

การพัฒนาตัวตรวจวัดคอปเปอร์ไอออนจากอนุพันธ์โรดามีนและ

พอลิเมอร์ชีวภาพ

โดย

นางสาวปาณิศา มิลินทานุช

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (นวัตกรรมและเทคโนโลยีวัสดุ) สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุและสิ่งทอ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปีการศึกษา 2559 ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

การพัฒนาตัวตรวจวัดคอปเปอร์ไอออนจากอนุพันธ์โรดามีนและ พอลิเมอร์ชีวภาพ

โดย

นางสาวปาณิศา มิลินทานุช

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (นวัตกรรมและเทคโนโลยีวัสดุ)

สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุและสิ่งทอ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปีการศึกษา 2559 ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

DEVELOPMENT OF COPPER ION SENSORS BASED ON RHODAMINE DERIVATIVES AND BIOPOLYMERS

ΒY

MISS PANISA MILINDANUTH

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE (MATERIALS INNOVATION AND TECHNOLOGY) DEPARTMENT OF MATERIALS AND TEXTILE TECHNOLOGY FACULTY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY THAMMASAT UNIVERSITY ACADEMIC YEAR 2016 COPYRIGHT OF THAMMASAT UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

วิทยานิพนธ์

ของ

นางสาวปาณิศา มิลินทานุช

เรื่อง

การพัฒนาตัวตรวจวัดคอปเปอร์ไอออนจากอนุพันธ์โรดามีนและพอลิเมอร์ชีวภาพ

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (นวัตกรรมและเทคโนโลยีวัสดุ)

เมื่อ วันที่ 7 กรกฎาคม พ.ศ. 2560

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

5.03 CHON

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติพงศ์ ไชยนอก)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญวิสาข์ พิสิฏฐศักดิ์) พระนา พระวิชา

(รองศาสตราจารย์ ดร.เทียนทอง ทองพันชั่ง) bear

(อาจารย์ ดร.พัชรกมน หนูเอียด)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

คณบดี

(รองศาสตราจารย์ ปกรณ์ เสริมสุข)

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาตัวตรวจวัดคอปเปอร์ไอออนจากอนุพันธ์โรดา
	มีนและพอลิเมอร์ชีวภาพ
ชื่อผู้เขียน	นางสาวปาณิศา มิลินทานุช
ชื่อปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (นวัตกรรมและเทคโนโลยีวัสดุ)
สาขาวิชา/คณะ/มหาวิทยาลัย	เทคโนโลยีวัสดุและสิ่งทอ
	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญวิสาข์ พิสิฏฐศักดิ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม (ถ้ามี)	รองศาสตราจารย์ ดร.เทียนทอง ทองพันชั่ง
ปีการศึกษา	2559

บทคัดย่อ

เซนเซอร์เปลี่ยนสีทางเคมีเป็นวัสดุ อุปกรณ์ หรือสารประกอบที่สามารถแสดงผลการ ตรวจวัดสารที่ต้องการวิเคราะห์ได้ในรูปการเปลี่ยนแปลงของสี ถ้าเซนเซอร์อยู่ในสถานะของแข็งจะมี ข้อดีคือสะดวกต่อการพกพาและใช้งานได้ง่าย การพัฒนาตัวตรวจวัดไอออนคอปเปอร์ในสารละลาย นั้นมีความน่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากระดับคอปเปอร์ที่สูงเกินไปจะส่งผลเสียต่อสุขภาพของมนุษย์ ได้ ในงานวิจัยนี้จึงพัฒนาเซนเซอร์เปลี่ยนสีทางเคมีให้อยู่ในรูปแบบของแข็ง โดยใช้เนื้อพื้นเป็น เซลลูโลสหรือซอยโปรตีนไอโซเลทและผสมอนุพันธ์ของโรดามีนลงไป เพื่อใช้เป็นตัวตรวจวัดไอออน ของคอปเปอร์ในสารละลาย เซนเซอร์แสดงผลโดยเปลี่ยนจากไม่มีสีเป็นสีชมพู เมื่อทำการทดสอบกับ ไอออนโลหะรบกวนอื่นๆ ด้วยเทคนิคการวัดค่าสีและการเรืองแสงฟลูออเรสเซนต์ พบว่าเซนเซอร์ที่ สังเคราะห์ได้มีความไวและการเลือกที่ดี เนื่องจากเซนเซอร์เปลี่ยนสีอย่างชัดเจน สามารถสังเกตเห็น การเปลี่ยนแปลงได้ด้วยตาเปล่า จึงสามารถใช้งานได้เหมือนกับกระดาษตรวจวัด

คำสำคัญ: คอปเปอร์, โรดามีน, เซลลูโลส, เซนเซอร์เปลี่ยนแสงทางเคมี, ซอยโปรตีนไอโซเลท

Thesis Title	DEVELOPMENT OF COPPER ION SENSORS
	BASED ON RHODAMINE DERIVATIVES AND
	BIOPOLYMERS
Author	Miss Panisa Milindanuth
Degree	Master of Science (Materials Innovation and
	Technology)
Major Field/Faculty/University	Materials and Textile Technology
	Faculty of Science and Technology
	Thammasat University
Thesis Advisor	Assistant Professor Dr. Penwisa Pisitsak
Thesis Co-Advisor	Associate Professor Dr. Tienthong
	Thongpanchang
Academic Years	2016

ABSTRACT

Colorimetric sensors are materials, devices, and compounds that can undergo well-defined color changes in the presence of analyte. Solid colorimetric sensors are convenient to use due to their portability and operational simplicity. The detection of copper ions is of great interest because high levels of copper can have deleterious effects on human health. In this work, colorimetric sensors based on rhodamine derivatives incorporated in cellulose fibers and soy protein isolate (SPI) were prepared to detect Cu(II) ions in aqueous solutions. Upon detection of Cu(II) ions, the color change from colorless to pink-violet was clearly visible. Negligible interference from other metal ions was observed. Both sensitivity and selectivity of the sensor were confirmed by colorimetric measurement and fluorescence spectroscopy. The sensor allows naked-eye detection of Cu(II) presented in aqueous solution and can be used in a manner similar to an indicator paper.

Keywords: colorimetric sensors, copper ion, rhodamine, cellulose, soy protein isolate

กิตติกรรมประกาศ

ในงานวิจัยนี้ได้รับความร่วมมือ ช่วยเหลือ และการสนับสนุนจากบุคคลหลายท่านและ หลายหน่วยงานจนส่งผลให้สามารถสำเร็จลุล่วงมาได้ด้วยดี โดยข้าพเจ้าในฐานะผู้วิจัย ต้อง ขอขอบพระคุณ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญวิสาข์ พิสิฏฐศักดิ์ ที่กรุณาให้ คำแนะนำ คำปรึกษาและความช่วยเหลือข้าพเจ้ามาตลอดจนงานวิจัยเสร็จสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รองศาสตราจารย์ ดร.เทียนทอง ทองพันชั่ง สำหรับคำแนะนำ คำปรึกษาและ ความช่วยเหลือที่มีให้ข้าพเจ้ามา ทั้งด้านสารเคมี อุปกรณ์วัสดุ และเครื่องมือวิจัยมาตลอดการทำงาน วิจัยนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุและสิ่งทอ หลักสูตรนวัตกรรม และเทคโนโลยีวัสดุ ที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ อบรม และประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ให้แก่ ข้าพเจ้า ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุและสิ่งทอ ที่ความช่วยเหลือและอำนวย ความสะดวกตลอดการทำวิจัย

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บิดา มารดา พี่ น้อง และ เพื่อนๆของข้าพเจ้าทั้งที่ศึกษา ปริญญาโทด้วยกัน และที่ศึกษาอยู่ ณ ที่อื่นที่คอยสนับสนุน ให้กำลังใจ และเป็นที่ปรึกษาที่ดีมาโดย ตลอด

นางสาวปาณิศา มิลินทานุช

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(1)
	<i>.</i>
บทคัดย้อภาษาอังกฤษ	(2)
กิตติกรรมประกาศ	(3)
สารบัญตาราง	(8)
สารบัญภาพ	(9)
าเทที่ 1 บทนำ	1
	-
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	3
บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
21 ทองแดง (conner)	4
2.2 เซนเซอร์ทางเคมี (chemosensor)	4
2.2.1 หลักการของเซนเซอร์ทางเคมี	5
2.2.2 ชนิดของเซนเซอร์ทางเคมี	5
2.2.2.1 เซนเซอร์ทางไฟฟ้า (electronic sensor)	5
2.2.2.2 เซนเซอร์ทางแสง (optical sensor)	6
2.2.3 การออกแบบเซนเซอร์ทางเคมี	6
2.2.2.1 โมเลกุลโฮสต์สำหรับแคทไออน	7

(4)

S S K O ev h	
2.2.2.2 โมเลกุลโฮสต์สำหรับแอนไอออน	7
2.2.2.3 โมเลกุลโฮสต์สำหรับคู่ไอออน และสวิทเทอร์ไอออน	7
2.3 โรดามีน บี (Rhodamine B)	7
2.3.1 ตัวจับโมเลกุลเกสต์แบบซัลเฟอร์ (Sulfur, S)	9
2.3.2 ตัวจับโมเลกุลเกสต์แบบไนโตรเจน (Nitrogen, N)	10
2.3.3 ตัวจับโมเลกุลเกสต์แบบออกซิเจน (Oxygen, O)	10
2.4 การเคลือบโมเลกุลเซนเซอร์กับวัสดุรองรับ	12
2.4.1 การยึดติดทางกายภาพ (Physical embedding)	12
2.3.2 การดัดแปรพื้นผิวทางเคมี (Chemical surface modification)	13
2.5 วัสดุรองรับเซนเซอร์	15
2.5.1 เซลลูโลส	15
2.5.2 ซอยโปรตีนไอโซเลท	18
บทที่ 3 วิธีการวิจัย	19
3.1 วัสดุตัวอย่างและสารเคมี	19
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	20
3.3 วิธีการทดลอง	21
3.3.1 การสังเคราะห์อนุพันธ์โรดามีน	21
3.3.1.1 สังเคราะห์โรดามีน บี ไฮดราซีน	21
3.3.1.2 สังเคราะห์ 2, 5 ไดไฮดรอกซีเบนซาลดีไฮด์ โรดามีน บี ไฮดราโซน	22
3.3.1.3 สังเคราะห์ซาลิไซลัลดีไฮด์ โรดามีน บี ไฮดราโซน	23
3.3.2 การทดลองเคลือบอนุพันธ์โรดามีนลงบนเส้นใยเซลลูโลส	23
3.3.2.1 การเตรียมผ้าฝ้ายทอลายขัด	24
3.3.2.2 การเตรียมกระดาษเซลลูโลสอัด	24
3.3.2.3 การเตรียมสารละลายแบคทีเรียเซลลูโลส	24
3.3.2.4 การเตรียมสารละลายโรดามีน 2	24
3.3.2.5 การเคลือบอนุพันธ์โรดามีนลงบนผ้าฝ้ายทอลายขัด	25
3.3.2.6 การเคลือบอนุพันธ์โรดามีนลงบนกระดาษเซลลูโลสอัด	25

(5)

3.3.2.7 การเคลือบอนุพันธ์โรดามีนลงบนแบคทีเรียเซลลูโลส	25
3.3.3 การทดลองผสมอนุพันธ์โรดามีนลงในซอยโปรตีนไอโซเลท	25
3.2.3.1 การเตรียมสารละลายโรดามีนบี 3	25
3.2.3.2 การผสมอนุพันธ์โรดามีนลงในซอยโปรตีนไอโซเลท	25
3.4 วิธีการทดสอบ	26
3.4.1 วิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุล	26
3.4.2 ทดสอบสภาวะที่เหมาะสมในการใช้งานเซนเซอร์	26
3.4.3 ทดสอบอัตราส่วนที่เหมาะสมของเซนเซอร์กับคอปเปอร์ไอออน	26
3.4.4 ทดสอบความสามารถในการตรวจวัดคอปเปอร์ไอออน	27
3.4.4.1 เซนเซอร์รูปแบบสารละลาย	27
3.4.4.2 เซนเซอร์รูปแบบของแข็ง (โรดามีน 2 ผสมในเซลลูโลส)	27
3.4.2.3 เซนเซอร์รูปแบบของแข็ง (โรดามีน 3 ผสมในซอยโปรตีนไอโซเลท)	27
3.4.5 ทดสอบความจำเพาะในการตรวจจับสารโลหะรบกวนอื่นๆ	27
3.4.5.1 เซนเซอร์รูปแบบสารละลาย	28
3.4.5.2 เซนเซอร์รูปแบบของแข็ง (โรดามีน 2 ผสมในเซลลูโลส)	28
3.4.5.3 เซนเซอร์รูปแบบของแข็ง (โรดามีน 3 ผสมในซอยโปรตีนไอโซเลท)	28
3.4.6 ทดสอบการยึดติดของเซนเซอร์กับวัสดุรองรับ	28
3.4.7 ลักษณะสัณฐานวิทยา	29
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	30
4.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุล	30
4.1.1 ผลวิเคราะห์โครงสร้างสารด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์	
สเปคโตรสโคปี	30
4.2 ผลทดสอบสภาวะที่เหมาะสมในการใช้งานเซนเซอร์	37
4.3 ทดสอบอัตราส่วนการเกิดเชิงซ้อนของเซนเซอร์กับคอปเปอร์ไอออน	39
4.4 ผลการทดสอบความสามารถในการตรวจวัดคอปเปอร์ไอออน	40

40

4.4.1 เซนเซอร์รูปแบบสารละลาย	41
4.4.1.1 ผลการดูดกลื่นแสงของสาร	41
4.4.1.2 ผลการเรื่องแสงของสาร	44
4.4.2 เซนเซอร์รูปแบบของแข็ง	46
4.4.2.1 เซนเซอร์เซลลูโลสผสมโรดามีน 2	46
(1) ผ้าฝ้ายทอขัด	46
(2) กระดาษเซลลูโลสอัด	48
(3) แบคทีเรียเซลลูโลส	50
4.4.2.2 เซนเซอร์ซอยโปรตีนไอโซเลทผสมโรดามีนบี 3	51
4.5 ทดสอบความจำเพาะในการตรวจจับสารโลหะรบกวนอื่นๆ	53
4.5.1 เซนเซอร์รูปแบบสารละลาย	53
4.5.1.1 ผลการดูดกลื่นแสงของสาร	53
4.5.1.2 ผลการเรื่องแสงของสาร	55
4.5.2 เซนเซอร์รูปแบบของแข็ง	56
4.5.2.1 เซนเซอร์แบคทีเรียเซลลูโลสผสมโรดามีน 2	56
4.5.2.2 เซนเซอร์ซอยโปรตีนไอโซเลทผสมโรดามีนบี 3	57
4.6 ทดสอบการยึดติดของเซนเซอร์กับวัสดุรองรับ	60
4.7 ลักษณะสัณฐานวิทยา	60
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	63
5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย	63
5.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัย	65
รายการอ้างอิง	66
ประวัติผู้เขียน	70

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 แสดงผลการวัดค่าสีของผ้าฝ้ายทอขัดเคลือบสารโรดามีน 2 ที่แช่ลงในสารละลาย Cu ²	+
เข้มข้น 10 ⁻⁵ -10 ⁻² โมลาร์	47
4.2 แสดงผลการวัดค่าสีของกระดาษเซลลูโลสอัดเคลือบสารโรดามีน 2 ที่แช่ลงในสาร	
ละลาย Cu ²⁺ เข้มข้น 10⁻⁵-10⁻² โมลาร์	48
4.3 แสดงผลการวัดค่าสีของแบคทีเรียเซลลูโลสผสมสารโรดามีน 2 ที่แช่ลงในสารละลาย	
Cu ²⁺ เข้มข้น 10 ⁻⁵ -10 ⁻² โมลาร์	50
4.4 แสดงผลการวัดค่าสีของซอยโปรตีนไอโซเลทเคลือบสารโรดามีน 3 ที่แช่ลงในสาร	
ละลาย Cu ²⁺ เข้มข้น 5x10⁻⁵-1.5x10⁻³	52
4.5 แสดงผลการวัดค่าสีขอแบคทีเรียเซลลูโลสผสมสารโรดามีน 2 ที่แช่ลงในสารละลาย	
โลหะไอออนดังนี้ Ba ²⁺ , Cd ²⁺ , Co ²⁺ , Cr ²⁺ , Cu ²⁺ , Hg ²⁺ , Mg ²⁺ , Mn ²⁺ , Pb ²⁺ , Sn ²⁺ , Sr ²⁺ และ	
Zn ²⁺ ที่ความเข้มข้น 10 ⁻² โมลาร์	56
4.6 แสดงผลการวัดค่าสีของซอยโปรตีนไอโซเลทผสมสารโรดามีน 3 ที่แช่ลงในสารละลาย	
โลหะไอออนดังนี้ Cd ²⁺ , Co ²⁺ , Cu ²⁺ และ Hg ²⁺ ที่ความเข้มข้น 10 ⁻² โมลาร์	58

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของโรดามีน บี	7
2.2 การเหนี่ยวนำของไอออนโลหะหนักที่ทำให้เกิดกลไกการเปิดปิดวงแหวนในอนุพันธ์	
ของโรดามีน	8
2.3 เซนเซอร์ 1	9
2.4 เซนเซอร์ 2	9
2.5 เซนเซอร์ 3	10
2.6 เซนเซอร์ 4	10
2.7 เซนเซอร์ 5	11
2.8 เซนเซอร์ 6	11
2.9 เซนเซอร์ 7	12
2.10 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาและการยึดเกาะของเซนเซอร์จากอนุพันธ์โรดามีนกับ	
เส้นใยนาโน	13
2.11 ปฏิกิริยาเชื่อมขวางระหว่างสารหน่วงไฟกับเส้นใยเซลลูโลสด้วยกรดซิตริก	14
2.12 ปฏิกิริยาเชื่อมขวางระหว่างสารกลีเซอรอลกับสตาร์ซ (starch) ด้วยกรดซิตริก	15
2.13 โครงสร้างของเซลลูโลส	16
2.14 การเกิดปฏิกิริยาระหว่างเซนเซอร์ตรวจวัดไซยาไนด์ไอออนกับเซลลูโลส	17
2.15 โครงสร้างกระดาษเคลือบ Ti $_6 O_{11}$ และสาร N-(3-(trimethoxysilyl) propyl)	
ethylenediamine	18
3.1 การสังเคราะห์โรดามีน บี ไฮดราซีน (rhodamine B-hydrazine) หรือโรดามีน 1	22
3.2 การสังเคราะห์ 2, 5 ไดไฮดรอกซีเบนซาลดีไฮด์ โรดามีน บี ไฮดราโซน หรือโรดามีน 2	22
3.3 การสังเคราะห์ซาลิไซลัลดีไฮด์ โรดามีน บี ไฮดราโซน หรือ โรดามีน 3	23
4.1 แนวโน้มสภาพแวดล้อมของโปรตอนที่ตำแหน่งสัญญาณที่ค่าเคมิคัลชิฟต์ต่างๆ	30
4.2 ผล ¹ H-NMR ของโรดามีน 1 ในสารละลายคลอโรฟอร์ม	31
4.3 ผล ¹ H-NMR ของโรดามีน 2 ในสารละลายคลอโรฟอร์ม	32
4.4 ผล ¹ H-NMR ของโรดามีน 3 ในสารละลายคลอโรฟอร์ม	33
4.5 ผล ¹³ C-NMR ของโรดามีน 1 ในสารละลายคลอโรฟอร์ม	35
4.6 ผล ¹³ C-NMR ของโรดามีน 2 ในสารละลายคลอโรฟอร์ม	36

4.7 แสดงรูปถ่ายสารละลายโรดามีน 2 เข้มข้น 10⁻⁵ โมลาร์ ที่ค่า pH 1-14	37
4.8 แสดงรูปถ่ายสารละลายโรดามีน 2 เข้มข้น 10 ⁻⁵ โมลาร์ ผสมกับสารละลายคอปเปอร์	
(II)คลอไรด์เข้มข้น 10 ⁻⁵ โมลาร์ ที่ค่า pH 1-14	38
4.9 แสดงผลการดูดกลืนแสงของโรดามีน 2 ผสมกับสารละลายคอปเปอร์ที่เศษส่วนโมล	
ต่างๆ	39
4.10 แสดงรูปถ่าย สารละลายโรดามีน 2 ผสมกับสารละลายคอปเปอร์เข้มข้นสุทธิที่ 10 ⁻⁴	
โมลาร์ โดยมีสัดส่วนโดยโมลที่ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 และ 1.0 ตามลำดับ	40
4.11 แสดงผลการดูดกลืนแสงที่ช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตรของสารละลาย	
โรดามีน 2 ที่ความเข้มข้น 10 ⁻⁴ โมลาร์ ผสมสารละลายคอปเปอร์เข้มข้น 0- 200 ไมโครโมลาร์	40
4.12 แสดงผลการดูดกลืนแสงที่ช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตรของสารละลาย	
โรดามีน 2 ที่ความเข้มข้น 10 ⁻⁴ โมลาร์ ผสมสารละลายคอปเปอร์เข้มข้น 4-128 ไมโครโมลาร์	41
4.13 แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นของความเข้มในการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 545	
นาโนเมตรของสารละลายโรดามีน 2 และสารละลายคอปเปอร์ที่ความเข้มข้น 4-128 ไมโคร-	
โมลาร์ ตามลำดับ	43
4.14 ภาพถ่ายสารละลายโรดามีน 2 เข้มข้น 10⁻⁴ โมลาร์ ผสมสารละลายคอปเปอร์เข้มข้น	
4-128 ไมโครโมลาร์	43
4.15 แสดงผลการเรื่องแสงที่ช่วงความยาวคลื่น 530-700 นาโนเมตรของสารละลาย	
โรดามีน 2 ที่ความเข้มข้น 10 ⁻⁴ โมลาร์ ผสมสารละลายคอปเปอร์ที่ความเข้มข้น 0-250	
ไมโครโมลาร์ ตามลำดับ	45
4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของคอปเปอร์ที่ผสมกับสารละลาย	
โรดามีนกับความเข้มของการเรื่องแสงของโรดามีน 2	45
4.17 แสดงภาพชิ้นตัวอย่างของเซนเซอร์ผ้าฝ้ายทอขัดผสมโรดามีน 2 ที่ผ่านการจุ่มสาร	
ละลายคอปเปอร์เข้มข้น 0, 10⁻⁵, 5×10⁻⁵, 10⁻⁴, 5×10⁻⁴, 10⁻³, 5×10⁻³ และ 10⁻² โมลาร์	48
4.18 แสดงภาพชิ้นตัวอย่างของเซนเซอร์กระดาษเซลลูโลสอัดผสมโรดามีน 2 ที่ผ่านการจุ่ม	
สารละลายคอปเปอร์เข้มข้น 0, 10 ⁻⁵ , 5×10 ⁻⁵ , 10 ⁻⁴ , 5×10 ⁻⁴ , 10 ⁻³ , 5×10 ⁻³ และ 10 ⁻² โมลาร์	49
4.19 แสดงภาพชิ้นตัวอย่างของเซนเซอร์แบคทีเรียเซลลูโลสผสมโรดามีน 2 ที่ผ่านการจุ่ม	
สารละลายคอปเปอร์เข้มข้น 0, 10⁻⁵, 5×10⁻⁵, 10⁻⁴, 5×10⁻⁴, 10⁻³, 5×10⁻³ และ 10⁻² โมลาร์	51
4.20 แสดงภาพชิ้นตัวอย่างของเซนเซอร์โรดามีน 3 ผสมในซอยโปรตีนไอโซเลท ที่ผ่านการ	
จุ่มสารละลายคอปเปอร์เข้มข้น 5×10 ⁻⁵ , 10 ⁻⁴ , 5×10 ⁻⁴ , 10 ⁻³ และ 1.5×10 ⁻³ โมลาร์	53

