

การวิเคราะห์ไทโอไซยาเนตด้วยการทดสอบแบบจุดบนกระดาษ
โดยใช้โซล-เจลเจือด้วยเหล็ก(III)

DETERMINATION OF THIOCYANATE BY SPOT TEST ON PAPER
WITH SOL-GEL DOPED IRON(III)



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

การวิเคราะห์ไทโอไซยาเนตด้วยการทดสอบแบบจุดบนกระดาษ
โดยใช้โซล-เจลเจือด้วยเหล็ก(III)

DETERMINATION OF THIOCYANATE BY SPOT TEST ON PAPER
WITH SOL-GEL DOPED IRON(III)



นางสาวจินตพร ไช้สีทอง
นางสาวจินตภา ไช้สีทอง
นางสาวสุชาดา สมนาม

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การวิเคราะห์ไทโอไซยาเนตด้วยการทดสอบแบบจุดบนกระดาษ
โดยใช้โซล-เจลเจือด้วยเหล็ก(III)

Determination of Thiocyanate by Spot Test on Paper
with Sol-gel Doped Iron(III)

ชื่อนักศึกษา

นางสาวจินตพร ไชสีทอง รหัสนักศึกษา 54050141

นางสาวจินตภา ไชสีทอง รหัสนักศึกษา 54050142

นางสาวสุชาดา สมนาม รหัสนักศึกษา 54050303

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา

เคมี


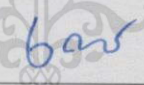
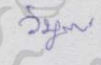
ปีการศึกษา

2557

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ประจำปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.ณัฐวุฒิ เขิงขัน ประธานกรรมการ	
ดร.เสาวภาคย์ อีราทรง กรรมการ	
ผศ.ดร.วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การวิเคราะห์ไทโอไซยาเนตด้วยการทดสอบแบบจุดบนกระดาษ โดยใช้โซล-เจลเจือด้วยเหล็ก(III)		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวจินตพร ไชสีทอง	รหัสนักศึกษา	54050141
	นางสาวจินตภา ไชสีทอง	รหัสนักศึกษา	54050142
	นางสาวสุชาดา สมนาม	รหัสนักศึกษา	54050303
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)		
ภาควิชา	เคมี		
ปีการศึกษา	2557		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ		

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาและพัฒนาการทดสอบแบบจุดบนกระดาษสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณของไทโอไซยาเนตในปุ๋ย เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ภาคสนาม การทดสอบนี้ใช้กระดาษกรองเป็นซับสเตรท ใช้สารละลายโซล-เจลเจือเหล็ก(III) ความเข้มข้นร้อยละ 0.20 (w/v) เป็นจุดรีเอเจนต์โดยหยดลงบนกระดาษกรอง ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร ทิ้งไว้ 30 นาที แล้วทำการหยดกรดไนตริกความเข้มข้น 0.50 โมลาร์ ตามด้วยสารละลายมาตรฐานไทโอไซยาเนตหรือสารละลายตัวอย่าง ปริมาตรอย่างละ 10.00 ไมโครลิตร ลงบนจุดรีเอเจนต์ ทิ้งไว้ให้แห้ง 20 นาที บันทึกภาพจุดสีแดงส้มที่เกิดจากสารเชิงซ้อนระหว่างเหล็ก(III) กับไทโอไซยาเนตด้วยเครื่องสแกน ใช้โปรแกรม Image J™ วัดและบันทึกค่าความเข้มแสง RGB คำนวณค่าความแตกต่างความเข้มแสงด้วยสมการยูคลิด กราฟมาตรฐานที่ได้มีความเป็นเส้นตรงอยู่ในช่วง 10-100 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ น้อยกว่า 8.01% ขีดจำกัดของการตรวจพบและขีดจำกัดของการตรวจวัดเชิงปริมาณเท่ากับ 4.85 และ 15.26 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ การวิเคราะห์ปริมาณไทโอไซยาเนตในตัวอย่างปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตและปุ๋ยยูเรียได้ค่าร้อยละคืนกลับ อยู่ในช่วง 53.96 - 62.14% และ 92.92 - 106.26% ตามลำดับ

คำสำคัญ: ชุดทดสอบแบบจุด, ไทโอไซยาเนต, ปุ๋ย, เฟอริกไอออน

Title	Determination of Thiocyanate by Spot Test on Paper with Sol-gel Doped Iron(III)
Students	Miss. Jintaporn Kaisithong Student ID 54050141
	Miss. Jintapa Kaisithong Student ID 54050142
	Miss. Suchada Somnam Student ID 54050303
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)
Department	Chemistry
Academic Year	2014
Advisor	Asst.Prof.Dr.Wiboon Praditweangkum

ABSTRACT

The paper based spot test kit for fieldwork has been studied and developed for determination of thiocyanate in fertilizer. The filter paper is used as a substrate. A 10.00 μL of sol-gel doped iron(III) 0.20 % (w/v) is dropped on filter paper as a reagent spot. Wait 30 minutes for drying. A 10.00 μL of 0.50 M nitric acid is applied on a reagent spot. Wait 20 minutes for drying. Then 10.00 μL of thiocyanate or sample solution is again dropped on the test spot. The reddish-orange color of iron(III) - thiocyanate complex on paper can be recorded by a scanner. Image J™ program is used to analyse the intensity of RGB light. The Euclidean Distance is calculated. The calibration curve is linear from 10 to 100 mgL^{-1} with relative standard deviation lower than 8.01%. The limit of detection and limit of quantitation are 4.85 and 15.26 mgL^{-1} , respectively. The recovery of thiocyanate in ammonium sulfate and urea fertilizers are 53.96 – 62.14% and 92.92 – 106.26%, respectively.

Keywords : Spot test kit, Thiocyanate, Fertilizer, Ferric ion

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้ ศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาการทดสอบบนกระดาษสำหรับการตรวจวัด
ไทโอไซยานเตโอออนในตัวอย่างปุ๋ย จัดทำขึ้นเพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาตรี
วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม แขนงเคมีวิเคราะห์

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาจาก ผศ.ดร.วิบูลย์
ประดิษฐ์เวียงคำ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดจน
แก้ปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงาน ขอขอบคุณ ดร.ณัฐภูมิ เชิงชั้น และ ดร.เสาวภาคย์ ธีราทรง
กรรมการสอบโครงการพิเศษที่กรุณาตรวจสอบและแก้ไขโครงการพิเศษนี้ให้ถูกต้องมากขึ้น รวมถึง
อาจารย์ผู้สอนในภาควิชาเคมีทุกท่านที่ให้ความรู้ทางด้านเคมีตั้งแต่เริ่มทำศึกษา นอกจากนี้ขอขอบคุณ
เจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์ อาครวิทยาศาสตร์ ชั้น 5 ทุกท่าน ที่คอยช่วยเหลือทั้งในเรื่องอุปกรณ์ สารเคมี
ตลอดจนเครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ และขอบคุณเพื่อนๆ สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม แขนงเคมีวิเคราะห์
ทุกๆ คน ที่เป็นกำลังใจและให้การช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษเล่มนี้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัว ที่ได้ให้โอกาสในการศึกษาเล่าเรียน
ตลอดจนให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

นางสาวจินตพร ไชสีทอง
นางสาวจินตภา ไชสีทอง
นางสาวสุชาดา สมนาม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	จ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 กระบวนการโซล-เจล(sol-gel process).....	3
2.1.1 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส.....	4
2.1.2 ปฏิกิริยาควบแน่น.....	6
2.2 การเกิดสารเชิงซ้อนระหว่างเหล็ก(III) กับไทโอไซยาเนต.....	7
2.3 ชุดทดสอบภาคสนาม (on-site monitoring test kit).....	8
2.4 ระบบสี (Color system).....	8
2.4.1. ระบบสีแบบ RGB.....	9
2.4.2. ระบบสีแบบ CMYK.....	9
2.5 หลักการทำงานของเครื่องสแกน (scanner).....	10
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	13
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....	17
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์.....	17
3.1.1 สารเคมี.....	17
3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	17
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	17
3.3 วิธีดำเนินการทดลอง.....	18
3.3.1 ศึกษาลักษณะและรูปร่างชุดทดสอบบนกระดาษ.....	18
3.3.1.1 การเตรียมสารละลาย.....	18
3.3.1.2 การเตรียมสารละลายโซล-เจล เจือด้วยเหล็ก(III).....	19

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3.1.3 ชุดทดสอบบนกระดาษแบบจุด.....	20
3.3.2 ศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของเหล็ก(III)ในระบบโซล-เจล.....	20
3.3.3 ศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา.....	20
3.3.4 ศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของกรดไนตริกที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยา.....	21
3.3.5 ศึกษาอุปกรณ์และโปรแกรมสำหรับตรวจวัดความเข้มข้นของจุดสีบนชุดทดสอบบน กระดาษแบบจุด.....	21
3.3.5.1 ศึกษาอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดความเข้มข้นของจุดสีบนชุดทดสอบบน กระดาษแบบจุด.....	21
3.3.5.1.1 เครื่องสแกน.....	21
3.3.5.1.2 กล้องมือถือสมาร์ทโฟน.....	21
3.3.5.2 ศึกษาโปรแกรมสำหรับตรวจวัดความเข้มข้นของจุดสีบนชุดทดสอบบน กระดาษแบบจุด.....	21
3.3.5.2.1 Image J™.....	21
3.3.5.2.2 Adobe Photoshop CS5™.....	21
3.3.6 การทดสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์.....	21
3.3.6.1 ความเป็นเส้นตรง (Linearity).....	22
3.3.6.2 ความเที่ยง (Precision).....	22
3.3.6.3 ความแม่นยำ (Accuracy).....	22
3.3.6.4 ขีดจำกัดของการตรวจพบ (Limit of detection, LOD).....	23
3.3.6.5 ขีดจำกัดของการตรวจวัดเชิงปริมาณ (Limit of quantitation, LOQ).....	23
3.3.7 วิเคราะห์ไทโอไซยาเนตในตัวอย่างปุย.....	23
3.3.7.1 การวิเคราะห์ตัวอย่างปุย.....	23
3.3.7.1.1 การเตรียมตัวอย่างปุย.....	23
3.3.7.1.2 การเตรียมสารละลายปุยสำหรับชุดทดสอบบนกระดาษแบบ จุด.....	23
3.3.7.1.3 การวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยชุดทดสอบบนกระดาษแบบจุด.....	24
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	25
4.1 ศึกษาลักษณะและรูปร่างชุดทดสอบบนกระดาษ.....	25
4.2 ศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของเหล็ก(III) ในระบบโซล-เจล.....	26
4.3 ศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา.....	27

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.4 ศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของกรดไนตริกที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยา.....	28
4.5 ศึกษาอุปกรณ์และโปรแกรมสำหรับตรวจวัดความเข้มข้นของจุดสีบนชุดทดสอบบน กระดาษแบบจุด.....	30
4.5.1 ศึกษาอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดความเข้มข้นของจุดสีบนชุดทดสอบบนกระดาษแบบ จุด.....	30
4.5.2 ศึกษาโปรแกรมสำหรับตรวจวัดความเข้มข้นของจุดสีบนชุดทดสอบบนกระดาษ แบบจุด.....	31
4.6 การทดสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์.....	34
4.6.1 ความเป็นเส้นตรง (linearity).....	34
4.6.2 ความเที่ยง (Precision).....	35
4.6.3 ความแม่นยำ (Accuracy).....	35
4.6.4 ขีดจำกัดของการตรวจพบ (Limit of detection: LOD).....	36
4.6.5 ขีดจำกัดของการตรวจวัดเชิงปริมาณ (Limit of Quantitation: LOQ).....	37
4.7 วิเคราะห์ไทโอไซยาเนตในตัวอย่างปุย.....	37
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	42
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	42
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	42
เอกสารอ้างอิง.....	43
ภาคผนวก.....	44

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงลิแกนด์ที่นิยมใช้เป็นสารตั้งต้น.....	4
2.2 แสดงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาปริมาณไทโอไซยาเนตด้วยเทคนิคต่างๆ.....	16
4.1 แสดงสมการเชิงเส้นตรงที่ได้ เมื่อทดลองใช้กรดไนตริกความเข้มข้นต่างๆสำหรับสารละลายมาตรฐานไทโอไซยาเนตความเข้มข้น 10 – 100 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	29
4.2 แสดงค่า Euclidean Distance ของสารละลายมาตรฐานไทโอไซยาเนตที่ความเข้มข้นต่างๆ (n=10).....	34
4.3 แสดงค่า Euclidean Distance ของสารละลายมาตรฐานไทโอไซยาเนตเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (n=10).....	35
4.4 แสดงค่า y_i , \hat{y}_i และ $(y_i - \hat{y}_i)^2$ ในการคำนวณขีดจำกัดของการตรวจพบ.....	36
4.5 แสดงค่า Euclidean Distance ของสารละลายมาตรฐานไทโอไซยาเนตที่ความเข้มข้นต่างๆกัน.....	37
4.6 แสดงค่าร้อยละคืนกลับ (%recovery) ของตัวอย่างปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต A.....	39
4.7 แสดงค่าร้อยละคืนกลับ (%recovery) ของตัวอย่างสารเคมีแอมโมเนียมซัลเฟต.....	39
4.8 แสดงค่าร้อยละคืนกลับ (%recovery) ของตัวอย่างปุ๋ยยูเรีย B.....	40
4.9 แสดงค่าร้อยละคืนกลับ (%recovery) ของตัวอย่างปุ๋ยยูเรีย C.....	40
4.10 แสดงค่าร้อยละคืนกลับ (%recovery) ของตัวอย่างสารเคมียูเรีย.....	40
ค.1 ค่าความเข้มแสง ค่าความแตกต่างความเข้มแสงและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์เปรียบเทียบระบบโซล-เจลเจือด้วยเหล็ก(III) ความเข้มข้นร้อยละ 0.20, 040 และ 0.60 (w/v).....	46
ง.1 ค่าความเข้มแสง ค่าความแตกต่างความเข้มแสงและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์เปรียบเทียบกรดไนตริกที่ความเข้มข้น 0.5, 0.7, 1 โมลาร์.....	48
จ.1 ค่าความเข้มแสง ค่าความแตกต่างความเข้มแสงและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์เปรียบเทียบอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดความเข้มสีของชุดทดสอบระหว่างเครื่องสแกนกับกล้องมือถือสมาร์ตโฟน.....	50
ฉ.1 ค่าความเข้มแสง ค่าความแตกต่างความเข้มแสงและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์เปรียบเทียบโปรแกรมสำหรับตรวจวัดความเข้มสีของชุดทดสอบระหว่างโปรแกรม Image J™ และโปรแกรม Adobe Photoshop CS5™ โดยใช้กล้องมือถือสมาร์ตโฟนในการบันทึกภาพ..	51
ฉ.2 ค่าความเข้มแสง ค่าความแตกต่างความเข้มแสงและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์เปรียบเทียบโปรแกรมสำหรับตรวจวัดความเข้มสีของชุดทดสอบระหว่างโปรแกรม Image J™ และโปรแกรม Adobe Photoshop CS5™ โดยใช้เครื่องสแกนในการบันทึกภาพ.....	52

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างเฟสไดอะแกรม 3 ภูมิภาคของเตตระเอทิลอโทซิลิเกต น้ำและ 95% แอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	5
2.2 ผลของค่า pH ต่ออัตราการละลายและเวลาในการเกิดเจล.....	6
2.3 เทคนิคในการสังเคราะห์โดยวิธีโซล-เจล.....	7
2.4 โครงสร้างของสารเชิงซ้อนระหว่างเหล็ก(III) กับไทโอไซยาเนต.....	7
2.5 ภาพแสดงระบบสีของ CMYK และระบบสีของ RGB.....	9
2.6 แสดงภาพประเภทของเครื่องสแกน.....	10
2.7 ภาพแสดงการทำงานของเครื่องสแกน.....	12
4.1 การเปลี่ยนแปลงสีของชุดทดสอบบนกระดาษแบบจุด.....	25
4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างความเข้มแสงกับความเข้มข้นสารละลายเหล็ก(III) ในระบบโซล-เจล บันทึกภาพที่เวลา 20 นาที.....	26
4.3 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างความเข้มแสงกับความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานไทโอไซยาเนตที่บันทึกภาพหลังการเกิดปฏิกิริยาที่เวลาต่างๆกัน.....	27
4.3 (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างความเข้มแสงกับเวลาในการเกิดปฏิกิริยาของสารละลายมาตรฐานไทโอไซยาเนตกับเหล็ก(III) บันทึกภาพหลังการเกิดปฏิกิริยาที่เวลาต่างๆกัน.....	27
4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแตกต่างความเข้มแสงกับความเข้มข้นของกรดไนตริกความเข้มข้นต่างๆกัน ทดลองกับสารละลายมาตรฐานไทโอไซยาเนตความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	28
4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างความเข้มแสงกับความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานไทโอไซยาเนตเปรียบเทียบการบันทึกภาพจากเครื่องสแกนเนอร์และมือถือสมาร์ทโฟน.....	30
4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างความเข้มแสงกับความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานไทโอไซยาเนต เปรียบเทียบโปรแกรม Image J™ และ โปรแกรม Adobe Photoshop CS5™ โดยใช้กล้องมือถือสมาร์ทโฟนในการบันทึกภาพ.....	31
4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างความเข้มแสงกับความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานไทโอไซยาเนต เปรียบเทียบโปรแกรม Image J™ และ โปรแกรม Adobe Photoshop CS5™ โดยใช้เครื่องสแกนในการบันทึกภาพ.....	32
4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างความเข้มแสงกับความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานไทโอไซยาเนต เมื่อทำการปรับค่าความสว่าง (Brightness).....	33
4.9 แสดงกราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแตกต่างความเข้มแสงกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไทโอไซยาเนต.....	34

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 แสดงกราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแตกต่างความเข้มแสงกับ ความเข้มข้น ของสารละลายมาตรฐาน.....	38
ก.1 หน้าต่างโปรแกรม Image J™ และการเรียกหน้าต่างวัดค่าความเข้มแสง.....	44
ข.1 หน้าต่างโปรแกรม Adobe Photoshop CS5™ และการเรียกหน้าต่างวัดค่าความเข้มแสง.....	45
ข.2 หน้าต่างแสดงค่าแสงสีแดง สีเขียวและสีน้ำเงิน.....	45



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ทางการเกษตรได้มีการใช้ปุ๋ยเคมีมาเป็นตัวช่วยให้พืชผลเจริญเติบโต ซึ่งปุ๋ยเคมีที่นิยมนำมาใช้ในการเกษตร ได้แก่ ปุ๋ยยูเรียและปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต พืชจะได้รับธาตุไนโตรเจนกับกำมะถันเพื่อช่วยให้พืชเจริญเติบโต แต่ปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตอาจมีการเจือปนสารไทโอไซยาเนต ซึ่งจะส่งผลไปขัดขวางการเจริญเติบโตของพืช จากการศึกษาค้นคว้าได้พบว่าในปัจจุบันมีการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์หลากหลายรูปแบบที่นำมาใช้วิเคราะห์หาสารไทโอไซยาเนตในปุ๋ย เช่น การวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไทโอไซยาเนตในปุ๋ยโดยใช้ไอออนโครมาโทกราฟี (Ion Chromatography, IC)[6] การวิเคราะห์ไทโอไซยาเนตโดยใช้ flow injection analysis (FIA)[6] เป็นต้น การวิเคราะห์ดังกล่าวก็สามารถวิเคราะห์ได้โดยตรงหรืออาจต้องมีการเตรียมตัวอย่างก่อนทำการทดสอบ ซึ่งจะทำให้การทดสอบมีอุปกรณ์เครื่องมือที่ยุ่ยยากและผู้ทำการทดสอบจำเป็นต้องมีความชำนาญในการใช้อุปกรณ์เหล่านั้นอีกด้วย ปัจจุบันมีการพัฒนาชุดทดสอบอย่างหลากหลายรูปแบบ ซึ่งก็ตามแต่ความต้องการของผู้วิจัยและพัฒนาได้ออกแบบขึ้นล้วนแต่มีความสามารถในการตรวจวิเคราะห์ได้อย่างหลากหลาย เช่น คลอไรด์ ซัลไฟต์ ไนเตรท แอมโมเนีย โปรท เป็นต้น ชุดทดสอบที่วางขายตามท้องตลาดโดยทั่วไป ส่วนใหญ่เป็นชุดทดสอบที่ออกแบบมาในเชิงคุณภาพวิเคราะห์ โดยสามารถบอกได้ว่ามีสารนั้นๆ อยู่ในตัวอย่างหรือไม่ ส่วนชุดทดสอบที่เป็นในเชิงปริมาณวิเคราะห์ส่วนใหญ่มักจะสามารถบอกความเข้มข้นได้เป็นช่วงเท่านั้น ไม่สามารถระบุได้อย่างชัดเจนว่ามีความเข้มข้นหรือปริมาณอยู่เท่าใด

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นจึงสามารถนำไปพัฒนาชุดทดสอบที่สามารถระบุความเข้มข้นหรือปริมาณของสารตัวอย่างได้และตอบสนองความต้องการในด้านการวิเคราะห์ที่ลดความยุ่งยากของอุปกรณ์ลงและง่ายต่อการใช้งานของผู้ทดสอบรวมถึงใช้เวลาในการวิเคราะห์ไม่นานและสามารถทดสอบหน้างานได้ สำหรับงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาชุดทดสอบภาคสนามขึ้น โดยใช้วัสดุที่หาง่ายและไม่ซับซ้อน คือ กระดาษกรอง ทำการพัฒนารูปแบบของชุดทดสอบและประสิทธิภาพของชุดทดสอบให้สามารถวิเคราะห์ในเชิงปริมาณได้ โดยใช้รีเอเจนต์ คือ เหล็ก(III) เพื่อทำการตรวจวัดสารตัวอย่าง คือ ไทโอไซยาเนตไอออน โดยจะเกิดสารเชิงซ้อนเป็นสีส้มแดง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาและพัฒนาชุดทดสอบบนกระดาษสำหรับวิเคราะห์ปริมาณไทโอไซยาเนตไอออน โดยใช้ระบบโซล-เจลช่วยตรึงรีเอเจนต์เหล็ก(III) เป็นจุดทดสอบ

