้วย โดยวิธีแช่แผ่นกระดาษทดสอบสามารถทดลองกับสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) ในระดับความเข้มข้นที่ต่ำกว่า และให้ค่า %RSD ต่ำกว่าวิธีฉีดสารละลายไหลผ่าน ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีแช่แผ่นกระดาษทดสอบสำหรับการทดลองต่อไป

เนื่องจากการสังเกตจุดสีบนแผ่นกระดาษทดสอบในไฟล์ภาพที่ได้หลังจากการสแกน พบว่า จุดสีในไฟล์ภาพที่ได้หลังจากการสแกนมีความเข้มสีมากกว่าจุดสีบนแผ่นกระดาษทดสอบที่พิมพ์ออกมา ความแตกต่างนี้เกิดจากการใช้ระบบแถบแม่สีไม่เหมือนกัน โดยเครื่องพิมพ์ใช้ระบบแถบแม่สี CMYK ซึ่งเป็นระบบที่ไม่มีการปรับความสว่างของสี ในขณะที่เครื่องสแกนแบบตั้งโต๊ะที่ใช้ในการวิจัยเป็น Canon รุ่น LiDE 210 ใช้ระบบแถบแม่สี Lab ซึ่งเป็นระบบที่มีการปรับความสว่างของสีได้ จึงทดลองปรับค่าความสว่างที่ใช้ในการสแกนภาพจุดสีในช่วงสเกล 0 ถึง -50 พบว่า เมื่อใช้ค่าความสว่างเป็น 0 ค่า ED ที่คำนวณได้ผลแต่ละจุดสีมีค่าน้อยมากจนใกล้เคียงกับค่า blank เป็นผลมาจากความสว่างของหลอดไฟที่มากเกินไปจนส่งผลต่อความเข้มจุดสีในไฟล์ภาพจางลง เมื่อปรับลดความสว่างที่ใช้ในการสแกนต่ำกว่าระดับ 0 ไปเรื่อยๆ พบว่า ความเข้มจุดสีในไฟล์ภาพชัดเจนเรื่อยๆ และการคำนวณค่า ED ก็คำนวณได้ละเอียดขึ้น จนสเกลความสว่างเป็น -50 ความเข้มจุดสีในไฟล์ภาพชัดสุดและการคำนวณค่า ED จะตรงกับสภาพของจุดสีบนกระดาษทดสอบก่อนการสแกนมากที่สุด ถ้าสเกลความสว่างเกิน -50 รูปภาพในไฟล์จะเริ่มมืดลงเป็นสีเทาดำจนกลายเป็นสีดำสนิททำให้มองไม่เห็นภาพ ในงานวิจัยนี้จึงเลือกความสว่างที่ใช้สแกนเป็น -50

เมื่อวางแผ่นกระดาษทดสอบบนโต๊ะปฏิบัติการที่ไม่สะอาดส่งผลต่อจุดสีบนกระดาษทดสอบ ทำให้ค่า ED ที่คำนวณได้มีค่าเบี่ยงเบนมาก ในขณะที่วางแผ่นกระดาษทดสอบบนฝาของภาตหลุมที่ผ่านการทำความสะอาด ค่า ED ที่คำนวณได้มีค่าเบี่ยงเบนต่ำกว่ามาก จึงควรระมัดระวังสถานที่ที่ใช้พักแผ่นกระดาษทดสอบให้แห้ง ต้องคำนึงถึงความสะอาดด้วย

ปัจจัยที่มีผลต่อวิธีแช่แผ่นกระดาษทดสอบให้เกิดความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาเกิดสารเชิงซ้อน คือ ปริมาณของสารตั้งต้น และ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา จึงได้ทำการทดลองโดยกำหนดปริมาณของสารตั้งต้นเป็นปริมาตรของสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) ในช่วงปริมาตร 0.10 ถึง 0.40 มิลลิลิตร เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเป็นเวลาที่แช่แผ่นกระดาษทดสอบตั้งแต่ 1 นาที ถึง 30 นาที พบว่า การทดสอบโดยใช้ปริมาตรในช่วง 0.10 ถึง 0.40 มิลลิลิตรสำหรับแช่แผ่นกระดาษทดสอบนั้นให้ค่า ED ใกล้เคียงกัน แสดงว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาตรในช่วงที่ทำการทดลองไม่ได้เป็นการเพิ่มปริมาณของไอออนเหล็ก (II) ที่จะทำปฏิกิริยาเกิดเป็นสารเชิงซ้อนบนแผ่นกระดาษทดสอบ และเมื่อทดลองโดยเปลี่ยนเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยานานขึ้น พบว่า ค่า ED ที่คำนวณได้มีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการแช่ และเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 1, 5 และ 10 นาทีให้ค่า ED ที่เบี่ยงเบนมากกว่าเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 15, 20 และ 30 นาที แสดงว่าการทำปฏิกิริยาระหว่างไอออนเหล็ก (II) กับบอโรไทน์แนโนทอร์สเกิดเป็นสารเชิงซ้อนสี่สมต้องใช้เวลาช่วงหนึ่งสำหรับการเกิดปฏิกิริยา เพื่อเกิดเป็นสารเชิงซ้อนที่สมบูรณ์ในงานวิจัยนี้เลือกเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่ 15 นาที เพื่อให้การวิเคราะห์มีความรวดเร็ว แต่ยังคงผลการทดลองที่แยกแยะความแตกต่างของความเข้มข้นของไอออนเหล็ก (II) ไว้ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อใช้วิธีแช่แผ่นกระดาษทดสอบไปทดสอบหาปริมาณเหล็กในตัวอย่งน้ำดื่ม น้ำประปา และ น้ำกรอง พบว่า วิธีทดสอบนี้สามารถแสดงให้เห็นว่า ตัวอย่งน้ำทั้งหมดมีปริมาณเหล็กไม่เกิน 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตรตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 332 (พ.ศ.2521)

เมื่อทดลองวิเคราะห์หาปริมาณเหล็กในตัวอย่งน้ำด้วยวิธีมาตรฐาน คือ วิธีสเปกโทรโฟโตเมทรี ซึ่งเป็นวิธีอาศัยการตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารเชิงซ้อนระหว่างไอออนเหล็ก (II) กับอโทธิพีแนนโธรลีนที่ความยาวคลื่น 508 นาโนเมตร พบว่า วิธีสเปกโทรโฟโตเมทรีนี้ไม่สามารถวิเคราะห์ตัวอย่งน้ำซึ่งมีเหล็กปริมาณต่ำกว่า 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร ถ้าต้องการวิเคราะห์ปริมาณเหล็กที่ต่ำกว่า 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตรต้องใช้วิธีมาตรฐาน ASTM D 1068 ซึ่งต้องใช้การสกัดสารเชิงซ้อนระหว่างไอออนเหล็ก (II) กับอโทธิพีแนนโธรลีนด้วย normal-benzoyl alcohol หรือ isoamyl alcohol และเติม บาโทธิพีแนนโธรลีน (Bathophenanthroline; BPA) เป็นบัฟเฟอร์

การทดลองหาเปอร์เซ็นต์ recovery ของวิธีแช่แผ่นกระดาษทดสอบเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้น พบว่า การทดลองด้วยวิธีแช่แผ่นกระดาษทดสอบกับน้ำดื่ม น้ำกรอง และน้ำประปา ให้ค่าเปอร์เซ็นต์ recovery อยู่ในช่วง 97 ถึง 103 % ซึ่งสามารถยอมรับความถูกต้องของวิธีที่พัฒนานี้ได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