(10)

4.21 แสดงผลการการดูดกลืนแสงที่ช่วง 400-700 นาโนเมตรของสารละลายโรดามีน 2	
เข้มข้น 10 ⁻⁴ โมลาร์ กับไอออนโลหะชนิด Ba ²⁺ , Cd ²⁺ , Co ²⁺ , Cr ²⁺ , Cu ²⁺ , Hg ²⁺ , Mg ²⁺ , Mn ²⁺ ,	
Pb ²⁺ , Sn ²⁺ , Sr ²⁺ และ Zn ²⁺ ทีความเข้มข้น 10 ⁻⁴ โมลาร์	54
4.22 แสดงผลการการเรื่องแสงที่ช่วง 530-700 นาโนเมตรของสารละลายโรดามีน 2	
เข้มข้น 10 ⁻⁴ โมลาร์ กับไอออนโลหะชนิด Ba ²⁺ , Cd ²⁺ , Co ²⁺ , Cr ²⁺ , Cu ²⁺ , Hg ²⁺ , Mg ²⁺ , Mn ²⁺ ,	
Pb ²⁺ , Sn ²⁺ , Sr ²⁺ และ Zn ²⁺ ทีความเข้มข้น 10 ⁻⁴ โมลาร์	55
4.23 แสดงภาพชิ้นตัวอย่างของเซนเซอร์แบคทีเรียเซลลูโลสผสมโรดามีน 2 ที่ผ่านการจุ่ม	
สารละลายไอออนของโลหะอย่าง Ba ²⁺ , Cd ²⁺ , Co ²⁺ , Cr ²⁺ , Cu ²⁺ , Hg ²⁺ , Mg ²⁺ , Mn ²⁺ , Pb ²⁺ ,	
Sn ²⁺ , Sr ²⁺ และ Zn ²⁺ เข้มข้น 10 ⁻⁴ โมลาร์ ตามลำดับ	57
4.24 แสดงภาพชิ้นตัวอย่างของเซนเซอร์โรดามีน 3 ผสมในซอยโปรตีนไอโซเลท ที่แช่	
สารละลายโลหะไอออน Cd ²⁺ , Co ²⁺ , Cu ²⁺ และ Hg ²⁺ ที่ความเข้มข้น 10⁻² โมลาร์	59
4.25 แสดงผลการดูดกลืนแสงที่ช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตรของสารละลาย	
คอปเปอร์ไอออนเข้มข้น 10 ⁻² โมลาร์ ที่ผ่านการแช่ผ้าฝ้ายทอขัด กระดาษเซลลูโลสอัด และ	
แบคทีเรียเซลลูโลสเป็นเวลา 5 นาที	59
4.26 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของผ้าฝ้ายทอขัดที่กำลังขยาย 600 เท่า (ซ้าย) ก่อนผสม	
สารโรดามีน 2, (ขวา) หลังผสมสารโรดามีน 2	60
4.27 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของกระดาษเซลลูโลสอัดที่กำลังขยาย 600 เท่า (ซ้าย)	
ก่อนผสมสารโรดามีน 2, (ขวา) หลังผสมสารโรดามีน 2	61
4.28 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของแบคทีเรียเซลูลโสที่กำลังขยาย 30000 เท่า (ซ้าย)	
ก่อนผสมสารโรดามีน 2, (ขวา) หลังผสมสารโรดามีน 2	62

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

คอปเปอร์ถือได้ว่าเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับทั้งสัตว์และพืช เพราะมีส่วนร่วมในกระบวนการ ทางสรีรวิทยาต่างๆ (1) เช่น การสังเคราะห์ยิโมโกลบิน การพัฒนากระดูก การหายใจของเซลล์และ การควบคุมการทำงานของเส้นประสาท (2) โดยปริมาณจะต้องอยู่ในขอบเขตที่จำกัด ตามหลักฐาน การวิจัย ถ้าร่างกายของมนุษย์ขาดคอปเปอร์จะทำให้เกิดโรคโลหิตจางและมีอันตรายต่อภาวะหลอด เลือด แต่ถ้าระดับของคอปเปอร์สูงเกินไปจะทำให้เกิดการรบกวนระบบทางเดินอาหาร สามารถสร้าง ความเสียหายต่อตับและไตได้ โดยในโรควิลสัน โรคอัลไซเมอร์และพาร์กินสัน จะพบว่ามีความ เกี่ยวข้องกับการสะสมของปริมาณคอปเปอร์ที่มากเกินไป (3) โดยคอปเปอร์เป็นหนึ่งในโลหะหนักที่ มักถูกนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมอย่างหลากหลาย เช่นการผลิตสารกันบูด สีย้อมผ้า ฟอกเครื่องหนัง น้ำยาเคลือบไม้ รวมไปถึงการใช้ในด้านเกษตรกรรมอย่าง การผสมในอาหารสัตว์ เป็นปุ๋ยเพื่อปรับปรุง ดินหรือรักษาโรคในพืช และเป็นส่วนผสมในยาฆ่าแมลง ด้วยเหตุนี้ทำให้คอปเปอร์เป็นสารโลหะหนักที่ ปะปนอยู่ในสิ่งแวดล้อมรอบตัวสิ่งมีชีวิต (4) ดังนั้นการตรวจวัดคอปเปอร์ในอาหาร อุตสาหกรรมและ ตัวอย่างจากสิ่งแวดล้อมจึงมีความสำคัญ

เทคนิคทางสเปกโตรสโกปีเป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมสำหรับการตรวจวัดโลหะหนัก เพราะสามารถตรวจวิเคราะห์ได้อย่างถูกต้องและมีความแม่นยำสูง แต่เทคนิคเหล่านี้มีข้อจำกัดคือ เครื่องมือมีราคาสูง ต้องอาศัยความชำนาญของผู้วิเคราะห์ และที่สำคัญไม่สามารถนำไปวิเคราะห์ใน ภาคสนามได้ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาเทคนิคสำหรับใช้ตรวจวัดไอออนที่เรียกว่าเซนเซอร์ทางเคมี (chemosensor) โดยเป็นการอาศัยการเปลี่ยนแปลงสีของเซนเซอร์ในสารละลาย การนำเซนเซอร์ ทางเคมีมาพัฒนาเพื่อใช้ตรวจวัดโลหะหนักอย่างคอปเปอร์นั้นเป็นเทคนิคที่น่าสนใจ เนื่องจากมีข้อดี หลายประการ เช่น ความเรียบง่าย (simplicity) ตอบสนองรวดเร็ว (fast response) มีความไวสูง (sensitivity) และการเลือกที่ดี (selectivity) ในการกระบวนการตรวจวัดนั้นใช้สารตัวอย่างเพียง เล็กน้อยก็สามารถวัดผลออกมาได้อย่างรวดเร็วและสามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงเบื้องต้นได้ ด้วยตาเปล่าโดยไม่ต้องอาศัยเครื่องมือตรวจวัดหรือวิเคราะห์ ทำให้ช่วยลดค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องกับการ วัดและการดำเนินงานการตรวจสอบได้ (5, 6) แต่อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์เชิงปริมาณอาจจะระบุ ได้เพียงความเข้มข้นขั้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้ การสังเกตเปลี่ยนแปลงสีด้วยตาเปล่านั้นยากที่จะ บอกความเข้มข้นที่แท้จริงในสารตัวอย่างได้เพราะความเข้มสีของสารละลายอาจแตกต่างกันแค่ เล็กน้อยจนไม่สามารถแยกแต่ละความเข้มข้นได้ แต่เราสามารถตรวจวัดได้โดยใช้ เทคนิคอื่นๆร่วมด้วย เช่น เทคนิคยูวี-วิสิเบิล (UV-Vis spectrometry) และเทคนิคฟลูออเรสเซนส์ เป็นต้น (7) การ ออกแบบของเซนเซอร์เปลี่ยนแสงทางเคมีจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างโมเลกุลของเซนเซอร์ โดยต้องมี ความจำเพาะต่อไอออนที่ต้องการจะตรวจวัด โดยการเปลี่ยนสีเป็นผลมาจากการเกิดอันตรกิริยา ภายในโมเลกุล จะสามารถเปลี่ยนสีได้ก็ต่อเมื่อมีตัวกระตุ้นที่จำเพาะอย่างไอออนของโลหะหนัก การ พัฒนาจึงต้องปรับเปลี่ยนที่โครงสร้างของโมเลกุลเซนเซอร์ จากการค้นคว้าพบว่าโรดามีน (rhodamine) เป็นที่ได้รับความนิยมและมีคุณสมบัติเหมาะแก่การนำมาสังเคราะห์เป็นเซนเซอร์ สำหรับตรวจวัดไอออนของคอปเปอร์ (8) แต่เนื่องด้วยเซนเซอร์หรือโมเลกุลวิเคราะห์ดังกล่าว ส่วน ใหญ่จะผลิตออกมาให้ใช้ในรูปแบบที่ใช้งานในสารละลาย การเลือกพัฒนาเซนเซอร์เปลี่ยนแสงทางเคมี ให้ออกมาในรูปแบบของแข็งอย่างการเคลือบลงบนพื้นผิวหรือผสมลงในเส้นใยเซลลูโลสหรือฟิล์มของ พอลิเมอร์จึงมีความน่าสนใจ โดยการออกแบบเซนเซอร์เปลี่ยนแสงทางเคมีให้อยู่ในรูปแบบของแข็งจะ สะดวกต่อการพกพาและการใช้งานสามารถนำไปใช้ตรวจสอบในสถานที่จริงง่ายขึ้น สามารถตรวจ วิเคราะห์เบื้องต้นได้ด้วยตาเปล่า รวมไปถึงการประยุกต์ใช้ให้เข้ากับความต้องการในหลายๆด้านได้ มากขึ้น ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อไป (7)

ในงานวิจัยนี้จะเลือกสังเคราะห์อนุพันธ์ของโรดามีนเป็นเซนเซอร์เปลี่ยนแสงทางเคมีที่ สามารถปรับใช้ได้กับวัสดุได้หลากหลาย เช่น เซลลูโลสในรูปแบบต่าง และโปรตีน เพื่อให้เป็นเซนเซอร์ ของแข็งจะได้เหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้งาน โดยใช้วิธีสังเคราะห์ที่เรียบง่ายแล้วผสมลงบนวัสดุ

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อสังเคราะห์อนุพันธ์โรดามีนเป็นตัวตรวจวัดคอปเปอร์ไอออนในสารละลาย
1.2.2 พัฒนาเส้นใยเซลลูโลสและซอยโปรตีนไอโซเลทผสมอนุพันธ์โรดามีนเพื่อ
ตรวจสอบคอปเปอร์ไอออนในสารละลาย

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 สังเคราะห์โครงสร้างอนุพันธ์โรดามีนให้เคลือบบนเส้นใยเซลลูโลสและซอยโปรตีน
ไอโซเลทเป็นเซนเซอร์ตรวจจับคอปเปอร์ไอออน

1.3.2 ศึกษาคุณสมบัติของเซนเซอร์ตรวจวัดคอปเปอร์ไอออนจากอนุพันธ์โรดามีนใน สารละลาย

1.3.3 ศึกษาคุณสมบัติของเซนเซอร์ตรวจวัดคอปเปอร์ไอออนจากอนุพันธ์โรดามีนที่ เคลือบบนเส้นใยเซลลูโลสและซอยโปรตีนไอโซเลท



บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทองแดง (copper)

ทองแดงหรือคอปเปอร์เป็นหนึ่งในธาตุที่จำเป็นสำหรับทั้งสัตว์และพืช เพราะมีส่วนร่วม ในกระบวนการทางสรีรวิทยาต่างๆ เช่นการสังเคราะห์ฮีโมโกลบิน การพัฒนากระดูก การหายใจของ เซลล์และการควบคุมการทำงานของเส้นประสาท โดยปริมาณที่ได้รับจะต้องอยู่ในขอบเขตที่จำกัด ถ้า ร่างกายขาดคอปเปอร์อาจส่งผลให้เกิดโรคโลหิตจางและอันตรายต่อภาวะหลอดเลือดได้ แต่ถ้าใน ร่างกายมีระดับคอปเปอร์ที่สูงเกินไปจะรบกวนระบบทางเดินอาหาร สามารถสร้างความเสียหายต่อ ตับและไตได้ โดยมีงานวิจัยว่าในโรควิลสัน โรคอัลไซเมอร์ และโรคพาร์กินสันนั้นมีความเกี่ยวข้องกับ การสะสมของปริมาณคอปเปอร์ที่มากเกินไป นอกจากจะส่งผลเสียหายต่อมนุษย์แล้วยังมีความเป็น พิษต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย เนื่องจากสามารถละลายน้ำได้ค่อนข้างดีจึงเกิดการปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำ โดยปลาสัตว์ทะเล และพืชในทะเลจะอ่อนไหวง่ายต่อความเป็นพิษของทองแดง

คอปเปอร์เป็นหนึ่งในโลหะหนักที่ถูกนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมอย่างหลากหลาย เช่น การนำมาใช้เป็นส่วนประกอบของการผลิตสารกันบูด สีย้อมผ้า ฟอกเครื่องหนัง น้ำยาเคลือบไม้ รวม ไปถึงการใช้ในด้านเกษตรกรรมอย่างการผสมในอาหารสัตว์ เป็นปุ๋ยเพื่อปรับปรุงดินหรือรักษาโรคใน พืช และเป็นส่วนผสมในยาฆ่าแมลง ด้วยเหตุนี้ทำให้คอปเปอร์เป็นสารโลหะหนักที่ปะปนอยู่ใน สิ่งแวดล้อมรอบตัวสิ่งมีชีวิตได้ง่าย

2.2 เซนเซอร์ทางเคมี (chemosensor)

เซนเซอร์ทางเคมีถูกพัฒนาขึ้นมาโดยใช้หลักการของเคมีซูปราโมเลคิวลาร์ (supramolecular chemistry) หรือการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลผ่านอันตรกิริยาแบบไม่สร้าง พันธะโควาเลนต์ (non-covalent) เช่น พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bonding) อันตรกิริยาแบบ ไฟฟ้าสถิต (eletrostatic interaction) อันตรกิริยาแคทไอออน-ไพ (cation- π interaction) และ อันตรกิริยาไพ-ไพ (π - π interaction) เป็นต้น ซึ่งแม้ว่าอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นแรงกระทำที่ แข็งแรงน้อยกว่าการสร้างพันธะโควาเลนต์มาก แต่เนื่องจากมีการยึดเกาะกันด้วยทิศทางและ ระยะทางที่แน่นอนทำให้โมเลกุลที่ได้มีความจำเพาะเจาะจงในการเลือกจับกับไอออนต่างๆ เช่นแคท ไอออน แอนไอออนรวมไปถึงคู่ไอออนอย่างสวิทเทอร์ไอออน (zwitterion) หรือแม้กระทั่งโมเลกุลของ สารประกอบอินทรีย์ โดยมีการแสดงผลเป็นสัญญาณที่สามารถอ่านวิเคราะห์ได้ทั้งอาศัยและไม่อาศัย เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ โดยสามารถใช้ได้ทั้งในการวิเคราะห์แบบเชิงปริมาณ (quantitative) และ เชิงคุณภาพ (qualitative) (9)

2.2.1 หลักการของเซนเซอร์ทางเคมี

เซนเซอร์ทางเคมือาศัยหลักของการเปลี่ยนแปลงทางเคมีระหว่างโมเลกุลซึ่งอาจเกิดผ่าน กลไกการเคลื่อนย้ายประจุระหว่างโมเลกุลหรือการเกิดโคออดิเนชันเป็นต้น เซนเซอร์ทางเคมี ประกอบด้วยส่วนพื้นฐานที่สำคัญ 2 ส่วนคือ ส่วนจับโมเลกุล (binding site) หรือโมเลกุลของ เซนเซอร์ส่วนที่เลือกจับกับสารที่สนใจหรือเกสต์ (guest) ซึ่งส่วนนี้จะต้องมีความจำเพาะสูงกับสารที่ สนใจเท่านั้น โดยจะไมเกิดปฏิกิริยากับไอออนแขงขันอื่นๆ หรือไม่แสดงผลที่จะรบกวนการวิเคราะห์ คือมีการเลือกที่ดี (selectivity) นั่นเอง และอีกส่วนหนึ่งคือส่วนแสดงสัญญาณ (signaling unit) โดย จะทำหน้าที่แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่จะสามารถตรวจวัดได้ อย่างเช่นการ เปลี่ยนสีของสารเป็นต้น

หลักการทำงานของโมเลกุลตรวจจับหรือตัวรับ (receptor) ที่ทำหน้าที่เป็นโฮสต์ และ ไอออนซึ่งเป็นเกสต์นั้น จะมีหลักการการทำงานคล้ายกับหลักการของแม่กุญแจและลูกกุญแจ (rock and key principle) คือ โมเลกุลที่เป็นโฮสต์จะต้องมีความจำเพาะเจาะจง (specific) ในการเลือกจับ กับเกสต์ตัวใดตัวหนึ่งชนิดเดียวเท่านั้น ด้วยเหตุนี้จึงเรียกได้ว่าเป็นการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุล โฮสต์-เกสต์ (host-guest chemistry)

2.2.2 ชนิดของเซนเซอร์ทางเคมี

เซนเซอร์ทางเคมีสามารถแบ่งออกตามชนิดของสัญญาณที่แสดงออกมาได้เป็น 2 ชนิด

2.2.2.1 เซนเซอร์ทางไฟฟ้า (electronic sensor)

เซนเซอร์ทางไฟฟ้าเป็นการแสดงสัญญาณการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบของ สมบัติทางเคมีไฟฟ้าโดยมักจะอาศัยการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ ซึ่งเซนเซอร์สามารถแบ่งออกเป็น 5 ประเภทดังนี้

- (1) ขั้วไฟฟ้าเลือกจับไอออนจำเพาะ (ion-selective electrodes, ISEs)
- (2) ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า (field effect transistor, FETs)
- (3) เซนเซอร์ตอบสนองทางไฟฟ้า (electroactive sensor)
- (4) ไบโอเซนเซอร (biosensor)
- (5) ไมโครอิเล็กโทรด (microelectrode)

โดยเซนเซอร์ไฟฟ้ามักประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ตัวตรวจวัดทางศักย์ไฟฟ้า (voltammetric sensor) เป็นต้น

2.2.2.2 เซนเซอร์ทางแสง (optical sensor)

เซนเซอร์ทางแสงเป็นการแสดงสัญญาณการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบสมบัติ ทางแสงของโมเลกุล อย่างการดูดกลืนหรือคายแสงที่ช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน โดยเซนเซอร์ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

(1) เซนเซอร์ที่อาศัยการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลาย(chromogenic/colorimetric sensor)

(2) เซนเซอร์ที่อาศัยการเรืองแสง (fluorogenic sensor)

ซึ่งเซนเซอร์ทางเคมีทั้งสองชนิดนี้มีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันทั้งในด้านการ ออกแบบโมเลกุล ในส่วนความจำเพาะและส่วนแสดงสัญญาณสภาพไว ความรวดเร็ว ความสามารถใน การละลาย และการรบกวนจากไอออนแข่งขัน (competing ions) เป็นต้น (10, 11)

2.2.3 การออกแบบเซนเซอร์ทางเคมี

การออกแบบและสังเคราะห์เซนเซอร์ทางเคมีจะต้องประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันที่มี ความจำเพาะกับสารที่ต้องการตรวจจับอย่างน้อยหนึ่งหมู่หรือมากกว่าและหมู่ฟังก์ชันที่ทำหน้าที่ เปลี่ยนแปลงสัญญาณทางแสง โดยสามารถเกิดขึ้นได้สองลักษณะตามการเลื่อนของสเปกตรัม การ ดูดกลืนแสงสูงสุดเพิ่มขึ้น (red-shift) และลดลง (blue-shift) เซนเซอร์ทางเคมีที่มีสภาพไวสูงสามารถ ตรวจวัดสารได้ถึงระดับมิลลิกรัมต่อลิตรหรือน้อยกว่าและสามารถพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้ในการ วิเคราะห์ใอออนในตัวอย่างทางสิ่งแวดล้อมได้

ในการออกแบบเซนเซอร์ทางเคมีให้มีหมู่ฟังก์ชันที่มีความจำเพาะกับสารที่ต้องการ ตรวจจับนั้นจะต้องให้ตัวเซนเซอร์หรือโฮสต์มีความจำเพาะเจาะจงกับสารที่สนใจหรือเกสต์นั้นๆ ซึ่ง เกสต์แต่ละชนิดจะมีข้อควรคำนึงถึงที่แตกต่างกัน โดยจะต้องพิจารณาถึงความเหมาะสมทั้งในด้าน โครงสร้างและด้านอิเล็กทรอนิก (electronic) ของโมเลกุลโฮสต์กับโมเลกุลเกสต์ หลักๆแล้ว องค์ประกอบสำคัญที่มีผลต่อการจับกันของโมเลกุลทั้งสอง คือขนาดและรูปร่างของเกสต์ ขนาด ช่องว่างของโฮสต์ ทิศทางของโมเลกุลโฮสต์ในการจัดเรียงตัวเมื่อจับกับเกสต์แล้วควรมีการ เปลี่ยนแปลงโครงสร้างน้อยที่สุด อะตอมที่ทำหน้าที่ในการเกิดอันตรกิริยา และอิทธิพลของตัวทำ ละลาย การออกแบบโมเลกุลโฮสต์นั้นมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากจะต้องจับกับโมเลกุล เกสต์ที่เป็น แคทไอออน (cation) แอนไอออน (anion) หรือโมเลกุลที่เป็นกลาง (neutral) ได้อย่าง จำเพาะเจาะจง โดยแบ่งการออกแบบโมเลกุลโฮสต์ตามรูปแบบของโมเลกุลเกสต์ได้ 3 แบบดังนี้

2.2.3.1โมเลกุลโฮสต์สำหรับแคทไออน

โมเลกุลโฮสต์สำหรับจับกับแคทไอออนนั้นจะต้องมีส่วนประกอบของอะตอม ที่ให้อิเล็กตรอน (donor atom) อาทิเช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน หรือ หมู่ที่มีประจุลบ

2.2.3.2 โมเลกุลโฮสต์สำหรับแอนไอออน

ในการออกแบบโมเลกุลโฮสต์สำหรับจับกับแอนไอออนนั้นมีความซับซ้อน มากกว่าแคทไอออน เนื่องมาจากแอนไอออนมีขนาดใหญ่กว่าแคทไอออน รูปร่างของแอนไอออนมีได้ หลายรูปแบบ เช่น ทรงกลม (spherical) เส้นตรง (linear) ทรงสี่หน้า (tetrahedral) เป็นต้น ดังนั้น โมเลกุลโฮสต์ที่จับกับแอนไอออนจึงต้องมีรูปร่างสอดคล้องกับแอนไอออนเพื่อให้สามารถจับกันได้ อย่างเหมาะสม และโมเลกุลโฮสต์ที่ใช้ต้องเป็นโมเลกุลที่มีส่วนที่สามารถเกิดอันตรกิริยากับแอนไอออน ได้ซึ่งอาจจะเป็นอันตรกิริยาแบบพันธะไฮโดรเจน โคออร์ดิเนชันด้วยไอออน แรงประจุไฟฟ้าหรือแรง ไฮโดรโฟบิก เป็นต้น