1.2.2 เพื่อนำชุดทดสอบบนกระดาษแบบจุดที่พัฒนาขึ้นมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างปุ๋ยที่มีไทโอไซยาเนตเจือปนในเชิงปริมาณวิเคราะห์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ศึกษาหลักการและระบบที่เหมาะสมและเป็นไปได้สำหรับพัฒนาชุดทดสอบบนกระดาษ ซึ่งได้มีการเจอเหล็ก(III) ไว้ด้วยระบบโซล-เจลบนจุดทดสอบ เพื่อใช้เป็นชุดทดสอบภาคสนามในเชิงปริมาณวิเคราะห์ ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเจือรีเอเจนต์เหล็ก(III) ลงในชุดทดสอบและ ประสิทธิภาพความใช้ได้ของชุดทดสอบที่พัฒนาขึ้น

ขั้นตอนการดำเนินการมีดังนี้

1.3.1 สืบค้นข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

1.3.2 ศึกษาความเป็นไปได้และออกแบบระบบที่ใช้ในการเตรียมชุดทดสอบแบบจุดบนแผ่นกระดาษ

1.3.3 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการสร้างชุดทดสอบแบบจุดบนกระดาษ

1.3.4 ศึกษาความสามารถและประเมินประสิทธิภาพความใช้ได้ของชุดทดสอบสำหรับการตรวจวัดเชิงปริมาณวิเคราะห์

1.3.5 ประยุกต์ชุดทดสอบบนกระดาษนี้พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการตรวจวิเคราะห์หาปริมาณไทโอไซยาเนตในตัวอย่างปุ๋ย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ชุดทดสอบแบบจุดบนกระดาษสำหรับใช้งานในภาคสนามสำหรับการตรวจวัดปริมาณไทโอไซยาเนตไอออนในตัวอย่างปุ๋ย

1.4.2 ได้พัฒนาเทคนิคและวิธีการสร้างชุดทดสอบบนกระดาษด้วยระบบโซล-เจลเจือด้วยเหล็ก(III)

บทที่ 2

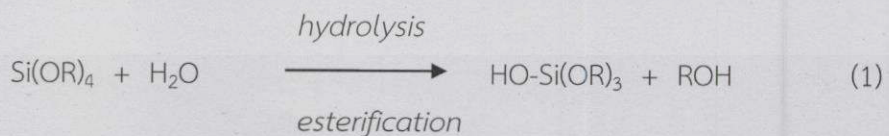
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการโซล-เจล(sol-gel process) [1]

คอลลอยด์ (colloid) คือสารประกอบที่มีอนุภาคกระจายตัวอยู่ในวัฏภาคนั้น โดยมีขนาดอนุภาคประมาณ 1-1000 นาโนเมตร ซึ่งแรงโน้มถ่วงของโลกมีผลน้อยมากต่ออนุภาคคอลลอยด์โซล (*sol*) คืออนุภาคคอลลอยด์ของแข็งที่กระจายตัวอยู่ในวัฏภาคของเหลว แอโรซอล (*aerosol*) คืออนุภาคคอลลอยด์ที่กระจายตัวอยู่ในวัฏภาคของก๊าซ ในกรณีที่มีอนุภาคคอลลอยด์เป็นของเหลวจะเรียกว่า “หมอก” (*fog*) และในกรณีที่มีอนุภาคคอลลอยด์เป็นของแข็งจะเรียกว่า “ควัน” (*smoke*) และอิมัลชัน (*emulsion*) คืออนุภาคคอลลอยด์ของเหลวที่กระจายตัวอยู่ในวัฏภาคของเหลวอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งที่กล่าวมาข้างต้นสามารถนำมาสร้างเป็นพอลิเมอร์หรือชิ้นงานต่างๆ ได้เช่น ถ้าหากทำให้อนุภาคของโซลหนาแน่นขึ้นจะเปลี่ยนเป็นอนุภาคเจล (*gel*) มีลักษณะเป็นของแข็งที่เกิดการเชื่อมโยงจนมีขนาดใหญ่อันซึ่งล้อมรอบอยู่ในวัฏภาคของเหลว

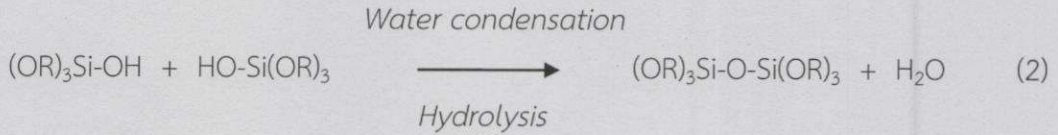
กระบวนการโซล-เจลประกอบด้วยสารตั้งต้น (*precursor*) ซึ่งเป็นอนุภาคคอลลอยด์ที่ประกอบด้วยธาตุโลหะ (*metal*) หรือธาตุกึ่งโลหะ (*metalloid*) ซึ่งล้อมรอบด้วยลิแกนด์ (*ligand*) ชนิดต่างๆ ตัวอย่างของสารตั้งต้นที่นิยมนำมาใช้โดยทั่วไปคือ อลูมิเนียมออกไซด์ (*aluminum oxide*) ที่มีเกลืออนินทรีย์ (*inorganic salts*) เป็นองค์ประกอบ เช่น $Al(NO_3)_3$ หรืออาจมีสารอินทรีย์ (*organic*) เป็นองค์ประกอบ เช่น $Al(OC_2H_5)_3$ ในส่วนของลิแกนด์นั้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มด้วยกัน ได้แก่ กลุ่มอัลคิล (*alkyl*) คือกลุ่มของโมเลกุลอัลเคน (*alkane*) ซึ่งไฮโดรเจนอะตอม (โปรตอน) หลุดออกไป 1 ตัวตัวอย่างเช่น เมทิล (*methyl*; $\bullet CH_3$) หรือ เอทิล (*ethyl*; $\bullet C_2H_5$) (โดยที่ \bullet หมายถึง อิเล็กตรอน; *e*) และกลุ่มอัลคอกซี (*alkoxy*) คือกลุ่มของโมเลกุลอัลคอกซิล (*alkoxyl*) หรือ แอลกอฮอล์ (*alcohol*) ที่โปรตอนหลุดออกไป 1 ตัว ตัวอย่างเช่น เมทอกซี (*methoxy*; $\bullet OCH_3$) หรือ เอทอกซี ($\bullet OC_2H_5$) ตัวอย่างลิแกนด์ที่นิยมใช้ แสดงดังตารางที่ 2.1

เมทัลอัลคอกไซด์ (*metal alkoxide*) มักเป็นสารตั้งต้นที่นิยมใช้ในการทดลองและการศึกษาวิจัย ตัวอย่างเช่น เตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต (*tetraethyl orthosilicate*; *TEOS* หรือ *tetraethoxysilane*), $Si(OC_2H_5)_4$ เนื่องจากสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวนั้นจะเรียกว่า “ไฮโดรไลซิส” (*hydrolysis*) โดยสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (1)

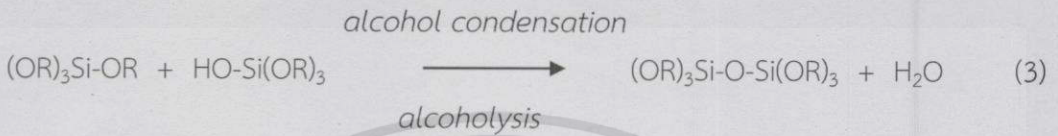


โดยที่ R คือ โปรตอนหรือลิแกนด์
ROH คือ แอลกอฮอล์

และเมื่อโมเลกุลที่ผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแล้ว สามารถเกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุลซึ่งเรียกว่า “ปฏิกิริยาควบแน่น” (condensation reaction) ดังสมการที่ (2) และ (3)



หรือ



ตารางที่ 2.1 แสดงลิแกนด์ที่นิยมใช้เป็นสารตั้งต้น

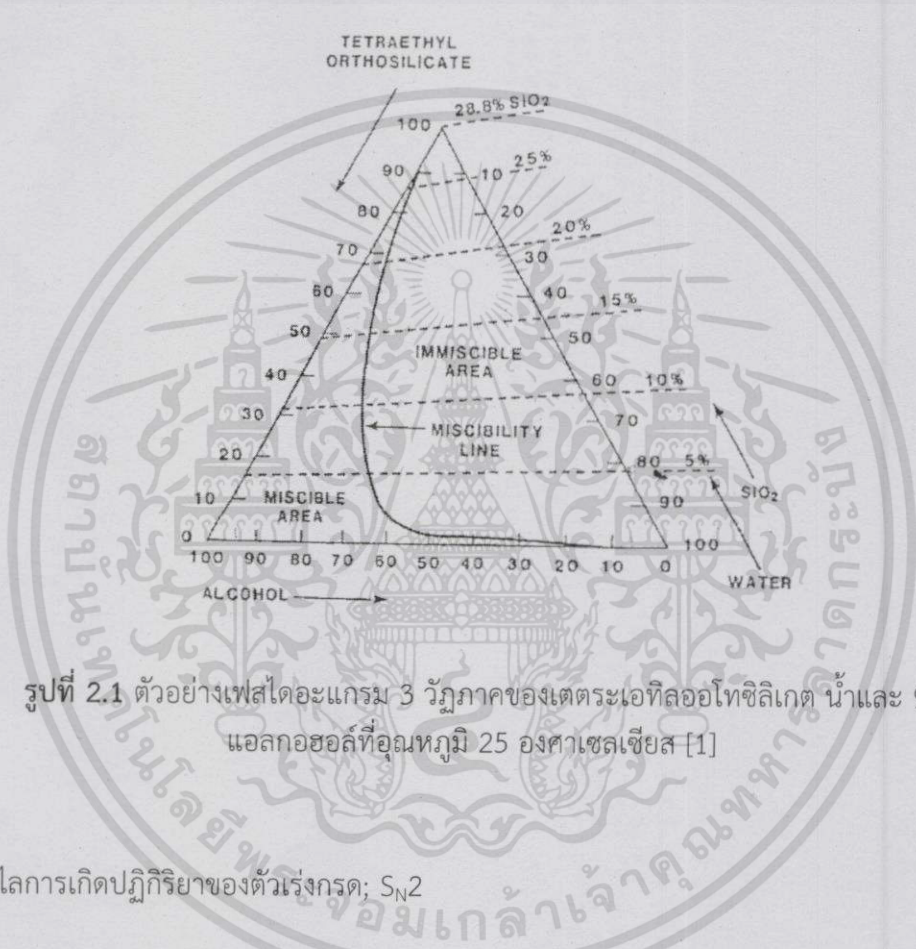
Alkyl		Alkoxy	
methyl	• CH ₃	methoxy	•O CH ₃
ethyl	• C ₂ H ₅	ethoxy	•O C ₂ H ₅
n-propyl	• CH ₂ CH ₂ CH ₃	n-propoxy	•O CH ₂ CH ₂ CH ₃
iso-propyl	H ₃ C(•C)H CH ₃	iso-propoxy	H ₃ C(•O)CH CH ₃
n-butyl	• CH ₂ (CH ₂) ₂ CH ₃	n-butoxy	•O(CH ₂) ₃ CH ₃
sec-butyl	•H ₃ C(•C)HCH ₂ CH ₃	sec-butoxy	•H ₃ C(•O)CH CH ₂ CH ₃
iso-butyl	• CH ₂ CH(CH ₃) ₂	iso-butoxy	•O CH ₂ CH(CH ₃) ₂
tert-butyl	• C(CH ₃) ₃	tert-butoxy	•O C(CH ₃) ₃

ปฏิกิริยาควบแน่นจะสร้างโมเลกุลขนาดเล็กออกมาเป็นผลพลอยได้ เช่น น้ำหรือแอลกอฮอล์ ซึ่งปฏิกิริยาควบแน่นนี้สามารถเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องเพื่อสร้างโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งเรียกปฏิกิริยาดังกล่าวว่า “พอลิเมอไรเซชัน” (polymerization)

2.1.1 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

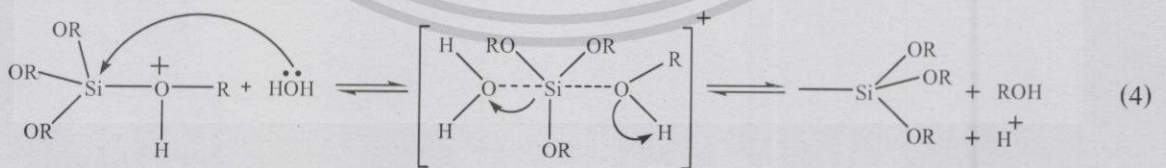
ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสสามารถเกิดขึ้นได้ โดยปราศจากการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) แต่ปฏิกิริยาจะเกิดได้อย่างรวดเร็วและสมบูรณ์เมื่อมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา โดยตัวเร่งปฏิกิริยานั้นโดยทั่วไปที่นิยมใช้คือ กรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid; HCl) และแอมโมเนียม (ammonium; NH₄⁺) ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นๆ ได้แก่ กรดอะซิติก (acetic acid; CH₃COOH) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (potassium hydroxide; KOH) หรือ โพแทสเซียมฟลูออไรด์ (potassium fluoride; KF) เป็นต้น โดยความแรงและความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยากรดหรือเบส จะมีผลต่ออัตราเร็วและขอบเขตของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส รวมทั้งอัตราส่วนของน้ำต่อซิลิกอน (H₂O:Si) มีผลต่อความสมบูรณ์ของการเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากน้ำและอัลคอกไซด์ไม่สามารถรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันได้ (immiscible) จึงต้องเติมตัวทำละลาย (solvent) อื่นช่วย (homogenizing agent) เช่น แอลกอฮอล์ ให้เกิดการรวมตัวได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม เจลสามารถเกิดขึ้นจากการผสมกันของน้ำและอัลคอกไซด์ได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยไม่ต้องเติมตัวทำละลายเพราะแอลกอฮอล์สามารถเกิดขึ้นจากผลพลอยได้ (by-product) ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอยู่แล้ว ดังนั้น อัตราส่วนของน้ำต่อซิลิกอนนั้นมีอัตราส่วนที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 1 ถึง 50 และค่าความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 0.01 ถึง 7.0 โมลาร์ ซึ่งเป็นค่าที่นิยมใช้ในการศึกษาและสังเคราะห์จากกระบวนการโซล-เจล ตัวอย่างเฟสไดอะแกรม 3 ภูมิภาคของเตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต น้ำ และ 95% แอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 2.1 และกลไกของการเกิดปฏิกิริยาในสภาวะตัวเร่งกรดและเบส แสดงได้ดังสมการที่ (4) และ (5)



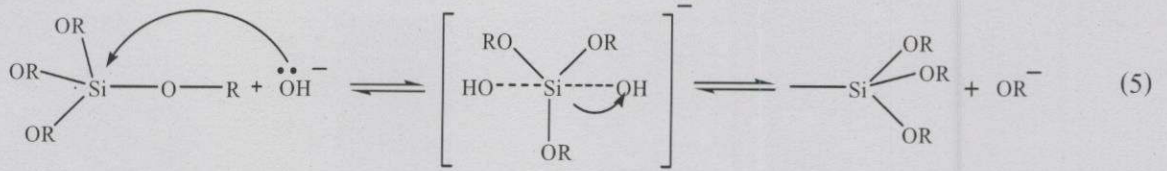
รูปที่ 2.1 ตัวอย่างเฟสไดอะแกรม 3 ภูมิภาคของเตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต น้ำ และ 95% แอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส [1]

กลไกการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งกรด; S_N2



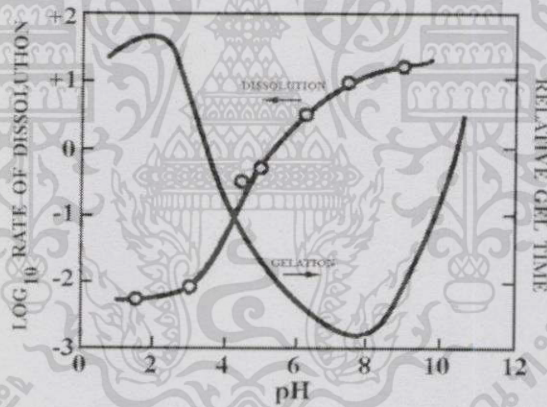
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลไกการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งเบส; S_N2



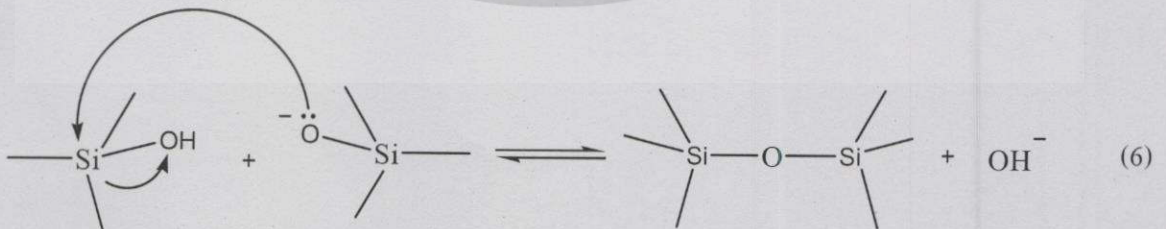
2.1.2 ปฏิกิริยาควบแน่น

ปฏิกิริยาควบแน่นเป็นการเชื่อมโยงโมเลกุลเล็กๆต่อกันให้ใหญ่ขึ้นด้วยพันธะซิลอกเซน (siloxane bonding) ในสภาวะเบสจะเกิดเจลได้เพิ่มขึ้น โดยปฏิกิริยาการควบแน่นจะเกิดอย่างต่อเนื่องที่ค่า pH 2 ถึง 8 การละลาย (dissolution) จะเพิ่มขึ้น ส่วนการแข็งตัว (gelation) จะไม่เกิดขึ้น และในช่วงค่า pH >8 การละลายจะลดลง ส่วนการแข็งตัวเป็นเจลจะเพิ่มขึ้น ผลของค่า pH ที่มีผลต่ออัตราการละลายและเวลาในการเกิดเจลแสดงในรูปที่ 2.2 และกลไกของการเกิดปฏิกิริยาควบแน่นแสดงได้ดังสมการที่ (6)

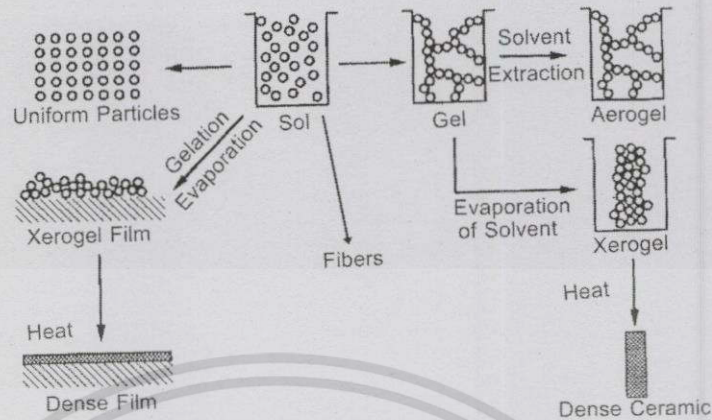


รูปที่ 2.2 ผลของค่า pH ต่ออัตราการละลายและเวลาในการเกิดเจล [1]

กลไกการเกิดปฏิกิริยาควบแน่น



และเทคนิคในการสังเคราะห์โดยวิธีโซล-เจลแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 เทคนิคในการสังเคราะห์โดยวิธีโซล-เจล [1]

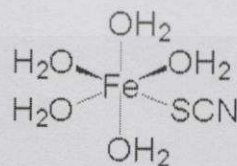
2.2 การเกิดสารเชิงซ้อนระหว่างเหล็ก(III) กับไทโอไซยาเนต [2]

ไทโอไซยาเนตไอออน(III) เป็นสารเชิงซ้อนที่มีประจุบวก มีสูตรทางเคมีคือ $[\text{Fe}(\text{SCN})]^{2+}$ มีสีแดงคล้ำเลือด การเกิดปฏิกิริยาเป็นดังสมการที่ (7) ปฏิกิริยานี้ใช้ในการทดสอบเหล็ก(III) เมื่อเหล็ก(III) ทำปฏิกิริยากับไทโอไซยาเนตจะเกิดสารละลายสีแดง มีโครงสร้างแบบทรงแปดหน้า (octahedral) ที่มีน้ำเป็นลิแกนด์ 5 ตัว และมีไทโอไซยาเนตเป็นลิแกนด์ 1 ตัวเกิดพันธะกับไอออนของเหล็ก(III) ดังรูปที่ 2.4 ในกรณีที่มีความเข้มข้นของไทโอไซยาเนตมาก ไทโอไซยาเนตจะเข้าแทนที่น้ำเกิดเป็นโครงสร้างทรงแปดหน้าที่มีไทโอไซยาเนตเป็นลิแกนด์ทั้งหมด 6 ตัว ส่งผลให้โครงสร้างมีความเสถียรและจะไม่มีการเกิดปฏิกิริยากับสารอื่น

ไทโอไซยาเนตไอออน(III) ต้องเก็บในสารละลายกรด เพื่อป้องกันการเกิดเป็นไอออน FeOH^{2+} ซึ่ง H^+ ที่มากเกินพอจะป้องกันการเกิด Fe^{3+} จากปฏิกิริยาข้างเคียงและไทโอไซยาเนตไอออน(III) จะสลายตัวเมื่อโดนแสง



(7)



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของสารเชิงซ้อนระหว่างเหล็ก(III) กับไทโอไซยาเนต [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ชุดทดสอบภาคสนาม (on-site monitoring test kit) [3]

ชุดทดสอบภาคสนามต้องมีสมบัติเพื่อให้ได้ผลทดสอบได้ทันที เพื่อการทดสอบตัวอย่างจำนวนมาก สามารถทดสอบได้ทันทีที่เก็บตัวอย่าง เนื่องจากการนำตัวอย่างมาทดสอบยังห้องปฏิบัติการอาจมีการปนเปื้อนหรือการสลายตัวของตัวอย่าง ก่อนที่ตัวอย่างจะส่งวิเคราะห์มายังห้องปฏิบัติการ ชุดทดสอบภาคสนามเหมาะสำหรับการคัดกรอง (screening) ตัวอย่างที่มีจำนวนมาก ก่อนนำส่งตัวอย่างเข้าสู่ห้องปฏิบัติการ ชุดทดสอบภาคสนามส่วนใหญ่จึงมีไว้สำหรับใช้ในการคัดกรอง และไม่สามารถใช้ในการทดสอบที่ต้องการความแม่นยำสูงได้ ชุดทดสอบภาคสนามมีจุดเด่นและจุดด้อยดังนี้