วิธีแช่แผ่นกระดาษทดสอบใช้เวลาช่วงหนึ่งสำหรับการฝังแผ่นกระดาษทดสอบหลังจากแช่สารตัวอย่งและสารละลายมาตรฐานไอออนเหล็ก (II) นานมาก การฝังแผ่นกระดาษทดสอบนี้ อาจทำได้โดยอาศัยการตากแดด หรือ อาศัยอุปกรณ์ที่ให้ความร้อนเพื่อให้แห้งได้เร็วขึ้น โดยไม่ส่งผลต่อผลการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- [1] ปราโมช เชี่ยวชาญ, 2552. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สุขภาพฉบับที่ 3 [จุลสาร], สภาวิชาชีพวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
- [2] V.S. Anusuya Devi and V. Krishna Reddy, 2012. "Spectrophotometric determination of iron (II) and cobalt (II) by direct, derivative, and simultaneous methods using 2-hydroxy-1-naphthaldehyde-p-hydroxybenzoic hydrazone" *International Journal of Analytical Chemistry*, 2012, 26-50.
- [3] I. Durukan, Ç.A. Şahin, N. Şatiroğlu and S. Bektaş, 2011. "Determination of iron and copper in food samples by flow injection cloud point extraction flame atomic absorption spectrometry" *Microchemical Journal*, 99(1), 159-163.
- [4] B. Peng, Y-P. Shen, Z-T. Gao, M. Zhou and Y-J. Ma, 2015. "Determination of total iron in water and foods by dispersive liquid-liquid microextraction coupled with microvolume UV-VIS Spectrophotometry". *Food Chemistry*, 176, 288-293.
- [5] Y-N. Huang, D-X. Yuan, M-H. Dai and Y-X. Liu, 2012. "Reverse flow injection analysis method for catalytic spectrophotometric determination of iron in estuarine and coastal water: A comparison with normal flow injection analysis". *Talanta*, 93, 86-93.
- [6] F. Ayadin and M. Soylak, 2010. "Separation, preconcentration and inductively coupled plasma-mass spectrometric (ICP-MS) determination of thorium (IV), Titanium (IV), iron (II), lead (II) and chromium (III) on 2-nitroso-1-naphthol impregnated MCI GEL CHP20P resin" *Journal of Hazardous Materials*, 173(1-3), 669-674.
- [7] P. Nowak, K. Śpiwak, M. Brindell, M. Woźniakiewicz, G. Stochel and et al., 2013. "Separation of iron-free and iron-saturated of transferrin and lactoferrin via capillary electro-phoresis performed in Fused-silica and neutral capillaries". *Journal of Chromatography A*, 1321, 127-132.
- [8] นฤชิต ไพโรจน์, 2555. ชุดทดสอบแบบจุดโดยใช้โซล-เจลเจือออโทพีแนโนโทรลีนสำหรับการวิเคราะห์เชิงปริมาณของเหล็ก (II) [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี], คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [9] C.J. Brinker and G.W.Scherer, 1990. *Sol-Gel Science the Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing*, United Kingdom Edition, Academic Press INC.
- [10] N.Y. Turova, E.P. Turevskaya, V.G. Kessler and M.I. Yanovskaya, 2002. *The Chemistry of Metal Alkoxides*, Kluwer Academic Publishers, United States of America.
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] B. Viswanathan, S. Sivasanker and A.V. Ramaswamy, 2002. Catalysis Principles and Applications, Narosa Publishing House, India.
- [12] Sol-Gel Methods [Online]. http://www.uio.no/studier/emner/matnat/kjemi/KJM5100/h06/undervisningsmateriale/10KJM5100_2006_sol_gel_d.pdf; Search: 26 June 2015.
- [13] Sol-Gel Chemistry [Online]. <http://www.ncu.edu.tw/~stchiang/ch848/related/set1/The%20Sol-gel%20Gateway%20%20Educational%20materials.files/solgel.htm>; Search: 26 June 2015.
- [14] รศ. อรุณี คงศักดิ์ไพศาล, 2550. ปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์ 1, คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [15] H.A. Mckenzie, 1955. The Stability Constant of The Tris-1,10-Phenanthroline Ferrous Ion. Australian Journal of The Chemistry, 8(4), 569-570.
- [16] ImageJ [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/ImageJ>; Search: 1 July 2015.
- [17] Mini Fast Color Converter [Online]. Available: <http://software.thaiware.com/11842-Mini-Fast-Color-Converter.html>; Search: 1 July 2015.
- [18] The Nernst Equation [Online]. Available: http://www.everyscience.com/Chemistry/Inorganic/Redox_Reactions/c.1228.php; Search: 1 July 2015.
- [19] H. Tributsch and J. Rojas-Chapana, editors. 15th International Biohydrometallurgy Symposium; 2003 Sep 14-19; Athens, Greece.
- [20] D. Lazić, B. skundrić, J. Penavin-Škundrić, S. Sladojević, L. Vasiljević, D. Blagojević, et al., 2010. Stability of Tris-1,10-Phenanthroline Iron (II) Complex in Different Composite. Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly, 16(2), 193-198.
- [21] สีในงานคอมพิวเตอร์กราฟิก [Online]. Available: http://lpruofteng.blogspot.com/2012/04/blog-post_04.html; Search: 1 July 2015.
- [22] ยุคของคอมพิวเตอร์ [Online]. Available: http://www.chandra.ac.th/office/ict/document/it/it01/com_02.htm; Search: 1 July 2015.
- [23] RGB แตกต่างกับ CMYK อย่างไร [Online]. Available: http://www.qghservice.com/index.php?lay=boardshow&ac=webboard_show&WBntype=1&No=1277212; Search: 1 July 2015.
- [24] ระบบสี [Online]. Available: <https://sites.google.com/site/wbicomputergraphics/rabb-si-color-model>; Search: 1 July 2015.
- [25] เตียว ใจบุญ, 2557. พืชคณิตเชิงเส้น 1, โรงเรียนมหิตลวิทยานุสรณ์.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [26] รศ.ดร. พยุง มีสีจ, 2557. Advance Match of Engineers, คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [27] จรัส บุญยธรรมา, 2557. เครื่องสแกนทำงานอย่างไร, คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก.
- [28] เครื่องสแกน [Online]. Available: <http://www.prakan.ac.th/Link-Data/web-it/data/web%20dream/scanner.htm>; Search: 2 July 2015.
- [29] Scanners [Online]. Available: <http://www.pcmag.com/encyclopedia/term/50852/scanner>; Search: 4 July 2015.
- [30] Scanners [Online]. Available: <http://www.pctechguide.com/scanners>; Search: 2 July 2015.
- [31] Choosing The Best Flatbed Scanner On The Market [Online]. Available: <http://animationreporter.com/archives/46>; Search: 3 July 2015.
- [32] Fujitsu ScanSnap S1500 Instant PDF Multi Sheet-Fed Scanner [Online]. Available: <http://www.fujitsu.com/us/products/computing/peripheral/scanners/product/eol/s1500/>; Search: 3 July 2015.
- [33] The Ultimate in Dedicated Film Scanners for the Home and Office, the Plustek OpticFilm 120 [Online]. Available: <http://cameraphoto.com/ultimate-dedicated-film-scanners-home-plustek-opticfilm-120/>; Search: 3 July 2015.
- [34] high end Drum Scanner DS Screen 747SG [Online]. Available: http://www.alibaba.com/product-detail/high-end-Drum-Scanner-DS-Screen_104621794/showimage.html; Search: 3 July 2015.
- [35] American Society for Testing and Materials, 2003. Certificate by Authority of the United States of America Legally Binding Document. Washington: The Executive Director Office of the Federal Register.
- [36] Acrodisc[®] Minispine syringe filters [Online]. Available: <http://www.sigmaldrich.com/catalog/product/aldrich/z260436?lang=en®ion=TH>; Search: 15 August 2015.
- [37] การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบ [Online]. Available: <http://reo06.mnre.go.th/home/images/upload/file/report/Jurairut070509.pdf>; Search: 15 August 2015.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ก. อภิธานศัพท์