2.2.3.3 โมเลกุลโฮสต์สำหรับคู่ไอออน และสวิทเทอร์ไอออน

โมเลกุลโฮสต์สำหรับคู่ไอออน และสวิทเทอร์ไอออนพัฒนามาจากการ ออกแบบโมเลกุลโฮสต์ให้สามารถจับได้ทั้งแคทไอออนและแอนไอออนพร้อมกัน โดยมีทั้งหน่วยรับ แคทไอออน และหน่วยรับแอนไอออนเชื่อมต่อกันเป็นโมเลกุลเดียว ซึ่งการจับเป็นการจับแบบไม่สร้าง พันธะโคเวเลนท์ และเป็นการจับแบบคู่ไอออนซึ่งแข็งแรงมากกว่า การแยกจับกับไอออนเพียงโมเลกุล ใดโมเลกุลหนึ่ง (12, 13)

2.3 โรดามีน บี (Rhodamine B)



ภาพที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของโรดามีน บี

โรดามีน บี มีสูตรทางเคมีคือ C₂₈H₃₁N₂O₃ (ภาพที่ 2.1) สามารถละลายได้ดีใน แอลกอฮอล์และให้สีสะท้อนแดงอมน้ำเงิน โดยส่วนใหญ่มักถูกนำไปใช้ในการย้อมผ้าไหม ใช้ย้อมสีทาง จุลชีววิทยา รวมไปถึงเป็นสารที่ใช้ในการวิเคราะห์หาโลหะหนัก

จากการศึกษาของ Kim et al. (2008) พบว่าโรดามีนถูกนำไปสังเคราะห์ร่วมกันกับ ไฮดราซีนและสารอื่นๆเพื่อให้ได้เป็นอนุพันธ์ที่หลากหลายสำหรับใช้เป็นเซนเซอร์ตรวจจับโลหะหนัก ต่างๆ อย่างปรอท และคอปเปอร์ ซึ่งอนุพันธ์ที่สังเคราะห์ได้นั้นมีคุณสมบัติในการเป็นเซนเซอร์เปลี่ยน สีทางเคมีที่ดี โดยการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีลักษณะเหมือนเป็นการเปิดปิดสวิทซ์ (turn-on/off switches) จะมีการเปลี่ยนแปลงบริเวณวงแหวนสไปโรแลคตัม (spirolactam) ของโรดามีนใน ลักษณะเปิดปิดวงแหวน โดยเมื่อวงแหวนปิดจะไม่แสดงสี แต่เมื่อมีการจับกับโลหะหนักจะทำให้วง แหวนเปิดออกแล้วมีการเปลี่ยนแปลงของสีเป็นสีชมพูขึ้นมา ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2.2 แสดงการเหนี่ยวนำของไอออนโลหะหนัก ที่ทำให้เกิดกลไกการเปิดปิดวงแหวนในอนุพันธ์ ของโรดามีน

การเปลี่ยนสีนั้นเกิดจากการที่ตัวดักจับของอนุพันธ์โรดามีนนั้นสามารถจับไอออน โลหะหนักได้ โดยกระบวนการนี้เป็นการเกิดเชิงซ้อนกันโดยมีอันตรกิริยาแบบโคออดิเนต ซึ่งในขณะที่ เกิดการจับกันของอนุพันธ์โรดามีนกับไอออนโลหะหนักจะทำให้โครงสร้างของอนุพันธ์โรดามีนเกิดการ เปลี่ยนแปลง คือ ในสารละลายที่ไม่มีไอออนโลหะหนักนั้นอนุพันธ์โรดามีนจะมีการปิดวงสไปโร แลคตัมทำให้ระบบคอนจูเกชั่น (conjugation system) ในโครงสร้างนั้นยังสั้นและไม่ต่อเนื่องเพียงพอ ต่อการช่วยดูดกลืนแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ แต่เมื่อในสารละลายมีไอออนโลหะหนัก จะทำให้เกิด อันตรกิริยากับอนุพันธ์โรดามีน ทำให้เกิดการเปิดวงของสไปโรแลคตัม และเหนี่ยวนำให้อิเล็กตรอนใน โครงสร้างเคลื่อนที่เข้าสู่ระบบคอนจูเกชั่น จึงทำให้ระบบคอนจูเกชั่นในโครงสร้างยาวขึ้นและต่อเนื่อง เพียงพอต่อการช่วยดูดกลืนแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ และเมื่อนำไอออนโลหะหนักออกจากโครงสร้าง ของอนุพันธ์โรดามีนระบบคอนจูเกชั่นก็จะกลับสู่รูปแบบเดิม และการดูดกลืนแสงก็จะกลับสู่รูปแบบ ก่อนจับกับไอออนโลหะหนัก (8)

อนุพันธ์ของโรดามีนสามารถแบ่งออกตามลักษณะและองค์ประกอบของหมู่ฟังก์ชั่น บริเวณที่เป็นตัวจับโมเลกุลเกสต์ได้ดังตัวอย่างงานวิจัยต่อไปนี้

2.3.1 ตัวจับโมเลกุลเกสต์แบบซัลเฟอร์ (Sulfur, S)



ภาพที่ 2.3 แสดงเซนเซอร์ 1

Yang et al. (2016) ได้ทดลองสังเคราะห์เซนเซอร์ 1 จากสารโรดามีนบีกับหมู่ไทโอฟีน (thiophene group) เป็นเซนเซอร์ตรวจวัดคอปเปอร์ไอออน จากผลการวิจัยพบว่าเซนเซอร์ที่ได้มี ความจำเพาะที่ดีต่อคอปเปอร์ไอออนในสารละลายผสมระหว่างน้ำกับเอทานอล โดยแสดงการดูดกลืน แสงที่ 561นาโนเมตร และจะมีความเข้ม (intensity) สูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นมากขึ้นซึ่งตาเปล่าจะเห็น เป็นสีชมพู (5)



ภาพที่ 2.4 แสดงเซนเซอร์ 2

Zhao et al. (2009) ได้ทดลองสังเคราะห์เซนเซอร์ 2 จากสารโรดามีนบีกับ โพแทสเซียมไทโอไซยาเนต (Potassium thiocyanate, KSCN) เป็นเซนเซอร์ตรวจวัดคอปเปอร์ ไอออน จากผลการวิจัยพบว่าเซนเซอร์ที่ได้มีความจำเพาะที่ดีต่อคอปเปอร์ไอออนในสารละลายผสม ระหว่างน้ำกับเมทิลแอลกอฮอล์ในอัตราส่วน 3:7 ที่ pH 7 โดยแสดงการดูดกลืนแสงที่ 565 นาโน เมตร และจะมีความเข้มสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นมากขึ้นซึ่งตาเปล่าจะเห็นเป็นสีชมพู (14)

2.3.2 ตัวจับโมเลกุลเกสต์แบบไนโตรเจน (Nitrogen, N)



ภาพที่ 2.5 แสดงเซนเซอร์ 3

Huo *et al.* (2013) ได้ทดลองสังเคราะห์เซนเซอร์ 3 จากสารโรดามีนบีกับพิโคลินาดี ไฮด์ (picolinaldehyde) เป็นเซนเซอร์ตรวจวัดคอปเปอร์ไอออน ผลการวิจัยพบว่าเซนเซอร์ที่ได้มี ความจำเพาะที่ดีต่อคอปเปอร์ไอออนในสารละลายคลอโรฟอร์มที่ pH 7 โดยแสดงการดูดกลืนแสงที่ 559 นาโนเมตร และมีความเข้มสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นมากขึ้น ซึ่งตาเปล่าจะเห็นเป็นสีชมพู (15)

2.3.3 ตัวจับโมเลกุลเกสต์แบบออกซิเจน (Oxygen, O)



ภาพที่ 2.6 แสดงเซนเซอร์ 4

Xiang *et al.* (2006) ได้ทดลองสังเคราะห์เซนเซอร์ 4 จากสารโรดามีนบีกับซาลิไซลาดี ไฮด์ (salicylaldehyde) เป็นเซนเซอร์ตรวจวัดคอปเปอร์ไอออน จากผลการวิจัยพบว่าเซนเซอร์ที่ได้มี ความจำเพาะที่ดีต่อคอปเปอร์ไอออนในสารละลายผสมระหว่างอะซิโตไนไตรล์กับน้ำ (CH₃CN/H₂O) ที่ pH 7 โดยแสดงการดูดกลืนแสงที่ 558 นาโนเมตร และจะมีความเข้มสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นมากขึ้น ซึ่งตาเปล่าจะเห็นเป็นสีชมพู (16)



Zhang et al. (2014) ทดลองสังเคราะห์เซนเซอร์ 5 จากสารโรดามีนบีกับ 3 โบรโม 5 เมทิลซาลิไซลัลดีไฮด์ (3-bromo-5-methylsalicylaldehyde) เป็นเซนเซอร์ตรวจวัดคอปเปอร์ ไอออน จากผลการวิจัยพบว่าเซนเซอร์ที่ได้มีความจำเพาะที่ดีต่อคอปเปอร์ไอออนในสารละลายผสม ระหว่างอะซิโตไนไตรล์กับน้ำ (CH₃CN/H₂O) โดยแสดงการดูดกลืนแสงที่ 552 นาโนเมตร และมีความ เข้มสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นมากขึ้นซึ่งตาเปล่าจะเห็นเป็นสีแดง (4)



ภาพที่ 2.8 แสดงเซนเซอร์ 6

Zhou *et al.* (2009) ได้ทดลองสังเคราะห์เซนเซอร์ 6 จากสารโรดามีนบีกับหมู่ไพริน (pyrene group) เป็นเซนเซอร์ตรวจวัดคอปเปอร์ไอออน จากผลการวิจัยพบว่าเซนเซอร์ที่ได้นั้นมี ความจำเพาะที่ดีต่อคอปเปอร์ไอออนในสารละลายผสมระหว่างอะซิโตไนไตรล์กับน้ำ (CH₃CN/H₂O) ที่ pH 7.4 โดยแสดงการดูดกลืนแสงที่ 557 นาโนเมตรและจะมีความเข้มสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นมาก ขึ้นซึ่งตาเปล่าจะเห็นเป็นสีชมพู (17)



ภาพที่ 2.9 แสดงเซนเซอร์ 7

Hu et al. (2016) ได้ทดลองสังเคราะห์เซนเซอร์ 7 จากสารโรดามีนบีกับ acetylacetone เป็นเซนเซอร์ตรวจวัดคอปเปอร์ไอออน จากผลการวิจัยพบว่าเซนเซอร์ที่ได้มี ความจำเพาะที่ดีต่อคอปเปอร์ไอออนในสารละลายผสมระหว่างเอทานอลกับน้ำในอัตราส่วน 9:1 ที่ pH 7 โดยแสดงการดูดกลืนแสงที่ 552 นาโนเมตรและจะมีความเข้มสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นมากขึ้นซึ่ง ตาเปล่าจะเห็นเป็นสีชมพู **(18)**

2.4 การเคลือบโมเลกุลเซนเซอร์กับวัสดุรองรับ

การจะทำให้เซนเซอร์เป็นของแข็งเพื่อให้สะดวกต่อการนำไปใช้นั้นควรทำโดยการยึด ติดโมเลกุลของเซนเซอร์เข้ากับบริเวณพื้นผิวของวัสดุรองรับที่เป็นของแข็ง ซึ่งวิธีการยึดติดสารลงบน พื้นผิวของวัสดุนั้นแบ่งออกเป็น 2 วิธีหลักๆตามแรงที่ใช้ในการยึดติด คือ

2.4.1 การยึดติดทางกายภาพ (physical embedding)

เป็นการใช้แรงทางกายภาพยึดโมเลกุลของเซนเซอร์ให้อยู่กับเส้นใย มักทำโดยการสร้าง ชั้นเคลือบของพอลิเมอร์หรือโครงสร้างสารอื่นกักเซนเซอร์ไว้บริเวณพื้นผิวของเส้นใยโดยไม่ได้มี ปฏิกิริยาทางเคมีเกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของเซนเซอร์กับเส้นใย เช่น กระบวนการโซลเจล (sol-gel) กระบวนการจุ่ม-อัด-ผนึกด้วยความร้อน (pad-dry-cure) การใช้สารยึดติด (Binder) เป็นต้น ซึ่งวิธีที่ กล่าวมาจะสามารถยึดติดเซนเซอร์ไว้ได้ในระยะหนึ่งหรือในบางการใช้งานก็ไม่สามารถยึดติดเส้นใยไว้ ได้ อย่างการใช้งานของเซนเซอร์ที่จะต้องใช้ควบคู่ไปกับสารละลายของตัวอย่างนั้นก็อาจจะไม่ เหมาะสม เนื่องด้วยเมื่อเซนเซอร์ถูกแช่ลงในสารละลายเพื่อเกิดปฏิกิริยากับไอออนของโลหะนั้น ตัวเซนเซอร์ที่อยู่บนพื้นผิวของแข็งก็อาจจะถูกสารละลายชะล้างด้วยแรงทางกลให้หลุดออกจากพื้นผิว ของวัสดุดังกล่าวได้ แต่อย่างไรก็ตาม ในการผสมเซนเซอร์ลงในเนื้อของวัสดุก็เป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่ ใช้เนื้อของวัสดุช่วยกักโมเลกุลของเซนเซอร์ไว้ได้ ดังตัวอย่างในงานวิจัยต่อไปนี้



ภาพที่ 2.10 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาและการยึดเกาะของเซนเซอร์จากอนุพันธ์โรดา มีนกับเส้นใยนาโน

จากงานวิจัย ของ Min *et al*. (2013) ได้ทดลองผสมสารโรดามีนลงในเส้นใยนาโน โดย ผสมสารโรดามีนลงในพอลิอีเทอร์ซัลโฟน ก่อนฉีดขึ้นรูปเป็นเส้นใยนาโนด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิ่ง ผลที่ได้คือเส้นใยนาโนของพอลิอีเทอร์ซันโฟนกับสารละลายโรดามีน สามารถตรวจวัดไอออนคอป เปอร์ในสารละลายได้โดยมีการเปลี่ยนสีจากสีค่อนข้างขาวไปเป็นสีชมพู (19) ดังภาพที่ 2.10

2.4.2 การดัดแปรพื้นผิวทางเคมี (chemical surface modification)

เป็นการใช้พันธะเคมีเป็นตัวยึดติดโมเลกุลของเซนเซอร์กับวัสดุรองรับ โดยเป็นการทำให้ เซนเซอร์เกิดพันธะทางเคมีกับวัสดุรองรับ อย่างการเกิดพันธะโควาเลนต์ที่แข็งแรง ซึ่งจะสามารถทำได้ โดยการออกแบบเซนเซอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชั่นที่สามารถเกิดพันธะโควาเลนต์กับวัสดุรองรับได้ ซึ่งอาจจะ ออกแบบให้เกิดโดยตรงกับวัสดุรองรับ หรือเกิดพันธะผ่านสารเชื่อมขวางแทน วิธีนี้จำเป็นต้องอาศัย ความเจาะจงของหมู่ฟังก์ชั่นแต่เมื่อสามารถยึดติดด้วยพันธะทางเคมีแล้วเซนเซอร์จะไม่หลุดออกหรือ เคลื่อนตัวจากวัสดุรองรับ(20) ทำให้สามารถนำไปตรวจวัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตัวอย่างการยึดติด โมเลกุลของสารด้วยพันธะทางเคมีจะเห็นได้จากงานวิจัยดังนี้



ภาพที่ 2.11 แสดงปฏิกิริยาเชื่อมขวางระหว่างสารหน่วงไฟกับเส้นใยเซลลูโลสด้วยกรดซิตริก

จากรูปที่ 2.11 Mohsin *et al.* (2013) ทำการทดลองยึดติดสารหน่วงไฟ (Pyrovatex CP) ลงบนพื้นผิวของผ้าฝ้ายโดยใช้กรดซิตริกเป็นสารเชื่อมขวาง ผลที่ได้คือกรดซิตริกสามารถช่วยเพิ่ม การยึดติดของสารหน่วงไฟกับเส้นใยเซลลูโลสได้ สามารถทนต่อการซักได้มากกว่า 10 ครั้ง หมู่ฟังก์ชั่น ที่สำคัญต่อการเกิดพันธะโควาเลนต์กับกรดซิตริกคือหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) โดยกรดซิตริกจะจับกับ หมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่บนโครงสร้างของเส้นใยเซลลูโลสและสารหน่วงไฟเป็นพันธะที่แข็งแรงและไม่ส่งผล ต่อประสิทธิภาพการหน่วงไฟของสารดังกล่าวบนเซลลูโลสด้วย และนอกจากนี้ยังมีข้อวิเคราะห์ว่า หมู่ไฮดรอกซิลของสารหน่วงไฟกับเส้นใยเซลลูโลสนั้นเกิดพันธะโดยตรงต่อกันบางส่วน โดยไม่ได้เกิด ผ่านโมเลกุลของกรดซิตริก (21)



ภาพที่ 2.12 แสดงปฏิกิริยาเชื่อมขวางระหว่างสารกลีเซอรอลกับสตาร์ซ (starch) ด้วยกรดซิตริก

Seligra *et al.* (2016) ทำการทดลองยึดติดสารกลีเซอรอลลงบนพื้นผิวของสตาร์ซโดย ใช้กรดซิตริกเป็นสารเชื่อมขวาง ผลที่ได้คือกรดซิตริกสามารถช่วยยึดติดสารกลีเซอรอลกับสตาร์ซได้ โดยหมู่ฟังก์ชั่นที่สำคัญต่อการเกิดพันธะโควาเลนต์กับกรดซิตริกคือหมู่ไฮดรอกซิล โดยกรดซิตริกจะ จับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่บนโครงสร้างของสตาร์ซและกลีเซอรอลเป็นพันธะที่แข็งแรงดังภาพที่ 2.12 (22)

2.5 วัสดุรองรับเซนเซอร์

ในการสร้างเซนเซอร์ของแข็งจำเป็นจะต้องมีวัสดุรองรับโมเลกุลของเซนเซอร์ เพื่อให้ เซนเซอร์คงตัวอยู่ได้มีที่ยึดติดไม่กระจายตัวออกเป็นบริเวณที่กว้างเกินไปจนส่งผลต่อการแสดงสีที่ เปลี่ยนแปลงไปหลังเกิดการจับกับไอออนโลหะหนัก วัสดุรองรับที่ดีควรจะมีสมบัติในการคงรูปที่ดี ทน ต่อน้ำและสารละลายได้ รวมถึงไม่ส่งผลหรือรบกวนการทำงานของเซนเซอร์ แต่ที่สำคัญที่สุดคือตัว วัสดุรองรับจำเป็นจะต้องมีหมู่ฟังก์ชั่นที่สามารถเกิดพันธะที่แข็งแรงกับเซนเซอร์หรือสารเชื่อมขวางได้ หรือมีโครงสร้างที่เอื้อต่อการยึดเกาะของเซนเซอร์

2.5.1 เซลลูโลส

เซลลูโลสเป็นเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของเซลล์พืช ประกอบ ไปด้วยหน่วยย่อยของน้ำตาลกลูโคสมาเชื่อมต่อกันเป็นสายยาว มีสูตรเคมีทั่วไปคือ (C₆H₁₀O₅)_n (ภาพ ที่ 2.13)



ภาพที่ 2.13 แสดงโครงสร้างของเซลลูโลส ที่มา: Lustri (2015) (23)

จากโครงสร้างจะเห็นว่าโมเลกุลของเซลลูโลสเป็นสายโซ่ยาวเกาะกันตามแนวราบ ระหว่างโมเลกุลและภายในโมเลกุลของเซลลูโลสมีการเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้ โครงสร้างมีความแข็งแรง มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลสูง ละลายในตัวทำลายได้ยากไม่ละลายในน้ำ หรือในด่าง แต่จะละลายในกรดเข้มข้น สามารถดูดความชื้นได้ดี โดยหมู่ไฮดรอกซิลที่กระจายอยู่ใน โมเลกุลจะยืดจับกับโมเลกุลของน้ำที่ผ่านเข้ามาในเส้นใยได้ดี และบริเวณหมู่ไฮดรอกซิลนี้เองที่เป็นที่ สามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้ เช่น เกิดปฏิกิริยากับสีย้อม สารตกแต่ง รวมไปถึงการยึดเกาะกับ เซนเซอร์ตรวจวัดด้วย (24)

เซลลูโลสมักจะผลิตได้จากไม้และฝ้าย โดยจะใช้กรดหรือด่างสกัดออกมาภายใต้อุณหภูมิ และความดันสูง โดยการผลิตจะคำนึงถึงจุดมุ่งหมายในการนำไปใช้ประโยชน์ เซลลูโลสและอนุพันธ์ถูก นำมาทำเป็นวัสดุของแข็งหลายอย่าง เช่น กระดาษ สิ่งทอ เป็นต้น ซึ่งผ้าฝ้ายเมื่อทอเป็นผ้าผืนแล้วจะ มีความแข็งแรง ทนทานต่อสารละลาย ดูดความชื้นได้ดี ผิวเรียบและมีสีขาว สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุ รองรับเซนเซอร์ได้ดี ซึ่งจะเห็นได้จากตัวอย่างงานวิจัยต่อไปนี้

Isaad et al (2011) ได้ทดลองสังเคราะห์เซนเซอร์ตรวจวัดไอออนลบของไซยาไนด์ที่อยู่ ในสารละลายให้ยึดติดกับพื้นผิวของเส้นใยเป็นเซนเซอร์ของแข็ง โดยสังเคราะห์เซนเซอร์ 2 ตัวให้มีหมู่ ฟังก์ชั่นที่แตกต่างกันเพื่อตรวจจับกับไซยาไนด์ไอออนลบและให้มีหมู่ฟังก์ชั่นที่สามารถเกิดพันธะทาง เคมีกับหมู่ไฮดรอกซิลบนเส้นใยเซลลูโลสจากธรรมชาติได้ ซึ่งลักษณะของหมู่ฟังก์ชั่นและการ เกิดปฏิกิริยาจะแสดงในภาพที่ 2.14 ผลการวิจัยพบว่าเซนเซอร์ตรวจวัดไซยาไนด์ไอออนลบดังกล่าวสามารถยึดติดบนเส้นใย เซลลูโลสได้ดีอย่างสม่ำเสมอและไม่ส่งผลต่อคุณสมบัติในการตรวจวัดของเซนเซอร์ เมื่อทดสอบใน สารละลายผสมไซยาไนด์ไอออนลบที่ความเข้มข้นต่างๆ เซนเซอร์ของแข็งก็สามารถแสดงผลการ ตรวจวัดผ่านการเปลี่ยนแปลงสีที่สังเกตด้วยตาเปล่าได้ทั้งสองเซนเซ็นเซอร์ โดยมีความแตกต่างกันที่ เฉดสีซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละเซนเซอร์ และนอกเหนือจากนี้ยังพบว่าเส้นใยเซลลูโลสสามารถ ดูดซึมสารละลายได้ดีทำให้ช่วยส่งผลที่ดีต่อการตรวจวัดของเซนเซอร์ในสารละลาย (25)

Li et al. (2016) ได้ทดลองพัฒนากระดาษกรองจากเซลลูโลสเป็นตัวดูดซับและตรวจวัด คอปเปอร์ไอออน โดยเคลือบผิวด้วย Ti₆O₁₁ เพื่อเป็นตัวกลางเชื่อมระหว่างสาร N-(3-(trimethoxysilyl) propyl) ethylenediamine ที่มีหมู่ฟังก์ชั่นสำหรับตรวจจับคอปเปอร์ไอออนกับ กระดาษกรองบริเวณหมู่ไฮดรอกซิลดังภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.14 แสดงการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเซนเซอร์ตรวจวัดไซยาไนด์ไอออนลบกับเซลลูโลส ที่มา: Isaad *et al* (2011)