จุดเด่น

1. ใช้ได้ง่าย โดยผู้ใช้ไม่ต้องมีความเชี่ยวชาญด้านนั้นๆ โดยตรง กระบวนการทดสอบจึงต้องไม่สลับซับซ้อนเกินไป
2. สามารถนำไปใช้ในสถานะของภาคสนาม ใช้งานในสถานะที่ต่างจากห้องปฏิบัติการ ไม่มีโต๊ะ ไม่มีไฟฟ้า ไม่มีน้ำ มีสถานะอากาศแปรปรวน เป็นต้น
3. ใช้เวลาทดสอบน้อย เพราะเป็นการใช้ในภาคสนาม ซึ่งมักไม่สามารถรอผลการทดสอบที่ใช้เวลานานได้
4. ราคาถูก เพราะการทดสอบภาคสนามมักจำเป็นต้องทำการทดสอบตัวอย่างจำนวนมาก

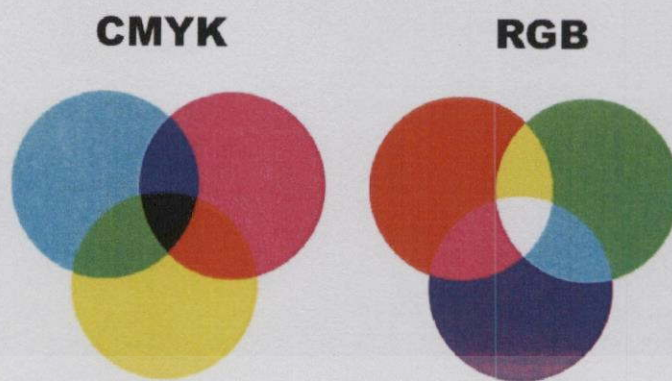
จุดด้อย

1. ความถูกต้องแม่นยำน้อยกว่าวิธีที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ
 2. ความไวต่ำกว่าวิธีที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ
 3. มีข้อจำกัดด้านตัวอย่างที่ทดสอบได้ เช่น ใช้ได้เฉพาะตัวอย่างที่ไม่สลับซับซ้อน
 4. น้ำยาและสารเคมีต่างๆ ที่ใช้ จะต้องมีความเสถียร เพื่อให้สามารถเก็บไว้ใช้เป็นเวลานาน
- เนื่องจากชุดทดสอบภาคสนามมีทั้งจุดเด่นและจุดด้อย จึงควรใช้ชุดทดสอบชนิดนี้ตามความเหมาะสมกับลักษณะของงาน และความถูกต้องแม่นยำที่ต้องการ

2.4 ระบบสี (Color system) [4]

โดยทั่วไปสีในธรรมชาติและสีที่สร้างขึ้น จะมีรูปแบบการมองเห็นของสีที่แตกต่างกัน ซึ่งรูปแบบการมองเห็นสีที่ใช้ในงานด้านกราฟิกทั่วไปนั้นมียูด้วยกันหลายระบบ เช่น

1. ระบบสีแบบ RGB ตามหลักการแสดงสีของเครื่องคอมพิวเตอร์
2. ระบบสีแบบ CMYK ตามหลักการแสดงสีของเครื่องพิมพ์



รูปที่ 2.5 ภาพแสดงระบบสีของ CMYK และระบบสีของ RGB [3]

2.4.1. ระบบสีแบบ RGB

เป็นระบบสีที่ประกอบด้วยแม่สี 3 สีคือ แดง (Red), เขียว (Green) และ น้ำเงิน (Blue) ในสัดส่วนความเข้มข้มที่แตกต่างกัน เมื่อนำมาผสมกันทำให้เกิดสีต่างๆ บนจอคอมพิวเตอร์ได้มากถึง 16.7 ล้านสี ซึ่งใกล้เคียงกับสีที่ตาเรามองเห็นได้โดยปกติ และจุดที่สีทั้งสามสีรวมกันจะกลายเป็นสีขาว นิยมเรียกการผสมสีแบบนี้ว่าแบบ “Additive” หรือการผสมสีแบบบวก ซึ่งเป็นการผสมสีชั้นที่ 1 หรือ ถ้านำเอา Red Green Blue มาผสมครั้งละ 2 สี ก็จะทำให้เกิดสีใหม่ เช่น

$$\begin{aligned} \text{Blue} + \text{Green} &= \text{Cyan} \\ \text{Red} + \text{Blue} &= \text{Magenta} \\ \text{Red} + \text{Green} &= \text{Yellow} \end{aligned}$$

แสงสี RGB มักจะถูกใช้สำหรับการส่องสว่างทั้งบนจอทีวีและจอคอมพิวเตอร์ ซึ่งสร้างจากการให้กำเนิดแสงสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน ทำให้สีดูสว่างกว่าความเป็นจริง

2.4.2. ระบบสีแบบ CMYK

เป็นระบบสีที่ใช้กับเครื่องพิมพ์ที่พิมพ์ออกทางกระดาษ ซึ่งประกอบด้วยสีพื้นฐาน คือ สีฟ้า (Cyan), สีม่วงแดง (Magenta), สีเหลือง (Yellow) และเมื่อนำสีทั้ง 3 สีมาผสมกันจะเกิดสีเป็น สีดำ (Black) แต่จะไม่ดำสนิทเนื่องจากหมึกพิมพ์มีความไม่บริสุทธิ์ โดยเรียกการผสมสีทั้ง 3 สีข้างต้นว่า “Subtractive Color” หรือการผสมสีแบบลบ หลักการเกิดสีของระบบนี้คือ หมึกสีหนึ่งจะดูดกลืนสีจากสีหนึ่งแล้วสะท้อนกลับออกมาเป็นสีต่างๆ เช่น สีฟ้าดูดกลืนสีม่วงแล้วสะท้อนออกมาเป็นสีน้ำเงิน ซึ่งจะสังเกตได้ว่าสีที่สะท้อนออกมาจะเป็นสีหลักของระบบ RGB การเกิดสีนี้ในระบบนี้จึงตรงข้ามกับการเกิดสีในระบบ RGB

2.5 หลักการทำงานของเครื่องสแกน (scanner) [5]

เครื่องสแกน คือ อุปกรณ์ต่อเชื่อมคอมพิวเตอร์แบบกราฟิก มีหน้าที่ในการเปลี่ยนแปลงภาพต้นฉบับ (รูปถ่าย ตัวอักษรบนหน้ากระดาษ ภาพวาด) ให้เป็นข้อมูล เพื่อให้คอมพิวเตอร์สามารถนำข้อมูลดังกล่าวมาใช้ประโยชน์ในการแสดงผลที่หน้าจอ ทำให้สามารถแก้ไข ตกแต่งเพิ่มเติม และจัดเก็บข้อมูลได้

คำว่าสแกน (scan) หมายถึง กราดตรวจ, กราดภาพเครื่องสแกน หรือ เครื่องกราดภาพ จะทำการตรวจสอบข้อมูลในลักษณะตัวอักษร หรือภาพโดยเรียงลำดับทีละส่วน นั่นเอง

ประเภทของเครื่องสแกน (scanner)

1. Flatbed scanners บางที่เรียกว่า สแกนเนอร์แบบตั้งโต๊ะเป็นสแกนเนอร์ที่นิยมใช้กันมากที่สุด

2. Sheet - fed scanners เหมือนกับสแกนเนอร์แบบตั้งโต๊ะเพียงแต่มีอุปกรณ์ป้อนกระดาษเพิ่มขึ้น

3. Handheld - scanners เป็นเทคโนโลยีแบบเดียวกับสแกนเนอร์แบบตั้งโต๊ะ ออกแบบให้มีขนาดเล็ก ใช้มือสแกนแทนมอเตอร์ ความละเอียดสลับตั้งโต๊ะไม่ได้ การใช้ค่อนข้างสะดวกและสามารถพกพาใส่กระเป๋าได้

4. Drum- scanners เป็นสแกนเนอร์ขนาดใหญ่ ใช้ในงานพิมพ์ที่ต้องการความละเอียดสูง เทคโนโลยีที่ใช้คือ หลอดโฟโตมัลติไฟเออร์ (Photomultipliers) ย่อเป็นหลอด PMT เอกสารที่ต้องการสแกนจะนำไปม้วนติดกับหลอดแก้ว ภายในหลอดแก้วมีแหล่งกำเนิดแสงส่องไปที่เอกสารและสะท้อนออกมาเป็นลำแสง 3 ลำ แสงแต่ละลำผ่านฟิลเตอร์ 3 สีเพื่อเข้าสู่หลอดมัลติไฟเออร์ เพื่อเปลี่ยนพลังงานของแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า ภาพของเครื่องสแกนแต่ละประเภทแสดงในรูปที่ 2.6



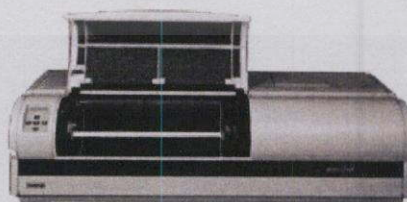
Flatbed scanner



Handheld - scanners



Sheet - fed scanners



Drum - scanner

รูปที่ 2.6 แสดงภาพประเภทของเครื่องสแกน [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

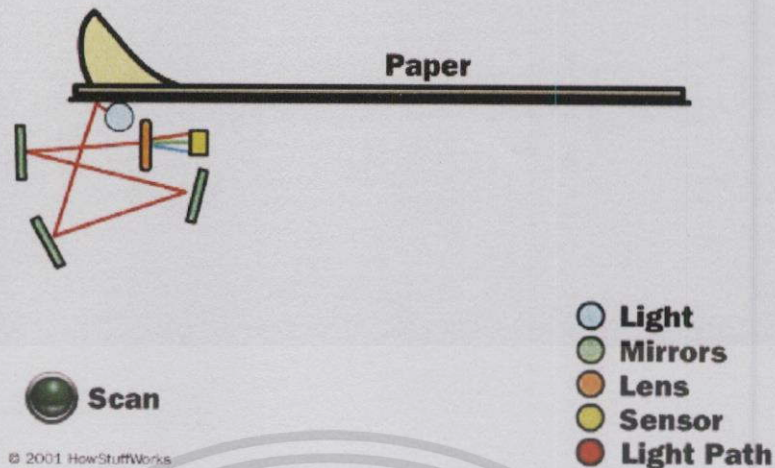
ส่วนประกอบของเครื่องสแกน

1. แผ่นปิด (Document Cover) เป็นส่วนที่มีความสำคัญ เพราะใช้สำหรับป้องกันแสงจากภายนอกที่อาจจะเข้าไปรบกวนในขณะที่เครื่องสแกนทำงาน ดังนั้นเมื่อสแกนภาพทุกครั้งจะต้องปิดแผ่นปิดเสมอ แต่บางครั้งอาจจะถอดฝาดังกล่าวออกได้หากเอกสารที่นำมาสแกนมีความหนาและสามารถที่ปิดกระจกวางได้สนิท
2. แผ่นกระจกวางรูป (Document Table) เป็นบริเวณที่นำภาพมาวางขณะสแกนภาพ
3. คาร์เรียด (Carriage) เป็นส่วนที่สำคัญที่สุดสำหรับการสแกนภาพ ประกอบด้วยอุปกรณ์หลักๆอยู่ 2 ประเภท คือ ตัวตรวจจับแสง (Optical Sensor) และหลอดฟลูออเรสเซนต์
4. แผงหน้าปัทม์ควบคุม ใช้สำหรับกำหนดและควบคุมการทำงานของเครื่องสแกน ในเรื่องของความละเอียด ความสว่าง (Brightness) สัดส่วนขนาดของภาพ และการเลือกพิมพ์จากภาพสแกน
5. ดิสทริบิวต์ ใช้สำหรับบอกลักษณะการติดต่อระหว่างเครื่องสแกนกับคอมพิวเตอร์

การทำงานของเครื่องสแกน

ภาพการทำงานของเครื่องสแกนแสดงได้ดังรูปที่ 2.7

- สแกนเนอร์ มีหลักการทำงาน คือ เครื่องอ่านภาพ จะทำการอ่านภาพโดยอาศัยการสะท้อนหรือการส่องผ่านของแสง กับภาพต้นฉบับที่ทึบแสง หรือโปร่งแสง ให้ตกกระทบกับแถบของอุปกรณ์ไวแสง (photosensitive) ซึ่งมีชื่อในทางเทคนิคว่า Charge-Coupled Device (CCD) ตัว CCD จะรับแสงดังกล่าวลงไปเก็บไว้ในเส้นเล็กของเซลล์ และจะแปลงคลื่นแสงของแต่ละเซลล์เล็กๆ ให้กลายเป็นคลื่นความต่างศักย์ ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามอัตราส่วนของระดับความเข้มของแสงแต่ละจุด
- ตัวแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัล หรือ ADC : Analog to Digital Convertor จะแปลงคลื่นความต่างศักย์ให้เป็นข้อมูลในรูปแบบที่คอมพิวเตอร์เข้าใจ ในเวลาเดียวกันโปรแกรมในการอ่านจะควบคุมการทำงานของเครื่องอ่านภาพให้รับข้อมูลเข้า และจัดรูปแบบเป็นแฟ้มข้อมูลของภาพในระบบคอมพิวเตอร์ต่อไป
- ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องสแกนคือแหล่งกำเนิดแสงซึ่งจะทำหน้าที่ฉายแสงไปที่กระดาษที่วางอยู่บนกระจก พื้นทึบที่ผิวปิดจะช่วยให้การสะท้อนของแสงดีขึ้น เมื่อคุณสั่งให้สแกนเนอร์ทำงาน มอเตอร์จะขับเคลื่อนหัวสแกนผ่านใต้กระดาษ ในระหว่างที่เคลื่อนที่นี้หัวสแกนจะจับแสงที่สะท้อนมาจากแต่ละพื้นที่ของกระดาษด้วย ซึ่งพื้นที่นี้จะมีขนาดประมาณ 1/90,000 ตารางนิ้ว แสงจากกระดาษจะสะท้อนผ่านระบบกระจกเพื่อทำให้ลำแสงนั้นได้ไปในทิศทางที่เหมาะสมไปยังเลนส์ เลนส์จะรวมแสงเพื่อไปผ่านไดโอดแสง เพื่อแปลงข้อมูลแสงนี้ให้อยู่ในรูปแบบของกระแสไฟฟ้า ถ้ามีแสงผ่านไปที่ไดโอดมากปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ได้ก็จะมากขึ้น
- ถ้าเป็นเครื่องสแกนแบบสี แสงที่สะท้อนนี้จะผ่านไปยังฟิลเตอร์แดง เขียว หรือน้ำเงินที่อยู่หน้าไดโอด ADC จะเก็บข้อมูลอะนาล็อกแต่ละส่วนนี้ไว้ ซึ่งข้อมูลแต่ละส่วนนี้เรียกว่า พิกเซล ซึ่งในความยาวหนึ่งนิ้วจะประกอบด้วยพิกเซลประมาณ 300-1,200 พิกเซล
- การเคลื่อนที่ของเครื่องสแกนบางประเภท ตัวกระดาษไม่เคลื่อนที่ สิ่งที่เคลื่อนที่คือ หัวสแกน แต่ในเครื่องสแกนระดับสูงหัวอ่านจะไม่เคลื่อนที่ จะมีตัวหมุนกระดาษเข้าไป ด้วยวิธีนี้ทำให้คุณภาพที่ได้จากการสแกนแบบนี้สูงกว่า



© 2001 HowStuffWorks

รูปที่ 2.7 ภาพแสดงการทำงานของเครื่องสแกน [5]

ประเภทของภาพที่เกิดจากการสแกน แบ่งเป็นประเภทดังนี้

1. ภาพ Single Bit ภาพ Single Bit เป็นภาพที่มีความหยابมากที่สุด ใช้พื้นที่ในการเก็บข้อมูลน้อยที่สุดและนำมาใช้ประโยชน์อะไรไม่ค่อยได้ แต่ข้อดีของภาพประเภทนี้คือ ใช้ทรัพยากรของเครื่องน้อยที่สุดใช้พื้นที่ในการเก็บข้อมูลน้อยที่สุด ใช้ระยะเวลาในการสแกนภาพน้อยที่สุด Single-bit แบ่งออกได้สองประเภทคือ

- Line Art ได้แก่ภาพที่มีส่วนประกอบเป็นภาพขาวดำ ตัวอย่างของภาพพวกนี้ ได้แก่ ภาพที่ได้จากการสเก็ต

- Halftone ภาพพวกนี้จะให้สีที่เป็นโทนสีเทามากกว่า แต่โดยทั่วไปยังถูกจัดว่าเป็นภาพประเภท Single-bit เนื่องจากเป็นภาพหยาบๆ

2. ภาพ Gray Scale ภาพพวกนี้จะมีส่วนประกอบมากกว่าภาพขาวดำ โดยจะประกอบด้วยเฉดสีเทาเป็นลำดับขั้น ทำให้เห็นรายละเอียดด้านแสง-เงา ความชัดลึกมากขึ้น ภาพพวกนี้แต่ละพิกเซลหรือแต่ละจุดของภาพอาจประกอบด้วยจำนวนบิตมากกว่า ต้องการพื้นที่เก็บข้อมูลมากขึ้น

3. ภาพสี หนึ่งพิกเซลของภาพสีนั้นประกอบด้วยจำนวนบิตมหาศาล และใช้พื้นที่เก็บข้อมูลมาก ความสามารถในการสแกนภาพออกมาได้ละเอียดขนาดไหนนั้นขึ้นอยู่กับว่าใช้เครื่องสแกนขนาดความละเอียดเท่าไร

4. ตัวหนังสือ ตัวหนังสือในที่นี้ ได้แก่ เอกสารต่างๆ เช่น ต้องการเก็บเอกสารโดยไม่ต้องพิมพ์ลงในแฟ้มเอกสารของเวิร์ดโปรเซสเซอร์ ก็สามารถใช้เครื่องสแกนทำการสแกนเอกสารดังกล่าว และเก็บไว้เป็นแฟ้มเอกสารได้ นอกจากนี้ด้วยเทคโนโลยีปัจจุบันสามารถใช้ โปรแกรมที่สนับสนุน OCR (Optical Characters Reconize) มาแปลงแฟ้มภาพเป็นเอกสารดังกล่าวออกมาเป็นแฟ้มข้อมูลที่สามารถแก้ไขได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ohshima, T., Kagaya, S., Ide, M.G. and Cattrall, R.W. [6] ได้ศึกษาการใช้ Polymer inclusion membrane (PIM) จะถูกใช้เป็นตัวดูดซับในคอลัมน์ ก่อนการทำการวิเคราะห์ด้วยระบบ flow injection analysis เพื่อเป็นการเพิ่มความไวให้กับการวิเคราะห์ PIM-coated column เตรียมได้จากการเคลือบ PIM ลงบนคอลัมน์ ซึ่งจะประกอบไปด้วยโพลีไวนิลคลอไรด์, Aliquat 336 และ 1-เตตระเดคานอล ลงบน glass bead จากนั้นจึงแพ็ค glass bead ลงในคอลัมน์ ซึ่งในการวิเคราะห์หาไทโอไซยาเนตในปύจะใช้คอลัมน์ PIM ในการตรวจสอบซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของคอลัมน์ PIM ในระบบ FIA สารละลายมาตรฐานไทโอไซยาเนตและสารตัวอย่าง จะถูกฉีดเข้าสู่ระบบและถูกพาเข้าสู่ระบบด้วยกระแสของไนเตรต เมื่อผ่าน sample zone เข้าไป สารละลายไทโอไซยาเนตจะถูกทำให้มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ช่วยเพิ่มความไวในการวิเคราะห์ของระบบได้ถึง 7.4 เท่า หลังจากไทโอไซยาเนตทำปฏิกิริยากับเหล็ก(III) ไทโอไซยาเนตจะถูกตรวจวัดด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ มีขีดจำกัดการตรวจวัดของไทโอไซยาเนตที่พบได้ในสารที่ไม่มีและมีของแอมโมเนียมซัลเฟต 20 กรัมต่อลิตร คือ 0.014 และ 0.024 มิลลิกรัมต่อลิตร (S/N=2) ตามลำดับ ซึ่งการวิจัยนี้ถือว่าประสบความสำเร็จในการตรวจหาไทโอไซยาเนตในปύแอมโมเนียมซัลเฟต

Afkhami, A., Felehgari, F.S. และ Madrakian, T. [7] ศึกษาการใช้อนุภาคทองคำระดับนาโนและท่อนาโนคาร์บอนเป็นส่วนสำคัญของสิ่งในการสร้างขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งมีความไวในการวิเคราะห์สูงและเป็นเซ็นเซอร์ทางเคมีไฟฟ้าที่มีความไวสูงและจำเพาะเจาะจง ใช้สำหรับการตรวจหาไทโอไซยาเนต ซึ่งวิธีวิจัยในงานวิจัยนี้สามารถทำได้ง่ายและรวดเร็วโดยใช้ไซคลิกโวลแทมเมตรี (cyclic voltammetry) จากการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscopy (SEM)) ส่องดูอนุภาคทองคำระดับนาโนที่อยู่บนพื้นผิวอนุภาคทองคำระดับนาโนเสริมด้วยท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น มีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยประมาณ 30 นาโนเมตร มีการรวมเอาข้อดีพื้นผิวอนุภาคทองคำระดับนาโนเสริมด้วยท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น จึงทำให้ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้าในการออกซิเดชันไทโอไซยาเนตให้กระแสที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับขั้วไฟฟ้าที่เคลือบด้วยคาร์บอน (CPE) เพียงอย่างเดียวเช่นเดียวกับการใช้ขั้วไฟฟ้าท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) ที่พัฒนาขึ้นแล้วก็ตาม ในงานวิจัยนี้พบว่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการใช้โวลแทมเมตรี เพื่อวิเคราะห์หาไทโอไซยาเนตมีการตอบสนองที่ดี เช่น เซ็นเซอร์มีการตอบสนองที่ช่วงความเป็นเส้นตรง 0.01-200.0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ ความไวในการตรวจวัด 2.9046 $\mu\text{A L}\mu\text{mol}^{-1}$ และขีดจำกัดการตรวจวัดต่ำสุดของไทโอไซยาเนต $5 \times 10^{-3} \mu\text{mol L}^{-1}$ ขั้วไฟฟ้านี้ใช้ในการตรวจวัดไทโอไซยาเนต ไอออนในน้ำลาย ปัสสาวะ และตัวอย่างน้ำ ได้ผลเป็นที่ยอมรับได้เมื่อเทียบกับวิธีวิเคราะห์มาตรฐาน