- I คือ ความเข้มสีโดยรวม
- I_R คือ ความเข้มสีแดงของแถบแม่สี RGB
- I_G คือ ความเข้มสีเขียวของแถบแม่สี RGB
- I_B คือ ความเข้มสีน้ำเงินของแถบแม่สี RGB
- $(\Delta I_R)^2$ คือ ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความเข้มสีแดงเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยความเข้มสีแดงของ blank
- $(\Delta I_G)^2$ คือ ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความเข้มสีเขียวเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยความเข้มสีเขียวของ blank
- $(\Delta I_B)^2$ คือ ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความเข้มสีน้ำเงินเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยความเข้มสีน้ำเงินของ blank
- ผลรวม $(\Delta I)^2$ คือ $(\Delta I_R)^2 + (\Delta I_G)^2 + (\Delta I_B)^2$
- ถอตราที่ 2 คือ ถอตราที่ 2 ของผลรวม $(\Delta I)^2$
- SD คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ข. ตารางแสดงการคำนวณค่า Euclidean Distance (ED) ของสารละลายมาตรฐานของ ไอออนเหล็ก (II)

ตัวอย่าง	I_R	I_G	I_B	$(\Delta I_R)^2$	$(\Delta I_G)^2$	$(\Delta I_B)^2$	ผลรวม $(\Delta I)^2$	ถอตราที่ 2
blank	198.607	198.082	191.439	-	-	-	-	-
	199.536	199.847	193.659	-	-	-	-	-
	199.786	199.424	192.808	-	-	-	-	-
I โดยเฉลี่ย	199.452	199.118	192.635	-	-	-	-	-
SD	0.737	0.922	1.120	-	-	-	-	-
สารละลาย มาตรฐานไอออน เหล็ก (II) เข้มข้น 0.10 mg/L	198.929	198.163	192.324	0.289	0.471	0.103	0.863	0.929
	199.536	198.681	192.244					
	198.278	198.449	192.377					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง	I _R	I _G	I _B	(ΔI _R) ²	(ΔI _G) ²	(ΔI _B) ²	ผลรวม (ΔI) ²	ถอตกรากที่ 2
I โดยเฉลี่ย	198.914	198.431	192.315					
SD	0.629	0.259	0.067					
สารละลาย มาตรฐานไอออน เหล็ก (II) เข้มข้น 0.20 mg/L	198.966 199.464 199.710	198.127 198.416 198.788	191.645 191.534 192.194	0.005	0.454	0.713	1.172	1.083
I โดยเฉลี่ย	199.380	198.444	191.791					
SD	0.379	0.331	0.353					
สารละลาย มาตรฐานไอออน เหล็ก (II) เข้มข้น 0.30 mg/L	199.093 200.058 199.665	198.129 198.775 198.486	192.015 191.523 191.263	0.024	0.428	1.071	1.523	1.234
I โดยเฉลี่ย	199.605	198.463	191.600					
SD	0.485	0.324	0.382					
สารละลาย มาตรฐานไอออน เหล็ก (II) เข้มข้น 0.40 mg/L	199.280 199.883 197.311	198.094 198.519 197.859	191.743 191.727 191.942	0.394	0.922	0.691	2.007	1.416
I โดยเฉลี่ย	198.825	198.157	191.804					
SD	1.345	0.335	0.120					
สารละลาย มาตรฐานไอออน เหล็ก (II) เข้มข้น 0.50 mg/L	198.936 199.461 199.115	197.588 198.449 198.039	190.901 191.521 191.403	0.079	1.193	1.851	3.123	1.767
I โดยเฉลี่ย	199.170	198.025	191.275					
SD	0.267	0.430	0.329					
สารละลาย มาตรฐานไอออน เหล็ก (II) เข้มข้น 0.60 mg/L	198.791 198.231 199.591	197.200 197.238 198.257	191.344 191.686 191.444	0.338	2.411	1.309	4.057	2.014
I โดยเฉลี่ย	198.871	197.565	191.491					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง	I _R	I _G	I _B	(ΔI _R) ²	(ΔI _G) ²	(ΔI _B) ²	ผลรวม (ΔI) ²	ถอตรางที่ 2
SD	0.683	0.600	0.176					
สารละลาย มาตรฐานไอออน เหล็ก (II) เข้มข้น 0.70 mg/L	199.242	197.904	191.255	0.128	2.423	2.663	5.215	2.284
	198.614	196.766	190.658					
	199.425	198.013	191.097					
I โดยเฉลี่ย	199.094	197.561	191.003					
SD	0.425	0.691	0.309					
สารละลาย มาตรฐานไอออน เหล็ก (II) เข้มข้น 0.80 mg/L	199.667	197.824	190.681	0.057	2.762	4.182	7.001	2.646
	198.700	197.001	190.631					
	199.274	197.542	190.459					
I โดยเฉลี่ย	199.214	197.456	190.590					
SD	0.486	0.418	0.116					
สารละลาย มาตรฐานไอออน เหล็ก (II) เข้มข้น 0.90 mg/L	199.620	197.606	190.354	0.017	2.611	5.443	8.071	2.841
	199.953	198.009	190.393					
	198.393	196.890	190.160					
I โดยเฉลี่ย	199.322	197.502	190.302					
SD	0.822	0.567	0.125					
สารละลาย มาตรฐานไอออน เหล็ก (II) เข้มข้น 1.00 mg/L	198.910	197.194	190.285	0.073	3.061	6.011	9.145	3.024
	199.528	197.287	189.799					
	199.109	197.623	190.467					
I โดยเฉลี่ย	199.182	197.368	190.184					
SD	0.315	0.226	0.345					

ค. เอกสารที่ตีพิมพ์ในงานประชุมวิชาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความฉบับเต็ม

การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัย
ระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 34

วันศุกร์ที่ 27 มีนาคม 2558

ณ อาคารเรียนรวม คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น



บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น
GRADUATE SCHOOL KHON KAEN UNIVERSITY

การพัฒนากระดาษทดสอบที่ตรึงอโทพีแนนโทรลีนด้วยกระบวนการโซล-เจล
สำหรับวิเคราะห์ปริมาณเหล็ก

**Development of Paper Test Kit Doped Orthophenanthroline by Sol-Gel Process
for Determination of Iron**

ฉันทัท วังษิตี (Chantas Wongdee)* ดร.วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ (Dr. Wiboon Praditweangkum)**

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาชุดทดสอบบนกระดาษสำหรับวิเคราะห์หาปริมาณเหล็ก ทำการเติมอโทพีแนนโทรลีนเป็นส่วนผสมในสารละลายโซล-เจล แล้วใช้ไมโครปิเปตหยดสารละลายนี้ 10 ไมโครลิตรลงบนกระดาษกรอง ตัดแผ่นกระดาษกรองนี้เป็นรูปวงกลมตามรอยขอบของสารละลายโซล-เจลได้เป็นกระดาษทดสอบ สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบปริมาณเหล็กคือทำการแช่แผ่นกระดาษทดสอบในสารละลายผสมระหว่างสารละลายเหล็กกับสารละลายไฮดรอกซีลามีนไฮโดรคลอไรด์ที่ปรับ pH เป็น 4.5 ปริมาตรในช่วง 0.10-0.40 มิลลิเมตร เป็นเวลา 15 นาที จะเกิดสารเชิงซ้อนระหว่างเหล็ก (II) กับอโทพีแนนโทรลีนเป็นสีส้มบนกระดาษทดสอบ นำไปสแกนรูปสีด้วยเครื่องสแกน ตั้งค่าความละเอียดในการสแกนเท่ากับ 600 จุดต่อตารางนิ้ว และค่าความสว่างของหลอดไฟเท่ากับ -50 คำนวณหาค่าความแตกต่างความเข้มแสงด้วยโปรแกรม ImageJ กระดาษทดสอบนี้สามารถตรวจวัดความเข้มข้นของสารละลายเหล็กได้ถึงระดับ 0.20 มิลลิกรัมต่อลิตร

ABSTRACT

The paper test kit for determination of iron is developed. Orthophenanthroline is added as a gradient in sol-gel solution. Each 10 μ L of this solution is pipetted and dropped on a filter paper. This paper is cut as a circle around the edge of sol-gel and can be used as iron test paper. The optimum condition for iron testing is operated by soaking a test paper in mixing solution of iron and hydroxylaminehydrochloride adjusted pH = 4.5, volumes range from 0.10 mL to 0.40 and reaction time for 15 minutes. The orange color of Fe(II)-orthophenanthroline complex is developed on test paper. This paper strip is scanned by a scanner as a color picture at 600 dpi resolution and -50 brightness. The Euclidean distance is calculated by using the ImageJ program. This developed test paper can be used to detect iron concentration down to 0.20 mg/L.