จากการทดลองพบว่า Ti₆O₁₁ สามารถยึดติดบนพื้นผิวของกระดาษกรองได้ดีและ สามารถเกิดพันธะทางเคมีกับสาร N-(3-(trimethoxysilyl) propyl) ethylenediamineได้ เมื่อนำไป ทดสอบกับคอปเปอร์ไอออนที่อยู่ในสารละลายโดยการกวนที่อุณหภูมิต่างกัน พบว่ากระดาษกรอง สามารถดูดซับคอปเปอร์ไอออนได้ดีโดยที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสกระดาษกรองสามารถดูดซับ คอปเปอร์ไอออนได้มีประสิทธิภาพสูงสุดและและให้การตอบสนองของสีที่ชัดเจน (26)



ภาพที่ 2.15 แสดงโครงสร้างกระดาษเคลือบ Ti₆O₁₁ และสาร N-(3-(trimethoxysilyl) propyl) ethylenediamine

นอกจากเซลลูโลสสำเร็จรูปอย่างกระดาษเซลลูโลสและผ้าผืนแล้ว ปัจจุปันมีการผลิต เซลลูโลสจากแบคทีเรียเพิ่มขึ้นมา โดยเรียกว่าแบคทีเรียเซลลูโลส ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจอย่าง แพร่หลาย ทั้งในด้านอาหาร การแพทย์ อุตสาหกรรม ผลิตภัณฑ์กระดาษ โดยเซลลูโลสที่ได้จะมี ลักษณะเป็นเส้นใยเล็กละเอียด (microfibril) และถูกนำมาใช้ในรูปแบบคล้ายๆผ้าไม่ถักไม่ทอในมา งสิ่งทอ ซึ่งลักษณะที่เหมาะสมต่อการเป็นวัสดุเซนเซอร์ เพราะจะมีพื้นที่ผิวมาก และนอกจากนี้ แบคทีเรียเซลลูโลสที่ได้นั้นมีความบริสุทธ์ และสมบัติต่างๆๆใกล้เคียงกับเซลลูโลส สามารถดูดซึมน้ำได้ ค่อยข้างดี มีความเหนียวเมื่อเปียกน้ำ ซึ่งสมบัติดังกล่าวจะส่งผลดีต่อการใช้งานของเซนเซอร์ที่จะต่อ ทอสอบไอออนในสารละลาย (27)

2.5.1 ซอยโปรตีนไอโซเลท

โปรตีนเป็นพอลิเมอร์ทางชีวภาพที่ประกอบไปด้วยกรดอะมิโนที่เชื่อมกันด้วยพันธะเปป ไทด์ โดยสามารถสังเคราะห์ได้จากทั้งพืชและสัตว์ ซึ่งซอยโปรตีนไอโซเลทนี้ได้จากถั่วเหลือง โดยผ่าน การสกัดแยกไขมันออกแล้วผ่านกระบวนการแยกโปรตีนออกจากคาร์โบไฮเดรต โดยถูกนำมาใช้งาน อย่างแพร่หลาย มีข้อดีคือ ราคาถูก อุ้มน้ำได้ดี (28) เมื่อนำไปผสมกับสารอื่นๆหรือการขึ้นรูปเป็น ของแข็งจะช่วยให้มีความคงตัวและสมบัติเชิงกลดีขึ้น เช่นการขึ้นรูปเป็นฟิล์มหรืออัดรูปเป็นเม็ดยา อย่างในงานวิจัยของ Park *et al.* (2000) ได้ทดลองสร้างฟิล์มของซอยโปรตีนไอโซเลทผสมกับสารก ลูตาราลดีไฮด์ ซึ่งทำให้เกิดการเชื่อมกันของโมเลกุลทั้งสองจนเป็นแผ่นฟิล์มได้ (29)

บทที่ 3 วิธีการวิจัย

3.1 วัสดุตัวอย่างและสารเคมี

- 3.1.1 ผ้าฝ้ายทอลายขัด ขนาด 8x10 นิ้ว
- 3.1.2 กระดาษเซลลูโลส
- 3.1.3 วุ้นมะพร้าว จากตลาดไท รังสิต ปทุมธานี
- 3.1.4 ซอยโปรตีน ไอโซเลท (90%) (Krittiya Royal Limited, Thailand)

3.1.5 โรดามีน บี (Sigma-Aldric Co., USA)

3.1.6 ไฮดราซีน (hydrazine 80%) (Sigma-Aldrich Co., USA)

3.1.7 2, 5ไดไฮดรอกซีเบนซาลดีไฮด์ (2, 5-Dihydroxybenzaldehyde) (Sigma-

ALDRICH Co., USA)

3.1.8 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) (Sigma-Aldrich Co., USA)

3.1.9 กรดไฮโดรคลอริค (hydrochloric acid 37 %) (Merck KGaA Co., Germany)

3.1.10 กรดแทนนิค (tannic acid) (Sigma-Aldrich Co., USA)

3.1.11 เอทานอล (ethanol absolute) (RCL labscan Co., Thailand)

3.1.12 คลอโรฟอร์ม (Choloroform) (Merck KGaA Co., Germany)

3.1.13 ไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (dimethylformamide) (Merck KGaA Co., Germany)

- 3.1.14 คอปเปอร์(II)คลอไรด์ (Ajax Finechem Co., Australia)
- 3.1.15 แบเรียมคลอไรด์ (Ajax Finechem Co., Australia)

3.1.16 แคดเมียมคลอไรด์ (Merck KGaA Co., Germany)

3.1.17 โครเมียม(III)คลอไรด์ (Hi-Media Lab, India)

3.1.18 โคบอลต์(II)คลอไรด์ (Ajax Finechem Co., Australia)

3.1.19 เมอร์คิวรีคลอไรด์ (BDH Laboratory Supplies, Poole, UK)

3.1.20 โพแทสเซียมคลอไรด์ (Ajax Finechem Co., Australia)

3.1.21 แมงกานีสซัลเฟต (Merck KGaA Co., Germany)

3.1.22 แมกนีเซียมคลอไรด์ (Asia pacific specialty chemical Co., Australia)

3.1.23 เลด(II)ในเตรท (Asia pacific specialty chemical Co., Australia)

- 3.1.24 ทิน(II)คลอไรด์ (Asia pacific specialty chemical Co., Australia)
- 3.1.25 ซึ่งค์ซัลเฟต (Ajax Finechem Co., Australia)

3.1.26 กรดเอทิลีนไดเอมีนเตตระอะซิติก (ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA)) (Ajax Finechem Co., Australia)

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เครื่องชั่งน้ำหนัก (Sartorius analytical balances) (Model CP 224S, Sartorius AG, ประเทศเยอรมนี)

3.2.2 เครื่องกวนและผสม (mixing/overhead stirrer) (Model IKA RW20 digital, IKA, China)

3.2.3 ชุดเครื่องกรองสุญญากาศ (vacuum filtering flask and vacuum pump)

3.2.4 ตู้อบสาร (binder) (Model ED53/E2, Scientific Promotion Co., Ltd., Thailand)

3.2.5 เครื่องกวนสารละลายพร้อมให้ความร้อน (hotplate stirrer) (scilogex ms7h550-s)

3.2.6 เครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน (rotary evaporator)

3.2.7 เครื่องฉาบผิว (sputter coater) (Quorum, Q150RES)

3.2.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) (JEOL, JSM-7800F)

3.2.9 เครื่องโปรตอน-นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปคโตรสโคปี (¹H-Nuclear magnetic resonance spectroscopy)

3.2.10 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrophotometer, FTIR)

3.2.11 เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer) (Perkin-Elmer Lambda 25)

3.2.12 เครื่องวัดการเรืองแสงของสาร (fluorescence spectrophotometer)

3.2.13 เครื่องวัดสี (spectrophotometer) (Gretag MacBeth)

3.2.14 เครื่องอัดขึ้นรูปเม็ดยา (tablet press machine)

3.3 วิธีการทดลอง

การทดลองจะแบ่งออกเป็นการสังเคราะห์อนุพันธ์โรดามีนสำหรับเป็นเซนเซอร์ใน การตรวจวัดคอปเปอร์ในสารละลาย การทดลองเคลือบอนุพันธ์โรดามีนลงบนเส้นใยเซลลูโลส และ การทดลองผสมอนุพันธ์โรดามีนลงในซอยโปรตีนไอโซเลท

3.3.1 การสังเคราะห์อนุพันธ์โรดามีน

การสังเคราะห์อนุพันธ์โรดามีนจะเริ่มจากการสังเคราะห์อนุพันธ์ของโรดามีน บี กับสาร ไฮดราซีนก่อน แล้วจึงนำสารที่ได้ไปสังเคราะห์ขั้นต่อไป โดยในงานวิจัยนี้จะสังเคราะห์อนุพันธ์ของโร ดามีน 2 ตัวเพื่อใช้สำหรับวัสดุรองรับที่แตกต่างกัน โดยมีวิธีการสังเคราะห์ดังต่อไปนี้

3.3.1.1 การสังเคราะห์โรดามีน บี ไฮดราซีน (rhodamine B-hydrazine) หรือโรดามีน1

(1) ผสมโรดามีน บี 4.79 กรัม (10 มิลลิโมล) กับเอทานอล 50 มิลลิลิตร คน ให้เข้ากันแล้วจึงเติมไฮดราซีน (hydrazine) ความเข้มข้น 80 เปอร์เซ็นต์ จำนวน 12 มิลลิลิตร ซึ่งเป็น จำนวนที่มากเกินพอทีละหยดในระหว่างนั้นให้คนสารไปด้วยจะได้เป็นสารละลายสีชมพูเข้ม

 (2) ให้ความร้อนเพื่อให้สารเกิดปฏิกิริยาด้วยการรีฟลักซ์ในอ่างน้ำมันซิลิโคน เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ระหว่างนั้นใช้วิธีทินเลเยอร์ โครมาโตกราฟี (Thin Layer Chromatography (TLC)) ตรวจสอบเพื่อติดตามปฏิกิริยา โดยระหว่างที่มีปฏิกิริยาเกิดขึ้นสีชมพูจะค่อยๆเปลี่ยนเป็นสีส้ม มากขึ้น

(3) เมื่อสีชมพูหายไปหมดแล้ว และผลของทินเลเยอร์ โครมาโตกราฟียืนยัน
ว่าเกิดผลิตภัณฑ์ใหม่ทั้งหมดแล้ว ให้ปิดการรีฟลักซ์และรอระบบเย็นลงที่อุณหภูมิห้อง

(4) ทำการระเหยตัวทำละลายออกโดยเครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน (rotary evaporator) จะได้เป็นของแข็งทีเหลืออยู่ (residue)

(5) นำของแข็งที่ได้มาละลายในกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 1 โมล เมื่อละลายหมดแล้วจึงปรับค่าพีเอชเป็น 7 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 0.5 โมล ผลที่ได้จะเกิดเป็นตะกอนของโรดามีนบีไฮดราซีน

(6) นำตะกอนที่ได้มากรองสุญญากาศและล้างด้วยน้ำหลายๆครั้งจนกระทั่ง ได้ตะกอนสีขาวตุ่น (off-white) (16)


ภาพที่ 3.1 การสังเคราะห์โรดามีน บี ไฮดราซีน (rhodamine B-hydrazine) หรือโรดามีน 1

3.3.1.2 การสังเคราะห์ 2, 5 ไดไฮดรอกซีเบนซาลดีไฮด์ โรดามีน บี ไฮดราโซน หรือสารดีบีอาร์เอช (2, 5-Dihydroxybenzaldehyde rhodamine B hydrazone (DBRH)) หรือ โรดามีน 2

(1) ละลายโรดามีน บี ไฮดราซีน 0.46 กรัม (1 มิลลิโมล) ในเอทานอล 20 มิลลิลิตร จากนั้น เติมสาร 2, 5 ไดไฮดรอกซีเบนซาลดีไฮด์ (2,5-Dihydroxybenzaldehyde) จำนวน
0.214 กรัม (1.5 มิลลิโมล) ลงไป คนให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

(2) ให้ความร้อนเพื่อให้สารเกิดปฏิกิริยาด้วยการรีฟลักซ์ในอ่างน้ำมันซิลิโคน เป็นเวลา 36 ชั่วโมง ระหว่างนั้นใช้วิธีทินเลเยอร์ โครมาโตกราฟี ตรวจสอบเพื่อติดตามปฏิกิริยา สารละลายจะเริ่มเปลี่ยนจากสีชมพูเข้มเป็นสีม่วงเข้มมากขึ้นและเริ่มมีตะกอนเกิดขึ้น

(3) เมื่อผลของทินเลเยอร์ โครมาโตกราฟียืนยันว่าเกิดผลิตภัณฑ์ใหม่ทั้งหมด แล้ว ให้ปิดการรีฟลักซ์และรอระบบเย็นลงที่อุณหภูมิห้อง

(4) นำตะกอนสีม่วงอ่อนของสาร 2, 5 ไดไฮดรอกซีเบนซาลดีไฮด์ โรดามีน บี ไฮดราโซนที่ได้มาล้างด้วยเอทานอลเย็น 10 มิลลิลิตร 3 ครั้ง จะได้ตะกอนสีอ่อนลงจากนั้นกรองแยก ตะกอนที่ได้ แล้วทำให้แห้ง จะได้เป็นตะกอนสีเหลือง



ภาพที่ 3.2 การสังเคราะห์ 2, 5 ไดไฮดรอกซีเบนซาลดีไฮด์ โรดามีน บี ไฮดราโซน หรือโรดามีน 2

3.3.1.3 การสังเคราะห์ซาลิไซลัลดีไฮด์ โรดามีน บี ไฮดราโซนหรือสารเอสอาร์บี เอช (Salicylaldehyde rhodamine B hydrazone (SRBH)) หรือ โรดามีน 3

(1) ละลายโรดามีน บี ไฮดราซีน 0.46 กรัม (1 มิลลิโมล) ในเอทานอล 20 มิลลิลิตร จากนั้น เติมสารซาลิลัลดีไฮด์ (Salicylaldehyde) จำนวน 0.214 กรัม (4 มิลลิโมล) ลงไป คนให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

(2) ให้ความร้อนเพื่อให้สารเกิดปฏิกิริยาด้วยการรีฟลักซ์ในอ่างน้ำมันซิลิโคน
เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ระหว่างนั้นใช้วิธีทินเลเยอร์ โครมาโตกราฟี ตรวจสอบเพื่อติดตามปฏิกิริยา
(3) เมื่อผลของทินเลเยอร์ โครมาโตกราฟียืนยันว่าเกิดผลิตภัณฑ์ใหม่ทั้งหมด

แล้ว ให้ปิดการรีฟลักซ์และรอระบบเย็นลงที่อุณหภูมิห้อง โดยตั้งทิ้งไว้ 1คืน (4) จะเกิดเป็นตะกอนสีน้ำตาลของสารซาลิไซลัลดีไฮด์ โรดามีน บี ไฮดราโซน

นำตะกอนที่ได้มาล้างด้วยเอทานอลเย็น 10 มิลลิลิตร 3 ครั้ง จะได้ตะกอนสีอ่อนลงจากนั้นกรองแยก ตะกอนที่ได้ แล้วทำให้แห้ง จะได้เป็นตะกอนสีน้ำตาลอ่อน (16)



ภาที่ 3.3 การสังเคราะห์ซาลิไซลัลดีไฮด์ โรดามีน บี ไฮดราโซน หรือ โรดามีน 3

3.3.2 การทดลองเคลือบอนุพันธ์โรดามีนลงบนเส้นใยเซลลูโลส

การทดลองเคลือบอนุพันธ์โรดามีนลงบนเส้นใยเซลลูโลส ทำการทดลองโดยใช้ โรดามีน 2 เคลือบลงบนเส้นใยเซลลูโลสที่มีลักษณะและคุณสมบัติการใช้งานที่แตกต่างกัน 3 แบบ ประกอบไป ด้วย ผ้าฝ้ายทอขัด กระดาษเซลลูโลสอัด และแบคทีเรียเซลลูโลส โดยมีการขั้นตอนการทดลองดังนี้

3.3.2.1 การเตรียมผ้าฝ้ายทอลายขัด

(1) นำผ้าฝ้ายมาซักทำความสะอาดแล้วอบให้แห้ง

(2) ตัดผ้าฝ้ายเป็นชิ้นตัวอย่างขนาด 10x10 ซม.

(3) นำไปชั่งน้ำหนักผ้าแล้ววางไว้ในจานเลี้ยงเชื้อแก้วตื้น

3.3.2.2 การเตรียมกระดาษเซลลูโลสอัด

(1) นำกระดาษมาทำความสะอาดแล้วอบให้แห้ง

(2) ตัดกระดาษเป็นชิ้นตัวอย่างขนาด 10x10 ซม.

(3) นำไปชั่งน้ำหนักแล้ววางไว้ในจานเลี้ยงเชื้อแก้วตื้น

3.3.2.3 การเตรียมสารละลายแบคทีเรียเซลลูโลส

(1) นำวุ้นมะพร้าวมาทำความสะอาดด้วยน้ำปราศจากไอออน (DI water)

(2) นำวุ้นมะพร้าวที่ได้มาปั่นให้ผสมให้เข้ากับน้ำปราศจากไอออนด้วยเครื่อง

เครื่องกวนผสมที่มีใบพัด

(3) เมื่อวุ้นมะพร้าวเข้ากันดีกับน้ำปราศจากไอออนให้เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ลงไป แล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 25 นาที เพื่อ กำจัดน้ำตาลออกจากระบบ

(4) เมื่อครบเวลาจะสังเกตเห็นสารละลายเริ่มเป็นสีเหลือง ให้ปิดระบบความ ร้อนและตั้งสารละลายทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

(5) นำสารละลายที่ได้มากรองล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนจนมีความเป็น กลาง จะได้แบคทีเรียเซลลูโลสที่มีลักษณะเป็นสีขาวใส โดยแบคทีเรียที่ได้สามารถเก็บรักษาให้คง สภาพได้ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส

(6) การคำนวณหาปริมาณเนื้อแบคทีเรียเซลลูโลสในสารละลาย ทำโดยนำ แบคทีเรียเซลลูโลสที่ได้มาแบ่งใส่ภาชนะที่ 10 มิลลิลิตร 3 ภาชนะ แล้วนำไปอบแห้งแล้วชั่งน้ำหนัก ของปริมาณเนื้อเซลลูโลสที่เหลืออยู่ จะสามารถคำนวณหาปริมาณเนื้อที่มีอยู่ในสารละลาย 10 มิลลิลิตรได้ (30)

3.3.2.4 การเตรียมสารละลายโรดามีน 2

เตรียมสารละลายโรดามีน 2 ที่ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ โดยสารละลายในไดเมทิล ฟอร์มาไมด์

3.3.2.5 การเคลือบอนุพันธ์โรดามีนลงบนผ้าฝ้ายทอลายขัด

(1) นำผ้าฝ้ายชิ้นตัวอย่างมาแช่ลงในสารละลายโรดามีน 0.01 โมลาร์ ใน

อัตราส่วน ผ้าฝ้าย 1 กรัม ต่อ โรดามีน 2 ปริมาณ 0.05 มิลลิลิตร แช่ทิ้งไว้ 30 นาที (2) นำผ้าฝ้ายชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการแช่สารละลายโรดามีน มาอบที่อุณหภูมิ

80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

3.3.2.6 การเคลือบอนุพันธ์โรดามีนลงบนกระดาษเซลลูโลสอัด

(1) นำกระดาษเซลลูโลสอัดชิ้นตัวอย่างมาแช่ลงในสารละลายโรดามีน 2
เข้มข้น 0.01 โมลาร์ ในอัตราส่วน 1 กรัม ต่อ 0.05 มิลลิลิตร แช่ทิ้งไว้ 30 นาที

(2) นำชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการแช่สารละลายโรดามีน 2 มาอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

3.3.2.7 การเคลือบอนุพันธ์โรดามีนลงบนแบคทีเรียเซลลูโลส

 (1) นำสารละลายแบคทีเรียเซลลูโลสที่เตรียมไว้มาแบ่งใส่ภาชนะที่ปริมาณ
40 มิลลิลิตร จากนั้นค่อยๆหยดสารละลายโรดามีน 2 เข้มข้น 0.01 โมลาร์ ลงไป 2 มิลลิลิตร คน สารละลายให้เข้ากับเนื้อแบคทีเรียเซลลูโลสอย่างทั่วถึง

(2) นำสารละลายที่เข้ากันดีแล้วมาใส่ลงในจานเพาะเชื้อ เกลี่ยให้มีความหนาเท่ากันโดยให้มีความหนาประมาณ 1 เซนติเมตร

(3) นำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

(4) เมื่ออบแห้งดีแล้วจะได้เป็นแผ่นแบคทีเรียเซลลูโลสพร้อมนำไปทดสอบ

3.3.3 การทดลองผสมอนุพันธ์โรดามีนลงในซอยโปรตีนไอโซเลท

3.3.3.1 การเตรียมสารละลายโรดามีนบี 3

ละลายโรดามีน 3 0.05 กรัม ในสารละลายคลอโรฟอร์ม 10 มิลลิลิตร

3.3.3.2 การผสมอนุพันธ์โรดามีนลงในซอยโปรตีนไอโซเลท

(1) ละลายซอยโปรตีนไอโซเลท 2 กรัม ในน้ำบริสุทธิ์ 20 มิลลิลิตร คนให้ สารละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน

(2) ค่อยๆหยดกรดแทนนิคเข้มข้น 25 เปอร์เซ็นต์ จำนวน 0.5 มิลลิลิตรลงไป ในสารละลายภายใต้การคนให้เข้ากัน (3) เมื่อสารละลายเข้ากันดีจึงเติม สารละลายโรดามีน 3 ลงไป จากนั้นคนให้

เข้ากันเป็นเวลา 30 นาที

(4) นำสารละลายที่เข้ากันดีแล้ว เทลงในจานเพาะเชื้อตื้นแล้วทิ้งไว้ให้แห้งที่ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 12 ชม.