Bjergegaard, C., Moller, P. และ Sorensen, H. [8] ได้ศึกษาและพัฒนา Micellar electrokinetic capillary chromatography (MECC) เพื่อใช้ในการตรวจวัดหาไทโอไซยาเนต ไอออน, ไอโอไดด์, ไนไตรต์และไนเตรต จากงานวิจัยพบว่าอัลคิลไตรเมทิลแอมโมเนียมไอออนมีประโยชน์อย่างมากสำหรับ MECC เมื่อเทียบกับประจุลบ ซึ่งพบว่าในประจุลบจะมีการแพร่กระจายน้อยกว่า MECC จึงทำให้การวิเคราะห์ที่ใช้ MECC จะสามารถวิเคราะห์ได้เร็วกว่า นอกจากนี้ในระบบ MECC จะมีการใช้สารลดแรงตึงผิว ซึ่งมีประจุบวก คือ โดเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(dodecyltrimethylammonium bromide, DTAB) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการแยกแอนไอออนของตัวที่ต้องการวิเคราะห์ออกจากตัวรบกวนที่มีประจุลบ พบว่าจากตัวอย่างซึ่งเป็นสารสกัดทางชีวภาพ เช่น นมและเลือด ในการตรวจวัดแอนไอออนจะทำการตรวจวัดโดยใช้แสงยูวี จากงานวิจัยพบว่าวิธีวิจัยนี้ให้ผลเป็นที่น่าพอใจ แต่ยังมีส่วนที่จะต้องปรับปรุงคือในส่วนของ theoretical plates (N) ของไทโอไซยาเนตไอออนที่มีจำนวนน้อย ในงานวิจัยนี้จะใช้ capillary ขนาด 75 ไมโครเมตร เทียบกับ capillary ขนาด 50 ไมโครเมตร และมีการใช้ high sensitivity optical cell เพื่อเพิ่มความไวในการวิเคราะห์ ซึ่งจากการทำการทดลองซ้ำ 9 ครั้งโดยใช้ capillary ขนาด 50 ไมโครเมตร ให้ผลการทดลองที่ดีกว่าทั้ง migration time, relative migration time และ normalised peak area (ยกเว้นไทโอไซยาเนตไอออน) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์อยู่ระหว่าง 0.24 - 0.29%, 0.14 - 0.16% และ 1.75 - 2.37% ตามลำดับ สำหรับไทโอไซยาเนตไอออนเป็นส่วนตัวที่ต้องมีการปรับปรุงพัฒนาทั้ง normalised and relative normalised peak areas คือ 13.50 และ 13.91% ความเป็นเส้นตรง ($r^2 = 0.9748$) มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficients) อยู่ระหว่าง 0.9962 - 0.9975 สำหรับ normalised peak areas

Van Staden, J.F. และ Botha, A. [9] A. ศึกษาแบบ sequential injection analysis (SIA) ใช้ควบคู่กับเทคนิคสเปกโทรโฟโตเมทรี เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาไทโอไซยาเนตโดยอาศัยการจับตัวกันเกิดเป็นสารเชิงซ้อนไทโอไซยาเนตไอโอรอน(III) อัตราการไหล, ปริมาณตัวอย่างและรีเอเจนต์, ความยาวและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเป็นพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการกระจายภายในระบบ SIA จึงต้องมีการควบคุมให้เหมาะสม มีการศึกษาผลกระทบจากความเข้มข้นของรีเอเจนต์และความเข้มข้นของกรดไนตริกรีเอเจนต์จะถูกฉีดเข้าภายในระบบและมีกรดไนตริกเป็นตัวพา เปรียบเทียบกับ Flow injection analysis ที่มีรีเอเจนต์เป็นตัวพา ระบบถูกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์และสามารถวิเคราะห์หาไทโอไซยาเนตในตัวอย่างได้ 24 ตัวอย่างภายในเวลา 1 ชั่วโมง สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนน้อยกว่า 1.20% สำหรับตัวอย่างและสารละลายมาตรฐานไทโอไซยาเนตมีความเข้มข้นมากกว่า 10.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงความเป็นเส้นตรงอยู่ระหว่าง 20-150 มิลลิกรัมต่อลิตร ขีดจำกัดของการตรวจพบ 1.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ระบบสามารถนำไปประยุกต์ใช้วิเคราะห์หาไทโอไซยาเนตในน้ำเสีย

Wang, L., Dong, L. และ Song, W. [10] พบว่าในที่เป็นกรด โมเลกุลของไทโอไซยาเนตจะทำปฏิกิริยากับเหล็ก(III) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารเชิงซ้อนสีแดง โดยในการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไทโอไซยาเนตจะใช้เครื่องมือสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งจะศึกษาถึงผลกระทบของความยาวคลื่น ปริมาณของตัวทำปฏิกิริยา ความเป็นกรดและเวลาในการดูดกลืนแสง ได้กล่าวถึงตัวรบกวนของไอออนที่อยู่รวมกัน ผลลัพธ์ระหว่างค่าดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของไทโอไซยาเนตเป็นไปตามกฎของเบียร์ (Beer's Law) เมื่อความเข้มข้นของไทโอไซยาเนตเป็น 2-20 มิลลิกรัมต่อลิตร การลดถอยเชิงเส้นของค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 0.0523 และความเข้มข้นเท่ากับ 0.0156 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงเส้นเท่ากับ 0.9997 ค่าเฉลี่ยของค่าร้อยละของการวิเคราะห์คืนกลับของ vacuum carbonate desulfurization wastewater ของ 2 ชนิดเท่ากับ 100.95% และ 99.62% และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์เท่ากับ 0.79% และ 0.14% ตามลำดับ จากที่กล่าวแสดงให้เห็นว่าวิธีนี้มีความรวดเร็ว ความเที่ยงสูง มีความแม่นยำและง่ายต่อการปฏิบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นฤชิต ไพโรจน์ [1] ได้มีการพัฒนาชุดทดสอบสำหรับหาปริมาณเหล็กขึ้น โดยใช้โซล-เจลเจือด้วยออปโทไฟแนนโทรลีน และใช้เครื่องสแกนเป็นเครื่องตรวจวัด จากนั้นใช้โปรแกรม Image JTM ในการหาค่าความเข้มสี (สีแดง สีเขียว สีน้ำเงิน) คำนวณความแตกต่างของความเข้มสีจากสมการเชิงเส้นแบบยูคลิด (Euclidean Distance, ED) ซึ่งวิธีนี้สามารถหาปริมาณเหล็กในตัวอย่างวิตามินได้ในช่วงความเข้มข้น 10-100 มิลลิกรัมต่อลิตร

จิตพร โพธิ์ปัญญาศักดิ์ [11] ได้พัฒนาชุดทดสอบแบบจุดสำหรับหาปริมาณเฟอร์รัสไอออน โดยใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นสารช่วยยึดติดบนซับสเตรท 2 ชนิด คือกระดาษกรองและแผ่นกระจกปิดสไลด์ จุดรีเอเจนต์เตรียมได้โดยการหยดสารละลายออปโทไฟแนนโทรลีนเข้มข้น 0.05% ในสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เข้มข้น 3% ปริมาตร 10.0 ไมโครลิตร บนกระดาษกรอง หรือสารละลายออปโทไฟแนนโทรลีนเข้มข้น 0.07% ในสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เข้มข้น 3% ปริมาตร 10.0 ไมโครลิตรบนแผ่นกระจกปิดสไลด์ หยดสารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสไอออนหรือสารละลายตัวอย่างที่อยู่ในสารละลายไฮดรอกไซด์โรดามีนไฮโดรคลอไรด์ pH 3.5 ปริมาตร 10.0 ไมโครลิตร ลงบนจุดรีเอเจนต์ นำกระดาษกรองไปบันทึกภาพด้วยเครื่องสแกน โดยใช้โปรแกรม Image JTM เพื่อหาความเข้มสีและคำนวณค่า Euclidean Distance ส่วนแผ่นกระจกปิดสไลด์นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์พบว่าชุดทดสอบทั้ง 2 มีความเป็นเส้นตรงอยู่ในช่วงความเข้มข้น 1-10 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อนำชุดทดสอบที่พัฒนาขึ้น โดยใช้วิธีคราะห์หาปริมาณเหล็กในตัวอย่างวิตามิน โดยเปรียบเทียบกับเทคนิคสเปกโตรโฟโตเมทรี ทดสอบด้วยค่าทางสถิติ t พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อทดสอบกับชุดทดสอบบนกระดาษกรอง ($t_{\text{stat}}=0.53$, $t_{\text{crit}}=2.57$, $n=6$) และไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 90% เมื่อทดสอบกับชุดทดสอบบนแผ่นกระจกปิดสไลด์ ($t_{\text{stat}}=2.96$, $t_{\text{crit}}=4.03$, $n=6$)

ตารางที่ 2.2 แสดงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาปริมาณไทโอไซยาเนตด้วยเทคนิคต่างๆ

เทคนิค	ตัวอย่าง	ช่วงความเป็นเส้นตรง	ขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจพบ	เอกสารอ้างอิง
Micellar electrokinetic capillary chromatography (MECC)	Biological samples		0.6 pmol	[8]
Gold nanoparticles/multi walled carbon nanotube/carbon paste (GNPs/MWCPE) / voltammetry	Urine	0.01-200.0 $\mu\text{mol/L}$	$5 \times 10^{-3} \mu\text{mol/L}$	[7]
polymer inclusion membrane (PIM) / Spectrophotometry	fertilizer	0.040-1.5 mg/L	0.024 mg/L	[6]
Vacuum carbon gas desulfurization) / Spectrophotometry	Waste water	2-20 mg/L	-	[10]
sequential injection analysis (SIA)) / Spectrophotometry	Waste water	2.0 - 150.0 mg/l	1.1 mg/L	[9]

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์

3.1.1 สารเคมี

1. กรดไนตริก (Nitric acid; A.R. grade - CarloErba)
2. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid ; A.R. grade - Fluka)
3. เตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต (Tetraethylorthosilicate; A.R. grade -Aldrich)
4. ไตรตัน เอ็กซ์ 100(Triton[®] X-100;A.R. grade -Fluka)
5. น้ำปราศจากไอออน(Deionized water – Milli Q)
6. โพแทสเซียมไทโอไซยาเนต (Potassiumthiocyanate; A.R. grade)
7. ยูเรีย(Urea; A.R. grade – Ajax Finechem)
8. เอทานอลปราศจากน้ำ (Absolute ethanol ; A.R. grade - Carlo Erba)
9. แอมโมเนียมซัลเฟต (Ammonium sulfate; A.R. grade - Carlo Erba)
10. แอมโมเนียมไอรอน(III)ซัลเฟตโดเดคาไฮเดรต (Ammoniumiron(III) dodecahydrate ; A.R. grade – Ajax Finechem)

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. กระดาษกรอง เบอร์ 2 (Qualitative Paper Filter Advantec No. 2 ϕ 125 mm)
2. เครื่องกวนแม่เหล็กพร้อมแท่งกวน
3. เครื่องแก้ว (Glassware laboratory)
4. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง (Sartorius รุ่น CP224S)
5. เครื่องสแกนเนอร์ (CANNON LiDE 110)
6. ไมโครปิเปตขนาด 2.00 – 20.00 ไมโครลิตร (Thermo รุ่น FINNPIPETTE[®] F3)
7. มือถือสมาร์ตโฟน (Smart Phoneยี่ห้อ oppo รุ่น yoyo r2001)

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2.1 ศึกษาลักษณะและรูปร่างชุดทดสอบบนกระดาษ

3.2.1.1 การเตรียมสารละลาย

3.2.1.2 การเตรียมสารละลายโซล-เจล เจือด้วยเหล็ก(III)

3.2.1.3 ชุดทดสอบบนกระดาษแบบจุด

3.2.2 ศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของเหล็ก(III) ในระบบโซล-เจล

3.2.3 ศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา

3.2.4 ศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของกรดไนตริกที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยา

3.2.5 ศึกษาอุปกรณ์และโปรแกรมสำหรับตรวจวัดความเข้มสีของจุดสีบนชุดทดสอบบน

กระดาษแบบจุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.5.1 ศึกษาอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดความเข้มข้นของจุดสีบนชุดทดสอบบน

กระดาษแบบจุด

3.2.5.1.1 เครื่องสแกน

3.2.5.1.2 กล้องมือถือสมาร์ตโฟน

3.2.5.2 ศึกษาโปรแกรมสำหรับตรวจวัดความเข้มข้นของจุดสีบนชุดทดสอบบน

กระดาษแบบจุด

3.2.5.2.1 Image J™

3.2.5.2.2 Adobe Photoshop CS5™

3.2.6 การทดสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์

3.2.6.1 ความเป็นเส้นตรง (Linearity)

3.2.6.2 ความเที่ยง (Precision)

3.2.6.3 ความแม่นยำ (Accuracy)

3.2.6.4 ขีดจำกัดของการตรวจพบ (Limit of detection)

3.2.6.5 ขีดจำกัดของการตรวจวัดเชิงปริมาณ (Limit of quantitation)

3.2.7 วิเคราะห์ไทโอไซยาเนตในตัวอย่างปุ๋ย

3.2.7.1 การวิเคราะห์ตัวอย่างปุ๋ย

3.2.7.1.1 การเตรียมตัวอย่างปุ๋ย

3.2.7.1.2 การเตรียมสารละลายปุ๋ยสำหรับชุดทดสอบบนกระดาษแบบจุด

3.2.7.1.3 การวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยชุดทดสอบบนกระดาษแบบจุด

3.3 วิธีดำเนินการทดลอง

3.3.1 ศึกษาลักษณะและรูปร่างชุดทดสอบบนกระดาษ

3.3.1.1 การเตรียมสารละลาย

1) สารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์

เปิดสารละลายกรดไนตริก 65 %w/w ปริมาณ 7 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ที่มีน้ำปราศจากไอออนบรรจุอยู่ จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน เขย่าให้เข้ากัน

2) สารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 0.70, 0.50, 0.20 โมลาร์

เปิดสารละลายกรดไนตริกความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ ปริมาณ 17.5, 12.5, 5.0 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน เขย่าให้เข้ากัน จะได้กรดไนตริกที่ความเข้มข้น 0.70, 0.50, 0.20 โมลาร์ ตามลำดับ

3) สารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 0.10 โมลาร์

เปิดสารละลายกรดไนตริกความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ ปริมาณ 5 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน เขย่าให้เข้ากัน

4) สารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 0.050, 0.010 โมลาร์

ปิเปตสารละลายไนตริกความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ปริมาณ 12.5, 2.5 มิลลิลิตรใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน เขย่าให้เข้ากัน จะได้กรดไนตริกที่ความเข้มข้น 0.050 และ 0.010 โมลาร์ ตามลำดับ

5) สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.10 โมลาร์

ตวงสารละลายไฮโดรคลอริกเข้มข้น 8.20 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร ที่มีน้ำปราศจากไอออนบรรจุอยู่ประมาณ 100 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน เขย่าให้เข้ากัน

6) สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไทโอไซยาเนต เข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร

ชั่งโพแทสเซียมไทโอไซยาเนต 0.4183 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน จากนั้นเทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน เขย่าให้เข้ากัน

7) สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไทโอไซยาเนต เข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

ปิเปตสารละลายโพแทสเซียมไทโอไซยาเนตความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน เขย่าให้เข้ากัน

8) สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไทโอไซยาเนต สำหรับสร้างกราฟมาตรฐาน

ปิเปตสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไทโอไซยาเนต ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 0.00, 1.25, 3.20, 6.25 และ 12.50 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตร ขนาด 25 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน เขย่าให้เข้ากัน จากนั้นจะได้สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไทโอไซยาเนตที่ความเข้มข้น 0, 10, 25, 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

3.3.1.2 การเตรียมสารละลายโซล-เจด เจือด้วยเหล็ก(III)

ชั่งแอมโมเนียมไอโรน(III) ซัลเฟตโดเดคะไฮเดรต จำนวน 0.0100 กรัมลงในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร ปิเปตสารละลายเตตระเอทิลออลโทซิลิเกต ปริมาณ 2.00 มิลลิลิตร ใส่ลงไป ปิเปตสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ปริมาณ 1.00 มิลลิลิตร และปิเปตเอทานอลเติมลงไป ปริมาณ 2.00 มิลลิลิตร และหยดไตรตันเอ็กซ์ 100[®] ลงในบีกเกอร์ 7 หยด แล้วปั่นจนสารละลายจนเป็นเนื้อเดียวกัน ใช้เวลา 1 ชั่วโมง จะได้สารละลายโซล-เจด เจือด้วยเหล็ก(III) เข้มข้นร้อยละ 0.20 (w/v)

3.3.1.3 ชุดทดสอบบนกระดาษแบบจุด

หยดสารละลายโซล-เจล เจือด้วยเหล็ก(III) เข้มข้นร้อยละ 0.20 (w/v) ที่เตรียมได้จากข้อ 3.3.1.2 ปริมาณจุดลง 10.00 ไมโครลิตร ลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 จากนั้นทิ้งไว้ให้แห้งประมาณ 30 นาที จากนั้นหยดกรดไนตริกเข้มข้น 0.50 โมลาร์ ปริมาณ 10.00 ไมโครลิตรลงบนจุดทดสอบ และทิ้งไว้ให้แห้งประมาณ 20 นาที

ทำการทดสอบการเกิดสารเชิงซ้อนบนกระดาษ โดยหยดสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไทโอไซยาเนตที่ความเข้มข้น 0, 10, 25, 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 10.00 ไมโครลิตร ลงบนบริเวณที่หยดสารละลายโซล-เจลและกรดไนตริกเอาไว้ ทิ้งเอาไว้สักครู่ประมาณ 20 นาที บันทึกผลการเปลี่ยนแปลงสีของชุดทดสอบบนกระดาษแบบจุด โดยบันทึกภาพด้วยเครื่องสแกน จากนั้นนำภาพที่ได้มาบันทึกค่าความเข้มแสง (RGB) ด้วยโปรแกรม Image J™ นำค่าความเข้มแสงดังกล่าว มาพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของไทโอไซยาเนตไอออนกับความแตกต่างความเข้มแสง (Euclidean distance; ED) จากสมการทางคณิตศาสตร์หรือเรียกว่า “สมการเชิงเส้นแบบยูคลิด”

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

โดยที่ Δ คือ ผลต่างของแสงที่จุด blank กับค่าความเข้มแสง ณ จุดที่เกิดปฏิกิริยากับไทโอไซยาเนตไอออนที่ความเข้มข้นต่างกัน

R คือ ค่าความเข้มแสงสีแดง

G คือ ค่าความเข้มแสงสีเขียว

B คือ ค่าความเข้มแสงสีน้ำเงิน

หมายเหตุแสงสีขาวจะประกอบด้วยแสงสีแดง สีเขียวและสีน้ำเงิน ซึ่งมีค่าความเข้มแสงสูงสุดเท่ากับ 255, 255, 255 (R, G, B) และแสงสีดำจะมีค่าความเข้มแสงต่ำสุดเท่ากับ 0, 0, 0

3.3.2 ศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของเหล็ก(III)ในระบบโซล-เจล

เตรียมสารละลายโซล-เจลเจือด้วยเหล็ก(III) เช่นเดียวกับข้อ 3.3.1.2 แต่เปลี่ยนปริมาณเหล็กโดยใช้เป็น 0.0200 กรัม และ 0.0300 กรัม จะได้สารละลายโซล-เจลเจือด้วยเหล็ก(III) เข้มข้นร้อยละ 0.40 (w/v) และ 0.60 (w/v) ตามลำดับ

3.3.3 ศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา

เตรียมสารละลายโซล-เจลเจือด้วยเหล็ก(III) เช่นเดียวกับข้อ 3.3.1.2 ทำการหยดกรดไนตริกความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ปริมาณ 10.00 ไมโครลิตร ทิ้งให้แห้งประมาณ 20 นาที หยดสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไทโอไซยาเนตที่ความเข้มข้น 0, 10, 25, 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 10.00 ไมโครลิตร ลงบนบริเวณที่หยดสารละลายโซล-เจลและกรดไนตริกเอาไว้ บันทึกผลการเปลี่ยนแปลงสีของชุดทดสอบบนกระดาษแบบจุดด้วยเครื่องสแกน โดยบันทึกเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่เวลา 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90, 120, 150, 180 นาที

3.3.4 ศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของกรดไนตริกที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยา

เตรียมสารละลายโซล-เจล เจือด้วยเหล็ก(III) เช่นเดียวกับ 3.3.1.2 จะได้สารละลายโซล-เจล เจือด้วยเหล็ก(III) เข้มข้นร้อยละ 0.20 (w/v) ทิ้งโซล-เจลให้แห้งประมาณ 30 นาที ทำการหยดไนตริก ความเข้มข้น 0.010, 0.050, 0.10, 0.20, 0.50, 0.70 และ 1.0 โมลาร์ ปริมาณ 10.00 ไมโครลิตร ทิ้งไว้ให้แห้งประมาณ 20 นาที จากนั้นหยดสารละลายมาตรฐานไทโอไซยาเนต ที่ความเข้มข้น 0, 10, 25, 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 10.00 ไมโครลิตร ลงบนจุดทดสอบโซล-เจลที่หยดกรดไนตริกไว้ ทิ้งให้แห้งประมาณ 20 นาที บันทึกผลการเปลี่ยนแปลงสีของจุดทดสอบบนกระดาษแบบจุดด้วยเครื่องสแกน

3.3.5 ศึกษาอุปกรณ์และโปรแกรมสำหรับตรวจวัดความเข้มสีของจุดสีบนจุดทดสอบบนกระดาษแบบจุด

3.3.5.1 ศึกษาอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดความเข้มสีของจุดสีบนจุดทดสอบบนกระดาษแบบจุด