คำสำคัญ: ชุดทดสอบบนกระดาษ เหล็ก เครื่องสแกน

Key Words: Paper test kit, Iron, Scanner

* นักศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทนำ

เหล็กที่พบในดินและดินอยู่ในรูปสินแร่ที่ไม่ละลายน้ำ โดยที่ในดินมีแบคทีเรียสามารถย่อยสารอินทรีย์แล้วได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งละลายน้ำได้กรดคาร์บอนิก เมื่อกรดคาร์บอนิกไหลผ่านดินแร่เหล็กจะละลายเหล็กให้อยู่ในรูปเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ถ้าเป็นสภาวะที่ขาดออกซิเจน แบคทีเรียในชั้นดินที่มีสารอินทรีย์อยู่สามารถเปลี่ยนเหล็กเฟอร์ริก (Fe_2O_3) เป็นเหล็กเฟอร์รัส (FeO) ซึ่งถูกละลายด้วยกรดคาร์บอนิกเข้าสู่แหล่งน้ำได้เช่นกัน ถ้าในแหล่งน้ำมีปริมาณเหล็กเกิน 1 – 2 ppm จะมีรสหวานปนขม และขุ่น ไม่น่าอาไปบริโภค นอกจากนี้เมื่อนำมาทำการอุปโภค เช่น ซักผ้าก็เกิดรอยด่างบนเสื้อผ้าและคราบสนิม (ปราโมช เขียวชาญ, 2552) จากผลเสียเรื่องรสชาติของน้ำและความขุ่นของเฟอร์รัสไอออนที่ละลายในน้ำมากเกินไป ทำให้มีการควบคุมคุณภาพของไอออนเหล็กที่เจือปนในน้ำเพื่อให้ชาวบ้านได้ใช้น้ำที่สะอาดทั้งเรื่องสี กลิ่น รส และความปลอดภัยในน้ำดื่ม

การตรวจสอบไอออนเหล็กที่ละลายในน้ำทำได้หลายวิธี เช่น การวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยวิธีสเปกโทรโฟโตเมทรี (Devi VSA, Reddy VK, 2012) วิธีอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโทรเมทรี (Dunukan I et al., 2011) วิธีการสกัดด้วยวัฏภาคของเหลว-ของเหลว (Peng Bet al., 2015) วิธีโฟลโอินเจคชันอะนาไลซิส (Huang Y-N et al., 2012) วิธีอินดิคทีฟลิคชันเป็ลพลาสมา-แมสสเปกโทรเมทรี (Funda A, Mustofa S, 2010) วิธีคาพิลลารีอิเล็กโตรโฟรีซิส (Nowak P et al., 2013) เป็นต้น วิธีการวิเคราะห์เหล่านี้ส่วนใหญ่จะใช้เครื่องมือที่มีราคาแพงและมีวิธีการใช้งานที่ยุ่งยาก ต้องอาศัยความชำนาญในการปฏิบัติงาน วิธีที่นิยมใช้มากที่สุดคือวิธี UV-VIS สเปกโทรโฟโตเมทรี เป็นวิธีที่วัดค่าได้สะดวก รวดเร็ว เครื่องมือใช้งานง่าย มีอยู่ในห้องปฏิบัติการทั่วไปอยู่แล้ว

การวิเคราะห์เหล็กในตัวอย่างน้ำโดยทั่วไปมีขั้นตอนการเก็บตัวอย่างใส่ลงในขวดพลาสติก แล้วนำส่งไปให้ทางห้องปฏิบัติการตรวจวัด ซึ่งทำให้เสียเวลา

และเสียค่าใช้จ่าย นฤชิต (2555) ได้พัฒนาวิธีวิเคราะห์ปริมาณเหล็กในตัวอย่างน้ำที่สามารถวิเคราะห์บริเวณหน้างานได้ โดยใช้วิธีทดสอบแบบจุด (Spot test) บนกระดาษ ซึ่งเตรียมจุดรีเอเจนต์ด้วยกระบวนการโซล-เจลเป็นการตรึงออร์โธโทรีนบนโพรตีนที่อยู่ในโซล-เจลเมื่อผสมสารละลายเหล็กกับไฮดรอกซีลามีโนไฮโดรคลอไรด์ ในภาวะ $pH = 4.5$ เหล็ก (III) ที่มีในสารละลายจะเปลี่ยนเป็นเหล็ก (II) จากนั้นหยดลงบนจุดรีเอเจนต์จะเกิดสารเชิงซ้อนสีส้ม ระหว่างเหล็ก (II) กับออร์โธโทรีน (Ph) ดังนี้ $Fe^{2+} + 3PhH^+ \rightarrow Fe(Ph)_3^{2+} + 3H^+$ แล้วทำการสแกนรูปจุดสีด้วยเครื่องสแกน และใช้โปรแกรมวิเคราะห์ความเข้มของสี ซึ่งเป็นการทดสอบและตรวจวัดที่ทำได้ง่าย โดยที่วิธีนี้มีขีดจำกัดของการตรวจวัดเพียง 7.95 มิลลิกรัมต่อลิตร ในงานวิจัยนี้จะพัฒนาต่อยอดชุดทดสอบบนกระดาษให้สามารถตรวจวัดเหล็กในปริมาณที่ต่ำลงไปได้อีก โดยทำการตรึงออร์โธโทรีนไว้บนแผ่นกระดาษทดสอบด้วยกระบวนการโซล-เจลแล้วนำไปแช่ในสารละลายที่ต้องการหาปริมาณเหล็ก ตรวจวัดความเข้มจุดสีโดยการสแกนรูปภาพและคำนวณค่า Euclidean distance

วัตถุประสงค์การวิจัย

พัฒนาชุดทดสอบแบบกระดาษโดยการตรึงรีเอเจนต์ไว้บนกระดาษด้วยวิธีโซล-เจล และนำไปตรวจวิเคราะห์เหล็กปริมาณต่ำในช่วง 0.2 – 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

วิธีการวิจัย

สารเคมี อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมีที่ใช้เป็น Analytical Grade เตตระอะทิลออร์โธซิลิเกต (Tetraethylorthosilicate, $Si(OC_2H_5)_4$) และ Triton[®] X-100 มาจากบริษัท Aldrich Chemical Company ออร์โธโทรีน (Orthophenanthroline, $C_{12}H_8N_2$) เอทานอลปราศจากน้ำ ไฮดรอกซีลามีโนไฮโดรคลอไรด์ (hydroxylamine hydrochloride,

NH₂OH·HCl) กรดไฮโดรคลอริก และกรดซัลฟิวริก มาจากบริษัท Carlo Erba เฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต (ferrous sulfate heptahydrate, FeSO₄·7 H₂O) มาจากบริษัท Chemex โซเดียมซิเตรตไดไฮเดรต (Sodium citrate dihydrate, HOC(COONa)(CH₂COONa)₂·2H₂O) มาจากบริษัท SAFC ใช้น้ำปราศจากไอออนในการทดลอง กระดาษกรองเบอร์ 2 เส้นผ่านศูนย์กลาง 125 มิลลิเมตร ของบริษัท Whatman เครื่องสแกนของบริษัท Canon รุ่น LiDE 210 โปรแกรม ImageJ (The National Institutes of Health by an employee of the Federal Government, USA, 2004)