(5) จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นแผ่นฟิล์มสีน้ำตาลอ่อน ให้นำแผ่นฟิล์มดังกล่าวมาบด ให้ละเอียดเป็นผงด้วยโกร่งบดยา

(6) นำผงที่ได้ไปอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดยาที่แรงดัน 5 นิวตัน จะได้ผลิตภัณฑ์ สำหรับนำไปเป็นเซนเซอร์

3.4 วิธีการทดสอบ

3.4.1 วิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุล

นำสารโรดามีน 1 โรดามีน 2 และโรดามีน 3 ที่ได้จากการสังเคราะห์ในแต่ละขั้นตอนมา วิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุล ¹H-NMR และ ¹³C-NMR ด้วยเครื่องโปรตอน-นิวเคลียร์แมกเนติกเร โซแนนซ์สเปคโตรสโคปี (¹H-nuclear magnetic resonance spectroscopy)

3.4.2 ทดสอบสภาวะที่เหมาะสมในการใช้งานเซนเซอร์

ทำการทดสอบเซนเซอร์โรดามีน 2 ว่าเหมาะจะใช้ในสภาวะที่มี่ค่าความเป็นกรดเบสที่ เท่าใด โดยเตรียมโรดามีนที่มีความเข้มข้น 10⁻⁵ โมลาร์ ที่ค่า pH 1-14 และเตรียมโรดามีนที่มีความ เข้มข้น 10⁻⁵ โมลาร์ผสมกับสารละลายคอปเปอร์(II)คลอไรด์ที่ความเข้มข้น 10⁻⁵ โมลาร์ ที่ค่า pH 1-14 จากนั้นสังเกตการเปลี่ยนแปลงด้วยตาเปล่า แล้วนำไปทดสอบการดูดกลืนแสงที่เปลี่ยนแปลงไปด้วย เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer)

3.4.3 ทดสอบอัตราส่วนที่เหมาะสมของเซนเซอร์กับคอปเปอร์ไอออน

เตรียมสารละลายโรดามีน 2 ที่ความเข้มข้น ต่างๆดังนี้ 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 ไมโครโมลาร์ และเตรียมสารละลายคอปเปอร์(II)คลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่างๆดังนี้ 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 ไมโครโมลาร์ จากนั้นนำสารละลายโรดามีน 2 ผสม กับสารละลายคอปเปอร์(II)คลอไรด์ให้มีความเข้มข้นสุทธิที่ 100 ไมโครโมลาร์ สังเกตการเปลี่ยนแปลง ด้วยตาเปล่า แล้วนำไปทดสอบการดูดกลืนแสงที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโต มิเตอร์

3.4.4 ทดสอบความสามารถในการตรวจวัดคอปเปอร์ไอออน

โดยทำการตรวจวัดทั้งในเซนเซอร์ที่อยู่ในรูปสารละลายและเซนเซอร์ที่เคลือบลงบนวัสดุ รองรับและเซนเซอร์ที่ผสมลงในซอยโปรตีนไอโซเลท โดยมีการทดสอบแตกต่างกันดังนี้

3.4.4.1 เซนเซอร์รูปแบบสารละลาย

เตรียมสารละลายทดสอบ โดยผสมสารคอปเปอร์คลอไรด์กับน้ำบริสุทธิ์ ตามความ เข้มข้นดังนี้ 0, 10, 30, 50, 70, 100, 130, 170 และ 200 ไมโครโมลาร์ คนสารละลายให้เข้ากัน จากนั้นนำไปผสมกับสารละลายโรดามีน 2 ที่เข้มข้น 10⁻⁵ โมลาร์ แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลง ประมาณ 2 นาที แล้วจึงนำไปทดสอบการดูดกลืนแสงที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตร โฟโตมิเตอร์ และ เครื่องวัดการเรืองแสงของสาร

3.4.4.2 เซนเซอร์รูปแบบของแข็ง (โรดามีน 2 ผสมในเซลลูโลส)

เตรียมสารละลายทดสอบ โดยผสมสารคอปเปอร์คลอไรด์กับน้ำบริสุทธิ์ ตาม ความเข้มข้นดังนี้ 10⁻⁵, 5×10⁻⁵, 10⁻⁴, 5×10⁻⁴, 10⁻³, 5×10⁻³ และ 10⁻² โมลาร์ คนสารละลายให้เข้า กัน จากนั้นนำเส้นใยเซลลูโลสที่เคลือบด้วยโรดามีน 2 ซึ่งประกอบไปด้วย ผ้าฝ้ายทอ กระดาษ เซลลูโลสอัด และแบคทีเรียเซลลูโลส มาแซ่ลงในสารละลายดังกล่าว สังเกตการเปลี่ยนแปลงประมาณ 5 นาที นำชิ้นตัวอย่างออกแล้วล้างน้ำบริสุทธิ์ทิ้งไว้ให้แห้งเพื่อดูการเปลี่ยนแปลง โดยสังเกตการ เปลี่ยนแปลงของตัวอย่างด้วยตาเปล่าและใช้เครื่องวัดสี

3.4.4.3 เซนเซอร์รูปแบบของแข็ง (โรดามีน 3 ผสมในซอยโปรตีนไอโซเลท)

เตรียมสารละลายทดสอบ โดยผสมสารคอปเปอร์คลอไรด์กับน้ำบริสุทธิ์ ตามความ เข้มข้นดังนี้ 5×10⁻⁵, 10⁻⁴, 5×10⁻⁴, 10⁻³ และ 1.5×10⁻³ โมลาร์ คนสารละลายให้เข้ากัน จากนั้นนำชิ้น ตัวอย่างซอยโปรตีนไอโซเลทที่ผสมโรดามีน 3 มาแช่ลงในสารละลายดังกล่าว สังเกตการเปลี่ยนแปลง ประมาณ 10 นาที นำชิ้นตัวอย่างออกแล้วทิ้งไว้ให้แห้งเพื่อดูการเปลี่ยนแปลง โดยสังเกตการ เปลี่ยนแปลงของตัวอย่างด้วยตาเปล่าและใช้เครื่องวัดสีวิเคราะห์

3.4.5 ทดสอบความจำเพาะในการตรวจจับสารโลหะรบกวนอื่นๆ

โดยทำการทดสอบทั้งในเซนเซอร์ที่อยู่ในรูปสารละลาย เซนเซอร์ที่เคลือบลงบนวัสดุ รองรับและเซนเซอร์ที่ผสมลงในซอยโปรตีนไอโซเลท โดยทดสอบแตกต่างกันดังนี้

3.4.5.1 เซนเซอร์รูปแบบสารละลาย

เตรียมสารละลายทดสอบ โดยผสมสารโลหะอื่นๆกับน้ำบริสุทธ์ที่ความเข้มข้น 10⁻² โมลาร์ โดยใช้สารโลหะดังนี้ Ba²⁺, Cd²⁺, Co²⁺, Cr²⁺, Cu²⁺, Hg²⁺, Mg²⁺, Mn²⁺, Pb²⁺, Sn²⁺, Sr²⁺ และ Zn²⁺ คนสารละลายให้เข้ากัน จากนั้นนำผสมกับสารละลายโรดามีน 2 เข้มข้น 10⁻⁵ โมลาร์ แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงประมาณ 2 นาที แล้วนำไปทดสอบการเปลี่ยนแปลงด้วยเครื่องยูวี-วิสิ เบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ และ เครื่องวัดการเรืองแสงของสาร

3.4.5.2 เซนเซอร์รูปแบบของแข็ง (โรดามีน 2 ผสมในเซลลูโลส)

เตรียมสารละลายทดสอบ โดยผสมสารโลหะรบกวนอื่นๆกับน้ำบริสุทธ์ที่ ความเข้มข้น 10⁻² โมลาร์ โดยใช้สารโลหะดังนี้ Ba²⁺, Cd²⁺, Co²⁺, Cr²⁺, Cu²⁺, Hg²⁺, Mg²⁺, Mn²⁺, Pb²⁺, Sn²⁺, Sr²⁺ และ Zn²⁺ คนสารละลายให้เข้ากัน จากนั้นนำเส้นใยเซลลูโลสที่เคลือบด้วยโรดามีน 2 ซึ่งประกอบไปด้วย ผ้าฝ้ายทอขัด กระดาษเซลลูโลสอัด และแบคทีเรียเซลลูโลส มาแซ่ลงใน สารละลายดังกล่าว สังเกตการเปลี่ยนแปลงประมาณ 5 นาที นำชิ้นตัวอย่างออกแล้วล้างน้ำบริสุทธิ์ทิ้ง ไว้ให้แห้งเพื่อดูการเปลี่ยนแปลง โดยสังเกตการเปลี่ยนแปลงของตัวอย่างด้วยตาเปล่าและใช้เครื่องวัด สีวิเคราะห์

3.4.5.3 เซนเซอร์รูปแบบของแข็ง (โรดามีนบี 3 ผสมในซอยโปรตีนไอโซเลท)

เตรียมสารละลายทดสอบ โดยผสมสารโลหะอื่นๆกับน้ำบริสุทธ์ที่ความเข้มข้น 10⁻² โมลาร์ โดยใช้สารโลหะดังนี้ Cd²⁺, Co²⁺, Cu²⁺ และ Hg²⁺คนสารละลายให้เข้ากัน จากนั้นนำชิ้น ตัวอย่างซอยโปรตีนไอโซเลทที่ผสมโรดามีน 3 มาแช่ลงในสารละลายดังกล่าว สังเกตการเปลี่ยนแปลง ประมาณ 10 นาที นำชิ้นตัวอย่างออกแล้วทิ้งไว้ให้แห้งเพื่อดูการเปลี่ยนแปลง โดยสังเกตการ เปลี่ยนแปลงของตัวอย่างด้วยตาเปล่าและใช้เครื่องวัดสีวิเคราะห์

3.4.6 ทดสอบการยึดติดของเซนเซอร์กับวัสดุรองรับ

ทดสอบกับวัสดุรองรับที่เคลือบโรดามีน 2 ซึ่งประกอบด้วย ผ้าฝ้ายทอขัด กระดาษ เซลลูโลสอัด และแบคทีเรียเซลลูโลส โดยเตรียมสารละลายคอปเปอร์เข้มข้น 10⁻⁴ โมลาร์ จากนั้นนำ วัสดุรองรับทั้ง 3 ตัวอย่าง แช่ลงในสารละลายคอปเปอร์เข้มข้นทิ้งไว้ 5 นาที นำชื้นงานออกแล้วเก็บ สารละลายที่ผ่านการแช่ตัวอย่างไปวัดค่าการดูดกลืนแสงของสาร เปรียบเทียบความแตกต่างของการ ดูดกลืนแสงของสารที่เปลี่ยนไป

3.4.7 ลักษณะสัณฐานวิทยา

ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิวเส้นใยเซลลูโลสทั้ง 3 ตัวอย่าง คือ ผ้าฝ้ายทอขัด กระดาษเซลลูโลสอัด แบคทีเรียเซลลูโลส ก่อนและหลังผนึกสารโรดามีน 2 ลงบนพื้นผิวเส้นใย เนื่องจากตัวอย่างเป็นวัสดุไม่นำไฟฟ้าจึงต้องผ่านการฉาบผิวด้วยอนุภาคทอง ก่อนจะนำมาทดสอบ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การทดลองแบ่งออกเป็นการสังเคราะห์อนุพันธ์โรดามีนสำหรับเป็นเซนเซอร์ในการตรวจวัด คอปเปอร์ในสารละลาย การทดลองเคลือบอนุพันธ์โรดามีนลงบนเส้นใยเซลลูโลส และการทดลองผสม อนุพันธ์โรดามีนลงในซอยโปรตีนไอโซเลท

4.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุล

4.1.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของสารด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ สเปคโตรสโคปี

NMR เกี่ยวข้องกับการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงคลื่นวิทยุ เนื่องจากนิวเคลียส ทุกชนิดมีประจุเป็นบวก แต่นิวเคลียสบางชนิดมีการหมุนแบบมีประจุ ทำให้เกิดโมเมนต์แม่เหล็ก (magnetic moment) ส่งผลให้นำมาวิเคราะห์ด้วย NMR ได้ คือ ¹H NMR เพราะพบได้มากใน สารประกอบอินทรีย์ทั่วๆไป และ ¹³C NMR ที่พบได้น้อยกว่า

โดยจำนวนชนิดของสัญญาณ NMR จะบอกจำนวนชนิดของโปรตอนที่แตกต่างกันใน โมเลกุล ตำแหน่งของสัญญาณจะให้ข้อมูลสภาพแวดล้อมอิเล็กตรอนของโปรตอนแต่ละกลุ่มนั้น ความเข้ม (intensity) ของสัญญาณ จะบอกข้อมูลเกี่ยวกับจำนวนโปรตอนแต่ละชนิด การแยก (splitting) ของสัญญาณจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับจำนวนโปรตอนอื่นๆ โดยตำแหน่งสัญญาณที่ค่าเคมิคัล ชิฟต์แต่ละตำแหน่งสามารถอนุมานเทียบว่าเป็นโปรตอนที่มีสภาพแวดล้อมแบบโครงสร้างโมเลกุลใด ดังภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 แสดงแนวโน้มสภาพแวดล้อมของโปรตอนที่ตำแหน่งสัญญาณที่ค่าเคมิคัลชิฟต์ต่างๆ



ภาพที่ 4.2 แสดงผล ¹H-NMR ของโรดามีน 1 ในสารละลายคลอโรฟอร์ม



ภาพที่ 4.3 แสดงผล ¹H-NMR ของโรดามีน 2 ในสารละลายคลอโรฟอร์ม



ภาพที่ 4.4 แสดงผล ¹H-NMR ของโรดามีน 3 ในสารละลายคลอโรฟอร์ม

ในการทดลองนี้จะนำสารโรดามีน บี, โรดามีน 1, โรดามีน 2, และโรดามีน 3 ที่ได้จาก การสังเคราะห์ในแต่ละขั้นตอนมาวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกล ¹H-NMR และ ¹³C-NMR

จากภาพที่ 4.2 ผลของ ¹H-NMR ของโรดามีน 1 ในสารละลายคลอโรฟอร์ม มีค่า **ठ** (chemical shift) ที่ 1.13 ppm (t, 12H, NCH₂CH₃, J = 7.0 Hz), 3.42 (q, 8H, NCH₂CH₃, J = 7.0 Hz), 3.60 (bs, 2H, NH₂), 6.28 (dd, 2H, Xanthene-H, J 1 = 9.0 Hz, J 2 = 2.4 Hz), 6.41 (d, 2H, Xanthene-H, J = 2.4 Hz), 6.45 (d, 2H, Xanthene-H, J = 9.0 Hz), 7.10 (dd, 1H, Ar-H, J 1 = 5.4 Hz, J 2 = 3.3 Hz), 7.42 (d, 1H, Ar-H, J = 3.3 Hz), 7.44 (d, 1H, Ar-H, J = 3.3 Hz), และ 7.93 (dd, 1H, Ar-H, J 1 = 5.4 Hz, J 2 = 3.3 Hz) โดยผลวิเคราะห์¹H-NMR ที่กล่าวมา ในข้างต้นมีความสอดคล้องกับโครงสร้างโมเลกุลของสารโรดามีน 1

จากภาพที่ 4.3 ผลของ ¹H-NMR ของโรดามีน 2 ในสารละลายคลอโรฟอร์ม มีค่า **ō** (chemical shift) ที่ 1.14 ppm (t, 12H, NCH₂CH₃, J = 7.1 Hz), 3.2 (q, 8H, NCH₂CH₃, J = 7.1 Hz), 6.23 (dd, 2H, Xanthene-H, J1 = 8.9 Hz, J2 = 2.2 Hz), 6.49 (d, 2H, Xanthene-H, J = 8.9 Hz), 6.74 (dd, 1H, Phen-H), 6.79 (d, 1H, Phen-H), 7.24 (d, 1H, Phen-H), 7.29 (dd, 1H, Phen-H), 7.32 (d, 1H, Ar-H), 7.58 (m, 2H, Ar-H), 7.97 (d, 1H, Ar-H), 9.39 (bs, 1H, N=C-H), 10.28 (bs, 2H, Phen-OH) โดยผลวิเคราะห์ของ ¹H-NMR ที่กล่าวมาในข้างต้นมีความสอดคล้องกับ โครงสร้างโมเลกุลของสารโรดามีน 2

จากภาพที่ 4.4 ผลของ ¹H-NMR ของโรดามีน 3 ในสารละลายคลอโรฟอร์ม มีค่า **ठ** (chemical shift) ที่ 1.15 ppm (t, 12H, NCH₂CH₃, J = 7.1 Hz), 3.4 (q, 8H, NCH₂CH₃, J = 7.1 Hz), 6.31 (dd, 2H, Xanthene-H, J1 = 8.9 Hz, J2 = 2.2 Hz), 6.42 (d, 2H, Xanthene-H, J = 2.2 Hz), 6.48 (d, 2H, Xanthene-H, J = 8.9 Hz), 6.77 (dd, 1H, Phen-H), 6.78 (d, 1H, Phen-H), 7.12 (d, 1H, Phen-H), 7.20 (dd, 1H, Phen-H), 7.28 (d, 1H, Ar-H), 7.58 (m, 2H, Ar-H), 7.97 (d, 1H, Ar-H), 9.21 (bs, 1H, N=C–H), 10.52 (bs, 1H, Phen–OH) โดยผลวิเคราะห์ของ ¹H-NMR ที่กล่าวมาในข้างต้นมีความสอดคล้องกับโครงสร้างโมเลกูลของสารโรดามีน 3



ภาพที่ 4.5 แสดงผล ¹³C-NMR ของโรดามีน 1 ในสารละลายคลอโรฟอร์ม



ภาพที่ 4.6 แสดงผล ¹³C-NMR ของโรดามีน 2 ในสารละลายคลอโรฟอร์ม

จากภาพที่ 4.5 แสดงผล ¹³C-NMR ของโรดามีน 1 ในสารละลายคลอโรฟอร์ม พบว่ามี ค่าความถี่ **δ** = 153.83, 151.54, 148.86, 132.50, 130.0, 128.08, 123.81, 122.98, 108.01, 104.51, 97.93, 77.32,77.20, 77.00, 76.78, 44.35 และ12.60 โดยผลวิเคราะห์ของ ¹³C-NMR ที่ กล่าวมาในข้างต้นมีความสอดคล้องกับโครงสร้างโมเลกุลของสารโรดามีน 1

จากภาพที่ 4.6 แสดงผล ¹³C-NMR ของโรดามีน 2 ในสารละลายคลอโรฟอร์ม พบว่ามี ค่าความถี่ **δ** = 164.65, 153.79, 153.73, 152.44, 150.36, 149.09, 148.61, 133.59, 130.46, 128.78, 128.06, 124.06, 123.39, 119.25, 118.30, 117.77, 116.65, 108.04, 105.19, 97.95, 77.32, 77.21, 77.00, 76.68, 44.33 และ12.60 โดยผลวิเคราะห์ของ ¹³C-NMR ที่กล่าวมาในข้างต้น มีความสอดคล้องกับโครงสร้างโมเลกุลของสารโรดามีน 2

4.2 ผลทดสอบสภาวะที่เหมาะสมในการใช้งานเซนเซอร์

ทดสอบด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยเปรียบเทียบสารละลายโรดามีน 2 เข้มข้น 10⁻⁵ โมลาร์ ที่ค่า pH 1-14 และโรดามีน 2 เข้มข้น 10⁻⁵ โมลาร์ผสมกับสารละลายคอปเปอร์ (แ)คลอไรด์เข้มข้น 10⁻⁵ โมลาร์ ที่ค่า pH 1-14 โดยมีการเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้ด้วยตาเปล่าดังนี้



ภาพที่ 4.7 แสดงรูปถ่ายสารละลายโรดามีน 2 เข้มข้น 10⁻⁵ โมลาร์ ที่ค่า pH 1-14

จากภาพที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าสารละลายที่มีเฉพาะโรดามีน 2 มีการเปลี่ยนแปลงของสี ที่สังเกตได้ด้วยตาเปล่าที่ขึ้นกับค่า pH โดยที่ค่า pH 1 มีสีชมพูอย่างเห็นได้ชัด ที่ค่า pH 2-4 ก็มี แนวโน้มของสีที่สังเกตได้เป็นสีชมพูอ่อนลงเรื่อยๆจากสีของ pH 1 ที่เป็นสีชมพูเข้ม และสีที่สังเกตได้ ของสารละลายเริ่มเข้าสู่สึใสที่ช่วง pH 5-11 แล้วเริ่มมีกลับมามีสีชมพูอ่อนๆอีกครั้งในช่วง pH 12-14 จากการทดลองสังเกตความสัมพันธ์ของสารละลายโรดามีน 2 กับ สภาวะความเป็นกรด-เบสดังกล่าว พบว่าสารละลายโรดามีนมีความอ่อนไหวต่อสภาวะกรดเข้มข้นที่ช่วง pH 1-4 และสภาวะเบสที่ช่วง pH 12-14 โดยช่วงที่เหมาะสมสำหรับสารละลายโรดามีนจะอยู่ในช่วง pH 5-11



ภาพที่ 4.8 แสดงรูปถ่ายสารละลายโรดามีน 2 เข้มข้น 10⁻⁵ โมลาร์ ผสมกับสารละลายคอปเปอร์ (II)คลอไรด์เข้มข้น 10⁻⁵ โมลาร์ ที่ค่า pH 1-14

จากภาพที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าสารละลายโรดามีน 2 ที่ผสมกับสารละลายคอปเปอร์ (II)คลอไรด์ มีการเปลี่ยนแปลงของสีที่สังเกตได้ด้วยตาเปล่าที่ขึ้นกันค่า pH โดยที่ค่า pH 1-2 มี ลักษณะของสารลายเป็นสารละลายใส ต่อมาในช่วง pH 3, pH 4 และ pH 5 นั้นเริ่มมีแสดงให้เห็นว่า ค่อยมีสีชมพูเพิ่มมากขึ้นจนถึงที่ pH 6 นั้นมีสีชมพูที่เข้มที่สุดแล้วค่อยๆจางลงไปเมื่อเข้าสู่ช่วง pH 7-9 และกลับมาเป็นสารละลายใสอีกครั้งในช่วง pH 10-14 จากการเปลี่ยนแปลงที่สังเกตได้จากการ ทดลองดังกล่าวพบว่าสารละลายโรดามีนที่ผสมกับสารละลายคอปเปอร์(II)คลอไรด์นั้นมีความอ่อนไหว ต่อสภาวะกรดเข้มข้นอย่างใน pH 1-2 และในสภาวะเบสที่ pH 10-14 โดยทำให้ความสามารถในการ ดูดกลึนแสงของสารโรดามีนผสมกับสารละลายคอปเปอร์เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสำหรับการที่จะนำ สารละลายดังกล่าวมาใช้เป็นเซนเซอร์ตรวจวัดนั้นควรใช้ช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสำหรับการที่จะนำ สารละลายดังกล่าวมาใช้เป็นเซนเซอร์ตรวจวัดนั้นควรใช้ช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสำหรับการที่จะนำ สารละลายดังกล่าวมาใช้เป็นเซนเซอร์ตรวจวัดนั้นควรใช้ช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสำหรับการที่จะนำ สารละลายดังกล่าวมาใช้เป็นเซนเซอร์ตรวจวัดนั้นควรใช้ช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสำหรับการที่จะนำ สารสะลายค้าปลงของสารโรดามีน 2 ก่อนที่ผสมกับสารละลายคอปเปอร์ไอออนและหลังผสมพบว่าก่อนผสม มีช่วงที่เหมาะสมคือ pH 5-11 และหลังผสมมีช่วงที่สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงได้คือช่วง pH 3-9 เมื่อเปรียบเทียบแล้วก็พบว่ามีช่วงที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการทดสอบคือช่วง pH 5-9 และจะเห็นการ เปลี่ยนแปลงที่ชัดที่สุดที่ pH 6

4.3 ทดสอบอัตราส่วนการเกิดเชิงซ้อนของเซนเซอร์กับคอปเปอร์ไอออน

เป็นการหาอัตราส่วนการเกิดเชิงซ้อน (Job's plot) ของเซนเซอร์โรดามีน 2 กับคอป เปอร์ไอออน โดยเลือกให้มีความเข้มข้นโดยโมลสุทธิที่ 10⁻⁴ โมลาร์ จากนั้นนำมาทดสอบการดูดกลืน สีที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงของสาร (UV-Vis Spectrophotometer) โดยเลือก ผลการดูดกลืนแสงที่ 560 นาโนเมตร



ภาพที่ 4.9 แสดงผลการดูดกลืนแสงของโรดามีน 2 ผสมกับสารละลายคอปเปอร์ที่เศษส่วนโมลต่างๆ

ผลการดูดกลืนแสงของสารละลายโรดามีน 2 ผสมกับสารละลายคอปเปอร์จากภาพที่ 4.9 โดยแสดงเป็นกราฟระหว่างเศษส่วนโดยโมลของสารละลายโรดามีนกับค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ ที่ช่วง 560 นาโนเมตร พบว่าค่าการดูดกลืนแสงสูงที่สุดอยู่ที่สารละลายโรดามีน 2 เข้มข้น 0.5โมล ผสมกับสารละลายคอปเปอร์เข้มข้น 0.5 โมล และลดลงเมื่ออัตราส่วนของสารละลายโรดามีน 2 ต่อ สารละลายคอปเปอร์เปลี่ยนแปลงไป โดยจะมีค่าใกล้เคียงกันในบางอัตราส่วน อย่างใน สารละลายโร ดามีน 2 ผสมกับสารละลายคอปเปอร์ที่เศษส่วนโดยโมลของโรดามีนเมื่อเทียบกับคอปเปอร์เท่ากับ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 และ 1.0 ตามลำดับ พบว่า ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดอยู่ที่ เศษส่วนโมล 0.5 นั้นคือ ที่ปริมาณโรดามีนเท่ากับคอปเปอร์ที่เศษส่วนโมลมากหรือน้อยกว่านี้ ค่าการ ดูดกลืนแสงจะลดลง และลดลงมาก หากมีความแตกต่างระหว่างปริมาณคอปเปอร์มากขึ้น แสดงว่าโร ดามีนและไอออนคอปเปอร์จะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่อัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1:1 ส่วนสาเหตุที่ เศษส่วนโมลอื่นๆมีการดูดกลืนแสงที่ใกล้เคียงกับเป็นคู่ๆและลดลงตามสัดส่วนนั้น เกิดจากการที่ โมเลกุลของสารที่อยู่ในภาชนะมีไม่เพียงพอต่อการเกิดสารเชิงซ้อน เช่น ที่เศษส่วนโมล 0.4 จะมีค่า การดูดกลืนแสงที่ใกล้เคียงกับ 0.6 เนื่องจากผลการดูดกลืนแสงของทั้งสองเศษส่วนโมล เป็นผลจาก สารประกอบเชิงซ้อนของโรดามีน 0.4 และ คอปเปอร์ 0.4 เช่นกัน ส่วนโรดามีนและคอปเปอร์ที่มาก เกินพอนั้นไม่สามารถทำให้เกิดการดูดกลืนแสงได้ โดยปริมาณที่เกินจาก 0.4 นั้นมากเกินพอต่อระบบ โดยในสัดส่วนอื่นๆนั้นก็เป็นไปตามหลักการเดียวกัน จึงสามารถสรุปได้ว่าอัตราส่วนการทำปฏิกิริยา ของสารโรดามีน 2 กับไอออนของคอปเปอร์ที่ได้คือ อัตราส่วน1:1



ภาพที่ 4.10 แสดงรูปถ่าย สารละลายโรดามีน 2 ผสมกับสารละลายคอปเปอร์(II)คลอไรด์เข้มข้นสุทธิ ที่ 10⁻⁴ โมลาร์ โดยมีสัดส่วนโดยโมลที่ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 และ 1.0 ตามลำดับ

4.4 ผลการทดสอบความสามารถในการตรวจวัดคอปเปอร์ไอออน

โดยทำการตรวจวัดทั้งในเซนเซอร์ที่อยู่ในรูปสารละลายและเซนเซอร์ที่เคลือบลงบน วัสดุรองรับและเซนเซอร์ที่ผสมลงในซอยโปรตีนไอโซเลท โดยมีการทดสอบแตกต่างกันดังนี้

4.4.1 เซนเซอร์รูปแบบสารละลาย





ภาพที่ 4.11 แสดงผลการดูดกลืนแสงที่ช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตรของสารละลายโรดา มีน 2 ที่ความเข้มข้น 10⁻⁴ โมลาร์ ผสมสารละลายคอปเปอร์ที่ความเข้มข้นดังนี้ 0, 10, 30, 50, 70, 100, 130, 170 และ 200 ไมโครโมลาร์ ตามลำดับ

จากภาพที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าผลการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-700 นา โนเมตร ของสารละลายโรดามีน 2 ที่ความเข้มข้น 10⁻⁴ โมลาร์ ผสมสารละลายคอปเปอร์ที่ความ เข้มข้น 0, 10, 30, 50, 70, 100, 130, 170 และ 200 ไมโครโมลาร์ ตามลำดับ นั้นมีความเข้มของการ ดูดกลืนแสงที่เข้มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ที่เพิ่มขึ้น โดยมีการดูดกลืนแสงเข้มสุด ที่ช่วงความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร ในทุกความเข้มข้นและรูปแบบของสเปกตรัมมีความคล้ายคลึง กันในทุกความเข้มข้น ซึ่งอนุมานได้ว่าการเปลี่ยนที่สีที่เกิดขึ้นจากการดูดกลืนแสงที่เปลี่ยนแปลงไปนั้น อาจจะส่งผลให้เห็นเป็นสีที่ปรากฏในเฉดสีเดียวกัน แต่มีความเข้มของสีต่างกัน โดยช่วงสเปกตรัมที่ เกิดขึ้นจะเป็นช่วงของสีแดงออกชมพู เมื่อมีปริมาณความเช้นช้นน้อยๆจะแสดงออกเป็นสีมชมพูและ จะเข้าขึ้นเรื่อยๆตามความเข้มข้นโดยจะเข้มขึ้นจนเป็นสีชมพูอมม่วงซึ่งจะเห็นได้ชัดด้วยตาเปล่า



ภาพที่ 4.12 แสดงผลการดูดกลืนแสงที่ช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตรของสารละลายโรดา มีน 2 ที่ความเข้มข้น 10⁻⁴ โมลาร์ ผสมสารละลายคอปเปอร์ที่ความเข้มข้น 4, 8, 16, 32, 64 และ 128 ไมโครโมลาร์ ตามลำดับ

จากภาพที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าผลการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-700 นา โนเมตร ของสารละลายโรดามีน 2 ที่ความเข้มข้น 10⁻⁴ โมลาร์ ผสมสารละลายคอปเปอร์ที่ความ เข้มข้นค่อยๆเพิ่มขึ้นที่ละ 2 เท่า โดยมีความเข้มข้นตามนี้ 4, 8, 16, 32, 64 และ 128 ไมโครโมลาร์ จะเห็นได้ว่าความเข้มของการดูดกลืนแสงเข้มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ที่เพิ่มขึ้น โดยมีการดูดกลืนแสงเข้มสุดที่ช่วงความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร และรูปแบบของสเปกตรัมมีความ คล้ายคลึงกันในทุกความเข้มข้น และการเพิ่มขึ้นดังกล่าวนั้นมีความเข้มของการดูดกลืนแสงที่เพิ่มขึ้น เป็น 2 เท่าของสารละลายก่อนหน้า ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่าเซนเซอร์โรดามีน 2 ดังกล่าวมีการ เพิ่มขึ้นของการดูดกลืนแสงเป็นสัดส่วนตามความเข้มข้นของสารละลาย



ภาพที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นของความเข้มในการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 545 นาโน เมตรของสารละลายโรดามีน 2 และสารละลายคอปเปอร์ที่ความเข้มข้น 4, 8, 16, 32, 64 และ 128 ไมโครโมลาร์ ตามลำดับ



ภาพที่ 4.14 ภาพถ่ายสารละลายโรดามีน 2 เข้มข้น 10⁻⁴ โมลาร์ ผสมสารละลายคอปเปอร์ที่ความ เข้มข้น 4, 8, 16, 32, 64 และ 128 ไมโครโมลาร์ ตามลำดับ

จากภาพ 4.13 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสารละลายโรดามีน 2 และ สารละลายคอปเปอร์ โดยการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 545 นาโนเมตร ความเข้มในการดูดกลืน แสงของสารละลายผสมแต่ละความเข้มข้นนั้นมีการเพิ่มขึ้นเป็นลำดับดังสมการ

$$Y = 0.0247 x - 0.0036$$

ความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงออกมาในรูปแบบเชิงเส้น มีค่า R² = 0.9999 โดยการเปลี่ยนแปลงของการดูดกลืนที่ความเข้มมากขึ้นนั้นทำให้สีที่ปรากฏมีความเข้ม มากขึ้นเช่นเดียวกัน สามารถดูได้จากภาพที่ 4.14 จะเห็นว่าที่ความเข้มสีของสารละลายมากขึ้นตาม ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ที่เพิ่มขึ้นตัวอย่างละ 2 เท่าโดยโมล โดยสีของสารละลายที่ได้มี ลักษณะเป็นสีเฉดสีชมพูออกแดง โดยที่ความเข้มข้น 4 ไมโครโมลาร์ มีลักษณะสีที่ปรากฏเป็นสีชมพู อ่อนๆ และเป็นสีชมพูเข้มขึ้นตามปริมาณของสารละลายคอปเปอร์ที่เข้มข้นขึ้น โดยมีสีเข้มมากสุดที่ ความเข้มข้น 128 ไมโครโมลาร์ โดยสารละลายดังกล่าวมีสีชมพูเข้มจนออกแดง

4.4.1.2 ผลการเรื่องแสงของสาร

จากภาพที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่าการเรืองแสงของเซนเซอร์จะมีการเปลี่ยนแปลงในช่วง ความยาวคลื่นที่ 540-640 นาโนเมตร โดยเมื่อมีความเข้มข้นของคอปเปอร์ที่มากขึ้นจะทำให้เกิดการ เรืองแสงที่มีความเข้มมากขึ้น โดยความยาวคลื่นที่มากที่สุดของการเรืองแสงคือ 570 นาโนเมตร ซึ่ง จะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของคอปเปอร์ที่มากขึ้น โดยความสัมพันธ์ของระหว่างค่าความเข้มข้นของ คอปเปอร์ที่ผสมกับสารละลายโรดามีนกับความเข้มของการเรืองแสงของโรดามีน 2 สามารถดูได้จาก ภาพที่ 4.16 จะเห็นความสัมพันธ์ของสารดังกล่าวแสดงดังสมการ

 $y = 0.0013x^3 - 0.0785x^2 + 1.7554x + 3.083$

โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงออกมาในรูปแบบสมการมการโพลิโนเมียล มีค่า R² =

0.9991



ภาพที่ 4.15 แสดงผลการเรืองแสงที่ช่วงความยาวคลื่น 530-700 นาโนเมตรของสารละลายโรดามีน 2 ที่ความเข้มข้น 10⁻⁴ โมลาร์ ผสมสารละลายคอปเปอร์ที่ความเข้มข้นดังนี้ 0, 10, 30, 50, 70, 100, 150, 170, 200, 230 และ 250 ไมโครโมลาร์ ตามลำดับ



ภาพที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของคอปเปอร์ที่ผสมกับสารละลายโรดา มีนกับความเข้มของการเรืองแสงของโรดามีน 2

4.4.2 เซนเซอร์รูปแบบของแข็ง

การวัดสีของเซนเซอร์ในรูปแบบของแข็งจะวัดผลโดยอ้างอิงระบบสี CIE L*a*b* โดยค่า L* แสดงถึงค่าความสว่างของสี (lightness) ซึ่งเป็นการสะท้อนของแสง โดยเริ่มจากความ สว่างน้อยไปจนถึงสว่างมากมีค่าตั้งแต่ 0-100 ค่า a* แสดงถึงค่าสีที่ปรากฏในการมองเห็นว่ามี แนวโน้มเป็นสีใด โดยถ้ามีค่า a* เป็นลบแสดงว่ามีแนวโน้มสีค่อนไปทางสีแดงและเมื่อมีค่า a* lป ทางบวกแสดงว่ามีแนวโน้มสีค่อนไปทางสีเขียว และสุดท้ายค่า b* แสดงถึงค่าสีที่ปรากฏในการ มองเห็นว่ามีแนวโน้มในโทนสีเหลืองและเขียว ถ้ามีค่า b* เป็นลบแสดงว่ามีแนวโน้มสีค่อนไปทางสี เหลืองและเมื่อมีค่า b* เป็นบวกแสดงว่ามีแนวโน้มสีค่อนไปทางสีน้ำเงิน นอกจากนี้ยังมีการวัดค่า ความแตกต่างของสี โดยเทียบกับสีของวัสดุตัวอย่าง โดยนำค่า L*a*b* ของวัสดุตั้งต้นมาคำนวณ เทียบกับค่า L*a*b* ของวัสดุที่เปลี่ยนไป ค่าความแตกต่างของสีจะแสดงได้ในรูปของค่า ∆E* มีสูตร การคำนวณหาดังสมการต่อไปนี้

$\Delta E^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{0.5}$

โดยถ้ามีค่า ∆E* มากแสดงว่ามีการความแตกต่างของสีที่ปรากฏมากขึ้น ซึ่งค่าดังกล่าว สามารถนำไปใช้เปรียบเทียบได้ว่าสีของตัวอย่างมีความแตกต่างจากสีอ้างอิงเพียงใด และตัวอย่างใดมี ความแตกต่างของสีมากกว่ากัน

นอกจากนี้แล้วยังมีค่า K/S ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากเครื่องวัดสี โดยเป็นค่าที่บอกถึงความเข้มสี ของชิ้นตัวอย่าง โดยเมื่อสีมีความเข้มมากขึ้นจะมีค่า K/S ที่สูงขึ้น

4.4.2.1 เซนเซอร์จากเซลลูโลสผสมโรดามีน 2(1) ผ้าฝ้ายทอขัด

ทดลองโดยใช้ชิ้นตัวอย่างผ้าฝ้ายทอขัดเคลือบสารโรดามีน 2 แช่ลงในสารละลายคอป เปอร์(II)คลอไรด์ที่ความเข้มข้น 10⁻⁵, 5×10⁻⁵, 10⁻⁴, 5×10⁻⁴, 10⁻³, 5×10⁻³ และ 10⁻² โมลาร์ ทิ้งไว้ 5 นาที จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างออกมาทำให้แห้งแล้วนำไปวัดค่าสี

ตาราง	ที่ 4.1 แล	สดงผ	ลการวัด	ค่าสีขอ	งผ้าฝ้า	ยทอขั	ดเคลื่อบ	สารโรดาม์	ว ้ น 2 ใน _ร ุ	รูปแบบข	องค่	า CIE L*a*b	*
, ∆E*	และค่า	K/S	ที่แช่ลง์	ในสารส	าะลาย	Cu ²⁺	เข้มข้น	10 ⁻⁵ -10 ⁻²	์ โมลาร์	(Blank	คิอ	ผ้าฝ้ายทอขั	ด
เคลื่อเ	เสารโรด	ามีน	2 จุ่มน้ำ	ปราศจ′	ากไออ	อน)							

ตัวอย่าง	L*	a*	b*	ΔE*	K/S
Blank	89.82	5.00	-2.01	-	0.107
1×10 ⁻⁵ M	79.17	17.93	-11.37	19.19	0.330
5x10 ⁻⁵ M	78.98	18.94	-11.45	20.03	0.366
1×10 ⁻⁴ M	76.32	21.00	-13.07	23.68	0.409
5×10 ⁻⁴ M	75.24	22.55	-13.69	25.64	0.495
1x10 ⁻³ M	70.55	26.10	-16.67	32.12	0.696
5x10 ⁻³ M	68.04	28.82	-16.19	35.26	0.788
1x10 ⁻² M	66.27	30.41	-15.96	37.35	0.918

จากตารางที่ 4.1แสดงผลของค่าสีที่วัดได้จากผ้าฝ้ายตัวอย่างที่เคลือบด้วยสารละลายโร

ดามีน 2 โดยแสดงในรูปแบบของค่า CIE L*a*b* จะเห็นได้ว่าตัวอย่างตั้งต้นที่แช่น้ำปราศจากไอออน จะไม่เปลี่ยนสี แต่ชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการจุ่มสารละลายคอปเปอร์จะเปลี่ยนเป็นสีชมพู โดยค่า L* (ความ สว่าง) จะลดลง ค่าของ a* นั้นมีค่าเป็นบวกเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าชิ้นตัวอย่างมีสีแดงมากขึ้น และใน ค่า b* พบว่ามีค่าติดลบมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าผ้าฝ้ายชิ้นตัวอย่างมีความเป็นสีน้ำเงินเพิ่มมากขึ้นเมื่อ เทียบกับผ้าฝ้ายที่ไม่ได้ผ่านการแช่สารละลายคอปเปอร์ และในส่วนค่าความแตกต่างสีระหว่างผ้าฝ้าย ที่ไม่จุ่มสารละลายคอปเปอร์กับผ้าที่จุ่มสารละลายคอปเปอร์ แสดงได้ในรูปของค่า △E* โดยให้สีของ ผ้าฝ้ายที่ไม่ได้ผ่านการจุ่มสารละลายคอปเปอร์เป็นสีอ้างอิง พบว่าผ้าฝ้ายชิ้นตัวอย่างนั้นมีความ แตกต่างกันอยู่ที่ 19.19 และมีค่าความแตกต่างที่เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ที่ นำมาแช่ โดยความแตกต่างสูงสุดที่ความเข้มข้น 10⁻² โดยมีค่าอยู่ที่ 37.35 และค่า K/S แสดงว่ามี ความเข้มที่เพิ่มขึ้น โดยมีความเข้มสูงสุดอยู่ที่ 0.918 ของความเข้มข้นคอปเปอร์ที่ 10⁻² จากผล ดังกล่าวในตารางแสดงให้เห็นว่าเซนเซอร์ของแข็งที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจความเข้มข้นของคอปเปอร์ ไอออนได้โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงของสีที่ปรากฏตามที่กล่าวมาในข้างต้นโดยจากค่าสี CIE L*a*b* จะเห็นว่าชิ้นตัวอย่างมีสีปรากฏไปทางสีแดงที่มีสีน้ำเงินผสมอยู่เล็กน้อย และมีความสว่างค่อนข้างมาก เมื่อมองด้วยตาเปล่าจะเห็นเป็นสีชมพูอมแดง ดังภาพที่ 4.17



ภาพที่ 4.17 แสดงภาพชิ้นตัวอย่างของเซนเซอร์ผ้าฝ้ายทอขัดผสมโรดามีน 2 ที่ผ่านการจุ่มสารละลาย คอปเปอร์เข้มข้น 0, 10⁻⁵, 5×10⁻⁵, 10⁻⁴, 5×10⁻⁴, 10⁻³, 5×10⁻³ และ 10⁻² โมลาร์ ตามลำดับ

(2) กระดาษเซลลูโลสอัด

ทดลองโดยใช้ชิ้นตัวอย่างกระดาษเซลลูโลสอัดเคลือบด้วยสารละลายโรดามีน 2 แช่ลงในสารละลายคอปเปอร์(II)คลอไรด์ที่ความเข้มข้น 10⁻⁵, 5×10⁻⁵, 10⁻⁴, 5×10⁻⁴, 10⁻³, 5×10⁻³ และ 10⁻² โมลาร์ ทิ้งไว้ 5 นาทีแล้ว จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างออกมาทำให้แห้งแล้วนำไปวัดค่าสี

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการแสดงผลการวัดค่าสีของกระดาษเซลลูโลสอัดเคลือบสารโรดามีน 2 ใน รูปแบบของค่า CIE L*a*b* , ∆E* และค่า K/S ที่แช่ลงในสารละลาย Cu²⁺ เข้มข้น 10⁻⁵-10⁻² โมลาร์ (Blank คือ กระดาษเซลลูโลสเคลือบสารโรดามีน 2 จุ่มน้ำปราศจากไอออน)

ตัวอย่าง	L*	a*	b*	∆E*	K/S
Blank	87.47	26.91	2.91	-//	0.136
1×10 ⁻⁵ M	83.16	15.63	-7.73	17.14	0.374
5x10 ⁻⁵ M	78.15	20.82	-9.76	23.84	0.716
1×10 ⁻⁴ M	75.68	23.55	-11.14	27.61	0.993
5×10 ⁻⁴ M	74.93	25.13	-12.28	29.69	1.108
1×10 ⁻³ M	71.94	28.35	-14.50	34.51	1.595
5x10 ⁻³ M	69.00	30.39	-15.48	37.81	1.844
1×10 ⁻² M	66.47	34.50	-16.25	42.41	2.604

จากตารางที่ 4.2 แสดงผลของค่าสีที่วัดได้จากกระดาษเซลลูโลสอัดที่เคลือบด้วย สารละลายโรดามีน 2 โดยแสดงในรูปแบบของค่า CIE L*a*b* จะเห็นได้ว่าตัวอย่างตั้งต้นที่แช่น้ำ ปราศจากไอออนจะไม่เปลี่ยนสีแต่ขึ้นตัวอย่างที่ผ่านการจุ่มสารละลายคอปเปอร์จะเปลี่ยนเป็นสีชมพู โดยค่า L* (ความสว่าง) จะลดลง ค่าของ a* นั้นมีค่าเป็นบวกเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าชิ้นตัวอย่างมีส แดงมากขึ้น และในค่า b* พบว่ามีค่าติดลบมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าชิ้นตัวอย่างมีความเป็นสีน้ำเงินเพิ่ม มากขึ้นเมื่อเทียบกับกระดาษเซลลูโลสอัดที่ไม่ได้ผ่านการแข่สารละลายคอปเปอร์ และในส่วนค่าความ แตกต่างสีระหว่างกระดาษเซลลูโลสอัดที่ไม่ดุ่มสารละลายคอปเปอร์กับกระดาษเซลลูโลสอัดที่ลุ่ม สารละลายคอปเปอร์ แสดงได้ในรูปของค่า △E* โดยให้สีของกระดาษเซลลูโลสอัดที่ไม่ได้ผ่านการจุ่ม สารละลายคอปเปอร์ แสดงได้ในรูปของค่า △E* โดยให้สีของกระดาษเซลลูโลสอัดที่ไม่ได้ผ่านการจุ่ม สารละลายคอปเปอร์ แสดงได้ในรูปของค่า △E* โดยให้สีของกระดาษเซลลูโลสอัดที่ไม่ได้ผ่านการจุ่ม สารละลายคอปเปอร์ แสดงได้ในรูปของค่า △E* โดยให้สีของกระดาษเซลลูโลสอัดที่ไม่ได้ผ่านการจุ่ม สารละลายคอปเปอร์เป็นสีอ้างอิง พบว่ากระดาษเซลลูโลสอัดชิ้นตัวอย่างนั้นมีความแตกต่างกันอยู่ที่ 17.14 และมีค่าความแตกต่างที่เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ที่นำมาแช่ โดย ความแตกต่างสูงสุดที่ความเข้มข้น 10⁻² โดยมีค่าอยู่ที่ 42.41 และค่า K/S แสดงว่ามีความเข้มที่เพิ่มขึ้น โดยมีความเข้มสูงสุดอยู่ที่ 2.604 ของความเข้มข้นคอปเปอร์ที่ 10⁻² จากผลดังกล่าวในตารางแสดงให้ เห็นว่าเซนเซอร์ของแข็งที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจความเข้มข้นของคอปเปอร์ไอออนได้โดยจะมีการ เปลี่ยนแปลงของสีที่ปรากฏตามที่กล่าวมาในข้างต้นโดยจากค่าสี CIE L*a*b* จะเห็นว่าชิ้นตัวอย่างมีสี ปรากฏไปทางสีแดงที่มีสีน้ำเงินผสมอยู่เล็กน้อย และมีความสว่างค่อนข้างมาก เมื่อมองด้วยตาเปล่าจะ เห็นเป็นสีชมพูอมม่วง ดังภาพที่ 4.18



ภาพที่ 4.18 แสดงภาพชิ้นตัวอย่างของเซนเซอร์กระดาษอัดผสมโรดามีน 2 ที่ผ่านการจุ่มสารละลาย คอปเปอร์เข้มข้น 0, 10⁻⁵, 5×10⁻⁵, 10⁻⁴, 5×10⁻⁴, 10⁻³, 5×10⁻³ และ 10⁻² โมลาร์ ตามลำดับ

(3) แบคทีเรียเซลลูโลส

ทดลองโดยนำชิ้นตัวอย่างของแบคทีเรียเซลลูโลสผสมสารโรดามีน 2 แช่ลงใน สารละลายคอปเปอร์(II)คลอไรด์ที่ความเข้มข้น 10⁻⁵, 5×10⁻⁵, 10⁻⁴, 5×10⁻⁴, 10⁻³, 5×10⁻³ และ 10⁻² โมลาร์ ทิ้งไว้ 5 นาทีแล้วสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลง จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างออกมาทำให้แห้งแล้วนำไป วัดค่าสี

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการแสดงผลการวัดค่าสีของแบคทีเรียเซลลูโลสผสมสารโรดามีน 2 ในรูปแบบ ของค่า CIE L*a*b* , ∆E* และค่า K/S ที่แช่ลงในสารละลาย Cu²⁺ เข้มข้น 10⁻⁵-10⁻² โมลาร์ (Blank คือ แบคทีเรียเซลลูโลสผสมสารโรดามีน 2 จุ่มน้ำปราศจากไอออน)

ตัวอย่าง	L*	a*	b*	ΔE*	K/S
Blank	90.97	-0.08	0.94	-	0.154
1x10 ⁻⁵ M	76.30	18.50	-1.63	16.92	0.693
5x10 ⁻⁵ M	72.88	23.90	-6.67	24.35	1.124
1×10 ⁻⁴ M	70.82	26.25	-6.71	27.33	1.411
5x10 ⁻⁴ M	68.37	29.69	-9.48	32.21	1.938
1x10 ⁻³ M	66.34	30.87	-10.68	34.68	2.326
5x10 ⁻³ M	63.80	31.57	-11.63	37.12	2.801
1×10 ⁻² M	54.26	18.15	-16.53	39.55	3.663

จากตารางที่ 4.3 แสดงผลของค่าสีที่วัดได้จากแบคทีเรียเซลลูโลสที่ผสมสารละลายโร ดามีน 2 โดยแสดงในรูปแบบของค่า CIE L*a*b* จะเห็นได้ว่าตัวอย่างตั้งต้นที่แช่น้ำปราศจากไอออน จะไม่เปลี่ยนสีแต่ชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการจุ่มสารละลายคอปเปอร์จะเปลี่ยนเป็นสีชมพู โดยค่า L* (ความ สว่าง) จะลดลง ค่าของ a* นั้นมีค่าเป็นบวกเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าชิ้นตัวอย่างมีสีแดงมากขึ้น และใน ค่า b* พบว่ามีค่าติดลบมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าชิ้นตัวอย่างมีความเป็นสีน้ำเงินเพิ่มมากขึ้นเมื่เทียบกับ ผ้าฝ้ายที่ไม่ได้ผ่านการแช่สารละลายคอปเปอร์ และในส่วนค่าความแตกต่างสีระหว่างแบคทีเรีย เซลลูโลสที่ไม่จุ่มสารละลายคอปเปอร์กับแบคทีเรียเซลลูโลสที่จุ่มสารละลายคอปเปอร์ แสดงได้ในรูป ของค่า ΔE* โดยให้สีของแบคทีเรียเซลลูโลสที่ไม่ได้ผ่านการจุ่มสารละลายคอปเปอร์เป็นสีอ้างอิง พบว่าแบคทีเรียเซลลูโลสชิ้นตัวอย่างนั้นมีความแตกต่างกันอยู่ที่ 16.92 และมีค่าความแตกต่างที่ เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ที่นำมาแช่ โดยความแตกต่างสูงสุดที่ความเข้มข้น 10⁻² โดยมีค่าอยู่ที่ 39.55 และค่า K/S แสดงว่ามีความเข้มที่เพิ่มขึ้น โดยมีความเข้มสูงสุดอยู่ที่ 3.663 ของความเข้มข้นคอปเปอร์ที่ 10⁻² จากผลดังกล่าวในตารางแสดงให้เห็นว่าเซนเซอร์ของแข็งที่ พัฒนาขึ้นสามารถตรวจความเข้มข้นของคอปเปอร์ไอออนได้โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงของสีที่ปรากฏ ตามที่กล่าวมาในข้างต้นโดยจากค่าสี CIE L*a*b* จะเห็นว่าชิ้นตัวอย่างมีสีปรากฏไปทางสีแดงที่มีสีน้ำ เงินผสมอยู่เล็กน้อย และมีความสว่างค่อนข้างมาก เมื่อมองด้วยตาเปล่าจะเห็นเป็นสีชมพูอมม่วง โดย ดูได้จากภาพถ่ายตัวอย่างแบคทีเรียเซลลูโลสตามภาพที่ 4.19



ภาพที่ 4.19 แสดงภาพชิ้นตัวอย่างของเซนเซอร์แบคทีเรียเซลลูโลสผสมโรดามีน 2 ที่ผ่านการจุ่ม สารละลายคอปเปอร์เข้มข้น 0, 10⁻⁵, 5×10⁻⁵, 10⁻⁴, 5×10⁻⁴, 10⁻³, 5×10⁻³ และ 10⁻² โมลาร์ ตามลำดับ

4.4.2.2 เซนเซอร์ซอยโปรตีนไอโซเลทผสมโรดามีนบี 3

ทดลองโดยใช้ชิ้นตัวอย่างซอยโปรตีนไอโซเลทผสมโรดามีนบี 3 แช่ลงในสารละลายคอป เปอร์(II)คลอไรด์ที่ความเข้มข้น 1×10⁻⁵, 5×10⁻⁵, 10⁻⁴, 5×10⁻⁴, 10⁻³ และ1.5×10⁻³ โมลาร์ ทิ้งไว้ 5 นาทีแล้วสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลง จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างออกมาทำให้แห้งแล้วนำไปวัดค่าสี

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการแสดงผลกา	รวัดค่าสีของซอยโปรตีเ	นไอโซเลทผสมโรดา	มีนบี 3 ในรูปแบบ
ของค่า CIE L*a*b* , ∆E* และค่า K	/S ที่แช่ลงในสารละลาย	ย Cu ²⁺ เข้มข้น 5x1	0 ⁻⁵ -1.5x10 ⁻³ (Blank
คือ ซอยโปรตีนไอโซเลทผสมโรดามีน	บี 3 จุ่มน้ำปราศจากไอ	ออน)	

ตัวอย่าง	L*	a*	b*	∆E*
Blank	61.13	8.86	33.03	-
5x10 ⁻⁵ M	60.87	10.48	13.23	19.86
1×10 ⁻⁴ M	59.69	11.22	12.37	20.84
5×10 ⁻⁴ M	45.63	22.44	3.19	36.26
1×10 ⁻³ M	41.44	22.90	-2.06	42.62
1.5x10 ⁻³ M	39.87	24.36	-3.47	45.00

จากตารางที่ 4.3 แสดงผลของค่าสีที่วัดได้จากซอยโปรตีนไอโซเลทผสมโรดามีนบี 3

โดยแสดงในรูปแบบของค่า CIE L*a*b* จะเห็นได้ว่าตัวอย่างตั้งต้นที่แช่น้ำปราศจากไอออนจะไม่ เปลี่ยนสีแต่ชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการจุ่มสารละลายคอปเปอร์จะเปลี่ยนเป็นสีชมพู โดยค่า L* (ความสว่าง) จะลดลง ค่าของ a* นั้นมีค่าเป็นบวกเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าชิ้นตัวอย่างมีสีแดงมากขึ้น และในค่า b* พบว่ามีค่าติดลบมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าชิ้นตัวอย่างมีความเป็นสีน้ำเงินเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับซอย โปรตีนไอโซเลทที่ไม่ได้ผ่านการแช่สารละลายคอปเปอร์ และในส่วนค่าความแตกต่างสีระหว่างซอย โปรตีนไอโซเลทที่ไม่ได้ผ่านการแช่สารละลายคอปเปอร์ และในส่วนค่าความแตกต่างสีระหว่างซอย โปรตีนไอโซเลทที่ไม่ได้ผ่านการแช่สารละลายคอปเปอร์ และในส่วนค่าความแตกต่างสีระหว่างซอย โปรตีนไอโซเลทที่ไม่จุ่มสารละลายคอปเปอร์กับซอยโปรตีนไอโซเลทที่ไม่ได้ผ่านการจุ่มสารละลายคอปเปอร์ แสดง ได้ในรูปของค่า ΔE* โดยให้สีของซอยโปรตีนไอโซเลทที่ไม่ได้ผ่านการจุ่มสารละลายคอปเปอร์เป็นสี อ้างอิง พบว่าผ้าชิ้นตัวอย่างนั้นมีความแตกต่างกันอยู่ที่ 19.86 และมีค่าความแตกต่างที่เพิ่มขึ้นตาม ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ที่นำมาแช่ โดยความแตกต่างสูงสุดที่ความเข้มข้น 10⁻² โดยมีค่า อยู่ที่ 45.00 จากผลดังกล่าวในตารางแสดงให้เห็นว่าเซนเซอร์ของเข็งที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจความ เข้มข้นของคอปเปอร์ไอออนได้โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงของสีที่ปรากฏตามที่กล่าวมาในข้างต้นโดย จากค่าสี CIE L*a*b* จะเห็นว่าชิ้นตัวอย่างมีสีปรากฏไปทางสีแดงที่มีสีน้ำเงินผสมอยู่เล็กน้อย และมี ความสว่างค่อนข้างมาก เมื่อมองด้วยตาเปล่าจะเห็นเป็นสีชมพูอมม่วง



ภาพที่ 4.20 แสดงภาพชิ้นตัวอย่างของเซนเซอร์โรดามีน 3 ผสมในซอยโปรตีนไอโซเลท ที่ผ่านการจุ่ม สารละลายคอปเปอร์เข้มข้น 5×10⁻⁵, 10⁻⁴, 5×10⁻⁴, 10⁻³ และ 1.5×10⁻³ โมลาร์

โดยการเปลี่ยนแปลงสีที่ปรากฎของเซนเซอร์โรดามีน 3 ผสมในซอยโปรตีนไอโซเลท มี ความเข้มมากขึ้นเช่นเดียวกัน สามารถดูได้จากภาพที่ 4.17 จะเห็นว่าเซนเซอร์ดังกล่าวมีสีเริ่มต้นเป็นสี ออกเหลืองของซอยโปรตีนไอโซเลท เมื่อผ่านการแช่สารละลายคอปเปอร์ความเข้มของสีนั้นมากขึ้น ตามความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ที่เพิ่มขึ้น โดยสีของเซนเซอร์ที่ได้มีลักษณะเป็นสีเฉดสีชม พู ออกแดง โดยที่ความเข้มข้น 5×10⁻⁵ โมลาร์ มีลักษณะสีที่ปรากฏเป็นสีชมพูอ่อนๆ และเป็นสีชมพูเข้ม ขึ้นตามปริมาณของสารละลายคอปเปอร์ที่เข้มข้นขึ้น โดยมีสีเข้มมากสุดที่ความเข้มข้น 1.5×10⁻³ โม ลาร์ โดยสารละลายดังกล่าวมีสีชมพูเข้มจนออกม่วง

4.5 ทดสอบความจำเพาะในการตรวจจับสารโลหะรบกวนอื่นๆ

โดยทำการทดสอบทั้งเซนเซอร์ที่อยู่ใรรูปแบบสารละลายและเซนเซอร์ที่อยู่รูปแบบ ของแข็ง โดยเซนเซอร์ในรูปแบบสารละลายจะทดสอบและวัดค่าด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรเมทรี ด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงของสาร และเซนเซอร์ในรูปแบบของแข็งจะทดสอบและวัดค่าด้วย เครื่องวัดสีและสเปกตรัมแสงแบบสเปกโตรมิเตอร์

4.5.1 เซนเซอร์รูปแบบสารละลาย

4.5.1.1 ผลการดูดกลื่นแสงของสาร

ทำการทดสอบเซนเซอร์โรดามีน 2 ในรูปแบบสารละลายเข้มข้น 10⁻⁴ กับสารละลาย ของสารโลหะรบกวนอื่นๆกับน้ำบริสุทธ์ที่ความเข้มข้น 10⁻⁴ โมลาร์ โดยใช้สารโลหะรบกวนดังนี้ Ba²⁺, Cd²⁺, Co²⁺, Cr²⁺, Hg²⁺, Mg²⁺, Mn²⁺, Pb²⁺, Sn²⁺, Sr²⁺ และ Zn²⁺ รวมถึงสารละลาย Cu²⁺ จากนั้น นำสารทั้งสองมาผสมกันแล้วทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายโรดามีน 2 กับสารละลาย โลหะไอออนต่างๆ





จากภาพที่ 4.21 แถบการดูดกลืนแสงของสารละลายผสมของโรดามีนเข้มข้น 10^{-4} กับสารละลาย Cu²⁺ ที่ความเข้มข้น 10^{-4} โมลาร์ มีความยาวคลื่นที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 560 นาโนเมตร ค่าดูดกลืนแสงเท่ากับ 0.635 ส่วนสารละลายโรดามีน 2 กับสารละลายโลหะไอออน รบกวนอื่นๆนั้น มีการดูดกลืนแสงน้อยมาก น้อยกว่า 0.005 ซึ่งแสดงถึงความจำเพาะของเซนเซอร์โร ดามีน 2 ต่อคอปเปอร์ไอออน โดยแทบจะไม่มีการรบกวนจากไอออนของโลหะอื่นๆอย่าง Ba²⁺, Cd²⁺, Co²⁺, Cr²⁺, Hg²⁺, Mg²⁺, Mn²⁺, Pb²⁺, Sn²⁺, Sr²⁺ และ Zn²⁺ เข้มข้น 10⁻⁴ โมลาร์

4.5.1.2 ผลการเรื่องแสงของสาร



ภาพที่ 4.22 แสดงผลการเรืองแสงที่ช่วง 530-700 นาโนเมตรของสารละลายโรดา มีน 2 เข้มข้น 10⁻⁴ โมลาร์ กับไอออนโลหะชนิด Ba²⁺, Cd²⁺, Co²⁺, Cr²⁺, Cu²⁺, Hg²⁺, Mg²⁺, Mn²⁺, Pb²⁺, Sn²⁺, Sr²⁺ และ Zn²⁺ ที่ความเข้มข้น 10⁻⁴ โมลาร์

จากภาพที่ 4.22 แถบการเรืองแสงของสารละลายผสมของโรดามีน 2 เข้มข้น 10^{-4} กับสารละลาย Cu²⁺ ที่ความเข้มข้น 10^{-4} โมลาร์ มีความยาวคลื่นที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 580 นาโนเมตร ค่าดูดกลืนแสงเท่ากับ 30.52 ส่วนสารละลายโรดามีน 2 กับสารละลายโลหะไอออน รบกวนอื่นๆนั้น มีการดูดกลืนแสงน้อยมากเมื่อเทียบกับการเรืองแสงของคอปเปอร์ ซึ่งแสดงถึง ความจำเพาะของเซนเซอร์โรดามีน 2 ต่อคอปเปอร์ไอออน โดยแทบจะไม่มีการรบกวนจากไอออนของ โลหะอื่นๆอย่าง Ba²⁺, Cd²⁺, Co²⁺, Cr²⁺, Hg²⁺, Mg²⁺, Mn²⁺, Pb²⁺, Sn²⁺, Sr²⁺ และ Zn²⁺ เข้มข้น 10^{-4} โมลาร์

4.5.2 เซนเซอร์รูปแบบของแข็ง

4.5.2.1 เซนเซอร์แบคทีเรียเซลลูโลสผสมโรดามีน 2

โดยศึกษาความจำเพาะของแบคทีเรียเซลลูโลสที่พัฒนาเป็นเซนเซอร์ตรวจวัดคอปเปอร์ ไอออนในสารละลายด้วยโรดามีน 2 ต่อสารละลายของโลหะไอออนอื่นๆอย่าง Ba²⁺, Cd²⁺, Co²⁺, Cr²⁺, Hg²⁺, Mg²⁺, Mn²⁺, Pb²⁺, Sn²⁺, Sr²⁺ และ Zn²⁺ ที่ความเข้มข้น 10⁻² โมลาร์ รวมไปถึง Cu²⁺ ที่ ความเข้มข้น 10⁻² โมลาร์ เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างกันด้วยเครื่องเครื่องวัดสีและสเปกตรัมแสง แบบสเปกโตรมิเตอร์ ซึ่งจะแสดงด้วยค่า L*a*b* , ∆E* และค่า K/S

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการวัดค่าสีของแบคทีเรียเซลลูโลสผสมสารโรดามีน 2 ในรูปแบบของค่า CIE L*a*b* , ∆E* และค่า K/S ที่แช่ลงในสารละลายโลหะไอออนดังนี้ Ba²⁺, Cd²⁺, Co²⁺, Cr²⁺, Cu²⁺, Hg²⁺, Mg²⁺, Mn²⁺, Pb²⁺, Sn²⁺, Sr²⁺ และ Zn²⁺ ที่ความเข้มข้น 10⁻² โมลาร์ (Blank คือ แบคทีเรีย เซลลูโลสผสมสารโรดามีน 2 จุ่มน้ำปราศจากไอออน)

ตัวอย่าง	L*	a*	b*	∆E*	K/S
Blank	83.53	9.59	4.45		0.492
Cu ²⁺	56.80	35.62	-15.01	42.08	3.819
Ba ²⁺	82.52	10.35	2.57	2.27	0.446
Cd ²⁺	84.24	9.35	2.99	1.64	0.426
Co ²⁺	80.60	10.85	5.50	3.36	0.586
Cr ³⁺	82.31	7.32	4.71	2.59	0.492
Hg ²⁺	84.64	8.21	5.02	1.86	0.439
Mg ²⁺	83.35	9.83	1.14	3.33	0.542
Mn ²⁺	84.24	8.90	3.74	1.22	0.433
Pb ²⁺	85.79	7.34	3.44	3.34	0.492
Sn ²⁺	83.16	11.32	2.25	2.83	0.412
Zn ²⁺	83.83	8.42	3.25	1.70	0.329

จากตารางที่ 4.5 แสดงผลของค่าสีที่วัดได้จากแบคทีเรียเซลลูโลสที่ผสมสารโรดา มีน 2 โดยแสดงในรูปแบบของค่า CIE L*a*b* จะเห็นได้ว่าตัวอย่างตั้งต้นที่แช่น้ำปราศจากไอออนจะ ไม่เปลี่ยนสีแต่ชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการจุ่มสารละลายคอปเปอร์จะเปลี่ยนเป็นสีชมพูอย่างเห็นได้ชัด โดยมี ค่า ΔE^* เมื่อเทียบกับตัวอย่างตั้งต้นอยู่ที่ 42.08 ซึ่งเป็นค่าที่สูงมากเมื่อเทียบกับชิ้นตัวอย่างที่แช่ลงใน สารละลายของโลหะไอออนรบกวนอื่นๆ โดยค่า ΔE^* ของโลหะไอออนรบกวนอื่นๆเมื่อเทียบกับชิ้น ตัวอย่างตั้งต้นมีค่าไม่เกิน 3.36 ซึ่งเมื่อเทียบด้วยค่าของของ L* a* b* ก็พบความแตกต่างเพียง เล็กน้อย นอกจากนี้ยังมีค่า K/S แสดงถึงความเข้มที่แตกต่างกันของตัวอย่าง โดยชิ้นตัวอย่างที่จุ่มลง ในน้ำปราศจากไอออนมีความเข้มสีที่ 0.492 ชิ้นตัวอย่างที่จุ่มในสารละลายคอปเปอร์มีค่าความเข้มที่ 3.819 ส่วนที่แช่ลงในสารละลายไอออนอื่นๆนั้นมีค่าความเข้มใกล้เคียงกับชิ้นตัวอย่างเริ่มต้น มีความ ต่างของแต่ละค่าไม่เกิน 0.1 ในขณะที่ในสารละลายคอปเปอร์มีค่าถึง 3.819 ความต่างที่เห็นได้ชัด ข้างต้นช่วยยืนยันให้เห็นว่าเซนเซอร์ดังกล่าวมีความจำเพาะต่อไอออนของคอปเปอร์ โดยแทบจะไม่มี การรบกวนจากไอออนของโลหะอื่นๆอย่าง Ba²⁺, Cd²⁺, Co²⁺, Cr²⁺, Hg²⁺, Mg²⁺, Mn²⁺, Pb²⁺, Sn²⁺, Sr²⁺ และ Zn²⁺เข้มข้น 10⁻⁴ โมลาร์ โดยสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงด้วยตาเปล่าได้ดังภาพที่ 4.23



ภาพที่ 4.23 แสดงภาพชิ้นตัวอย่างของเซนเซอร์แบคทีเรียเซลลูโลสผสมโรดามีน 2 ที่ผ่านการจุ่ม สารละลายไอออนของโลหะอย่าง Ba²⁺, Cu²⁺, Cd²⁺, Co²⁺, Cr²⁺, Hg²⁺, Mg²⁺, Mn²⁺, Pb²⁺, Sn²⁺, Sr²⁺ และ Zn²⁺ เข้มข้น 10⁻⁴ โมลาร์ ตามลำดับ

4.5.2.2 เซนเซอร์ซอยโปรตีนไอโซเลทผสมโรดามีน 3

ศึกษาความจำเพาะของซอยโปรตีนไอโซเลทที่พัฒนาเป็นเซนเซอร์ตรวจวัด คอปเปอร์ไอออนในสารละลายด้วยโรดามีน 3 ต่อโลหะไอออนรบกวนอื่นๆอย่าง Cd²⁺, Co²⁺, และ Hg²⁺ ที่ความเข้มข้น 10⁻² โมลาร์ รวมไปถึง Cu²⁺ ที่ความเข้มข้น 10⁻² โมลาร์ เพื่อเปรียบเทียบความ แตกต่างกันซึ่งจะแสดงด้วยค่า L*a*b* และค่า ∆E*
ตารางที่ 4.6 แสดงผลการวัดค่าสีของซอยโปรตีนไอโซเลทผสมสารโรดามีน 3 ในรูปแบบของค่า CIE L*a*b* และ ∆E* ที่แช่ลงในสารละลายโลหะไอออนดังนี้ Cd²⁺, Co²⁺, Cu²⁺ และ Hg²⁺ ที่ความ เข้มข้น 10⁻² โมลาร์

ตัวอย่าง	L*	а*	b*	∆E*
Blank	63.87	5.50	17.69	-
Cu ²⁺	37.05	19.33	-3.94	38.59
Cd ²⁺	55.13	7.52	19.78	5.38
Co ²⁺	61.12	7.88	16.23	5.61
Hg ²⁺	57.32	7.21	16.66	7.22

จากตารางที่ 4.6 แสดงผลของค่าสีที่วัดได้จากซอยโปรตีนไอโซเลทที่ผสมโรดามีน

3 โดยแสดงในรูปแบบของค่า CIE L*a*b* จะเห็นได้ว่าตัวอย่างตั้งต้นที่แช่น้ำปราศจากไอออนจะไม่ เปลี่ยนสีแต่ขึ้นตัวอย่างที่ผ่านการจุ่มสารละลายคอปเปอร์จะเปลี่ยนเป็นสีชมพูอย่างเห็นได้ชัด โดยมีค่า ΔE^* เมื่อเทียบกับตัวอย่างตั้งต้นอยู่ที่ 38.59 ซึ่งเป็นค่าที่สูงมากเมื่อเทียบกับขึ้นตัวอย่างที่แช่ลงใน สารละลายของโลหะไอออนรบกวนอื่นๆ โดยค่า ΔE^* ของโลหะไอออนรบกวนอื่นๆเมื่อเทียบกับขึ้น ตัวอย่างตั้งต้นมีค่าไม่เกิน 7.22 ซึ่งเมื่อเทียบด้วยค่าของของ L* a* b* ก็พบความแตกต่างเพียง เล็กน้อย จากที่กล่าวมาในข้างต้นช่วยยืนยันให้เห็นว่าเซนเซอร์ดังกล่าวมีความจำเพาะต่อไอออนของ คอปเปอร์ โดยแทบจะไม่มีการรบกวนจากไอออนของโลหะอื่นๆ Cd²⁺, Co²⁺ และ Hg²⁺เข้มข้น 10⁻⁴ โมลาร์

โดยการเปลี่ยนแปลงสีที่ปรากฏของเซนเซอร์โรดามีน 3 ผสมในซอยโปรตีนไอโซเลท สามารถดูได้จากภาพที่ 4.24 จะเห็นว่าชิ้นตัวอย่างของเซนเซอร์ดังกล่าวเมื่อนำไปแช่ลงในสารละลาย โลหะไอออนรบกวน Cd²⁺, Co²⁺ และ Hg²⁺ ที่ความเข้มข้น 10⁻² โมลาร์นั้นมีสีออกเหลืองของซอย โปรตีนไอโซเลท แต่สำหรับชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการแช่สารละลาย Cu²⁺ ที่ความเข้มข้น 10⁻² โมลาร์ ความเข้มของสีที่ได้มีลักษณะเป็นสีเฉดสีชมพูเข้มจนออกม่วง ซึ่งสามารถเห็นความแต่กต่างได้ด้วยตา เปล่าอย่างชัดเจน



ภาพที่ 4.24 แสดงภาพชิ้นตัวอย่างของเซนเซอร์โรดามีน 3 ผสมในซอยโปรตีนไอโซเลท ที่แช่ สารละลายโลหะไอออน Cd²⁺, Co²⁺, Cu²⁺ และ Hg² ที่ความเข้มข้น 10⁻² โมลาร์



ภาพที่ 4.25 แสดงผลการดูดกลืนแสงที่ช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตรของ สารละลายคอปเปอร์ไอออนเข้มข้น 10⁻² โมลาร์ ที่ผ่านการแซ่ผ้าฝ้ายทอขัด กระดาษเซลลูโลสอัด และ แบคทีเรียเซลลูโลสเป็นเวลา 5 นาที

4.6 ทดสอบการยึดติดของเซนเซอร์กับวัสดุรองรับ

การทดสอบการยึดติดของเซนเซอร์กับวัสดุรองรับที่ผสมโรดามีน 2 ซึ่งประกอบด้วย ผ้า ฝ้ายทอขัด กระดาษเซลลูโลสอัด และแบคทีเรียเซลลูโลส โดยนำวัสดุรองรับทั้ง 3 ตัวอย่างมาแช่ลงใน สารละลายคอปเปอร์ไอออนเข้มข้น 10⁻² โมลาร์ ทิ้งไว้ 5 นาที จึงนำชื้นงานออกแล้วเก็บสารละลายที่ ผ่านการแช่ตัวอย่างมาวัดค่าการดูดกลืนแสงของสาร เปรียบเทียบความแตกต่างของการดูดกลืนแสง ของสารที่เปลี่ยนไป

จากภาพที่ 4.25 จะเห็นว่าผลการดูดกลืนแสงที่ช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร ของสารละลายคอปเปอร์ไอออนเข้มข้น 10⁻² โมลาร์ ที่ผ่านการแช่ผ้าฝ้ายทอขัด กระดาษเซลลูโลสอัด และแบคทีเรียเซลลูโลสเป็นเวลา 5 นาที นั้นแทบไม่มีการดูดกลืนแสงที่ตลอดช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร ทั้งที่แช่ลงในสารละลายคอปเปอร์เข้มข้นถึง 10⁻²โมลาร์ จึงแสดงให้เห็นว่าไม่มีโมเลกุล ของสารโรดามีน 2 ที่ชิ้นตัวอย่างทั้ง 3 หลุดออกมาที่สารละลาย

4.7 ลักษณะสัณฐานวิทยา

ผลของลักษณะสัณฐานวิทยานั้นได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ กำลังขยาย 600 เท่าสำหรับผ้าฝ้ายทอขัดและกระดาษเซลลูโลส และ 30000 เท่าสำหรับแบคทีเรีย เซลลูโลส โดยจะศึกษาถึงความแตกต่างของพื้นผิววัสดุ เปรียบเทียบก่อนและหลังการผสมสารโรดามีน 2 ลงในวัสดุรองรับอย่างผ้าฝ้ายทอขัด กระดาษเซลลูโลสอัด และแบคทีเรียเซลลูโลส



4.7.1 ผ้าฝ้ายทอขัด

ภาพที่ 4.26 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของผ้าฝ้ายทอขัดที่กำลังขยาย 600 เท่า (ซ้าย) ก่อนผสมสาร โรดามีน 2, (ขวา) หลังผสมสารโรดามีน 2

ลักษณะสัณฐานวิทยาของผ้าฝ้ายทอขัดจากภาพที่ 4.26 นั้นแสดงให้เห็นถึงพื้นผิวก่อน และหลังการผสมสารโรดามีน 2 ลงในเส้นใย ที่กำลังขยาย 600 เท่าจะเห็นว่าเส้นใยของผ้าฝ้ายทอขัด นั้นมีลักษณะเป็นรูปแบบเส้นใยยาวขนาดสม่ำเสมอ และลักษณะการบิดตัวในรูปแบบคล้ายริบบิ้น โดย มีขนาดประมาณ 16 ไมโครเมตร (วัดในแนวด้านกว้าง) และลักษณะพื้นผิวของเส้นใยก่อนและหลัง การตกแต่งผนึกสารโรดามีน 2 นั้นไม่มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจาก อนุพันธ์โรดามีนที่ผสมลงในเส้นใยนั้นเป็นสารโมเลกุลเล็กที่สามารถกระจายตัวได้อย่างทั่วถึงและไม่ เกาะตัวเป็นกลุ่มก้อน

4.7.2 กระดาษเซลลูโลสอัด



ภาพที่ 4.27 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของกระดาษเซลลูโลสอัดที่กำลังขยาย 600 เท่า (ซ้าย) ก่อน ผสมสารโรดามีน 2, (ขวา) หลังผสมสารโรดามีน 2

ลักษณะสัณฐานวิทยาของกระดาษเซลลูโลสอัดจากภาพที่ 4.27 นั้นแสดงให้เห็นถึง พื้นผิวก่อนและหลังการผสมสารโรดามีน 2 ลงในเส้นใย ที่กำลังขยาย 600 เท่าจะเห็นว่ากระดาษ เซลลูโลสอัดนั้นมีลักษณะเป็นรูปแบบเส้นใยแบนยาวกระจายตัวทับซ้อนกันเป็นชั้นเต็มพื้นที่ โดยมี ขนาดของเส้นใยประมาณ 10-13 ไมโครเมตร และลักษณะพื้นผิวของเส้นใยก่อนและหลังการตกแต่ง ผนึกสารโรดามีน 2 นั้นโดยไม่มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากอนุพันธ์โรดา มีนที่ผสมลงในเส้นใยนั้นเป็นสารโมเลกุลเล็กที่สามารถกระจายตัวได้อย่างทั่วถึงและไม่เกาะตัวเป็น กลุ่มก้อน

4.7.3 แบคทีเรียเซลลูโลส



ภาพที่ 4.28 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของแบคทีเรียเซลูลโสที่กำลังขยาย 30000 เท่า (ซ้าย) ก่อน ผสมสารโรดามีน 2, (ขวา) หลังผสมสารโรดามีน 2

ลักษณะสัณฐานวิทยาของแบคทีเรียเซลลูโลส จากภาพที่ 4.28 นั้นแสดงให้เห็นถึงพื้นผิว ก่อนและหลังการผสมสารโรดามีน 2 ลงในแบคทีเรียเซลลูโลส ที่กำลังขยาย 30000 เท่าจะเห็นว่าเส้น ใยของแบคทีเรียเซลลูโลสนั้นมีลักษณะเป็นเส้นใยยาวขนาดสม่ำเสมอกระจายตัวคล้ายใยแมงมุมทับ ซ้อนกันทั่วบริเวณ โดยมีขนาดของเส้นใยประมาณ 8-10 นาโนเมตร และลักษณะพื้นผิวของเส้นใย ก่อนและหลังการตกแต่งผนึกสารโรดามีน 2 นั้นมีความแตกต่างกันโดยสังเกตเห็นการปกคลุมของสาร อนุพันธ์โรดามีนบนเส้นใยและช่องว่างระหว่างเส้นใย

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้สังเคราะห์อนุพันธ์ของโรดามีนเป็นเซนเซอร์เปลี่ยนแสงทางเคมีเพื่อ พัฒนาเป็นตัวตรวจวัดคอปเปอร์ไอออนที่ ในรูปแบบของแข็งที่สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลง เบื้องต้นได้ด้วยตาเปล่า โดยนำอนุพันธ์ที่สังเคราะห์ได้มาผสมลงในเส้นใยเซลลูโลสรูปแบบต่างๆอย่าง ผ้าฝ้ายทอขัด กระดาษอัดเซลลูโลส แบคทีเรียเซลลูโลส รวมไปถึงซอยโปรตีนไอโซเลท โดยใช้ผนึกด้วย ความร้อนให้สารสังเคราะห์ยึดติดอยู่ในวัสดุรองรับ จากนั้นทำการศึกษาสมบัติของเซนเซอร์ที่ สังเคราะห์ทั้งในรูปแบบสารละลายและของแข็ง และสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

5.1.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลแสดงให้เห็นว่าสามารถสังเคราะห์อนุพันธ์ของ โรดามีนได้ตามต้องการ

5.1.2 ผลการทดสอบสภาวะที่เหมาะสมในการใช้งานเซนเซอร์ พบว่าช่วงที่เหมาะสม สำหรับใช้ในการทดสอบคือช่วง pH 5-9 และจะเห็นการเปลี่ยนแปลงที่ชัดที่สุดที่ pH 6

5.1.3 ผลการทดสอบหาอัตราส่วนการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของเซนเซอร์กับไอออน คอปเปอร์พบว่าอัตราส่วนการทำปฏิกิริยาของสารโรดามีน 2 กับไอออนของคอปเปอร์คือ 1:1

5.1.4 ผลการทดสอบความสามารถในการตรวจวัดไอออนคอปเปอร์

5.1.4.1 เซนเซอร์รูปแบบสารละลาย

ผลการดูดกลืนแสงที่ช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตรของสารละลายโรดามีน 2 ที่ความเข้มข้น 10⁻⁴ โมลาร์ ผสมสารละลายไอออนคอปเปอร์ที่ความเข้มข้นต่างๆ พบว่าการดูดกลืน แสงของสารละลายนั้นสูงขึ้นเป็นเชิงเส้นกับความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ มีการดูดกลืนแสง สูงสุดที่ความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร โดยทุกความเข้มข้นให้รูปแบบของสเปกตรัมที่ความคล้ายคลึง กัน และการเปลี่ยนแปลงสีที่เกิดขึ้นสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า

5.1.4.1 เซนเซอร์รูปแบบของแข็ง

ผลการวัดค่าสีของขึ้นตัวอย่างในระบบค่า CIE L*a*b* , ∆E* และค่า K/S แสดงให้เห็น ว่าเซนเซอร์ของแข็งที่พัฒนาขึ้นทั้ง 3 แบบ ได้แก่ ผ้าฝ้ายทอขัด กรดดาษอัดเซลลูโลส แบคทีเรีย เซลลูโลส สามารถตรวจวัดความเข้มข้นของไอออนคอปเปอร์ได้โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงของสีไปทาง สีแดง โดยสามารถตรวจวัดได้ในช่วงความเข้มข้น 10⁻⁵-10⁻² โมลาร์ และสำหรับชิ้นตัวอย่างจากซอย โปรตีนไอโซเลทผสมสารโรดามีน 3 นั้นมีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน โดยสามารถตรวจวัด ได้ในช่วง 5×10⁻⁵-1.5×10⁻³ โมลาร์

5.1.5 ทดสอบความจำเพาะในการตรวจจับสารโลหะรบกวนอื่นๆ5.1.4.1 เซนเซอร์รูปแบบสารละลาย

ผลการการดูดกลืนแสงที่ช่วง 400-700 นาโนเมตรของสารละลายโรดามีน 2 เข้มข้น 10^{-4} ผสมกับสารละลายไอออนของโลหะรบกวนเข้มข้น 10^{-4} โมลาร์ ดังนี้ Ba²⁺, Cd²⁺, Co²⁺, Cr²⁺, Cu²⁺, Hg²⁺, Mg²⁺, Mn²⁺, Pb²⁺, Sn²⁺, Sr²⁺ และ Zn²⁺ แสดงให้เห็นว่าสารละลายโรดามีน 2 มี ความจำเพาะเจาะจงต่อ Cu²⁺

5.1.4.1 เซนเซอร์รูปแบบของแข็ง

ผลการวัดค่าสีของชิ้นตัวอย่างเซลลูโลสผสมสารโรดามีน 2 ในรูปแบบของค่า CIE L*a*b* , ∆E* และค่า K/S ที่แช่ลงในสารละลายโลหะไอออนดังนี้ Ba²⁺, Cd²⁺, Co²⁺, Cr²⁺, Cu²⁺, Hg²⁺, Mg²⁺, Mn²⁺, Pb²⁺, Sn²⁺, Sr²⁺ และ Zn²⁺ ที่ความเข้มข้น 10⁻² โมลาร์ พบว่าเซนเซอร์ดังกล่าว มีความจำเพาะเจาะจงต่อไอออนของคอปเปอร์ จากโลหะรบกวนข้างต้น และในซอยโปรตีนไอโซเลท ชิ้นตัวอย่างที่ผสมสารโรดามีน 3 มีความจำเพาะเจาะจงต่อไอออนของคอปเปอร์ จากโลหะรบกวน ต่อไปนี้ Cd²⁺, Co²⁺ และ Hg²⁺

5.1.6 ทดสอบการยึดติดของเซนเซอร์กับวัสดุรองรับ

ผลการดูดกลืนแสงที่ช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตรของสารละลายคอป เปอร์ไอออนเข้มข้น 10⁻² โมลาร์ ที่ผ่านการแช่ผ้าฝ้ายทอขัด กระดาษเซลลูโลสอัด และแบคทีเรีย เซลลูโลสเป็นเวลา 5 นาที แสดงให้เห็นว่าไม่มีโมเลกุลของสารโรดามีน 2 ที่ชิ้นตัวอย่างทั้ง 3 หลุด ออกมาที่สารละลาย

5.1.7 ลักษณะสัณฐานวิทยา

ผลของลักษณะสัณฐานวิทยานั้นได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เปรียบเทียบพื้นผิวก่อนและหลังการผสมสารโรดามีน 2 ลงในวัสดุรองรับ ที่กำลังขยาย 600 เท่า ของ ผ้าฝ้ายทอขัด และกระดาษเซลลูโลสอัด แสดงให้เห็นว่าการผสมสารโรดามีน 2 นั้นไม่ส่งผลต่อลักษณะ สัณฐานวิทยาของวัสดุรองรับทั้งสอง และที่กำลังขยาย 30000 เท่าพบว่ามีการปกคลุมของสารอนุพันธ์ โรดามีนบนเส้นใยและช่องว่างระหว่างเส้นใยของแบคทีเรียเซลลูโลส

5.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัย

5.2.1. อาจศึกษาการเปลี่ยนแปลงสึในช่วงความเข้มข้นของไอออนคอปเปอร์ที่ละเอียด และกว้างมากขึ้น เพื่อนำไปสร้างชาร์ตสำหรับการเทียบสีเพื่อบอกความเข้มข้นของไอออนคอปเปอร์ ในสารละลาย

5.2.1. นอกจากการสร้างชาร์ตเทียบสีอาจใช้การบันทึกผลด้วยกล้องหรือมือถือถ่ายรูป ร่วมกับโปรแกรม ในการบอกความเข้มข้นของไอออนคอปเปอร์ในสารละลาย ซึ่งกล้องและมือถือเป็น อุปกรณ์ที่ใช้งานกันอย่างแพร่หลายและสะดวกต่อการพกพา



รายการอ้างอิง

1. Andreini C, Banci L, Bertini I, Rosato A. Occurrence of copper proteins through the three domains of life: a bioinformatic approach. The Journal of Proteome Research. 2007;7(01):209-16.

2. Dong Q, Liu J, Song L, Shao G. Novel zwitterionic inorganic–organic hybrids: synthesis of hybrid adsorbents and their applications for Cu²⁺ removal. Journal of hazardous materials. 2011;186(2):1335-42.

 Li G, Tao F, Wang H, Li Y, Wang L. A novel reversible colorimetric chemosensor for rapid naked-eye detection of Cu²⁺ in pure aqueous solution. Sensors and Actuators B: Chemical. 2015;211:325-31.

4. Zhang J, Zhang L, Wei Y, Chao J, Shuang S, Cai Z, et al. A selectively rhodaminebased colorimetric probe for detecting copper (II) ion. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 2014;132:191-7.

Yang Z, Zhao Y, Chen S, Bu Y, Zhu X, Du Y, et al. A highly sensitive and selective colorimetric "Off-On" chemosensor for Cu²⁺ in aqueous media based on a rhodamine derivative bearing thiophene group. Sensors and Actuators B: Chemical. 2016;235:414-9.

6. Cheng X, Li Q, Li C, Qin J, Li Z. Azobenzene Based Colorimetric Chemosensors for Rapid Naked Eye Detection of Mercury (II). Chemistry- A European Journal. 2011;17(26):7276-81.

7. Wang W, Wang X, Yang Q, Fei X, Sun M, Song Y. A reusable nanofibrous film chemosensor for highly selective and sensitive optical signaling of Cu $^{2+}$ in aqueous media. Chemical Communications. 2013;49(42):4833-5.

8. Kim HN, Lee MH, Kim HJ, Kim JS, Yoon J. A new trend in rhodamine-based chemosensors: application of spirolactam ring-opening to sensing ions. Chemical Society Reviews. 2008;37(8):1465-72.

 อุปปะ ย. เคมีซุปราโมเลคิวลาร์, เซนเซอร์ทางเคมี. วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราช มงคลศรีวิชัย. 2014;6(2):82-9.

จันทรสุวรรณ ว. การออกแบบเซนเซอร์ทางเคมีสำหรับตรวจวัดไอออนปรอทด้วยตาเปล่า.
 วารสารวิทยาศาสตร มข. 2014;42(4):748-60.

11. Prodi L, Bolletta F, Montalti M, Zaccheroni N. Luminescent chemosensors for transition metal ions. Coordination Chemistry Reviews. 2000;205(1):59-83.

แก้วทอง ช. เคมีซุปราโมเลคิวลาร์; ตัวตรวจวัดไอออนบวกและไอออนลบ. วารสาร
 วิทยาศาสตร์ ม อุบลฯ ฉบับพิเศษ 2011;1:52-9.

13. Bicker KL, Wiskur SL, Lavigne JJ. Colorimetric Sensor Design. Chemosensors: Principles, Strategies, and Applications. 2011:275-95.

14. Zhao M, Yang X-F, He S, Wang L. A rhodamine-based chromogenic and fluorescent chemosensor for copper ion in aqueous media. Sensors and Actuators B: Chemical. 2009;135(2):625-31.

15. Huo F, Wang L, Yin C, Yang Y, Tong H, Chao J, et al. The synthesis, characterization of three isomers of rhodamine derivative and their application in copper (II) ion recognition. Sensors and Actuators B: Chemical. 2013;188:735-40.

16. Xiang Y, Tong A, Jin P, Ju Y. New fluorescent rhodamine hydrazone chemosensor for Cu (II) with high selectivity and sensitivity. Organic Letters. 2006;8(13):2863-6.

17. Zhou Y, Wang F, Kim Y, Kim S-J, Yoon J. Cu²⁺-selective ratiometric and "off-on" sensor based on the rhodamine derivative bearing pyrene group. Organic letters. 2009;11(19):4442-5.

18. Hu Y, Zhang J, Lv Y-Z, Huang X-H, Hu S-l. A new rhodamine-based colorimetric chemosensor for naked-eye detection of Cu²⁺ in aqueous solution. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 2016;157:164-9.

19. Min M, Wang X, Chen Y, Wang L, Huang H, Shi J. Highly sensitive and selective Cu $^{2+}$ sensor based on electrospun rhodamine dye doped poly (ether sulfones) nanofibers. Sensors and Actuators B: Chemical. 2013;188:360-6.

20. Belgacem MN, Gandini A. The surface modification of cellulose fibres for use as reinforcing elements in composite materials. Composite Interfaces. 2005;12(1-2):41-75.

21. Mohsin M, Ahmad SW, Khatri A, Zahid B. Performance enhancement of fire retardant finish with environment friendly bio cross-linker for cotton. Journal of cleaner production. 2013;51:191-5.

22. Seligra PG, Jaramillo CM, Famá L, Goyanes S. Biodegradable and nonretrogradable eco-films based on starch–glycerol with citric acid as crosslinking agent. Carbohydrate polymers. 2016;138:66-74.

23. Lustri WR, de Oliveira Barud HG, da Silva Barud H, Peres MF, Gutierrez J, Tercjak
A, et al. Microbial Cellulose— Biosynthesis Mechanisms and Medical Applications.
Cellulose-Fundamental Aspects and Current Trends: InTech; 2015.

24. Xiao W, Hu H, Huang J. Colorimetric detection of cysteine by surface functionalization of natural cellulose substance. Sensors and Actuators B: Chemical. 2012;171:878-85.

25. Isaad J, El Achari A. Colorimetric sensing of cyanide anions in aqueous media based on functional surface modification of natural cellulose materials. Tetrahedron. 2011;67(26):4939-47.

26. Li J-j, Ji C-h, Hou C-j, Huo D-q, Zhang S-y, Luo X-g, et al. High efficient adsorption and colorimetric detection of trace copper ions with a functional filter paper. Sensors and Actuators B: Chemical. 2016;223:853-60.

27. Esa F, Tasirin SM, Rahman NA. Overview of bacterial cellulose production and application. Agriculture and Agricultural Science Procedia. 2014;2:113-9.

28. Barać MB, Stanojević SP, Jovanović ST, Pešić MB. Soy protein modification: A review. Acta periodica technologica. 2004(35):3-16.

29. Park S, Bae D, Rhee K. Soy protein biopolymers cross-linked with glutaraldehyde. Journal of the American Oil Chemists' Society. 2000;77(8):879-84.

30. Juntaro J, Ummartyotin S, Sain M, Manuspiya H. Bacterial cellulose reinforced polyurethane-based resin nanocomposite: a study of how ethanol and processing pressure affect physical, mechanical and dielectric properties. Carbohydrate polymers. 2012;87(4):2464-9.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวปาณิศา มิลินทานุช
วันเดือนปีเกิด	11 มิถุนายน 2535
ตำแหน่ง	-
ทุนการศึกษา (ถ้ามี)	-

ผลงานทางวิชาการ

เสนอผลงานต่อที่ประชุมวิชาการ ระดับนานาชาติ

The pure and applied Chemistry international conference 2017 (PACCON) ภายใต้ชื่อเรื่อง Colorimetric sensor based on rhodamine derivative-doped soy protein for the detection of copper ions in aqueous solution

ประสบการณ์ทำงาน