3.3.5.1.1 เครื่องสแกน

นำจุดทดสอบบนกระดาษแบบจุดระบบโซล-เจลเจือด้วยเหล็ก(III) เข้มข้นร้อยละ 0.20 (w/v) ที่เกิดปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานไทโอไซยาเนต ที่ความเข้มข้น 0, 10, 25, 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ บันทึกภาพด้วยเครื่องสแกนเนอร์โดยใช้ความละเอียด 300 ppi จากนั้นนำภาพที่บันทึกได้มาบันทึกค่าความเข้มแสงด้วยโปรแกรม Image J™ แล้วพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไทโอไซยาเนตกับความแตกต่างความเข้มแสง

3.3.5.1.2 กล้องมือถือสมาร์ทโฟน

ทำเช่นเดียวกับข้อ 3.3.5.1.1 แต่เปลี่ยนอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเข้มแสงเป็นกล้องมือถือสมาร์ทโฟน

3.3.5.2 ศึกษาโปรแกรมสำหรับตรวจวัดความเข้มข้นของจุดสีบนจุดทดสอบบนกระดาษแบบจุด

3.3.5.2.1 Image J™

นำภาพที่บันทึกได้จากเครื่องสแกนเนอร์จากข้อ 3.3.5.1 มาบันทึกค่าความเข้มแสงด้วยโปรแกรม Image J™ นำค่าความเข้มแสงดังกล่าวพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไทโอไซยาเนตกับความแตกต่างความเข้มแสง

3.3.5.2.2 Adobe Photoshop CS5™

ทำเช่นเดียวกับข้อ 3.3.5.2.1 แต่เปลี่ยนโปรแกรมตรวจวัดเป็น Adobe Photoshop CS5™

3.3.6 การทดสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์

ศึกษาความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์โดยใช้สภาวะที่เหมาะสม คือ เตรียมสารละลายโซล-เจลเจือด้วยเหล็กเข้มข้นร้อยละ 0.20 (w/v) ตามข้อ 3.3.1.2 จากนั้นทำการหยดสารละลายโซล-เจลลงบนกระดาษกรอง เบอร์ 2 จำนวน 10 ไมโครลิตร ทิ้งไว้ให้แห้งประมาณ 30 นาที เมื่อโซล-เจลแห้งหยดกรดไนตริก เข้มข้น 0.5 โมลาร์ 10.00 ไมโครลิตร ทิ้งให้แห้งประมาณ 20 นาที

3.3.6.1 ความเป็นเส้นตรง (Linearity)

ทดสอบความเป็นเส้นตรงของวิธีวิเคราะห์สามารถทำได้โดย

1. ทำการหาค่าสารละลายมาตรฐานไทโอไซยาเนตเข้มข้น 0, 10, 25, 50, 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 10.00 ไมโครลิตร ลงบนโซล-เจลและกรดไนตริกที่หยดเตรียมไว้ โดยหยดแต่ละความเข้มข้นอย่างละ 10 จุด ทิ้งไว้ 20 นาที
2. นำชุดทดสอบไปสแกนที่ความละเอียด 300 ppi และใช้โปรแกรม Image J™
3. คำนวณค่า Euclidean Distance (ED) และสร้างกราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างค่า ED กับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไทโอไซยาเนตจากนั้นหาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Determination coefficient, r^2)

3.3.6.2 ความเที่ยง (Precision)

ความเที่ยงเป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถของการวิเคราะห์ในการแสดงค่าเดิมเมื่อทำการวัดหลายๆครั้ง หรือความสามารถในการแสดงค่าซ้ำ (repeatability) ภายใต้สภาวะที่กำหนด ระบุในรูปของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (relative standard deviation : RSD) ซึ่งแสดงค่าความคลาดเคลื่อนของวิธีที่เกิดขึ้น นิยมแสดงเป็นค่าร้อยละ

$$\%RSD = \frac{SD \times 100}{\bar{X}}$$

เมื่อ SD คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation : SD)

\bar{X} คือ ค่าเฉลี่ยของผลการวิเคราะห์ (mean)

การประเมินความเที่ยงโดย

1. บีบสารละลายมาตรฐานไทโอไซยาเนตเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มา 10.00 ไมโครลิตร หยดลงบนโซล-เจลและกรดไนตริกที่หยดเตรียมไว้ หยดเป็นจำนวน 10 จุด จากนั้นทำการสแกนและคำนวณค่า Euclidean Distance
2. คำนวณหา %RSD

3.3.6.3 ความแม่นยำ (Accuracy)

ความแม่นยำของวิธีสามารถแสดงค่าที่วัดได้เข้าใกล้ค่าจริงหรือร้อยละคืนกลับ (%recovery) ถ้ามีค่าใกล้ 100% หมายถึงวิธีวิเคราะห์ดังกล่าวมีความแม่นยำสูง โดยสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\%Recovery = \frac{(C_1 - C_2)}{C_3} \times 100$$

เมื่อ C_1 = ความเข้มข้นของตัวอย่างที่เติมสารละลายมาตรฐาน

C_2 = ความเข้มข้นของตัวอย่าง

C_3 = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานที่เติมลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.6.4 ขีดจำกัดของการตรวจพบ (Limit of detection, LOD)

สามารถหาได้จากกราฟมาตรฐาน โดยใช้สูตร

$$LOD = Y_B + 3S_B$$

เมื่อ Y_B คือ จุดตัดแกน y ที่ได้จากการสมการเส้นตรง $y = mx + c$

S_B คือ ค่าคลาดเคลื่อนในแนวแกน y (Random error in y -direction) หาได้จาก

สูตร

$$S_B = \sqrt{\frac{\sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-2}}$$

เมื่อ y_i คือ ค่าจริงที่ได้จากเครื่องมือ

\hat{y}_i คือ ค่าที่ได้จากการแทนค่า x ลงในสมการเส้นตรง

3.3.6.5 ขีดจำกัดของการตรวจวัดเชิงปริมาณ (Limit of quantitation, LOQ)

สามารถหาได้จากกราฟมาตรฐาน โดยใช้สูตร

$$LOQ = Y_B + 10S_B$$

เมื่อ Y_B คือ จุดตัดแกน y ที่ได้จากการสมการเส้นตรง $y = mx + c$

S_B คือ ค่าคลาดเคลื่อนในแนวแกน y (Random error in y -direction)

3.3.7 วิเคราะห์ไทโอไซยาเนตในตัวอย่างปุ๋ย

3.3.7.1 การวิเคราะห์ตัวอย่างปุ๋ย

3.3.7.1.1 การเตรียมตัวอย่างปุ๋ย

ชั่งตัวอย่างปุ๋ย 2.00 กรัม (บันทึกน้ำหนักถึงทศนิยมของตำแหน่งที่ 2) ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรให้ถึงขีดบอกปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จากนั้นกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 2 แยกสารละลายที่กรองได้ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร

3.3.7.1.2 การเตรียมสารละลายปุ๋ยสำหรับชุดทดสอบบนกระดาษแบบจุด

ปิเปตสารละลายตัวอย่างปุ๋ยที่เตรียมได้จากข้อ 3.3.7.1 ปริมาณ 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร จากนั้นปิเปตสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไทโอไซยาเนต ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 0.00, 1.25, 3.20, 6.25 และ 12.50 มิลลิลิตร ตามลำดับ ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน เขย่าให้เข้ากัน จะได้สารละลายปุ๋ยสำหรับชุดทดสอบบนกระดาษที่มีความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไทโอไซยาเนตที่เติมลงไปเป็นความเข้มข้น 0, 10, 25, 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

3.3.7.1.3 การวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยชุดทดสอบบนกระดาษแบบจุด

นำสารละลายตัวอย่างปุยที่เตรียมได้จาก 3.3.7.1.2 ปริมาณ 10.00 ไมโครลิตร มาหยดลงบนชุดทดสอบบนกระดาษแบบจุดในระบบโซล-เจลเจือด้วยเหล็ก(III) เข้มข้นร้อยละ 0.20 (w/v) และกรดไนตริก ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ที่เตรียมไว้ ทิ้งเอาไว้ประมาณ 20 นาที บันทึกภาพด้วยเครื่องสแกนภาพที่ได้มาคำนวณค่าความเข้มแสงด้วยโปรแกรม Image J™ จากนั้นพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไทโอไซยาเนตกับความแตกต่างความเข้มแสง

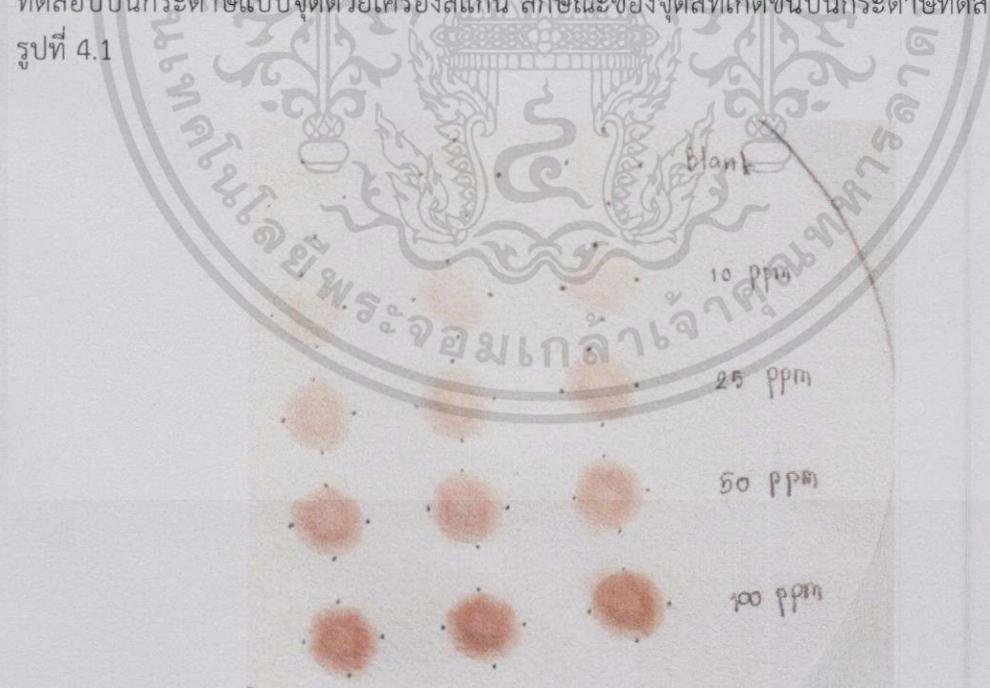


บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 ศึกษาลักษณะและรูปร่างชุดทดสอบบนกระดาษ

นำกระดาษกรองเบอร์ 2 มาหยดด้วยสารละลายโซล-เจลเจือด้วยเหล็ก(III) ปริมาณ 10.00 ไมโครลิตร จากนั้นทิ้งไว้ให้สารละลายโซล-เจลแห้งประมาณ 30 นาที พบว่าบริเวณพื้นผิวของกระดาษกรองที่หยดด้วยสารละลายโซล-เจลนั้นกระดาษกรองสามารถดูดซับโซล-เจลไว้ได้หมด ซึ่งโซล-เจลที่ได้จะมีลักษณะเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 11.00 มิลลิเมตร สามารถเห็นขอบเขตของโซล-เจลได้ชัดเจน ต่อไปทำการหยดกรดไนตริกความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ปริมาณ 10.00 ไมโครลิตร ลงบนโซล-เจลทิ้งให้แห้งประมาณ 20 นาที ซึ่งกรดไนตริกที่หยดลงไปบนโซล-เจลนั้นจะแพร่กระจายทุกทิศทางและจะเกินออกนอกขอบเขตของโซล-เจลเพียงเล็กน้อย จากนั้นนำชุดทดสอบมาหยดสารละลายมาตรฐานไทโอไซยาเนตที่ความเข้มข้นต่างๆ ปริมาณ 10.00 ไมโครลิตร พบว่าจะเกิดสารเชิงซ้อนสีแดงส้มของไทโอไซยาเนตไอออนกับไอออนเหล็ก(III) โดยจะมีการแพร่กระจายของสารละลายมาตรฐานไทโอไซยาเนตที่หยดลงไปนั้นไม่สามารถแพร่ผ่านออกนอกขอบเขตของโซล-เจลที่หยดไว้บนกระดาษกรอง ซึ่งความเข้มสีของจุดทดสอบแปรผันตามความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไทโอไซยาเนต โดยเมื่อความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไทโอไซยาเนตเพิ่มขึ้น ความเข้มสีของสารเชิงซ้อนดังกล่าวจะมีสีเข้มขึ้นตามลำดับ จากนั้นทำการบันทึกการเปลี่ยนแปลงสีของชุดทดสอบบนกระดาษแบบจุดด้วยเครื่องสแกน ลักษณะของจุดสีที่เกิดขึ้นบนกระดาษทดสอบ แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงสีของชุดทดสอบบนกระดาษแบบจุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของเหล็ก(III) ในระบบโซล-เจล

เมื่อใช้สารละลายโซล-เจลเจือด้วยเหล็ก(III) ความเข้มข้นร้อยละ 0.20, 0.40 และ 0.60 (w/v) ใช้กรดไนตริกที่ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ทดสอบการเกิดสารเชิงซ้อนบนจูดรีเอเจนต์โดยทำปฏิกิริยากับสารละลายไทโอไซยาเนตที่ความเข้มข้นต่างๆ หลังจากทิ้งไว้ให้แห้งเป็นเวลา 20 นาที แล้วทำการบันทึกภาพจุดสีด้วยกล้องมือถือสมาร์ตโฟนและนำภาพดังกล่าวคำนวณหาความเข้มแสง (RGB) ด้วยโปรแกรม Image J™ นำค่าที่ได้มาพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก(III) ในระบบโซล-เจลกับค่าความแตกต่างความเข้มแสง ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.2

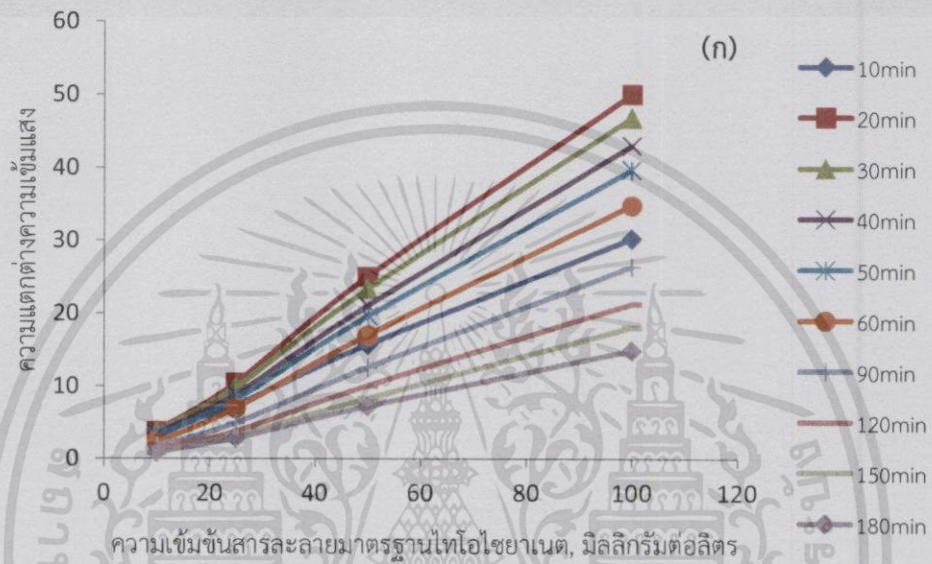


รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างความเข้มแสงกับความเข้มข้นสารละลายเหล็ก(III) ในระบบโซล-เจล บันทึกภาพที่เวลา 20 นาที

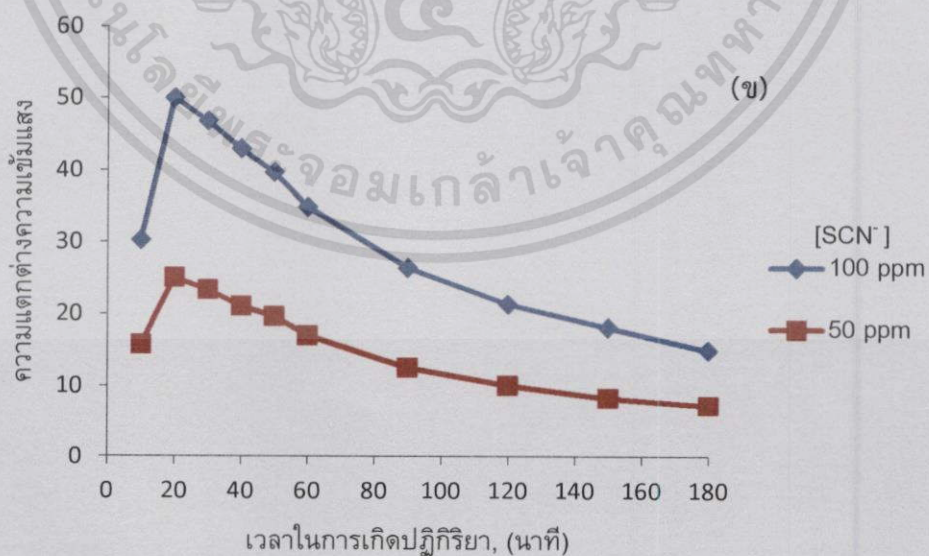
จากรูปที่ 4.2 จะเห็นว่าเมื่อใช้ระบบโซล-เจลที่เจือด้วยสารละลายเหล็ก(III) เข้มข้นร้อยละ 0.20 (w/v) จะให้ค่าความแตกต่างความเข้มแสงสูงที่สุด เมื่อเทียบกับการใช้สารละลายเหล็ก(III) ที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเป็นเข้มข้นร้อยละ 0.40 และ 0.60 (w/v) เป็นไปได้ว่าการใช้ความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก(III) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.20 (w/v) ในระบบโซล-เจลเป็นปริมาณที่เหมาะสมแล้ว เห็นการเปลี่ยนแปลงสีชัดเจนที่สุด จึงเลือกใช้ความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก(III) เข้มข้นร้อยละ 0.20 (w/v) นี้สำหรับการทดลองต่อไป

4.3 ศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา

เป็นการทดลองโดยเตรียมจตุรีเอเจนต์ที่ใช้สารละลายเหล็ก(III) เข้มข้นร้อยละ 0.20 (w/v) ในระบบโซล-เจล ทิ้งไว้ให้แห้ง 30 นาที หยดกรดไนตริก เข้มข้น 0.10 โมลาร์ ปริมาณ 10.00 ไมโครลิตร ทิ้งไว้ให้แห้ง 20 นาที จากนั้นหยดสารละลายมาตรฐานไทโอไซยาเนตที่ความเข้มข้นต่างๆ บันทึกภาพด้วยเครื่องสแกน โดยทำการบันทึกหลังจากเกิดปฏิกิริยาเป็นเวลา 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90, 120, 150, 180 นาที ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูป 4.3



รูปที่ 4.3 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างความเข้มแสงกับความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานไทโอไซยาเนตที่บันทึกภาพหลังการเกิดปฏิกิริยาที่เวลาต่างๆกัน



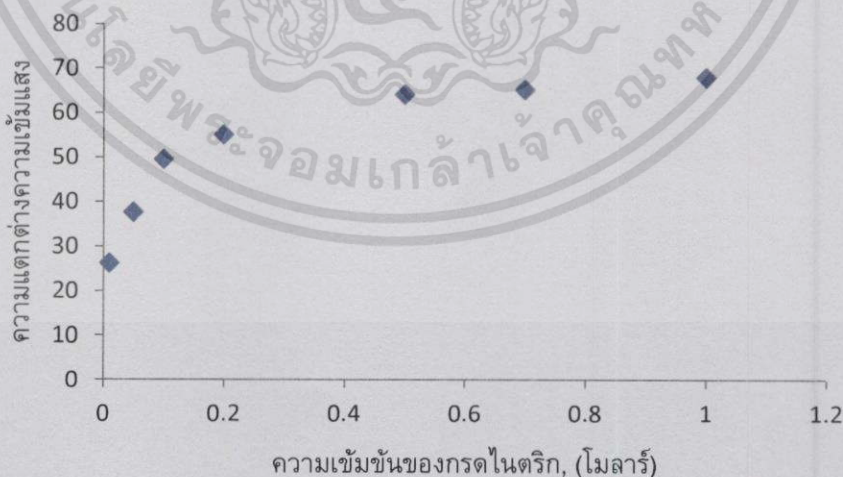
รูปที่ 4.3 (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างความเข้มแสงกับเวลาในการเกิดปฏิกิริยาของสารละลายมาตรฐานไทโอไซยาเนตกับเหล็ก(III) บันทึกภาพหลังการเกิดปฏิกิริยาที่เวลาต่างๆกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 (ก), (ข) เป็นการทดลองโดยใช้ระบบโซล-เจลที่ผสมด้วยสารละลายเหล็ก(III) ความเข้มข้นร้อยละ 0.20 (w/v) หยดกรดไนตริกความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ และหยดสารละลายมาตรฐานไทโอไซยานเนตที่ความเข้มข้นต่างๆกัน จากนั้นทำการบันทึกภาพจุดสี พบว่าในช่วงเวลา 10 และ 20 นาที ความแตกต่างความเข้มแสงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลาโดยที่ 10-20 นาที มีค่าความแตกต่างความเข้มแสงที่สูงขึ้นเรื่อยๆ จากนั้นตั้งแต่ช่วงเวลา 30 นาทีเป็นต้นไป พบว่าความแตกต่างความเข้มแสงมีค่าลดต่ำลงเรื่อยๆ ตามช่วงเวลาที่เพิ่มมากขึ้น โดยบันทึกภาพถึงช่วงเวลาที่ 180 นาที พบว่ามีค่าความแตกต่างความเข้มแสงลดลง จากผลการทดลองนี้ ทำให้ตัดสินใจเลือกบันทึกภาพจุดสีหลังเกิดปฏิกิริยาแล้ว 20 นาที ซึ่งให้ค่าความแตกต่างความเข้มแสงสูงที่สุด

4.4 ศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของกรดไนตริกที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยา

การทำชุดทดสอบระบบโซล-เจลเจือด้วยเหล็ก(III) นั้นได้มีการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดสารเชิงซ้อนของไทโอไซยานเนตไอออนกับไอออนเหล็ก(III) ซึ่งการเกิดสีของสารเชิงซ้อนเป็นสีแดงส้มนั้นปฏิกิริยาเกิดได้ช้า เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการพัฒนาวิธีการให้เป็นชุดทดสอบ ซึ่งต้องการความรวดเร็วในการทดสอบ จึงได้มีการนำกรดไนตริกมาใช้ในการหยดลงบนจุดทดสอบก่อนที่จะหยดสารละลายมาตรฐานไทโอไซยานเนต เพื่อให้กรดไนตริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการเกิดสีของสารเชิงซ้อนได้เร็วและชัดเจนมากขึ้น ดังนั้นได้ทำการทดลองเพื่อหาความเข้มข้นของกรดไนตริกที่เหมาะสมสำหรับชุดทดสอบ โดยทำการเตรียมสารละลายโซล-เจลเจือด้วยเหล็ก(III) เข้มข้นร้อยละ 0.20 (w/v) และเตรียมกรดไนตริกที่ความเข้มข้น 0.010, 0.050, 0.10, 0.20, 0.50, 0.70, 1.0 โมลาร์ เมื่อทำการหยดโซล-เจลลงบนกระดาษกรองรอให้แห้งแล้วหยดกรดไนตริกจากนั้นรอให้แห้งประมาณ 20 นาที จึงค่อยทำการหยดสารละลายมาตรฐานไทโอไซยานเนต ทำการบันทึกภาพที่เวลา 20 นาที ด้วยเครื่องสแกนและใช้โปรแกรม Image J™ บันทึกความเข้มสี แล้วคำนวณค่าความแตกต่างความเข้มแสงได้ผลการทดลองที่แสดงดังรูปที่ 4.4 และตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแตกต่างความเข้มแสงกับความเข้มข้นของกรดไนตริก ความเข้มข้นต่างๆกัน ทดลองกับสารละลายมาตรฐานไทโอไซยานเนต ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ 4.1 แสดงสมการเชิงเส้นตรงที่ได้ เมื่อทดลองใช้กรดไนตริกความเข้มข้นต่างๆ สำหรับสารละลายมาตรฐานไทโอไซยาเนตความเข้มข้น 10 – 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

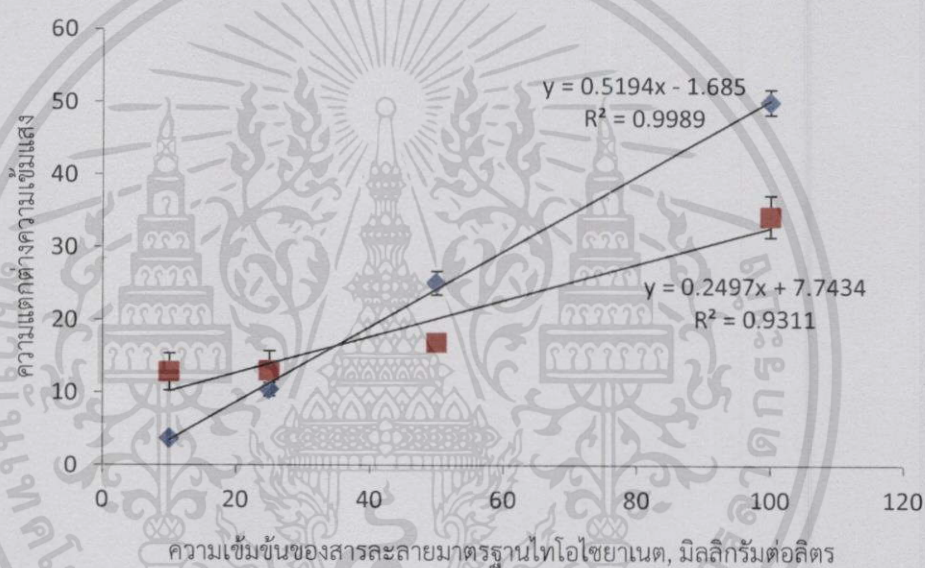
ความเข้มข้น HNO ₃ (โมลาร์)	สมการเชิงเส้นตรง	r ²
0.01	$y = 0.2552x + 0.424$	0.9944
0.05	$y = 0.3532x + 2.4208$	0.9960
0.1	$y = 0.4932x + 0.3471$	0.9991
0.2	$y = 0.5469x + 0.3543$	0.9992
0.5	$y = 0.6431x - 1.461$	0.9931
0.7	$y = 0.6569x - 1.1359$	0.9981
1.0	$y = 0.6797x + 2.4029$	0.9794

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าการใช้กรดไนตริกที่ความเข้มข้น 0.50, 0.70, 1.0 โมลาร์ ให้ค่าความแตกต่างความเข้มแสงที่สูงและมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อสรุปจากตารางที่ 4.1 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแตกต่างความเข้มแสงกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไทโอไซยาเนตที่แสดงเป็นสมการเชิงเส้นตรงนั้น พบว่าเมื่อใช้กรดไนตริกที่ความเข้มข้น 0.50 โมลาร์ สมการเชิงเส้นตรง คือ $y = 0.643x - 1.461$ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.9931 ที่กรดไนตริกความเข้มข้น 0.70 โมลาร์ สมการเชิงเส้นตรง คือ $y = 0.656x - 1.134$ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.9981 และที่กรดไนตริกความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ สมการเชิงเส้นตรง คือ $y = 0.679x + 2.402$ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.9794 จะพบว่าเมื่อใช้กรดไนตริกที่ความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจน้อยกว่าที่กรดไนตริกความเข้มข้น 0.50, 0.70 โมลาร์ ซึ่งกรดไนตริกที่ความเข้มข้น 0.5 และ 0.7 โมลาร์ ให้ค่าความแตกต่างความเข้มแสงใกล้เคียงกันและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ยอมรับได้ ดังนั้นชุดทดสอบในระบบโซล-เจลเจือด้วยเหล็ก(III) เข้มข้นร้อยละ 0.2 (w/v) จึงเลือกใช้กรดไนตริกที่ความเข้มข้น 0.50 โมลาร์ ในการเร่งปฏิกิริยาการเกิดสารเชิงซ้อนของไทโอไซยาเนตไอออนกับไอออนเหล็ก(III)

4.5 ศึกษาอุปกรณ์และโปรแกรมสำหรับตรวจวัดความเข้มสีของจุดสีบนชุดทดสอบบนกระดาษแบบจุด

4.5.1 ศึกษาอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดความเข้มสีของจุดสีบนชุดทดสอบบนกระดาษแบบจุด

ศึกษาอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดความเข้มสีของจุดทดสอบในระบบโซล-เจลเจ็ดด้วยเหล็ก(III) เข้มข้นร้อยละ 0.20 (w/v) โดยหยดกรดไนตริกความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ลงบนจุดรีเอเจนต์ที่เตรียมไว้ รอให้แห้ง จากนั้นหยดสารละลายมาตรฐานไทโอไซยาเนตที่ความเข้มข้นต่างๆ ทำการบันทึกภาพที่เวลา 20 นาที ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดเป็นเครื่องสแกนและกล้องมือถือสมาร์ทโฟน คำนวณค่าความเข้มแสงด้วยโปรแกรม Image J™ นำค่าที่ได้มาพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างความเข้มแสงกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไทโอไซยาเนต เปรียบเทียบอุปกรณ์ตรวจวัด ซึ่งได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.5

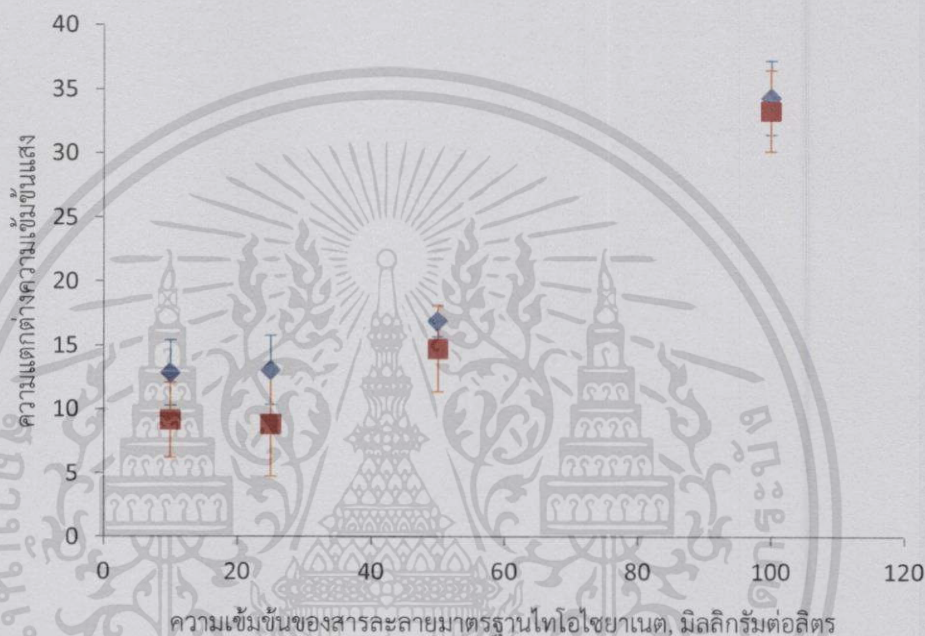


รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างความเข้มแสงกับความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานไทโอไซยาเนตเปรียบเทียบการบันทึกภาพจากเครื่องสแกนเนอร์และมือถือสมาร์ทโฟน (◆) เครื่องสแกน และ (■) กล้องมือถือสมาร์ทโฟน

จากรูปที่ 4.5 ได้ทำการเปรียบเทียบอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดความเข้มสีที่ได้จากเครื่องสแกนพบว่าสมการเชิงเส้นตรง คือ $y = 0.519x - 1.685$ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.9989 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) อยู่ในช่วง 3.50 – 8.80 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการตรวจวัดที่ได้จากกล้องมือถือสมาร์ทโฟนจะพบว่าสมการเชิงเส้นตรง คือ $y = 0.249x + 7.743$ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.9311 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) อยู่ในช่วง 7.16 – 20.84 เปอร์เซ็นต์ พบว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์จากค่าความแตกต่างความเข้มแสงที่ได้จากกล้องมือถือสมาร์ทโฟนนั้นสูงกว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ที่ได้จากเครื่องสแกน เนื่องจากการใช้กล้องมือถือสมาร์ทโฟนเป็นอุปกรณ์ในการตรวจวัดนั้นจะมีเรื่องแสงและเงาของการถ่ายภาพที่มีแสงไม่สม่ำเสมอเข้ามารบกวน ทำให้การคำนวณค่าความแตกต่างความเข้มแสงของจุดสีบนกระดาษทดสอบมีคลาดเคลื่อน

4.5.2 ศึกษาโปรแกรมสำหรับตรวจวัดความเข้มข้นของจุดสีบนชุดทดสอบบนกระดาษแบบจุด

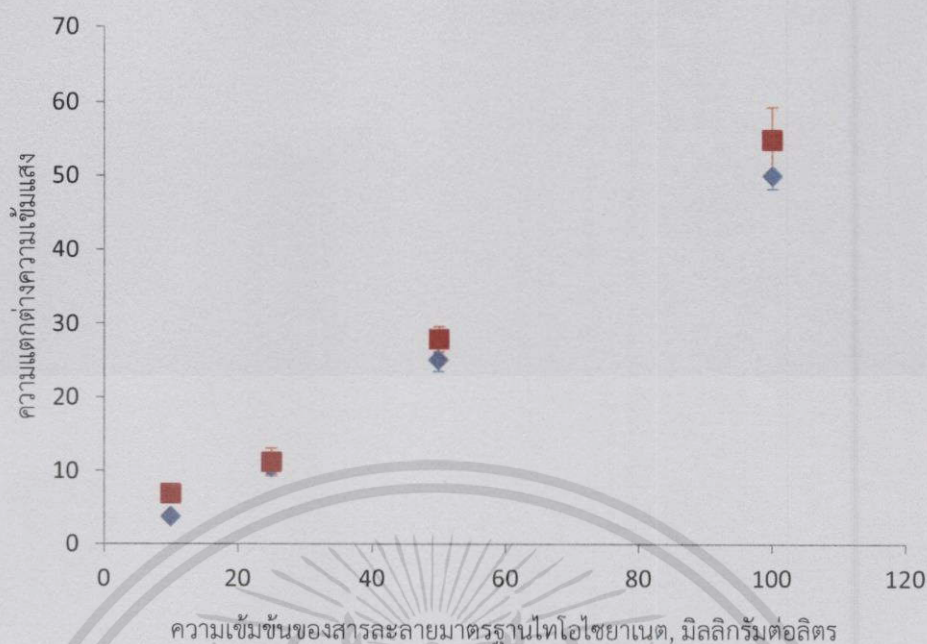
ศึกษาโปรแกรมสำหรับการตรวจวัดความเข้มข้นของจุดทดสอบในระบบโซล-เจลเจือด้วยเหล็ก (III) เข้มข้นร้อยละ 0.20 (w/v) โดยนำภาพที่ได้จากการใช้อุปกรณ์เป็นกล้องมือถือสมาร์ทโฟนและเครื่องสแกนมาใช้ในการตรวจวัดความเข้มแสงเปรียบเทียบระหว่างโปรแกรม Image J™ และโปรแกรม Adobe Photoshop CS5™ โดยนำค่าความแตกต่างความเข้มแสงที่ได้จากการคำนวณมาพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างความเข้มแสงกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไทโอไซยาเนต ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างความเข้มแสงกับความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานไทโอไซยาเนต เปรียบเทียบโปรแกรม Image J™ และ โปรแกรม Adobe Photoshop CS5™ โดยใช้กล้องมือถือสมาร์ทโฟนในการบันทึกภาพ

(◆) โปรแกรม Image J™ และ (■) โปรแกรม Adobe Photoshop CS5™

จากรูปที่ 4.6 นำภาพของจุดสีทดสอบที่ได้จากการบันทึกภาพด้วยกล้องมือถือสมาร์ทโฟนมาตรวจวัดค่าความเข้มแสงด้วยโปรแกรม Image J™ สมการเชิงเส้นตรง คือ $y = 0.249x + 7.743$ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.931 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) อยู่ในช่วง 7.16 - 20.84 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการตรวจวัดค่าความเข้มแสงด้วยโปรแกรม Adobe Photoshop CS5™ พบว่าสมการเชิงเส้นตรง คือ $y = 0.283x + 3.385$ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.945 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) อยู่ในช่วง 9.46 - 46.21 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์จากค่าความแตกต่างความเข้มแสงของโปรแกรม Image J™ มีค่าต่ำกว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ของโปรแกรม Adobe Photoshop CS5™ อย่างชัดเจน



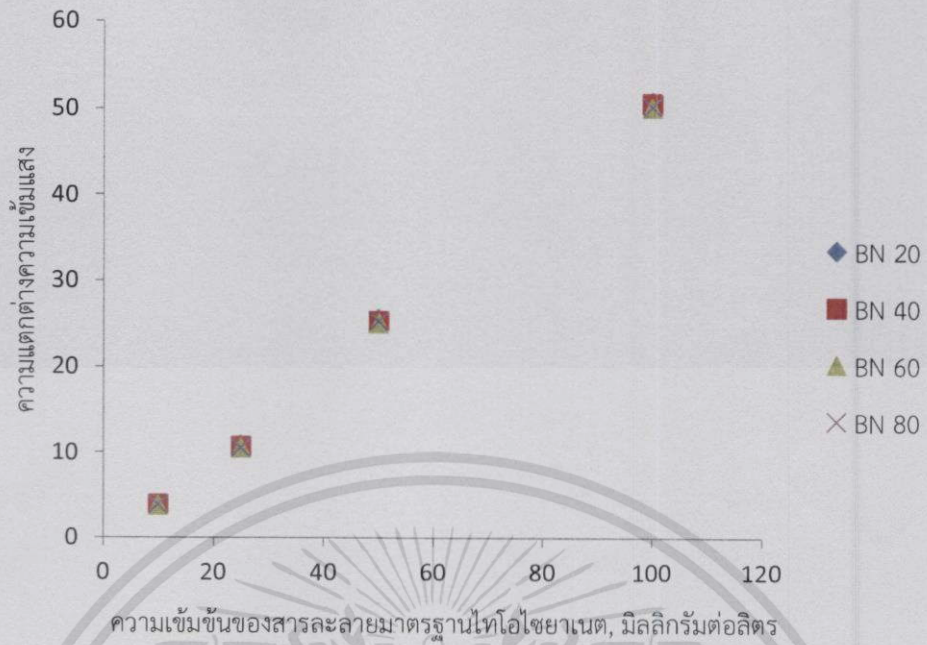
รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างความเข้มแสงกับความเข้มชั้นของสารละลายมาตรฐานไทโอไซยานต, มิถิลกรัมต่อลิตร

รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างความเข้มแสงกับความเข้มชั้นสารละลายมาตรฐานไทโอไซยานต เปรียบเทียบโปรแกรม Image J™ และ โปรแกรม Adobe Photoshop CS5™ โดยใช้เครื่องสแกนในการบันทึกภาพ

(◆) โปรแกรม Image J™ และ (■) โปรแกรม Adobe Photoshop CS5™

จากรูปที่ 4.7 เมื่อนำภาพของจุดสีทดสอบที่ได้จากการบันทึกภาพด้วยเครื่องสแกนมาตรวจวัดค่าความเข้มแสงด้วยโปรแกรม Image J™ สมการเชิงเส้นตรง คือ $y = 0.519x - 1.685$ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.998 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) อยู่ในช่วง 3.50 – 8.80 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการตรวจวัดค่าความเข้มแสงด้วยโปรแกรม Adobe Photoshop CS5™ พบว่าสมการเชิงเส้นตรง คือ $y = 0.549x - 0.214$ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.994 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) อยู่ในช่วง 4.51 – 16.41 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์จากค่าความแตกต่างความเข้มแสงของโปรแกรม Image J™ มีค่าต่ำกว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ของโปรแกรม Adobe Photoshop CS5™

เมื่อทำการบันทึกภาพโดยใช้เครื่องสแกนเป็นอุปกรณ์ในการตรวจวัดและตรวจวัดความเข้มแสงโดยใช้โปรแกรม Image J™ ภาพที่ได้จะสว่างมากทำให้การมองเห็นขอบเขตของจุดสีบนชุดทดสอบไม่ชัดเจน ดังนั้นต้องมีการปรับค่าความสว่าง (Brightness) เพื่อช่วยในการมองเห็นขอบเขตให้ชัดเจนมากขึ้น จึงทำการปรับค่าความสว่างเป็น 20, 40, 60 และ 80 พบว่ามีค่าความแตกต่างความเข้มแสงที่ค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นการปรับค่าความสว่างจึงไม่มีผลต่อการคำนวณหาค่าความแตกต่างความเข้มแสงของสารละลาย แสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างความเข้มแสงกับความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานไทโอไซยาเนต เมื่อทำการปรับค่าความสว่าง (Brightness)

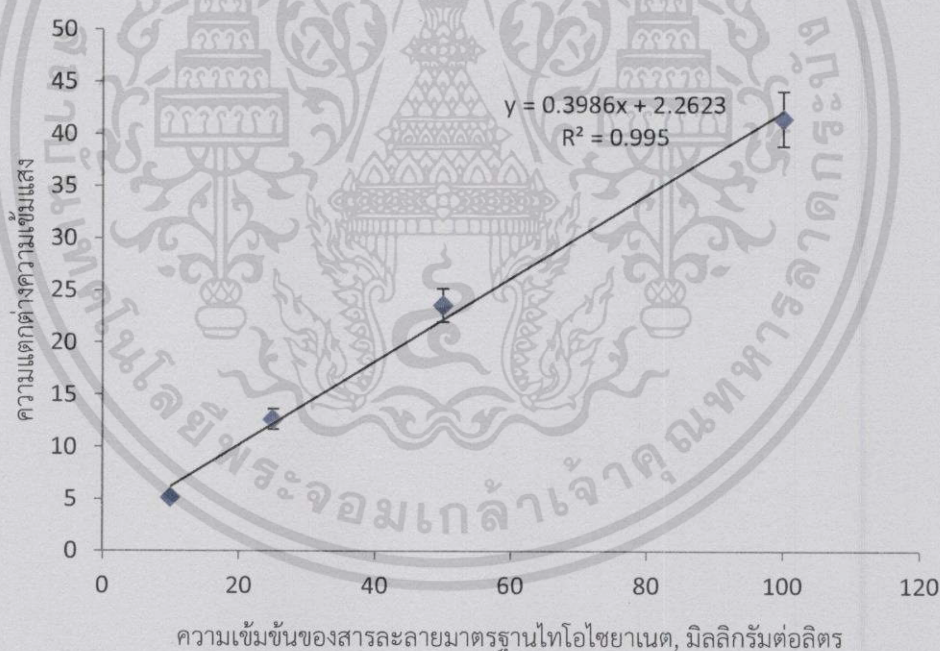
4.6 การทดสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์

4.6.1 ความเป็นเส้นตรง (linearity)

เมื่อนำค่าความแตกต่างความเข้มแสง (แกน Y) และความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไทโอไซยานต (แกน X) มาสร้างกราฟมาตรฐานทำให้สามารถหาความเป็นเส้นตรง ได้ผลการทดลองในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.9

ตารางที่ 4.2 แสดงค่า Euclidean Distance ของสารละลายมาตรฐานไทโอไซยานตที่ความเข้มข้นต่างๆ (n=10)

ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไทโอไซยานต (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่า Euclidean Distance
10	5.15±0.21
25	12.62±0.97
50	23.58±1.59
100	41.44±2.61



รูปที่ 4.9 แสดงกราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างความเข้มแสงกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไทโอไซยานต

จากรูปที่ 4.9 พบว่ามีความเป็นเส้นตรงอยู่ในช่วง 10-100 มิลลิกรัมต่อลิตร สมการเชิงเส้นถดถอย คือ $y = 0.3986x + 2.2623$ และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (r^2) เท่ากับ 0.995

4.6.2 ความเที่ยง (Precision)

ทำการวิเคราะห์สารละลายมาตรฐานไทโอไซยาเนตความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมดังที่ได้กล่าวมา จำนวน 10 ครั้ง และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ ซึ่งนิยมแสดงเป็นร้อยละหรือ %RSD ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงค่า Euclidean Distance ของสารละลายมาตรฐานไทโอไซยาเนตเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (n=10)

ครั้งที่	ค่า Euclidean Distance
1	30.14
2	34.95
3	37.38
4	38.14
5	39.39
6	40.19
7	35.65
8	36.66
9	36.88
10	33.80
ค่าเฉลี่ย	36.32
SD	2.91
%RSD	8.01

4.6.3 ความแม่นยำ (Accuracy)