การเตรียมสารละลายโซเดียมซิเตรตเข้มข้นร้อยละ 25.0%w/v

ชั่งโซเดียมซิเตรตไดไฮเดรต 25.0 กรัม ละลายและปรับปริมาตรเป็น 100 mL ด้วยน้ำปราศจากไอออน

การเตรียมสารละลายไฮดรอกซีลามีนไฮโดรคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 10%w/v

ชั่งไฮดรอกซีลามีนไฮโดรคลอไรด์ 10.0 กรัม ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน 100 mL แล้วปรับ pH ให้เท่ากับ 4.5 ด้วยสารละลายโซเดียมซิเตรตเข้มข้นร้อยละ 25.0%w/v

การเตรียมสารละลายมาตรฐานเหล็ก (II) เข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร

ชั่งเฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต 4.9782 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน 50 mL เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นลงไป 1.00 mL คนให้เข้ากัน แล้วเทใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 mL ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน

การเตรียมสารละลายมาตรฐานเหล็ก (II) เข้มข้น 0.20, 0.50 และ 1.00 มิลลิกรัมต่อลิตร

เปิดสารละลายมาตรฐานเหล็ก (II) เข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 20, 50 และ 100 ไมโครลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 mL แล้วเติมสารละลายไฮดรอกซีลามีนไฮโดรคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 10 %w/v ลงไป 1.00 mL ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน เขย่าให้เข้ากัน จะได้สารละลาย

มาตรฐานเหล็ก (II) ความเข้มข้น 0.20, 0.50 และ 1.00 มิลลิกรัมต่อลิตร

วิธีเตรียมสารละลายโซล-เจด เจือด้วยออปโทพีแนนโทรลีนเข้มข้นร้อยละ 0.2 %w/v

ชั่งออปโทพีแนนโทรลีน 0.0100 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 25 mL ละลายด้วยเอทานอลปราศจากน้ำ 2 mL เติมสารละลายเตตระเอทิลออปโทซิลิเกต 2 mL และเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.10 M 1 mL จากนั้นเติม Triton[®]X-100 7 หยด แล้วปั่นจนให้เป็นสารละลายเนื้อเดียวกันเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

การเตรียมจุดรีเอเจนต์บนกระดาษทดสอบ

เปิดสารละลายโซล-เจดเจือด้วยออปโทพีแนนโทรลีนเข้มข้นร้อยละ 0.2%w/v ปริมาตร 10 ไมโครลิตร หยดลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 ทิ้งไว้ให้แห้ง คัดแผ่นกระดาษทดสอบเป็นรูปร่างกลมตามรอยขอบของสารละลายโซล-เจด

วิธีการทดลองเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก (II) โดยใช้ micropore

นำแผ่นกระดาษทดสอบรูปร่างกลมที่ทำการหยดจุดรีเอเจนต์ไว้แล้ว ใส่ลงในอุปกรณ์ micropore จุดสารละลายมาตรฐานเหล็ก (II) เข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 mL เข้าตู้หลอดฉีดยา แล้วประกบเข้ากับอุปกรณ์ micropore กดกระบอกถูกสูบเพื่อดันให้สารละลายไหลผ่าน micropore จนหมด นำแผ่นกระดาษทดสอบออกมาทิ้งไว้ให้แห้ง จากนั้นนำแผ่นกระดาษทดสอบไปสแกนรูปสี่ด้วยเครื่องสแกนโดยตั้งค่าความละเอียดในการสแกนที่ 600 dpi แล้วใช้โปรแกรม ImageJ ตรวจสอบค่าความเข้มแสง (RGB) และนำไปคำนวณหาค่าความแตกต่างความเข้มแสงแสดงในรูปค่า Euclidean Distance (ED) จากสมการเชิงเส้นแบบยูคลิด ดังสมการต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$ED = \sqrt{(\Delta I_R)^2 + (\Delta I_G)^2 + (\Delta I_B)^2}$$

Δ คือ ผลต่างของแสงที่จุด blank กับค่าความเข้มแสง ณ จุดที่เกิดปฏิกิริยากับเหล็กที่ความเข้มข้นต่างๆกัน

I_R คือ ค่าความเข้มแสงสีแดง

I_G คือ ค่าความเข้มแสงสีเขียว

I_B คือ ค่าความเข้มแสงสีน้ำเงิน

วิธีการทดลองเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก (II) โดยการแช่

นำแผ่นกระดาษทดสอบรูปร่างกลมที่ทำกรวยคจหรือเจเนดไว้แล้วห้อยลงในภาชนะทดลอง จากนั้นเปิดสารละลายมาตรฐานเหล็ก (II) เข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 ไมโครลิตร ใส่ลงในหลุมทดลอง แช่ทิ้ง 1 นาที จากนั้นคีบแผ่นกระดาษทดสอบรูปร่างกลมขึ้นมา ทิ้งไว้ให้แห้ง แล้วนำไปสแกนและคำนวณค่า ED (ใช้น้ำปราศจากไอออนเป็น blank)

วิธีการทดลองเพื่อศึกษาผลของค่าความสว่างที่ใช้ในการสแกนรูปสี่ของกระดาษทดสอบ
ใช้แผ่นกระดาษทดสอบรูปร่างกลมที่ผ่านการทดลองแช่ในสารละลาย Fe(II) เข้มข้น 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาในการแช่ 30 นาที นำมาสแกนรูปสี่ด้วยเครื่องสแกนที่ค่าความสว่างในช่วง 0 ถึง -50 และคำนวณค่า ED

วิธีการทดลองเพื่อศึกษาผลของปริมาตรสารละลาย Fe(II) และเวลาที่ใช้ในการแช่แผ่นกระดาษทดสอบ

นำแผ่นกระดาษทดสอบรูปร่างกลมที่ทำกรวยคจหรือเจเนดไว้แล้วห้อยลงในภาชนะทดลอง แต่ละหลุม จากนั้นเปิดสารละลายมาตรฐานเหล็ก (II) แต่ละความเข้มข้น 0.20, 0.50 และ 1.00 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ละปริมาตร 100, 200, 300 และ 400 ไมโครลิตร ใส่ลงในแต่ละหลุมทดลอง แช่ทิ้งไว้เป็นเวลา 1, 5, 10, 15, 20 และ 30 นาที จากนั้นคีบแผ่นกระดาษทดสอบรูปร่างกลม

ขึ้นมา ทิ้งไว้ให้แห้ง แล้วนำไปสแกนและคำนวณค่า ED (ใช้น้ำปราศจากไอออนเป็น blank)

ผลการวิจัย

การทดลองเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก (II) บนกระดาษทดสอบแบบจุด

เมื่อทำการทดลองในเบื้องต้นเพื่อศึกษาวิธีการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก (II) ด้วยวิธีการที่ต่างกัน พบว่าได้ผลการทดลองเปรียบเทียบแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่า Euclidean distance ที่ได้จากการทดลองเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก (II) ด้วยวิธีการต่างกัน

การทดลองครั้งที่	วิธีการทดลองเพิ่มความเข้มข้น	
	สารละลายผ่าน Micropore ^a	แช่กระดาษทดสอบในสารละลาย ^b
ค่า Euclidean distance		
1	10.337	1.434
2	1.829	1.581
3	12.139	2.075
ค่าเฉลี่ย	8.102	1.697
SD	5.507	0.336
%RSD	67.97	19.80

หมายเหตุ ความเข้มข้นสารละลาย Fe(II) ที่ใช้ทดลองคือ 2^a และ 1^b มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ, ความสว่างที่ใช้ในการสแกนเป็น -50

ผลของค่าความสว่างที่ใช้ในการสแกนรูปสี่ของกระดาษทดสอบ

การทดลองปรับค่าความสว่างของแสงจากหลอด backlight ที่ใช้ในการสแกน เพื่อให้รูปที่สแกนได้เห็นสีส้มของสารเชิงซ้อนชัดเจนขึ้น โดยทดลองปรับค่าความสว่างในช่วงสเกล 0 ถึง -50 ให้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2

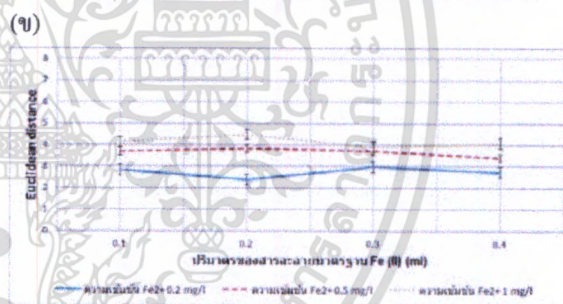
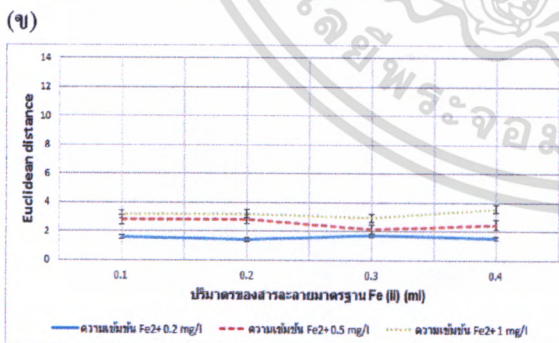
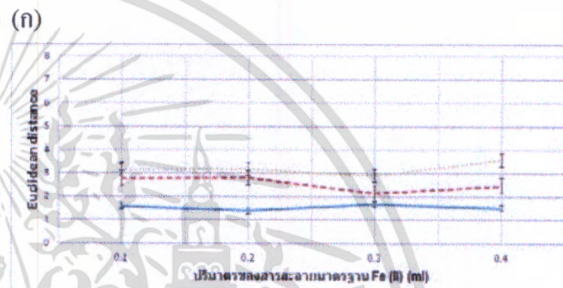
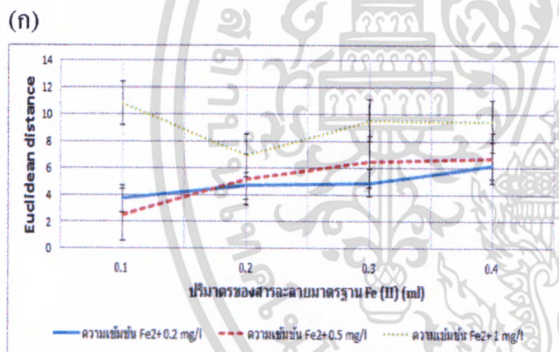
ตารางที่ 2 ค่า Euclidean distance ที่ได้จากการทดลอง ปรับค่าความสว่างของเครื่องสแกน (สารละลาย Fe(II) เข้มข้น 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร) ระยะเวลาในการแช่ 30 นาที

ค่าความสว่าง	ปริมาณสารละลาย Fe(II) ที่ใช้แช่				SD
	0.10 mL	0.20 mL	0.30 mL	0.40 mL	
	ค่า Euclidean distance				
0	0.074	0.022	0.099	0.096	0.036
-10	0.577	0.572	0.579	0.805	0.114
-20	0.655	0.661	4.043	4.046	1.955
-30	0.549	0.984	4.893	4.831	2.371
-40	2.748	2.739	5.350	5.345	1.504
-50	6.257	6.235	6.236	6.243	0.010

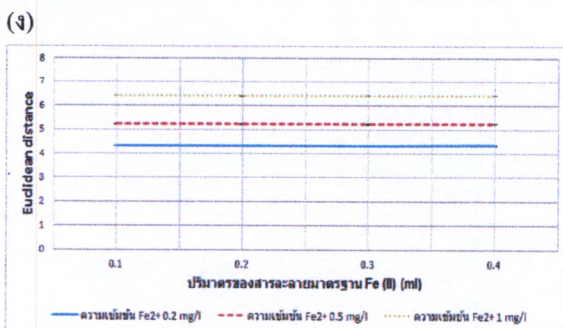
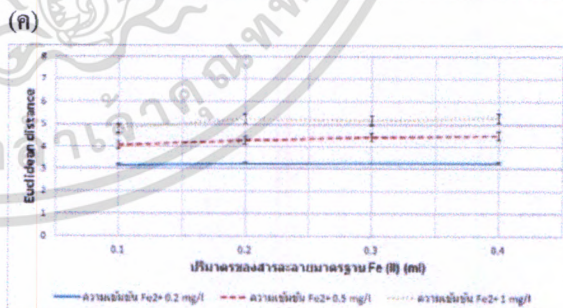
ผลของปริมาตรสารละลาย Fe(II) และเวลาที่ใช้ในการแช่แผ่นกระดาษทดสอบ

เมื่อทดลองแช่แผ่นกระดาษทดสอบในสารละลายมาตรฐาน Fe(II) ที่ปริมาตรต่าง ๆ กัน ตั้งแต่ 0.10 ถึง 0.40 มิลลิลิตร เป็นเวลา 1 นาที พบว่าให้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 1

การทดลองแช่แผ่นกระดาษทดสอบเป็นเวลาต่าง ๆ กัน ตั้งแต่ 1 นาที ถึง 30 นาที ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 2 และรูปที่ 3

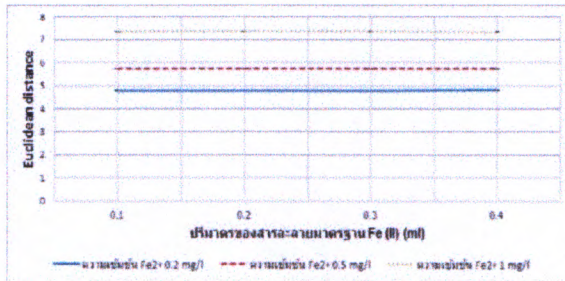


รูปที่ 1 กราฟแสดงค่า Euclidean distance เมื่อทดลองแช่แผ่นกระดาษทดสอบในสารละลาย Fe(II) ที่มีปริมาตรต่าง ๆ กัน เป็นเวลา 1 นาที แล้วนำกระดาษทดสอบออกมา (ก) วางบนพื้นโต๊ะห้องปฏิบัติการ (ข) วางบนขอบปากภาดหลุม

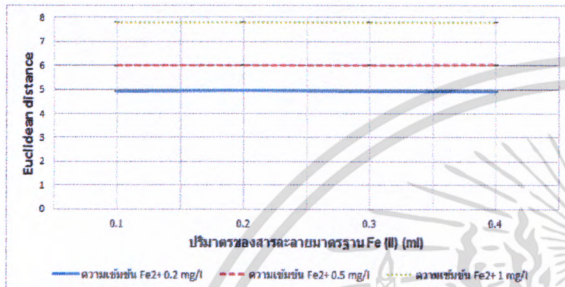


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

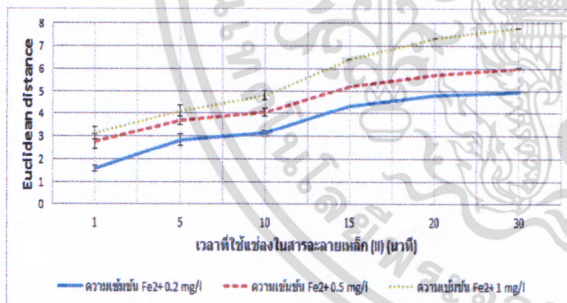
(จ)



(ข)



รูปที่ 2 กราฟแสดงค่า Euclidean distance เมื่อทดลองแช่แผ่นกระดาษทดสอบในสารละลาย Fe(II) ที่มีปริมาณต่าง ๆ กัน และตั้งแต่วินาที (ก) 1 นาที, (ข) 5 นาที, (ค) 10 นาที, (ง) 15 นาที, (จ) 20 นาที และ (ฉ) 30 นาที



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ED กับเวลาที่ใช้ในการแช่แผ่นกระดาษทดสอบในสารละลาย Fe(II) ปริมาตร 0.10 มิลลิลิตร

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

นฤชิต (2555) ได้พัฒนาการตรวจวัดเหล็กในเม็ดชาด้วยชุดทดสอบแบบจุดบนกระดาษที่เตรียมจุดรีเอเจนต์ด้วยวิธี โซล-เจด ซึ่งมีความสะดวกในการทดลอง และสามารถวิเคราะห์ผลได้รวดเร็ว โดยที่ชุดทดสอบนี้มีขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์เชิงปริมาณเท่ากับ 7.95

มิลลิกรัมต่อลิตร ในงานวิจัยนี้ต้องการปรับปรุงชุดทดสอบดังกล่าวให้สามารถตรวจวัดปริมาณเหล็กในตัวอย่งน้ำดื่มที่มีการควบคุมคุณภาพตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 332 (พ.ศ. 2521) ที่มีเกณฑ์อนุ โลมให้มีปริมาณเหล็กได้สูงสุดไม่เกิน 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากผลการทดลองในตารางที่ 1 พบว่าเมื่อทดลองเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย Fe(II) ด้วยวิธีให้สารละลายผ่านอุปกรณ์ micropore ให้ค่า %RSD สูง แสดงว่าผลการทดลองในแต่ละครั้งมีการเบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยมาก โดยที่การดูดสารละลายมาตรฐานไว้ในหลอดนิตยามแล้วฉีดผ่านแผ่นกระดาษทดสอบที่บรรจุไว้ใน micropore แต่ละครั้งจะใช้เวลาในการฉีดผ่าน ไปไม่เท่ากัน บางช่วงกระบอกถูกสูบฝืดทำให้ต้องออกแรงกดมากและสารละลายผ่านเร็วเกินไป ไม่สามารถควบคุมอัตราการไหลให้คงที่ได้ ส่งผลให้สารละลาย Fe(II) ที่กักอยู่ใน micropore ใช้เวลาไม่เท่ากันในการเกิดปฏิกิริยากับไอโอดีน-โพแทสเซียมไอโอไดด์ โดยที่การเกิดสารเชิงซ้อนนั้นต้องใช้เวลาระยะหนึ่งจึงจะเกิดปฏิกิริยาได้สมบูรณ์ ถ้าไม่สามารถควบคุมเวลาในการผ่าน micropore ให้เท่ากันได้ ก็จะส่งผลถึงความเข้มสีบนจุดทดสอบที่ได้แต่ละครั้งมีความแตกต่างกันไป วิธีการต่อมาได้ทดลองแช่กระดาษทดสอบในสารละลายมาตรฐาน Fe(II) เป็นเวลา 1 นาที เพื่อให้มีเวลาสำหรับปฏิกิริยาการเกิดสารเชิงซ้อน พบว่าค่า ED ที่ได้จากการทดลองแต่ละครั้งมีความเบี่ยงเบนน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีให้สารละลายผ่าน micropore โดยการทดลองด้วยการแช่กระดาษทดสอบ ซึ่งใช้สารละลายเหล็กความเข้มข้นต่ำกว่า (1 mg/l) สามารถให้ค่าความเบี่ยงเบนน้อยกว่าวิธีให้สารละลายผ่าน micropore ที่ใช้สารละลายเหล็กความเข้มข้นสูงกว่า (2 mg/l) จึงเลือกวิธีการแช่กระดาษทดสอบในสารละลายมาตรฐาน Fe(II) เพื่อทำการทดลองต่อไป

ในขั้นตอนการแทนจุดสีของกระดาษทดสอบเพื่อนำไปประมวลผล ได้ทำการทดลองปรับค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสว่างของแสงจากหลอด backlight ที่ใช้ในการสแกน เพื่อให้รูปที่สแกน ได้เห็นสีส้มของสารเชิงซ้อนชัดเจนขึ้น โดยทดลองปรับค่าความสว่างในช่วงสเกล 0 ถึง -50 ให้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2 ความสว่างของแสงที่ใช้ในการสแกนแสดงถึงความสว่างของแสงจากหลอด backlight ที่ใช้ในเครื่องสแกน โดยค่าความสว่างเป็น 0 คือ ความสว่างของแสงจากหลอด backlight ที่ไม่มีการลดความสว่างลง จากผลการทดลองในตารางที่ 2 จะเห็นว่าที่ค่าความสว่างเป็น 0 นั้น ค่า ED ที่คำนวณ ได้มีค่าน้อยใกล้เคียงกับค่า blank ในขณะที่การสังเกตด้วยตาเปล่าสามารถแยกแยะความแตกต่างจาก blank ได้ดีกว่านี้ แสดงว่าแสงสว่างจากหลอด backlight สว่างมากเกินไปทำให้รูปที่สแกน ได้แสดงความเข้มของสีส้ม ไม่ชัดเจน เมื่อปรับลดค่าความสว่างลงเรื่อย ๆ จนถึงค่าความสว่าง -50 จะทำให้รูปที่สแกน ได้แสดงความเข้มสีส้มชัดเจนขึ้นและสามารถคำนวณค่า ED ได้ละเอียดมากขึ้น เมื่อค่าความสว่างลดลงมากกว่าค่า -50 เป็นต้นไป รูปภาพที่สแกน ได้จะค่อย ๆ มีดลงเป็นสีเทา ค่าซึ่งไม่สามารถมองเห็นสีส้ม ได้อีก จึงเลือกใช้ค่าความสว่างที่ -50 ในการสแกนรูปที่ของกระดาษทดสอบ

สำหรับผลการทดลองในรูปที่ 1 แสดงให้เห็นว่าหลังจากการแช่แผ่นกระดาษทดสอบเป็นเวลา 1 นาที แล้วนำขึ้นมาวางทิ้งไว้ให้แห้งบนพื้นโต๊ะห้องปฏิบัติการที่ไม่สะอาดนัก อาจมีการปนเปื้อนของสารเคมีที่มีผลกระทบต่อการศึกษาสารเชิงซ้อน ส่งผลให้ค่า ED ที่ได้มีการเบี่ยงเบนอย่างมาก แต่เมื่อนำแผ่นกระดาษทดสอบขึ้นมาวางทิ้งไว้ให้แห้งบนขอบปากภาชนะที่สะอาด ค่า ED ที่ได้จะเบี่ยงเบนน้อยมาก ดังนั้นต้องให้ความระมัดระวังในเรื่องความสะอาดของบริเวณที่จะวางแผ่นกระดาษทดสอบเพื่อทิ้งไว้ให้แห้งด้วย

ในการทดลองแช่แผ่นกระดาษทดสอบเป็นเวลาค้าง ๆ กัน ตั้งแต่ 1 นาที ถึง 30 นาที ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 2 และรูปที่ 3 เมื่อแช่แผ่นกระดาษทดสอบเป็นเวลา 1, 5 และ 10 นาที จะให้ค่า ED ของแต่ละจุดที่ทดลองมีความเบี่ยงเบนมากกว่าแช่แผ่นกระดาษทดสอบเป็นเวลา 15, 20 และ 30 นาที ดังนั้นการใช้เวลา

ในการแช่แผ่นกระดาษทดสอบที่นานขึ้น มีผลทำให้ค่า ED มีความเบี่ยงเบนลดลง และพบว่าการแช่ในช่วงเวลา 15, 20 และ 30 นาที ให้ความแตกต่างของเส้นกราฟในแต่ละความเข้มข้นอย่างชัดเจนและกราฟมีลักษณะเหมือนกัน และพบอีกว่าเมื่อเวลาที่ใช้ในการแช่ยาวนานขึ้น ค่า ED จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย แสดงให้เห็นว่าต้องใช้ระยะเวลาช่วงหนึ่งในเกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ระหว่าง Fe(II) กับออปโทพีแนม โทโรลีนเพื่อเกิดเป็นสารเชิงซ้อนที่มีสีส้มบนแผ่นกระดาษทดสอบ ในการทดลองนี้จึงเลือกใช้เวลาในการแช่ 15 นาที เพื่อให้การวิเคราะห์มีความรวดเร็ว แต่ยังคงผลการทดลองที่แยกแยะความแตกต่างของความเข้มข้นของเหล็ก (II) (0.2, 0.5 และ 1 mg/L) ไว้ได้ ส่วนปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน Fe(II) ที่ใช้ในการแช่แผ่นกระดาษทดสอบนั้นพบว่าในแต่ละความเข้มข้นของสารละลาย Fe(II) ที่ใช้ทดลอง เมื่อใช้ปริมาตรเพิ่มขึ้นในช่วง 0.10 ถึง 0.40 มิลลิลิตร ค่า ED ที่ได้มีค่าคงที่ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาตร ไม่ได้เป็นการเพิ่มปริมาณของ Fe(II) ที่จะทำปฏิกิริยาเกิดเป็นสารเชิงซ้อนบนแผ่นกระดาษทดสอบ การเพิ่มขึ้นของค่า ED จะแปรผันตามความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน Fe(II) ไม่ขึ้นกับปริมาตรของสารละลายที่ใช้ในการแช่แผ่นกระดาษทดสอบ

สภาวะการทดลองเหมาะสมที่ได้จากงานวิจัยนี้สำหรับชุดทดสอบบนกระดาษเพื่อตรวจวัดปริมาณเหล็ก จะทำการเตรียมแผ่นทดสอบ โดยการตรึงออปโทพีแนม โทโรลีนด้วยวิธีโซล-เจลไว้บนกระดาษกรอง หลังจากผสมสารละลายมาตรฐาน Fe(II) กับสารละลายไฮดรอกซีลามีนไฮโดรคลอไรด์ที่ปรับ pH เป็น 4.5 เข้าด้วยกัน แล้วนำแผ่นกระดาษทดสอบแช่ในสารละลายผสม ปริมาตรในช่วง 0.10 ถึง 0.40 มิลลิลิตร เป็นเวลา 15 นาที เพื่อให้เกิดสารเชิงซ้อนเป็นสีส้มบนกระดาษทดสอบ ทิ้งไว้ให้แห้ง จากนั้นนำไปสแกนรูปที่ด้วยเครื่องสแกนซึ่งตั้งค่าความสว่างที่ -50 แล้วคำนวณค่า ED จากสภาวะเหมาะสมที่ทดลองได้นี้ สามารถตรวจวัดความเข้มข้นของ Fe(II) ได้ถึงระดับ 0.20 มิลลิกรัมต่อลิตร ใกล้เคียงกับค่าต่ำที่สุดที่สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยวิธีมาตรฐาน

ASTM D 1068 (American Society for Testing and Materials, 2003) ซึ่งเป็นวิธีสเปกโทรโฟโตเมทรีที่ใช้ ออโทพีแนม โทรีนเป็นรีเอเจนต์ ซึ่งเหมาะกับการ วิเคราะห์เหล็ก (II) ในช่วง 0.4 – 1.0 mg/L เมื่อ เปรียบเทียบกันพบว่าวิธีที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถใช้งาน ได้ สะดวกกว่า, ใช้เครื่องมือที่ง่ายต่อการตรวจวัดผลการ ทดลอง และใช้รีเอเจนต์กับสารตัวอย่างปริมาณน้อยกว่า วิธีมาตรฐาน วิธีพัฒนาขึ้นนี้มีความเป็นไปได้ที่จะนำไป ประยุกต์ใช้ในการควบคุมคุณภาพน้ำดื่ม โดยทำการ ทดลองในเชิงคุณภาพทั้งปริมาณวิเคราะห์ แล้วสามารถ ระบุได้ว่ามีปริมาณเหล็กเกินกว่าค่าอนุ โลมที่ 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือไม่ ซึ่งจะได้นำมาดำเนินการทดลองใน ลำดับถัดไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่สนับสนุนค่าใช้จ่ายในการทำงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

นฤชิต ไพโรจน์. ชุดทดสอบแบบจุดโดยใช้โซล-เจลเจือ ออโทพีแนม โทรีนสำหรับการวิเคราะห์เชิง ปริมาณของเหล็ก (II) [วิทยานิพนธ์ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี]. กรุงเทพฯ: คณะวิทยาศาสตร์สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง; 2555.

ปราโมช เชี่ยวชาญ. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สุขภาพฉบับที่ 3 [จุลสาร]. กรุงเทพมหานคร: สภาวิชาชีพ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี; 2552.

Durukan I, Şahin AÇ, Şatiroğlu N, Bektaş S. Deter mination of iron and copper in food samples by flow injection cloud point extraction flame atomic absorption spectrometry. *Microchem ical Journal* 2011; 99(1): 159-163.

Funda A, Mustofa S. Separation, preconcentration and inductively coupled plasma-mass spectrometric (ICP-MS) determination of thorium(IV), Tita nium(IV), iron(II), lead(II) and chromium(III) on 2-nitroso-1-naphthol impregnated MCI GEL CHP20P resin. *Journal of Hazardous Materials* 2010; 173(1-3): 669-674.

Devi VSA, Reddy VK. Spectrophotometric determina tion of iron(II) and cobalt(II) by direct, derivative, and simultaneous methods using 2-hydroxy-1-naphthaldehyde-p-hydroxy-benzoic-hydrazone. *International Journal of Analytical Chemistry* 2012; 2012: 26-50.

Nowak P, Śpiewak K, Brindell M, Woźniakiewicz M, Stochel G, et al.. Separation of iron-saturated of transferrin and lactoferrin via capillary electro phoresis performed in Fused-silica and neutral capillaries. *Journal of Chromatography A* 2013; 1321: 127-132.

Huang Y-N, Yuan D-X, Dai M-H, Liu Y-X. Reverse flow injection analysis method for catalytic spectrophotometric determination of iron in estuarine and coastal water: A comparison with normal flow injection analysis. *Talanta* 2012; 93: 86-93.

Peng B, Shen Y-N, Gao Z-T, Zhou M, Ma Y-J. Determination of total iron in water and foods by dispersive liquid-liquid microextraction coupled with microvolume UV-VIS Spectro photometry. *Food Chemistry* 2015; 176: 288-293.

The National Institutes of Health by an employee of the Federal Government. *ImageJ* [online] 2004 [cited 17 July 2013]. Available from: [http:// imagej.nih.gov/ij/index.html](http://imagej.nih.gov/ij/index.html).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

American Society for Testing and Materials. Certificate

by Authority of the United States of America

Legally Binding Document. Washington: The

Executive Director Office of the Federal

Register: 2003.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นาย ฉันททัต วงษ์ดี
วัน เดือน ปีเกิด 21 มิถุนายน พ.ศ. 2530
ที่อยู่ปัจจุบัน 37/2 ซ.เพชรเกษม 81/6 ถ.เพชรเกษม แขวงหนองค้างพลู เขตหนองแขม
จ.กรุงเทพฯ
ประวัติการศึกษา 2552 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขา เคมีอุตสาหกรรม เกรดเฉลี่ย 3.00
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2558 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขา เคมี เกรดเฉลี่ย 3.00
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ทุนการศึกษาที่ได้รับ ทุนนำเสนอผลงานวิทยานิพนธ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง
ผลงานทางวิชาการ 1. การพัฒนากระดาษทดสอบที่ตรึงอโทพีแนนโพลีเมอร์ด้วยกระบวนการโซล-เจล
สำหรับวิเคราะห์ปริมาณเหล็ก
2. การพัฒนาคุณสมบัติไบโอฟิล์มในการทำพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ใน
ธรรมชาติด้วยการใช้ยางและแป้งมันสำปะหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้