สามารถประเมินได้โดยทำการหาค่าร้อยละคืนกลับ (%recovery) โดยทำการเติมสารละลายมาตรฐานไทโอไซยาเนตลงในตัวอย่างให้มีความเข้มข้นเป็น 10, 25, 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นทำการหาปริมาณไทโอไซยาเนตในสารละลายตัวอย่างที่เติมสารละลายมาตรฐานไทโอไซยาเนตแล้วคำนวณค่าร้อยละคืนกลับ ผลการทดลองดังแสดงในหัวข้อ 4.7 ตารางที่ 4.6 - 4.10

4.6.4 ขีดจำกัดของการตรวจพบ (Limit of detection: LOD)

ขีดจำกัดของการตรวจพบ (LOD) สามารถคำนวณได้โดยใช้สูตร

$$\text{LOD} = y_B + 3S_B$$

เมื่อ y_B คือ จุดตัดแกน y ที่ได้จากการสมการเส้นตรง $y = mx + c$

S_B คือ ค่าความคลาดเคลื่อนในแนวแกน y (Random error in y -direction) หาได้

จากสูตร

$$S_B = \sqrt{\frac{\sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-2}}$$

เมื่อ y_i คือ ค่าจริงที่ได้จากเครื่องมือ

\hat{y}_i คือ ค่าที่ได้จากการแทนค่า x ลงในสมการเส้นตรง

จากกราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างความเข้มแสงกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไทโอไซยานेटจะได้สมการเส้นตรง คือ $y = 0.5244x - 0.4024$

ตารางที่ 4.4 แสดงค่า y_i , \hat{y}_i และ $(y_i - \hat{y}_i)^2$ ในการคำนวณขีดจำกัดของการตรวจพบ

ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน ไทโอไซยานेट (มิลลิกรัมต่อลิตร)	y_i	\hat{y}_i	$y_i - \hat{y}_i$	$(y_i - \hat{y}_i)^2$
10	4.44	4.84	-0.40	0.1600
25	12.39	12.71	-0.32	0.1024
50	27.02	25.82	1.2	1.4400
100	51.56	52.04	-0.48	0.2304
			รวม	1.9328
			S_B	0.80

โดยใช้กราฟมาตรฐานในช่วงความเข้มข้น 10-100 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งจากการคำนวณแทนค่า $y_B = -0.4024$ และ $S_B = 0.80$ ในสมการจะได้ค่า LOD พบว่าวิธีนี้ได้ค่าขีดจำกัดของการตรวจพบไทโอไซยานेटเท่ากับ 2.00 หรือ 4.58 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.6.5 ขีดจำกัดของการตรวจวัดเชิงปริมาณ (Limit of Quantitation: LOQ)

ขีดจำกัดของการตรวจวัดเชิงปริมาณ (LOQ)สามารถคำนวณได้โดยใช้สูตร

$$LOQ = Y_B + 10S_B$$

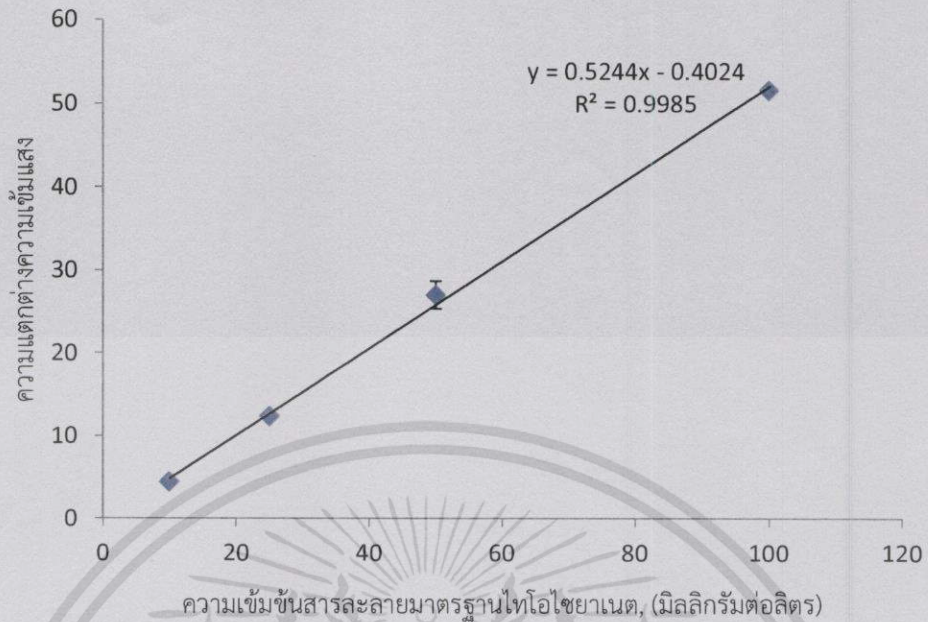
โดยใช้กราฟมาตรฐานในช่วงความเข้มข้น 10-100 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งจากการคำนวณแทนค่า $y_B = -0.4024$ และ $S_B = 0.80$ ในสมการจะได้ค่า LOQ พบว่าวิธีนี้ได้ค่าขีดจำกัดของการตรวจวัดเชิงปริมาณ เท่ากับ 7.60 หรือ 15.26 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.7 วิเคราะห์ไทโอไซยาเนตในตัวอย่างปุ๋ย

ทำการหาปริมาณไทโอไซยาเนตไอออนจากตัวอย่างปุ๋ย โดยใช้จุดทดสอบบนกระดาษในระบบโซล-เจลเจือด้วยเหล็ก(III) เข้มข้นร้อยละ 0.20 (w/v) ที่พัฒนาขึ้น หยดกรดไนตริกความเข้มข้น 0.50 โมลาร์ จากนั้นหยดสารละลายตัวอย่างปุ๋ยที่เจือจางลงไปบนจุดรีเอเจนต์ ปริมาณ 10.00 ไมโครลิตร จะปรากฏสีส้มแดงของสารเชิงซ้อนระหว่างไทโอไซยาเนตไอออนกับเหล็ก(III) ที่มีในตัวอย่าง จากนั้นตั้งทิ้งให้แห้งทำการบันทึกภาพที่เวลา 20 นาที ด้วยเครื่องสแกนและใช้โปรแกรม Image J™ คำนวณค่าความเข้มแสงของสีแดง สีเหลือง สีเขียว และค่าความแตกต่างความเข้มแสงแต่ละจุดสีของแบลงค์กับจุดสีที่เกิดสารเชิงซ้อนโดยใช้สมการเชิงเส้นแบบยูคลิด

ตารางที่ 4.5 แสดงค่า Euclidean Distance ของสารละลายมาตรฐานไทโอไซยาเนตที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน

ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไทโอไซยาเนต (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่า Euclidean Distance
10	4.44±0.25
25	12.39±0.17
50	27.02±1.63
100	51.56±0.37



รูปที่ 4.10 แสดงกราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างความเข้มแสงกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน

จากกราฟมาตรฐานหาความเป็นเส้นตรงได้คือ มีความเป็นเส้นตรงอยู่ในช่วง 10-100 มิลลิกรัมต่อลิตร สมการเชิงเส้นถดถอยคือ $y = 0.5244x - 0.4024$ และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (r^2) เท่ากับ 0.9985

การวิเคราะห์หาปริมาณไทโอไซยานตในตัวอย่างปูดด้วยการใช้วิธี Standard addition โดยการเติมสารละลายมาตรฐานไทโอไซยานตที่ความเข้มข้นต่างๆลงในตัวอย่างที่มีปริมาตร 10 มิลลิลิตร จะได้สารละลายที่มีความเข้มข้น 0, 10, 25, 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ หลังจากนั้นทำการหยดสารละลายลงบนจุดโซล-เจลเจือด้วยเหล็ก(III) และกรดไนตริกที่เตรียมไว้ ทำการบันทึกภาพที่เวลา 20 นาที ด้วยเครื่องสแกน คำนวณค่า Euclidean Distance ด้วยโปรแกรม Image JTM

นำค่า Euclidean Distance ที่ได้มาคำนวณหาความเข้มข้นโดยใช้สมการเส้นตรงจากกราฟมาตรฐานไทโอไซยานต คือ $y = 0.5244x - 0.4024$ ได้ค่าความเข้มข้นในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรและรายงานผลปริมาณของไทโอไซยานตที่ได้จากการวิเคราะห์ในรูปของค่าร้อยละกลับคืน (%recovery) ของแต่ละตัวอย่าง

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าร้อยละคืนกลับ (%recovery) ของตัวอย่างปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต A

ความเข้มข้นของสารละลายไทโอไซยาเนตที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่า Euclidean Distance	ความเข้มข้นของไทโอไซยาเนตที่วิเคราะห์ได้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการกลับคืน (%recovery)
0	0.32	0	-
10	2.56	5.65*	56.5
25	6.67	13.49	53.96
50	15.89	31.07	62.14
100	32.18	62.13	62.13

(*) ค่าน้อยกว่า LOQ

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าร้อยละคืนกลับ (%recovery) ของตัวอย่างสารเคมีแอมโมเนียมซัลเฟต

ความเข้มข้นของสารละลายไทโอไซยาเนตที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่า Euclidean Distance	ความเข้มข้นของไทโอไซยาเนตที่วิเคราะห์ได้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการกลับคืน (%recovery)
0	0.47	0	-
10	3.32	7.10*	71.00
25	9.43	18.75	75.00
50	17.82	34.75	69.50
100	35.22	67.93	67.93

(*) ค่าน้อยกว่า LOQ

จากตารางที่ 4.6 และตารางที่ 4.7 ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ที่เป็นปุ๋ยและสารเคมีแอมโมเนียมซัลเฟต มีค่าร้อยละการกลับคืนใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 53.96-75.00%

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าร้อยละคืนกลับ (%recovery) ของตัวอย่างปุ๋ยยูเรีย B

ความเข้มข้นของสารละลายไทโอไซยาเนตที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่า Euclidean Distance	ความเข้มข้นของไทโอไซยาเนตที่วิเคราะห์ได้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการกลับคืน (%recovery)
0	0.53	0	-
10	4.77	9.86*	98.60
25	12.67	24.93	99.72
50	27.46	53.13	106.26
100	51.8	99.55	99.55

(*) ค่าน้อยกว่า LOQ

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าร้อยละคืนกลับ (%recovery) ของตัวอย่างปุ๋ยยูเรีย C

ความเข้มข้นของสารละลายไทโอไซยาเนตที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่า Euclidean Distance	ความเข้มข้นของไทโอไซยาเนตที่วิเคราะห์ได้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการกลับคืน (%recovery)
0	0.68	0	-
10	4.35	9.06*	90.6
25	11.78	23.23	92.92
50	26.51	51.32	102.64
100	51.86	99.66	99.66

(*) ค่าน้อยกว่า LOQ

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าร้อยละคืนกลับ (%recovery) ของตัวอย่างสารเคมียูเรีย

ความเข้มข้นของสารละลายไทโอไซยาเนตที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่า Euclidean Distance	ความเข้มข้นของไทโอไซยาเนตที่วิเคราะห์ได้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการกลับคืน (%recovery)
0	0.71	0	-
10	4.01	8.41*	84.1
25	11.81	23.29	93.16
50	24.86	48.17	96.34
100	49.65	95.45	95.45

(*) ค่าน้อยกว่า LOQ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.8, 4.9 และตารางที่ 4.10 ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์เป็นปุ๋ยและสารเคมียูเรีย มีค่าร้อยละการกลับคืนใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 92.92 - 106.26%



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การวิเคราะห์ไทโอไซยาเนตแบบจุดบนกระดาษนำเทคนิคโซล-เจลเจือด้วยเหล็ก(III) เข้ามาประยุกต์ใช้ โดยเหล็ก (III) จะจำเพาะต่อไทโอไซยาเนต จึงทำให้เกิดสารเชิงซ้อนสีแดงส้มและทำการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของสีเพื่อนำมาคำนวณหาปริมาณไทโอไซยาเนตที่พบ ซึ่งได้สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมโซล-เจล คือ ระบบโซล-เจลเจือด้วยเหล็ก(III) เข้มข้นร้อยละ 0.02 (w/v) และกรดไนตริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ซึ่งกรดไนตริกจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของจุดสีได้ชัดเจนยิ่งขึ้น จากนั้นหยดสารละลายมาตรฐานไทโอไซยาเนตหรือสารละลายตัวอย่างปูลงบนจุดรีเอเจนต์ ทำการบันทึกภาพที่เวลา 20 นาที แล้วใช้เครื่องสแกนบันทึกภาพ คำนวณค่าความเข้มแสงที่ได้ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จากการศึกษาพบว่าการใช้เครื่องสแกนบันทึกภาพจะช่วยลดข้อผิดพลาดและสามารถควบคุมแสงได้ดีกว่าการบันทึกภาพด้วยกล้องมือถือสมาร์ตโฟน เนื่องจากการบันทึกภาพด้วยเครื่องสแกนเป็นการถ่ายภาพในระบบปิด ไม่มีแสงรบกวนจากแหล่งอื่น ส่วนโปรแกรมที่เหมาะสมในการตรวจวัดความเข้มแสงคือ โปรแกรม Image J™ เนื่องจากการเก็บข้อมูลของค่าความเข้มแสงของโปรแกรมนี้ช่วยลดความผิดพลาดจากการเลือกพื้นที่ในการวัดค่าความเข้มแสงของผู้ทดลองเพราะโปรแกรมจะเลือกพื้นที่ทั้งหมดของจุดบนภาพ ซึ่งจะต่างจากโปรแกรม Adobe Photoshop ที่ผู้ทดลองจะทำการเลือกเฉพาะพื้นที่ของจุดเอง อีกทั้งยังลดค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลได้ การวิเคราะห์ไทโอไซยาเนตในตัวอย่างปุยและสารเคมี สามารถทำได้โดยสร้างกราฟมาตรฐาน ซึ่งช่วงความเป็นเส้นตรงที่ได้ทดสอบนั้นอยู่ในช่วง 10 – 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มีสมการเชิงเส้นถดถอย คือ $y = 0.5244x - 0.4024$ และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (r^2) เท่ากับ 0.9985 มีค่าขีดจำกัดของการตรวจพบ (LOD) และค่าขีดจำกัดของการตรวจวัดเชิงปริมาณ (LOQ) เท่ากับ 4.58 และ 15.26 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากผลการคำนวณหาไทโอไซยาเนตในตัวอย่างมีค่าร้อยละคืนกลับของตัวอย่างปุยแอมโมเนียมซัลเฟตอยู่ในช่วง 53.96–62.14% ส่วนตัวอย่างปุยยูเรีย B, C อยู่ในช่วง 99.55 –106.26% และ 92.92–102.64%

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาอุณหภูมิและความเร็วในการปั่นกวนสารละลายโซล-เจล เพราะสารละลายโซล-เจล ขึ้นเกินไปจะมีผลต่อการแพร่กระจายของสารละลาย
2. ในการทดลองจะต้องมีการระวังสิ่งปนเปื้อนเป็นพิเศษทั้งจากเครื่องแก้วและสภาพแวดล้อมระหว่างการทดลอง เนื่องจากมีผลทำให้ผลการทดลองผิดพลาดได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] นฤชิต โปโรจน์, 2555. “ชุดทดสอบแบบจุดโดยใช้โซล-เจลเจือออโรฟิแนนโทรสีนสำหรับการวิเคราะห์เชิงปริมาณของเหล็ก(III)”. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [2] การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่มีสีของเหล็กไอออนกับไทโอไซยาเนต [Online]. สืบค้นเมื่อวันที่ 25 พฤษภาคม 2558 จาก <http://en.wikipedia.org/wiki/Thiocyanatoiron>.
- [3] ชุดทดสอบภาคสนาม [Online]. สืบค้นเมื่อวันที่ 25 พฤษภาคม 2558 จาก http://www.sc.mahidol.ac.th/tha/research/webtestkit/when_front.htm.
- [4] ระบบสี [Online]. สืบค้นเมื่อวันที่ 25 พฤษภาคม 2558 จาก <https://thanasanza74100.wordpress.com/สีกับงานกราฟฟิก/>.
- [5] หลักการทำงานของเครื่องสแกน [Online]. สืบค้นเมื่อวันที่ 25 พฤษภาคม 2558 จาก <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/computer/system/scanner.htm>.
<http://www.rmutphysics.com/charud/howstuffwork/scanner/scannerthai4.htm>.
<http://www.prakan.ac.th/Link-Data/web-it/data/web%20dream/scanner.htm>.
- [6] Ohshima, T., Kagaya, S., Ide, M.G. and Cattrall, R.W., 2014. “The use of a polymer inclusion membrane as a sorbent for online preconcentration in the flow injection determination of thiocyanate impurity in ammonium sulfate fertilizer”. *Talanta*, 930-8555.
- [7] Afkhami, A., Felehgari, F.S. and Madrakian, T., 2014. “Highly sensitive and selective determination of thiocyanate using gold nanoparticles surface decorated multi-walled carbon nanotubes modified carbon paste electrode”. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 195, 467-474.
- [8] Bjerregaard, C., Moller, P. and Sorensen, H., 1995. “Determination of thiocyanate, iodide, nitrate and nitrite in biological samples by micellar electrokinetic capillary chromatography”. *Journal of Chromatography A*, 717, 409-414.
- [9] Van Staden, J.F. and Botha, A., 2000. “Spectrophotometric determination of thiocyanate by sequential injection analysis”. *Analytica Chimica Acta*, 403, 279-286.
- [10] Wang, L., Dong, L. and Song, W., 2013. “Determination of thiocyanate in the vacuum carbonate desulfurization wastewater”. *Journal of Environmental Sciences*, 25, s89-s92.
- [11] จิตพร โพธิ์ปัญญาศักดิ์, 2556. “ชุดทดสอบแบบจุดโดยใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นสารช่วยยึดติดสำหรับวิเคราะห์หาปริมาณเฟอร์รัสไอออน”. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




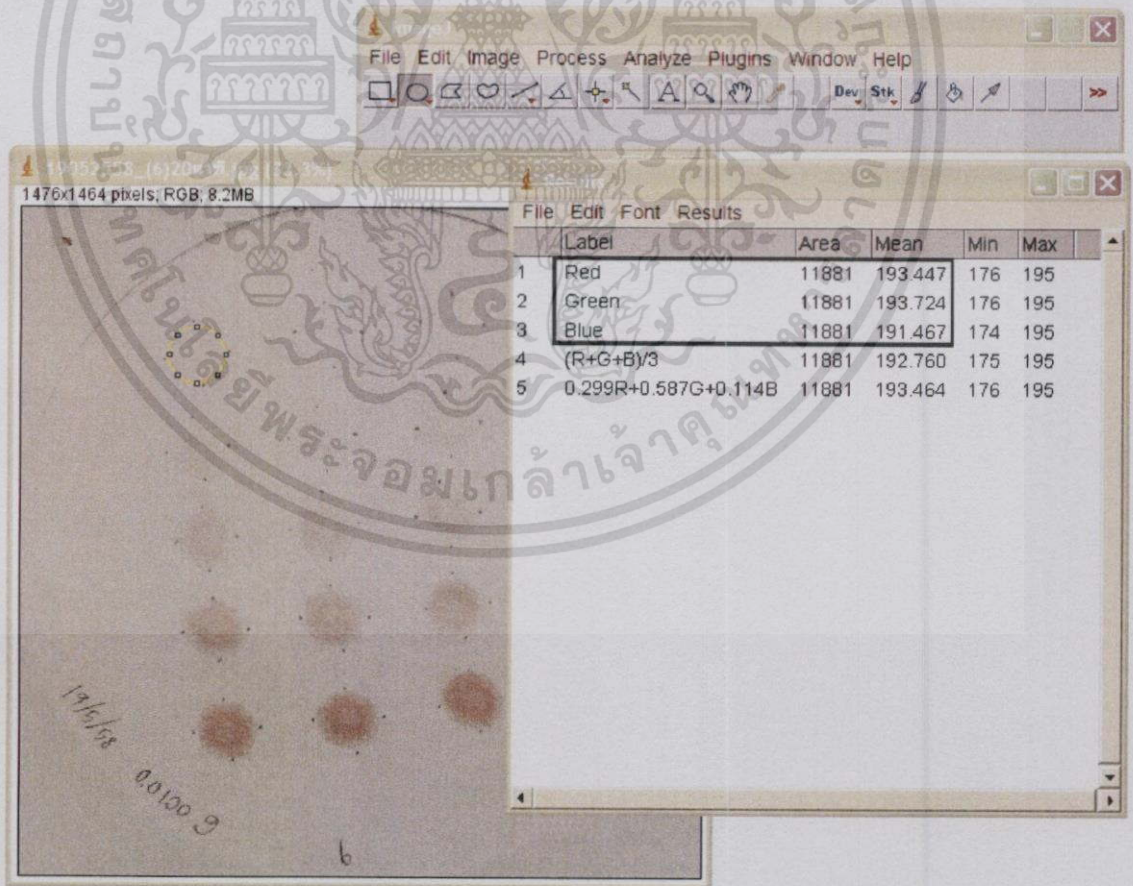
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

การบันทึกค่าความเข้มแสงจากโปรแกรม Image J™

ขั้นตอนและวิธีการใช้โปรแกรม

1. ลงโปรแกรม Image J™
2. เปิดโปรแกรม Image J™ จากนั้นทำการเลือกเมนู File > Open หรือกด Ctrl+O เพื่อเปิดภาพที่ต้องการ
(ทำการปรับค่าความสว่าง (Brightness) หากภาพที่บันทึกมีความสว่างจนมองไม่เห็นขอบเขตของจุดสี เลือกเมนู Image > Adjust > Brightness/Contrast... หรือกด Ctrl+Shift+O)
3. ทำการเลือกพื้นที่ของจุดสีโดยสร้างวงกลมโดยใช้เครื่องมือ 
4. เมื่อเลือกพื้นที่เสร็จแล้วทำการเปิดหน้าต่างคำนวณค่า RGB โดยเลือกเมนู Plugins > Analyze > Measure RGB จะปรากฏหน้าต่าง Results
5. หน้าต่างคำนวณ RGB จะปรากฏขึ้น นำค่า Mean ของค่าแสงสีแดง สีเขียวและสีน้ำเงิน บันทึกค่าแสง RGB และนำมาคำนวณค่าความแตกต่างความเข้มแสง



รูปที่ ก.1 หน้าต่างโปรแกรม Image J™ และการเรียกหน้าต่างวัดค่าความเข้มแสง

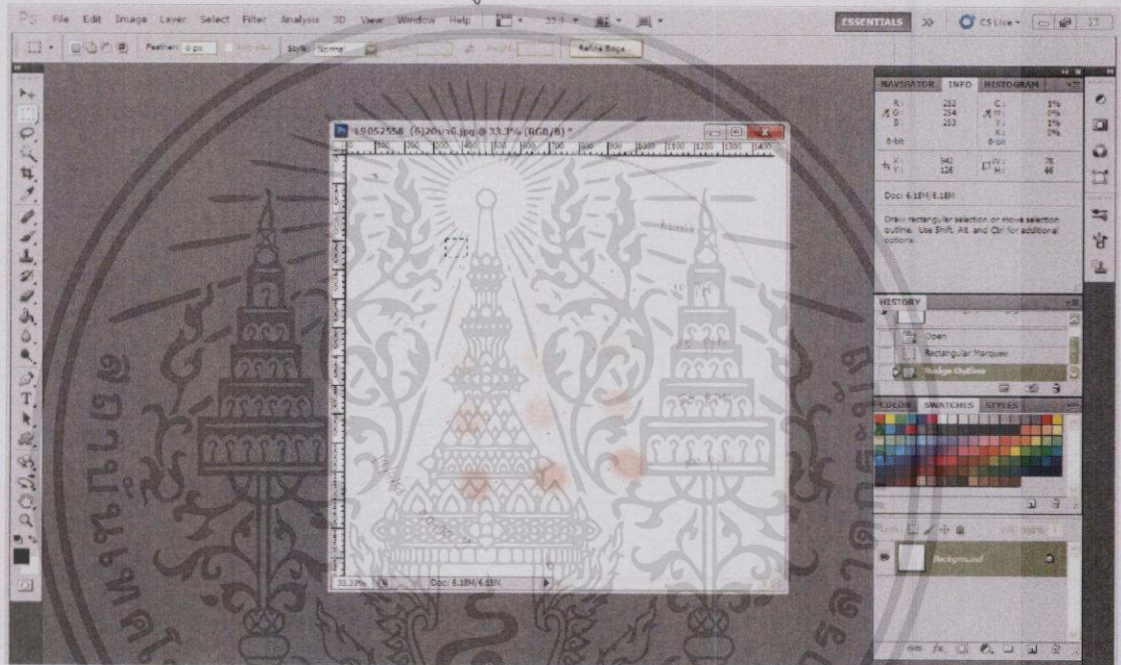
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

การบันทึกค่าความเข้มแสงจากโปรแกรม Adobe Photoshop CS5™

ขั้นตอนและวิธีการใช้โปรแกรม

1. เปิดโปรแกรม Adobe Photoshop CS5™ จากนั้นทำการเลือกเมนู File > Open หรือกด Ctrl+O เพื่อเปิดภาพที่ต้องการ
2. เปิดหน้าต่าง Info โดยเลือกเมนู Window > Info
3. เลือกพื้นที่โดยการสร้างกรอบสี่เหลี่ยมอยู่ภายในวงกลม



รูปที่ ข.1 หน้าต่างโปรแกรม Adobe Photoshop CS5™ และการเรียกหน้าต่างวัดค่าความเข้มแสง

4. ข้ลู่ศรไปยังจุดที่ต้องการวัดความเข้มแสง โดยค่าที่ได้จะแสดงออกมาเป็นค่าแสงสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน (RGB) ดังรูปที่ ข.2 ซึ่งจะเลือกวัดค่าความเข้มแสงทั้งหมด 5 จุดคือ มุมของกรอบสี่เหลี่ยมที่ลากไว้ทั้ง 4 มุมและจุดกึ่งกลางของกรอบสี่เหลี่ยม บันทึกค่าแสง RGB และนำมาคำนวณค่าความแตกต่างความเข้มแสง

NAVIGATOR		INFO	HISTOGRAM	
R:	252	C:	1%	
G:	254	M:	0%	
B:	253	Y:	1%	
	8-bit	K:	0%	
X:	942	W:	78	
Y:	126	H:	66	

รูปที่ ข.2 หน้าต่างแสดงค่าแสงสีแดง สีเขียวและสีน้ำเงิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

แสดงค่าความเข้มข้น ค่าความแตกต่างความเข้มข้นและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ อ้างอิงจากรูปที่ 4.2

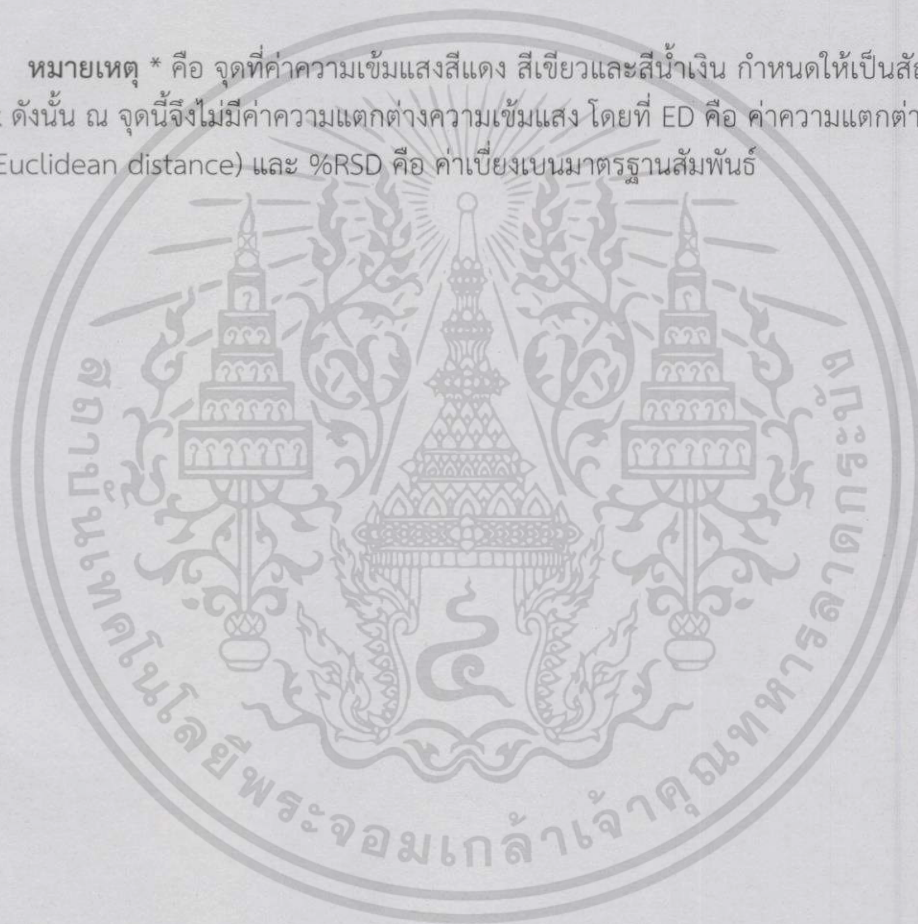
ตารางที่ ค.1 ค่าความเข้มข้น ค่าความแตกต่างความเข้มข้นและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ เปรียบเทียบระบบโซล-เจลเจือด้วยเหล็ก(III) ความเข้มข้นร้อยละ 0.20, 0.40 และ 0.60 (w/v)

ความเข้มข้นของ สารละลายมาตรฐาน ไทโอไซยาเนต, มิลลิกรัมต่อลิตร	ระบบโซล-เจลความเข้มข้นร้อยละ 0.20 (w/v)				
	ค่าความเข้มข้น			ED	%RSD
	แดง	เขียว	น้ำเงิน		
0.00	139.22±5.73	134.22±6.45	137.61±4.77	*	-
10.00	129.53±4.76	124.78±6.40	125.31±7.38	18.29±2.78	0.15
25.00	124.09±3.20	118.96±4.76	117.56±5.26	29.39±3.08	0.10
50.00	123.75±1.39	114.52±3.47	109.28±4.27	37.82±5.29	0.14
100.00	125.78±2.64	109.64±0.38	102.14±0.10	45.20±8.26	0.18

ความเข้มข้นของ สารละลายมาตรฐาน ไทโอไซยาเนต, มิลลิกรัมต่อลิตร	ระบบโซล-เจลความเข้มข้นร้อยละ 0.40 (w/v)				
	ค่าความเข้มข้น			ED	%RSD
	แดง	เขียว	น้ำเงิน		
0.00	133.96±3.38	130.58±5.97	132.63±6.16	*	-
10.00	126.98±2.08	122.55±3.99	121.91±4.05	15.1±3.17	0.21
25.00	123.09±2.82	118.95±5.04	115.86±4.66	23.12±1.85	0.08
50.00	126.12±3.96	117.64±5.74	111.66±6.18	25.86±0.62	0.02
100.00	132.80±1.66	113.82±2.31	104.83±3.12	32.48±5.06	0.16

ความเข้มข้นของ สารละลายมาตรฐาน ไทโอไซยาเนต, มิลลิกรัมต่อลิตร	ระบบโซล-เจลความเข้มข้นร้อยละ 0.60 (w/v)				
	ค่าความเข้มแสง			ED	%RSD
	แดง	เขียว	น้ำเงิน		
0.00	141.37±2.65	137.39±4.44	138.85±4.04	*	-
10.00	135.70±2.78	128.85±4.38	129.36±4.51	13.38±0.49	0.04
25.00	129.94±3.37	125.23±4.84	121.86±4.92	23.82±1.21	0.05
50.00	129.11±3.25	120.12±4.68	114.14±5.12	32.55±1.26	0.04
100.00	131.39±2.77	111.61±4.89	100.29±5.28	47.45±1.32	0.03

หมายเหตุ * คือ จุดที่ค่าความเข้มแสงสีแดง สีเขียวและสีน้ำเงิน กำหนดให้เป็นสัญญาณของ blank ดังนั้น ณ จุดนี้จึงไม่มีค่าความแตกต่างความเข้มแสง โดยที่ ED คือ ค่าความแตกต่างความเข้มแสง (Euclidean distance) และ %RSD คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์



ภาคผนวก ง.

แสดงค่าความเข้มข้น ค่าความแตกต่างความเข้มข้นและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์
อ้างอิงจากรูปที่ 4.4

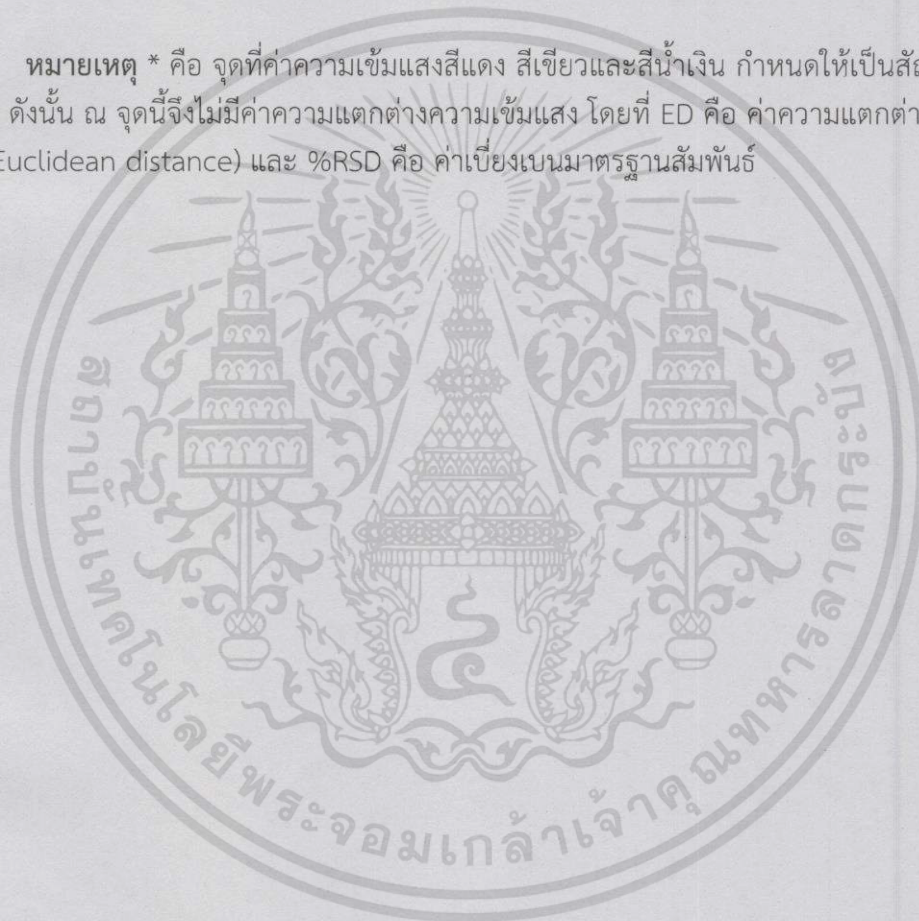
ตารางที่ ง.1 ค่าความเข้มข้น ค่าความแตกต่างความเข้มข้นและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์
เปรียบเทียบกรดไนตริกที่ความเข้มข้น 0.50, 0.70, 1.0 โมลาร์

ความเข้มข้นของ สารละลายมาตรฐาน ไทโอไซยาเนต, มิลลิกรัมต่อลิตร	กรดไนตริกที่ความเข้มข้น 0.50 โมลาร์				
	ค่าความเข้มข้น			ED	%RSD
	แดง	เขียว	น้ำเงิน		
0.00	190.99±0.50	191.59±0.49	188.13±1.56	*	-
10.00	190.22±0.61	189.07±0.64	182.35±0.54	6.35±1.04	16.38
25.00	190.41±0.22	184.50±0.25	174.89±0.58	15.03±1.05	6.99
50.00	189.73±0.40	177.62±1.32	164.37±2.24	27.59±1.08	3.91
100.00	186.16±1.01	155.51±1.17	135.30±0.80	64.16±1.14	1.78

ความเข้มข้นของ สารละลายมาตรฐาน ไทโอไซยาเนต, มิลลิกรัมต่อลิตร	กรดไนตริกที่ความเข้มข้น 0.70 โมลาร์				
	ค่าความเข้มข้น			ED	%RSD
	แดง	เขียว	น้ำเงิน		
0.00	190.60±0.30	191.19±0.28	186.77±0.63	*	-
10.00	189.47±0.88	188.27±0.89	181.55±0.64	6.09±0.84	13.79
25.00	188.55±1.07	182.83±2.85	173.76±3.90	15.61±4.23	27.09
50.00	189.16±1.55	175.07±4.32	161.53±6.47	30.04±7.21	24.00
100.00	184.82±1.73	153.80±4.95	133.62±6.45	65.24±7.60	11.65

ความเข้มข้นของ สารละลายมาตรฐาน ไทโอไซยาเนต, มิลลิกรัมต่อลิตร	กรดไนตริกที่ความเข้มข้น 1.0 โมลาร์				
	ค่าความเข้มแสง			ED	%RSD
	แดง	เขียว	น้ำเงิน		
0.00	189.45±0.07	190.13±0.09	185.10±0.34	*	-
10.00	188.73±0.47	186.39±0.67	179.81±0.90	6.61±0.90	13.62
25.00	186.63±1.22	179.54±1.51	169.99±179	18.71±2.33	12.45
50.00	183.22±0.38	166.69±0.17	150.72±0.33	42.08±0.32	0.76
100.00	180.12±0.25	150.72±1.35	130.52±1.48	67.96±1.71	2.52

หมายเหตุ * คือ จุดที่ค่าความเข้มแสงสีแดง สีเขียวและสีน้ำเงิน กำหนดให้เป็นสัญญาณของ blank ดังนั้น ณ จุดนี้จึงไม่มีค่าความแตกต่างความเข้มแสง โดยที่ ED คือ ค่าความแตกต่างความเข้มแสง (Euclidean distance) และ %RSD คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์



ภาคผนวก จ.

แสดงค่าความเข้มแสง ค่าความแตกต่างความเข้มแสงและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ อ้างอิงจากรูปที่ 4.5

ตารางที่ จ.1 ค่าความเข้มแสง ค่าความแตกต่างความเข้มแสงและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ เปรียบเทียบอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดความเข้มสีของชุดทดสอบระหว่างเครื่องสแกนกับกล้องมือถือสมาร์ทโฟน

ความเข้มข้นของ สารละลายมาตรฐาน ไทโอไซยาเนต, มิลลิกรัมต่อลิตร	เครื่องสแกน				
	ค่าความเข้มแสง			ED	%RSD
	แดง	เขียว	น้ำเงิน		
0.00	193.20±0.15	193.48±0.16	191.24±0.14	*	-
10.00	193.00±0.08	191.98±0.04	187.79±0.05	3.77±0.17	4.51
25.00	193.01±0.08	188.40±0.60	182.10±0.94	10.46±0.92	8.80
50.00	191.90±0.49	179.57±1.14	170.43±1.38	25.07±1.62	6.46
100.00	188.63±0.59	163.09±1.33	151.75±1.36	50.04±1.75	3.50

ความเข้มข้นของ สารละลายมาตรฐาน ไทโอไซยาเนต, มิลลิกรัมต่อลิตร	กล้องมือถือสมาร์ทโฟน				
	ค่าความเข้มแสง			ED	%RSD
	แดง	เขียว	น้ำเงิน		
0.00	143.62±3.74	138.71±1.64	141.29±2.65	*	-
10.00	136.38±2.26	132.32±3.31	132.79±3.89	12.87±2.55	19.81
25.00	137.41±1.75	133.18±0.60	131.24±1.11	13.05±2.72	20.84
50.00	141.66±2.94	131.22±1.84	126.27±1.76	16.90±1.21	7.16
100.00	142.34±2.13	120.44±0.91	112.23±0.36	34.35±2.89	8.41

หมายเหตุ * คือ จุดที่ค่าความเข้มแสงสีแดง สีเขียวและสีน้ำเงิน กำหนดให้เป็นสัญญาณของ blank ดังนั้น ณ จุดนี้จึงไม่มีค่าความแตกต่างความเข้มแสง โดยที่ ED คือ ค่าความแตกต่างความเข้มแสง (Euclidean distance) และ %RSD คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์

ภาคผนวก ฉ.

แสดงค่าความเข้มแสง ค่าความแตกต่างความเข้มแสงและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ อ้างอิงจากรูปที่ 4.6 และ 4.7

ตารางที่ ฉ.1 ค่าความเข้มแสง ค่าความแตกต่างความเข้มแสงและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ เปรียบเทียบโปรแกรมสำหรับตรวจวัดความเข้มสีของชุดทดสอบระหว่างโปรแกรม Image J™ และ โปรแกรม Adobe Photoshop CS5™ โดยใช้กล้องมือถือสมาร์ทโฟนในการบันทึกภาพ

ความเข้มข้นของ สารละลายมาตรฐาน ไทโอไซยาเนต, มิลลิกรัมต่อลิตร	โปรแกรม Image J™				
	ค่าความเข้มแสง			ED	%RSD
	แดง	เขียว	น้ำเงิน		
0.00	143.62±3.74	138.71±1.64	141.29±2.65	*	-
10.00	136.38±2.26	132.32±3.31	132.79±3.89	12.87±2.55	19.81
25.00	137.41±1.75	133.18±0.60	131.24±1.11	13.05±2.72	20.84
50.00	141.66±2.94	131.22±1.84	126.27±1.76	16.90±1.21	7.16
100.00	142.34±2.13	120.44±0.91	112.23±0.36	34.35±2.89	8.41

ความเข้มข้นของ สารละลายมาตรฐาน ไทโอไซยาเนต, มิลลิกรัมต่อลิตร	โปรแกรม Adobe Photoshop CS5™				
	ค่าความเข้มแสง			ED	%RSD
	แดง	เขียว	น้ำเงิน		
0.00	141.00±3.54	136.20±2.23	138.27±3.36	*	-
10.00	135.20±2.60	132.40±4.04	132.27±5.46	9.17±2.93	31.95
25.00	137.40±0.20	132.67±0.70	131.00±1.56	8.85±4.09	46.21
50.00	141.20±1.56	130.27±0.61	124.80±1.2	14.72±3.35	22.76
100.00	144.60±1.81	118.53±1.29	110.07±0.90	33.31±3.15	9.46

ตารางที่ ๑.2 ค่าความเข้มแสง ค่าความแตกต่างความเข้มแสงและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพันธ์เปรียบเทียบโปรแกรมสำหรับตรวจวัดความเข้มสีของชุดทดสอบระหว่างโปรแกรม Image J™ และโปรแกรม Adobe Photoshop CS5™ โดยใช้เครื่องสแกนในการบันทึกภาพ

ความเข้มข้นของ สารละลายมาตรฐาน ไทโอไซยาเนต, มิลลิกรัมต่อลิตร	โปรแกรม Image J™				
	ค่าความเข้มแสง			ED	%RSD
	แดง	เขียว	น้ำเงิน		
0.00	193.20±0.15	193.48±0.16	191.24±0.14	*	-
10.00	193.00±0.08	191.98±0.04	187.79±0.05	3.77±0.17	4.51
25.00	193.01±0.08	188.40±0.60	182.10±0.94	10.46±0.92	8.80
50.00	191.90±0.49	179.57±1.14	170.43±1.38	25.07±1.62	6.46
100.00	188.63±0.59	163.09±1.33	151.75±1.36	50.04±1.75	3.50

ความเข้มข้นของ สารละลายมาตรฐาน ไทโอไซยาเนต, มิลลิกรัมต่อลิตร	โปรแกรม Adobe Photoshop CS5™				
	ค่าความเข้มแสง			ED	%RSD
	แดง	เขียว	น้ำเงิน		
0.00	253.93±0.31	253.93±0.46	252.13±1.21	*	-
10.00	252.87±0.12	252.07±0.70	245.60±1.22	6.88±0.31	4.51
25.00	253.80±0.53	249.00±1.51	242.07±2.70	11.21±1.84	16.41
50.00	253.53±0.95	237.80±2.00	229.40±1.20	27.88±1.67	5.99
100.00	249.93±0.92	219.73±4.74	209.40±2.20	54.88±4.44	8.09

หมายเหตุ * คือ จุดที่ค่าความเข้มแสงสีแดง สีเขียวและสีน้ำเงิน กำหนดให้เป็นสัญญาณของ blank ดังนั้น ณ จุดนี้จึงไม่มีค่าความแตกต่างความเข้มแสง โดยที่ ED คือ ค่าความแตกต่างความเข้มแสง (Euclidean distance) และ %RSD คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพันธ์