



ตัวบ่งชี้การเปลี่ยนสีจากวัสดุผสมระหว่างพอลิไดแอเซทิลีนและซิงค์ออกไซด์
สำหรับประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ตรวจวัดทางเคมี

โดย

ปภาอร สิริบุญบันดาล

คุณิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปรัชญาคุณิพนธ์บัณฑิต (ฟิสิกส์)

สาขาวิชาฟิสิกส์

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ปีการศึกษา 2565

COLORIMETRIC INDICATORS BASED ON POLYDIACETYLENE/
ZINC OXIDE COMPOSITES FOR CHEMOSENSOR APPLICATIONS

BY

PAPAORN SIRIBUNBANDAL



A DISSERTATION SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF PHILOSOPHY (PHYSICS)
DEPARTMENT OF PHYSICS
FACULTY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
THAMMASAT UNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2022

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ดุษฎีนิพนธ์

ของ

ปภาอร สิริบุญบันดาล

เรื่อง

ตัวบ่งชี้การเปลี่ยนสีจากวัสดุผสมระหว่างพอลิไดออกไซด์แอเซทิลีนและซิงค์ออกไซด์
สำหรับประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ตรวจวัดทางเคมี

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (ฟิสิกส์)

เมื่อ วันที่ 25 พฤศจิกายน พ.ศ. 2565

ประธานกรรมการสอบดุษฎีนิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร โอสนาจินทร์)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาดุษฎีนิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เรวัตร ใจสุทธิ)

กรรมการสอบดุษฎีนิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กมล เอี่ยมพนากิจ)

กรรมการสอบดุษฎีนิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรกรณ์ ปรีชาบุรณะ)

กรรมการสอบดุษฎีนิพนธ์

(อาจารย์ ดร.สายัณห์ ผุดวิวัฒน์)

คณบดี

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุเพชร จิรขจรกุล)

หัวข้อคุณสมบัติ	ตัวบ่งชี้การเปลี่ยนสีจากวัสดุผสมระหว่าง
	พอลิไดแอเซทิลีนและซิงค์ออกไซด์สำหรับ
	ประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ตรวจวัดทางเคมี
ชื่อผู้เขียน	ภาอร สิริบุญบันดาล
ชื่อปริญญา	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (ฟิสิกส์)
สาขาวิชา/คณะ/มหาวิทยาลัย	สาขาวิชาฟิสิกส์
	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาดุษฎีนิพนธ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เรวัตร ใจสุทธิ
ปีการศึกษา	2565

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาเซนเซอร์วัดการเปลี่ยนสีด้วยพอลิไดแอเซทิลีน และวัสดุผสมพอลิไดแอเซทิลีนที่มีหมู่ไทโอดและซิงค์ออกไซด์ สำหรับตรวจวัดแอมโมเนียและฟอร์มาลีน การเปลี่ยนสีของเซนเซอร์เชิงปริมาณตรวจวัดด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี และการวิเคราะห์สีจากภาพถ่ายจากโทรศัพท์เคลื่อนที่และเครื่องสแกนเนอร์ เซนเซอร์สารละลาย พอลิไดแอเซทิลีน (PDA) เตรียมจากไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ 10,12-เพนตะโคเซไดอานีนิกแอซิด (PCDA) สำหรับตรวจวัดสารละลายแอมโมเนียในช่วงความเข้มข้น 5 ถึง 200 พีพีเอ็ม ผลการวิจัยพบว่าสารละลาย PDA เปลี่ยนสีจากสีน้ำเงิน เป็นสีม่วงแดง และสีแดง ตามระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียซึ่งสามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนสีได้ด้วยตาเปล่า การตรวจวัดสีเชิงปริมาณด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปีและการวิเคราะห์สีจากภาพถ่ายพบว่าเซนเซอร์เหมาะสมสำหรับวัดแอมโมเนียในช่วงความเข้มข้น 5 ถึง 80 พีพีเอ็ม เนื่องจากให้ความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น และที่ความเข้มข้นมากกว่า 80 พีพีเอ็ม การเปลี่ยนสีของ PDA เริ่มคงที่ ฟิล์มวัสดุผสมระหว่างพอลิไดแอเซทิลีนและซิงค์ออกไซด์ที่อยู่ในตัวกลางพอลิไดเมทิลไซโลเซน (PDA/ZnO/PDMS) เตรียมด้วยกระบวนการผสมและการทำแห้งเพื่อตรวจวัดแก๊สแอมโมเนีย พบการเปลี่ยนสีของฟิล์มจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงอย่างชัดเจนได้ด้วยตาเปล่าตามความเข้มข้นของแก๊สแอมโมเนียที่เพิ่มขึ้นในช่วง 20 ถึง 1000 พีพีเอ็ม และสามารถประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์บอกสถานะการเน่าเสียของเนื้อไก่และเนื้อหมูในบรรจุภัณฑ์ได้ด้วยการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียที่ปลดปล่อยออกมาจากเนื้อสัตว์ นอกจากนี้สารละลายวัสดุผสมระหว่างพอลิไดแอเซทิลีน พอลิไดแอเซทิลีนที่มีหมู่ไทโอดและซิงค์ออกไซด์

(PDA/PDA-SH/ZnO) เตรียมเพื่อตรวจวัดสารละลายฟอร์มาลีน พบว่าเซนเซอร์มีการเปลี่ยนแปลงสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงในช่วงความเข้มข้นของฟอร์มาลีน 200 ถึง 1000 พีพีเอ็ม เซนเซอร์มีความจำเพาะต่อฟอร์มาลีนสูงและมีเสถียรภาพการใช้งานภายใต้การเปลี่ยนแปลงต่อสภาวะความเป็นกรด สมบัติเชิงเซนเซอร์ของเซนเซอร์ทั้งสามกลุ่มพบว่าเซนเซอร์มีการเปลี่ยนแปลงสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงตามการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของสารที่ต้องการวิเคราะห์ เซนเซอร์มีความจำเพาะกับสารทดสอบเป้าหมาย สามารถวิเคราะห์ที่ความเข้มข้นต่ำ มีเสถียรภาพในการใช้งานและเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง เหมาะสำหรับการใช้งานในภาคสนามในสภาพแวดล้อมจริง

คำสำคัญ: เซนเซอร์ที่เปลี่ยนสีได้, พอลิไดแอเซทิลีน, วัสดุผสมของพอลิไดแอเซทิลีนกับซิงค์ออกไซด์

Dissertation Title	COLORIMETRIC INDICATORS BASED ON POLYDIACETYLENE/ZINC OXIDE COMPOSITES FOR CHEMOSENSOR APPLICATIONS
Author	Papaorn Siribunbandal
Degree	Doctor of Philosophy (Physics)
Major Field/Faculty/University	Physics Faculty of Science and Technology Thammasat University
Dissertation Advisor	Assistant Professor Rawat Jaisutti, Ph.D.
Academic Year	2022

ABSTRACT

This research presents the study and development of colorimetric sensors for detecting ammonia and formalin by using polydiacetylene, thiol-functionalized polydiacetylene and zinc oxide nanocomposite. The quantitative color change of the sensor was studied by ultraviolet–visible (UV–vis) spectroscopy and color images taken by smartphone and scanner. Polydiacetylene (PDA) sensors in solution-phase were prepared from the diacetylene monomer 10,12-pentacosadiynoic acid (PCDA) and used to detect ammonia solution in the range of 5 to 200 ppm. It was found that the PDA solution changes from blue to purple and red as the ammonia concentration increases, which was detected by the naked-eye. The sensors exhibited a linear response to ammonia within a range of 5 to 80 ppm, and almost unchanged after the concentration exceeded 80 ppm. Polydiacetylene/zinc oxide nanocomposite-embedded polydimethylsiloxane (PDA/ZnO/PDMS) film was prepared for detecting ammonia gas using mixed and dried process. The sensors show a visible blue to red color change upon increasing ammonia gas concentration in the range of 20 to 1000 ppm. In practical applications, the sensors were successfully applied as colorimetric indicators to determine freshness stages of chicken and pork meats by detecting ammonia gas released from meat spoilage. In addition, thiol-functionalized

polydiacetylene and zinc oxide nanocomposite (PDA/PDA-SH/ZnO) solution were prepared to monitor formalin in the solution. The blue to red color transition was also observed when the sensor was tested with formalin in the range of 200 to 1000 ppm. The sensors show high selective to formalin and good stable under acid pH changed. Sensing properties for three groups of sensors exhibited a color change from blue to red with increasing concentration of the target analyte. Sensors may perform with good selectivity and low-concentration detection with appropriate sensitivity. In addition, sensors were highly stable during long-term storage at room temperature. These results suggest that sensors are suitable for onsite and real-time monitoring of ammonia and formalin in real environment.

Keywords: Colorimetric Sensor, Polydiacetylene, Polydiacetylene/Zinc Oxide Nanocomposites

กิตติกรรมประกาศ

ดุชนิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เรวัตร ใจสุทธิ อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย ผู้แนะแนวทางการคิดในงานวิจัยนี้ขึ้น ถ่ายทอดเทคนิคให้อย่างเต็มที่ ให้คำปรึกษา คำแนะนำและข้อเสนอแนะทั้งด้านวิชาการและการดำเนินงาน ช่วยแนะแนวทางการแก้ปัญหาและอุปสรรคในการทำงาน รวมถึงสนับสนุนทุนการทำวิจัยให้กับผู้วิจัยจนสามารถจัดทำดุชนิพนธ์ให้ลุล่วงสำเร็จได้ด้วยดี ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร โอสถจันทร์ อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ประธานกรรมการสอบงานวิจัย ที่เมตตาผู้วิจัยตลอดมา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กมล เอี่ยมพนากิจ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปกรณ์ ปรีชาบุรณะ และอาจารย์ ดร.สายัณห์ ผดุงวัฒน์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ กรรมการสอบงานวิจัย ที่ร่วมให้แนวคิดและชี้แนะแนวทางในการปรับปรุงงานวิจัยนี้ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัลยา เอื้อประเสริฐศักดิ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ทวี ภูมิอ้อย รองศาสตราจารย์ มนุ เพ็ญพุ่ม และ ดร.จารุณี ตันติเวชวุฒิกุล ที่คอยสนับสนุน ห่วงใย เป็นกำลังใจให้มาโดยตลอด และทำให้ผู้วิจัยตระหนักรู้ว่า จิตวิญญาณของความเป็นครูของคณาจารย์ทุกท่านมีคุณค่าเพียงใด ขอขอบพระคุณ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ สำหรับห้องปฏิบัติการวิจัยนวัตกรรมเซนเซอร์และอุปกรณ์นาโนอิเล็กทรอนิกส์ ในการทำงานวิจัย และขอบคุณบุคคลอื่นอีกมากมายที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จครั้งนี้

ขอขอบพระคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากกองบริหารการวิจัย มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ภายใต้ “ทุนปริญญาเอก เพื่อการวิจัย มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปีการศึกษา 2561” ที่สนับสนุนการศึกษาในระดับปริญญาเอกให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่เป็นแรงบันดาลใจในการศึกษาและนักวิทยาศาสตร์ที่ดี และขอกราบขอบพระคุณครอบครัวสิริบุญบันดาลที่คอยให้การสนับสนุนและเป็นกำลังสำคัญในความพยายามของผู้วิจัย ผู้วิจัยหวังว่า ดุชนิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อวงการวิชาการและวิทยาศาสตร์ไม่มากก็น้อย คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากดุชนิพนธ์ฉบับนี้ผู้วิจัยขอมอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ปภาอร สิริบุญบันดาล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(1)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(3)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญตาราง	(10)
สารบัญภาพ	(11)
รายการสัญลักษณ์และคำย่อ	(17)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 พอลิไดแอเซทิลีน	4
2.1.1 พอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล	5
2.1.2 สมบัติและกลไกการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีน	10
2.1.3 พอลิไดแอเซทิลีนและวัสดุคอมพอสิต	13
2.2 สีที่ถูกต้องและสีที่มองเห็นของวัตถุ	17
2.3 หลักการและเทคนิคในการวิเคราะห์การเปลี่ยนสีของวัสดุ	20

2.3.1 เทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี	20
2.3.2 การวิเคราะห์ทางสีด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี	24
2.3.3 การวิเคราะห์ทางสีจากภาพร่วมกับโปรแกรมประมวลผลภาพ	25
2.4 เซนเซอร์ทางเคมี	28
2.4.1 หลักการของเซนเซอร์ทางเคมี	28
2.4.2 ชนิดของเซนเซอร์ทางเคมี	29
2.4.2.1 เซนเซอร์ทางไฟฟ้า (electronic sensor)	29
2.4.2.2 เซนเซอร์ทางแสง (optical sensor)	29
2.4.3 การออกแบบเซนเซอร์ทางเคมีโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงสี	29
2.5 ระบบวัดสมบัติการตอบสนองต่อแก๊สของเซนเซอร์แก๊สแบบสถิตย	31
บทที่ 3 เซนเซอร์ตรวจวัดสารละลายแอมโมเนียที่เตรียมจากพอลิไดแอเซทิลีนในรูปสารละลาย	33
3.1 บทนำ	33
3.2 วิธีการทดลอง	35
3.2.1 วัสดุและสารเคมี	35
3.2.2 การเตรียมสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนในน้ำปราศจากไอออน	36
3.2.3 การวัดและวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางแสง และสมบัติเชิงเซนเซอร์ของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีน	36
3.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง	40
3.3.1 ผลการเตรียมสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนในน้ำปราศจากไอออน	40
3.3.2 สมบัติเชิงเซนเซอร์ของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีน	44
3.4 สรุปผลการทดลอง	57
บทที่ 4 เซนเซอร์ตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียที่เตรียมจากวัสดุผสมระหว่างพอลิไดแอเซทิลีนและซิงค์ออกไซด์ในรูปฟิล์ม	59
4.1 บทนำ	59

4.2	วิธีการทดลองและวิเคราะห์ผล	61
4.2.1	วัสดุและสารเคมี	61
4.2.2	การเตรียมฟิล์มวัสดุผสมระหว่างพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงค์ออกไซด์/ พอลิไดเมทิลไซโลเซน	61
4.2.3	การวัดและวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงเซนเซอร์ของ ฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงค์ออกไซด์/พอลิไดเมทิลไซโลเซน	63
4.3	ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง	65
4.3.1	ผลการเตรียมฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงค์ออกไซด์/ พอลิไดเมทิลไซโลเซน	65
4.3.2	สมบัติเชิงเซนเซอร์ของฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงค์ออกไซด์/ พอลิไดเมทิลไซโลเซน	68
4.3.3	การประยุกต์ใช้งานฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงค์ออกไซด์/ พอลิไดเมทิลไซโลเซน	80
4.4	สรุปผลการทดลอง	84
บทที่ 5	เซนเซอร์ตรวจวัดสารละลายฟอร์มาลีนที่เตรียมจากวัสดุผสมระหว่าง พอลิไดแอเซทิลีน พอลิไดแอเซทิลีนที่มีหมู่ไทออลและซิงค์ออกไซด์ใน รูปสารละลาย	86
5.1	บทนำ	86
5.2	วิธีการทดลอง	88
5.2.1	วัสดุและสารเคมี	88
5.2.2	การเตรียมสารละลายพอลิไดแอเซทิลีน/พอลิไดแอเซทิลีน ที่มีหมู่ฟังก์ชันนัลไทออล/ซิงค์ออกไซด์	88
5.2.3	การวัดและวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางแสง และ สมบัติเชิงเซนเซอร์ของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีน/ พอลิไดแอเซทิลีนที่มีหมู่ฟังก์ชันนัลไทออล/ซิงค์ออกไซด์	91
5.3	ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง	93
5.3.1	ผลการเตรียมสารละลายพอลิไดแอเซทิลีน/พอลิไดแอเซทิลีน ที่มีหมู่ฟังก์ชันนัลไทออล/ซิงค์ออกไซด์	93

5.3.2 สมบัติเชิงเซนเซอร์ของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีน/ พอลิไดแอเซทิลีนที่มีหมู่ฟังก์ชันนัลไทโอด/ซิงค์ออกไซด์	95
5.4 สรุปผลการทดลอง	106
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	108
6.1 เซนเซอร์ตรวจวัดสารละลายแอมโมเนียที่เตรียมจากพอลิไดแอเซทิลีน ในรูปสารละลาย	108
6.2 เซนเซอร์ตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียที่เตรียมจากวัสดุผสมระหว่าง พอลิไดแอเซทิลีนและซิงค์ออกไซด์ในรูปฟิล์ม	109
6.3 เซนเซอร์ตรวจวัดสารละลายฟอร์มาลีนที่เตรียมจากวัสดุผสมระหว่าง พอลิไดแอเซทิลีน พอลิไดแอเซทิลีนที่มีหมู่ไทโอดและซิงค์ออกไซด์ ในรูปสารละลาย	110
6.4 ข้อเสนอแนะ	111
รายการอ้างอิง	112
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ภาพขั้นตอนการสังเคราะห์อนุพันธ์ของไดแอเซทิลีนที่มีหมู่ไทโอด	130
ภาคผนวก ข ขนาดและการกระจายขนาดอนุภาคของสารละลายวัสดุผสม ระหว่างพอลิไดแอเซทิลีน พอลิไดแอเซทิลีนที่มีหมู่ไทโอดและ ซิงค์ออกไซด์ ด้วยเทคนิคการกระเจิงของแสง	132
ภาคผนวก ค รายละเอียดคุณสมบัติเฉพาะของเครื่องสแกนเนอร์รุ่น Epson Perfection Flatbed Photo Scanner V600 และ V370	134
ภาคผนวก ง รายละเอียดคุณสมบัติเฉพาะของกล้องถ่ายภาพบน โทรศัพท์เคลื่อนที่ ยี่ห้อ iPhone SE (รุ่นที่ 2)	137

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นแสงที่ถูกดูดกลืนกับสีของสารละลาย ที่มองเห็น	20



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ปฏิกิริยาโฟโตพอลิเมอไรเซชันการเติมแบบ 1,4-addition ของไดแอเซทิลีนเมื่อ R แสดงถึงหมู่แอลคิล	4
2.2 โครงสร้างของไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ของ 10,12-เพนตะโคเซไดอายนิก-แอซิด	5
2.3 การเกิดโครงสร้างแบบไบเลเยอร์เวสิเคิล และพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล	6
2.4 ภาพแสดงการเกิดพันธะ π (ก) สภาพก่อนการซ้อนทับกันของออร์บิทัล p_z และ (ข) สภาพภายหลังการซ้อนทับกันของออร์บิทัล p_z	7
2.5 ออร์บิทัลเชิงโมเลกุลในสายโซ่หลักของพอลิไดแอเซทิลีนคอนจูเกตพันธะ π	8
2.6 โครงสร้างแถบพลังงาน และการเปลี่ยนสภาวะ $\pi-\pi^*$ ของสารที่มีคอนจูเกต π -electron	9
2.7 การเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนเมื่อได้รับการกระตุ้นจากสิ่งเร้าต่าง ๆ	10
2.8 ผลของระบบคอนจูเกตพันธะ π ที่มีต่อการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีน	11
2.9 แผนภาพโครงสร้างของพอลิไดแอเซทิลีนแสดงการเตรียมและการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงเมื่อได้รับการกระตุ้นจากสิ่งเร้า	12
2.10 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงและการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนเมื่อถูกกระตุ้นจากสิ่งเร้า แสดง blue shift เนื่องจากอิทธิพลของการคอนจูเกตของพันธะ π	13
2.11 โครงสร้างเวสิเคิลของ (ด้านซ้าย) พอลิไดแอเซทิลีนบริสุทธิ์ในน้ำ และ (ด้านขวา) พอลิไดแอเซทิลีนซิงค์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตในน้ำ	15
2.12 ภาพแสดงพันธะไฮโดรเจนและแรงระหว่างประจุ ระหว่างหมู่คาร์บอกซิล ($-\text{COOH}$) และ หมู่คาร์บอกซิเลตไอออน ($-\text{COO}^-$) ของพอลิไดแอเซทิลีน กับ หมู่ Zn-OH และหมู่ Zn-OH_2^+ บริเวณพื้นผิวของซิงค์ออกไซด์	17
2.13 อันตรกิริยาของแสงกับสารละลาย	18
2.14 แสงที่ตกกระทบและแสงที่สะท้อนออกจากวัสดุสีต่าง ๆ แสดงการมองเห็นวัตถุเป็น (ก) สีแดง และ (ข) สีเขียว	18
2.15 วงล้อสี	19
2.16 แถบสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	20

2.17	แสดงค่าการดูดกลืนแสงเมื่อแสงเคลื่อนผ่านสารละลายที่ชั้นต่าง ๆ	21
2.18	แสดงการเคลื่อนที่ของแสงผ่านสารละลายที่ความเข้มข้นต่างกัน	22
2.19	แผนภาพแสดงแสงเชิงเดี่ยวเมื่อส่องผ่านสารละลายที่สอดคล้องตามกฎของเบียร์และแลมเบิร์ต	23
2.20	(ก) แบบจำลองสีในระบบ RGB และ (ข) การรวมกันของแม่แสงสีทำให้เกิดแสงสีใหม่โดยขึ้นกับอัตราส่วนของ RGB	26
2.21	องค์ประกอบของเซนเซอร์ทางเคมีที่ให้สัญญาณเชิงแสง (optical response sensor)	30
2.22	ตัวอย่างระบบวัดแก๊สแบบสถิติ	31
3.1	ขั้นตอนการเตรียมสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนในน้ำปราศจากไอออน	35
3.2	การจัดการทดลองสำหรับการศึกษาการตอบสนองต่ออุณหภูมิของละลายพอลิไดแอเซทิลีน	37
3.3	การจัดการทดลองสำหรับการวิเคราะห์ทางสีกาภาพเพื่อศึกษาการตอบสนองการเปลี่ยนสีของละลายพอลิไดแอเซทิลีนต่อแอมโมเนีย	39
3.4	(ก) สเปกตรัมการดูดกลืนแสงและสีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีน (ข) การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและสีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนเมื่อทดสอบแอมโมเนีย 100 พีพีเอ็ม	41
3.5	ขนาดและการกระจายขนาดอนุภาคของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีน	42
3.6	ภาพถ่าย SEM ของพอลิไดแอเซทิลีน (ก) ก่อนและ (ข) หลังเติมแอมโมเนีย 100 พีพีเอ็ม	42
3.7	FTIR-ATR ของพอลิไดแอเซทิลีนก่อนและหลังการเติมแอมโมเนีย 100 พีพีเอ็ม	43
3.8	แบบจำลองการเตรียมพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลจาก PCDA และอันตรกิริยาระหว่างพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลและแอมโมเนียมไอออน	44
3.9	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีน (ก) ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เมื่อทดสอบแอมโมเนียความเข้มข้น 100 พีพีเอ็ม (ข) ที่ความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์ ต่อสารทดสอบชนิดต่าง ๆ ที่ความเข้มข้น 1000 พีพีเอ็ม เทียบกับแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 100 พีพีเอ็ม	45
3.10	(ก) สเปกตรัมการดูดกลืนแสง และ (ข) เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนต่อแอมโมเนียความเข้มข้น 100 พีพีเอ็ม ที่ระยะเวลาต่าง ๆ	47

3.11	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีเมื่อเติมแอมโมเนียความเข้มข้น 100 พีพีเอ็ม ของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลา 60 วัน	48
3.12	(ก) สเปกตรัมการดูดกลืนแสง และ (ข) เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนที่อุณหภูมิต่าง ๆ	49
3.13	(ก) สเปกตรัมการดูดกลืนแสง และ (ข) เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนต่อแอมโมเนียความเข้มข้นต่าง ๆ	53
3.14	ค่าพีเอชของสารละลายแอมโมเนียที่ความเข้มข้นในช่วง 5 ถึง 200 พีพีเอ็ม โดยใช้เครื่องวัดค่าความเป็นกรดต่างแบบดิจิตอล	53
3.15	การตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบสของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีน (ก) สเปกตรัมการดูดกลืนแสง และ (ข) เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสี	54
3.16	(ก) สเปกตรัมการดูดกลืนแสง และ (ข) เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีน ต่อสารทดสอบชนิดต่าง ๆ ที่ค่าพีเอช 9.8	55
3.17	(ก) ภาพการเปลี่ยนแปลงสีที่ได้จากเครื่องสแกนเนอร์ (ข) ค่าอัตราส่วนของการเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนต่อแอมโมเนียความเข้มข้นต่าง ๆ	56
4.1	ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีนซิงค์ออกไซด์และพอลิไดเมทิลไซโลเซน	63
4.2	การจัดการทดลองสำหรับการวิเคราะห์ทางสีจากรูปภาพ (ก) ด้วยเครื่องสแกนเนอร์ และ (ข) ด้วยกล้องถ่ายภาพบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ เพื่อศึกษาการตอบสนองการเปลี่ยนสีของฟิล์มต่อแก๊สแอมโมเนียและแก๊สทดสอบชนิดต่าง ๆ	64
4.3	แบบจำลองการเตรียมฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงค์ออกไซด์/พอลิไดเมทิลไซโลเซนและอันตรกิริยาระหว่างฟิล์มและแก๊สแอมโมเนีย	66
4.4	สีของฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงค์ออกไซด์/พอลิไดเมทิลไซโลเซน ก่อนและหลังทดสอบกับแก๊สแอมโมเนีย 1000 พีพีเอ็ม	66
4.5	FTIR-ATR ของพอลิไดแอเซทิลีนและวัสดุผสมระหว่างพอลิไดแอเซทิลีนกับซิงค์ออกไซด์	68
4.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าอัตราส่วนของการเปลี่ยนสีของฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงค์ออกไซด์/พอลิไดเมทิลไซโลเซน (ก) (ค) ที่มีต่อแก๊สแอมโมเนียความเข้มข้น 200 พีพีเอ็ม (ข) (ง) ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิโดยรอบในช่วงเวลา 30 วัน ด้วยภาพที่ได้จากเครื่องสแกนเนอร์และจากกล้องถ่ายภาพบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ตามลำดับ	69

- 4.7 การเปลี่ยนสีของฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงค์ออกไซด์/พอลิไดเมทิลไซโลเซนที่ได้จากเครื่องสแกนเนอร์เมื่อผ่านการให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 27 ถึง 150 องศาเซลเซียส และเมื่อกลับสู่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส 71
- 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าอัตราส่วนของการเปลี่ยนสีของฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงค์ออกไซด์/พอลิไดเมทิลไซโลเซนด้วยภาพที่ได้จากเครื่องสแกนเนอร์ (ก) เมื่อได้รับความร้อน (ข)-(ง) เมื่อได้รับความร้อนและเมื่อกลับสู่อุณหภูมิห้องของฟิล์มที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 0, 5, 10, 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ 72
- 4.9 การเปลี่ยนสีของฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงค์ออกไซด์/พอลิไดเมทิลไซโลเซนที่ได้จากกล้องถ่ายภาพบนโทรศัพท์เคลื่อนที่เมื่อผ่านการให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 27 ถึง 150 องศาเซลเซียสและเมื่อกลับสู่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส 73
- 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าอัตราส่วนของการเปลี่ยนสีของฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงค์ออกไซด์/พอลิไดเมทิลไซโลเซนด้วยภาพที่ได้จากกล้องถ่ายภาพบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ (ก) เมื่อได้รับความร้อน (ข)-(ง) เมื่อได้รับความร้อนและเมื่อกลับสู่อุณหภูมิห้องของฟิล์มที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 0, 5, 10, 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ 74
- 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าอัตราส่วนการเปลี่ยนสีของฟิล์มวัสดุผสมพอลิไดแอเซทิลีนกับซิงค์ออกไซด์ที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (ก) (ค) ที่มีต่อแก๊สชนิดต่าง ๆ (ข) (ง) ที่มีต่อแก๊สแอมโมเนียตอบสนองที่เวลาต่าง ๆ ด้วยภาพที่ได้จากเครื่องสแกนเนอร์และจากกล้องถ่ายภาพบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ตามลำดับ 75
- 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าอัตราส่วนการเปลี่ยนสีของฟิล์มวัสดุผสมพอลิไดแอเซทิลีนกับซิงค์ออกไซด์ที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (ก) (ค) ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิโดยรอบและอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสในช่วงเวลา 30 วัน (ข) (ง) ที่มีต่อแก๊สแอมโมเนียด้วยภาพที่ได้จากเครื่องสแกนเนอร์และกล้องถ่ายภาพบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ตามลำดับ 77
- 4.13 การตอบสนองการเปลี่ยนสีของฟิล์มวัสดุผสมพอลิไดแอเซทิลีนกับซิงค์ออกไซด์ที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อแก๊สแอมโมเนียความเข้มข้นต่าง ๆ (ก) ภาพการเปลี่ยนสีของฟิล์มจากเครื่องสแกนเนอร์ (ข) ค่าอัตราส่วนการเปลี่ยนสี 79

4.14	การตอบสนองการเปลี่ยนสีของฟิล์มวัสดุผสมพอลิไดแอเซทิลีนกับ ซิงค์ออกไซด์ที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อแก๊ส แอมโมเนียความเข้มข้นต่าง ๆ (ก) ภาพการเปลี่ยนสีของฟิล์มจากกล้อง โทรศัพท์เคลื่อนที่ (ข) ค่าอัตราส่วนการเปลี่ยนสี	79
4.15	การตอบสนองการเปลี่ยนสีของฟิล์มเซนเซอร์ที่มีต่อ (ก) ตัวอย่างเนื้อไก่ (ข) ตัวอย่างเนื้อหมูจากซูปเปอร์มาร์เก็ตและตลาดสดภายในขณะปิดสนิท ระหว่างการเก็บที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง	81
4.16	กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าอัตราส่วนการเปลี่ยนสีของฟิล์มเซนเซอร์ที่มีต่อ ตัวอย่างเนื้อไก่ด้วยภาพที่ได้จาก (ก) เครื่องสแกนเนอร์ และ (ข) กล้อง โทรศัพท์เคลื่อนที่	82
4.17	กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าอัตราส่วนการเปลี่ยนสีของฟิล์มเซนเซอร์ที่มีต่อ ตัวอย่างเนื้อหมูด้วยภาพที่ได้จาก (ก) เครื่องสแกนเนอร์ และ (ข) กล้อง โทรศัพท์เคลื่อนที่	83
5.1	ขั้นตอนการสังเคราะห์อนุพันธ์ของไดแอเซทิลีนที่มีหมู่ไทออล	90
5.2	การจัดการทดลองสำหรับการวิเคราะห์ทางสีจากรูปภาพด้วยกล้องถ่ายภาพบน โทรศัพท์เคลื่อนที่ เพื่อศึกษาการตอบสนองการเปลี่ยนสีของ PDA/PDA- SH/ZnO ต่อฟอร์มาลีน	92
5.3	แบบจำลองการเตรียม PDA/PDA-SH/ZnO เวสิเคิล และอันตรกิริยาระหว่าง PDA/PDA-SH/ZnO เวสิเคิลและฟอร์มาลีน	94
5.4	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงและสีของ PDA/PDA-SH/ZnO ก่อนและหลัง ทดสอบฟอร์มาลีน 1000 พีพีเอ็ม	94
5.5	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของ PDA/PDA-SH/ZnO ที่เตรียมโดยใช้ปริมาตร PCDA-SH แตกต่างกัน ที่ปริมาณของซิงค์ออกไซด์ (ก) 0 (ข) 10 (ค) 20 และ (ง) 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อทดสอบฟอร์มาลีนความเข้มข้น 1000 พีพีเอ็ม	95
5.6	(ก) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซิงค์ออกไซด์กับขนาดอนุภาคของ สารละลาย PDA/PDA-SH/ZnO เวสิเคิล (ข) เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของ PDA/PDA-SH/ZnO ที่เตรียมโดยใช้ปริมาตร PCDA-SH 15 ไมโครลิตร ที่ ปริมาณซิงค์ออกไซด์แตกต่างกัน เมื่อทดสอบฟอร์มาลีนความเข้มข้น 1000 พีพีเอ็ม	96

5.7	(ก) สเปกตรัมการดูดกลืนแสง และ (ข) เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของ PDA/PDA-SH/ZnO ต่อสารทดสอบชนิดต่าง ๆ ที่ความเข้มข้น 1000 พีพีเอ็ม	98
5.8	(ก) สเปกตรัมการดูดกลืนแสง และ (ข) เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของ PDA/PDA-SH/ZnO ต่อฟอร์มาลินความเข้มข้น 1000 พีพีเอ็ม ที่ระยะเวลาต่าง ๆ	99
5.9	(ก) ภาพการเปลี่ยนแปลงสีที่ได้จากกล้องถ่ายภาพบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ (ข) ค่าอัตราส่วนของการเปลี่ยนสีของ PDA/PDA-SH/ZnO เมื่อผ่านการให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 27 ถึง 160 องศาเซลเซียส และเมื่อกลับสู่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส	100
5.10	(ก) สเปกตรัมการดูดกลืนแสง และ (ข) เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของ PDA/PDA-SH/ZnO ต่อฟอร์มาลินความเข้มข้นในช่วง 200 ถึง 1000 พีพีเอ็ม	101
5.11	ค่าพีเอชของสารละลายฟอร์มาลินที่ความเข้มข้นในช่วง 200 ถึง 1000 พีพีเอ็ม โดยใช้เครื่องวัดค่าความเป็นกรดต่างแบบดิจิทัล	103
5.12	การตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบสของ PDA/PDA-SH/ZnO (ก) สเปกตรัมการดูดกลืนแสง และ (ข) เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสี	103
5.13	การสเปกตรัมการดูดกลืนแสง และ (ข) เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของ PDA/PDA-SH/ZnO ต่อสารทดสอบชนิดต่าง ๆ ที่ค่าพีเอช 4.0	104
5.14	ภาพการเปลี่ยนแปลงสีและค่าอัตราส่วนของการเปลี่ยนสีของ PDA/PDA-SH/ZnO ต่อฟอร์มาลินความเข้มข้นต่าง ๆ ด้วยภาพที่ได้จาก (ก) กล้องถ่ายภาพบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ และ (ข) เครื่องสแกนเนอร์	105
6.1	ภาพสรุปผลการศึกษาและพัฒนาเซนเซอร์ตรวจวัดการเปลี่ยนสีด้วยพอลิไดแอเซทิลีน และวัสดุผสมระหว่างพอลิไดแอเซทิลีนและซิงค์ออกไซด์	108

รายการสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์/คำย่อ	คำเต็ม/คำจำกัดความ
PDA	พอลิไดแอเซทิลีน
PCDA	ไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ของ 10,12-เพนตะโค ซะไดอายนิกแอซิด
poly(PCDA)	ไดแอเซทิลีนพอลิเมอร์ของ 10,12-เพนตะโคซะ ไดอายนิกแอซิด
PCDA-SH	อนุพันธ์ของไดแอเซทิลีนที่มีหมู่ไทออล
PDMS	พอลิไดเมทิลไซโลเซน
FTIR	ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี
SEM	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
CR	การตอบสนองในการเปลี่ยนสี
°C	องศาเซลเซียส
g	กรัม
mL	มิลลิลิตร
mM	มิลลิโมลาร์
nm	นาโนเมตร
min	นาที
ppm	พีพีเอ็ม (หนึ่งในล้านในล้านส่วน)
wt. %	เปอร์เซ็นต์โดยมวล
%	เปอร์เซ็นต์

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของการวิจัย

ในปัจจุบันวิทยาการเซนเซอร์ได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย เซนเซอร์ได้รับการพัฒนาและใช้ประโยชน์ในหลายด้านเช่น เคมี ชีววิทยา แพทย์ศาสตร์ เกษตศาสตร์ สาธารณสุขศาสตร์ เกษตรศาสตร์ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจวิเคราะห์ทั้งทางด้านอุตสาหกรรมอาหารและด้านสิ่งแวดล้อม ตรวจสอบสถานะความเป็นพิษของน้ำ อากาศ ตรวจสอบคุณภาพสินค้า ตรวจวัดความสดของอาหาร สามารถใช้แทนวันหมดอายุ หรือ use-by date ช่วยลดการทิ้งอาหารโดยไม่จำเป็น ตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์ในรถยนต์ รวมถึงใช้เพื่อตรวจคัดกรองโรคบางชนิดโดยการตรวจลมหายใจ เป็นต้น

การตรวจวัดแอมโมเนียเพื่อนำไปใช้ในด้านอุตสาหกรรมอาหารเพื่อบอกความสดใหม่ของเนื้อสัตว์ เช่น ตรวจสอบการเน่าเสียของเนื้อปลา ซึ่งจะปลดปล่อยสารประกอบเอมีนในรูปของแอมโมเนีย หรือไตรเมทิลเอมีน และตรวจสอบคุณภาพอาหารที่มีการปนเปื้อนของฟอร์มาลินในอาหารทะเล เพื่อลดผลเสียต่อร่างกายผู้บริโภค เป็นต้น นอกจากนี้ประชาชนทั่วไปอาจได้รับสารดังกล่าวจากมลพิษทางน้ำจากการปล่อยน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมหรือจากกิจกรรมต่าง ๆ ถ้าแหล่งน้ำที่ใช้สำหรับอุปโภคและบริโภคมีการปนเปื้อนปริมาณมาก จะส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งแวดล้อมได้ ดังนั้นการตรวจสอบแอมโมเนียและฟอร์มาลินในน้ำนอกจากเป็นการบ่งชี้คุณภาพของน้ำแล้ว ยังป้องกันอันตรายจากการได้รับสารดังกล่าวเข้าสู่ร่างกายของเรา

การพัฒนาเซนเซอร์ระดับโมเลกุลโดยใช้คอนจูเกตพอลิเมอร์ (conjugated polymer) เป็นวัสดุตรวจวัด (sensing materials) (Wang et al., 2010; Thompson et al., 2000) เป็นเทคโนโลยี เซนเซอร์หนึ่งที่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากวัสดุชนิดนี้มีความสามารถในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อมโดยรอบที่เข้ามากระตุ้นได้เป็นอย่างดี เช่น เชื้อไวรัส และแบคทีเรีย *Escherichia coli* เป็นต้น โดยวัสดุหนึ่งที่น่าสนใจในกลุ่มนี้คือ พอลิไดอะเซทิลีน (Polydiacetylene; PDA) ซึ่งเป็นอนุภาคในระดับนาโนเมตรของสารในกลุ่มคอนจูเกตพอลิเมอร์ที่สามารถเตรียมได้ง่ายและมีความเป็นพิษต่ำ ด้วยกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันของแอมฟิฟิลิกมอนอเมอร์ในน้ำ ผ่านการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet radiation) โดยพอลิไดอะเซทิลีนมีสมบัติเด่น คือความสามารถในการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงเมื่อได้รับการกระตุ้นจากสิ่งเร้าภายนอก เช่น เกิดการเปลี่ยนสีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-เบส แรงดันเชิงกล

ไอออนหรือแก๊สบางชนิด เป็นต้น การเปลี่ยนสีเกิดขึ้นเนื่องจากการแตกออกของพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่คาร์บอกซิลิกเมื่อได้รับสิ่งกระตุ้น ทำให้สายโซ่หลักที่มีหมู่คอนจูเกตในโครงสร้างเกิดการบิดตัวเกิดการเปลี่ยนสีจากน้ำเงินเป็นแดง (Charoenthai et al., 2011; Wacharasindhu et al., 2010; Ahn, Lee, and Kim, 2009; Kim et al., 2006) พอลิไดแอเซทิลีนจึงเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจสำหรับการพัฒนาตัวบ่งชี้การเปลี่ยนสีหรืออินดิเคเตอร์เปลี่ยนสี ที่ตอบสนองต่อแก๊สหรือสารละลายแอมโมเนีย ฟอรัมาลีน นอกจากนี้สมบัติเด่นด้านการเปลี่ยนแปลงสีได้อย่างชัดเจน เมื่อได้รับการกระตุ้นจากสิ่งเร้าภายนอกสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า เป็นวิธีการตรวจวัดที่ง่ายและรวดเร็ว ไม่ต้องใช้เครื่องมือขั้นสูง ค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ต่ำ และสามารถประยุกต์ใช้ตรวจวัดในภาคสนามได้

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาและพัฒนาเซนเซอร์ตรวจวัดการเปลี่ยนสีด้วยพอลิไดแอเซทิลีน และคอมพอสิตของพอลิไดแอเซทิลีนกับซิงค์ออกไซด์ โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของพอลิไดแอเซทิลีนและซิงค์ออกไซด์ให้มีความเหมาะสม และศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของสารที่เตรียมได้เมื่อทดสอบแอมโมเนีย ฟอรัมาลีน หรือสารอินทรีย์ระเหยง่าย ในรูปแบบของเหลวและแก๊ส โดยเซนเซอร์ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงสีได้รับการพัฒนาทั้งในรูปแบบสารละลายและฟิล์มบาง และตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงสีด้วยสเปกโตรมิเตอร์การดูดกลืนแสง ภาพถ่ายจากกล้องสแกนเนอร์และกล้องถ่ายรูป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อสร้างและพัฒนาเซนเซอร์ที่อาศัยการเปลี่ยนแปลงสีสำหรับตรวจวัดแก๊สและสารละลาย โดยใช้พอลิไดแอเซทิลีนและวัสดุผสมระหว่างพอลิไดแอเซทิลีนและซิงค์ออกไซด์เป็นตัวรับรู้การเปลี่ยนแปลงทางเคมี

1.2.2 เพื่อศึกษาโมเดลการถ่ายโอนค่าสีจากการวิเคราะห์ค่าสเปกตรัมและค่าสีจากภาพถ่ายของเซนเซอร์ เมื่อทดสอบแอมโมเนีย และฟอรัมาลีน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลอง เพื่อศึกษาสมบัติการตอบสนองต่อสารละลายแอมโมเนีย ฟอर्मาลีน แอลกอฮอล์ ของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีน และของสารละลายคอมพอสิตของพอลิไดแอเซทิลีน และตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียของฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน โดยมีขอบเขตของการวิจัยดังนี้

1.3.1 สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางแสง ของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนและวัสดุผสมระหว่างพอลิไดแอเซทิลีนและซิงค์ออกไซด์

1.3.2 สมบัติเชิงเซนเซอร์ของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนและวัสดุผสมพอลิไดแอเซทิลีน เมื่อได้รับการรบกวนจากสิ่งกระตุ้นภายนอก ได้แก่ อุณหภูมิ สารละลายแอมโมเนีย สารละลายฟอर्मาลีน แอลกอฮอล์

1.3.3 การวิเคราะห์สีจากภาพถ่ายของสารละลายและฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีนเมื่อทดสอบแอมโมเนีย และวัสดุผสมระหว่างพอลิไดแอเซทิลีนและซิงค์ออกไซด์เมื่อทดสอบฟอर्मาลีน

1.3.4 โมเดลการถ่ายโอนค่าสี (colorimetric transfer model) ระหว่างการวิเคราะห์ค่าสีระบบอาร์จีบี (RGB color system) และสเปกตรัมการดูดกลืนแสง (absorption spectrum) เมื่อเซนเซอร์ตอบสนองต่อแอมโมเนียและฟอर्मาลีน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้พอลิไดแอเซทิลีนและคอมพอสิตของพอลิไดแอเซทิลีนสำหรับประยุกต์ใช้ในงานด้านตรวจวัดแอมโมเนียและฟอर्मาลีน

1.4.2 เป็นการเปิดโอกาสให้สามารถนำผลงานวิจัย ไปประยุกต์ใช้งานด้านอาหารและ/หรือการตรวจวัดคุณภาพน้ำด้านสิ่งแวดล้อม

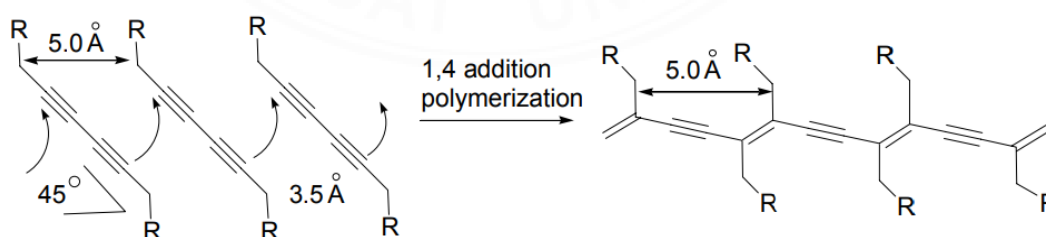
บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทนี้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งในการดำเนินงานวิจัยนี้จำเป็นต้องอาศัยหลักการและทฤษฎีหลายแขนง เช่น ทฤษฎีของพอลิไดแอเซทิลีน ทฤษฎีการดูดกลืนสีและการมองเห็นสีของวัตถุ หลักการและเทคนิคในการวิเคราะห์การเปลี่ยนสีของวัสดุ ทฤษฎีเซนเซอร์ทางเคมี และการวัดสมบัติการตอบสนองต่อแก๊สของเซนเซอร์ เป็นต้น โดยมีรายละเอียดของทฤษฎีดังต่อไปนี้

2.1 พอลิไดแอเซทิลีน

พอลิไดแอเซทิลีนเป็นอิน-ไอน์คอนจูเกตพอลิเมอร์ (ene-yne conjugated polymer) ที่มีขนาดระดับนาโนเมตร และเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างทางเคมีแบบเส้นตรงคอนจูเกตพันธะ π (linear π conjugated polymer) ปัจจุบันได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในการพัฒนาเป็นวัสดุสำหรับงานทางด้านการตรวจวัด เนื่องจากมีสมบัติเชิงแสงที่น่าสนใจ และสมบัติการเปลี่ยนสีที่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า พอลิไดแอเซทิลีนประกอบด้วยคอนจูเกตของพันธะคู่ (Ene) และพันธะสาม (Yne) เตรียมได้จากไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ผ่านโฟโตพอลิเมอไรเซชันด้วยปฏิกิริยาการเติมแบบ 1,4-addition ภายใต้รังสีแกมมา หรือรังสีอัลตราไวโอเลตที่มีความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร (Kim et al., 2005) ซึ่งมีระยะห่างระหว่างมอนอเมอร์ $r = 5 \text{ \AA}$ และมุม $\theta = 45^\circ$ เรียกการเกิดพอลิเมอไรเซชันแบบนี้ว่าทอพอพอลิเมอไรเซชัน (topopolymerization) ดังภาพที่ 2.1

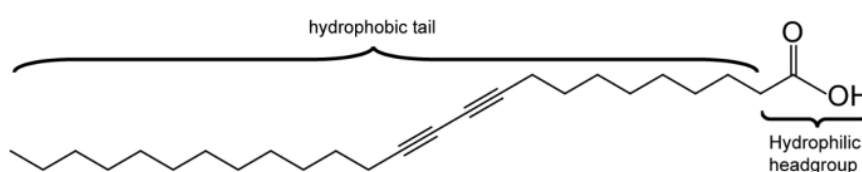


ภาพที่ 2.1 ปฏิกิริยาโฟโตพอลิเมอไรเซชันการเติมแบบ 1,4-addition ของไดแอเซทิลีน
เมื่อ R แสดงถึงหมู่แอลคิล (Wang et al., 2006)

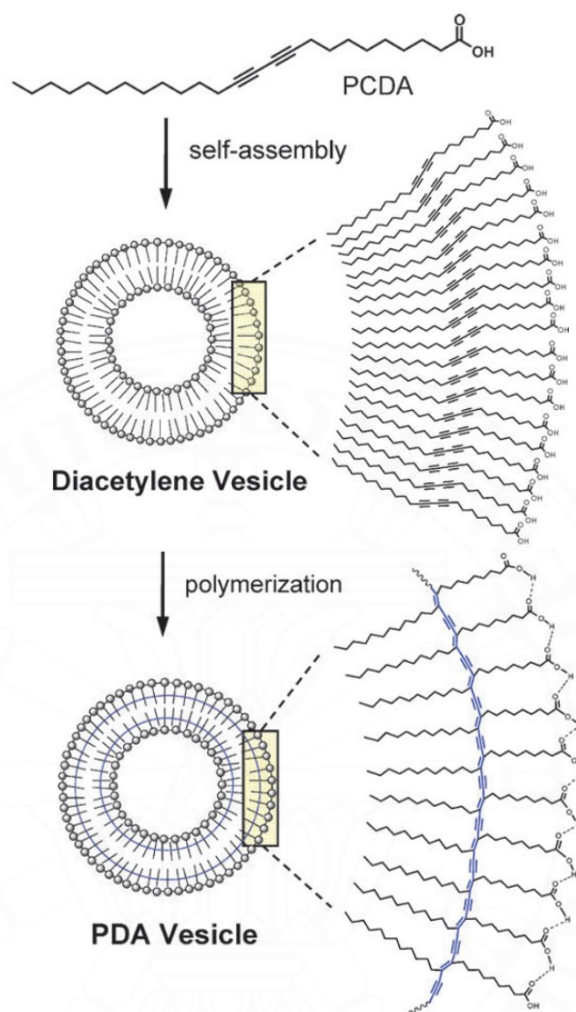
2.1.1 พอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล

พอลิไดแอเซทิลีนสามารถเตรียมให้มีโครงสร้างได้หลากหลาย เช่น ผลึกเดี่ยว (single crystal) ฟิล์มชั้นเดียวแลงเมียร์ (Langmuir monolayer film) ฟิล์มบางหลายชั้น (multilayer film) ท่อนาโน (nano tube) และเวสิเคิล (vesicle) เป็นต้น นักวิทยาศาสตร์และนักวิจัยในหลาย ๆ วงการ นิยมเตรียมพอลิไดแอเซทิลีนให้มีโครงสร้างแบบเวสิเคิลเพื่อใช้เป็นเซนเซอร์ ตรวจวัดการเปลี่ยนสี สำหรับวัดโมเลกุลเป้าหมายที่สามารถสังเกตเห็นผลการตรวจวัดการเปลี่ยนสีได้ด้วยตาเปล่า

ไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์เป็นแอมฟิฟิลิกโมเลกุล (amphiphilic molecule) มีส่วนหัวที่มีขั้วหรือชอบน้ำ (hydrophilic head) คือ หมู่คาร์บอกซิลิกและส่วนหางที่ไม่มีขั้วหรือไม่ชอบน้ำ (hydrophobic tail) คือ หมู่แอลคิล ตัวอย่างของไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ ได้แก่ 10,12-เพนตะโคเซไดอายนิกแอซิด (10,12-pentacosadiynoic acid; PCDA) ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างทางเคมี ดังภาพที่ 2.2 ไดแอเซทิลีนพอลิเมอร์ของ 10,12-เพนตะโคเซไดอายนิกแอซิด (poly(PCDA)) เตรียมจาก 10,12-เพนตะโคเซไดอายนิกแอซิดผ่านปฏิกิริยาโฟโตพอลิเมอไรเซชัน เมื่อไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์จำนวนมากกระจายตัวอยู่ในน้ำจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่อย่างเป็นระเบียบด้วยตนเอง (self-assembly) เป็นโครงสร้างแบบไบเลเยอร์เวสิเคิล (bilayer vesicle) โครงสร้างของไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ส่วนหางจะถูกซ้อนไว้เกิดเป็นไบเลเยอร์ เมื่อได้รับแรงกระทำ ไบเลเยอร์จะจัดเรียงตัวเป็นทรงกลมที่เรียกว่า เวสิเคิล โดยหมู่คาร์บอกซิลิกจะอยู่ที่ขอบของเวสิเคิล และเกิดพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) ระหว่างหมู่คาร์บอกซิลิกด้วยกัน (Yoon, Lee, and Kim, 2009; Ji, Ahn, and Kim, 2003) เมื่อเกิดปฏิกิริยาโฟโตพอลิเมอไรเซชันในสารละลายจะทำให้โมเลกุลของแต่ละไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์เกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างพันธะของสายโซ่ข้างด้วยพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) เกิดเป็นพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล (polydiacetylene vesicle) ดังภาพที่ 2.3 ได้สารละลายสีน้ำเงินเข้ม



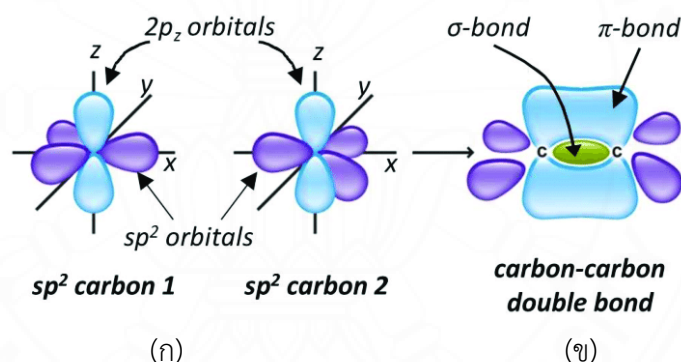
ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ของ 10,12-เพนตะโคเซไดอายนิกแอซิด
(Ji, Ahn, and Kim, 2003)



ภาพที่ 2.3 การเกิดโครงสร้างแบบไบเลเยอร์เวสิเคิล และพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล
(Yoon, Lee, and Kim, 2009)

สารละลายสีน้ำเงินเข้มของพอลิไดแอเซทิลีนมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตร เนื่องจากระบบคอนจูเกตพันธะ π (π -conjugation) ในโครงสร้างโมเลกุลของพอลิไดแอเซทิลีนทำให้อิเล็กตรอนในออร์บิทัลเชิงโมเลกุล (molecular orbital) ไม่ได้อยู่ประจำที่ (delocalized electrons) แต่สามารถเคลื่อนที่ไปได้ทั่วทั้งโมเลกุลตามระยะคอนจูเกตของพันธะ π ภายในสายโซ่หลัก (conjugated backbone) กล่าวคือมีการซ้อนเหลื่อมกัน (overlap) ของออร์บิทัล p (p-orbital) ของแต่ละอะตอมทำให้เกิดออร์บิทัลเชิงโมเลกุล ส่งผลให้เกิดการ delocalization ของอิเล็กตรอนหรือเกิดการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนได้ (electronic transition) จากทฤษฎีออร์บิทัลเชิงโมเลกุล (molecular orbital theory; MOT) ของคอนจูเกตพอลิเมอร์ กล่าวว่าในการสร้างพันธะเคมี ออร์บิทัลเชิงอะตอม

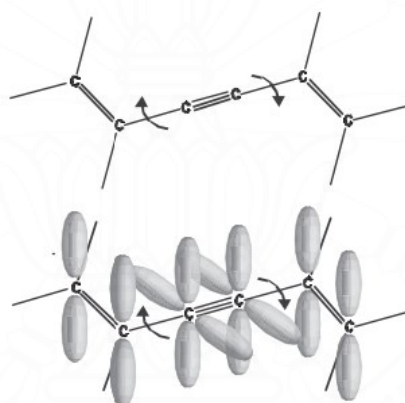
(atomic orbital; AO) สองออร์บิทัลมารวมกันจะได้ออร์บิทัลเชิงโมเลกุล (molecular orbital; MO) สองชนิดคือ ออร์บิทัลเชิงโมเลกุลแบบสร้างพันธะ (bonding molecular orbital; BMO) เป็นออร์บิทัลที่อยู่ในสภาวะพื้น (ground state) ได้แก่ σ -orbital π -orbital และ n-orbital และออร์บิทัลเชิงโมเลกุลแบบไม่สร้างพันธะหรือต้านพันธะ (anti-bonding molecular orbital; AMO) เป็นออร์บิทัลที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้น (excited state) ได้แก่ σ^* -orbital และ π^* -orbital ดังนั้นการเกิดสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเลตหรือรังสีของแสงที่มองเห็นของโมเลกุล เกิดจากการที่อิเล็กตรอนเปลี่ยนสภาวะโดยย้ายระดับพลังงานหรือแทรนซิชันจากสถานะพื้นในออร์บิทัลเชิงโมเลกุลระดับชั้นพลังงานสูงสุดที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ (highest occupied molecular orbital; HOMO) ไปยังสถานะถูกกระตุ้นในออร์บิทัลเชิงโมเลกุลระดับพลังงานต่ำสุดที่ว่างไม่มีอิเล็กตรอนบรรจุและอยู่ถัดขึ้นไป (lowest unoccupied molecular orbital; LUMO) ผลต่างระหว่างระดับพลังงาน HOMO-LUMO เรียกว่าช่องว่างพลังงาน (energy gap หรือ band gap) โดยพลังงานที่ดูดกลืนจะเท่ากับผลต่างระหว่างระดับพลังงานทั้งสอง



ภาพที่ 2.4 ภาพแสดงการเกิดพันธะ π (ก) สภาพก่อนการซ้อนทับกันของออร์บิทัล p_z และ (ข) สภาพภายหลังการซ้อนทับกันของออร์บิทัล p_z (Griffith et al., 2020)

พิจารณาธาตุคาร์บอนซึ่งมีเลขเชิงอะตอม (atomic number) เท่ากับ 6 และมีการจัดเรียงอิเล็กตรอน (electron configuration) ในอะตอมของคาร์บอนเป็นแบบ $1s^2 2s^2 2p^2$ เนื่องจากคาร์บอนอะตอมมี 4 วาเลนซ์อิเล็กตรอน ซึ่งสามารถเกิดพันธะกับอะตอมอื่นได้ด้วยออร์บิทัล s และออร์บิทัล p เมื่อเกิดปรากฏการณ์ไฮบริไดเซชัน (hybridization) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ออร์บิทัลในอะตอมเดียวกันรวมกันเกิดเป็นออร์บิทัลลูกผสมที่เรียกว่าไฮบริดออร์บิทัล (hybrid orbital) เช่น ไฮบริไดเซชันแบบ sp^2 ของอะตอมคาร์บอน ดังภาพที่ 2.4 เกิดจากการรวมกันระหว่างอิเล็กตรอนในออร์บิทัล s หนึ่งออร์บิทัล และ p สองออร์บิทัล โดยการรวมกันตามแนวแกนเดียวกันหรือซ้อนเหลื่อมตามแนวปลาย (ตามแนวแกนระหว่างนิวเคลียส) จะเกิดพันธะ σ หนึ่งพันธะ ในขณะที่

ที่ออร์บิทัล $2p_z$ ของคาร์บอนทั้งสองอะตอม ซ้อนเหลื่อมตามแนวข้าง (เหนือและใต้แกนระหว่างนิวเคลียส) จะเกิดพันธะ π อีกพันธะหนึ่ง (Zumdahl and Zumdahl, 2010) ซึ่งพันธะ σ และพันธะ π รวมเป็นพันธะคู่ระหว่างคาร์บอน ออร์บิทัลเชิงโมเลกุลชนิดนี้เรียกว่า ออร์บิทัล π (π -orbital) อิเล็กตรอนที่อยู่ในออร์บิทัล π เรียกว่า อิเล็กตรอน π (π -electron) ดังนั้นพันธะ π ที่เกิดขึ้นจะส่งต่อการดึงอิเล็กตรอนให้เข้าใกล้กันมากขึ้น จึงทำให้ระยะระหว่างอะตอมคาร์บอนมีความยาวสั้นลง และพันธะ π ยังมีผลทำให้พันธะคู่ในไฮบริดเซชันแบบ sp^2 และ พันธะสามในไฮบริดเซชันแบบ sp ของอะตอมคาร์บอนถูกตรึงไว้อยู่กับที่ในขณะที่พันธะเดี่ยวสามารถหมุนได้ โดยมีพันธะ σ เป็นแกนของการหมุน พอลิไดแอเซทิลีนโครงสร้างของโมเลกุลมีพันธะคู่ (double bond) และพันธะสาม (triple bond) พบว่าเป็นวัสดุพวก sp^2 hybridized π -electron และ sp hybridized π -electron (Race, Barford, and Bursill, 2001) ซึ่งจะสร้างออร์บิทัลแบบมีพันธะ π (bonding π orbitals) ดังภาพที่ 2.5 และมีช่องว่างพลังงานระหว่าง π และ π^* (π - π^* energy gap) ประมาณ 1.7 eV (Mark, 1996)

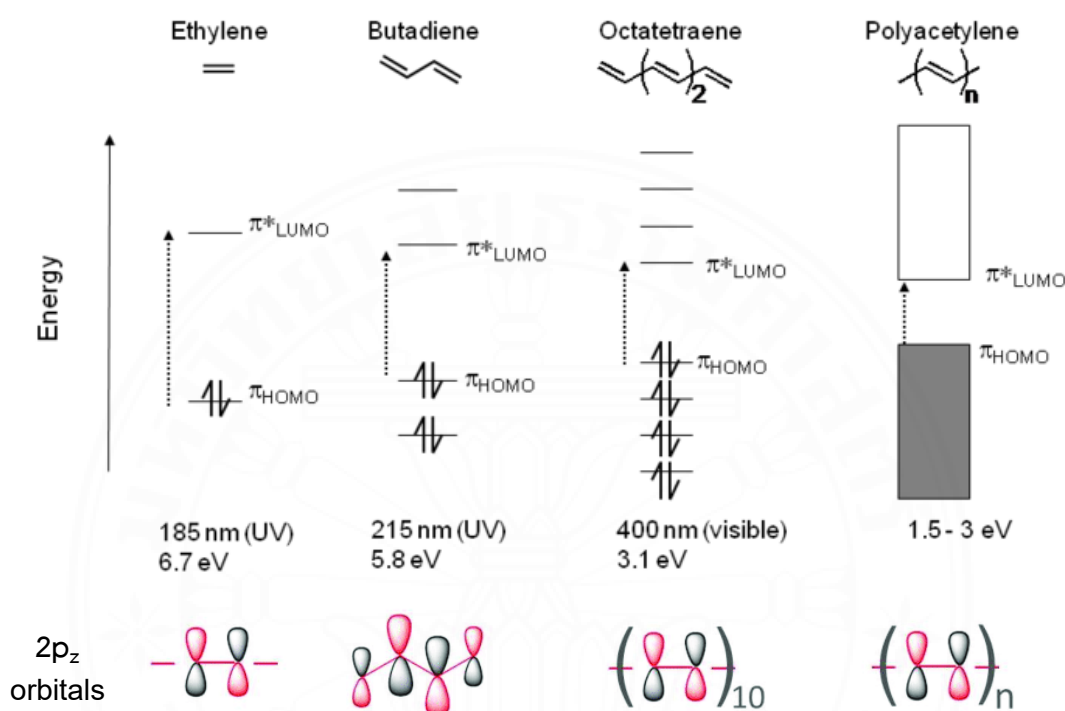


ภาพที่ 2.5 ออร์บิทัลเชิงโมเลกุลในสายโซ่หลักของพอลิไดแอเซทิลีนคอนจูเกตพันธะ π

(Carpick et al., 2004)

การคอนจูเกตของพันธะ π ส่งผลให้เกิดการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นเปลี่ยนแปลงจากเดิม ปรากฏการณ์นี้อธิบายได้โดยใช้แผนภาพออร์บิทัลเชิงโมเลกุล ดังภาพที่ 2.6 เช่น บิวทาไดอิน (butadiene) เทียบกับเอทิลีน (ethylene) เอทิลีนมีพันธะ $C=C$ อยู่อย่างโดดเดี่ยว การเกิด π - π^* ต้องใช้ความยาวคลื่น 185 นาโนเมตร เนื่องจากออร์บิทัลทั้งสองอยู่ห่างกันมากต้องใช้พลังงานในการเปลี่ยนสถานะสูง แต่ในบิวทาไดอินมีการคอนจูเกตของพันธะคู่สองพันธะ ทำให้มี π ออร์บิทัลสองออร์บิทัล และ π^* อีกสองออร์บิทัล โดยทั้งสองออร์บิทัลมีการซ้อนเหลื่อมกัน ทำให้ระยะห่างระหว่าง π - π^* ใกล้กันมากขึ้น ใช้พลังงานในการเปลี่ยนสถานะน้อยลง ดังนั้น

ชีวทาได้อื่นจึงมีการดูดกลืนที่ความยาวคลื่นยาวกว่า คือที่ความยาวคลื่น 215 นาโนเมตร นั่นคือ ถ้าพันธะ π มีการคอนจูเกตกันมาก จะทำให้สารมีการดูดกลืนที่ความยาวคลื่นยาวขึ้น หรือเกิดมีการดูดกลืนที่ช่วงแสงที่มองเห็นได้จึงทำให้เห็นสารปรากฏเป็นสีต่าง ๆ

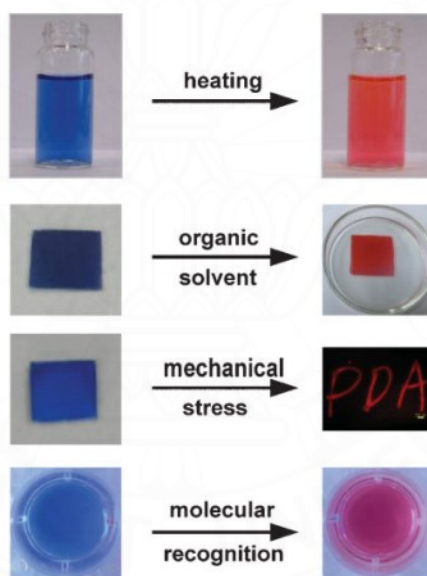


ภาพที่ 2.6 โครงสร้างแถบพลังงาน และการเปลี่ยนสถานะ $\pi-\pi^*$ ของสารที่มีคอนจูเกต π -electron (The Institute for Reduction of Cognitive Entropy in Organic Chemistry, 2021)

การศึกษาแถบดูดกลืนแสงของพอลิไดแอเซทิลีนด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโตรสโกปี (UV-Visible Spectrophotometry) จะพบแถบการดูดกลืนแสงในช่วงวิสิเบิล มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตร ทำให้มองเห็นเป็นสีน้ำเงิน ซึ่งเป็นการดูดกลืนแสงในลักษณะการเปลี่ยนสถานะหรือแทรนซิชันแบบ $\pi-\pi^*$ ($\pi-\pi^*$ transition) (Nuck and Sugihara, 2020) สอดคล้องกับการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนภายในออร์บิทัลของโมเลกุล (Bloor and Chance, 1985) สำหรับคอนจูเกตโพลิเมอร์จำพวก linear π conjugated polymer ปัจจัยที่เกี่ยวข้องขึ้นอยู่กับโครงสร้าง เช่น ความเป็นระนาบ ความยาวของสายโซ่ ความเสถียรของพลังงานเรโซแนนซ์ของวงแหวนอะโรมาติก และการมีหมู่แทนที่ที่มีสมบัติเป็นหมู่ให้อิเล็กตรอน (electron donor) หรือหมู่รับอิเล็กตรอน (electron acceptor) เป็นต้น ซึ่งส่งผลต่อค่าของ energy gap

2.1.2 สมบัติและกลไกการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีน

พอลิไดแอเซทิลีนมีคุณสมบัติเด่นด้านการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดง เมื่อได้รับการกระตุ้นจากสิ่งเร้าภายนอก ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Mergu and Son, 2021; Xiaoqiang and Juyoung, 2011) สารประกอบอะโรมาติก (Champaiboon et al., 2009) โลหะหนัก (Narkwiboonwong et al., 2011) ความเป็นกรดต่างของสารเคมี (Jannah and Kim, 2019) หรือแรงเค้นเชิงกล (Feng et al., 2013) เป็นต้น ดังแสดงในภาพที่ 2.7 สาเหตุที่พอลิไดแอเซทิลีนเกิดการเปลี่ยนสีเมื่อโดนรบกวนจากสิ่งเร้าภายนอกเนื่องมาจากการจัดเรียงตัวใหม่ของสายโซ่หลัก และสายโซ่ข้าง (alkyl chain) เป็นหมู่แทนที่ (pendant side-group) ที่ถูกเหนี่ยวนำโดยความเป็นระเบียบและไม่เป็นระเบียบของสายโซ่ด้านข้างของพอลิไดแอเซทิลีนจากการรบกวนจากสิ่งเร้าภายนอก และผลการคอนจูเกตของพันธะ π ในสายโซ่หลัก

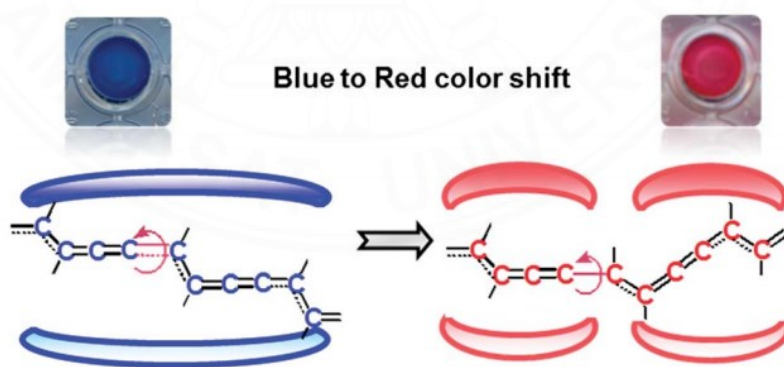


ภาพที่ 2.7 การเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนเมื่อได้รับการกระตุ้นจากสิ่งเร้าต่าง ๆ

(Ahn, Lee, and Kim, 2009)

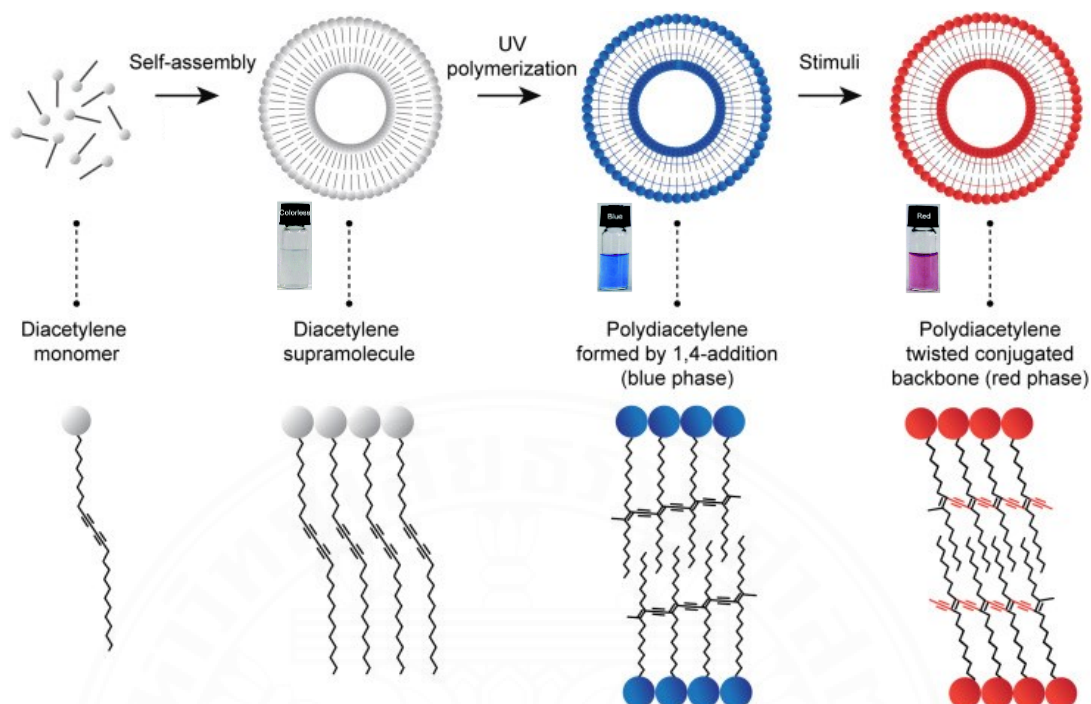
ความยาวคลื่นของการดูดกลืนแสงและความยาวยังผลการคอนจูเกตของพันธะ π (effective conjugation length; ECL) ในสายโซ่หลักของพอลิไดแอเซทิลีน มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (linear relationship) (Wenz et al., 1984) ซึ่งความยาวยังผลการคอนจูเกตของพันธะ π ถูกกำหนดด้วยระดับของการซ้อนเหลื่อมกัน (degree of overlap) ระหว่างออร์บิทัล p กับออร์บิทัล p เพื่อสร้างระบบ delocalized π -electron โดยความกว้างของช่องว่างระหว่าง

แถบพลังงาน (energy band gap) จะแคบเมื่อความยาวยังผลการคอนจูเกตของพันธะ π มีความยาวมาก พอลิไดแอเซทิลีนสามารถเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงได้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงในระบบคอนจูเกตของพอลิไดแอเซทิลีน ทำให้อิเล็กตรอนสามารถเกิดการเคลื่อนที่ไปมาในสายโซ่หลักได้ เห็นสารละลายสีน้ำเงินและ มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตร (blue phase) แต่เมื่อถูกรบกวนจากสิ่งรบกวนภายนอกจะทำให้สายโซ่หลักที่มีหมู่คอนจูเกตในโครงสร้างเกิดการบิดตัว (twisted) และ การซ้อนเหลื่อมกันของออร์บิทัล p ไม่อยู่ในแนวระนาบเดียวกัน (non-planar) ในระบบคอนจูเกต ดังภาพที่ 2.5 ซึ่งการซ้อนเหลื่อมกันเปลี่ยนแปลงโดยการหมุน (rotation) ของพันธะ C-C บางพันธะในสายโซ่หลัก (Gou et al., 2010; Wu et al., 2009; Potisatityuenyong et al., 2008) เนื่องจากผลของการหมุน และ/หรือการบิดตัว (distortion) ของสายโซ่ข้าง (Carpick et al., 2004) ดังนั้นอิเล็กตรอนในสายโซ่จึงเคลื่อนที่ได้ยากขึ้นในช่วงที่สายโซ่มีการบิดตัว (Nuck and Sugihara, 2020) ส่งผลให้ระยะคอนจูเกต (conjugation length) ในระบบคอนจูเกตพันธะ π มีความยาวสั้นลง ดังภาพที่ 2.8 และเพิ่มความกว้างของช่องว่างระหว่างแถบพลังงานให้กว้างมากขึ้นในโมเลกุลพอลิไดแอเซทิลีน จึงต้องใช้ระดับพลังงานเพิ่มขึ้นและส่งผลต่อการดูดกลืนแสงในช่วงพลังงานที่สูงขึ้น เกิดเปลี่ยนสถานะแบบ $\pi-\pi^*$ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากน้ำเงินเป็นแดงปรากฏค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตร (red phase) แต่ถ้าความยาวของระบบคอนจูเกตหรือระยะคอนจูเกตของพอลิไดแอเซทิลีนไม่มีการเปลี่ยนแปลง จะไม่สามารถเห็นการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนได้



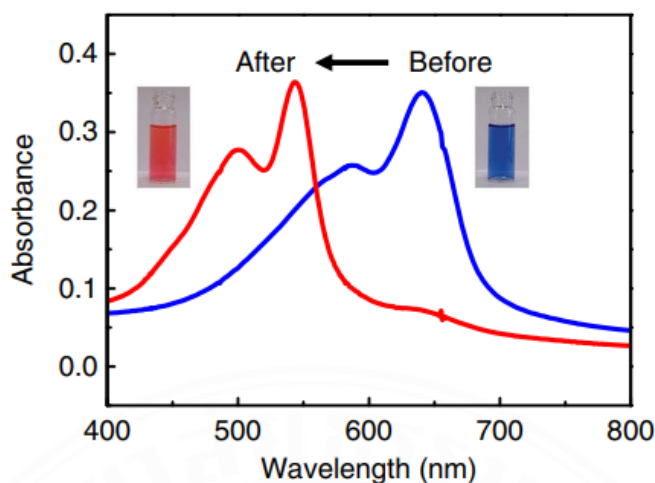
ภาพที่ 2.8 ผลของระบบคอนจูเกตพันธะ π ที่มีต่อการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีน

(Jelinek and Ritenberg, 2013)



ภาพที่ 2.9 แผนภาพโครงสร้างของพอลิไดแอเซทีลีนแสดงการเตรียมและการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงเมื่อได้รับการกระตุ้นจากสิ่งเร้า (Tjandra et al., 2021)

การคำนวณทางทฤษฎี (theoretical calculations) บ่งบอกว่าการหมุนของพันธะ C-C ในสายโซ่หลักแม้เพียงเล็กน้อยไม่ก็องศา ทำให้เปลี่ยนแปลงการซ้อนเหลื่อมกันของออร์บิทัล p อย่างมาก (Hankin, Downey, and Sandman, 1992; Eckhardt, Boudreaux, and Chance, 1986; Orchard and Tripathy, 1986) เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ hypsochromic หรือเรียกว่า blue-shift ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการที่สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่สั้นลงทางแสงสีน้ำเงิน ($\lambda_{\max}$ ลด) (Ahn and Kim, 2008) การคอนจูเกตเป็นการเรียงสลับระหว่างพันธะคู่กับพันธะเดี่ยวทำให้อิเล็กตรอนในออร์บิทัลสามารถครองตำแหน่งพื้นที่ในพันธะได้มากขึ้น อิเล็กตรอนเคลื่อนที่หรือเกิดการเปลี่ยนสภาวะได้ง่ายขึ้น ดังนั้นเมื่อพอลิไดแอเซทีลีนถูกรบกวนจากสิ่งเร้าภายนอก จำนวนพันธะ π ที่คอนจูเกตกันอาจลดลงเนื่องจากพอลิไดแอเซทีลีนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้าง (conformational change) และสายโซ่หลักที่มีหมู่คอนจูเกตในโครงสร้างเกิดการบิดตัว ดังภาพที่ 2.9 จะทำให้โมเลกุลดูดกลืนรังสีที่มีความยาวคลื่นสั้นเกิด blue-shift ดังภาพที่ 2.10 เนื่องจากระดับพลังงานสภาวะ $\pi-\pi^*$ ของอิเล็กตรอนอยู่ไกลออกจากกันมากขึ้น เป็นผลให้พลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนสภาวะของอิเล็กตรอนจากออร์บิทัลโมเลกุลแบบสร้างพันธะไปยังออร์บิทัลโมเลกุลแบบต้านพันธะมีค่าเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 2.10 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงและการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทีลีนเมื่อถูกกระตุ้นจากสิ่งเร้า แสดง blue-shift เนื่องจากอิทธิพลของการคอนจูเกตของพันธะ π (Lee et al., 2014)

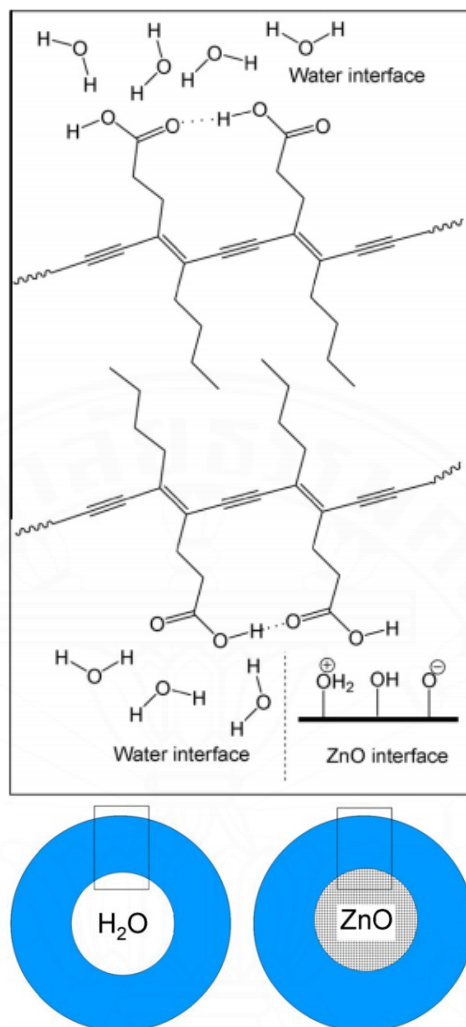
จากสมบัติการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทีลีนที่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า การสังเคราะห์ทำได้ง่ายไม่ซับซ้อน สามารถกระจายตัวได้ดีในน้ำซึ่งมีความปลอดภัยและไม่เป็นพิษ ทำให้พอลิไดแอเซทีลีนเป็นตัวเลือกที่ได้รับความสนใจจากนักวิจัยที่ต้องการพัฒนาวัสดุสำหรับงานด้านการตรวจวัดเพื่อประยุกต์ใช้ในงานด้านต่าง ๆ

2.1.3 พอลิไดแอเซทีลีนและวัสดุคอมพอสิต

พอลิไดแอเซทีลีนสามารถเกิดการเปลี่ยนสีได้เมื่อได้รับการกระตุ้นจากภายนอก สมบัติการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทีลีนมีลักษณะเฉพาะตัวและน่าสนใจ และจากที่กล่าวข้างต้น HOMO-LUMO energy gap เป็นค่าที่สามารถนำไปใช้บ่งบอกสมบัติทางแสง การที่ช่องว่างระหว่างแถบพลังงานแคบทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่จาก HOMO ไปยัง LUMO ได้ง่ายขึ้น โดยการปรับเปลี่ยนช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของพอลิไดแอเซทีลีนปกติทำได้โดยการปรับเปลี่ยนหมู่แทนที่ (side chain) ที่เกาะอยู่กับสายโซ่หลัก หรือการดัดแปลงหมู่แทนที่ของพอลิไดแอเซทีลีนด้วยวิธีทางเคมี (chemical modification) ซึ่งเป็นการปรับความแข็งแรงของอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่ (interchain interaction) และภายในสายโซ่ (intrachain interaction) ของพอลิไดแอเซทีลีน (Chen et al., 2010; Seo and Kim, 2010; Wacharasindhu et al., 2010; Wu et al., 2009; Lee and Kim, 2007; Park et al., 2007; Yuan, Lee, and Lee, 2006; Ferguson et al., 2005; Lee, Koepsel and Russell, 2005; Peng et al., 2005) มีผลทำให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการเปลี่ยนแปลงได้

หมุนง่ายหรือยากขึ้น และสามารถควบคุมการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทีลีนเพื่อประยุกต์ใช้ในเทคโนโลยีตัวตรวจวัดได้ ด้วยเหตุนี้นักวิจัยจึงศึกษาค้นคว้าและพัฒนาพอลิไดแอเซทีลีนมากยิ่งขึ้น มีการศึกษาวิธีการใหม่ในการควบคุมการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทีลีน ด้วยการเปลี่ยนแปลงความยาวของสายโซ่แอลคิล การปรับเปลี่ยนชนิดของไดแอเซทีลีนมอนอเมอร์ การเปลี่ยนแปลงหรือปรับเปลี่ยนชนิดของส่วนหัวของพอลิไดแอเซทีลีน การเติมไอออนบวกของสังกะสีเข้าไปในระบบเพื่อจับกับส่วนหัวของพอลิไดแอเซทีลีนทำให้แรงกระทำภายในระบบสูงขึ้น การศึกษาผลของตัวทำละลายต่อสมบัติการจัดเรียงตัวและสมบัติการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทีลีน การเติมพอลิเมอร์หลายชนิดเข้าไปในระบบของพอลิไดแอเซทีลีน เพื่อให้เกิดการตอบสนองต่อสิ่งกระตุ้นในลักษณะและระดับที่แตกต่างออกไป เช่น การปรับแต่งโครงสร้างของพอลิไดแอเซทีลีน ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีที่ช่วงอุณหภูมิแตกต่างไปจากเดิม (Wacharasindhu et al., 2010) การเติมอนุภาคเชิงคอลลอยด์ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้ (reversible) (Traiphol et al., 2011) เป็นต้น

พอลิไดแอเซทีลีนมีโครงสร้างแบบไบเลเยอร์เวสิเคิลในน้ำโดยหมู่คาร์บอกซิลิกที่ส่วนหัวเป็นส่วนที่มีขั้วจึงสามารถจับกับตัวกลางที่มีขั้ว (polar medium) ดังภาพที่ 2.11 (Ahn, Lee, and Kim, 2009; Yoon, Lee, and Kim, 2009; Reppy and Pindzola, 2007; Okada et al., 1998) การเพิ่มอุณหภูมิทำให้เกิดการไดนามิกส์ของสายโซ่ข้าง เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนบริเวณพื้นผิวของพอลิไดแอเซทีลีนเวสิเคิลเกิดการแตกออก (Ahn, Lee, and Kim, 2009; Potisatityuenyong et al., 2008; Kim et al., 2005; Okada et al., 1998; Mino, Tamura, and Ogawa, 1991) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงของสายโซ่ข้าง (side chain mobility) มากขึ้น คอนจูเกตของพันธะ π ภายในสายโซ่หลักลดลง คอนจูเกตพันธะ π จึงมีความยาวสั้นลง (Ahn, Lee, and Kim, 2009; Okada et al., 1998) ดังนั้นพอลิไดแอเซทีลีนจึงปรากฏเป็นสีแดงหรือสีม่วงที่สามารถสังเกตการเปลี่ยนสีได้ด้วยตาเปล่า โดยปกติพอลิไดแอเซทีลีนเวสิเคิลเปลี่ยนสีกับอุณหภูมิแบบผันกลับไม่ได้ (irreversible) วิธีการควบคุมการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิแบบผันกลับได้ของพอลิไดแอเซทีลีนเวสิเคิลคือการควบคุมความแข็งแรง (strength) ของอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างสายโซ่ข้างแต่ละสาย (Wacharasindhu et al., 2010; Wu et al., 2009; Kim et al., 2005; Okada et al., 1998) ด้วยการเปลี่ยนแปลงความยาวของสายโซ่ข้างและชนิดของส่วนหัวของพอลิไดแอเซทีลีน (Wacharasindhu et al., 2010; Yuan, Lee, and Lee, 2006; Lee, Koepsel, and Russell, 2005; Yuan, Lee, and Lee, 2004)



ภาพที่ 2.11 โครงสร้างเวสิเคิลของ (ด้านซ้าย) พอลิไดอะเซทิลีนบริสุทธ์ในน้ำ
และ (ด้านขวา) พอลิไดอะเซทิลีนซิงค์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตในน้ำ
(Traiphol et al., 2011)

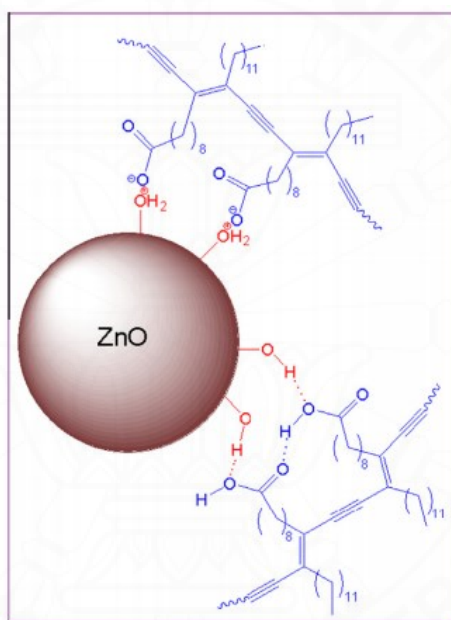
กลุ่มวิจัยของ Kim ที่มหาวิทยาลัยเกาหลี (Ahn, Lee, and Kim, 2009; Kim et al., 2005) อธิบายถึงการเพิ่มของพันธะไฮโดรเจนและการเพิ่มอันตรกิริยา $\pi-\pi$ ($\pi-\pi$ interaction) บริเวณพื้นผิวของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล ส่งผลต่อพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีกับอุณหภูมิแบบผันกลับได้ นอกจากนี้ยังมีการใช้อีกคือ ส่วนหัวหรือ head group ถูกทำให้ติดกันโดยใช้ตัวเชื่อมโยง (chemical linker) (Wacharasindhu et al., 2010; Yuan, Lee, and Lee, 2006) หรือโครงตาข่ายซิลิกา (silica network) (Peng et al., 2006; Peng et al., 2005) การเพิ่มอุณหภูมิทำให้เกิดการไดนามิกส์ของสายโซ่ข้างแต่ส่วนหัว head group ยังคงยึดเหนี่ยวซึ่งกันและกัน

ด้วยอันตรกิริยาอย่างเข้ม (strong interaction) หรือพันธะเคมี (chemical bonding) (Ahn, Lee, and Kim, 2009) ดังนั้นสายโซ่ข้างและสายโซ่หลักของพอลิไดแอเซทิลีนสามารถกลับสู่รูปร่างเดิม (original conformation) เมื่ออุณหภูมิเย็นตัวลง จึงกล่าวได้ว่าอันตรกิริยาที่บริเวณพื้นผิวของพอลิไดแอเซทิลีนเป็นปัจจัยสำคัญมากที่บ่งบอกถึงการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีน

การพัฒนาสมบัติของพอลิไดแอเซทิลีนโดยการเติมอนุภาคระดับนาโนเมตรของซิงค์ออกไซด์เข้าไปในโครงสร้างเวสิเคิลของพอลิไดแอเซทิลีน (Rungruangviriya and Traiphol, 2010) เป็นการเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่และภายในสายโซ่ของระบบ เพื่อให้เกิดเป็นพอลิไดแอเซทิลีนซิงค์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตที่มีซิงค์ออกไซด์ทำหน้าที่เป็นตัวรองรับ โดยที่หมู่คาร์บอกซิลิกที่บริเวณส่วนหัวของสายโซ่พอลิไดแอเซทิลีนจะเข้าไปยึดเกาะกับหมู่ที่ว่องไว (active group) บนพื้นผิวของซิงค์ออกไซด์ด้วยแรงระหว่างประจุ (ionic interaction) และพันธะไฮโดรเจน (Chanakul, Traiphol, and Traiphol, 2013) ส่งผลให้เกิดการจัดเรียงตัวของพอลิไดแอเซทิลีนที่เป็นระเบียบมากยิ่งขึ้น (วิภาวี ปัญญานันท์กิตต์, 2558) และเป็นสาเหตุสำคัญที่ส่งผลให้พอลิไดแอเซทิลีนซิงค์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตสามารถเปลี่ยนสีกับอุณหภูมิแบบผันกลับได้

การเติมอนุภาคระดับนาโนเมตรของซิงค์ออกไซด์เข้าไปในโครงสร้างพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล จะทำให้เกิดความแตกต่างของอันตรกิริยาระหว่างผิวหน้า (interfacial interactions) ของพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลบริสุทธิ์และพอลิไดแอเซทิลีนซิงค์ออกไซด์นาโนคอมพอสิต ดังภาพที่ 2.11 โดยที่บริเวณพื้นผิวของอนุภาคระดับนาโนเมตรของซิงค์ออกไซด์ในน้ำประกอบด้วยหมู่ Zn-OH หมู่ Zn-OH_2^+ และหมู่ Zn-O^- (Liufu, Xiao, and Li, 2006; Liufu, Xiao, and Li, 2004; Nagao, 1971) ที่อัตราส่วนแตกต่างกันตามพีเอชของสารละลาย ถ้าค่าพีเอชน้อยกว่า 7 หรือสารละลายมีความเป็นกรด ที่บริเวณพื้นผิวของซิงค์ออกไซด์จะมีหมู่ Zn-OH และหมู่ Zn-OH_2^+ อยู่เป็นส่วนใหญ่ (Liufu, Xiao, and Li, 2006; Liufu, Xiao, and Li, 2004) ดังนั้นไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ของ 10,12-เพนตะโคเซไดอานีนิกแอซิดในน้ำของอนุภาคซิงค์ออกไซด์คาดว่าจะเกิดการการจัดเรียงตัวใหม่อย่างเป็นระเบียบด้วยตนเองบนพื้นผิวของซิงค์ออกไซด์ด้วยแรงระหว่างประจุและพันธะไฮโดรเจนดังภาพที่ 2.12 แสดงอันตรกิริยาของพอลิไดแอเซทิลีนบนผิวของอนุภาคระดับนาโนเมตรของซิงค์ออกไซด์ หมู่ Zn-OH และหมู่ Zn-OH_2^+ เป็นตำแหน่งการยึดติด (anchoring site) สำหรับหมู่คาร์บอกซิล ($-\text{COOH}$) และหมู่คาร์บอกซิเลตไอออน ($-\text{COO}^-$) ในบริเวณส่วนหัวของไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ของ 10,12-เพนตะโคเซไดอานีนิกแอซิด โดยเกิดพันธะไอออนิกระหว่างหมู่คาร์บอกซิเลตในส่วนหัวกับ Zn-OH_2^+ บริเวณพื้นผิวของซิงค์ออกไซด์ และเกิดพันธะไฮโดรเจนในหมู่คาร์บอกซิลของบริเวณส่วนหัวกับ Zn-OH ถ้าอันตรกิริยาระหว่างผิวหน้าที่มีความแข็งแรงจะช่วยส่งเสริมการจัดเรียงโมเลกุลเพื่อให้ได้เป็นโครงสร้างอย่างเป็นระเบียบ

(molecular ordering) ของไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ของ 10,12-เพนตะโคเซไดอายนโนอิกแอซิด ซึ่งส่งผลต่อการไดนามิกส์ของสายโซ่ข้างและความยาวระบบคอนจูเกตพันธะ π ของไดแอเซทิลีนพอลิเมอร์ของ 10,12-เพนตะโคเซไดอายนโนอิกแอซิดซึ่งส่งผลต่อพฤติกรรมการเปลี่ยนสีกับอุณหภูมิ จากงานวิจัยที่กล่าวข้างต้นจะเห็นได้ว่าการสังเคราะห์พอลิไดแอเซทิลีนซิงค์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตด้วยการเติมอนุภาคระดับนาโนเมตรของซิงค์ออกไซด์นั้น สามารถทำได้ง่าย เช่นเดียวกับการเตรียมพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล ทั้งยังส่งผลให้มีความเสถียรและสามารถผันกลับสีได้ ซึ่งเป็นสมบัติเด่นที่เป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้งานได้หลากหลายมากยิ่งขึ้นและลดการใช้ทรัพยากรลงเนื่องจากสามารถใช้ตรวจวัดซ้ำได้

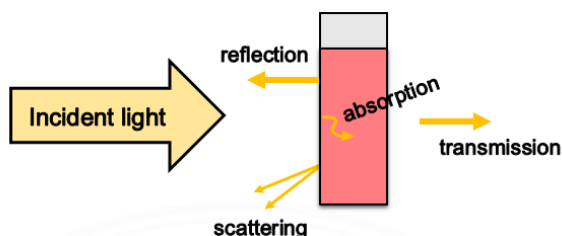


ภาพที่ 2.12 ภาพแสดงพันธะไฮโดรเจนและแรงระหว่างประจุ ระหว่างหมู่คาร์บอกซิล ($-\text{COOH}$) และ หมู่คาร์บอกซิเลตไอออน ($-\text{COO}^-$) ของพอลิไดแอเซทิลีน กับ หมู่ $\text{Zn}-\text{OH}$ และ หมู่ $\text{Zn}-\text{OH}_2^+$ บริเวณพื้นผิวของซิงค์ออกไซด์ (Traiphol et al., 2011)

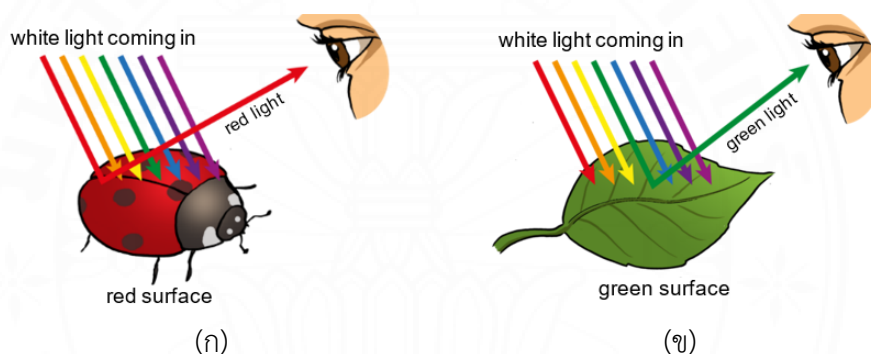
2.2 สีที่ถูกดูดกลืนและสีที่มองเห็นของวัตถุ

เมื่อมีแสงมาตกกระทบกับสารละลายจะเกิดอันตรกิริยาระหว่างแสงกับสารละลาย ดังภาพที่ 2.13 โดยแสงบางส่วนสามารถส่องผ่านสารละลายได้ (transmission) บางส่วนถูกสารละลายดูดกลืน (absorption) บางส่วนเกิดการสะท้อนกับสารละลาย (reflection) และแสงบางส่วนเกิดการกระเจิงแสงได้ (scattering) ทั้งนี้ปริมาณของแสงที่ส่องผ่านสารละลาย

ถูกสารละลายดูดกลืน สะท้อนออกจากสารละลาย และกระเจิงแสงนั้น ขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของสารละลายพร้อมทั้งค่าความยาวคลื่นแสงที่มากกระทบกับสารละลาย



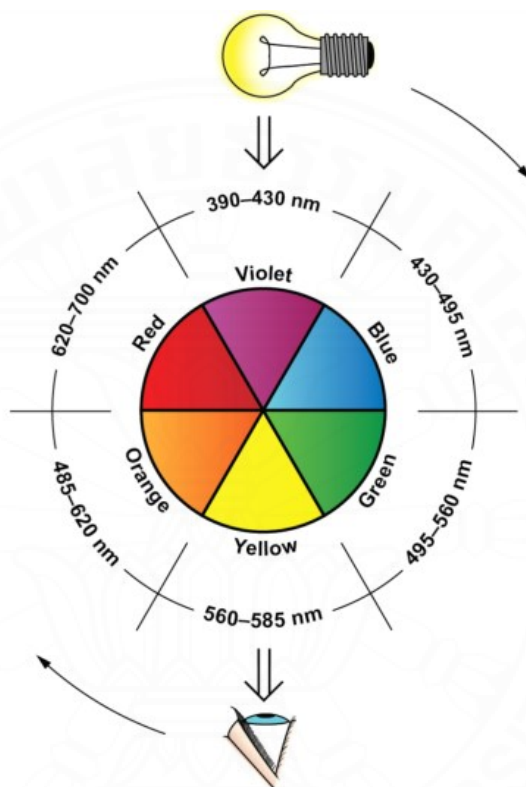
ภาพที่ 2.13 อันตรกิริยาของแสงกับสารละลาย (เขมจิรา มะลิซ้อน, 2562)



ภาพที่ 2.14 แสงที่ตกกระทบและแสงที่สะท้อนออกจากวัตถุสีต่าง ๆ แสดงการมองเห็นวัตถุเป็น (ก) สีแดง และ (ข) สีเขียว (Siyavula Education, 2015)

สำหรับการอธิบายสีที่ถูกดูดกลืนและสีที่มองเห็นของวัตถุ (absorbed-transmitted color feature) นั้น สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อมีแสงขาว (white light) หรือแสงที่มองเห็นได้ (visible light) ตกกระทบหรือส่องผ่านวัตถุหนึ่ง วัตถุอาจเกิดการดูดกลืนแสงบางส่วนหรือดูดกลืนแสงทั้งหมด หรืออาจไม่มีการดูดกลืนแสงเลย ถ้าหากวัตถุเหล่านั้นดูดกลืนแสงทั้งหมดจะทำให้มองเห็นวัตถุนั้นเป็นสีดำ ในทางกลับกันหากวัตถุนั้นไม่มีการดูดกลืนแสงเลยจะทำให้เห็นวัตถุนั้นเป็นสีขาว แต่ถ้าดูดกลืนแสงบางส่วนจะมองเห็นสีต่าง ๆ เป็นสีตรงข้ามของสีที่ถูกดูดกลืนเมื่อเทียบตามวงล้อสี (color wheel) ดังตัวอย่างในภาพที่ 2.14 เห็นได้ว่าแสงที่ตกกระทบลงบนวัตถุทั้ง 2 เป็นแสงสีขาว แต่การที่ผู้สังเกตมองเห็นวัตถุเป็นสีแดงได้นั้นเนื่องมาจากวัตถุมีความสามารถในการดูดกลืนแสงทุกช่วง ยกเว้นช่วงแสงสีแดงที่วัตถุไม่สามารถดูดกลืนได้ วัตถุจึงปล่อยสีแดงสะท้อนออกมาจากวัตถุ จึงทำให้ผู้สังเกตมองเห็นวัตถุเป็นสีแดง หรือการที่เรามองเห็นวัตถุเป็นสีเขียวเนื่องมาจากมีแต่แสง

ช่วงสีเดียวที่สะท้อนเข้าตาของเราส่วนแสงสีอื่น ๆ นั้นถูกวัตถุดูดกลืน จากเหตุการณ์ดังกล่าวสามารถบอกได้ว่าวัตถุสีต่าง ๆ ที่มีแสงขาวตกกระทบนั้นจะมีแสงสีบางช่วงที่ถูกดูดกลืนและปล่อยให้แสงบางช่วงสะท้อนออกมา หลักการพิจารณาวัตถุสีต่าง ๆ มีความสามารถในการดูดกลืนแสงสีใดนั้นสามารถใช้วงล้อสี ดังแสดงในภาพที่ 2.15 ในการอธิบายการดูดกลืนแสงของวัตถุสีต่าง ๆ



ภาพที่ 2.15 วงล้อสี (Algar et al., 2016)

ในสารละลายที่มีสีและมีการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิธีเบิลสเปกโทรสโกปี โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นแสงที่ถูกดูดกลืนกับสีของสารละลายที่มองเห็นดังภาพที่ 2.15 แสดงให้เห็นว่าสีของสารละลายที่เห็นนั้นจะไม่ใช่แสงสีที่ถูกดูดกลืนแต่เป็นแสงสีที่ผ่านออกมาจากสารละลาย นั้นหมายความว่าแสงที่ส่องผ่านออกมาจากสารละลายจึงมีสีตรงข้ามกับแสงที่ถูกดูดกลืน เช่น สารละลายสีน้ำเงินจะดูดกลืนแสงสีส้ม ถ้าเขียนกราฟระหว่างความยาวคลื่นและค่าการดูดกลืนจะพบสเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณช่วงคลื่นของแสงสีส้ม ดังนั้นจากภาพที่ 2.15 สามารถนำมาระบุถึงความสามารถของสารละลายสีต่าง ๆ ที่มีความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงสีที่เราสามารถมองเห็นได้ตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นแสงที่ถูกดูดกลืนกับสีของสารละลายที่มองเห็น

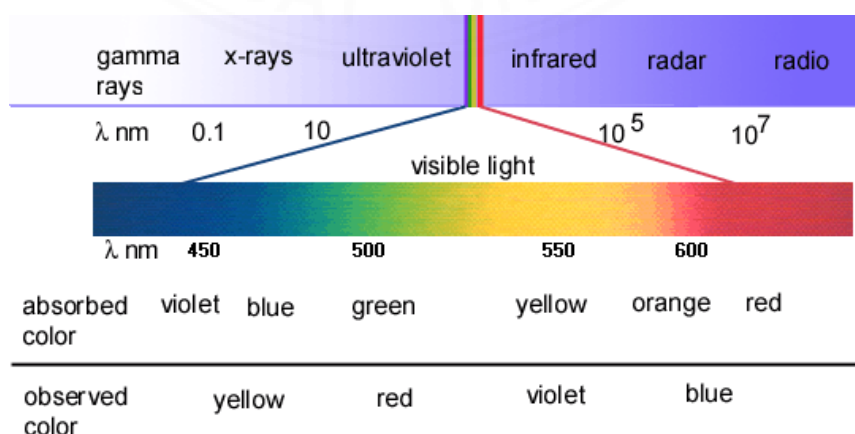
ความยาวคลื่น (nm)	สีที่ถูกดูดกลืน	สีที่มองเห็น
380-420	ม่วง	เขียว-เหลือง
420-440	ม่วง-ฟ้า	เหลือง
440-470	น้ำเงิน	ส้ม
470-500	เขียว-น้ำเงิน	แดง
500-550	เขียว-เหลือง	ม่วง
550-580	เหลือง	ม่วง-น้ำเงิน
580-620	ส้ม	น้ำเงิน
620-780	แดง	เขียว-น้ำเงิน

ที่มา: (สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้, 2561)

2.3 หลักการและเทคนิคในการวิเคราะห์การเปลี่ยนสีของวัสดุ

2.3.1 เทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี

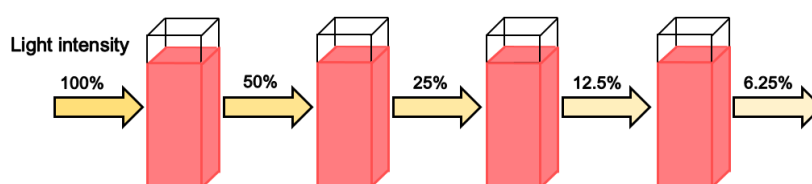
แสงที่ตามองเห็นเป็นส่วนหนึ่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave) ที่มีความเร็วในสุญญากาศเท่ากับ 3×10^8 เมตร/วินาที โดยภาพที่ 2.16 แสดงแถบสเปกตรัมหรือแถบรังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ กัน และสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงที่ตามองเห็น



ภาพที่ 2.16 แถบสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (University of Illinois Archives, 1999)

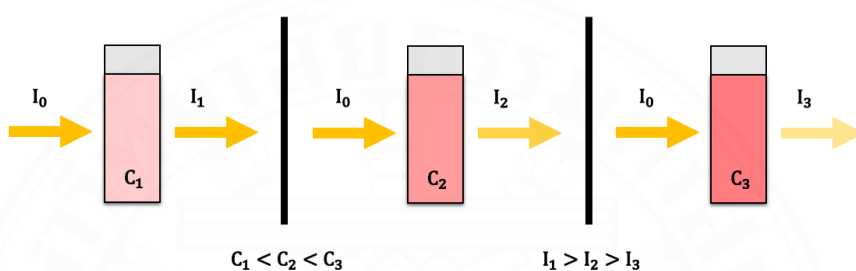
พอลิไดแอเซทิลีนเป็นสารอินทรีย์ (organic compound) ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก เมื่อดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ตช่วงความยาวคลื่น 190-400 นาโนเมตร หรือแสงที่ตามองเห็นช่วงความยาวคลื่น 400-800 นาโนเมตร เวเลนซ์อิเล็กตรอนที่อยู่ในออร์บิทัลในพันธะ σ พันธะ π หรืออิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว เกิดแทรนซิชันจากสถานะพื้นไปยังสถานะถูกกระตุ้น ซึ่งสามารถวิเคราะห์โครงสร้างสารอินทรีย์ด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปีได้ โดยทั่วไปสารอินทรีย์ที่ไม่มีสีจะดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ตช่วงความยาวคลื่น 190-400 นาโนเมตร และสารอินทรีย์ที่มีสีจะดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-800 นาโนเมตร กรณีพอลิไดแอเซทิลีน โครงสร้างสายโซ่หลักมีพันธะคู่ พันธะสาม สลับกับพันธะเดี่ยว ซึ่งเกิดการแทรนซิชันแบบ $\pi - \pi^*$ หลังจากดูดกลืนรังสีที่มีความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตร จึงสามารถวัดค่าการดูดกลืนแสงของพอลิไดแอเซทิลีนด้วยเครื่องอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปีได้

ในธรรมชาติเมื่อมีแสงมาตกกระทบกับสารหรือสารละลายจะเกิดอันตรกิริยาระหว่างแสงกับสารหรือสารละลายดังภาพที่ 2.13 นักวิทยาศาสตร์จึงนำสมบัติเหล่านี้ไปใช้เป็นวิธีวิเคราะห์ โดยที่กฎของแสงที่นำมาใช้วิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงจะพิจารณาเฉพาะแสงที่ตกกระทบแสงที่ดูดกลืน และแสงที่ส่องผ่านเท่านั้น โดยไม่ได้คำนึงถึงอิทธิพลของคลื่นแสงรบกวน (stray light) เมื่อสารอินทรีย์ดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลที่มีค่าพลังงานเท่ากับผลต่างของพลังงานที่สถานะพื้นและสถานะถูกกระตุ้น ความเข้มแสงหรือค่าการดูดกลืนแสงจะเป็นไปตามกฎของเบียร์และแลมเบิร์ต (Beer-Lambert's law) กฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law) กล่าวว่า “เมื่อมีแสงที่มีความยาวคลื่นเดียว (monochromatic light) ผ่านตัวกลางเนื้อเดียว สัดส่วนของความเข้มของแสงที่ถูกตัวกลางนั้นดูดกลืนไว้ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงที่กระทบตัวกลางนั้น และความเข้มของแสงจะถูกแต่ละชั้นของตัวกลางดูดกลืนไว้ในสัดส่วนที่เท่ากัน” จากภาพที่ 2.17 อธิบายได้ว่าเมื่อแสงเดินทางผ่านสารละลายในแต่ละชั้น จะถูกโมเลกุลของสารละลายของแต่ละชั้นดูดกลืนแสงไป 50% ของแสงที่มาตกกระทบ และหากเปลี่ยนชนิดของสารละลายหรือแสงที่มาตกกระทบ อัตราการดูดกลืนแสงในแต่ละชั้นจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไป แต่การดูดกลืนที่แต่ละชั้นจะมีค่าการดูดกลืนที่เท่ากัน



ภาพที่ 2.17 แสดงค่าการดูดกลืนแสงเมื่อแสงเคลื่อนผ่านสารละลายที่ชั้นต่าง ๆ
(เขมจิรา มะลิซ้อน, 2562)

กฎของเบียร์ (Beer's law) กล่าวว่า “เมื่อแสงที่มีความยาวคลื่นเดียว ผ่านตัวกลางเนื้อเดียว สัดส่วนของความเข้มของแสงที่ถูกตัวกลางนั้นดูดกลืนไว้แปรผันโดยตรงกับ ปริมาณความเข้มข้นของตัวกลางที่ดูดกลืนแสงนั้น” จากภาพที่ 2.18 ถ้าสารละลายชนิดเดียวกัน ความเข้มข้นต่างกัน โดยสารละลาย C_2 มีค่าความเข้มข้นมากกว่าสารละลาย C_1 เมื่อแสงเคลื่อนที่ ผ่านสารละลาย C_2 แสงที่ส่องผ่านออกมาจะมีค่าความเข้มแสงน้อยกว่าแสงที่ผ่านสารละลาย C_1 สารละลาย C_2 ดูดกลืนแสงได้มากกว่า



ภาพที่ 2.18 แสดงการเคลื่อนที่ของแสงผ่านสารละลายที่มีความเข้มข้นต่างกัน
(เขมจิรา มะลิซ้อน, 2562)

เมื่อรวมกฎของเบียร์และแลมเบิร์ตเข้าด้วยกันจึงอธิบายได้ว่าการวัด ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายหนึ่ง ๆ จะขึ้นอยู่กับทั้งความเข้มข้นและระยะทางที่แสงเคลื่อนที่ ผ่านสารละลาย โดยค่าการส่งผ่าน (transmittance; T) เป็นสัดส่วนกับปริมาณแสงที่เหลือผ่าน ออกมา (I) ต่อปริมาณแสงที่ผ่านเข้าไปในสารตัวอย่าง (I_0) เขียนสมการได้ว่า

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (2.1)$$

ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance; A) นิยามสมการได้เป็น

$$A = \log \left(\frac{I_0}{I} \right) = -\log T \quad (2.2)$$

โดยทั่วไปจะรายงานค่าการส่งผ่านเป็นเปอร์เซ็นต์ ($\%T$) และความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละของ การส่งผ่านและการดูดกลืนแสงแสดงดังสมการ

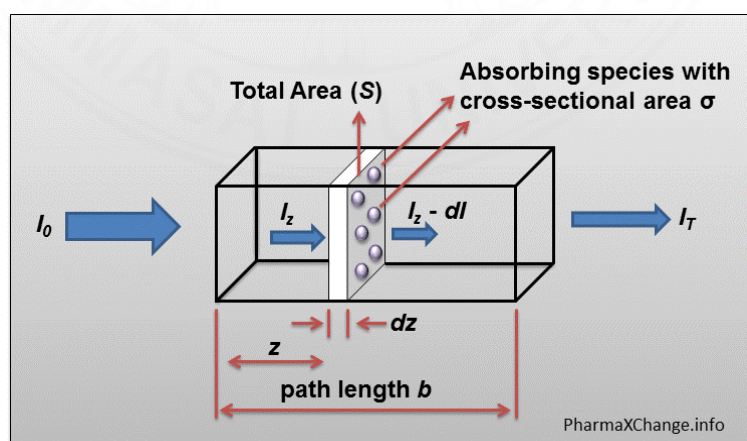
$$A = 2 - \log \%T \quad (2.3)$$

จากสมการที่ 2.3 อธิบายได้ว่า เมื่อแสงสามารถส่องผ่านสารละลายได้ร้อยละ 100 นั่นคือสารละลายไม่มีการดูดกลืนแสง จึงได้ค่า $A = 0$ หากแสงมีการส่องผ่านออกมาได้ร้อยละ 10 นั่นคือค่า $A = 1$ และหากแสงสามารถส่องผ่านออกมาได้เพียงร้อยละ 1 นั่นคือมีค่าการดูดกลืนเป็น $A = 2$ เป็นต้น ในข้างต้นจะเห็นได้ว่าค่าการดูดกลืนแสงจะมีค่าขึ้นอยู่กับทั้งค่าความเข้มข้นและความหนาของสารละลาย จึงสามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$A = \epsilon bC \quad (2.4)$$

- เมื่อ A คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสาร
 ϵ คือ เป็นสมบัติจำเพาะของสารที่ดูดกลืนและวัดที่ความยาวค่าหนึ่ง เรียกว่า molar absorptivity มีหน่วยเป็น ลิตร/โมล-เซนติเมตร ($\text{L mol}^{-1} \text{cm}^{-1}$)
 b คือ ระยะทางที่แสงผ่านตัวอย่าง มีหน่วยเป็น เซนติเมตร (cm)
 C คือ ความเข้มข้นของสาร มีหน่วยเป็น โมลต่อลิตร หรือโมลาร์ (M)

จากสมการที่ 2.4 บอกได้ว่า เมื่อค่าความเข้มข้นหรือความหนาของบรรจุภัณฑ์ของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าการดูดกลืนแสงก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ในทางกลับกันถ้าสารละลายมีความเข้มข้นหรือความหนาของบรรจุภัณฑ์น้อยลง ค่าการดูดกลืนแสงก็จะมีค่าลดลงไปด้วย



ภาพที่ 2.19 แผนภาพแสดงแสงเชิงเดี่ยวเมื่อส่องผ่านสารละลาย
 ที่สอดคล้องตามกฎของเบียร์และแลมเบิร์ต (Mehta, 2012)

การวัดค่าการส่องผ่านหรือการดูดกลืนแสงที่สอดคล้องกับกฎของเบียร์และแลมเบิร์ตอีกวิธีการหนึ่งที่สามารถนำมาคำนวณหาค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมื่อ สารละลายมีการเปลี่ยนแปลงทั้งความเข้มข้นและความหนาของสารละลาย พิจารณาเมื่อมีแสงที่มีความเข้ม I_0 เคลื่อนที่ทะลุผ่านสารละลายความหนา b เซนติเมตร และมีจำนวนโมเลกุลซึ่งสามารถดูดกลืนแสงได้จำนวน N โมเลกุลต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าความเข้มแสงจะลดลงเหลือ I โดยแต่ละโมเลกุลในสารละลายสามารถดูดกลืนแสงไว้ได้ (typical cross-sections; σ) ตารางเซนติเมตรต่อโมเลกุล (Thani, Al-Ameri, and Sultan, 2018) ดังแสดงในสมการที่ 2.5

$$I = I_0 e^{-\sigma Nb} \quad (2.5)$$

นำสมการที่ 2.5 เขียนให้อยู่ในรูปที่สอดคล้องกับสมการที่ 2.1 จะได้เป็น

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\sigma Nb} \quad (2.6)$$

การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ (qualitative) และเชิงปริมาณ (quantitative) ด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี โดยหลักการแล้วสเปกตรัมซึ่งเกิดจากการดูดกลืนแสงในช่วงรังสีอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลของสารตัวอย่างจะแสดงคุณสมบัติเฉพาะของสารนั้น ๆ ทำให้สามารถนำไปใช้วิเคราะห์ชนิดของสารได้ โดยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จะให้ผลเพียงคร่าว ๆ จึงควรใช้เทคนิคอื่นร่วมวิเคราะห์ด้วย สำหรับการวิเคราะห์สารในเชิงปริมาณสามารถทำได้โดยใช้วิธีการทำกราฟมาตรฐานระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและค่าความเข้มแสง

2.3.2 การวิเคราะห์ทางสีด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี

วิธีการวิเคราะห์เชิงปริมาณสำหรับผลการเปลี่ยนสี (colorimetric analysis) ของพอลิไดแอเซทิลีนเมื่อมีการรบกวนระบบ ซึ่งสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่ได้จากเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปีจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและค่าการดูดกลืนแสง โดยวิธีการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงโดยนำค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นของระบบที่ไม่ได้ถูกรบกวน ($\lambda \approx 640$ นาโนเมตร) และค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นของระบบที่ถูกรบกวน ($\lambda \approx 540$ นาโนเมตร) มาคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์การตอบสนองในการเปลี่ยนสี (colorimetric response; %CR) ดังสมการที่ 2.7 และ 2.8 (Okada et al., 1998; Charych et al., 1993)

$$\%CR = \frac{PB_0 - PB_f}{PB_0} \times 100 \quad (2.7)$$

โดยที่

$$PB = \frac{Absorbance_{640}}{Absorbance_{640} + Absorbance_{540}} \times 100\% \quad (2.8)$$

เมื่อ PB_0 คือ พอลิไดแอเซทิลีนที่ไม่ได้รับการกระตุ้น

PB_f คือ พอลิไดแอเซทิลีนที่ถูกกระตุ้นด้วยสิ่งเร้าภายนอก

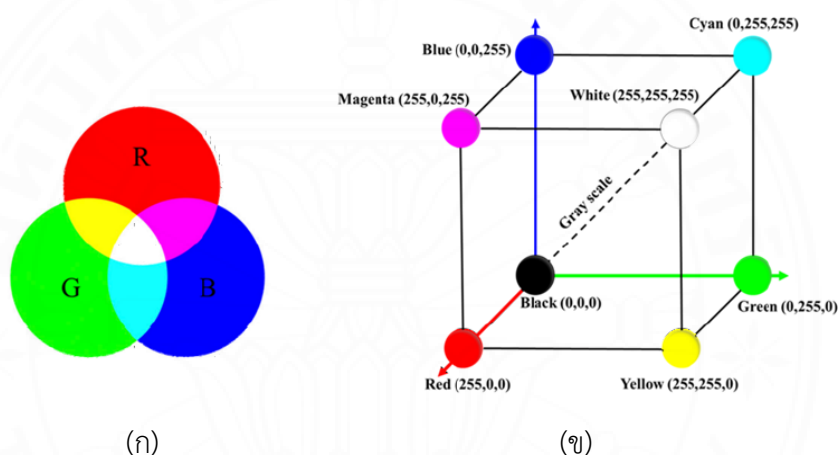
2.3.3 การวิเคราะห์ทางสีจากภาพร่วมกับโปรแกรมประมวลผลภาพ

การตรวจวิเคราะห์ระดับความเข้มข้นของสารที่ต้องการวิเคราะห์เชิงปริมาณแบบมาตรฐานมีหลายวิธี เช่น เทคนิคทางสเปกโทรสโกปี และเทคนิคทางไฟฟ้าเคมีต่าง ๆ เป็นต้น ซึ่งเทคนิคดังกล่าวมีสภาพไว (sensitivity) โดยสามารถตรวจวัดได้ในระดับต่ำ ๆ และมีความจำเพาะเจาะจง (selectivity) สูง แต่มีข้อจำกัดคือยังต้องใช้เครื่องมือขั้นสูงที่มีราคาแพงและมีขั้นตอนยุ่งยาก ต้องอาศัยทักษะหรือผู้เชี่ยวชาญในการตรวจวิเคราะห์เชิงปริมาณ ปัจจุบันได้มีผู้วิจัยหลายกลุ่มมุ่งพัฒนาวิธีการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยใช้การวิเคราะห์ทางสีด้วยกล้องดิจิทัลหรือเครื่องสแกนเนอร์ เพื่อเก็บภาพรวมกับการใช้โปรแกรมประมวลผลภาพ (image processing software) เพื่ออ่านค่าความเข้มสี หรือใช้สมาร์ทโฟนที่มีการติดตั้งแอปพลิเคชันการประมวลผลภาพ เพื่อลดข้อจำกัดด้านการใช้เครื่องมือขั้นสูงที่มีราคาแพงและลดขั้นตอนที่ซับซ้อนโดยไม่ต้องอาศัยทักษะหรือผู้เชี่ยวชาญในการตรวจวิเคราะห์เชิงปริมาณ จะทำให้มีความง่ายในการตรวจวิเคราะห์ และสะดวกมากขึ้น

โดยทั่วไประบบสี (color model) ที่ใช้ในการวิเคราะห์ในปัจจุบันมีอยู่ 4 ประเภท ได้แก่ ระบบสีแดง เขียว น้ำเงิน (RGB color system) ระบบสีฟ้าอมเขียว ม่วงแดง เหลืองดำ (CMYK color system) ระบบเนื้อสี ความอิ่มตัวของสี ความสว่างของสี (HSB color system) และระบบกำหนดความสว่าง ไล่สีจากสีเขียวไปสีแดง ไล่สีจากสีน้ำเงินไปสีเหลือง (LAB color system) และการค้นคว้าเบื้องต้น พบว่าระบบสีที่สามารถวิเคราะห์ได้ง่าย ไม่ซับซ้อน คือ ระบบสีแดง เขียว น้ำเงิน red-green-blue (RGB)

การวิเคราะห์ทางสีจากรูปภาพ (Birch and Stickle, 2003) โดยการใช้ภาพจากการถ่ายภาพด้วยกล้องบนสมาร์ทโฟนหรือกล้องดิจิทัลภายใต้ภาวะที่เหมาะสมในการถ่ายภาพ เช่น ในกล่องควบคุมแสง หรือการใช้เครื่องสแกนเนอร์ภายใต้ภาวะที่มีการควบคุมแสง ร่วมกับโปรแกรมประมวลผลภาพ เช่น ImageJ ColorAssist RGB tool และ Adobe Photoshop (Naorungroj

et al., 2021; Masawat, Harfield, and Namwong, 2015) เป็นต้น เพื่อติดตามความเข้มสีที่เปลี่ยนไปตามความเข้มสีของสารที่ต้องการวิเคราะห์ด้วยระบบแสงสีแดง เขียว น้ำเงิน ซึ่งสามารถคำนวณย้อนกลับเป็นค่าการดูดกลืนแสงได้ โดยจะให้ผลการวิเคราะห์สอดคล้องกับเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี นอกจากนี้โดยทั่วไปแสงสีในระบบ RGB จะใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ เช่น โทรศัพท์มือถือ สมาร์ทโฟน กล้องดิจิทัล ซึ่งแสงในระบบ RGB นี้ยังใช้อธิบายการมองเห็นของมนุษย์อีกด้วย (Jayawardane et al., 2014; Jayawardane, Wei, McKelvie, and Kolev, 2014; Jayawardane, McKelvie, and Kolev, 2012) ดังนั้นการวิเคราะห์ทางสีในระบบ RGB จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ



ภาพที่ 2.20 (ก) แบบจำลองสีในระบบ RGB และ (ข) การรวมกันของแม่แสงสีทำให้เกิดแสงสีใหม่โดยขึ้นกับอัตราส่วนของ RGB (Burger and Burge, 2009; Sharma G., 2002)

ตามทฤษฎีแสงสี แสงสีที่มองเห็นในระบบ RGB ประกอบด้วยแม่สีของแสงสามสีคือ สีแดง (R) สีเขียว (G) และสีน้ำเงิน (B) ดังในภาพที่ 2.20 (ก) โดยการรวมกันของแม่แสงสีจะทำให้ได้สีใหม่เกิดขึ้นตามอัตราส่วนของ RGB การนำระบบ RGB ไปใช้ในภาพดิจิทัลอนาล็อก 8 บิต ที่สามารถบอกค่าสีของแสงแต่ละสีตามค่าความเข้มสีได้ 256 ค่า ด้วยระดับที่แตกต่างกัน (0-255) เมื่อนำแม่สีของแสงทั้งสามสีนี้มารวมกัน แต่ละสีของ 1 พิกเซลในภาพดิจิทัลแสดงค่าความเข้มสีของแม่แสงสีในรูปแบบของ (R, G, B) ด้วยโปรแกรมประมวลผลภาพดังในภาพที่ 2.20 (ข) ค่า (R, G, B) ของแสงสีขาวมีค่า (R=255, G=255, B=255) แต่เมื่อค่า RGB ในแต่ละค่ามีค่าลดน้อยลงจนเป็น 0 ทั้งสามค่า (R=0, G=0, B=0) แสงที่เปล่งออกมาจะมีสีดำ โดยค่าสีที่ได้จากแต่ละช่องแสงสี RGB นั้น เป็นสีผสมเชิงลบ (subtractive color) เป็นสีที่ถูกดูดกลืนตามความยาวคลื่นแสง เช่น แสงสีน้ำเงิน เขียว และ

แดง มีช่วงความยาวคลื่น 430-495, 495-560 และ 620-700 นาโนเมตร ตามลำดับ ซึ่งส่งผลต่อการมองเห็นซึ่งตรงกันข้ามกับการรับรู้แสงสีของมนุษย์ (Choodum et al., 2013; Choodum et al., 2012; Choodum and Daeid, 2011; Byrne et al., 2000; Cantrell et al., 2010; Suziki et al., 2006; Birch and Stickler, 2003; Giorgianni and Madden, 1998; Epperson et al., 1988) โดยการตรวจวัดค่าสีที่ได้แต่ละช่องแสงสี RGB นั้นที่เป็นสีผสมเชิงลบซึ่งเป็นสีที่ถูกดูคลืนตามความยาวคลื่นแสงนั้น จะให้ค่าสัญญาณการตอบสนองไวสูง ส่งผลให้การวิเคราะห์หามีความไวสูง ซึ่งหลักการและทฤษฎีมีความสอดคล้องกับเทคนิคอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (Rattanakaroonjit et al., 2020)

วิธีการวิเคราะห์เชิงปริมาณสำหรับผลการตอบสนองการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนเมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยสิ่งเร้าภายนอก โดยใช้การวิเคราะห์ทางสีด้วยการใช้ภาพจากเครื่องสแกนเนอร์ภายใต้ภาวะที่มีการควบคุมแสงร่วมกับโปรแกรมประมวลผลภาพ MATLAB® software ค่าความเข้มสีของบริเวณตรวจวัดจะถูกวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมประมวลผลภาพ พบว่าการวิเคราะห์แสงสีของบริเวณตรวจวัดด้วยระบบ RGB เหมาะสมที่จะใช้ในการตรวจวัดทางสี เนื่องจากในการตรวจวัดทางสีของปฏิกิริยาให้เจดสีน้ำเงิน-ม่วง-แดง ซึ่งไม่ใช่เจดสีเดียว อย่างไรก็ตามในการตรวจวัดทางสีในปฏิกิริยาอาจใช้ระบบสีอื่นที่ให้สัญญาณตอบสนองไว และมีความจำเพาะมากที่สุด โดยอาศัยการใส่สารลงในไมโครเพลตขนาดเล็กที่ประกอบไปด้วย 96 หลุมด้วยไมโครปิเปตสำหรับการตรวจวัด แล้วนำไปสแกนด้วยเครื่องสแกนเนอร์ภายใต้ภาวะที่มีการควบคุมแสง แล้วตัดภาพเฉพาะส่วนที่ต้องการแสดงผล จากนั้นวิเคราะห์ค่าสีจากภาพที่ได้ด้วยสมการที่ 2.9 (Nguyen et al., 2020; Nguyen et al., 2019) ในการคำนวณหาค่าสัญญาณ (Signal) โดยจะต้องหาค่าความเข้มสีเฉลี่ย (average color value) จากสีหลักทั้ง 3 สี (RGB) ของตัวอย่างที่ได้มาจากข้อมูลสี ค่าความเข้มของสีหาได้จากการเลือกขอบเขตของภาพบริเวณที่สนใจ ซึ่งจะได้เป็นข้อมูลเมตริก โดยข้อมูลแต่ละค่าคือความเข้มของสีในแต่ละพิกเซลของภาพ จากนั้นจึงนำค่าที่ได้ทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ย เพื่อเพิ่มความถูกต้องในการวิเคราะห์

$$Signal = \frac{R/B}{R_0/B_0} \quad (2.9)$$

เมื่อ R คือ ค่าความเข้มสีเฉลี่ยของสีแดงของพอลิไดแอเซทิลีนที่ถูกกระตุ้น

B คือ ค่าความเข้มสีเฉลี่ยของสีน้ำเงินของพอลิไดแอเซทิลีนที่ถูกกระตุ้น

R_0 คือ ค่าความเข้มสีเฉลี่ยของสีแดงของพอลิไดแอเซทิลีนที่ยังไม่ถูกกระตุ้น

B_0 คือ ค่าความเข้มสีเฉลี่ยของสีน้ำเงินของพอลิไดแอเซทิลีนที่ยังไม่ถูกกระตุ้น

2.4 เซนเซอร์ทางเคมี

อุปกรณ์ตรวจวัด หรือ เซนเซอร์ ที่สามารถตรวจวัดสารวิเคราะห์โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของระบบ เรียกว่าเซนเซอร์ทางเคมี (chemosensor) เซนเซอร์ทางเคมีถูกพัฒนาขึ้นมาโดยใช้หลักการของเคมีซูพราโมเลคิวลาร์ (supramolecular chemistry) (Beer, Gale, and Smith, 1999) หรือการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลผ่านอันตรกิริยาแบบไม่สร้างพันธะโควาเลนต์ (non-covalent) เช่น พันธะไฮโดรเจน อันตรกิริยาแบบไฟฟ้าสถิต (electrostatic interaction) อันตรกิริยาแคทไอออน- π และ อันตรกิริยา π - π (Steed and Atwood, 2002; Lehn, 1995) เป็นต้น ซึ่งแม้ว่าอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นแรงกระทำที่แข็งแรงน้อยกว่าการสร้างพันธะโควาเลนต์มาก แต่เนื่องจากการยึดเกาะกันด้วยทิศทางและระยะทางที่แน่นอนทำให้โมเลกุลที่ได้มีความจำเพาะเจาะจงในการเลือกจับกับไอออนต่าง ๆ เช่น แคทไอออน แอนไอออน สวิตเทอร์ไอออน (zwitterion) หรือแม้กระทั่งโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์ (Uppa, 2014) โดยมีการแสดงผลเป็นสัญญาณที่สามารถอ่านวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ โดยอาจใช้หรือไม่ใช้เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ในการวิเคราะห์ผล

2.4.1 หลักการของเซนเซอร์ทางเคมี

เซนเซอร์ทางเคมีอาศัยหลักของการเปลี่ยนแปลงทางเคมีระหว่างโมเลกุล ซึ่งอาจเกิดผ่านกลไกการเคลื่อนย้ายประจุระหว่างโมเลกุลหรือการเกิดโคออดิเนชัน เซนเซอร์ทางเคมีประกอบด้วยส่วนพื้นฐานที่สำคัญ 2 ส่วนคือ ส่วนจับโมเลกุล (binding site) หรือโมเลกุลของเซนเซอร์ส่วนที่เลือกจับ (recognition unit) กับสารวิเคราะห์หรือเกสต์ (guest) ส่วนนี้จำเป็นต้องมีความจำเพาะสูงกับสารวิเคราะห์ (analyte) โดยไม่ทำปฏิกิริยากับไอออนอื่น (competing ions) หรือ ไม่แสดงผลที่จะรบกวนการวิเคราะห์ คือมีการเลือกที่ดี (selectivity) และส่วนที่สองคือส่วนแสดงสัญญาณ (signaling unit) ทำหน้าที่แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่สามารถตรวจวัดได้ เช่น การเปลี่ยนสีของสาร เป็นต้น

หลักการทำงานของโมเลกุลตรวจจับหรือตัวรับ (receptor) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวเซนเซอร์หรือโฮสต์ (host) และไอออนซึ่งเป็นเกสต์นั้น จะมีหลักการการทำงานคล้ายกับหลักการของแม่กุญแจและลูกกุญแจ (lock and key principle) คือ โมเลกุลที่เป็นโฮสต์จะต้องมีความจำเพาะเจาะจง (specific) ในการเลือกจับกับเกสต์ตัวใดตัวหนึ่งชนิดเดียวเท่านั้น ด้วยเหตุนี้จึงเรียกได้ว่าเป็นการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลโฮสต์-เกสต์ (host-guest chemistry)

2.4.2 ชนิดของเซนเซอร์ทางเคมี

เซนเซอร์ทางเคมีสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ตามชนิดของสัญญาณแสดงผล

2.4.2.1 เซนเซอร์ทางไฟฟ้า (electronic sensor)

เซนเซอร์ทางไฟฟ้าเป็นการแสดงสัญญาณการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบของสมบัติทางเคมีไฟฟ้าโดยมักจะอาศัยการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ เซนเซอร์ในกลุ่มนี้สามารถแบ่งออกเป็น 5 ประเภท คือ

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

เซนเซอร์ไฟฟ้าส่วนใหญ่ประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ตัวตรวจวัดทางศักย์ไฟฟ้า (voltammetric sensor) หรือกระแสไฟฟ้า

2.4.2.2 เซนเซอร์ทางแสง (optical sensor)

เซนเซอร์ทางแสงเป็นการแสดงสัญญาณการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบสมบัติทางแสงของโมเลกุล อย่างเช่น การดูดกลืนหรือคายแสงในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

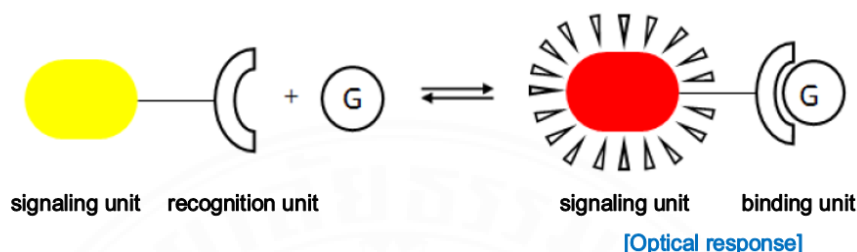
- (1) เซนเซอร์ที่อาศัยการเปลี่ยนแปลงสี (chromogenic/colorimetric sensor)
- (2) เซนเซอร์ที่อาศัยการเรืองแสง (fluorogenic sensor)

เมื่อพิจารณาจากความไวในการวิเคราะห์ของเซนเซอร์ทางเคมีทั้งสองชนิดนี้ จะพบว่าเซนเซอร์ที่อาศัยการเรืองแสงมีความไวที่สูงกว่า แต่ข้อจำกัดคือต้องใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์ ซึ่งแตกต่างกับเซนเซอร์ที่อาศัยการเปลี่ยนแปลงสีที่สามารถตรวจวัดด้วยตาเปล่าจากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีของสารได้โดยตรง

2.4.3 การออกแบบเซนเซอร์ทางเคมีโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงสี

เซนเซอร์ทางเคมีที่ให้สัญญาณเอาต์พุตเชิงแสง (ภาพที่ 2.21) ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนที่มีความจำเพาะกับสารวิเคราะห์ ทำหน้าที่ทำอันตรกิริยากับสารวิเคราะห์ ความจำเพาะหรือไวของเซนเซอร์ขึ้นกับลักษณะเฉพาะหรือโครงสร้างเคมีขององค์ประกอบนี้ และส่วน

แสดงผลสัญญาณ ทำหน้าที่สร้างสัญญาณเอาต์พุตออกมาในรูปของสีที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อพิจารณาจากแถบสเปกตรัมจะพบว่าการตอบสนองทางแสง (optical response) ของเซนเซอร์ที่อาศัยการเปลี่ยนแปลงสีเกิดขึ้นได้สองลักษณะตามการเลื่อนของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงสูงสุดเพิ่มขึ้น (red-shift) หรือลดลง (blue-shift)



ภาพที่ 2.21 องค์ประกอบของเซนเซอร์ทางเคมีที่ให้สัญญาณเชิงแสง (optical response sensor) (Chansuvarn, 2014; Máñez and Sancenón, 2003)

พอลิเมอร์ที่มีสมบัติเป็นเซนเซอร์ทางเคมีโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงสี (colorimetric sensor) ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากพอลิเมอร์เซนเซอร์มีความไวและความจำเพาะต่อสารทดสอบ และขึ้นรูปได้หลายรูปแบบ เช่น ฟิล์ม และไฮโดรเจล เป็นต้น พอลิเมอร์ที่มีสมบัติเป็นเซนเซอร์ทางเคมี แบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือ

- (1) พอลิเมอร์ที่มีลิแกนด์ติดอยู่กับหมู่แทนที่สำหรับทำหน้าที่เป็นหน่วยตรวจวัด (polymer sensors bearing pendant ligands for recognition)
- (2) คอนจูเกตพอลิเมอร์ (conjugated polymer based sensors)
- (3) เซนเซอร์กลุ่มเดนไดรเมอร์ (dendrimer based sensors)
- (4) เซนเซอร์พอลิเมอร์ที่มีรอยพิมพ์ (imprinted polymer based sensors)

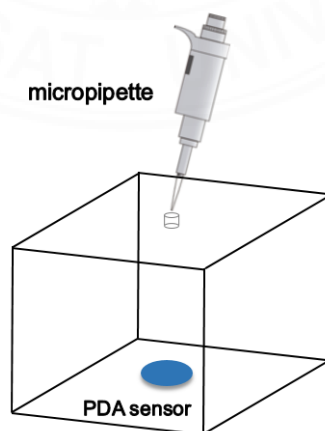
ในช่วงเวลาที่ผ่านมา มีงานวิจัยจำนวนมากที่เกี่ยวข้องกับพอลิเมอร์เซนเซอร์ ประเภทคอนจูเกตพอลิเมอร์อย่างพอลิไธโอเอเซทิลีน เนื่องจากเป็นวัสดุที่เตรียมได้ง่ายจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน แนวคิดในการออกแบบและสังเคราะห์โมเลกุลที่มีความจำเพาะกับสารวิเคราะห์พิจารณาจากสมบัติทางเคมีตามทฤษฎีกรด-เบสแบบแก่และอ่อน (hard-soft acids-bases; HSAB) เช่น เซนเซอร์ทางเคมีของพอลิไธโอเอเซทิลีนสำหรับตรวจวัดความเป็นกรดเบสด้วยเอนไซม์ยูรีเอส (Jannah and Kim, 2019) และตรวจวัด Pb^{2+} ไอออนในสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวกลาง (Wang et al., 2015) เอนไซม์ยูรีเอสทำหน้าที่ย่อยสลายยูเรียให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และแอมโมเนียที่มีสมบัติเป็นเบสอ่อน (soft base) และ Pb^{2+} มีสมบัติเป็นเบสอ่อนจึงชอบจับกับหมู่คาร์บอกซิล

ในโมเลกุล ที่มีสมบัติเป็นกรดอ่อน (soft acid) และส่วนแสดงสัญญาณอาศัยกลไกการเคลื่อนย้ายประจุระหว่างโมเลกุลเพื่อให้เกิดการแทรกซึมของอิเล็กตรอน โดยกลไกการเปลี่ยนแปลงสีของพอลิไดแอเซทิลีนนี้เกิดจากการเหนี่ยวนำของเอนไซม์ยูรีเอส และ Pb^{2+} ซึ่งเหนี่ยวนำให้เกิด blue-shift สีของสารละลายเปลี่ยนจาก สีน้ำเงินเป็นสีแดง โดยสามารถมองเห็นการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายได้ด้วยตาเปล่า

ดังนั้นการออกแบบเซนเซอร์ทางเคมีโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงสีจึงได้รับความสนใจ และสามารถประยุกต์ใช้สำหรับตรวจวัดสารที่สนใจทั้งในรูปแบบสารละลาย (solution phase) และ/หรือแก๊ส (gas phase) ในการวิเคราะห์ภาคสนาม เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย รวดเร็วและไม่ต้องใช้เครื่องมือราคาสูง

2.5 ระบบวัดสมบัติการตอบสนองต่อแก๊สของเซนเซอร์แก๊สแบบสถิตย์

ระบบวัดแก๊สแบบสถิตย์ (static gas measurement system) แสดงตัวอย่างดังภาพที่ 2.22 เป็นระบบที่มีห้องตรวจวัด (sensor chamber) สำหรับใส่เซนเซอร์ที่อาศัยการระเหยของของเหลวหรือแก๊สจากแหล่งกำเนิดและแพร่ไปยังเซนเซอร์ภายหลังจากที่ทำการฉีดของเหลวหรือนำแก๊สทดสอบ (tested gas) เข้าระบบ ซึ่งอัตราการระเหยหรือการแพร่จะขึ้นอยู่กับสมบัติของของเหลวหรือแก๊สนั้น ๆ (เรวัตร์ ใจสุทธิ, 2562) เพื่อศึกษาการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีขณะเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลแก๊สและเซนเซอร์ กลไกการทำงานของระบบถูกควบคุมโดยผู้ใช้งานเป็นหลักทั้งในเรื่องของการกำหนดเวลาการตรวจวัดการตอบสนองต่อแก๊ส และการฉีดของเหลวหรือแก๊สทดสอบเข้าระบบ



ภาพที่ 2.22 ตัวอย่างระบบวัดแก๊สแบบสถิตย์

การกำหนดความเข้มข้นของแก๊สทดสอบ (C_{ppm}) ในหน่วยพีพีเอ็ม คำนวณได้จากความสัมพันธ์เชิงปริมาตรของแก๊สทดสอบ (V_g) มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร (m^3) ต่อปริมาตรของภาชนะบรรจุ (V_D) มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร (m^3) เมื่อ C_g คือ ความเข้มข้นของแก๊สทดสอบที่ฉีดเข้าระบบในหน่วยพีพีเอ็ม ดังสมการที่ 2.10 (Barratt, 1981)

$$C_{ppm} \times V_D = C_g [\text{in ppm}] \times V_g \quad (2.10)$$

ความเข้มข้นของแก๊สทดสอบที่ฉีดเข้าระบบในหน่วยมิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (mg/m^3) คำนวณจากความดันไอของสารทดสอบ (P_g) มีหน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2) ที่อุณหภูมิ (T) มีหน่วยเป็นเคลวิน M คือ มวลโมเลกุลของแก๊สทดสอบมีหน่วยเป็นกรัมต่อโมล (g/mol) และ R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส ($8.314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$) ดังสมการที่ 2.11 (Dossa et al., 2015)

$$C_g [\text{in } mg/m^3] = \frac{P_g}{R} \times \frac{M}{T} \times 10^3 \quad (2.11)$$

การเปลี่ยนหน่วยความเข้มข้นของแก๊สทดสอบที่ฉีดเข้าระบบ มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เป็นหน่วยพีพีเอ็ม ที่อุณหภูมิ และความดันทดสอบ (P) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตรปรอท ($mmHg$) เขียนเป็นสมการได้ว่า (Hoshika et al., 1993)

$$C_g [\text{in ppm}] = \frac{22.4 \times C_g [\text{in } mg/m^3]}{M \times \frac{273}{T} \times \frac{P}{760}} \quad (2.12)$$

ระบบวัดแก๊สแบบสถิติสามารถปรับค่าความเข้มข้นของแก๊สทดสอบได้จากการกำหนดให้ปริมาตรของห้องตรวจวัดคงที่และปรับปริมาตรการหยดสารทดสอบที่ฉีดเข้าระบบในรูปของเหลวตามความเข้มข้นที่ต้องการ ได้ความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 2.13

$$C_{ppm} = \left(\frac{22.4 \times C_g [\text{in } mg/m^3]}{M \times \frac{273}{T} \times \frac{P}{760}} \right) \times \frac{V_g}{V_D} \quad (2.13)$$

บทที่ 3

เซนเซอร์ตรวจวัดสารละลายแอมโมเนียที่เตรียมจาก พอลิไดแอเซทิลีนในรูปสารละลาย

3.1 บทนำ

แอมโมเนีย เป็นแก๊สไม่มีสี มีกลิ่นฉุน ละลายน้ำได้ดี แอมโมเนียที่พบในแหล่งน้ำส่วนใหญ่เกิดจากการย่อยสลายของอินทรีย์ไนโตรเจน การขับถ่ายของสิ่งมีชีวิต ซากของสิ่งมีชีวิตที่ตายแล้ว ปุ๋ยและอาหารสัตว์น้ำที่เหลือตกค้าง การรั่วไหลของแอมโมเนียจากโรงงานอุตสาหกรรม ห้องเย็น โรงน้ำแข็ง เป็นต้น ปริมาณแอมโมเนียที่มากเกินไปส่งผลกระทบต่อทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อระบบนิเวศ อาจก่อให้เกิดความเป็นพิษและอันตรายต่อระบบร่างกายของสิ่งมีชีวิตได้ เพื่อมุ่งแก้ปัญหาเหล่านี้หน่วยงานที่รับผิดชอบ อาทิ องค์การอนามัยโลก กระทรวงสาธารณสุขและกรมทรัพยากรน้ำบาดาล จึงได้มีการกำหนดค่าความเข้มข้นมาตรฐาน (เกณฑ์กำหนดสูงสุด) เพื่อควบคุมปริมาณแอมโมเนียที่ถูกปล่อยทิ้งลงแหล่งน้ำตามธรรมชาติ ซึ่งค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดินควรมีปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด (total ammonia nitrogen; TAN) ไม่เกิน 17 พีพีเอ็ม (Environmental Protection Agency, 2013) การตรวจสอบแอมโมเนียในน้ำจึงมีความสำคัญ และได้รับความสนใจในกลุ่มนักวิจัยสำหรับการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียในน้ำโดยวิธีที่สะดวก มีความไวในการตรวจวัด มีศักยภาพที่จะเป็นการตรวจวิเคราะห์ในขณะที่กำลังเกิดขึ้นจริง (real-time analysis) และได้ผลวิเคราะห์รวดเร็ว

วิธีการตรวจสอบแอมโมเนียในน้ำโดยวิธีมาตรฐานมีหลายวิธี เช่น เทคนิคไอออนโครมาโทกราฟี (ion chromatography) (Thomas, Rey, and Jackson, 2002) เทคนิคขั้วไฟฟ้าแบบเจาะจงไอออน (ion selective electrode) (LeDuy and Samson, 1982) เทคนิคฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรสโกปี (fluorescence spectroscopy) (Zhu et al., 2015) และ เทคนิคโปรตอน-นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (^1H NMR spectroscopy) (Liu et al., 2016) เป็นต้น ซึ่งเทคนิคดังกล่าวมีความถูกต้องและแม่นยำในการวิเคราะห์สูง แต่การวิเคราะห์จำเป็นต้องใช้เครื่องมือราคาแพง ทำการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการโดยผู้เชี่ยวชาญ ซึ่งต้องใช้เวลาในการวิเคราะห์และค่าใช้จ่ายสูง ไม่เหมาะกับการนำไปใช้งานในภาคสนาม ปัจจุบันมีการพัฒนาระบบตรวจวัดแอมโมเนียในตัวอย่างน้ำโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงสี (colorimetric assay) ด้วยการใช้วิธีเนสเลอร์เซชัน (Nessler's reagent spectrophotometry) และวิธีอินโดฟีนอลบลู (indophenol blue spectrophotometry) (Zhou and Boyd, 2016) และวัดค่าสีตามมาตรฐานสากลโดยใช้

เทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิธีเบสเปกโทรสโกปี แต่วิธีดังกล่าวมีขั้นตอนการวัดที่ซับซ้อน ดังนั้นเพื่อให้เหมาะกับการนำไปใช้งานในภาคสนาม การตรวจวัดสีที่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า จึงเป็นวิธีการที่นำไปใช้เป็นระบบตรวจวัดแบบพกพาที่มีราคาถูกลงได้

พอลิไดแอเซทิลีนเป็นคอนจูเกตพอลิเมอร์ที่มีความสามารถในการเปลี่ยนสีเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อมโดยรอบที่เข้ามากระตุ้น นอกจากนี้พอลิไดแอเซทิลีนสามารถเตรียมได้ในน้ำและเกิดกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันได้ง่ายโดยการฉายแสงอัลตราไวโอเลต สมบัติเด่นของพอลิไดแอเซทิลีนคือ ความสามารถในการเปลี่ยนสีที่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า จากสีน้ำเงินไปเป็นสีแดงเมื่ออยู่ในสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกันหรือเกิดการจับกับสารบางชนิด เช่น เกิดการเปลี่ยนสีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Mergu and Son, 2021; Xiaoqiang and Juyoung, 2011) ค่าความเป็นกรด-เบส (Jannah and Kim, 2019) หรือเติมสารบางชนิดเข้าไปในระบบ (Sun et al., 2010) โดยเมื่อระบบของพอลิไดแอเซทิลีนได้สัมผัสกับสิ่งกระตุ้นที่เหมาะสม แล้วเกิดแรงกระทำต่อกันที่มากเพียงพอที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความยาวคอนจูเกต ซึ่งส่งผลให้สมบัติทางแสงในช่วงวิสิเบิลเกิดการเปลี่ยนแปลงจึงทำให้เห็นการเปลี่ยนสี และสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่าได้ ซึ่งจากสมบัติดังกล่าวนี้ทำให้นักวิจัยมีแนวคิดที่จะนำพอลิไดแอเซทิลีนมาประยุกต์เป็นเซนเซอร์เพื่อตรวจวัดอุณหภูมิ สารเคมี หรือสารชีวภาพต่าง ๆ ที่สนใจ อีกทั้งวิธีการตรวจสอบด้วยการใช้พอลิไดแอเซทิลีนดังกล่าวยังเป็นวิธีการที่ใช้สารเคมีปริมาณน้อย ลดขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างในการวิเคราะห์ และลดเวลาในการตรวจสอบ ซึ่งจัดว่าสามารถรับผลข้อมูลการวิเคราะห์ได้อย่างรวดเร็ว ทั้งยังสามารถแสดงผลได้ทันทีที่ภาคสนามโดยไม่ต้องใช้เครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูง

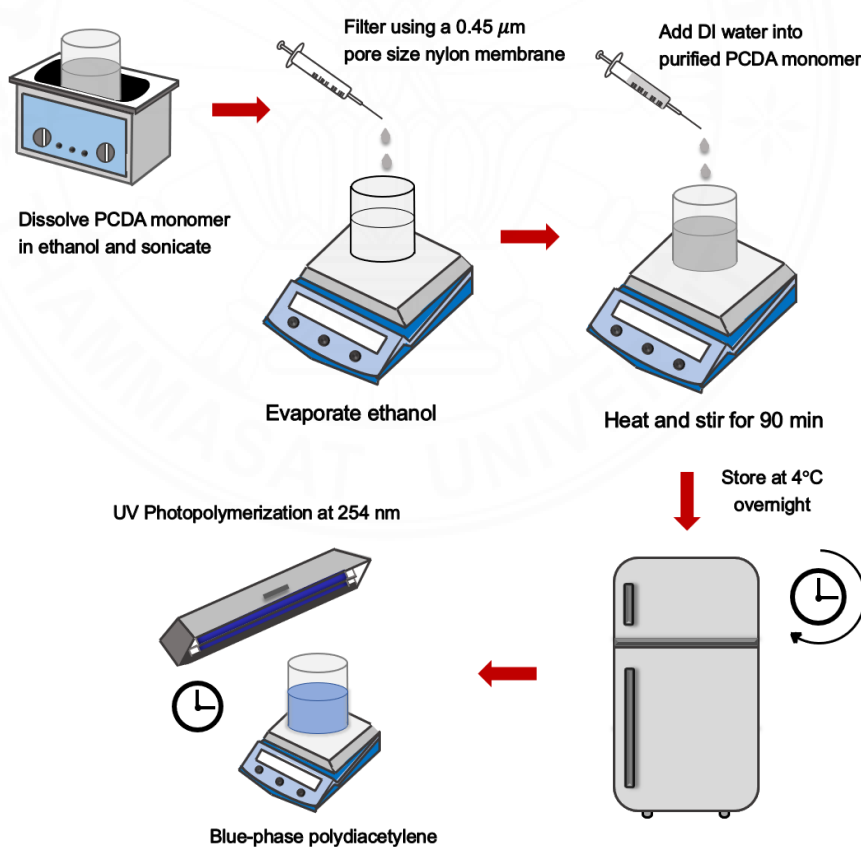
ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการศึกษาออกแบบเซนเซอร์ระดับโมเลกุลสำหรับตรวจสอบแอมโมเนียในน้ำด้วยการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีน โดยเลือกใช้ 10,12-เพนตะโคเซไดอายโนอิกแอซิดสำหรับการเตรียมพอลิไดแอเซทิลีนในรูปสารละลาย เพื่อตรวจวัดแอมโมเนียในน้ำ และวัดการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนที่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า เพื่อป้องกันถึงการมีอยู่ของแอมโมเนียในตัวอย่างทดสอบ ควบคู่กับเทคนิคการตรวจวัดวิเคราะห์สีจากภาพที่ได้จากสแกนเนอร์ร่วมกับโปรแกรมประมวลผลภาพให้มีประสิทธิภาพเทียบเคียงกับวิธีมาตรฐาน ในบทวิจัยนี้ ทำการศึกษาการเตรียมพอลิไดแอเซทิลีนในรูปของสารละลายในสภาวะที่เหมาะสม ศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางแสง สมบัติเชิงเซนเซอร์สำหรับตรวจวัด ให้ความกระจ่างแจ้งในการตรวจวัดแอมโมเนียทั้งเชิงคุณภาพและปริมาณ และศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนที่เตรียมได้เมื่อได้รับการรบกวนจากสิ่งกระตุ้นภายนอก ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-เบส การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ นอกจากนี้ตรวจสอบความน่าเชื่อถือของเซนเซอร์โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการวิเคราะห์ทางสีด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิธีเบสเปกโทรสโกปี และ

ภาพที่ได้จากสแกนเนอร์ร่วมกับโปรแกรมประมวลผลภาพในระบบสารละลาย เพื่อศึกษาความเป็นไปได้การวิเคราะห์ทางสีด้วยภาพถ่ายจากสแกนเนอร์

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 วัสดุและสารเคมี

ไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ 10,12-เพนตะโคแซไดออยโนอิกแอซิด (10,12-pentacosadiynoic acid; PCDA) (>97%) แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide; NH_4OH) (25%) และ ฟอรัมาลีนหรือฟอรัมาลดีไฮด์ (Formalin, Formaldehyde; HCHO) (37%) ซื้อจากบริษัท Sigma-Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา เอทานอล (Ethanol) เมทานอล (Methanol) ไอโซโพรพานอล (Isopropanol) และอะซีโตน (Acetone) จากบริษัท RCI Labscan ประเทศไทย



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนในน้ำปราศจากไอออน

3.2.2 การเตรียมสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนในน้ำปราศจากไอออน

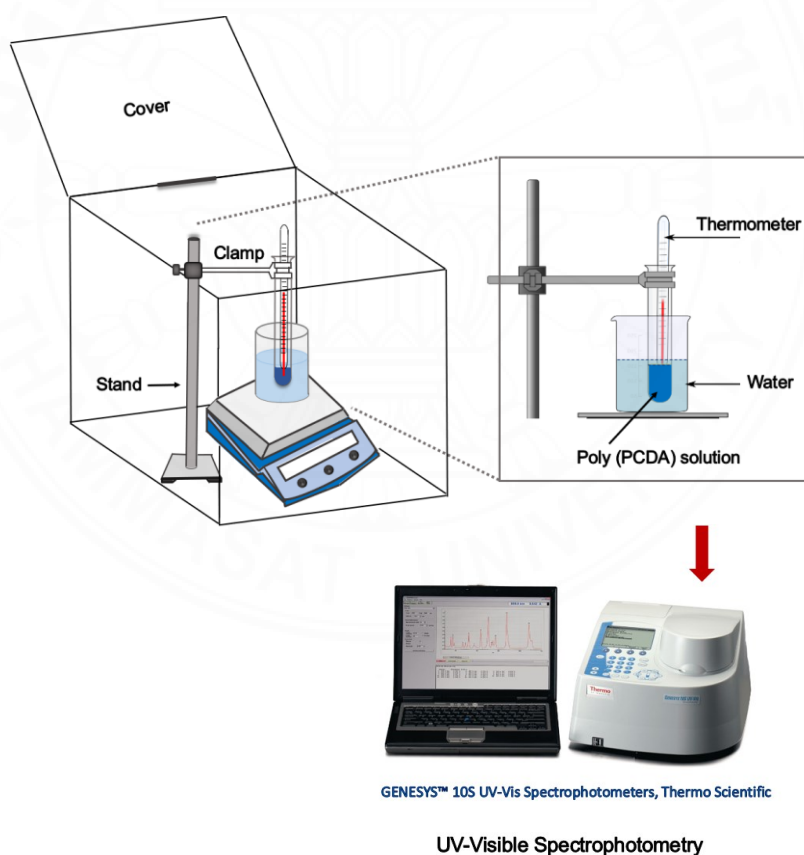
พอลิไดแอเซทิลีนที่ใช้ในการศึกษาในงานวิจัยที่กล่าวในบทนี้ เตรียมจาก PCDA ให้อยู่ในรูปของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนในน้ำปราศจากไอออนที่มีความเข้มข้น 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 และ 1.5 มิลลิโมลาร์ เพื่อศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีน สำหรับประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ตรวจวัดแอมโมเนีย โดยมีขั้นตอนการเตรียม แสดงดังภาพที่ 3.1

ทำ PCDA ให้บริสุทธิ์โดยการละลาย PCDA ในเอทานอลภายใต้การสั่นด้วยเครื่องสั่นที่ใช้คลื่นเสียงความถี่สูง (ultrasonic bath) ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 5 นาที แล้วทำการกรองด้วยแผ่นกรองในลอนที่มีขนาดของรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร เพื่อให้พอลิเมอร์ส่วนอื่นที่ปนเปื้อนออก จากนั้นทำการระเหยเอทานอล ด้วยเครื่องให้ความร้อนและปั่นกวน (hot plate and mechanical stirrer) รุ่น MSH-20A บริษัท Daihan Scientific ประเทศเกาหลี ที่ควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่ระดับประมาณ 70 ถึง 75 องศาเซลเซียส จนกระทั่งเอทานอลหมดไปโดยจะปรากฏลักษณะเป็นคราบขาวขุ่นภายในภาชนะซึ่งเป็นเนื้อสารของมอนอเมอร์ ต่อจากนั้นจะเป็นการเตรียมสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนที่ใช้น้ำปราศจากไอออน (deionized water) เป็นตัวทำละลาย ซึ่งจะถูกเติมลงไปเป็นปริมาณเท่ากับ 50 มิลลิลิตร และนำไปกระตุ้นให้เกิดการละลายได้ด้วยเครื่องให้ความร้อนและปั่นกวน ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที สารละลายที่ได้จะมีลักษณะใสแสดงถึงการเกิดเวสิเคิลคอลลอยด์ที่สมบูรณ์ นำสารที่เตรียมได้จากข้างต้นมาตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง และห่อด้วยกระดาษฟลอยด์เพื่อป้องกันแสงจากภายนอกครบถ้วนแล้วเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการจัดวางโมเลกุลอย่างเป็นระเบียบได้ด้วยตนเอง เป็นโครงสร้างแบบเวสิเคิล และเพื่อให้เกิดเป็นสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนจึงนำสารละลายดังกล่าวมาทำการฉายแสงด้วยเครื่องฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตที่พัฒนาขึ้นในห้องปฏิบัติการ ด้วยหลอด UV lamp OSRAM ยี่ห้อ PHILIPS บริษัท TOKIVA ประเทศไต้หวัน ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 254 นาโนเมตร ความเข้มแสง 1.5 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ภายใต้การปั่นกวนด้วยเครื่องกวนสารละลายแบบแม่เหล็ก เป็นเวลา 5 นาที จะทำให้ได้สารละลายพอลิไดแอเซทิลีนที่มีสีน้ำเงิน

3.2.3 การวัดและวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางแสง และ สมบัติเชิงเซนเซอร์ของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีน

สมบัติทางกายภาพของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนศึกษาโดยวิธีการวัดฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีในโหมดการดูดกลืนแสง (Attenuated Total Fourier

Transform Infrared Spectroscopy; ATR-FTIR) ด้วยเครื่องรุ่น Vertex 70 series บริษัท Bruker ประเทศสหรัฐอเมริกา ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคศึกษาโดยใช้เทคนิคการกระเจิงของแสง (dynamic light scattering; DLS) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคระดับนาโนรุ่น Zetasizer nano ZS บริษัท Malvern Instruments ประเทศอังกฤษ และสมบัติเชิงพื้นผิวศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) รุ่น JSM-6400 บริษัท JEOL ประเทศญี่ปุ่น สมบัติการดูดกลืนแสงของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนศึกษาด้วยเครื่องอัลตราไวโอเลต-วิสิเบิลสเปกโตรสโกปีรุ่น Genesys 10 series บริษัท Thermo Fisher Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยนำสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนที่เตรียมได้ประมาณ 3 มิลลิลิตร มาวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 300 ถึง 900 นาโนเมตร โดยใส่ตัวอย่างในเซลล์ควอทซ์แบบแก้ว (glass cuvette) ที่มีระยะแสงผ่าน 1 เซนติเมตร



ภาพที่ 3.2 การจัดการทดลองสำหรับการศึกษาการตอบสนองต่ออุณหภูมิ
ของละลายพอลิไดแอเซทิลีน

การศึกษาการเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนต่อสารละลายทดสอบ ประกอบด้วยแอมโมเนีย ฟอรัมาลีน กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) กรดอะซิติก (CH_3COOH) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และแอลกอฮอล์ชนิดต่าง ๆ ศึกษาโดยวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนที่เตรียมได้ จากนั้นเติมสารละลายที่ต้องการทดสอบลงในสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนที่เตรียมไว้และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 120 นาทีแล้วนำไปทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี การตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบส ศึกษาด้วยการเติมสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ในช่วงพีเอช 3 ถึง 12 ลงในสารละลายพอลิไดแอเซทิลีน และการศึกษาการตอบสนองต่ออุณหภูมิโดยเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนให้สูงขึ้นและปล่อยให้ระบบเข้าสู่สมดุลที่แต่ละอุณหภูมิ 10 นาที ก่อนทำการวัดค่าการดูดกลืนแสง โดยทำการศึกษาผลของอุณหภูมิในช่วง 27 ถึง 92 องศาเซลเซียส โดยจัดการทดลองดังแสดงในภาพที่ 3.2 จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีน โดยเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร และ 540 นาโนเมตร สำหรับพอลิไดแอเซทิลีนบริสุทธิ์และหลังการตอบสนองต่อสิ่งเร้า คำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การตอบสนองในการเปลี่ยนสี (%CR) ตามสมการที่ 3.1 และ 3.2

$$\%CR = \frac{PB_0 - PB_f}{PB_0} \times 100 \quad (3.1)$$

โดยที่

$$PB = \frac{Absorbance_{640}}{Absorbance_{640} + Absorbance_{540}} \times 100\% \quad (3.2)$$

เมื่อ PB_0 คือ พอลิไดแอเซทิลีนที่ไม่ได้รับการกระตุ้น

PB_f คือ พอลิไดแอเซทิลีนที่ถูกกระตุ้นด้วยสิ่งเร้าภายนอก

การวิเคราะห์ทางสีจากรูปภาพเพื่อศึกษาการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนเมื่อตอบสนองต่อแอมโมเนียโดยการวัดความเข้มสีที่เปลี่ยนไปตามความเข้มข้นของแอมโมเนียในช่วง 5 ถึง 200 พีพีเอ็ม เริ่มโดยใส่สารที่ต้องการศึกษาลงในไมโครเพลตขนาดเล็กที่ประกอบไปด้วย 96 หลุมด้วยไมโครปิเปต (300 ไมโครลิตร) นำไปสแกนด้วยเครื่องสแกนเนอร์รุ่น Epson Perfection V370 Photo บริษัท Epson ประเทศญี่ปุ่น ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมในการสแกนภาพ ที่เวลา 120 นาที ตัดภาพที่สแกนได้ด้วยเครื่องสแกนเนอร์เฉพาะส่วนที่ต้องการแสดงผลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.25 มิลลิเมตร (ความละเอียดภาพ 50 x 50 พิกเซล) ร่วมกับการใช้โปรแกรมประมวลผลภาพ

MATLAB® software (R2021a, Mathwork Inc, USA) เพื่ออ่านค่าความเข้มสีในระบบ RGB โดยเลือกการอ่านค่าความเข้มสีแดงและ สีน้ำเงิน แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าอัตราส่วนของการเปลี่ยนสี (red-blue ratio) หรือค่าสัญญาณ (Signal) ตามสมการที่ 3.3 เพื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิธีเบลสเปกโทรสโกปี โดยจัดการทดลองดังแสดงในภาพที่ 3.3

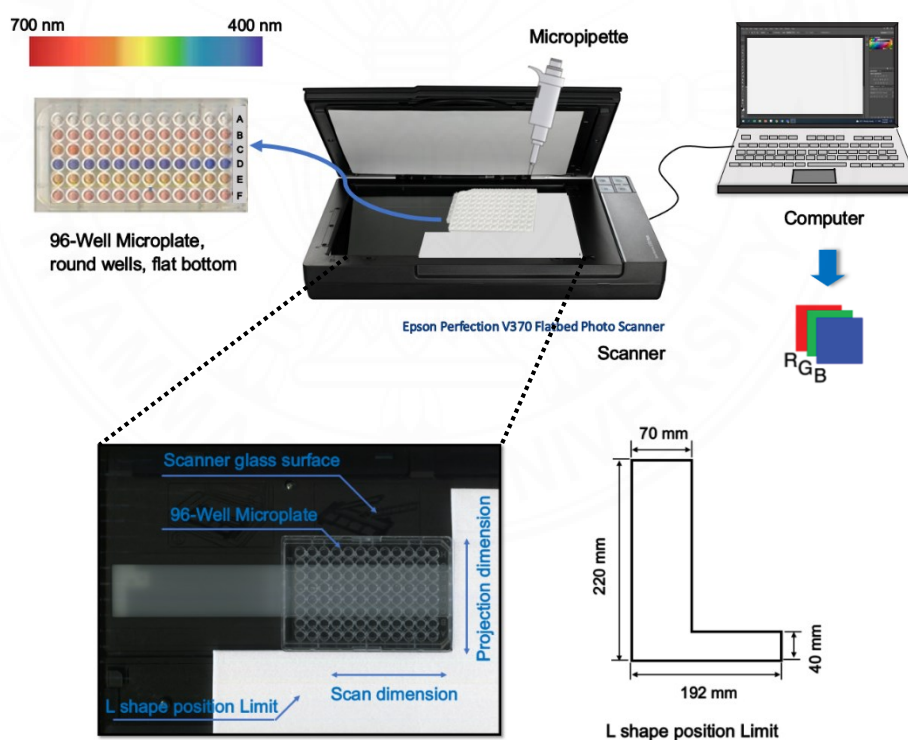
$$Signal = \frac{R/B}{R_0/B_0} \quad (3.3)$$

เมื่อ R คือ ค่าความเข้มสีเฉลี่ยของสีแดงของพอลิไดแอเซทิลีนที่ถูกרבבבבב

B คือ ค่าความเข้มสีเฉลี่ยของสีน้ำเงินของพอลิไดแอเซทิลีนที่ถูกרבבבבבב

R_0 คือ ค่าความเข้มสีเฉลี่ยของสีแดงของพอลิไดแอเซทิลีนที่ยังไม่ถูกระบבבבב

B_0 คือ ค่าความเข้มสีเฉลี่ยของสีน้ำเงินของพอลิไดแอเซทิลีนที่ยังไม่ถูกระבבבבב



ภาพที่ 3.3 การจัดการทดลองสำหรับการวิเคราะห์ทางสีจากรูปภาพเพื่อศึกษาการตอบสนองการเปลี่ยนสีของละลายพอลิไดแอเซทิลีนต่อแอมโมเนีย

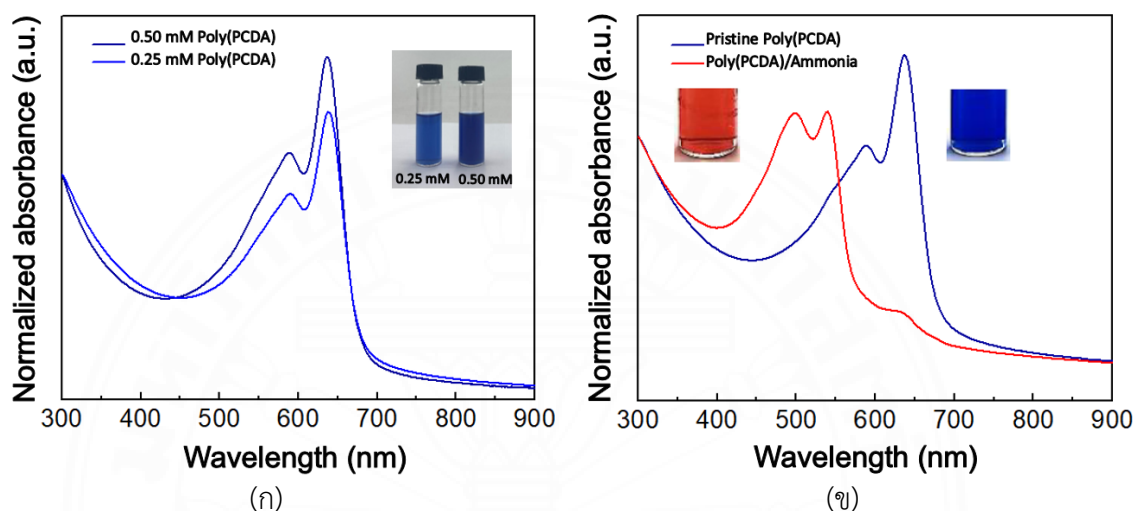
3.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.3.1 ผลการเตรียมสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนในน้ำปราศจากไอออน

การเตรียมสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนในน้ำปราศจากไอออนสามารถเตรียมได้จากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันด้วยการฉายแสงอัลตราไวโอเลต สารที่ได้มีสีน้ำเงินเข้มและกระจายตัวได้ดีในน้ำ ผลการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปีในช่วงความยาวคลื่น 300 ถึง 900 นาโนเมตร ของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนที่เตรียมด้วยความเข้มข้นเป็น 0.25 และ 0.5 มิลลิโมลาร์ แสดงดังในภาพที่ 3.4 (ก) พบว่าตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีน ปรากฏที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร และปรากฏยอดการดูดกลืนแสง (vibronic band) ที่ความยาวคลื่น 590 นาโนเมตร ซึ่งเป็นสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงิน ทำให้มองเห็นสารละลายมีสีน้ำเงิน เมื่อพิจารณาค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร และที่ความยาวคลื่น 590 นาโนเมตร ของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนที่มีความเข้มข้นของสารเป็น 0.25 และ 0.5 มิลลิโมลาร์ พบว่าค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนที่มีค่าความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์ มีค่ามากกว่าสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนที่มีค่าความเข้มข้น 0.25 มิลลิโมลาร์ ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับกฎของเบียร์คือแสงถูกดูดกลืนมากขึ้นเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้น และเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าจะพบว่าสารละลายที่มีค่าความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์ มีสีน้ำเงินเข้มมากกว่าของสารละลายที่มีค่าความเข้มข้น 0.25 มิลลิโมลาร์ เมื่อทดสอบสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนที่มีค่าความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์ ด้วยแอมโมเนียความเข้มข้น 100 พีพีเอ็ม พบว่าค่าความยาวคลื่นที่ตำแหน่ง การดูดกลืนแสงสูงสุดเปลี่ยนตำแหน่งจาก 640 นาโนเมตร เป็น 540 นาโนเมตร หรือเกิด blue-shift เนื่องจากการลดลงของความยาวของระบบคอนจูเกต ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของโมเลกุลไปยังความยาวคลื่นที่สั้นกว่า จึงทำให้เห็นสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนสามารถเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดง ดังแสดงในภาพที่ 3.4 (ข)

เมื่อนำสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนมาทำการศึกษาขนาดและการกระจายขนาดของอนุภาคด้วยเทคนิค DLS พบว่า อนุภาคมีการเกาะกันเป็นกลุ่มโดยมีขนาดของกลุ่มอนุภาคอยู่ในช่วง 50 ถึง 1480 นาโนเมตร และมีค่ากลางของขนาดกลุ่มอนุภาคเท่ากับ 228.4 นาโนเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.5 การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิไดแอเซทิลีนที่เตรียมด้วยความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์ ทั้งก่อนและหลังการทดสอบด้วยแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 100 พีพีเอ็ม ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าพอลิไดแอเซทิลีนก่อนการทดสอบแอมโมเนีย

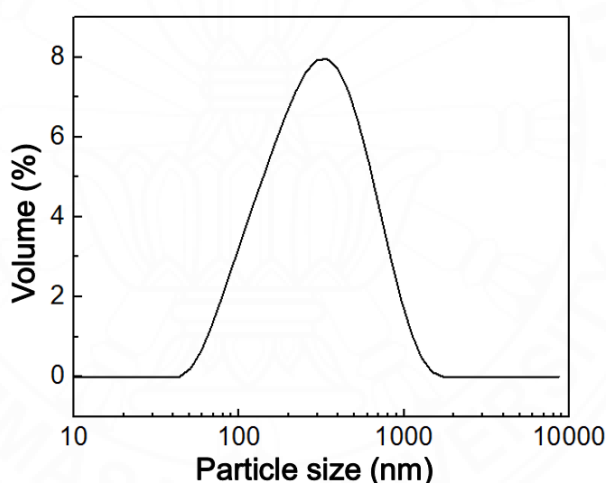
อนุภาคมีรูปร่างค่อนข้างกลม และมีขนาดอนุภาคประมาณ 220 นาโนเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.6 (ก) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาด้วยเทคนิค DLS แสดงถึงการจัดเรียงตัวเป็นทรงกลมที่เรียกว่าเวสิเคิล (Okada et al., 1998) เมื่อเติมแอมโมเนียลงในพอลิไดแอเซทิลีนส่งผลให้อนุภาคมีโครงสร้างเปลี่ยนเป็นรูปร่างที่มีความยาว (line-like structure) และไม่สามารถวัดขนาดอนุภาคได้ ดังแสดงในภาพที่ 3.6 (ข)



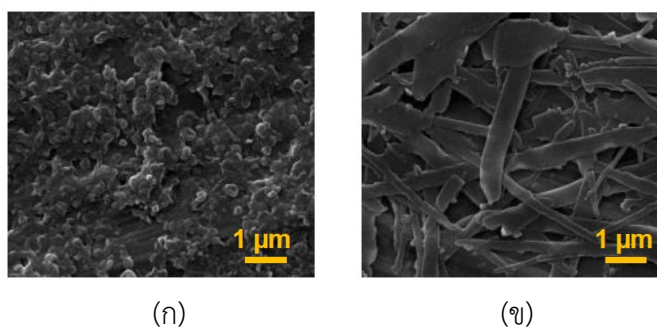
ภาพที่ 3.4 (ก) สเปกตรัมการดูดกลืนแสงและสีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีน (ข) การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและสีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนเมื่อทดสอบแอมโมเนีย 100 พีพีเอ็ม

สำหรับการวิเคราะห์ผลการเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์ และการวิเคราะห์ผลการตอบสนองต่อแอมโมเนียของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนด้วยการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค ATR-FTIR แสดงดังภาพที่ 3.7 พอลิไดแอเซทิลีนแสดงตำแหน่งการดูดกลืนคลื่นแสงที่สำคัญ ได้แก่ ตำแหน่งเลขคลื่น 1366 ต่อเซนติเมตร (cm^{-1}) แสดงการสั่นแบบยืด (stretching vibration) ของพันธะ C-H ของหมู่ CH_2 ในสายโซ่อัลคิล ซึ่งพันธะระหว่างอะตอมยืดออกหรือหดตามแกน ตำแหน่งเลขคลื่น 1428 และ 1452 ต่อเซนติเมตร แสดงการสั่นแบบงอ (bending vibration) ของพันธะ C-H ของหมู่ CH_2 ในสายโซ่อัลคิล ซึ่งพันธะระหว่างอะตอมเปลี่ยนตำแหน่งไปจากแกนพันธะเดิม ส่งผลให้มุมพันธะเปลี่ยนแปลง โดยมีลักษณะการสั่นแบบงอในแบบกรรไกร (scissoring) (Wu et al., 2014) ตำแหน่งเลขคลื่น 1640 ต่อเซนติเมตร เป็นการสั่นแบบยืดของพันธะ C=O ของหมู่คาร์บอนิล ของพันธะไฮโดรเจนในหมู่คาร์บอกซิล ($-\text{COOH}$) ของบริเวณส่วนหัวของโมเลกุลพอลิไดแอเซทิลีน (Kim et al., 2005; Huang, Jiang, and Liu, 2005) และยังปรากฏพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น 2336 และ 2361 ต่อเซนติเมตร ซึ่งแสดงถึงการสั่นของพันธะไม่อิ่มตัวของ C=C ที่มีโครงสร้างแบบคอนจูเกต (Jia et al., 2015) อีกทั้งแสดงตำแหน่งการสั่นแบบยืดสมมาตร

(symmetrical stretching) และ การสั่นแบบยืดไม่สมมาตร (asymmetrical stretching) ของพันธะ C-H ของหมู่ CH_2 ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 2904 และ 2944 ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ (Kim et al., 2005; Huang, Jiang, and Liu, 2005; Mino, Tamura, and Ogawa, 1991) และสำหรับตำแหน่งเลขคลื่น 3292 และ 3336 ต่อเซนติเมตร แสดงถึงการสั่นแบบยืดของพันธะ O-H ในหมู่ไฮดรอกซิลที่บริเวณปลายสายโซ่ เมื่อพิจารณา ATR-FTIR สเปกตรัมของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนที่เตรียมได้ที่ตำแหน่งการดูดกลืนคลื่นแสงดังกล่าวพบว่าสอดคล้องกับโครงสร้างของพอลิเมอร์ ซึ่งตรงกับ ATR-FTIR สเปกตรัมจากเอกสารงานวิจัยทำให้สามารถสรุปได้ว่าสารที่เตรียมได้คือพอลิไดแอเซทิลีนที่ประกอบด้วยหน่วยไดแอเซทิลีนอยู่ในโมเลกุล นอกจากนี้ภายหลังการเติมแอมโมเนียลงในพอลิไดแอเซทิลีนพบว่า มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างสเปกตรัมคือ เกิดพีคเล็กที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1520 ต่อเซนติเมตร แสดงถึงองค์ประกอบของ $-\text{CONH}$ ซึ่งการศึกษาจากเอกสารงานวิจัยพบว่าเกิดจากอันตรกิริยาระหว่างหมู่คาร์บอกซิล ($-\text{COOH}$) ของพอลิไดแอเซทิลีนกับหมู่เอมีนของแอมโมเนีย (Nguyen et al., 2019; Valdez et al., 2019) และทำให้เกิดการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีน



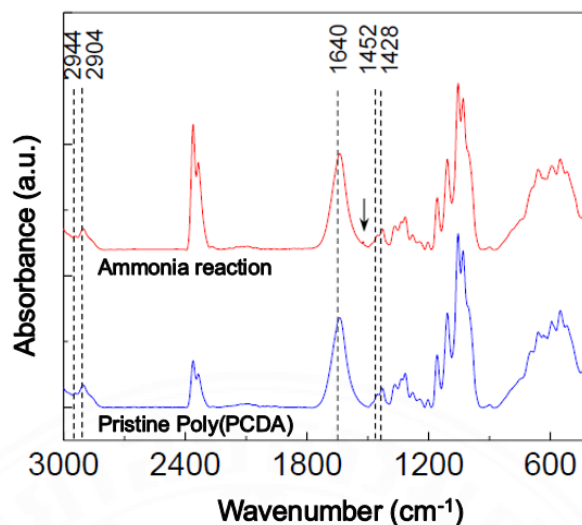
ภาพที่ 3.5 ขนาดและการกระจายขนาดอนุภาคของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีน



(ก)

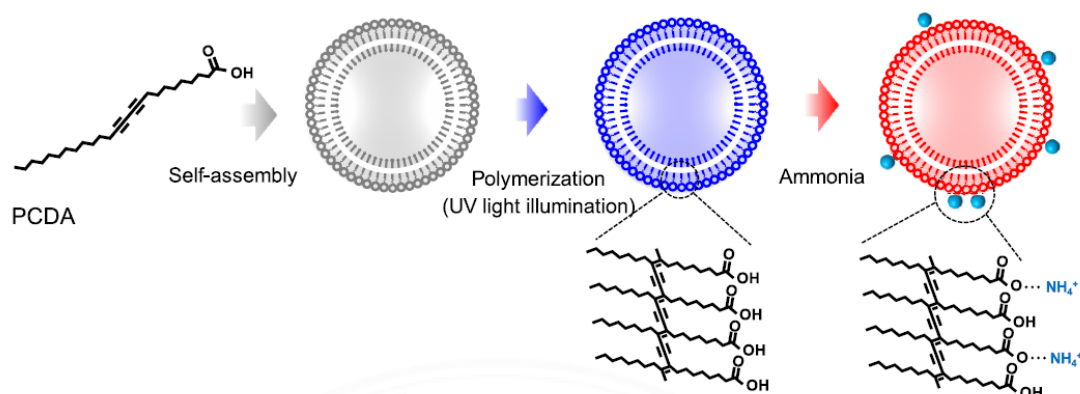
(ข)

ภาพที่ 3.6 ภาพถ่าย SEM ของพอลิไดแอเซทิลีน (ก) ก่อนและ (ข) หลังเติมแอมโมเนีย 100 พีพีเอ็ม



ภาพที่ 3.7 FTIR-ATR ของพอลิไดแอเซทิลีนก่อนและหลังการเติมแอมโมเนีย 100 พีพีเอ็ม

พอลิไดแอเซทิลีนสามารถเปลี่ยนสีได้เนื่องจากอิเล็กตรอนสามารถเกิดการเคลื่อนที่ไปมาในสายโซ่หลักของระบบคอนจูเกตของพอลิไดแอเซทิลีนทำให้เป็นสีน้ำเงิน โดยกลไกในการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนเกิดจากไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ไปดึงโปรตอนจากหมู่คาร์บอกซิลที่บริเวณส่วนหัวของพอลิไดแอเซทิลีนส่งผลให้พันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่างส่วนหัวของพอลิไดแอเซทิลีนเกิดการแตกออก จึงไปทำลายความเป็นระเบียบของโซ่ข้างและสายโซ่หลัก และเกิดแรงผลักระหว่างคาร์บอกซิเลตไอออน ($-\text{COO}^-$) ที่อยู่ติดกันอีกด้วย และเนื่องจากแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) มีสมบัติเป็นเบสอ่อนจึงจับกับหมู่คาร์บอกซิเลตไอออน ($-\text{COO}^-$) ซึ่งมีสมบัติเป็นกรดอ่อนในโมเลกุลของพอลิไดแอเซทิลีนด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างประจุบวกและประจุลบ แสดงดังภาพที่ 3.8 จึงทำให้เกิดความไม่เป็นระเบียบของสายโซ่ข้าง ส่งผลให้การจัดเรียงตัวอย่างเป็นระนาบของสายโซ่หลักที่มีโครงสร้างเป็นพันธะคู่สลับพันธะเดี่ยวแบบต่อเนื่องลดน้อยลง และทำให้ระยะคอนจูเกตของสายโซ่หลักลดลง ซึ่งถูกเหนี่ยวนำโดยความเป็นระเบียบและไม่เป็นระเบียบของสายโซ่ด้านข้างของพอลิเมอร์ ทำให้สายโซ่หลักของพอลิไดแอเซทิลีนเกิดการคลายตัว (relaxation) (Valdez et al., 2019; Zhang et al., 2018) ช่องว่างพลังงานของ HOMO และ LUMO กว้างขึ้น อิเล็กตรอนต้องใช้พลังงานมากขึ้นในการกระโดดข้ามช่องว่างพลังงาน จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของโมเลกุลไปยังความยาวคลื่นที่สั้นกว่า จึงทำให้เห็นสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดง เมื่อได้รับการรบกวนจากการเติมแอมโมเนีย และการแตกออกของพันธะไฮโดรเจนที่ยึดระหว่างหมู่คาร์บอกซิลที่บริเวณส่วนหัวของพอลิไดแอเซทิลีน (Nguyen et al., 2019; Kim et al., 2005) แสดงถึงสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนเปลี่ยนสีอย่างสมบูรณ์

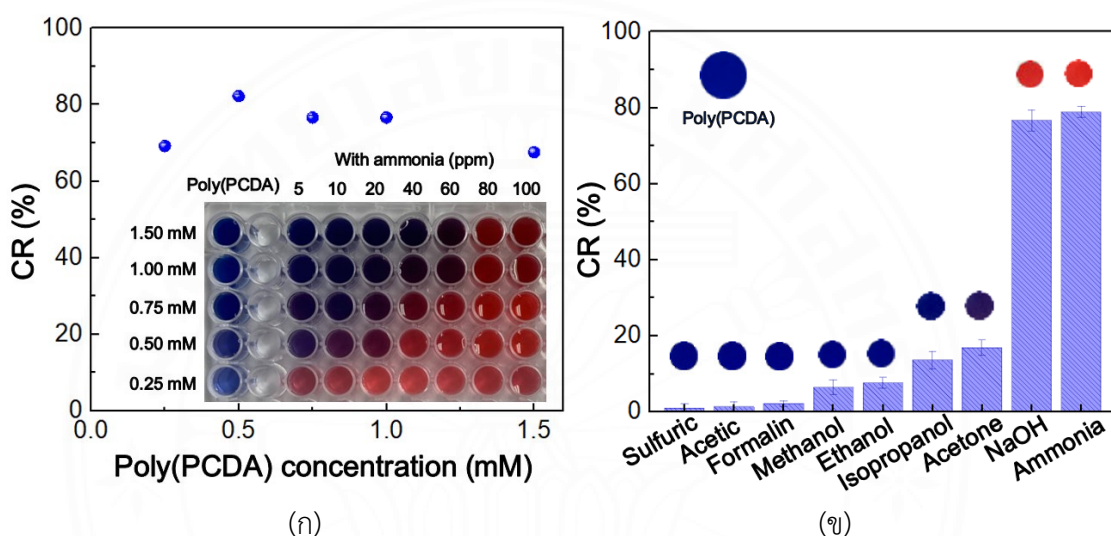


ภาพที่ 3.8 แบบจำลองการเตรียมพอลิไดอะเซทิลีนเวสเคิลจาก PCDA และอันตรกิริยาระหว่างพอลิไดอะเซทิลีนเวสเคิลและแอมโมเนียมไอออน (Siribunbandal et al., 2022)

3.3.2 สมบัติเชิงเซนเซอร์ของสารละลายพอลิไดอะเซทิลีน

การศึกษาผลความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายพอลิไดอะเซทิลีนเพื่อใช้เป็นตัวตรวจวัดแอมโมเนีย โดยศึกษาที่ความเข้มข้น 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 และ 1.5 มิลลิโมลาร์ ผลการตอบสนองต่อแอมโมเนียความเข้มข้น 5 ถึง 100 พีพีเอ็ม พิจารณาจากการเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดอะเซทิลีนจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงและค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสี (%CR) ที่วิเคราะห์จากสมบัติการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี ดังแสดงในภาพที่ 3.9 (ก) พบว่าสารละลายพอลิไดอะเซทิลีนทุกความเข้มข้นมีการตอบสนองต่อแอมโมเนีย พฤติกรรมการเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดอะเซทิลีนเป็นกระบวนการผันกลับไม่ได้ และเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วง และสีแดง ตามความเข้มข้นของแอมโมเนียที่เพิ่มขึ้น สารละลายพอลิไดอะเซทิลีนที่ความเข้มข้น 1.0 และ 1.5 มิลลิโมลาร์ เกิดการเปลี่ยนสีที่แอมโมเนียความเข้มข้นค่อนข้างสูงคือมากกว่าหรือเท่ากับ 60 พีพีเอ็ม ในขณะที่สารละลายพอลิไดอะเซทิลีนที่ความเข้มข้น 0.25 มิลลิโมลาร์ เกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงที่แอมโมเนียความเข้มข้นค่อนข้างต่ำคือเท่ากับ 5 พีพีเอ็ม สำหรับสารละลายพอลิไดอะเซทิลีนที่ความเข้มข้น 0.75 มิลลิโมลาร์ จะค่อย ๆ เปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดง และมีการเปลี่ยนสีที่ชัดเจนขึ้นที่ความเข้มข้นของแอมโมเนียมากกว่า 40 พีพีเอ็ม สารละลายพอลิไดอะเซทิลีนที่ความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์ พบว่ามีการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงที่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าในช่วงที่กว้างขึ้นเมื่อพิจารณากราฟเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดอะเซทิลีนของแต่ละความเข้มข้นเมื่อตอบสนองต่อแอมโมเนียความเข้มข้น 100 พีพีเอ็ม ที่ระยะเวลาการตรวจวัด 120 นาที พบว่าสารละลายพอลิไดอะเซทิลีนที่

ความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์ ให้ผลการตอบสนองต่อแอมโมเนียสูงสุดคือ 82.22 ± 0.63 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นแอมโมเนีย 100 พีพีเอ็ม เมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนที่มีความเข้มข้นอื่น ๆ ซึ่งแตกต่างจากเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนที่มีความเข้มข้น 0.75 มิลลิโมลาร์ ถึง 5.57 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงเลือกสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนที่มีความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์ เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมในการทดลองขั้นต่อไป สำหรับใช้พอลิไดแอเซทิลีนเป็น เซนเซอร์ตรวจวัดแอมโมเนียในงานวิจัย



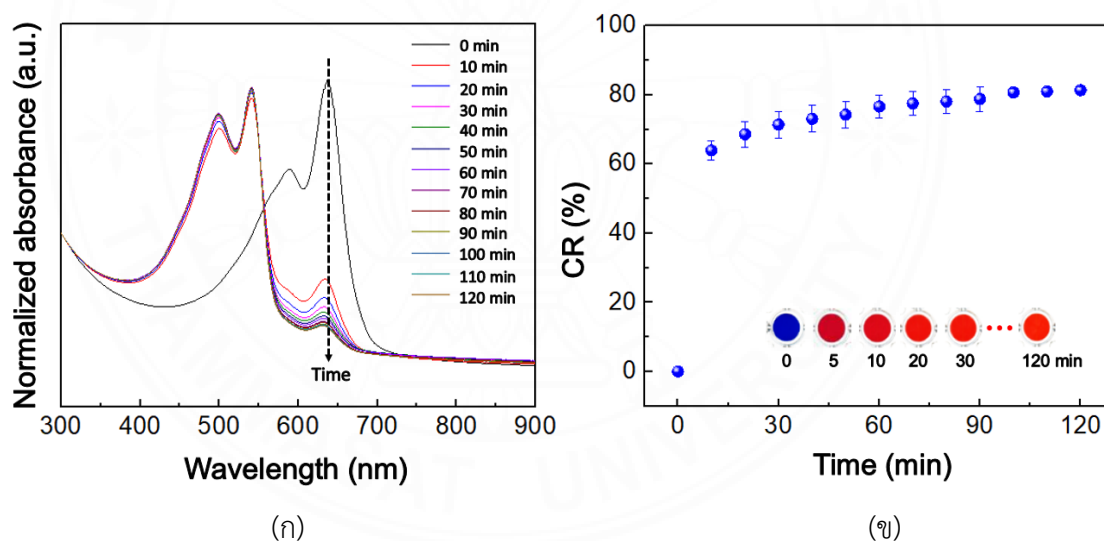
ภาพที่ 3.9 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีน (ก) ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เมื่อทดสอบแอมโมเนียความเข้มข้น 100 พีพีเอ็ม (ข) ที่ความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์ ต่อสารทดสอบชนิดต่าง ๆ ที่ความเข้มข้น 1000 พีพีเอ็ม เทียบกับแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 100 พีพีเอ็ม

การศึกษาสมบัติความจำเพาะเจาะจงในการตรวจวัดหรือการเลือกตอบสนอง (selective) ต่อสิ่งเร้าและสารเคมีบางชนิดของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนที่มีความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์ จากการศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนสี โดยสังเกตการเปลี่ยนสีด้วยตาเปล่าและค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสี แสดงดังภาพที่ 3.9 (ข) ประกอบด้วยการทดสอบผลการตอบสนองต่อกรดซัลฟิวริก กรดอะซิติก ฟอรัมาลีน เมทานอล เอทานอล ไอโซโพรพานอล อะซิโตน โซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 1000 พีพีเอ็ม และแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 100 พีพีเอ็ม จากการศึกษาพบว่าชนิดของสารทดสอบมีผลต่อการเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีน เมื่อเติมแอลกอฮอล์ชนิดต่าง ๆ คือ เมทานอล เอทานอล ไอโซโพรพานอล และอะซิโตน ในสารละลายพอลิไดแอเซทิลีน จากการสังเกตด้วยตาเปล่าพบว่าสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนเปลี่ยนเป็น

สีน้ำเงินอมม่วง และสีม่วงมากขึ้นเมื่อเติมอะซิโตน ในขณะที่สีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนยังคงเป็นสีน้ำเงินเมื่อเติมกรดซัลฟิวริก (กรดแก่) กรดอะซิติก (กรดอ่อน) และฟอร์มอลีน แต่เปลี่ยนเป็นสีแดงเมื่อทดสอบกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (เบสแก่) และแอมโมเนีย เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดง พบว่าสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนมีผลการตอบสนองต่อแอมโมเนียสูงสุดเมื่อเทียบกับสารทดสอบชนิดอื่น ๆ โดยมีผลการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีสูงกว่าประมาณ 12.29 เท่า และ 4.67 เท่า เมื่อเทียบกับเมทานอลและอะซิโตน ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนมีความจำเพาะต่อการเลือกตอบสนองต่อแอมโมเนียได้ดี และสามารถบอกความแตกต่างของการเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนจากการตรวจวัดแอมโมเนียได้เมื่อเทียบกับสารทดสอบชนิดอื่น ๆ นอกจากนี้สารละลายพอลิไดแอเซทิลีนสามารถตอบสนองต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเป็นเบสแก่ได้

โดยสาเหตุที่ทำให้สารละลายพอลิไดแอเซทิลีน เกิดการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับการกระตุ้นจากเมทานอล เอทานอล และไอโซโพรพานอล เนื่องจากโมเลกุลของเมทานอล (CH_3OH) เอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) และไอโซโพรพานอล ($\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$) พยายามจัดเรียงตัวโดยหันหมู่ไฮดรอกซิลเข้าหาหมู่คาร์บอกซิลที่บริเวณส่วนหัวของพอลิไดแอเซทิลีน เนื่องจากมีความเป็นขั้วเหมือนกัน และหันหมู่เมทิลของเมทานอล หมู่เอทิลของเอทานอล หรือหมู่โพรพิลของไอโซโพรพานอลซึ่งเป็นส่วนที่ไม่มีขั้วเข้าหาโซ่ข้างที่เป็นหมู่แอลคิลของพอลิไดแอเซทิลีน ลักษณะการจัดเรียงตัวเช่นนี้อาจทำให้เกิดการแทรกของโมเลกุลของแอลกอฮอล์ระหว่างโซ่ข้างของพอลิไดแอเซทิลีน จึงเกิดการแตกออกของพันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่างส่วนหัวของพอลิไดแอเซทิลีน ทำให้โซ่ข้างบิดงอและเกิดการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ ส่งผลให้ออร์บิทัล π เกิดการบิดออกนอกกระนาบ อิเล็กตรอนที่สายโซ่หลักที่มีพันธะคู่สลับพันธะเดี่ยวแบบต่อเนื่องเคลื่อนที่ไม่สะดวก ระยะเวลาจนเกิดลดลง เป็นสาเหตุให้เกิดการเปลี่ยนสีขึ้น (Potisatityuenyong et al., 2008) สำหรับสาเหตุที่สารละลายพอลิไดแอเซทิลีนเกิดการเปลี่ยนสี เมื่อได้รับการกระตุ้นจากอะซิโตน $((\text{CH}_3)_2\text{CO})$ นั้นคล้ายคลึงกับกลไกการตอบสนองต่อเมทานอล เอทานอล และไอโซโพรพานอล เนื่องจากอะซิโตนเป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทคีโตน ส่วนที่มีขั้วคือหมู่คาร์บอนิล ($\text{C}=\text{O}$) ของอะซิโตน สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่คาร์บอกซิลิก และแทรกส่วนหางที่ไม่มีขั้วเข้าไปในสายโซ่หลักของพอลิไดแอเซทิลีน ทำให้เกิดการบิดตัวของโครงสร้างหลักของพอลิไดแอเซทิลีน ความยาวของระบบคอนจูเกตสั้นลง จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วง แม้ว่าโมเลกุลของเมทานอล เอทานอล ไอโซโพรพานอล หรืออะซิโตน ทำให้พันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่างส่วนหัวของพอลิไดแอเซทิลีนเกิดการแตกออก จึงเกิดการรบกวนความเป็นระนาบของสายโซ่หลักที่มีพันธะคู่สลับพันธะเดี่ยวแบบต่อเนื่อง ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีขึ้น แต่อาจไม่มีแรงกระทำมากพอเมื่อ

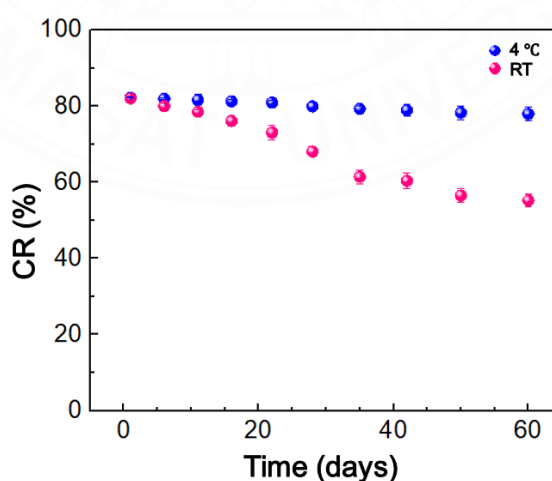
เปรียบเทียบกับสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนที่ได้รับการกระตุ้นจากโซเดียมไฮดรอกไซด์และแอมโมเนีย ที่ปรากฏเป็นสีแดงเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า การเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงในสารละลายพอลิไดแอเซทิลีน เป็นการเติมไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ซึ่งทำให้แรงกระทำระหว่างส่วนหัวของเวสิเคิลเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยการเติม OH^- ไอออนลงไปจะทำให้ไปจับตัวกับไฮโดรเจนไอออน (H^+) จากส่วนหัวที่เป็นหมู่คาร์บอกซิล ($-\text{COOH}$) ที่บริเวณส่วนหัวของ PCDA ส่งผลให้เกิดการแตกของพันธะไฮโดรเจนที่บริเวณพื้นผิวของเวสิเคิล (Kew and Hall, 2006) นอกจากนี้ปฏิกิริยาระหว่างกรด-เบสจะทำให้หมู่คาร์บอกซิลกลายเป็นหมู่คาร์บอกซิเลตไอออน ($-\text{COO}^-$) ซึ่งมีประจุเป็นลบ จึงทำให้เกิดแรงผลักระหว่างประจุลบบริเวณส่วนหัวของเวสิเคิล ส่งผลให้เกิดการขยับตัวและจัดเรียงตัวใหม่ของโครงสร้างเวสิเคิล จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนสี ส่วนสาเหตุที่สารละลายพอลิไดแอเซทิลีนไม่เกิดการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับการกระตุ้นจากกรดซัลฟิวริก กรดอะซิติก และฟอร์มิก เนื่องจากออร์บิทัล π ที่สายโซ่หลักที่มีโครงสร้างเป็นพันธะคู่สลับพันธะเดี่ยวแบบต่อเนื่อง ไม่เกิดการบิดออกนอกระนาบ ระยะคอนจูเกตไม่มีการเปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 3.10 (ก) สเปกตรัมการดูดกลืนแสง และ (ข) เปอร์เซนต์การเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนต่อแอมโมเนียความเข้มข้น 100 พีพีเอ็ม ที่ระยะเวลาต่าง ๆ

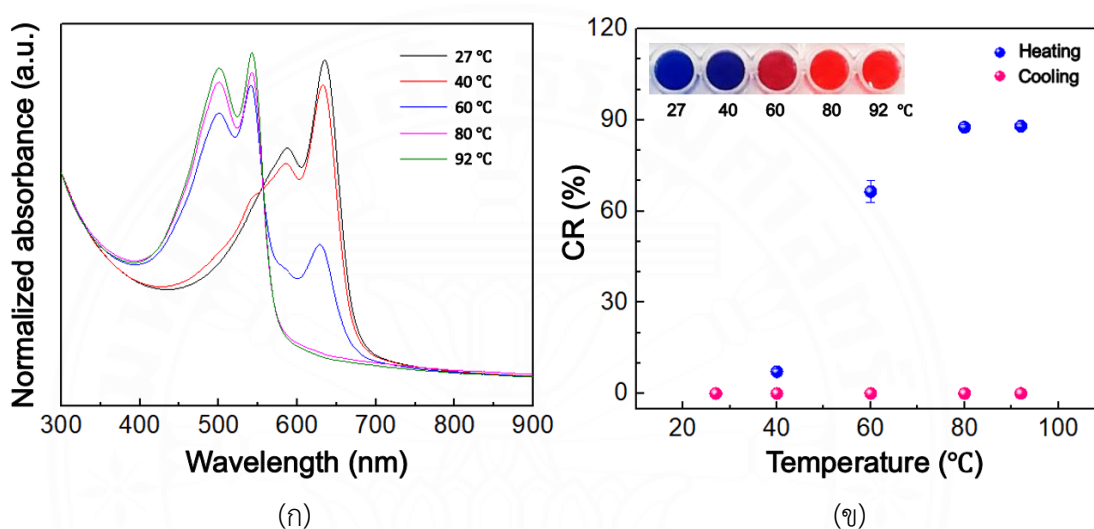
การศึกษาเวลาในการตอบสนองการเปลี่ยนสี (response time) ของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนที่ความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์ ต่อการตรวจวัดแอมโมเนียความเข้มข้น 100 พีพีเอ็ม โดยศึกษาค่าการดูดกลืนแสง ทุก ๆ 10 นาที เป็นระยะเวลา 120 นาที พบว่าปฏิกิริยาระหว่างสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนกับแอมโมเนียเกิดขึ้นได้รวดเร็ว ได้สเปกตรัมการดูดกลืนแสงดังแสดงใน

ภาพที่ 3.10 (ก) จากผลการทดลองพบว่า ภายหลังจากเติมแอมโมเนียลงไปในสารละลายพอลิไดอะเซทิลีน ที่งัวที่อุณหภูมิต้อง (27 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 10 นาที สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายพอลิไดอะเซทิลีนเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมากโดยความเข้มของการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร ลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว และตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุดจะเคลื่อนจากความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร ไปอยู่ที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร แสดงให้เห็นว่าอัตราการเปลี่ยนสีเพิ่มขึ้น (พิจารณาจากค่าความยาวคลื่น ณ ตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุด) จากนั้นเมื่อระยะเวลาเพิ่มมากขึ้นจนถึง 120 นาที ยอดการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตรลดลงเรื่อย ๆ ในขณะเดียวกันยอดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นในช่วง 490 ถึง 540 นาโนเมตรที่ปรากฏขึ้นมาเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่าไม่มีการเปลี่ยนสีเกิดขึ้นอีกต่อไปหลังจากที่งัวนานกว่า 120 นาที โดยค่าความยาวคลื่นสูงสุดคงที่ (ตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุดยังคงอยู่ตำแหน่งเดิม) ที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร เมื่อพิจารณากราฟเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีที่ระยะเวลาต่าง ๆ ในภาพที่ 3.10 (ข) พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลา 0 ถึง 10 นาที โดยเพิ่มขึ้นถึง 63.41 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าจะเห็นว่าสารละลายพอลิไดอะเซทิลีนปรากฏเป็นสีแดง และค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีเพิ่มอย่างต่อเนื่องในช่วง 10 ถึง 60 นาที ซึ่งเพิ่มไปอยู่ที่ค่า 77.49 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงสุดที่ 80.11 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเวลา 120 นาที ดังนั้นการศึกษานี้จึงได้เลือกระยะเวลาที่ 120 นาที เป็นระยะเวลาในการตรวจวัดการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสี (ทั้งในระบบการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี และการวิเคราะห์ภาพจากสแกนเนอร์)



ภาพที่ 3.11 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีเมื่อเติมแอมโมเนียความเข้มข้น 100 พีพีเอ็ม ของสารละลายพอลิไดอะเซทิลีนเก็บรักษาที่อุณหภูมิต้องและอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลา 60 วัน

เนื่องจากการนำพอลิไดแอเซทิลีนในรูปของสารละลายไปใช้งานอาจมีข้อจำกัดในด้านอายุการใช้งาน และความเสถียรในการเปลี่ยนสี เนื่องจากการตกตะกอนของอนุภาคในสารละลาย อุณหภูมิของสภาพแวดล้อมและสารละลาย ดังนั้นจึงศึกษาความคงสภาพหรือความเสถียร (stability) ของการตอบสนองต่อแอมโมเนียของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนเมื่อเก็บรักษาสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนที่อุณหภูมิห้องและในตู้เย็น และศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีน



ภาพที่ 3.12 (ก) สเปกตรัมการดูดกลืนแสง และ (ข) เพอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนที่อุณหภูมิต่าง ๆ

การศึกษาเสถียรภาพการตอบสนองการเปลี่ยนสีต่อแอมโมเนียของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีน โดยการศึกษาระยะเวลาการใช้งาน (beyond-use date) และอายุการเก็บรักษา (shelf life) ของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนที่แสดงผลการวิเคราะห์อยู่ในระดับที่ยอมรับได้และมีประสิทธิภาพการใช้งานของเซนเซอร์อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด โดยพิจารณากราฟเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนต่อแอมโมเนียความเข้มข้น 100 พีพีเอ็ม ภายใต้การตรวจวัดที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 วัน เริ่มนับตั้งแต่วันที่เตรียมสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนไปจนถึงวันที่กำหนด โดยก่อนนำสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนมาทำการทดสอบแอมโมเนียนั้น สารละลายพอลิไดแอเซทิลีนจะถูกเก็บในภาชนะปิดแน่นในสภาวะมืดเพื่อควบคุมแสงและเก็บภายใต้อุณหภูมิห้อง (30-35 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์อยู่ที่ 55-60 %RH) เปรียบเทียบกับการเก็บในตู้เย็นอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ดังแสดงผลตอบสนองการเปลี่ยนสีในภาพที่ 3.11 พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนที่เก็บภายใต้อุณหภูมิ

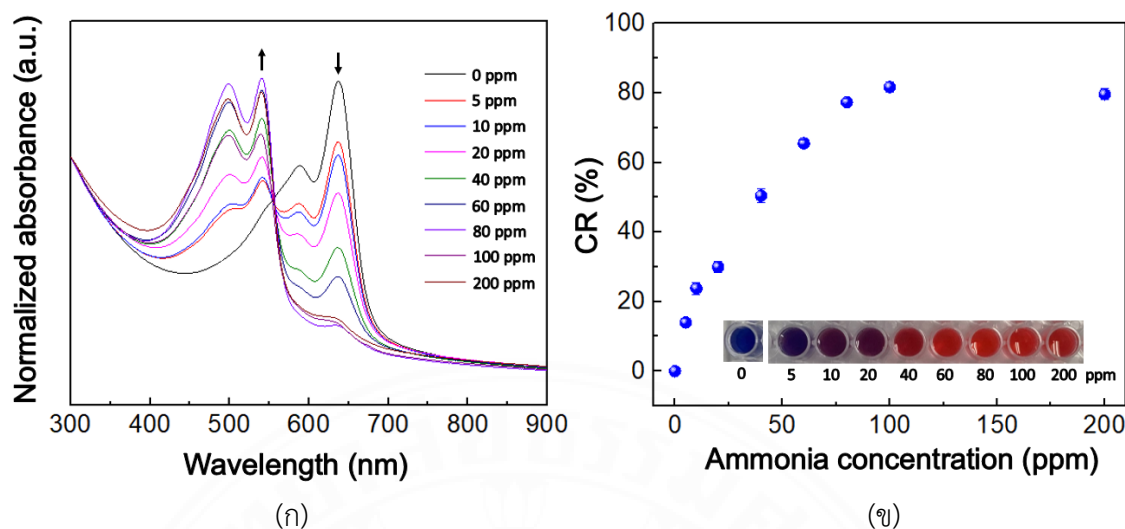
4 องศาเซลเซียส มีความเสถียรมากกว่าสารละลายพอลิไดออกซีเททราไฮดรอกซีเพนทาน-2-ออลที่เก็บภายใต้อุณหภูมิห้อง โดยค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีเปลี่ยนแปลง 4.29 เปอร์เซ็นต์ (ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีคงเหลือเป็น 77.97 ± 1.89 เปอร์เซ็นต์) เมื่อเวลาผ่านไป 60 วัน ถือว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดที่ยอมรับได้ ในช่วงอายุการเก็บรักษาของสารละลายพอลิไดออกซีเททราไฮดรอกซีเพนทาน-2-ออลนี้ ในขณะที่สารละลายพอลิไดออกซีเททราไฮดรอกซีเพนทาน-2-ออลที่เก็บภายใต้อุณหภูมิห้องค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีมีการเปลี่ยนแปลง 26.83 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับวันแรก ซึ่งลดลงเหลือเพียง 55.24 ± 1.65 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเวลาผ่านไป 60 วัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้วิธีการเตรียมสารละลายพอลิไดออกซีเททราไฮดรอกซีเพนทาน-2-ออลใหม่ทุกครั้ง หรือเก็บสารละลายพอลิไดออกซีเททราไฮดรอกซีเพนทาน-2-ออลในที่มีดที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส สำหรับการใช้เป็นเซนเซอร์ตรวจวัดแอมโมเนีย ทั้งนี้เพราะให้ผลการวิเคราะห์การตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีสูงสุด เพื่อนำไปใช้ตรวจวัดได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

เมื่อนำสารละลายพอลิไดออกซีเททราไฮดรอกซีเพนทาน-2-ออลที่เตรียมได้มาทำการศึกษาการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับการกระตุ้นโดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิ 27 ถึง 92 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิห้อง 27 องศาเซลเซียส สารละลายพอลิไดออกซีเททราไฮดรอกซีเพนทาน-2-ออลมีสีน้ำเงินจากการสังเกตด้วยตาเปล่า ทำการวิเคราะห์สมบัติการดูดกลืนแสงของสารละลายพอลิไดออกซีเททราไฮดรอกซีเพนทาน-2-ออลได้ผลการทดลองดังภาพที่ 3.12 (ก) พบตำแหน่งการดูดกลืนแสงสูงสุด ($\lambda_{\max}$) ของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอยู่ที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 40 องศาเซลเซียส ความเข้มของการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นของเฟสสีน้ำเงินที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตรลดลง และจะพบยอดการดูดกลืนแสงเล็ก ๆ ที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร โดยที่สารละลายพอลิไดออกซีเททราไฮดรอกซีเพนทาน-2-ออลยังคงปรากฏสีน้ำเงิน (ไม่สามารถสังเกตความแตกต่างของการเปลี่ยนสีได้ด้วยตาเปล่า) จนกระทั่งเมื่อให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจนอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 60 องศาเซลเซียส ความเข้มของแถบการดูดกลืนแสงสีน้ำเงินลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยปรากฏยอดการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 490 ถึง 540 นาโนเมตร ซึ่งเป็นสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสีแดงขึ้นมาและสารละลายพอลิไดออกซีเททราไฮดรอกซีเพนทาน-2-ออลเปลี่ยนเป็นสีแดง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 80 และ 92 องศาเซลเซียส สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายพอลิไดออกซีเททราไฮดรอกซีเพนทาน-2-ออลเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับอุณหภูมิเริ่มต้น โดยความเข้มของการดูดกลืนแสงของสีน้ำเงินลดลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ความเข้มของการดูดกลืนแสงของสีแดงกลับเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าพบว่าสารละลายพอลิไดออกซีเททราไฮดรอกซีเพนทาน-2-ออลเป็นสีแดงอมส้ม เมื่อกำหนดเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีพบว่าที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส สารละลายพอลิไดออกซีเททราไฮดรอกซีเพนทาน-2-ออลมีการเปลี่ยนสี 7.16 ± 1.05 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่สารละลายพอลิไดออกซีเททราไฮดรอกซีเพนทาน-2-ออลมีการเปลี่ยนสี 66.42 ± 3.55 และ 87.65 ± 0.95 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 60 และ 80 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดออกซีเททราไฮดรอกซีเพนทาน-2-ออลมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงอุณหภูมิ 60 จนถึง 80 องศาเซลเซียส และเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยค่า

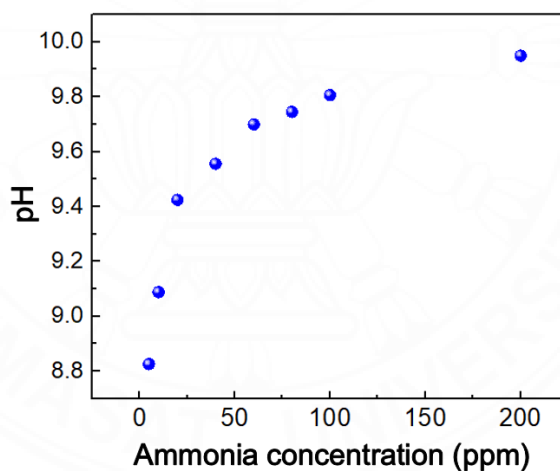
เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 92 องศาเซลเซียส เท่ากับ 87.99 ± 0.79 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้เมื่อสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนเย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้อง 27 องศาเซลเซียส พบว่าสีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนยังคงปรากฏเป็นสีแดงอยู่ จากการคำนวณเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนเมื่อเย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้องมีค่าเป็นศูนย์ ดังแสดงในภาพที่ 3.12 (ข) แสดงให้เห็นว่าสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนมีกระบวนการเปลี่ยนสีแบบผันกลับไม่ได้ อธิบายได้ว่าเมื่อสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนได้รับความร้อนมากขึ้นจะค่อย ๆ เกิด blue-shift ขึ้น นั่นคือค่าความยาวคลื่นที่ตำแหน่งการดูดกลืนแสงสูงสุดจะเคลื่อนไปที่ความยาวคลื่นต่ำลง โดยกลไกในการเปลี่ยนสีเกิดจากความร้อนทำให้โครงรูปของโซ่ข้างเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น เกิดการหมุนของโซ่ข้าง (rotation) เกิดการเคลื่อนที่ของโซ่ข้าง โครงสร้างที่เรียงตัวใหม่ (rearrangement structure) หรือทิศทางการจัดเรียงตัวเปลี่ยนแปลงไป เป็นต้น ส่งผลให้ออร์บิทัล π บางส่วนบิดตัว จึงเกิดการรบกวนความเป็นระนาบของสายโซ่หลักที่มีพันธะคู่สลับพันธะเดี่ยวแบบต่อเนื่องทำให้เกิดการเปลี่ยนสีขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น พลังงานที่สูงนี้ทำให้พันธะไฮโดรเจนของหมู่คาร์บอกซิลิกที่เชื่อมระหว่างส่วนหัวของพอลิไดแอเซทิลีนเกิดการแตกออกจึงทำให้เกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับไม่ได้ และโซ่ข้างที่เป็นหมู่แอลคิลเกิดการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็ว การเคลื่อนที่ของโซ่ข้างจะเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับอุณหภูมิที่สูงขึ้น จึงไปทำลายความเป็นระเบียบของโซ่ข้างและสายโซ่หลัก ทำให้เอนโทรปีเพิ่มขึ้นอย่างมาก ส่งผลให้ออร์บิทัล π เกิดการบิดออกนอกระนาบ ความเป็นระนาบของออร์บิทัล π น้อยลงอย่างเป็นระบบ และ π อิเล็กตรอนที่โครงสร้างโซ่หลักที่มีพันธะคู่สลับพันธะเดี่ยวแบบต่อเนื่องเคลื่อนที่ไม่สะดวก ส่งผลให้ระยะคอนจูเกตลดลง และเกิดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงไปยังความยาวคลื่นที่สั้นกว่า ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนเป็นสีแดง (Potisatityuenyong et al., 2008) จากผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนแสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิมีผลต่อการเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีน ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการตรวจวัดแอมโมเนียในน้ำด้วยพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลคือที่อุณหภูมิไม่เกิน 40 องศาเซลเซียส

การศึกษาการเปลี่ยนสีด้วยตาเปล่าและวิเคราะห์สมบัติการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี ของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนที่ความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์ เมื่อทดสอบแอมโมเนียความเข้มข้นในช่วง 5 ถึง 200 พีพีเอ็ม พบว่าการเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนเป็นกระบวนการผันกลับไม่ได้ และเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงิน เป็นสีม่วง และสีแดง ตามความเข้มข้นของแอมโมเนียที่เพิ่มขึ้น จากการสังเกตด้วยตาเปล่าสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนมีสีน้ำเงิน และเมื่อวิเคราะห์การดูดกลืนแสงได้ผลดังแสดงในภาพที่ 3.13 (ก) พบตำแหน่งการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร และปรากฏแถบ vibronic ที่

ความยาวคลื่น 590 นาโนเมตร ซึ่งเป็นสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงิน เมื่อเติมสารละลายแอมโมเนียความเข้มข้น 5 พีพีเอ็ม ลงไปในสารละลายพอลิไดแอเซทิลีน สีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนจะเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีน้ำเงินอมม่วง และเมื่อวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนแสงพบว่าที่ความเข้มข้นแอมโมเนีย 5 พีพีเอ็ม มียอดการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 490 ถึง 540 นาโนเมตร ซึ่งเป็นสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเฟสสีแดงปรากฏอยู่ร่วมกับเฟสสีน้ำเงิน เมื่อความเข้มข้นของแอมโมเนียเพิ่มขึ้นความเข้มของแถบการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงินลดลงเรื่อย ๆ ในขณะเดียวกันความเข้มของแถบการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตรเพิ่มขึ้น และเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าพบว่าสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นสีม่วงมากขึ้น และเมื่อความเข้มข้นของแอมโมเนียเพิ่มขึ้นจนถึง 40 และ 60 พีพีเอ็ม สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยความเข้มของการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงินลดต่ำลงอย่างมาก ในขณะที่ความเข้มของการดูดกลืนแสงของเฟสสีแดงกลับเพิ่มสูงขึ้นอย่างมากเช่นกัน โดยตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุดจะเลื่อนไปอยู่ที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร ในขณะที่แถบ vibronic จะปรากฏที่ความยาวคลื่น 490 นาโนเมตร ซึ่งมองเห็นสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนเป็นสีม่วงอมแดง เมื่อความเข้มข้นแอมโมเนียเป็น 80 100 และ 200 พีพีเอ็ม แถบการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 640 นาโนเมตรลดลงจนเกือบเป็นศูนย์ มีเพียงแถบการดูดกลืนแสงในช่วงของเฟสสีแดงปรากฏขึ้นมาเท่านั้น โดยมีความสูงของยอดใกล้เคียงกับความสูงของยอดการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร นั่นคือสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนเกิดการเปลี่ยนเฟสจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงอย่างสมบูรณ์ เมื่อสังเกตด้วยตาจะเห็นว่าสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนมีสีแดง เมื่อพิจารณากราฟเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนที่ความเข้มข้นของแอมโมเนียในช่วง 5 ถึง 200 พีพีเอ็ม ดังภาพที่ 3.13 (ข) พบว่าสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนมีค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของแอมโมเนีย และเมื่อความเข้มข้นแอมโมเนียสูงขึ้นเป็น 100 และ 200 พีพีเอ็ม ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีเพิ่มขึ้นมีค่าสูงสุด 81.67 ± 1.42 เปอร์เซ็นต์ และ 79.63 ± 1.62 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนสามารถตรวจวัดแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ได้ สามารถพัฒนาและประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ตรวจวัดแอมโมเนียในสิ่งแวดล้อมที่เป็นของเหลวได้ ทั้งนี้เนื่องจากการตอบสนองต่อแอมโมเนียของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนอยู่ในช่วงความเข้มข้นที่สอดคล้องกับค่าความเข้มข้นมาตรฐานของคุณภาพน้ำ และสามารถมองเห็นการเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนที่ความเข้มข้นของแอมโมเนียต่ำสุดที่ 5 พีพีเอ็ม



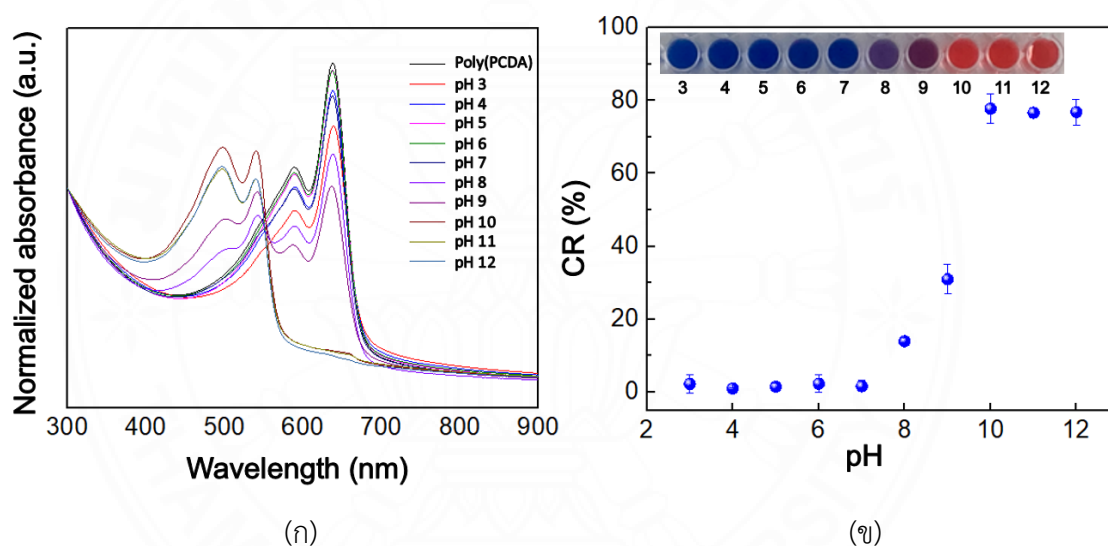
ภาพที่ 3.13 (ก) สเปกตรัมการดูดกลืนแสง และ (ข) เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนต่อแอมโมเนียความเข้มข้นต่าง ๆ



ภาพที่ 3.14 ค่าพีเอชของสารละลายแอมโมเนียที่ความเข้มข้นในช่วง 5 ถึง 200 พีพีเอ็ม โดยใช้เครื่องวัดค่าความเป็นกรดต่างแบบดิจิทัล

จากการตรวจวัดค่าพีเอชของแอมโมเนียที่ความเข้มข้นในช่วง 5 ถึง 200 พีพีเอ็ม ด้วยเครื่องวัดค่าความเป็นกรดต่างแบบดิจิทัล (pH meter) รุ่น Lab 855 บริษัท SI Analytics ประเทศเยอรมนี พบว่าค่าพีเอชอยู่ในช่วงประมาณ 8.8 ถึง 10.0 ดังแสดงในภาพที่ 3.14 นอกจากนี้จากการศึกษาการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบสของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนในช่วงพีเอช 3 ถึง 12 พบว่าการเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนเป็นกระบวนการผันกลับไม่ได้ และสารละลาย

พอลิไดแอเซทิลีนเริ่มเกิดการเปลี่ยนสีที่ค่าพีเอช 8 ขึ้นไป อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากกราฟการดูดกลืนแสงดังแสดงในภาพที่ 3.15 (ก) พบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงมีแนวโน้มที่จะเกิดการเปลี่ยนตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุดมาอยู่ที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตรได้ที่พีเอชสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีจากเฟสสีน้ำเงินเป็นเฟสสีแดงในภาพที่ 3.15 (ข) พบว่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงพีเอช 8 ถึง 10 โดยมีค่าสูงถึง 77.76 ± 3.98 เปอร์เซ็นต์ ที่พีเอช 10 และสีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนปรากฏเป็นสีแดง แสดงถึงสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนมีการตอบสนองต่อความเป็นเบส ไม่ตอบสนองต่อความเป็นกรด และสอดคล้องกับผลการศึกษาการตอบสนองของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนต่อแอมโมเนียที่ความเข้มข้นในช่วง 5 ถึง 200 พีพีเอ็ม

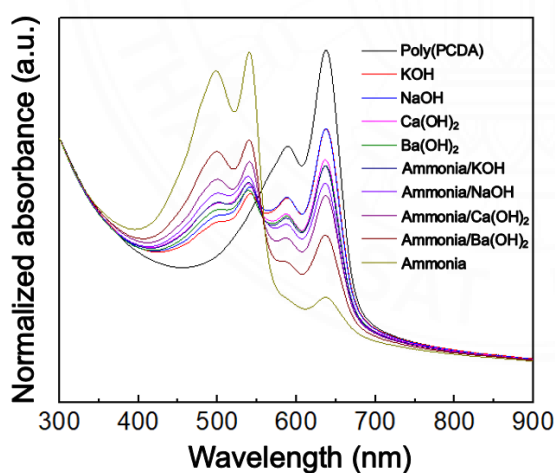


ภาพที่ 3.15 การตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบสของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีน

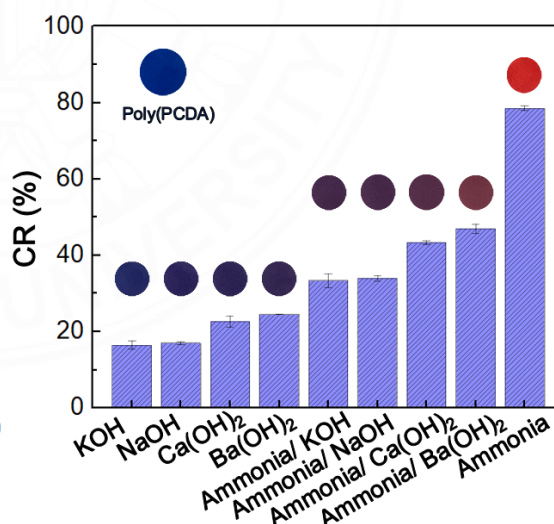
(ก) สเปกตรัมการดูดกลืนแสง และ (ข) เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสี

การศึกษาการตอบสนองของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนต่อสารทดสอบชนิดต่าง ๆ ที่มีสมบัติเป็นเบสที่ค่าพีเอช 9.8 และเป็นสารประกอบที่มี OH เมื่อละลายน้ำจะแตกตัวให้ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ได้แก่ แบเรียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ba}(\text{OH})_2$) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) สารผสมระหว่างแอมโมเนีย (ความเข้มข้น 50 พีพีเอ็ม) กับสารทดสอบแต่ละชนิดโดยปรับค่าพีเอชของสารผสมเท่ากับ 9.8 และแอมโมเนีย (ความเข้มข้น 100 พีพีเอ็ม) โดยสังเกตการเปลี่ยนสีด้วยตาเปล่าและวิเคราะห์สมบัติการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีน

จากการศึกษาพบว่าชนิดของสารทดสอบพีเอชมีผลต่อการเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนเพียงเล็กน้อยดังแสดงในภาพที่ 3.16 (ก) และ (ข) เมื่อเติมสารผสมระหว่างแอมโมเนีย (ความเข้มข้น 50 พีพีเอ็ม) กับสารทดสอบแต่ละชนิด (แอมโมเนีย/โซเดียมไฮดรอกไซด์ แอมโมเนีย/โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ แอมโมเนีย/แบเรียมไฮดรอกไซด์ และแอมโมเนีย/แคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดยปรับค่าพีเอชให้เทียบเท่ากับพีเอชของแอมโมเนียความเข้มข้น 100 พีพีเอ็ม) ในสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนพบว่าสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนเกิดการเปลี่ยนสีเป็นสีม่วงอมแดง เมื่อพิจารณาค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีดังแสดงในภาพที่ 3.16 (ข) พบว่าสารผสมระหว่างแอมโมเนีย (ความเข้มข้น 50 พีพีเอ็ม) กับสารทดสอบแต่ละชนิดมีค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีเทียบเท่ากับผลการทดสอบแอมโมเนียที่ 50 พีพีเอ็ม นอกจากนี้เมื่อสารทดสอบมีความเข้มข้นของ OH^- ที่สูง (แบเรียมไฮดรอกไซด์ และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (เบสที่มี OH^- 2 ตัว)) ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีมีค่ามากกว่าสารทดสอบมีความเข้มข้นของ OH^- ที่ต่ำกว่า (โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (เบสที่มี OH^- ตัวเดียว)) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนตอบสนองต่อแอมโมเนียได้ดีกว่าสารทดสอบชนิดอื่น มีความจำเพาะต่อการตรวจวัดแอมโมเนีย และสามารถแยกออกจากสารทดสอบชนิดต่าง ๆ ที่มีสมบัติเป็นเบสที่มีค่าพีเอชเท่ากันได้ ดังนั้นสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนเป็นเซนเซอร์ที่เหมาะสมสำหรับตรวจวัดแอมโมเนีย

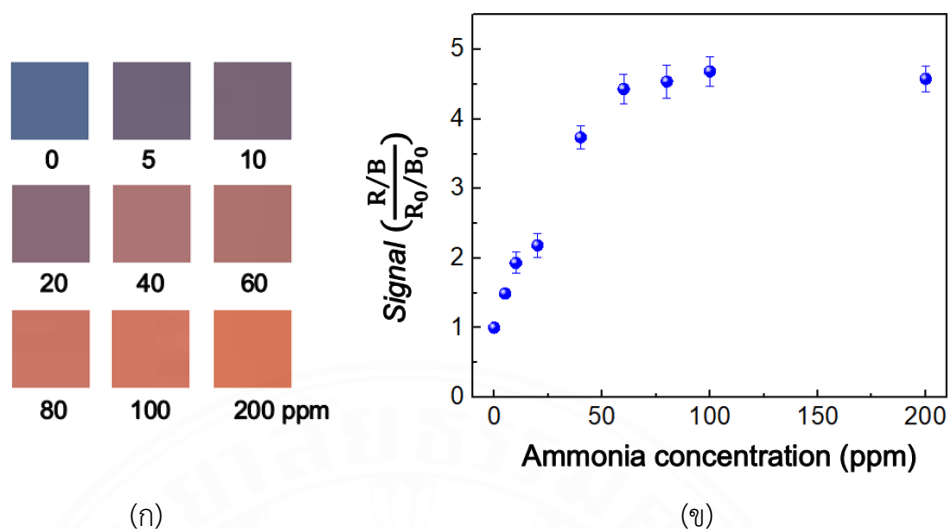


(ก)



(ข)

ภาพที่ 3.16 (ก) สเปกตรัมการดูดกลืนแสง และ (ข) เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีน ต่อสารทดสอบชนิดต่าง ๆ ที่ค่าพีเอช 9.8



ภาพที่ 3.17 (ก) ภาพการเปลี่ยนแปลงสีที่ได้จากเครื่องสแกนเนอร์ (ข) ค่าอัตราส่วนของการเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนต่อแอมโมเนียความเข้มข้นต่าง ๆ

การศึกษาผลการตอบสนองต่อแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 5 ถึง 200 พีพีเอ็ม ของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนที่ความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์ ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์สี (colorimetry) นอกจากการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโตรสโกปีแล้ว การวิเคราะห์ภาพที่ได้จากสแกนเนอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB® software ซึ่งเป็นการศึกษาด้วยการประมวลผลภาพเชิงตัวเลข (digital image processing) ผลการศึกษาพบว่า เมื่อนำสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนที่เติมแอมโมเนียไปวิเคราะห์ด้วยภาพจากสแกนเนอร์ สังเกตเห็นว่าสีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อความเข้มข้นของแอมโมเนียเพิ่มขึ้น โดยค่อย ๆ เกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงโดยเกิดการเปลี่ยนสีในระดับต่างกัน (เฉดสีที่แตกต่างกัน) คือ เฉดสีน้ำเงินบ่งบอกถึงเซนเซอร์ชนิดพอลิไดแอเซทิลีนบริสุทธิ์ เฉดสีม่วงเข้ม (dark violet) บ่งบอกถึงระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย 5 ถึง 20 พีพีเอ็ม เฉดสีม่วงอ่อน (light violet) บ่งบอกถึงระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย 40 ถึง 60 พีพีเอ็ม และเฉดสีแดงที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียมากกว่า 60 พีพีเอ็ม ดังในภาพที่ 3.17 (ก) เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงหรือค่าสัญญาณ (Signal) ดังในภาพที่ 3.17 (ข) พบว่าสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนเมื่อทดสอบแอมโมเนียความเข้มข้นที่สูงขึ้นจะมีค่าอัตราส่วนของการเปลี่ยนสีโดยรวมเพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 4.69 ± 0.21 ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย 100 พีพีเอ็ม และเข้าสู่ค่าคงที่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแอมโมเนีย (200 พีพีเอ็ม อัตราส่วนของการเปลี่ยนสีเท่ากับ 4.57 ± 0.18) ในขณะที่ความเข้มข้นของแอมโมเนีย 20 พีพีเอ็ม สารละลายพอลิไดแอเซทิลีนมีค่าอัตราส่วนของการเปลี่ยนสีอยู่ที่ 2.19 ± 0.17 เท่านั้น

เมื่อเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนของการเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนที่ความเข้มข้นของแอมโมเนีย 40 พีพีเอ็ม (อัตราส่วนของการเปลี่ยนสีเท่ากับ 3.74 ± 0.16) ซึ่งแตกต่างประมาณ 1.55 เท่า ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนสามารถตรวจวัดและแยกความแตกต่างของแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ได้ นอกจากนี้เมื่อนำเทคนิคการวิเคราะห์ภาพจากสแกนเนอร์นี้เปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐาน (อัลตราไวโอเลตและวิสเบิลสเปกโทรสโกปี) พบว่าทั้งสองเทคนิคไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าเทคนิคการวิเคราะห์ภาพจากสแกนเนอร์มีประสิทธิภาพเทียบเคียงกับวิธีมาตรฐาน สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์การตอบสนองต่อแอมโมเนียเป็นอย่างดี

3.4 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาการเตรียมสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนในน้ำปราศจากไอออนสำหรับประยุกต์เป็นเซนเซอร์ตรวจสอบแอมโมเนียในน้ำด้วยการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีน พบว่าเมื่อฉายแสงอัลตราไวโอเลตที่มีความยาวคลื่นประมาณ 254 นาโนเมตร ได้สารละลายสีน้ำเงินเข้มที่มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร พอลิไดแอเซทิลีนมีรูปร่างเป็นทรงกลมแสดงถึงการจัดเรียงตัวเป็นทรงกลมที่เรียกว่าเวสิเคิล เนื่องจากเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันได้คอนจูเกตพอลิเมอร์ซึ่งประกอบด้วยสายโซ่หลักที่มีพันธะคู่และพันธะสามสลับกันไป การคอนจูเกตของอิเล็กตรอน π จึงทำให้พอลิไดแอเซทิลีนสามารถดูดกลืนแสงที่มีพลังงานต่ำที่อยู่ในช่วงพลังงานของแสงที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า

ผลการทดลองสมบัติเชิงเซนเซอร์ของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีน พบว่าการเตรียมสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนที่มีความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์ เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาสมบัติการเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนในการตรวจวัดแอมโมเนีย ให้ผลการตอบสนองต่อแอมโมเนียสูงสุดคือ 82.22 ± 0.63 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นแอมโมเนีย 100 พีพีเอ็ม นอกจากนี้พบว่าสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนมีความจำเพาะต่อการเลือกตอบสนองต่อแอมโมเนียได้ดีมากกว่าสารทดสอบชนิดอื่น และมีระยะเวลาในการตอบสนอง 120 นาที อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเสถียรภาพของเซนเซอร์โดยการศึกษาระยะเวลาการใช้งานและอายุการเก็บรักษาของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีน พบว่าสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนสามารถใช้งานได้มากกว่า 60 วัน ภายใต้การเก็บรักษาในที่มืดอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส โดยค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีลดลง 4.29 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเวลาผ่านไป 60 วัน จากการศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับการกระตุ้นจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นพบว่าอุณหภูมิมีผลต่อการเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีน และจากการศึกษาพฤติกรรม

การเปลี่ยนสีเมื่อได้รับการกระตุ้นจากความเป็นกรด-เบส พบว่าสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนเริ่มเกิดการเปลี่ยนสีที่ค่าพีเอช 8 ขึ้นไป

ผลการตอบสนองการเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนต่อแอมโมเนีย พบว่าสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนมีการเปลี่ยนแปลงสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงตามความเข้มข้นของแอมโมเนียที่เพิ่มขึ้น โดยเกิดการเปลี่ยนสีในระดับต่างกัน (เฉดสีที่แตกต่างกัน) เป็น 3 ระดับ คือ เฉดสีน้ำเงินสำหรับการตรวจวัดแอมโมเนียที่สถานะเริ่มต้นความเข้มข้นของแอมโมเนีย 0 พีพีเอ็ม เฉดสีม่วงเข้มบ่งบอกถึงระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย 5 ถึง 20 พีพีเอ็ม เฉดสีม่วงอ่อนบ่งบอกถึงระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย 40 ถึง 60 พีพีเอ็ม และเฉดสีแดงที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียมากกว่า 60 พีพีเอ็ม การเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างการจัดเรียงตัวที่มีความเป็นระเบียบของโมเลกุลพอลิไดแอเซทิลีนลดลง จากการที่พันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างหมู่คาร์บอกซิลิกถูกทำลายจึงทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่เป็นหมู่แอลคิล มีผลให้ความยาวของระยะคอนจูเกตสั้นลง ทำให้พอลิไดแอเซทิลีนมีสมบัติการดูดกลืนแสงที่เปลี่ยนแปลงไป โดยมีการดูดกลืนคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นต่ำลงซึ่งเป็นคลื่นแสงสีเขียวที่ถูกดูดกลืน ทำให้สีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนที่ปรากฏขึ้นนั้นเป็นสีแดง นอกจากนี้ในการศึกษาสมบัติการเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนสำหรับการตรวจวัดแอมโมเนียยังทำการศึกษาด้านการวิเคราะห์ทางสีด้วยภาพที่ได้จากสแกนเนอร์ร่วมกับโปรแกรมประมวลผลภาพโดยเปรียบเทียบกับเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปีซึ่งเป็นวิธีมาตรฐาน พบว่าทั้ง 2 เทคนิค ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าเทคนิคการวิเคราะห์ทางสีด้วยภาพที่ได้จากสแกนเนอร์มีศักยภาพในการนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดจากความรู้ดังกล่าวเป็นแนวทางที่ดีสำหรับการนำสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนไปประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ในการตรวจวัดแอมโมเนียในสิ่งแวดล้อมที่เป็นของเหลวร่วมกับการวิเคราะห์ผลภาพจากสแกนเนอร์ได้ เพื่อให้สะดวก และง่ายในการตรวจวัด ซึ่งแสดงถึงความเป็นไปได้ในการที่จะนำไปใช้ในอนาคตได้จริง

บทที่ 4

เซนเซอร์ตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียที่เตรียมจากวัสดุผสมระหว่าง พอลิไดแอเซทิลีนและซิงค์ออกไซด์ในรูปฟิล์ม

4.1 บทนำ

ปัจจุบันความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีส่งผลต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์อย่างมาก อีกทั้งประเทศไทยเป็นผู้นำทางด้านการผลิตและส่งออกอาหารรวมถึงผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูป 10 อันดับแรกของโลก (Thai Business Information Center in USA, 2021) ความต้องการบรรจุภัณฑ์อาหารจึงมีการขยายตัวเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย เนื้อสัตว์เป็นแหล่งอาหารที่มีโปรตีนสูงและเป็นโปรตีนที่มีคุณภาพสูง (high biologic value; HBV) แต่มีการเน่าเสียง่าย (perishable food) เนื่องจากมีจุลินทรีย์ที่เฉพาะเจาะจง (specific spoilage organism; SSO) (Gui et al., 2018) สร้างการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของเนื้อสัตว์ ได้แก่ *Acinetobacter*, *Flavobacterium*, *Pseudomonas*, *Psychrobacter*, *Staphylococcus*, *Micrococcus*, *Moraxella*, *Clostridium* และ *Brochothrix* (Nie et al., 2022; Saenz-García et al., 2020) การเจริญเติบโตของ SSO ในอาหารจะเกิดสารระเหยได้หลายชนิด เช่น แอมโมเนีย ไดเมทิลเอมีน (dimethylamine; DMA) ไตรเมทิลเอมีน (trimethylamine; TMA) เป็นต้น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของสารเหล่านี้สามารถใช้เป็นดัชนีคุณภาพทางเคมีที่บ่งชี้ถึงการเน่าเสียของเนื้อสัตว์หรืออาหารได้ (chemical markers) (Yousefi et al., 2019; Morsy et al., 2016) เนื้อสัตว์ที่เน่าเสียไม่เพียงแต่ทำให้อาหารเสื่อมคุณภาพลง แต่ยังส่งผลกระทบต่อสุขภาพและความปลอดภัยของผู้บริโภคด้วย จากงานวิจัยที่ผ่านมา นักวิจัยให้แก๊สแอมโมเนียเป็นตัวบ่งชี้ถึงระดับการเน่าเสียของเนื้อไก่และเนื้อหมู (Barandun et al., 2019; Matindoust et al., 2017) ดังนั้นเซนเซอร์ตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียที่มีสภาพความไวสูง (high sensitivity) ต้นทุนต่ำ (low cost) สามารถแสดงข้อมูลที่วัดได้แบบทันทีทันใด (real time) ใช้งานภาคสนามหรือสถานที่ที่ต้องการทดสอบ ได้ (on-site) จึงได้รับการพัฒนาอย่างแพร่หลาย

โดยทั่วไปวิธีการตรวจวิเคราะห์ความสดของเนื้อสัตว์ทำได้หลายวิธี เช่น เทคนิคโครมาโทกราฟีแบบเยื่อบาง (thin layer chromatography) แก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ (gas chromatography-mass spectrometry) (Wang et al., 2018; Petričević et al., 2018) คัพพิลลารีอิเล็กโทรโฟเรซิส (capillary electrophoresis) และโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (high-performance liquid chromatography) เป็นต้น วิธีการดังกล่าวให้ค่าการตรวจวัดที่แม่นยำแต่ไม่สามารถทำในภาคสนามได้และใช้เวลาในการวิเคราะห์นาน

ดังนั้นการใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้า (electrochemical analysis) (Erna, Rovina, and Mantihal, 2021; Wu, Pu, and Sun, 2019) และเทคโนโลยีจมูกอิเล็กทรอนิกส์ (electronic nose) (Chen et al., 2019; Edita et al., 2018; Wojnowski et al., 2017) จึงถูกพัฒนาขึ้น อย่างไรก็ตามเซนเซอร์เหล่านี้มีหลักการทำงานที่ซับซ้อน ขนาดใหญ่ และราคาแพง ดังนั้นการใช้โมเลกุลเซนเซอร์ที่เปลี่ยนสีและสังเกตเห็นด้วยตาเปล่าได้ จึงเป็นวิธีการตรวจวัดที่น่าสนใจ สามารถตรวจวัดได้โดยง่าย สะดวก และราคาไม่แพง

นวัตกรรมเทคโนโลยีบรรจุภัณฑ์ฉลาดหรืออัจฉริยะ (intelligent and smart packaging) ได้รับการพัฒนาอย่างรวดเร็วในช่วงหลายปีที่ผ่านมาโดยเฉพาะในกลุ่มในประเทศที่พัฒนาแล้ว เช่น สหรัฐอเมริกา เกาหลีใต้ ออสเตรเลีย สเปน และ 핀แลนด์ เป็นต้น สำหรับประเทศไทยยังไม่เป็นที่นิยมมากนัก เนื่องจากมีราคาค่อนข้างสูง แต่มีแนวโน้มการใช้งานเพิ่มมากขึ้น บรรจุภัณฑ์อาหารแบบฉลาดหรืออัจฉริยะถูกออกแบบโดยผสมผสานหลายเทคโนโลยีเข้าด้วยกัน เพื่อบอกข้อมูลเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์ เช่น ระบบบาร์โค้ด (barcode) ระบบการชี้เฉพาะด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (radio frequency identification) ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ (time-temperature indicator) และตัวชี้วัดการเน่าเสียของอาหาร (food spoilage indicator) เป็นต้น งานวิจัยที่ผ่านมามีการพัฒนาเซนเซอร์ชี้วัดคุณภาพอาหารในภาชนะบรรจุ จากวัสดุต่าง ๆ เช่น พลาสติก (Mills and Chang, 1993) พอลิเมอร์ (Pospíšilová, Kuncová, and Trögl, 2015) กระดาษ (Feng et al., 2015; Fernández-Salmerón et al., 2015) และ อุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกส์ (Altintas et al., 2018; Tokel et al., 2015) เป็นต้น

พอลิไดแอเซทิลีนเป็นสารที่มีสมบัติเปลี่ยนสีได้เมื่อถูกกระตุ้นด้วยสารเคมีบางชนิดง่ายต่อการสังเกตการเปลี่ยนสีด้วยตาเปล่า การดัดแปลงด้วยวิธีทางเคมี (chemical modification) เป็นวิธีการปรับปรุงสมบัติของพอลิไดแอเซทิลีนสำหรับใช้งานเป็นเซนเซอร์ระดับโมเลกุลให้มีการตอบสนองต่อสิ่งกระตุ้นในระดับที่แตกต่างออกไป โดยการเติมอนุภาคนาโนของโลหะออกไซด์เพื่อสร้างเป็นวัสดุผสมขึ้น เช่น ZnO (Traiphol et al., 2011) SiO₂ (Nopwinyuwong et al., 2013; Su, 2006) และ TiO₂ (Kwon, Jung, and Lee, 2007) เป็นต้น วัสดุผสมช่วยปรับปรุงความสามารถในการจัดตัวเองได้ของพอลิไดแอเซทิลีน นอกจากนี้พอลิไดแอเซทิลีนยังสามารถผสมกับสารอื่นเพื่อเตรียมให้อยู่ในรูปของฟิล์มบาง (Nguyen et al., 2019; Park et al., 2016) เจล (Weston, Kuchel, and Chandrawati, 2021; Weston et al., 2020) เส้นใย (fiber) (Valdez et al., 2019) และ หมึกพิมพ์ (Hu et al., 2019)

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการศึกษาออกแบบเซนเซอร์ระดับโมเลกุลสำหรับตรวจสอบแก๊สแอมโมเนียด้วยการเปลี่ยนสีของฟิล์มด้วยวัสดุผสมระหว่างพอลิไดแอเซทิลีนและซิงค์ออกไซด์

โดยมี 10,12-เพนตะโคซะไดออยโนอิกแอซิดเป็นไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ และพอลิไดเมทิลไซโลเซนเป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์สำหรับขึ้นรูปฟิล์ม เนื่องจากพอลิไดเมทิลไซโลเซนเป็นพอลิเมอร์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีสมบัติเชิงกลที่ดี มีความยืดหยุ่นสูง และมีความโปร่งใสทางแสง อีกทั้งพอลิไดเมทิลไซโลเซนมีคุณสมบัติเฉพาะที่เหมาะสมที่จะเป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์ เนื่องจากไม่รบกวนระบบของพอลิไดแอเซทิลีนและซิงค์ออกไซด์ การเปลี่ยนสีของฟิล์มสามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่าจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงตามปริมาณของแก๊สแอมโมเนีย ศึกษาควบคู่กับการวิเคราะห์เชิงปริมาณด้วยเทคนิคการตรวจวัดที่อาศัยการวิเคราะห์สีจากภาพที่ได้จากสแกนเนอร์และกล้องโทรศัพท์เคลื่อนที่ นอกจากนี้สามารถประยุกต์ใช้ฟิล์มในการตรวจสอบความสดหรือการเน่าเสียของเนื้อสัตว์ ในบทวิจัยนี้ทำการศึกษาวิธีการเตรียมฟิล์มวัสดุผสมพอลิไดแอเซทิลีนและซิงค์ออกไซด์ โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของพอลิไดแอเซทิลีนและซิงค์ออกไซด์ และทำการศึกษาการเปลี่ยนสีของฟิล์มที่เตรียมได้เมื่อได้รับการรบกวนจากสิ่งกระตุ้นภายนอก ได้แก่ อุณหภูมิ แก๊สแอมโมเนีย ฟอรัมาลดีไฮด์ และแอลกอฮอล์ 4 ชนิด คือ เอทานอล เมทานอล ไอโซโพรพานอล อะซิโตน การตรวจสอบการเน่าเสียของเนื้อสัตว์ที่ซื้อจากตลาดสดเปรียบเทียบกับจากซูเปอร์มาร์เก็ต โดยใช้เนื้อไก่และเนื้อหมูเป็นตัวอย่างทดสอบ

4.2 วิธีการทดลองและวิเคราะห์ผล

4.2.1 วัสดุและสารเคมี

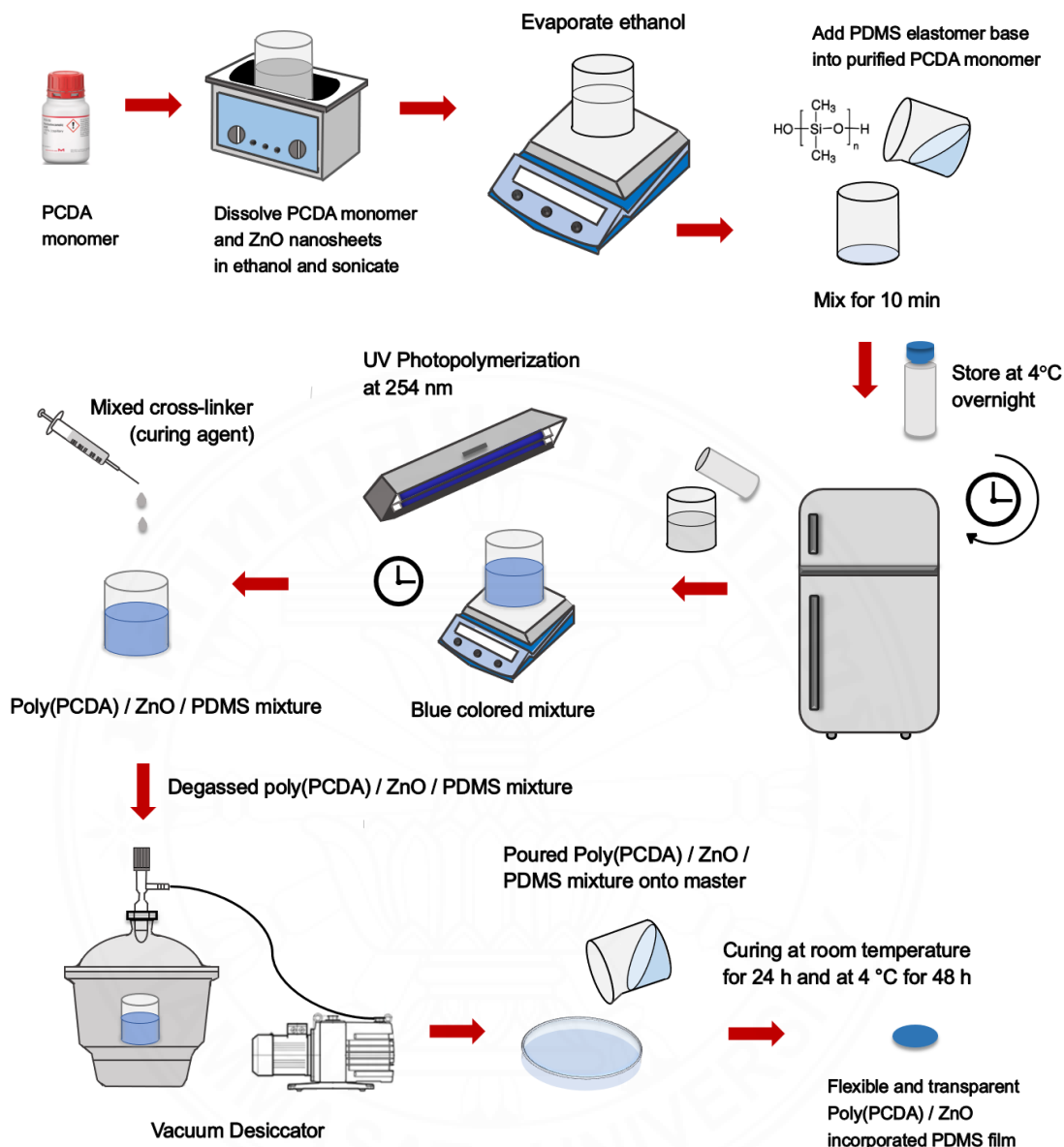
ไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ 10,12-เพนตะโคซะไดออยโนอิกแอซิด (10,12-pentacosadiynoic acid; PCDA) (>97%) แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (25%) และ ฟอรัมาลีนหรือฟอรัมาลดีไฮด์ (37%) ซื้อจากบริษัท Sigma-Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา เอทานอล เมทานอล ไอโซโพรพานอล และอะซิโตน ซื้อจากบริษัท RCI Labscan ประเทศไทย พอลิไดเมทิลไซโลเซน (Polydimethylsiloxane; PDMS) (SYLGARD™ 184) บริษัท Dow Corning ประเทศสหรัฐอเมริกา

4.2.2 การเตรียมฟิล์มวัสดุผสมระหว่างพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงค์ออกไซด์/พอลิไดเมทิลไซโลเซน

การเตรียมฟิล์มวัสดุผสมระหว่างพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงค์ออกไซด์/พอลิไดเมทิลไซโลเซน ในงานวิจัยนี้เตรียมจากวัสดุผสมระหว่างพอลิไดแอเซทิลีนและซิงค์ออกไซด์ ที่มีอัตราส่วนของซิงค์ออกไซด์ที่เหมาะสม โดยใช้พอลิไดเมทิลไซโลเซนหรือซิลิโคน เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์สำหรับ

การขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม การสังเคราะห์โครงสร้างนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ทำโดยเตรียมสารละลายซิงค์อะซิเตต ($\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในน้ำ ปราศจากไอออนปริมาตร 30 มิลลิลิตร ภายใต้การปั่นกวนด้วยเครื่องกวนแบบแม่เหล็ก ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จากนั้นเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ภายใต้การกวน ด้วยเครื่องกวนสารละลายแบบแม่เหล็ก ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จนสารละลายเข้ากัน นำสารผสมที่ได้เทลงในหม้อนึ่งความดัน (Teflon-lined stainless-steel autoclave) และอบที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และนำไปหมุนเหวี่ยงด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยง (centrifuge) รุ่น Z206A บริษัท Hermle ประเทศเยอรมนี ที่ 4000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 10 นาที และล้างด้วย เอทานอลและน้ำปราศจากไอออน นำสารที่ได้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จะได้ผลิตภัณฑ์ซิงค์ออกไซด์ที่เป็นผงละเอียดสีขาว

การเตรียมฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีน และฟิล์มวัสดุผสมระหว่างพอลิไดอะเซทิลีนกับ โครงสร้างนาโนของซิงค์ออกไซด์ โดยใช้ความเข้มข้นของ PCDA ต่อพอลิไดเมทิลไซโลเซนที่อัตราส่วน เป็น 1 : 350 โดยน้ำหนัก และปรับเปลี่ยนปริมาณของซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 5 10 15 และ 20 โดย น้ำหนักของ PCDA ซึ่งมีวิธีการและขั้นตอนการเตรียมแสดงดังภาพที่ 4.1 โดยละลาย PCDA 0.0286 กรัม ในเอทานอลภายใต้การสั่นด้วยเครื่องสั่นที่ใช้คลื่นเสียงความถี่สูง เป็นเวลา 5 นาที และ กรองด้วย แผ่นไนลอนขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร เพื่อกำจัดพอลิเมอร์ส่วนอื่นที่ปนเปื้อนออก หลังจากนั้นผสมซิงค์ออกไซด์ แล้วนำไปสั่นด้วยเครื่องสั่นที่ใช้คลื่นเสียงความถี่สูงที่อุณหภูมิห้อง เป็น เวลา 5 นาที เพื่อให้ซิงค์ออกไซด์เกิดการกระจายตัวที่ดี และระเหยเอทานอลออกด้วย เครื่องให้ความร้อนและปั่นกวน โดยควบคุมอุณหภูมิในช่วง 70 ถึง 75 องศาเซลเซียส จากนั้นผสมพอลิไดเมทิลไซโลเซนซิลิโคนใส (silicone elastomer) 10 กรัม กวนผสมเป็นเวลา 10 นาที และเก็บไว้ที่ อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำสารตัวอย่างมาฉายแสงด้วยเครื่อง ฉายแสงอัลตราไวโอเลต ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ความเข้มแสง 1.5 มิลลิวัตต์ต่อตาราง เซนติเมตร เป็นเวลา 5 นาที และผสมกับ curing agent เพื่อให้พอลิเมอร์แข็งตัว (hardener) ใน อัตราส่วนน้ำหนัก 10 : 1 เมื่อส่วนผสมเข้ากัน ทำการปั๊มด้วยสุญญากาศ (vacuum pump) เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเทสารที่เตรียมได้ลงในแม่แบบกระจกที่มีความลึก 1 มิลลิเมตร ทิ้งไว้ให้แห้งในที่มืด เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตามด้วยเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง สารจะถูกเปลี่ยน จากพอลิเมอร์ในเฟสของเหลวเป็นเฟสของแข็ง ได้ฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีนและฟิล์มวัสดุผสมระหว่าง พอลิไดอะเซทิลีนกับซิงค์ออกไซด์ที่มีสีน้ำเงินที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร และตัดฟิล์มเป็นแผ่นวงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องเจาะรู (hole puncher) สำหรับทดสอบสมบัติของ ฟิล์ม



ภาพที่ 4.1 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีน ซิงค์ออกไซด์ และพอลิไดเมทิลไซโลเซน

4.2.3 การวัดและวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงเซนเซอร์ของ ฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงค์ออกไซด์/พอลิไดเมทิลไซโลเซน

สมบัติทางกายภาพของฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีนและฟิล์มวัสดุผสมระหว่าง พอลิไดอะเซทิลีนกับซิงค์ออกไซด์ ศึกษาโดยวิธีการวัดฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ในโหมดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องรุ่น Nicolet iN10 บริษัท Thermo Scientific ประเทศ สหรัฐอเมริกา



ภาพที่ 4.2 การจัดการทดลองสำหรับการวิเคราะห์ทางสีจากรูปภาพ (ก) ด้วยเครื่องสแกนเนอร์ และ (ข) ด้วยกล้องถ่ายภาพบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ เพื่อศึกษาการตอบสนองการเปลี่ยนสีของฟิล์ม ต่อแก๊สแอมโมเนียและแก๊สทดสอบชนิดต่าง ๆ

การทดสอบการเปลี่ยนสีของฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีนและฟิล์มวัสดุผสมระหว่างพอลิไดอะเซทิลีนกับซิงค์ออกไซด์ต่อแก๊สแอมโมเนีย ศึกษาด้วยระบบวัดแก๊สที่พัฒนาขึ้นในห้องปฏิบัติการ โดยอาศัยหลักการระเหยของของเหลวเป็นแก๊สและแพร่ (molecular diffusion) ไปยังฟิล์ม การทดสอบทำโดยนำฟิล์มที่เตรียมได้ใส่ในห้องตรวจวัด จากนั้นฉีดสารแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เข้าในห้องตรวจวัดซึ่งเป็นระบบปิดมีปริมาตรคงที่ 1000 มิลลิลิตร และตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 240 นาที (เวลาที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างฟิล์มกับแก๊สแอมโมเนีย) จากนั้นนำฟิล์มไปสแกนด้วยเครื่องสแกนเนอร์รุ่น Epson Perfection V600 Photo บริษัท Epson

ประเทศญี่ปุ่น ดังแสดงในภาพที่ 4.2 (ก) พร้อมทั้งถ่ายภาพฟิล์มภายใต้กล้องควบคุมแสงด้วยกล้องถ่ายภาพบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ (ยี่ห้อ iPhone SE) โดยตั้งค่าทางยาวของโฟกัสของเลนส์กล้อง (focus level) 1.8 ค่าสปีดชัตเตอร์ (shutter speed) 1/100 วินาที และค่า ISO ความไวแสง 80 โดยจัดการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4.2 (ข) แล้วทำการวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนสีจากรูปภาพ เพื่อคำนวณหาค่าอัตราส่วนของการเปลี่ยนสีหรือค่าสัญญาณ (Signal) โดยหาค่าความเข้มสีเฉลี่ยของข้อมูลสีจากภาพฟิล์มตัวอย่างที่ได้จากการตัดภาพเฉพาะส่วนที่ต้องการแสดงผลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ร่วมกับการใช้โปรแกรมประมวลผลภาพ MATLAB® software เพื่ออ่านค่าความเข้มสีในระบบ RGB

การศึกษาศมบัติการตอบสนองต่ออุณหภูมิของฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีนและฟิล์มวัสดุผสมระหว่างพอลิไดแอเซทิลีนกับซิงค์ออกไซด์ ด้วยการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีและการผันกลับสีของฟิล์มที่เตรียมได้ เมื่อได้รับความร้อนและเมื่อกลับสู่ภาวะเดิมที่อุณหภูมิห้อง ทดสอบการตอบสนองต่ออุณหภูมิของฟิล์มโดยนำแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้วางลงบนแผ่นฐานกระจกสไลด์และวางในตู้อบลมร้อน (hot air oven) รุ่น ED53 บริษัท Binder ประเทศเยอรมนี ในช่วงอุณหภูมิ 27 ถึง 150 องศาเซลเซียส โดยทิ้งไว้ที่อุณหภูมิที่ต้องการศึกษาเป็นเวลา 10 นาที และทำการวิเคราะห์ทางสีจากรูปภาพด้วยวิธีการที่กล่าวไว้ข้างต้น เพื่อดูความสามารถในการเปลี่ยนสีในแต่ละช่วงอุณหภูมิ นอกจากนี้ฟิล์มที่เย็นตัวลงสู่อุณหภูมิห้องหลังจากได้รับความร้อนในแต่ละช่วงอุณหภูมิจะถูกวิเคราะห์ทางสีจากรูปภาพเช่นกัน เพื่อดูความสามารถในการผันกลับสีสู่อุณหภูมิห้อง

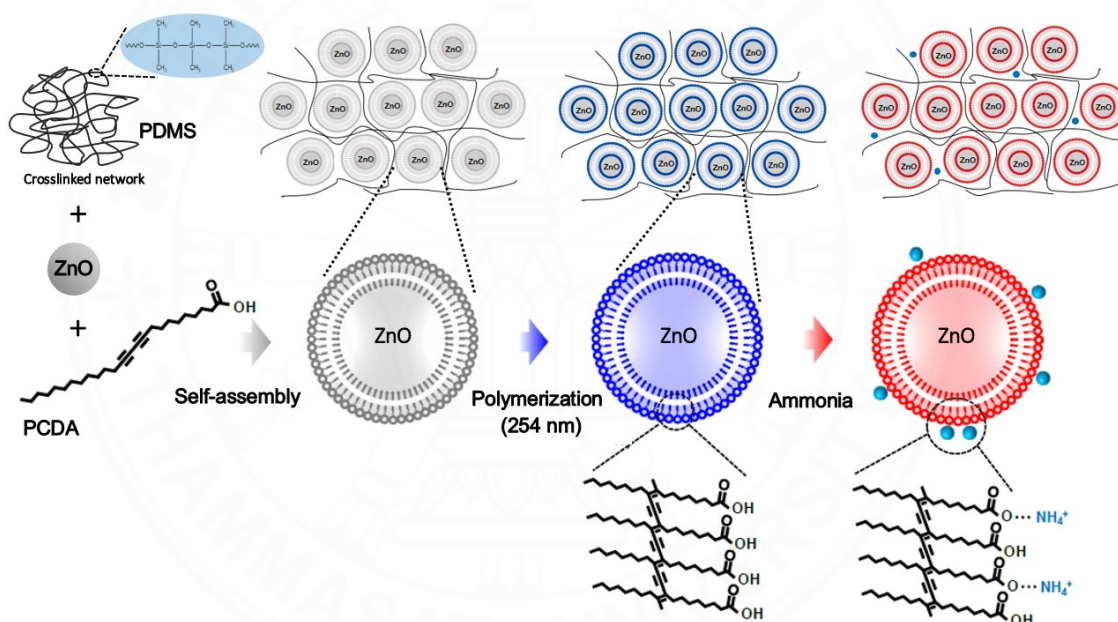
การศึกษาศมบัติการประยุกต์ใช้ฟิล์มเซนเซอร์พอลิไดแอเซทิลีน/ซิงค์ออกไซด์/พอลิไดเมทิลไซโลเซนสำหรับตรวจสอบแก๊สแอมโมเนียที่เกิดจากการเน่าเสียของเนื้อสัตว์ ทำโดยนำเซนเซอร์และเนื้อไก่หรือเนื้อหมูหนัก 40 กรัม เก็บไว้ในขวดแก้วใสปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปิดสนิทและเปรียบเทียบกับขวดแก้วใสที่ไม่มีเนื้อสัตว์อยู่ (กล้องควบคุม) เก็บผลการทดลองการเปลี่ยนสีของฟิล์มเซนเซอร์ ทุก 4 ชั่วโมง เป็นเวลา 72 ชั่วโมง เพื่อวิเคราะห์ผลในการจำแนกระดับการเน่าเสียของเนื้อไก่และเนื้อหมู

4.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.3.1 ผลการเตรียมฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงค์ออกไซด์/พอลิไดเมทิลไซโลเซน

การเตรียมฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน และฟิล์มวัสดุผสมระหว่างพอลิไดแอเซทิลีนกับซิงค์ออกไซด์ โดยใช้พอลิไดเมทิลไซโลเซนเป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์ขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม พบว่าฟิล์มที่

เตรียมได้มีคุณภาพฟิล์มที่ดี มีความเข้ากันได้ของทั้งสองและสามารถประกอบตามลำดับ มีความยืดหยุ่น (flexible) และมีศักยภาพที่เหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นเซนเซอร์ จากการเตรียมฟิล์มที่ปริมาณซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ผลการทดลองพบว่าทุกเงื่อนไขการเตรียม ขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้ดี มีความหนาเท่ากัน 1 มิลลิเมตร และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ฟิล์มมีสีน้ำเงินมากขึ้นเมื่อปริมาณซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้น ฟิล์มวัสดุผสมระหว่างพอลิไดแอเซทิลีนกับซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยปริมาณของซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักสามารถเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงได้เมื่อทดสอบกับแก๊สแอมโมเนียที่มีความเข้มข้น 1000 พีพีเอ็ม สามารถสังเกตการเปลี่ยนสีได้ด้วยตาเปล่าดังแสดงในภาพที่ 4.4 ด้วยการเกิดอันตรกิริยาระหว่างฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงค์ออกไซด์/พอลิไดเมทิลไซโลเซนและแก๊สแอมโมเนียดังภาพที่ 4.3



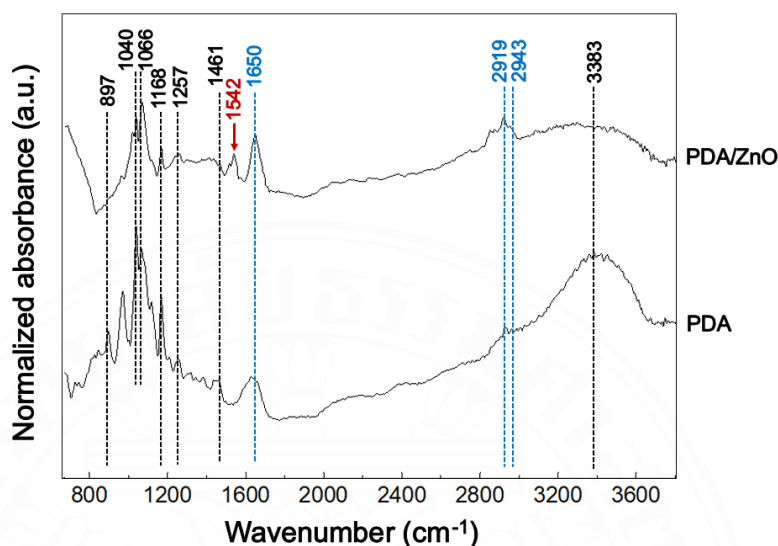
ภาพที่ 4.3 แบบจำลองการเตรียมฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงค์ออกไซด์/พอลิไดเมทิลไซโลเซน และอันตรกิริยาระหว่างฟิล์มและแก๊สแอมโมเนีย (Siribunbandal et al., 2022)



ภาพที่ 4.4 สีของฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงค์ออกไซด์/พอลิไดเมทิลไซโลเซน ก่อนและหลังทดสอบกับแก๊สแอมโมเนีย 1000 พีพีเอ็ม

การตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์ของพอลิไดแอเซทิลีนกับซิงค์ออกไซด์ และศึกษาการเชื่อมโยงยึดเกาะกันหรือมีปฏิสัมพันธ์กัน (Interfacial interaction) ระหว่างโมเลกุลของซิงค์ออกไซด์กับโมเลกุลของพอลิไดแอเซทิลีน และโครงรูปของสายโซ่ในแกนหลัก (backbone conformation) ของวัสดุผสมพอลิไดแอเซทิลีนกับซิงค์ออกไซด์ ด้วยการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค ATR-FTIR จากผลการทดลองพบว่าฟิล์มที่ได้จากพอลิไดแอเซทิลีน และวัสดุผสมระหว่างพอลิไดแอเซทิลีนกับซิงค์ออกไซด์ แสดงดังภาพที่ 4.5 พอลิไดแอเซทิลีนแสดงตำแหน่งการดูดกลืนคลื่นแสงที่สำคัญ ได้แก่ ตำแหน่งเลขคลื่น 2919 และ 2943 ต่อเซนติเมตร (cm^{-1}) แสดงตำแหน่งการสั่นแบบยืดสมมาตร (symmetrical stretching) และ การสั่นแบบยืดไม่สมมาตร (asymmetrical stretching) ของพันธะ C-H ของหมู่ CH_2 ในสายโซ่อัลคิล ตามลำดับ (Kim et al., 2005; Huang, Jiang, and Liu, 2005; Mino, Tamura, and Ogawa, 1991) ตำแหน่งเลขคลื่น 1461 ต่อเซนติเมตร แสดงการสั่นแบบงอ (bending vibration) ของพันธะ C-H ของหมู่ CH_2 ในสายโซ่อัลคิล ซึ่งพันธะระหว่างอะตอมเปลี่ยนตำแหน่งไปจากแกนพันธะเดิม ส่งผลให้มุมพันธะเปลี่ยนแปลง โดยมีลักษณะการสั่นแบบงอในแบบกรรไกร (scissoring) (Wu et al., 2014) และสำหรับตำแหน่งเลขคลื่น 1650 ต่อเซนติเมตร เป็นการสั่นแบบยืด (stretching vibration) ของพันธะ C=O ของหมู่คาร์บอนิล ของพันธะไฮโดรเจนในหมู่คาร์บอกซิล ($-\text{COOH}$) ของบริเวณส่วนหัวของโมเลกุลพอลิไดแอเซทิลีน (Kim et al., 2005; Huang, Jiang, and Liu, 2005) ในขณะที่โครงสร้างของวัสดุผสมระหว่างพอลิไดแอเซทิลีนกับซิงค์ออกไซด์ ปรากฏพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1542 ต่อเซนติเมตร แสดงถึงการสั่นแบบยืดไม่สมมาตรของหมู่คาร์บอกซิเลตไอออน ($-\text{COO}^-$) ในบริเวณส่วนหัวของพอลิไดแอเซทิลีนด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้ากับซิงค์ไอออน (Zn^{2+}) (Wu et al., 2014) เนื่องจากในงานวิจัยที่กล่าวในบทนี้ใช้สารตั้งต้นคือ PCDA มอนอเมอร์ ซึ่งมีความเป็นกรดอ่อน ดังนั้นเมื่อเตรียมวัสดุผสมระหว่างพอลิไดแอเซทิลีนกับซิงค์ออกไซด์ ซึ่งโครงสร้างจุลภาคของอนุภาคเชิงประกอบพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลกับซิงค์ออกไซด์ มีโครงสร้างภายในที่มีลักษณะซ้อนกันเป็นชั้นโดยมีพอลิไดแอเซทิลีนเกาะอยู่บนผิวของซิงค์ออกไซด์ (Traiphol et al., 2011) จะทำให้มีหมู่ Zn-OH_2^+ และ Zn-OH อยู่ที่ผิวของซิงค์ออกไซด์เป็นส่วนมาก ส่งผลให้เกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าที่แข็งแกร่งระหว่างหมู่คาร์บอกซิเลตที่ส่วนหัวกับ Zn-OH_2^+ บริเวณพื้นผิวของซิงค์ออกไซด์ และเกิดพันธะไฮโดรเจนในหมู่คาร์บอกซิล ($-\text{COOH}$) บริเวณส่วนหัวกับ Zn-OH จึงทำให้ PCDA มอนอเมอร์สามารถยึดเกาะบนพื้นผิวของซิงค์ออกไซด์ได้ ซึ่งการศึกษาจากเอกสารงานวิจัยพบว่าผลของซิงค์ไอออน (Zn^{2+}) ที่แทรกอยู่ระหว่างพอลิไดแอเซทิลีนและอันตรกิริยาของซิงค์ออกไซด์ระหว่างผิวหน้าที่มีความแข็งแกร่งนี้ช่วยส่งเสริมการจัดเรียงโมเลกุลของพอลิไดแอเซทิลีนเพื่อให้ได้เป็นโครงสร้างอย่างเป็นระเบียบ (Phonchai et al., 2020; Yimkaew, Traiphol, and Traiphol, 2022; Traiphol et al., 2017) วัสดุผสมระหว่าง

พอลิไดออกไซด์กับซิงค์ออกไซด์จึงมีคุณสมบัติในการตอบสนองการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับสิ่งกระตุ้นในระดับที่แตกต่างออกไปเมื่อเทียบกับพอลิไดออกไซด์



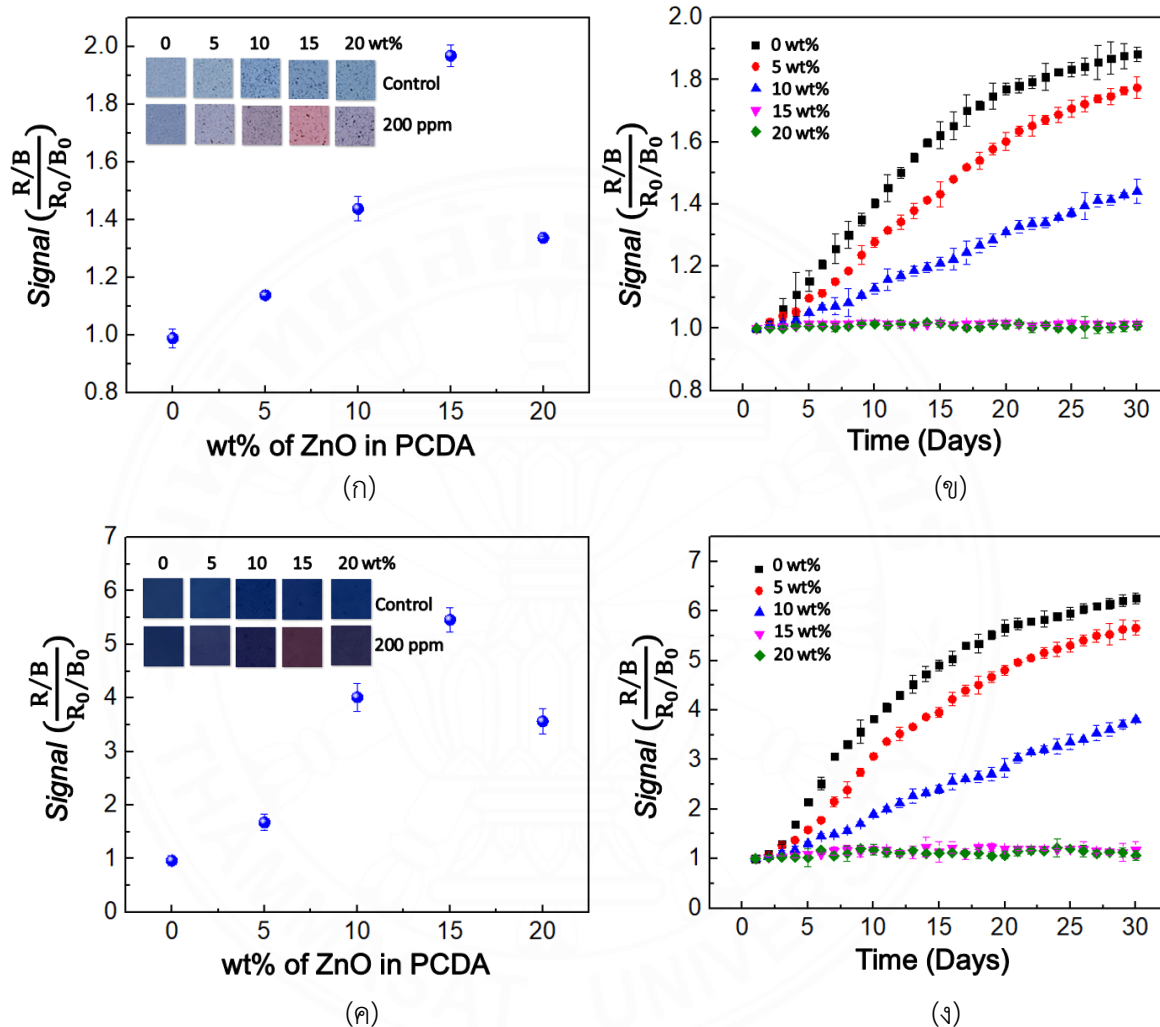
ภาพที่ 4.5 FTIR-ATR ของพอลิไดออกไซด์และวัสดุผสมระหว่างพอลิไดออกไซด์กับซิงค์ออกไซด์

4.3.2 สมบัติเชิงเซนเซอร์ของฟิล์มพอลิไดออกไซด์/ซิงค์ออกไซด์/พอลิไดเมทิลไซโลเซน

การศึกษาความเข้มข้นของฟิล์มวัสดุผสมพอลิไดออกไซด์กับซิงค์ออกไซด์ที่เหมาะสม ทำโดยใช้ปริมาณซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก เพื่อเลือกใช้เป็นฟิล์มเซนเซอร์ตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียที่มีประสิทธิภาพ โดยศึกษาผลการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียความเข้มข้น 200 พีพีเอ็ม ศึกษาการเปลี่ยนสีของฟิล์มที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (30-35 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์อยู่ที่ 55-60 %RH) เป็นเวลา 30 วัน และศึกษาสมบัติการเปลี่ยนสีของฟิล์มเมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ

การศึกษผลการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียความเข้มข้น 200 พีพีเอ็ม ของฟิล์มพอลิไดออกไซด์และฟิล์มวัสดุผสมพอลิไดออกไซด์กับซิงค์ออกไซด์ที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์เป็นร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก พิจารณาจากการเปลี่ยนสีของฟิล์มจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงและค่าอัตราส่วนการเปลี่ยนสีที่วิเคราะห์ด้วยภาพที่ได้จากเครื่องสแกนเนอร์และจากกล้องถ่ายภาพบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ ผลการศึกษานี้พบว่าฟิล์มพอลิไดออกไซด์ยังคงมีสีน้ำเงินเมื่อทดสอบแก๊สแอมโมเนีย ในขณะที่ฟิล์มวัสดุผสมพอลิไดออกไซด์กับซิงค์ออกไซด์ทุกความเข้มข้นมีการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนีย สำหรับฟิล์มวัสดุผสมพอลิไดออกไซด์กับซิงค์ออกไซด์ที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีการเปลี่ยนสีเป็นสีแดงและให้ค่าอัตราส่วนการเปลี่ยนสี

สูงสุด คือ 1.96 ± 0.04 ด้วยการวิเคราะห์ภาพจากสแกนเนอร์ (ภาพที่ 4.6 (ก)) และ 5.46 ± 0.22 ด้วยการวิเคราะห์ภาพจากกล้องโทรศัพท์เคลื่อนที่ (ภาพที่ 4.6 (ค)) ที่ความเข้มข้นแก๊สแอมโมเนีย 200 พีพีเอ็ม



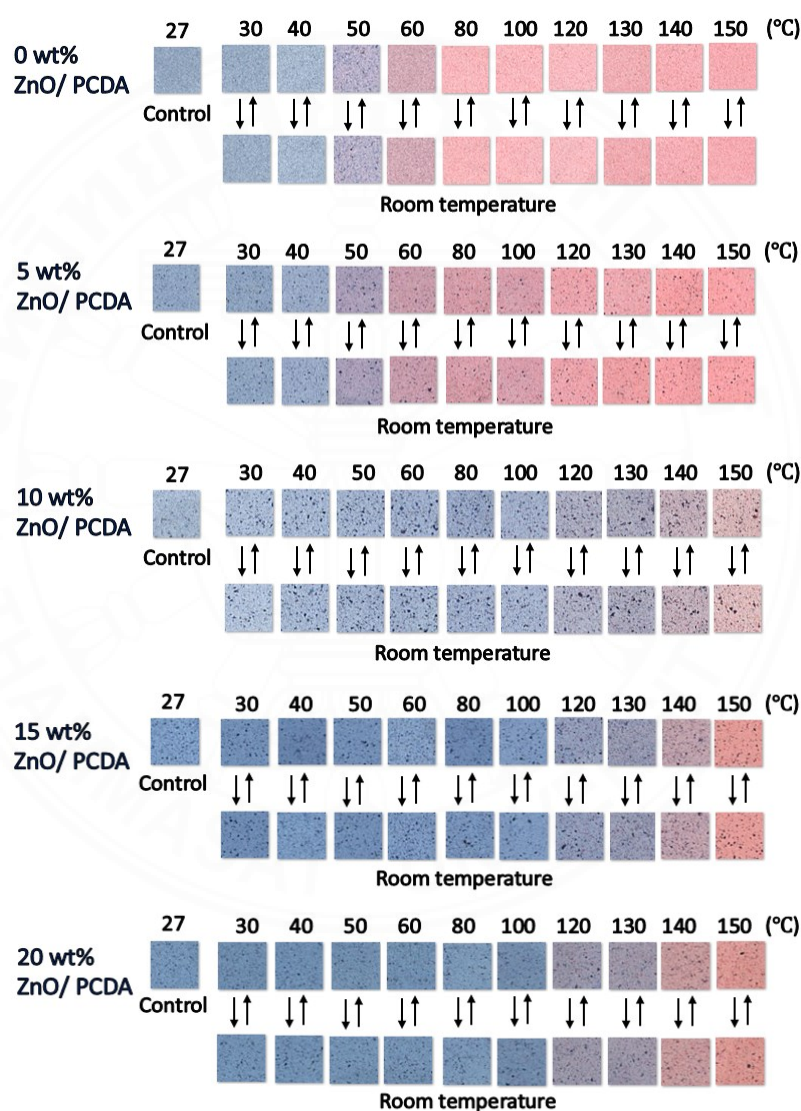
ภาพที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าอัตราส่วนของการเปลี่ยนสีของฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงค์ออกไซด์/พอลิไดเมทิลไซโลเซน (ก) (ค) ที่มีต่อแก๊สแอมโมเนียความเข้มข้น 200 พีพีเอ็ม (ข) (ง) ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องในช่วงเวลา 30 วัน ด้วยภาพที่ได้จากเครื่องสแกนเนอร์ และจากกล้องถ่ายภาพบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ตามลำดับ

การศึกษาการเปลี่ยนสีของฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีนและฟิล์มวัสดุผสมพอลิไดอะเซทิลีนกับซิงค์ออกไซด์ที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยนำหน้าที่เก็บในสภาวะมืดเพื่อควบคุมแสง ภายใต้อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 วัน เมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วน

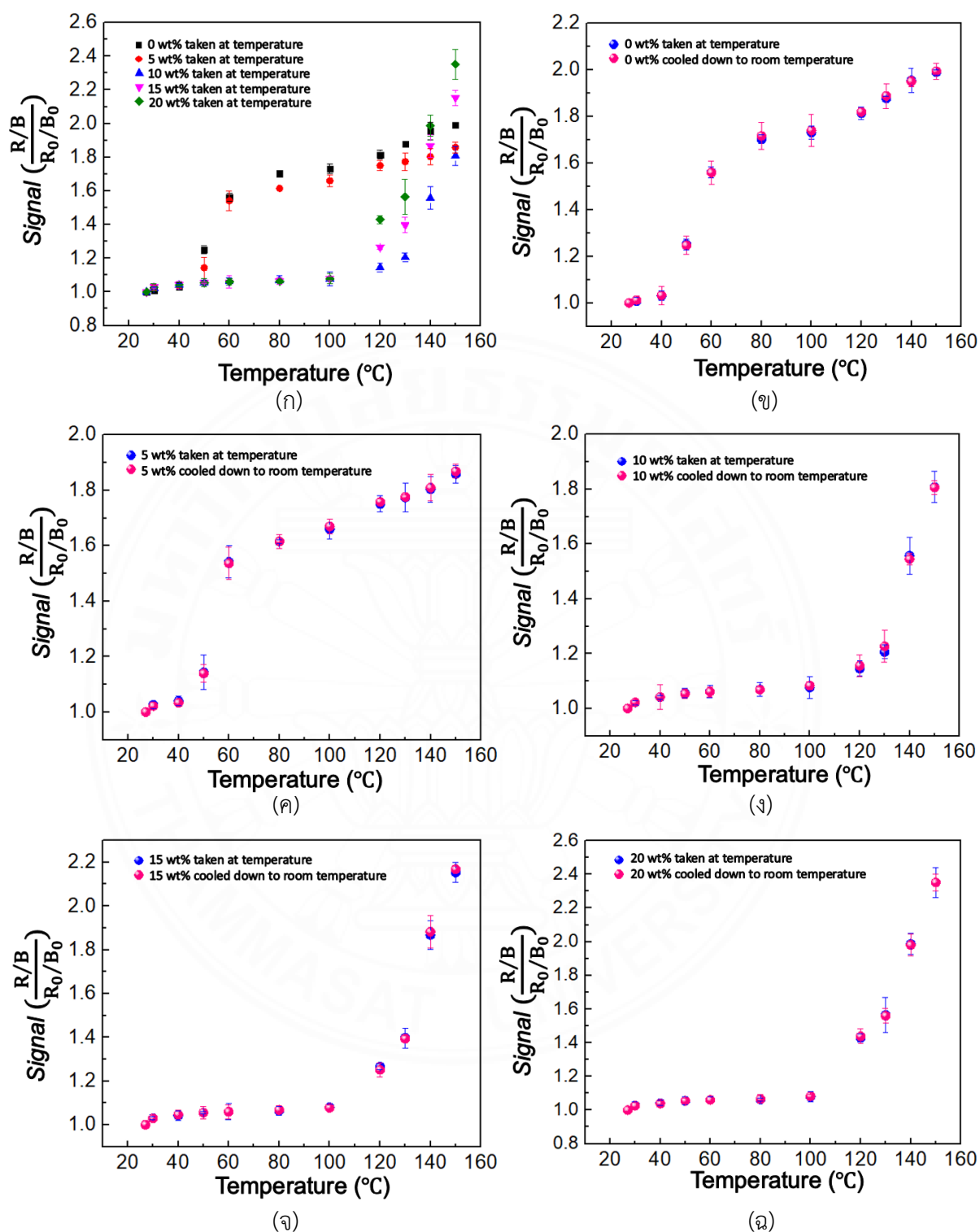
การเปลี่ยนสีในภาพที่ 4.6 (ข) และภาพที่ 4.6 (ง) จะเห็นความแตกต่างของการเปลี่ยนสีระหว่างฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีนกับฟิล์มวัสดุผสมพอลิไดแอเซทิลีนกับซิงค์ออกไซด์อย่างชัดเจน โดยฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีนและฟิล์มวัสดุผสมที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้ผลการทดลองคล้ายคลึงกัน ฟิล์มมีการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงด้วยอัตราส่วนของการเปลี่ยนสีเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเพิ่มขึ้นไปอยู่ที่ค่าสูงสุดที่ 1.88 ± 0.02 และ 6.25 ± 0.11 ตามลำดับเมื่อเวลาผ่านไป 30 วัน โดยฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีนมีค่าอัตราส่วนการเปลี่ยนสีมากกว่าเล็กน้อยซึ่งค่าอัตราส่วนการเปลี่ยนสีแตกต่างกันประมาณ 0.11 และ 0.60 ตามลำดับ ในขณะที่ฟิล์มวัสดุผสมที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะค่อย ๆ เกิดการเปลี่ยนสีเป็นสีม่วงไปด้วยอัตราค่อนข้างคงที่ และค่าอัตราส่วนการเปลี่ยนสีเพิ่มขึ้นไปอยู่ที่ค่า 1.44 ± 0.04 และ 3.81 ± 0.04 เมื่อเวลาผ่านไป 30 วัน ตามลำดับ แต่ในกรณีของฟิล์มวัสดุผสมที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าไม่เกิดการเปลี่ยนสีของฟิล์ม ค่าอัตราส่วนการเปลี่ยนสีไม่เปลี่ยนแปลงคงที่อยู่ที่ประมาณ 1 แสดงให้เห็นว่าฟิล์มวัสดุผสมที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สามารถเก็บที่อุณหภูมิห้องได้อย่างน้อย 30 วัน

เมื่อนำฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีนและฟิล์มวัสดุผสมระหว่างพอลิไดแอเซทิลีนกับซิงค์ออกไซด์ที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก มาทำการศึกษาสมบัติการเปลี่ยนสีภายใต้อุณหภูมิควบคุม พบว่าในสภาวะปกติฟิล์มมีสีน้ำเงิน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิโดยการอบฟิล์มตั้งแต่อุณหภูมิ 27 ถึง 150 องศาเซลเซียส พบว่าฟิล์มมีการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดง แสดงภาพฟิล์มจากเครื่องสแกนเนอร์และจากกล้องถ่ายภาพบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ในภาพที่ 4.7 และ ภาพที่ 4.9 ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าอัตราส่วนของการเปลี่ยนสีของฟิล์มกับอุณหภูมิ พบว่า ผลการทดลองสอดคล้องกันดังแสดงในภาพที่ 4.8 และ ภาพที่ 4.10 คือ ฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีนเริ่มมีการเปลี่ยนสีเป็นสีม่วงที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส แสดงการเปลี่ยนสีของฟิล์มได้อย่างชัดเจน และเปลี่ยนเป็นสีแดงที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ในขณะที่ฟิล์มวัสดุผสมพอลิไดแอเซทิลีนกับซิงค์ออกไซด์ที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์เป็น 5, 10, 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าฟิล์มเริ่มมีการเปลี่ยนเป็นสีม่วงที่อุณหภูมิ 50, 120, 120 และ 120 องศาเซลเซียส ตามลำดับ การที่ฟิล์มวัสดุผสมพอลิไดแอเซทิลีนกับซิงค์ออกไซด์เปลี่ยนสีที่อุณหภูมิสูงมากกว่าฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีนสามารถอธิบายได้ว่าปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่มีมากกว่า จะทำให้มีพื้นที่ผิวให้โมเลกุล PCDA เข้ามายึดเกาะและเกิดการเรียงตัวเป็นระเบียบได้มากกว่า จึงต้องใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีนเพื่อทำให้เกิดการทำลายพันธะไฮโดรเจนและเกิดการเปลี่ยนสีขึ้น ผลการทดลองไปในทางเดียวกันกับค่าอัตราส่วนการเปลี่ยนสีของฟิล์ม นอกจากนี้ยังพบว่าการเปลี่ยนสีที่เกิดขึ้นนั้นเป็นการเปลี่ยนสีแบบไม่ผันกลับเมื่อฟิล์มเย็นตัวลงถึงอุณหภูมิห้อง เนื่องจากหมู่

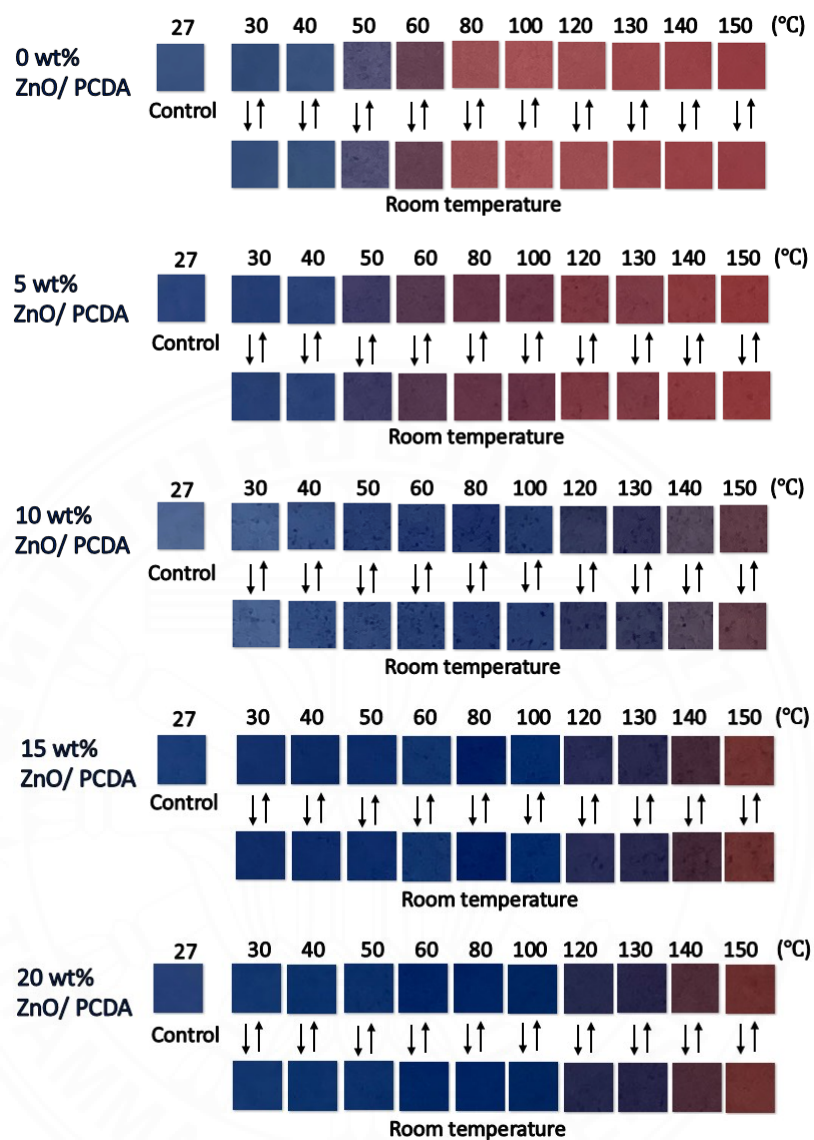
คาร์บอกซิลิกดิ่งดูดด้วยแรงยึดเหนี่ยวชนิดอ่อน พันธะไฮโดรเจนจึงไม่แข็งแรง เมื่อได้รับความร้อน พันธะจึงแตกออกและไม่สามารถกลับมาเชื่อมพันธะได้อีกครั้ง จึงไม่สามารถผันกลับไปเป็นสีน้ำเงินได้ ดังนั้นจึงเลือกวัสดุผสมระหว่างพอลิไดแอเซทิลีนกับซิงค์ออกไซด์ในระบบฟิล์มที่อยู่ในตัวกลาง พอลิไดเมทิลไซโลเซนที่ปริมาณซิงค์ออกไซด์เป็น 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมในการทดลองขั้นต่อไป สำหรับการใช้เป็นเซนเซอร์ตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียในงานวิจัยบทนี้



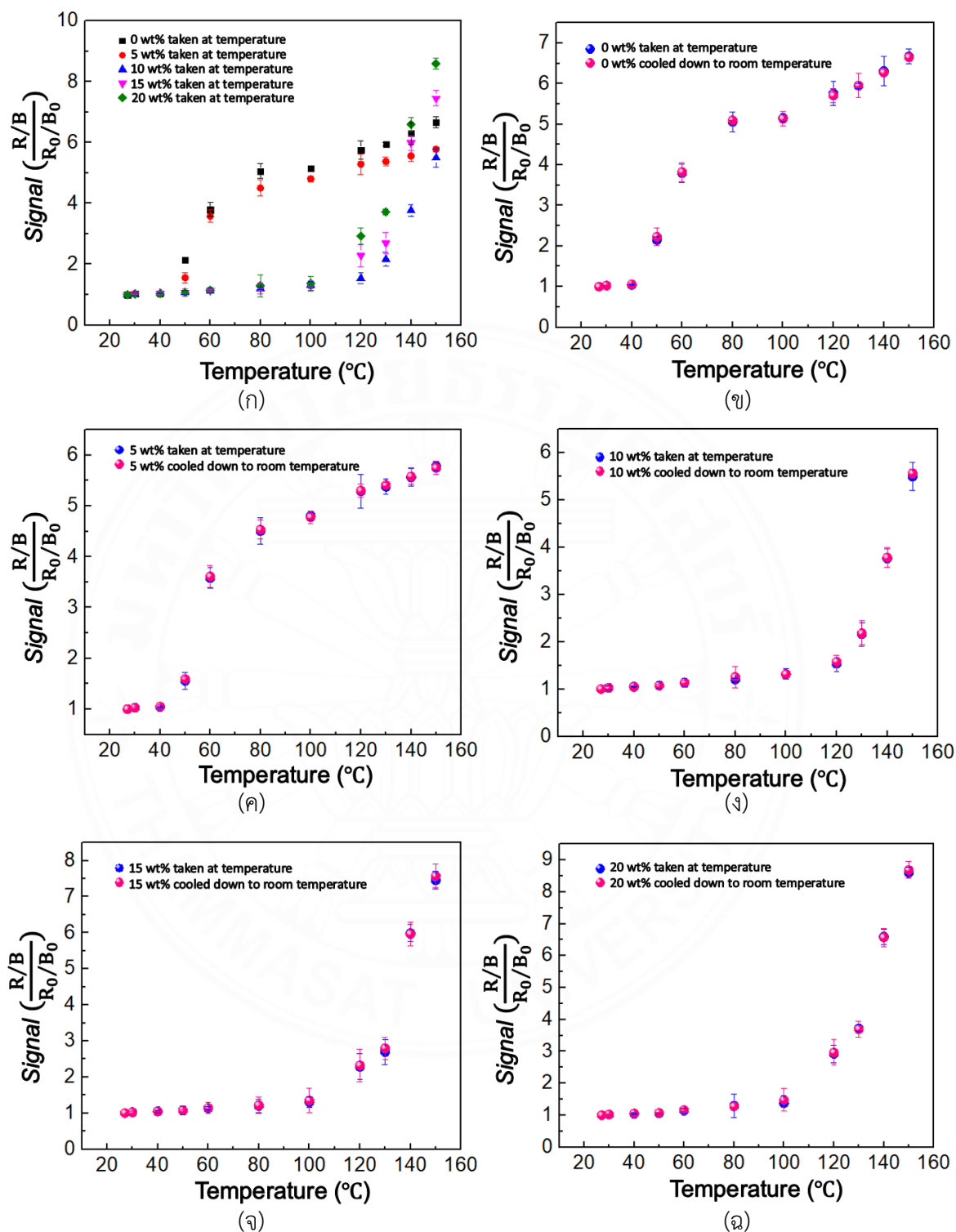
ภาพที่ 4.7 การเปลี่ยนสีของฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงค์ออกไซด์/พอลิไดเมทิลไซโลเซนที่ได้จาก เครื่องสแกนเนอร์เมื่อผ่านการให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 27 ถึง 150 องศาเซลเซียส และเมื่อกลับสู่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส



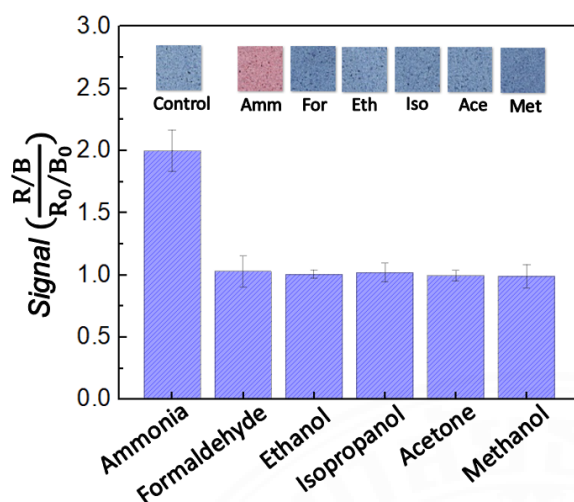
ภาพที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าอัตราส่วนของการเปลี่ยนสีของฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงค์ออกไซด์/พอลิไดเมทิลไซโลเซนด้วยภาพที่ได้จากเครื่องสแกนเนอร์ (ก) เมื่อได้รับความร้อน (ข)-(ง) เมื่อได้รับความร้อนและเมื่อกลับสู่อุณหภูมิห้องของฟิล์มที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 0, 5, 10, 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ



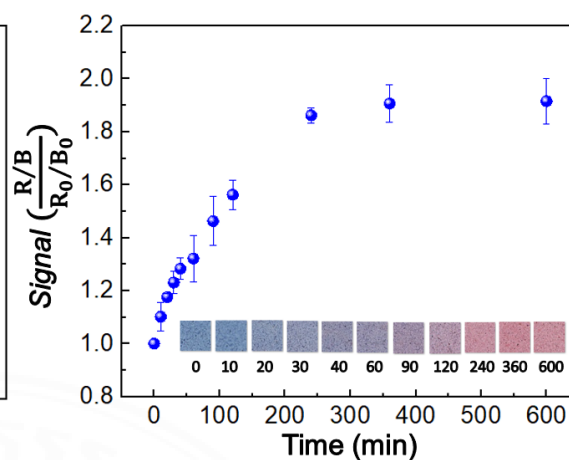
ภาพที่ 4.9 การเปลี่ยนสีของฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงค์ออกไซด์/พอลิไดเมทิลไซโลเซนที่ได้จากกล้องถ่ายภาพบนโทรศัพท์เคลื่อนที่เมื่อผ่านการให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 27 ถึง 150 องศาเซลเซียส และเมื่อกลับสู่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส



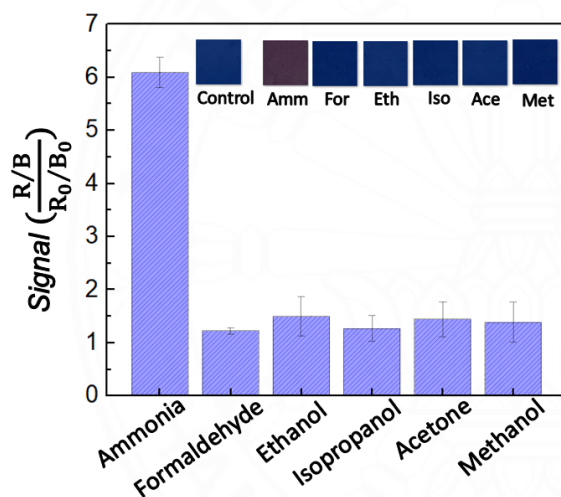
ภาพที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าอัตราส่วนของการเปลี่ยนสีของฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงค์ออกไซด์/พอลิไดเมทิลไซโลเซนด้วยภาพที่ได้จากกล้องถ่ายภาพนอร์คัพที่เคลื่อนที่ (ก) เมื่อได้รับความร้อน (ข)-(ฉ) เมื่อได้รับความร้อนและเมื่อกลับสู่อุณหภูมิห้องของฟิล์มที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 0, 5, 10, 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ



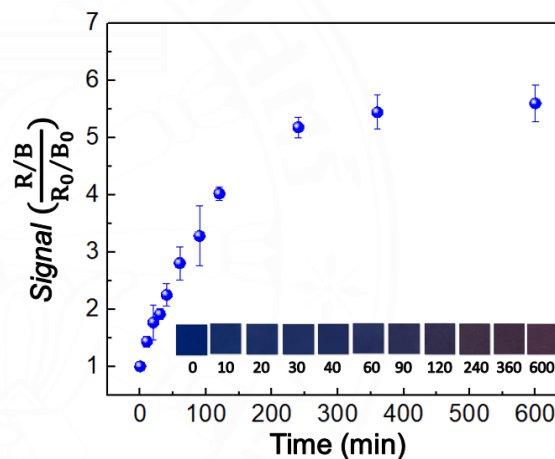
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

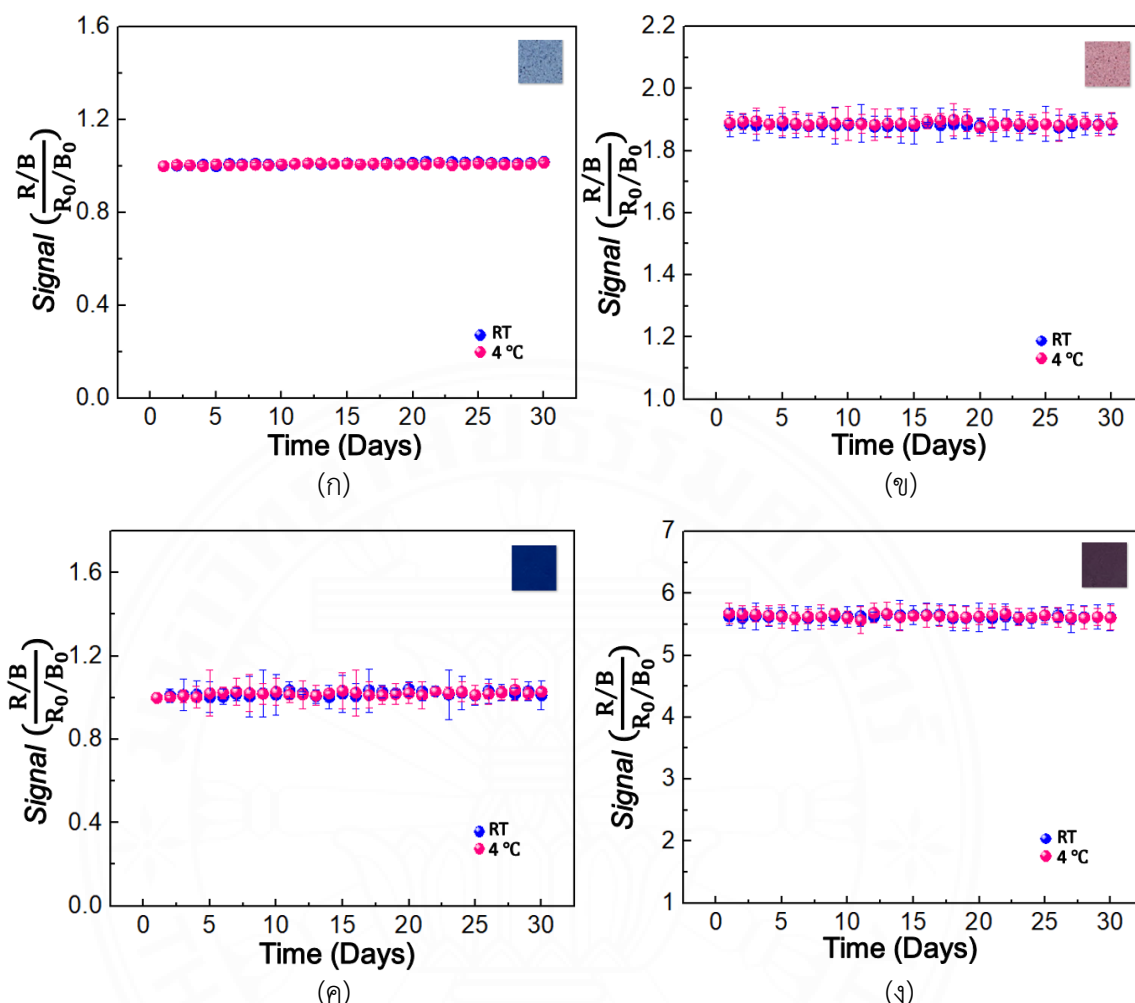
ภาพที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าอัตราส่วนการเปลี่ยนสีของฟิล์มวัสดุผสมพอลิไดแอเซทิลีนกับซิงค์ออกไซด์ที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (ก) (ค) ที่มีต่อแก๊สชนิดต่าง ๆ (ข) (ง) ที่มีต่อแก๊สแอมโมเนีย ตอบสนองที่เวลาต่าง ๆ ด้วยภาพที่ได้จากเครื่องสแกนเนอร์ และจากกล้องถ่ายภาพบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ตามลำดับ

การศึกษาสมบัติความจำเพาะเจาะจงในการตรวจวัดหรือการเลือกตอบสนองต่อชนิดแก๊สของฟิล์มวัสดุผสมพอลิไดแอเซทิลีนกับซิงค์ออกไซด์ที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยตรวจวัดแก๊สต่าง ๆ ได้แก่ แก๊สแอมโมเนีย ฟอรัลดีไฮด์ เอทานอล เมทานอล ไอโซโพรพานอล และอะซิโตน ที่ความเข้มข้น 200 พีพีเอ็ม จากการศึกษาการเปลี่ยนสีโดยสังเกตการเปลี่ยนสีด้วยตาเปล่า และค่าอัตราส่วนการเปลี่ยนสีที่วิเคราะห์ด้วยภาพที่ได้จากเครื่องสแกนเนอร์

และจากกล้องถ่ายภาพบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ แสดงดังภาพที่ 4.11 (ก) และภาพที่ 4.11 (ค) ตามลำดับ ผลการศึกษานี้พบว่าฟิล์มมีผลการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียสูงสุดเมื่อเทียบกับสารทดสอบชนิดอื่น ๆ มีค่าอัตราส่วนการเปลี่ยนสีเท่ากับ 1.99 ± 0.17 และ 6.08 ± 0.28 ตามลำดับ ดังนั้นฟิล์มวัสดุผสมพอลิไดแอเซทิลีนกับซิงค์ออกไซด์ที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีความจำเพาะต่อการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียสูง

การศึกษาเวลาในการตอบสนองการเปลี่ยนสีของฟิล์มวัสดุผสมพอลิไดแอเซทิลีนกับซิงค์ออกไซด์ที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ต่อแก๊สแอมโมเนียความเข้มข้น 200 พีพีเอ็ม เมื่อพิจารณากราฟอัตราส่วนการเปลี่ยนสีที่ระยะเวลาต่าง ๆ ในภาพที่ 4.11 (ข) และภาพที่ 4.11 (ง) พบว่าค่าอัตราส่วนการเปลี่ยนสีเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมากในช่วงเวลา 0 ถึง 240 นาที โดยเพิ่มขึ้นถึง 1.86 ± 0.03 และ 5.18 ± 0.18 ตามลำดับ หลังจากนั้นค่าอัตราส่วนการเปลี่ยนสีจะเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงสุดที่ 1.91 ± 0.08 และ 5.60 ± 0.32 ตามลำดับ เมื่อเวลา 600 นาที ดังนั้นการศึกษานี้จึงเลือกระยะเวลาที่ 240 นาที เป็นเวลาที่เหมาะสมและถือว่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ในการตรวจวัดการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีสำหรับฟิล์มเซนเซอร์กับแก๊สแอมโมเนีย (ทั้งในระบบการวิเคราะห์ด้วยภาพจากสแกนเนอร์และระบบการวิเคราะห์ด้วยภาพจากกล้องโทรศัพท์เคลื่อนที่)

การศึกษาอายุการใช้งาน และเสถียรภาพในการตอบสนองการเปลี่ยนสีต่อแก๊สแอมโมเนียของฟิล์มวัสดุผสมพอลิไดแอเซทิลีนกับซิงค์ออกไซด์ที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทดสอบโดยศึกษาการเปลี่ยนสีของฟิล์มที่เก็บในสภาวะมืด ภายใต้อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ทุก ๆ วัน เป็นเวลา 30 วัน แสดงดังภาพที่ 4.12 (ก) และภาพที่ 4.12 (ค) และศึกษาการเปลี่ยนสีของฟิล์มดังกล่าวต่อแก๊สแอมโมเนียความเข้มข้น 200 พีพีเอ็ม ภายใต้การตรวจวัดที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ทุก ๆ วัน เป็นเวลา 30 วัน แสดงดังภาพที่ 4.12 (ข) และภาพที่ 4.12 (ง) ผลการทดลองแสดงถึงฟิล์มมีอายุการใช้งานยาวนานสามารถเก็บได้อย่างน้อย 30 วัน และฟิล์มมีเสถียรภาพในการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียที่ดี

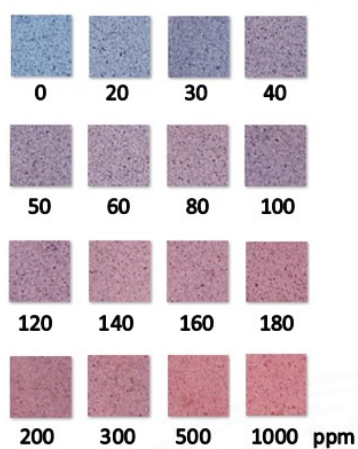


ภาพที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าอัตราส่วนการเปลี่ยนสีของฟิล์มวัสดุผสมพอลิไดแอเซทิลีนกับ ซิงค์ออกไซด์ที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (ก) (ค) ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลา 30 วัน (ข) (ง) ที่มีต่อแก๊สแอมโมเนีย ด้วยภาพที่ได้จากเครื่องสแกนเนอร์และกล้องถ่ายภาพบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ตามลำดับ

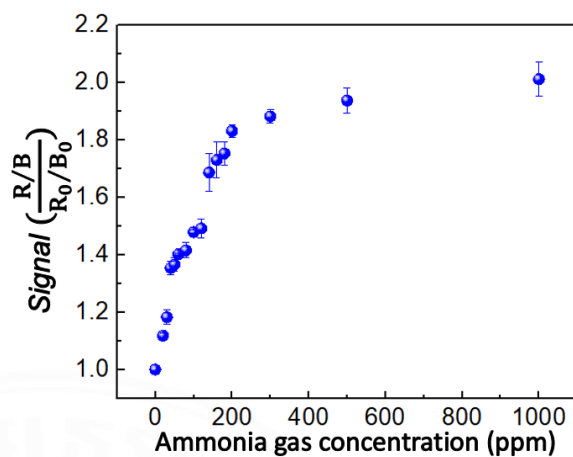
การศึกษาการเปลี่ยนสีด้วยตาเปล่าและวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยใช้การวิเคราะห์ทางสีด้วยภาพที่ได้จากเครื่องสแกนเนอร์และจากกล้องถ่ายภาพบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ ของฟิล์มวัสดุผสมพอลิไดแอเซทิลีนกับซิงค์ออกไซด์ที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแก๊สแอมโมเนีย ซึ่งศึกษาที่ความเข้มข้นของแก๊สแอมโมเนียในช่วง 20 ถึง 1000 พีพีเอ็ม พบว่าการเปลี่ยนสีของฟิล์มเป็นกระบวนการผันกลับไม่ได้ และเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงิน เป็น สีม่วง และสีแดง ตามความเข้มข้นของแก๊สแอมโมเนียที่เพิ่มขึ้น และสามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงสีได้ด้วยตาเปล่า โดยความเข้มข้นต่ำสุดของแก๊สแอมโมเนียที่สามารถสังเกตเห็นด้วยตาเปล่าคือ

40 พีพีเอ็ม เมื่อพิจารณากราฟอัตราส่วนการเปลี่ยนสีของฟิล์มที่ความเข้มข้นของแก๊สแอมโมเนีย ในช่วง 20 ถึง 1000 พีพีเอ็ม ดังภาพที่ 4.13 (ข) และภาพที่ 4.14 (ข) พบว่าฟิล์มมีค่าอัตราส่วนการเปลี่ยนสีเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของแก๊สแอมโมเนีย สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์มด้วย ภาพจากสแกนเนอร์และจากกล้องโทรศัพท์เคลื่อนที่ดังแสดงในภาพที่ 4.13 (ก) และภาพที่ 4.14 (ก) ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของแก๊สแอมโมเนีย 40 พีพีเอ็ม ฟิล์มมีค่าอัตราส่วนของการเปลี่ยนสีอยู่ที่ 1.35 ± 0.02 และ 4.31 ± 0.05 และเมื่อความเข้มข้นแก๊สแอมโมเนียสูงขึ้นเป็น 1000 พีพีเอ็ม ค่าอัตราส่วนการเปลี่ยนสีเพิ่มขึ้นไปอยู่ที่ค่าสูงสุดที่ 2.01 ± 0.06 และ 6.59 ± 0.21 ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าฟิล์มสามารถตรวจวัดและแยกความแตกต่างของแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ได้ นอกจากนี้เมื่อนำค่าอัตราส่วนการเปลี่ยนสีจากเทคนิคการวิเคราะห์ภาพด้วยสแกนเนอร์เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากเทคนิคการวิเคราะห์ภาพด้วยกล้องถ่ายภาพบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ พบว่าการวิเคราะห์ทางสีโดยใช้ภาพจากกล้องถ่ายภาพบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ร่วมกับโปรแกรมประมวลผลภาพมีประสิทธิภาพเทียบเคียงกับการใช้ภาพจากเครื่องสแกนเนอร์มีข้อดีคือ สามารถใช้งานได้ง่าย สะดวกต่อการพกพา และให้ค่าที่แม่นยำในการตรวจวัด

อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างฟิล์มวัสดุผสมพอลิไดแอเซทิลีนกับซิงค์ออกไซด์กับแก๊สแอมโมเนียทำให้ฟิล์มเกิดการเปลี่ยนสี โดยการเติมซิงค์ออกไซด์ช่วยเพิ่มความไวในการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนีย เมื่อระบบถูกรบกวนด้วยแก๊สแอมโมเนียจะทำให้เกิดการแตกตัวของซิงค์ออกไซด์ ส่งผลให้เกิดการทำลายแรงผลักแบบสเตอริก (steric force) ระหว่างไอออนที่มีประจุลบของคาร์บอกซิเลตไอออน ($-\text{COO}^-$) บริเวณส่วนหัวของพอลิไดแอเซทิลีนและไอออนที่มีประจุบวกของซิงค์ออกไซด์ (Weston, Kuchel, and Chandrawati, 2021) ผลคือประจุที่พื้นผิวของซิงค์ออกไซด์เปลี่ยนไปส่งผลต่อการจัดเรียงตัวของพอลิไดแอเซทิลีนบนโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ และการแตกตัวของหมู่คาร์บอกซิลิกที่ส่วนหัวของพอลิไดแอเซทิลีนเนื่องจากพันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่างส่วนหัวของพอลิไดแอเซทิลีนเกิดการแตกออก จึงไปทำลายความเป็นระเบียบของโซ่ข้างและสายโซ่หลัก และเกิดแรงผลักระหว่างคาร์บอกซิเลตไอออน ($-\text{COO}^-$) ที่อยู่ติดกันอีกด้วย จึงทำให้เกิดความไม่เป็นระเบียบของโซ่ข้าง ส่งผลให้การจัดเรียงตัวอย่างเป็นระนาบของสายโซ่หลักที่มีโครงสร้างเป็นพันธะคู่สลับพันธะเดี่ยวแบบต่อเนื่องลดน้อยลง และระยะคอนจูเกตของสายโซ่หลักลดลง ส่งผลต่อสถานะของอิเล็กทรอนิกส์จึงทำให้ฟิล์มเกิดการเปลี่ยนสีขึ้น เมื่อได้รับการรบกวนด้วยแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้นเหมาะสม



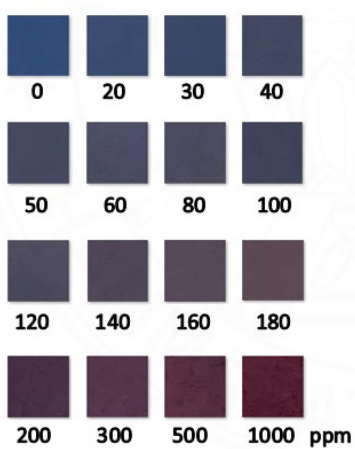
(ก)



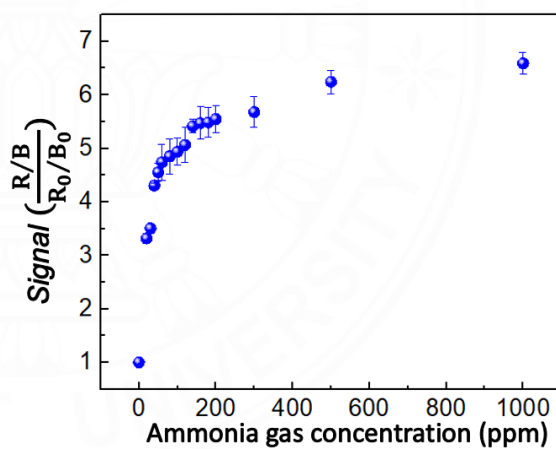
(ข)

ภาพที่ 4.13 การตอบสนองการเปลี่ยนสีของฟิล์มวัสดุผสมพอลิไดแอเซทิลีนกับซิงค์ออกไซด์ ที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ต่อแก๊สแอมโมเนียความเข้มข้นต่าง ๆ

(ก) ภาพการเปลี่ยนสีของฟิล์มจากเครื่องสแกนเนอร์ (ข) ค่าอัตราส่วนการเปลี่ยนสี



(ก)



(ข)

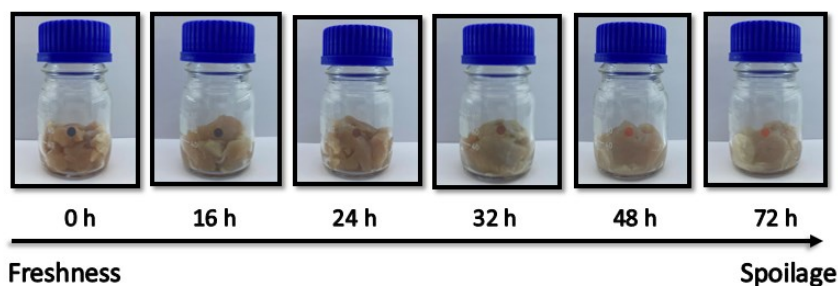
ภาพที่ 4.14 การตอบสนองการเปลี่ยนสีของฟิล์มวัสดุผสมพอลิไดแอเซทิลีนกับซิงค์ออกไซด์ ที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ต่อแก๊สแอมโมเนียความเข้มข้นต่าง ๆ

(ก) ภาพการเปลี่ยนสีของฟิล์มจากกล้องโทรศัพท์เคลื่อนที่ (ข) ค่าอัตราส่วนการเปลี่ยนสี

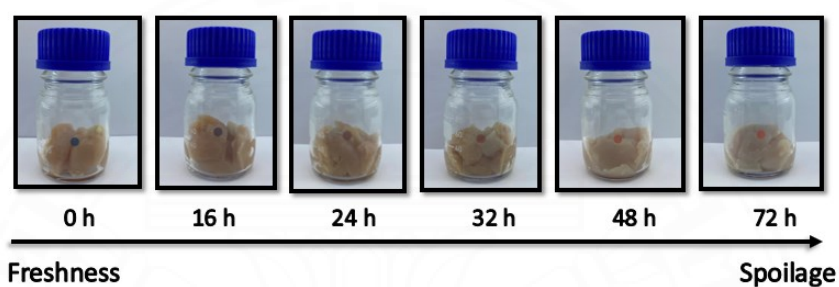
4.3.3 การประยุกต์ใช้งานฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงค์ออกไซด์/พอลิไดเมทิลไซโลเซน

ผลการประยุกต์ใช้งานฟิล์มวัสดุผสมระหว่างพอลิไดแอเซทิลีนกับซิงค์ออกไซด์ที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นฟิล์มเซนเซอร์ตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียที่จุลินทรีย์สร้างขึ้นจากการเน่าเสียของเนื้อไก่และเนื้อหมูตัวอย่าง พบว่าจากการทดลองเป็นเวลา 72 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง ฟิล์มเซนเซอร์ภายในภาชนะระบบปิดที่มีเนื้อไก่ตัวอย่างและเนื้อหมูตัวอย่าง ทั้งจากซูเปอร์มาร์เก็ตและจากตลาดสด มีการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงอย่างชัดเจนที่สังเกตได้ด้วยตาเปล่า ตามปริมาณแอมโมเนียที่เพิ่มมากขึ้นตามระดับการเน่าเสียของเนื้อไก่และเนื้อหมูตัวอย่าง ดังแสดงในภาพที่ 4.15 ในขณะที่ฟิล์มในกล่องควบคุมไม่มีการเปลี่ยนแปลงสี และสามารถยืนยันผลพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของฟิล์มเซนเซอร์ในทางปริมาณเพื่อเพิ่มความแม่นยำและถูกต้องในการวิเคราะห์มากขึ้นด้วยการคำนวณค่าอัตราส่วนการเปลี่ยนสีเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์และจำแนก ระดับการเน่าเสียของเนื้อไก่และเนื้อหมูตัวอย่าง เมื่อเนื้อไก่เริ่มมีการเน่าเสียเกิดขึ้นฟิล์มเซนเซอร์จะตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียที่ปลดปล่อยออกมาจากเนื้อไก่ ทำให้ค่าอัตราส่วนของการเปลี่ยนสีจากการวิเคราะห์ทางสีโดยการใช้ภาพจากเครื่องสแกนเนอร์และจากกล้องถ่ายภาพบนโทรศัพท์เคลื่อนที่จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามการเน่าเสีย ดังแสดงในภาพที่ 4.16 นอกจากนี้ผลจากการวิเคราะห์ ค่าอัตราส่วนของการเปลี่ยนสีเพื่อจำแนกกลุ่มตามระดับการเน่าเสียของเนื้อไก่สามารถแบ่งได้เป็น 3 ระดับคือ ปกติ เน่าเสียเล็กน้อยถึงปานกลาง และเน่าเสียอย่างมาก และการวิเคราะห์สีของฟิล์มเซนเซอร์พบว่าเมื่อเนื้อไก่มีลักษณะปกติฟิล์มมีสีน้ำเงิน เมื่อเนื้อไก่เริ่มมีการเน่าเสียเกิดขึ้นฟิล์มมีสีม่วง และเมื่อเนื้อไก่เน่าเสียมากฟิล์มมีสีแดง ค่าอัตราส่วนของการเปลี่ยนสีที่ทดสอบกับเนื้อไก่จากตลาดสดและเนื้อไก่จากซูเปอร์มาร์เก็ตมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน นอกจากนี้ค่าอัตราส่วนของการเปลี่ยนสีมีการเปลี่ยนแปลงเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนจากสถานะปกติที่เวลาผ่านไป 12 ชั่วโมง และเวลาผ่านไปประมาณ 20 ชั่วโมง ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงเนื้อไก่จากตลาดสดและเนื้อไก่จากซูเปอร์มาร์เก็ตที่นำมาใช้ในการทดลองเริ่มมีการเน่าเสียเกิดขึ้นที่เวลาดังกล่าว อีกทั้งเมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนสีของฟิล์มเซนเซอร์ที่ทดสอบเนื้อไก่จากตลาดสดและซูเปอร์มาร์เก็ตพบว่าค่าอัตราส่วนการเปลี่ยนสีของตัวอย่างเนื้อไก่จากตลาดสด 40 กรัม มีค่า 1.26 ± 0.05 และ 3.31 ± 0.25 เมื่อเวลาผ่านไป 12 ชั่วโมง และ มีค่าเพิ่มขึ้นถึง 2.46 ± 0.07 และ 9.79 ± 0.36 เมื่อเวลาผ่านไป 44 ชั่วโมง ในขณะที่ค่าอัตราส่วนการเปลี่ยนสีของตัวอย่างเนื้อไก่จากซูเปอร์มาร์เก็ต 40 กรัม มีค่า 1.11 ± 0.06 และ 1.46 ± 0.39 เมื่อเวลาผ่านไป 12 ชั่วโมง และมีค่าเพิ่มขึ้นถึง 2.06 ± 0.06 และ 7.62 ± 0.53 เมื่อเวลาผ่านไป 44 ชั่วโมง บ่งบอกถึงเนื้อไก่จากตลาดสดมีการเน่าเสียได้เร็วกว่าเนื้อไก่จากซูเปอร์มาร์เก็ต

Chicken (supermarket)

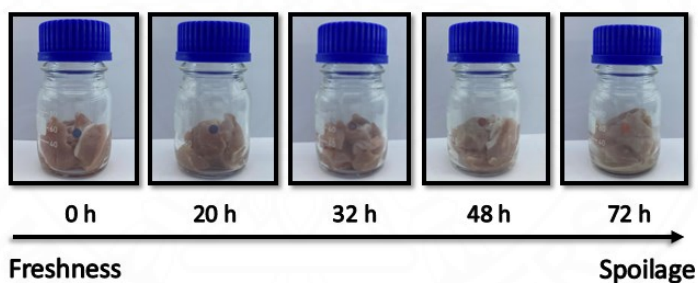


Chicken (market)

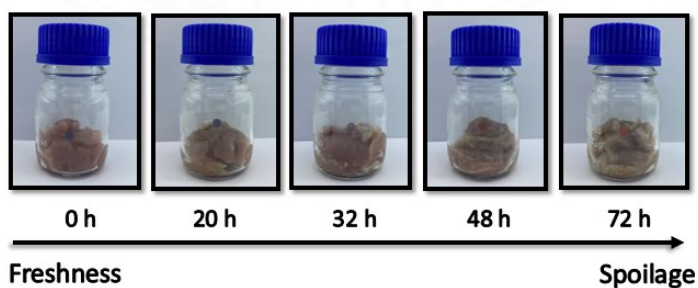


(ก)

Pork (supermarket)

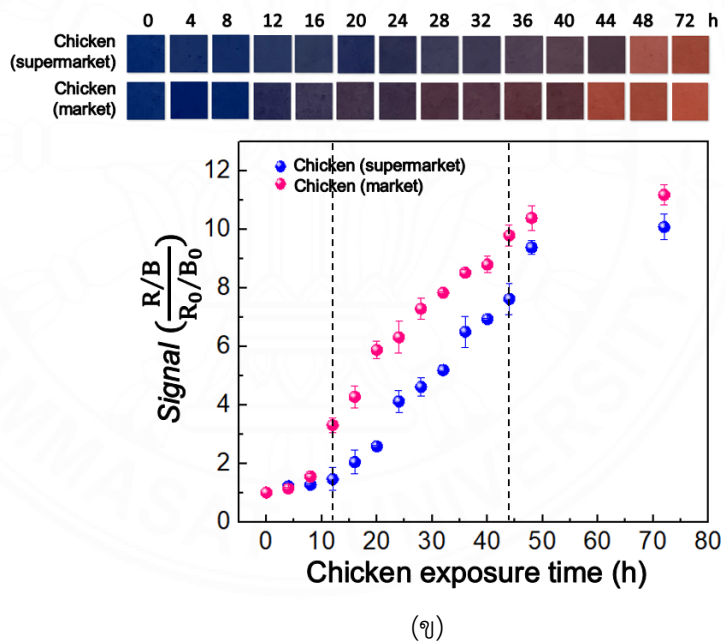
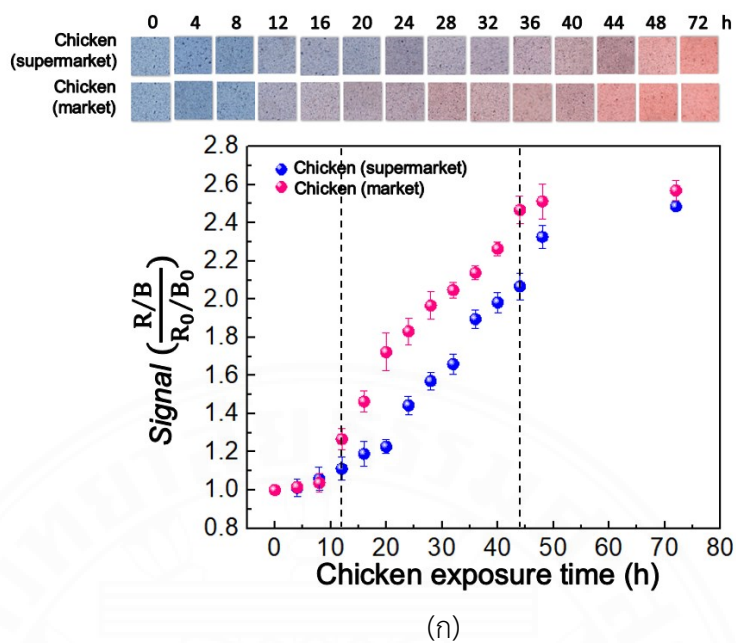


Pork (market)

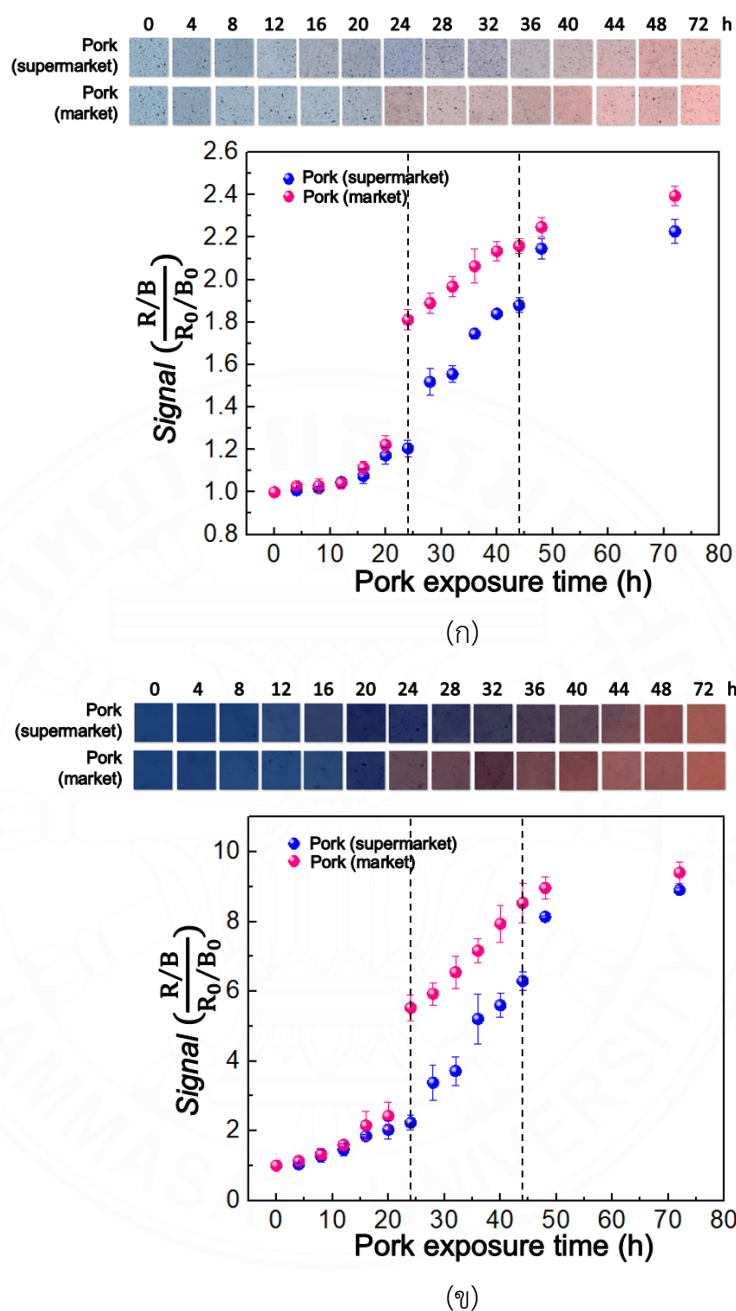


(ข)

ภาพที่ 4.15 การตอบสนองการเปลี่ยนสีของฟิล์มเซนเซอร์ที่มีต่อ (ก) ตัวอย่างเนื้อไก่
(ข) ตัวอย่างเนื้อหมูจากซูเปอร์มาร์เก็ตและตลาดสดภายในภาชนะปิดสนิท
ระหว่างการเก็บที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าอัตราส่วนการเปลี่ยนสีของฟิล์มเซนเซอร์ที่มีต่อตัวอย่างเนื้อไก่ด้วยภาพที่ได้จาก (ก) เครื่องสแกนเนอร์ และ (ข) กล้องโทรศัพท์เคลื่อนที่



ภาพที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าอัตราส่วนการเปลี่ยนสีของฟิล์มเซนเซอร์ที่มีต่อตัวอย่างเนื้อหมูด้วยภาพที่ได้จาก (ก) เครื่องสแกนเนอร์ และ (ข) กล้องโทรศัพท์เคลื่อนที่

พิจารณาพฤติกรรมการเปลี่ยนสีของฟิล์มเซนเซอร์และกราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าอัตราส่วนการเปลี่ยนสีของฟิล์มเซนเซอร์ที่มีต่อตัวอย่างเนื้อหมูดังแสดงในภาพที่ 4.17 พบว่าฟิล์มเซนเซอร์สามารถใช้ออกความสดใหม่ของเนื้อหมูได้ แบ่งระดับของการเน่าเสียได้เป็น 3 ระดับคือ

ปกติ เน่าเสียเล็กน้อยถึงปานกลาง และเน่าเสียอย่างมาก โดยค่าอัตราส่วนของการเปลี่ยนสีจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามการเน่าเสีย เมื่อวิเคราะห์สีของฟิล์มเซนเซอร์พบว่าเมื่อเนื้อหมูมีลักษณะปกติ ฟิล์มมีสีน้ำเงิน เมื่อเนื้อหมูเริ่มมีการเน่าเสียเกิดขึ้นฟิล์มมีสีม่วง และเมื่อเนื้อหมูเน่าเสียมาก ฟิล์มมีสีม่วงอมแดง แต่อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนสีของฟิล์มจากสีม่วงเป็นสีม่วงอมแดงจะไม่เด่นชัดมาก เริ่มตรวจพบการเน่าเสียของตัวอย่างเนื้อหมูจากตลาดสดเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง และเกิดการเน่าเสียอย่างรุนแรงเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 44 ชั่วโมง ในขณะที่ตัวอย่างเนื้อหมูจากซูเปอร์มาร์เก็ตเกิดการเน่าเสียช้ากว่าตัวอย่างเนื้อหมูจากตลาดสด โดยผลการทดลองมีความสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของเนื้อหมูที่ระยะเวลาเดียวกัน ซึ่งผลจากการศึกษานี้สามารถสรุปได้ว่าฟิล์มเซนเซอร์สามารถที่จะจำแนกความเน่าเสียของเนื้อไก่และเนื้อหมูได้ว่าอยู่ในระดับใด โดยระยะเวลาในการเน่าเสียของเนื้อไก่และเนื้อหมูจะมีไม่เท่ากัน เนื้อไก่มีการเน่าเสียได้ง่ายกว่าเนื้อหมู

4.4 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาการเตรียมฟิล์มวัสดุผสมระหว่างพอลิไดแอเซทิลีนและซิงค์ออกไซด์ที่อยู่ในตัวกลางพอลิไดเมทิลไซโลเซน โดยปรับเปลี่ยนปริมาณของซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ของ PCDA เพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิไดแอเซทิลีนและควบคุมการเปลี่ยนสีให้มีประสิทธิภาพสำหรับใช้งานเป็นเซนเซอร์ตรวจวัดแก๊สแอมโมเนีย จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงเซนเซอร์ของฟิล์มวัสดุผสมพอลิไดแอเซทิลีนและซิงค์ออกไซด์ พบว่าฟิล์มวัสดุผสมระหว่างพอลิไดแอเซทิลีนกับซิงค์ออกไซด์ที่ปริมาณซิงค์ออกไซด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีความเหมาะสมสำหรับการเตรียมเซนเซอร์แบบแผ่นฟิล์ม เนื่องจากให้ผลการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียสูงที่สุดเมื่อเทียบกับอัตราส่วนผสมอื่น รวมทั้งฟิล์มไม่มีการเปลี่ยนสีจากเดิมยังคงเป็นสีน้ำเงิน เมื่อเวลาผ่านไป 30 วัน ภายใต้การเก็บรักษาในที่มืดที่อุณหภูมิห้อง และจากการศึกษาการเปลี่ยนสีเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในช่วง 27 ถึง 150 องศาเซลเซียส พบว่าฟิล์มเริ่มเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส และเป็นการเปลี่ยนสีแบบผันกลับไม่ได้ ดังนั้นจึงเป็นคุณสมบัติที่ดีในการนำมาใช้เป็นเซนเซอร์ตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียในสภาวะแวดล้อมโดยทั่วไป นอกจากนี้พบว่าฟิล์มเซนเซอร์ที่เตรียมได้มีความจำเพาะต่อการเลือกตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียได้ดีมากกว่าแก๊สทดสอบชนิดอื่น และมีระยะเวลาในการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนีย 240 นาที เมื่อทดสอบเสถียรภาพของเซนเซอร์โดยการศึกษาระยะเวลาการใช้งานและอายุการเก็บรักษาของฟิล์ม พบว่าฟิล์มสามารถใช้งานได้มากกว่า 30 วัน ภายใต้การเก็บรักษาในที่มืดและอุณหภูมิห้อง ผลการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียยังคงมีค่าอัตราส่วนการเปลี่ยนสีคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 30 วัน แสดงให้เห็นว่าฟิล์มมีเสถียรภาพในการตรวจวัดแก๊ส

แอมโมเนียที่ดี ผลการตอบสนองการเปลี่ยนสีของฟิล์มวัสดุผสมพอลิไดอะเซทิลีนและซิงค์ออกไซด์ต่อแก๊สแอมโมเนียในช่วง 20 ถึง 1000 พีพีเอ็ม พบว่าฟิล์มเซนเซอร์มีการเปลี่ยนแปลงสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงตามความเข้มข้นของแก๊สแอมโมเนียที่เพิ่มขึ้น โดยความเข้มข้นต่ำสุดของแก๊สแอมโมเนียที่สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนสีด้วยตาเปล่าคือ 40 พีพีเอ็ม การวิเคราะห์เชิงปริมาณแสดงด้วยค่าอัตราส่วนการเปลี่ยนสี โดยใช้การวิเคราะห์ทางสีด้วยภาพที่ได้จากเครื่องสแกนเนอร์และจากกล้องถ่ายภาพบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการถ่ายภาพทั้ง 2 กรณี พบว่ามีแนวโน้มใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ฟิล์มเซนเซอร์สามารถเปลี่ยนสีตามระดับการเน่าเสียของเนื้อไก่และเนื้อหมูเพื่อบอกสถานะของเนื้อไก่และเนื้อหมูได้ แบ่งเป็น 3 ระดับคือ ปกติ เริ่มมีกลิ่นเล็กน้อยถึงปานกลาง และเน่าเสีย การวิจัยในบทวิจัยนี้เป็นก้าวสำคัญในการพัฒนาเซนเซอร์ที่สามารถบ่งบอกระดับการเน่าเสียของเนื้อไก่และเนื้อหมูได้โดยวัดการเปลี่ยนสี ซึ่งผลการตรวจวัดของฟิล์มเซนเซอร์สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าอย่างชัดเจน

บทที่ 5

เซนเซอร์ตรวจวัดสารละลายฟอร์มาลินที่เตรียมจากวัสดุผสมระหว่างพอลิไดแอเซทิลีน พอลิไดแอเซทิลีนที่มีหมู่ไทออลและซิงค์ออกไซด์ในรูปสารละลาย

5.1 บทนำ

ฟอร์มาลินหรือสารละลายของฟอร์มาลดีไฮด์เป็นของเหลวไม่มีสี มีกลิ่นฉุน เป็นสารอันตราย ปัจจุบันมีการนำสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการแพทย์ ด้านอุตสาหกรรม ด้านความงาม และด้านการเกษตร ทำให้เกิดการสะสมและเจือปนอยู่ในสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้มีการใช้ฟอร์มาลินในอาหารโดยเฉพาะเนื้อสัตว์ ผัก และอาหารทะเล เพื่อรักษาอาหารให้คงสภาพไม่เน่าเสีย อย่างไรก็ตาม การได้รับสารฟอร์มาลินเข้าสู่ร่างกายเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดมะเร็ง (International Agency for Research on Cancer, 2012) ดังนั้นการตรวจวัดการปนเปื้อนของฟอร์มาลินจึงมีความสำคัญสำหรับการป้องกันและควบคุมการใช้สารฟอร์มาลิน การพัฒนาชุดตรวจวัดฟอร์มาลินจึงได้รับความสนใจในกลุ่มนักวิจัยสำหรับการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์หาปริมาณโดยวิธีที่สะดวก มีความไวในการตรวจวัด มีศักยภาพตรวจวิเคราะห์ในเวลาจริง (real-time) และตรวจวิเคราะห์ภาคสนามได้ (on-site)

วิธีการตรวจวัดปริมาณฟอร์มาลินในตัวอย่างโดยวิธีมาตรฐานมีหลายวิธี เช่น เทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (high-performance liquid chromatography) (Hu, Wang, and Li, 2015; Azzam, Makahleh, and Saad, 2021) เทคนิคฟลูออโรเมทรี (fluorometry) (Belman, 1963; Zhan et al., 2000) และเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า (electrochemistry) (Chan and Xie, 1997; Korpan et al., 2000; Katakya et al., 2002) เป็นต้น ซึ่งเทคนิคดังกล่าว มีความถูกต้องและแม่นยำในการวิเคราะห์สูง แต่จำเป็นต้องใช้เครื่องมือราคาแพง ทำการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการโดยผู้เชี่ยวชาญ ไม่เหมาะกับการนำไปใช้งานในภาคสนาม ปัจจุบันมีการพัฒนาระบบตรวจวัดฟอร์มาลินโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงสี โดยการทำปฏิกิริยาระหว่างฟอร์มาลินกับสารเคมีที่จำเพาะ เกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์ที่มีสี ด้วยการใช้วิธีแบบแนช (Nash method) (Nash, 1953) และวิธี 4-อะมิโน ไฮดราซีน-5-เมอร์แคปโต-1,2,4-ไตรอาโซล (4-amino hydrazine-5-mercapto-1,2,4-triazole; AHMT) (Kawamura et al., 2005) แล้ววิเคราะห์สีของสารละลายในเชิงปริมาณโดยใช้เทคนิคสเปกโตรโฟโตเมทรี (spectrophotometry) แต่วิธีดังกล่าวมีความยุ่งยาก ซับซ้อน สารมีราคาแพง มีข้อจำกัดในด้านความไวของการวัด และอาจถูกรบกวนด้วยอัลติไฮด์อื่น

ดังนั้นวิธีการตรวจวัดที่น่าสนใจคือการใช้โมเลกุลเซนเซอร์ที่สามารถเปลี่ยนสีที่สังเกตเห็นด้วยตาเปล่า เนื่องจากสามารถตรวจวัดได้โดยง่าย สะดวก และราคาไม่แพง

พอลิไดแอเซทิลีนเป็นสารที่มีสมบัติเปลี่ยนสีได้เมื่อได้รับการรบกวนจากสิ่งกระตุ้นภายนอกต่าง ๆ สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนสีได้ด้วยตาเปล่า โดยเมื่อได้รับการรบกวนจากภายนอก จะเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดง จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษา การปรับเปลี่ยนชนิดของมอนอเมอร์ที่มีความยาวสายโซ่แอลคิลที่แตกต่างกัน การปรับเปลี่ยนชนิดของมอนอเมอร์ที่มีส่วนหัวแตกต่างกัน การปรับเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีของโซ่ข้างของพอลิไดแอเซทิลีน (van den Heuvel, Löwik, and van Hest, 2010; Tachibana et al., 1999) และการเติมอนุภาคนาโนของโลหะออกไซด์ให้เกิดเป็นวัสดุผสมขึ้น เป็นต้น เพื่อพัฒนาสมบัติของพอลิไดแอเซทิลีนให้มีความสามารถในการตอบสนองต่อสิ่งแวดล้อมที่เข้ามากระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนสีในระดับที่แตกต่างออกไป เช่น เกิดการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิหรือค่าความเป็นกรด-เบสที่สูงขึ้นหรือต่ำลง หรือตอบสนองต่อปริมาณตัวทำละลายแตกต่างไปจากเดิม โดยส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสายโซ่หลักที่มีโครงสร้างเป็นพันธะคู่สลับพันธะเดี่ยวแบบต่อเนื่อง จึงทำให้สถานะของอิเล็กทรอนิกส์และการดูดกลืนแสงเกิดการเปลี่ยนแปลง

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการศึกษาออกแบบเซนเซอร์ระดับโมเลกุลสำหรับตรวจสอบฟอร์มาลินด้วยการเปลี่ยนสีของวัสดุผสมระหว่างพอลิไดแอเซทิลีน พอลิไดแอเซทิลีนที่มีหมู่ไทออล และซิงค์ออกไซด์ในรูปสารละลายสำหรับประยุกต์ใช้ตรวจวัดฟอร์มาลินที่สามารถสังเกตสีได้ด้วยตาเปล่าจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงตามความเข้มข้นของฟอร์มาลิน การเตรียมวัสดุผสมเวสิเคิลประกอบด้วยซิงค์ออกไซด์และมอนอเมอร์ที่เป็นสารตั้งต้น 2 ชนิด คือ 10,12-เพนตะโคเซไดอายโนอิกแอซิดเป็นไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ และสังเคราะห์อนุพันธ์ของไดแอเซทิลีนที่มีหมู่ไทออลเพื่อทำการเปลี่ยนจากหมู่ส่วนหัวที่เป็นคาร์บอกซิลิกใน PCDA ให้เป็นหมู่ไทออลใน PCDA-SH ส่งผลให้เกิดอันตรกิริยากับฟอร์มาลินที่บริเวณผิวหน้าของเวสิเคิล โดยซิงค์ออกไซด์ในวัสดุผสมทำหน้าที่เป็นซับสเตรตให้โมเลกุลของ PCDA และ PCDA-SH ยึดเกาะและจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบและเป็นระนาบเดียวกัน ทำให้เกิดความแตกต่างของความหนาแน่นอิเล็กทรอนิกส์ระหว่างบริเวณของส่วนหัวกับบริเวณของโซ่ข้างที่ประกอบด้วยหมู่แอลคิลมากขึ้น ในบทวิจัยนี้ทำการศึกษาวิธีการเตรียมสารละลายวัสดุผสมพอลิไดแอเซทิลีน/พอลิไดแอเซทิลีนที่มีหมู่ฟังก์ชันนัลไทออล/ซิงค์ออกไซด์ โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของ PCDA-SH และซิงค์ออกไซด์ให้เหมาะสม มีความจำเพาะเจาะจงในการตรวจวัดฟอร์มาลินทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ศึกษาการเปลี่ยนสีของวัสดุผสมที่เตรียมได้เมื่อได้รับการรบกวนจากสิ่งกระตุ้นภายนอก ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-เบส การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์เป็นเซนเซอร์ตรวจวัดสารละลายฟอร์มาลินได้

5.2 วิธีการทดลอง

5.2.1 วัสดุและสารเคมี

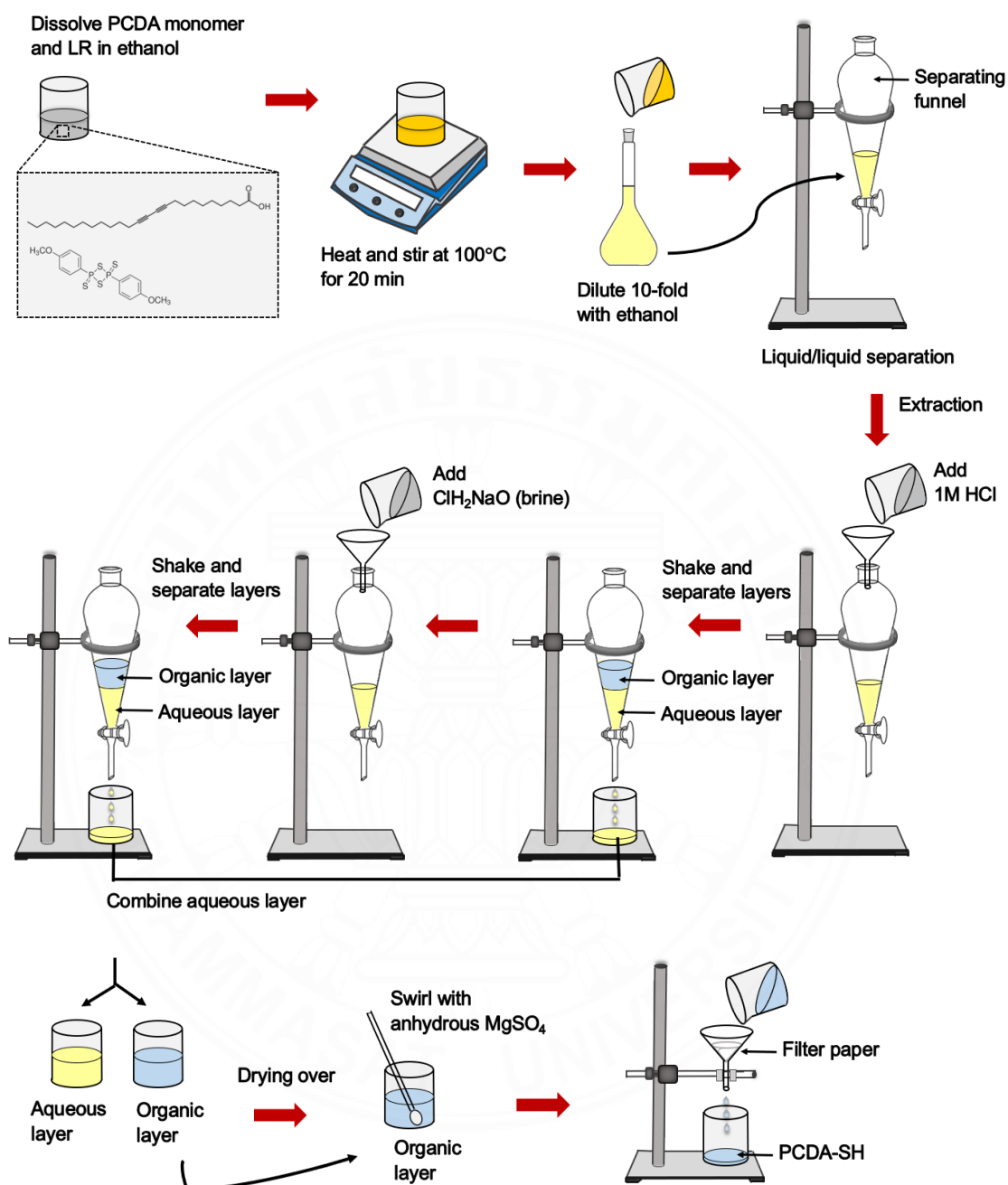
ไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ 10,12-เพนตะโคเซไดออยโนอิกแอซิด (10,12-pentacosadiynoic acid; PCDA) (>97%) รีเอเจนต์ของลอร์วัสสัน (Lawesson's reagent; LR) (97%) แมกนีเซียมซัลเฟตแอนไฮดรัส (99.5%) โซเดียมคลอไรด์หรือน้ำเกลือเข้มข้น (Brine) แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (25%) และ พอร์มาลีนหรือพอร์มาลดีไฮด์ (37%) ซื้อจากบริษัท Sigma-Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา กรดไฮโดรคลอริก (37%) ซื้อจากบริษัท Merck ประเทศเยอรมนี เอทานอล เมทานอล ไอโซโพรพานอล และอะซิโตน บริษัท RCI Labscan ประเทศไทย

5.2.2 การเตรียมสารละลายพอลิไดแอเซทิลีน/พอลิไดแอเซทิลีนที่มีหมู่ฟังก์ชันนัลไทออล/ซิงค์ออกไซด์

การเตรียมสารละลายพอลิไดแอเซทิลีน/พอลิไดแอเซทิลีนที่มีหมู่ฟังก์ชันนัลไทออล/ซิงค์ออกไซด์ (PDA/PDA-SH/ZnO) เตรียมจากวัสดุผสมระหว่างพอลิไดแอเซทิลีนพอลิไดแอเซทิลีนที่มีหมู่ฟังก์ชันนัลไทออล และซิงค์ออกไซด์ ที่มีความเข้มข้นของพอลิไดแอเซทิลีนที่มีหมู่ฟังก์ชันนัลไทออลและซิงค์ออกไซด์ที่เหมาะสม สำหรับขั้นตอนการสังเคราะห์โครงสร้างนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล มีวิธีการและขั้นตอนดังกล่าวในหัวข้อ 4.2.2 ซึ่งได้ลงสีขาวของซิงค์ออกไซด์ การสังเคราะห์อนุพันธ์ของไดแอเซทิลีนที่มีหมู่ไทออล (PCDA-SH) มีวิธีการและขั้นตอนการเตรียมแสดงดังภาพที่ 5.1 เริ่มจากผสม PCDA 0.23 กรัม กับรีเอเจนต์ของลอร์วัสสัน 0.13 กรัม ละลายในเอทานอลปริมาตร 30 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นนำสารที่ได้ไปเจือจางให้มีความเข้มข้นลดลงสิบเท่า (ten-fold dilution) ด้วยเอทานอล นำสารที่เตรียมได้เทลงกรวยแยก (separating funnel) เพื่อการสกัดแยก (extraction) ชั้นตัวทำละลายอินทรีย์ (organic layer) ออกจากชั้นน้ำ (aqueous layer) โดยใช้กรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ลงไปในกรวยแยกเพื่อเป็นตัวทำละลายในการสกัด เขย่ากรวยแยกให้สารละลายทั้งสองชั้นสัมผัสกันได้ทั่วถึง โดยใช้เวลาเขย่าทั้งหมดประมาณ 2 นาที ในระหว่างที่เขย่าต้องระบายความดันทุก ๆ 2 ถึง 3 วินาที ต่อจากนั้นวางกรวยแยกตั้งในแนวตั้งประมาณ 20 นาที เพื่อให้สารละลายแยกเป็นสองชั้น จากนั้นเปิดวาล์วเพื่อให้สารละลายที่อยู่ชั้นล่างไหลลงในภาชนะรองรับอย่างช้า ๆ ทำการสกัดแยกในกรวยแยกตามขั้นตอนข้างต้นซ้ำจำนวน 3 ครั้ง

ด้วยการเติมกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ ลงในกรวยแยก และซ้ำอีก 1 ครั้ง ด้วยการเติมสารละลายอิ่มตัวของโซเดียมคลอไรด์ แล้วเขย่าเพื่อให้ตัวทำละลายอินทรีย์ที่หลงเหลืออยู่ในชั้นของน้ำแยกออกเป็นชั้นอิสระได้ โดยโซเดียมคลอไรด์ไปทำหน้าที่เปลี่ยนจากการห่อหุ้มตัวทำละลายอินทรีย์เป็นการห่อหุ้มไอออนของโซเดียมคลอไรด์แทน เนื่องจากตัวทำละลายอินทรีย์มีความเป็นขั้วน้อยกว่าโซเดียมคลอไรด์ นำสารละลายที่อยู่ชั้นล่างออกมารวมกันทั้งหมด และเทสารละลายชั้นบนซึ่งเป็นชั้นของตัวทำละลายอินทรีย์ออกทางปากกรวยแยกลงในภาชนะรองรับ เมื่อแยกตัวสกัดที่เป็นตัวทำละลายอินทรีย์ได้แล้ว ทำการกำจัดน้ำออกโดยใส่แมกนีเซียมซัลเฟตแอนไฮดรัสปริมาณหนึ่งในสิบของปริมาตรตัวทำละลายอินทรีย์ หลังจากนั้นแกว่งและตั้งทิ้งไว้ประมาณ 15 นาที จึงกรองออกด้วยกระดาษกรอง จะได้สารสกัดที่ต้องการในตัวทำละลายอินทรีย์ที่ปราศจากน้ำ ซึ่งคืออนุพันธ์ของไดแอเซทิลีนที่มีหมู่ไทออล

การเตรียมสารละลายวัสดุผสมระหว่างพอลิไดแอเซทิลีน พอลิไดแอเซทิลีนที่มีหมู่ฟังก์ชันนัลไทออล และซิงค์ออกไซด์ ในน้ำปราศจากไอออน โดยใช้ความเข้มข้นของ PCDA เป็น 0.5 มิลลิโมลาร์ ปรับเปลี่ยนปริมาตรของอนุพันธ์ของไดอะเซทิลีนที่มีหมู่ไทออลเป็น 0, 5, 15, 25, 35, 50, 80, 100 และ 200 ไมโครลิตร และปรับเปลี่ยนปริมาณของซิงค์ออกไซด์เป็นร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักของ PCDA คำนวณและชั่งส่วนผสมระหว่าง PCDA ไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ และซิงค์ออกไซด์ในอัตราส่วนต่าง ๆ โดยใช้ปริมาณ PCDA 0.0094 กรัม จากนั้นนำ PCDA ไปละลายในเอทานอลภายใต้การสั่นด้วยเครื่องสั่นที่ใช้คลื่นเสียงความถี่สูง ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 5 นาที และกรองด้วยแผ่นไนลอนที่มีขนาดของรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร เพื่อกำจัดพอลิเมอร์ส่วนอื่นที่ปนเปื้อนออก และเติมสารอนุพันธ์ของไดอะเซทิลีนที่มีหมู่ไทออลที่สังเคราะห์ได้ จากนั้นผสมซิงค์ออกไซด์นำไปสั่นด้วยเครื่องสั่นที่ใช้คลื่นเสียงความถี่สูง ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้ซิงค์ออกไซด์เกิดการกระจายตัวที่ดี ทำการระเหยเอทานอลออกด้วยเครื่องให้ความร้อนและปั่นกววน โดยควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่ระดับประมาณ 70 ถึง 75 องศาเซลเซียส จากนั้นเติมน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 50 มิลลิลิตร และนำไปกระตุ้นให้เกิดการละลายได้ด้วยเครื่องให้ความร้อนและปั่นกววนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที นำสารที่เตรียมได้จากข้างต้นมาตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องห่อด้วยกระดาษฟลอยด์เพื่อป้องกันแสงจากภายนอกครบถ้วนแล้วเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 18 ชั่วโมง นำสารดังกล่าวมาทำการฉายแสงด้วยเครื่องฉายแสงอัลตราไวโอเลตที่มีความยาวคลื่นประมาณ 254 นาโนเมตร ความเข้มแสง 1.5 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 5 นาที จะได้สารละลายพอลิไดแอเซทิลีน/พอลิไดแอเซทิลีนที่มีหมู่ฟังก์ชันนัลไทออล/ซิงค์ออกไซด์ (PDA/PDA-SH/ZnO)



ภาพที่ 5.1 ขั้นตอนการสังเคราะห์อนุพันธ์ของไดแอเซทิลีนที่มีหมู่ไทออล

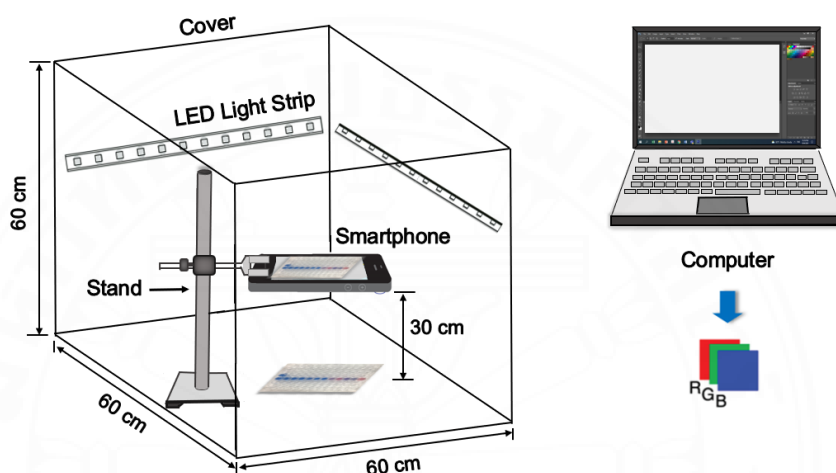
5.2.3 การวัดและวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางแสง และสมบัติเชิงเซนเซอร์ของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีน/พอลิไดแอเซทิลีนที่มีหมู่ฟังก์ชันนัลไทออล/ซิงค์ออกไซด์

ขนาดและการกระจายขนาดของอนุภาคของ PDA/PDA-SH/ZnO ในน้ำปราศจากไอออน ศึกษาโดยใช้เทคนิคการกระเจิงของแสง (dynamic light scattering; DLS) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคระดับนาโนรุ่น Zetasizer nano ZS บริษัท Malvern Instruments ประเทศอังกฤษ สมบัติการดูดกลืนแสงของ PDA/PDA-SH/ZnO ศึกษาด้วยเครื่องอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโตรสโกปีรุ่น Genesys 10 series บริษัท Thermo Fisher Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยนำ PDA/PDA-SH/ZnO ที่เตรียมได้ประมาณ 3 มิลลิลิตร มาวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เซลล์ควาร์ทแบบแก้วที่มีระยะแสงผ่าน 1 เซนติเมตร ซึ่งทำการวัดตั้งแต่ช่วงความยาวคลื่น 300 ถึง 900 นาโนเมตร

การเปลี่ยนสีของ PDA/PDA-SH/ZnO เมื่อทดสอบการเติมฟอร์มาลินอะซีทัลดีไฮด์ (acetaldehyde) แอมโมเนีย คลอรีนน้ำหรือโซเดียมไฮโปคลอไรท์ (sodium hypochlorite) กรดไฮโดรคลอริก กรดอะซิติก เอทานอล เมทานอล ไอโซโพรพานอล และอะซิโตน ศึกษาโดยนำ PDA/PDA-SH/ZnO ที่เตรียมได้มาวัดค่าการดูดกลืนแสง จากนั้นเติมสารทดสอบลงใน PDA/PDA-SH/ZnO ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 90 นาที แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโตรสโกปี การตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบส ศึกษาโดยการเติมสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ในช่วงพีเอช 3 ถึง 12 เพื่อวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนสีของสารละลายตัวอย่างที่เตรียมได้ วิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นของสารละลายตัวอย่างก่อนและหลังเติมสารละลายทดสอบ ด้วยการคำนวณเปอร์เซ็นต์การตอบสนองในการเปลี่ยนสี (%CR) ตามสมการที่ 3.1 และ 3.2

การวิเคราะห์ทางสีจากรูปภาพเพื่อศึกษาการตอบสนองการเปลี่ยนสีของ PDA/PDA-SH/ZnO ต่อฟอร์มาลินโดยการวัดความเข้มสีที่เปลี่ยนไปตามความเข้มข้นของฟอร์มาลินในช่วง 200 ถึง 1000 พีพีเอ็ม เริ่มโดยใส่สารที่ต้องการศึกษา ลงในไมโครเพลตขนาดเล็กที่ประกอบไปด้วย 96 หลุมด้วยไมโครปิเปต (300 ไมโครลิตร) จากนั้นนำไปสแกนด้วยเครื่องสแกนเนอร์รุ่น Epson Perfection V600 Photo บริษัท Epson ประเทศญี่ปุ่น) โดยจัดการทดลองเช่นเดียวกับภาพที่ 3.3 พร้อมทั้งถ่ายภาพภายใต้กล้องควบคุมแสง ด้วยกล้องถ่ายภาพบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ (ยี่ห้อ iPhone SE) โดยตั้งค่าทางยาวของโฟกัสของเลนส์กล้อง (focus level) 1.8 ค่าสปีดชัตเตอร์ (shutter speed) 1/100 วินาที และค่า ISO ความไวแสง 80 โดยจัดการทดลองดังแสดงในภาพที่ 5.2 แล้วทำการ

วิเคราะห์ผลการเปลี่ยนสีจากรูปภาพที่ได้โดยใช้สมการที่ 3.3 เพื่อคำนวณหาค่าอัตราส่วนของการเปลี่ยนสี (red-blue ratio) หรือค่าสัญญาณ (Signal) โดยหาค่าความเข้มสีเฉลี่ยของข้อมูลสีจากรูปภาพตัวอย่างที่ได้จากการตัดภาพเฉพาะส่วนที่ต้องการแสดงผลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.25 มิลลิเมตร (ความละเอียดภาพ 50 x 50 พิกเซล) ร่วมกับการใช้โปรแกรมประมวลผลภาพ MATLAB® software เพื่ออ่านค่าความเข้มสีในระบบ RGB



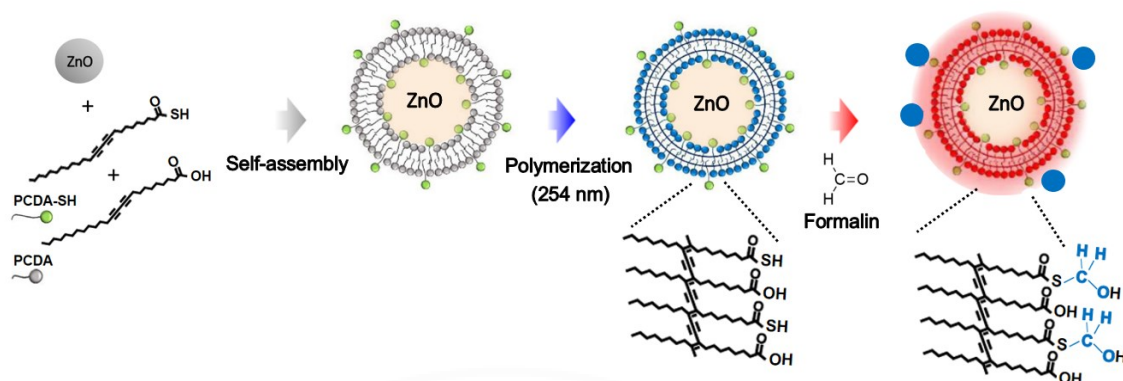
ภาพที่ 5.2 การจัดการทดลองสำหรับการวิเคราะห์ทางสีจากรูปภาพด้วยกล้องถ่ายภาพบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ เพื่อศึกษาการตอบสนองการเปลี่ยนสีของ PDA/PDA-SH/ZnO ต่อฟอร์มาลีน

สำหรับการศึกษาการตอบสนองต่ออุณหภูมิของ PDA/PDA-SH/ZnO ด้วยการศึกษการเปลี่ยนแปลงสีและการผันกลับสีของสารละลายที่เตรียมได้ เมื่อได้รับความร้อนและเมื่อกลับสู่ภาวะเดิมที่อุณหภูมิห้อง ทดสอบการตอบสนองต่ออุณหภูมิของสารละลายโดยทำการรบกวนระบบด้วยการให้ความร้อนในตู้อบลมร้อน รุ่น ED53 บริษัท Binder ประเทศเยอรมนี ในช่วงอุณหภูมิ 27 ถึง 160 องศาเซลเซียส โดยทิ้งไว้ที่อุณหภูมิที่ต้องการศึกษาเป็นเวลา 10 นาที และทำการวิเคราะห์ค่าสีจากรูปภาพด้วยกล้องถ่ายภาพบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ด้วยวิธีการที่กล่าวไว้ข้างต้น เพื่อดูความสามารถในการเปลี่ยนสีในแต่ละช่วงอุณหภูมิ นอกจากนี้สารละลายที่เย็นตัวลงสู่อุณหภูมิห้องหลังจากได้รับความร้อนในแต่ละช่วงอุณหภูมิจะถูกวิเคราะห์ทางสีจากรูปภาพเช่นกัน เพื่อดูความสามารถในการผันกลับสีสู่อุณหภูมิห้อง

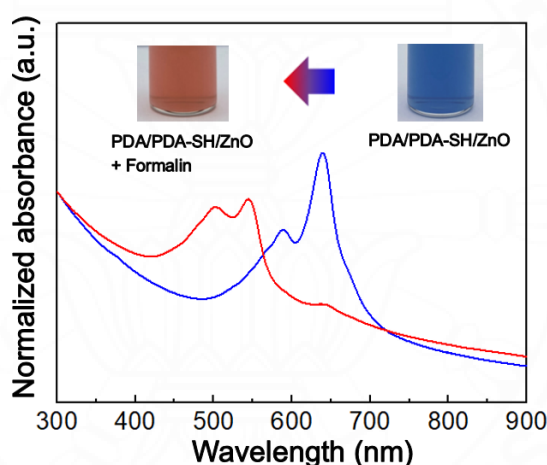
5.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

5.3.1 ผลการเตรียมสารละลายพอลิไดแอเซทิลีน/พอลิไดแอเซทิลีนที่มีหมู่ฟังก์ชันนัลไทออล/ซิงค์ออกไซด์

การเตรียม PDA/PDA-SH/ZnO ในน้ำปราศจากไอออนที่ใช้ในการศึกษาในงานวิจัยที่กล่าวในบทนี้ สารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมเตรียมจากองค์ประกอบ 3 ชนิด คือ PCDA มอนอเมอร์ PCDA-SH มอนอเมอร์ และซิงค์ออกไซด์ โดย PCDA หรือไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ 10,12-เพนตะโคเซไดอานีนิกแอซิด จะมีหมู่ที่ส่วนหัวเป็นคาร์บอกซิลิก ในขณะที่ PCDA-SH หรืออนุพันธ์ของไดแอเซทิลีนที่มีหมู่ไทออลที่บริเวณส่วนหัวจะถูกเปลี่ยนจากหมู่คาร์บอกซิลิกเป็นหมู่ไทออล (thiol group; -SH) มอนอเมอร์ทั้งสองชนิดมีสมบัติแอมฟิฟิลิกจึงทำให้เกิดการจัดเรียงตัวได้เองของโมเลกุล PCDA และ PCDA-SH ให้มีรูปร่างของโครงสร้างเป็นเวสิเคิลในน้ำ และยึดเกาะบนผิวของโครงสร้างนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าและพันธะไฮโดรเจน ดังแสดงในภาพที่ 5.3 และเมื่อเกิดกระบวนการพอลิเมอไรเซชันด้วยการฉายแสงอัลตราไวโอเลต และได้สารละลายวัสดุผสมพอลิไดแอเซทิลีน/พอลิไดแอเซทิลีนที่มีหมู่ฟังก์ชันนัลไทออล/ซิงค์ออกไซด์ (PDA/PDA-SH/ZnO) มีสีน้ำเงินเข้ม ผลการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปีในช่วงความยาวคลื่น 300 ถึง 900 นาโนเมตร เพื่อใช้ในการวิเคราะห์สีของ PDA/PDA-SH/ZnO ที่เตรียมได้ และศึกษาการจัดเรียงตัวและระยะคอนจูเกตของสายโซ่พอลิเมอร์ สามารถพิจารณาได้จากค่าความยาวคลื่นที่ตำแหน่งการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) ในสเปกตรัมการดูดกลืนแสง ดังแสดงในภาพที่ 5.4 พบว่าตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุดของ PDA/PDA-SH/ZnO ปรากฏที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร และปรากฏยอดการดูดกลืนแสง (vibronic band) ที่ความยาวคลื่น 590 นาโนเมตร ซึ่งเป็นสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงิน ทำให้มองเห็นสารละลายมีสีน้ำเงิน เมื่อทดสอบด้วยฟอร์มาลินความเข้มข้น 1000 พีพีเอ็ม พบว่าค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดจะลดลงและเกิดการเลื่อนของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงไปในช่วงพลังงานสูงขึ้น (blue-shift) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงจาก 640 นาโนเมตร ไปยังความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร เนื่องจากการลดลงของความยาวของระบบคอนจูเกตที่ส่งผลต่อสถานะของอิเล็กตรอน จึงทำให้เห็นสารละลายสามารถเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดง



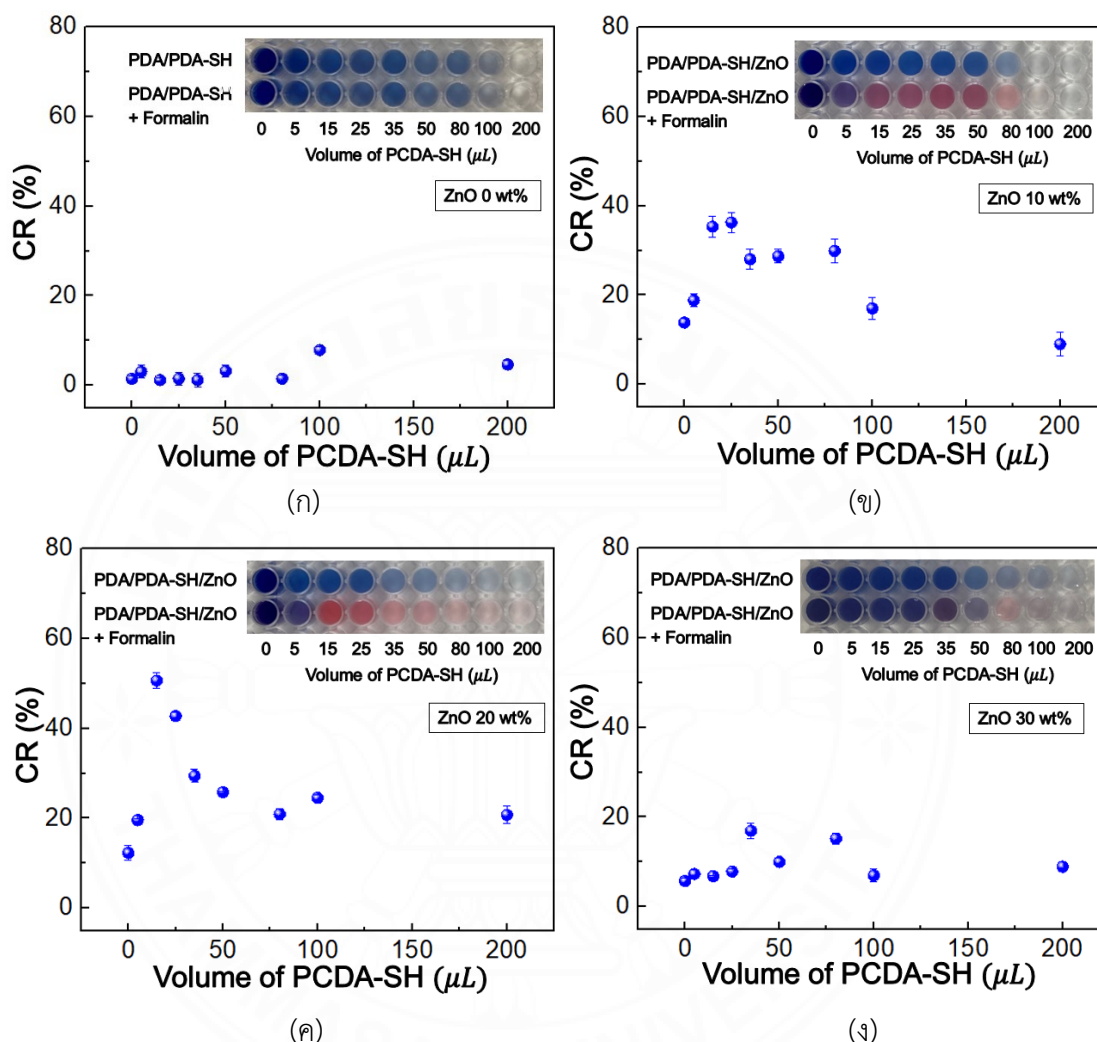
ภาพที่ 5.3 แบบจำลองการเตรียม PDA/PDA-SH/ZnO เวสิเคิล และอันตรกิริยาระหว่าง PDA/PDA-SH/ZnO เวสิเคิลและฟอร์มาลีน (Sagong et al., 2022)



ภาพที่ 5.4 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงและสีของ PDA/PDA-SH/ZnO ก่อนและหลังทดสอบฟอร์มาลีน 1000 พีพีเอ็ม

สารละลายวัสดุผสม PDA/PDA-SH/ZnO เมื่อทดสอบด้วยฟอร์มาลีนจะทำให้แรงกระทำระหว่างส่วนหัวของ PDA/PDA-SH/ZnO เวสิเคิลเกิดการเปลี่ยนแปลง ส่งผลต่อการจัดเรียงตัวของส่วนหัวที่บริเวณพื้นผิวของโครงสร้างเวสิเคิล ฟอร์มาลีนสามารถจับตัวหมู่ไทออล (-SH) จากส่วนหัวของ PCDA-SH เป็นไฮดรอกซีเมทิล (hydroxymethyl) (Chen et al., 2016) โดยมีซิงค์ออกไซด์และซิงค์ไอออน (Zn^{2+}) ช่วยเพิ่มความไวในการตอบสนองต่อฟอร์มาลีน (Phonchai et al., 2019) เนื่องจากผลของการแทรกตัวของฟอร์มาลีน ทำให้ประจุที่พื้นผิวของซิงค์ออกไซด์เปลี่ยนแปลง และส่งผลต่ออันตรกิริยาของซิงค์ไอออน (Zn^{2+}) ที่แทรกอยู่ระหว่างพอลิไดอะแซทิลีนที่บริเวณส่วนหัวกับหมู่คาร์บอกซิเลตไอออน ($-COO^-$) มีผลต่อความแข็งแรงของแรงกระทำภายในชั้น

ของเวสิเคิล เกิดการบิตตัวของออร์บิทัลพีที่สายโซ่หลัก และทำให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของสายโซ่หลักที่เกิดคอนจูเกต นำไปสู่การลดลงของระยะคอนจูเกต จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนสี

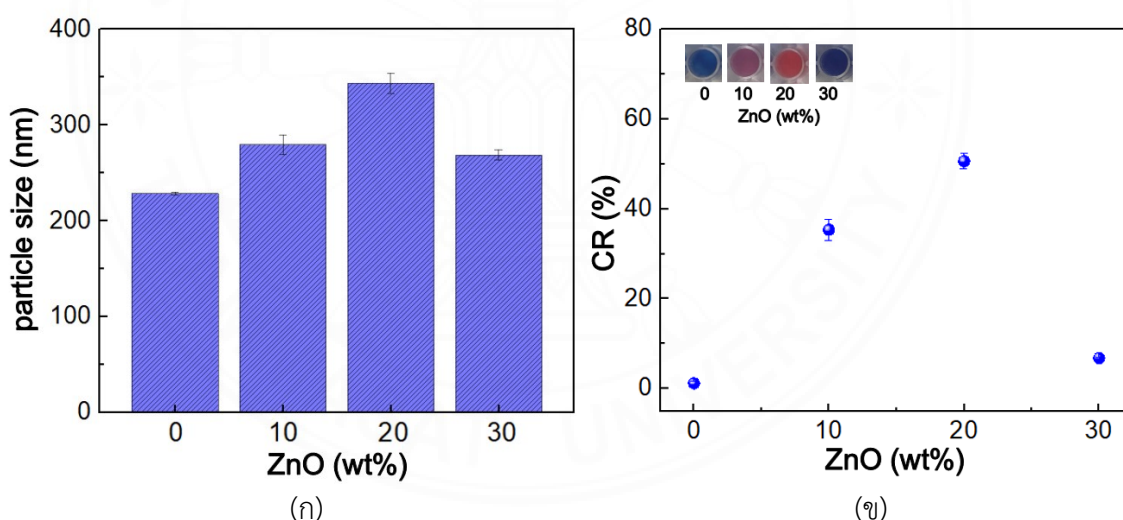


ภาพที่ 5.5 เพอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของ PDA/PDA-SH/ZnO ที่เตรียมโดยใช้ปริมาตร PCDA-SH แตกต่างกัน ที่ปริมาณของซิงค์ออกไซด์ (ก) 0 (ข) 10 (ค) 20 และ (ง) 30 เพอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อทดสอบฟอร์มาลินความเข้มข้น 1000 พีพีเอ็ม

5.3.2 สมบัติเชิงเซนเซอร์ของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีน/พอลิไดแอเซทิลีนที่มีหมู่ฟังก์ชันนัลไทออล/ซิงค์ออกไซด์

การศึกษาเงื่อนไขการเตรียมสารละลายวัสดุผสม PDA/PDA-SH/ZnO ที่เหมาะสม เพื่อเลือกใช้เป็นเซนเซอร์ตรวจวัดฟอร์มาลิน โดยกำหนดความเข้มข้นของ PCDA เป็น

0.5 มิลลิโมลาร์ ปรับเปลี่ยนปริมาตรของ PCDA-SH เป็น 0, 5, 15, 25, 35, 50, 80, 100 และ 200 ไมโครลิตร และปรับเปลี่ยนปริมาณของซิงค์ออกไซด์เป็นร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักของ PCDA และทดสอบผลการตอบสนองต่อฟอร์มาลินความเข้มข้น 1000 พีพีเอ็ม เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนสีของสารละลายตัวอย่างที่เตรียมได้ พบว่าเมื่อทดสอบฟอร์มาลิน สารละลายพอลิไดแอเซทิลีนบริสุทธิ์ และสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนผสมพอลิไดแอเซทิลีนที่มีหมู่ฟังก์ชันัลไทออล ไม่มีการเปลี่ยนสียังคงมีสีน้ำเงินซึ่งสอดคล้องกับค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีในภาพที่ 5.5 (ก) ในขณะที่การเติมซิงค์ออกไซด์ 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักใน PDA/PDA-SH จะเพิ่มความสามารถในการตอบสนองการเปลี่ยนสีต่อฟอร์มาลินเมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายที่ไม่ได้เติมซิงค์ออกไซด์ ที่ปริมาตรของ PCDA-SH ต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 5.5 (ข)-(ง) ผลการศึกษานี้พบว่า PDA/PDA-SH/ZnO ที่เตรียมโดยใช้ปริมาตร PCDA-SH 15 ไมโครลิตร และปริมาณซิงค์ออกไซด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงการเปลี่ยนสีได้ชัดเจนที่สุด โดยสารละลายเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงและให้ผลการตอบสนองต่อฟอร์มาลินสูงสุดคือ 50.62 ± 1.69 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นฟอร์มาลิน 1000 พีพีเอ็ม



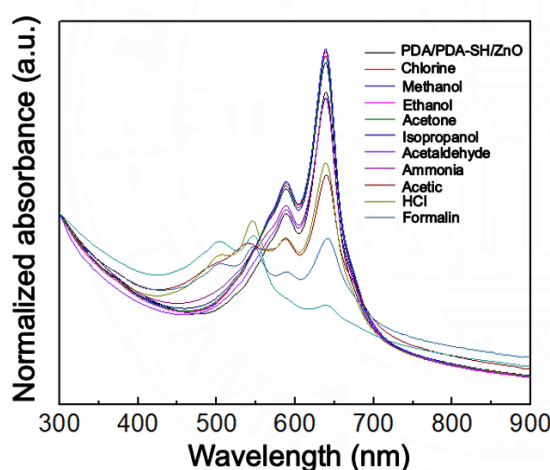
ภาพที่ 5.6 (ก) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซิงค์ออกไซด์กับขนาดอนุภาคของสารละลาย PDA/PDA-SH/ZnO เวกิล (ข) เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของ PDA/PDA-SH/ZnO ที่เตรียมโดยใช้ปริมาตร PCDA-SH 15 ไมโครลิตร ที่ปริมาณซิงค์ออกไซด์แตกต่างกัน เมื่อทดสอบฟอร์มาลินความเข้มข้น 1000 พีพีเอ็ม

เมื่อนำสารละลายวัสดุผสม PDA/PDA-SH/ZnO ที่เตรียมโดยใช้ปริมาตร PCDA-SH 15 ไมโครลิตร และปริมาณซิงค์ออกไซด์ 0, 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

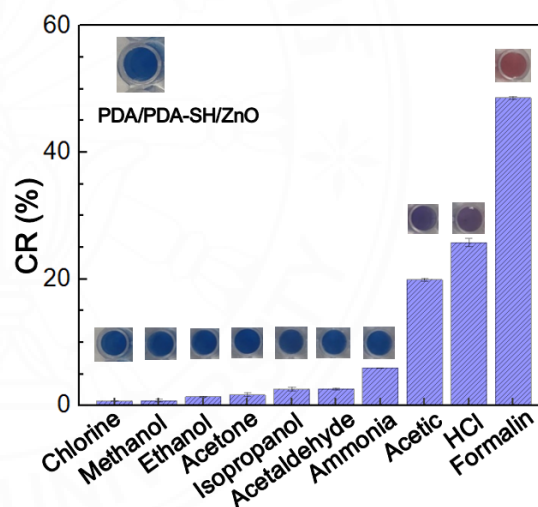
มาศึกษาขนาดอนุภาคด้วยเทคนิค DLS พบว่าสารละลายที่ไม่ได้เติมซิงค์ออกไซด์มีขนาดอนุภาคเล็กที่สุด คือ 228.6 ± 1.4 นาโนเมตร และเมื่อเพิ่มปริมาณของซิงค์ออกไซด์เป็น 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ขนาดของอนุภาคเพิ่มขึ้น เป็น 279.4 ± 10.3 และ 343.5 ± 10.6 นาโนเมตร ตามลำดับ เมื่อเพิ่มปริมาณของซิงค์ออกไซด์เป็น 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ขนาดอนุภาคลดลงเล็กน้อยมีค่าเท่ากับ 268.8 ± 5.1 นาโนเมตร ดังภาพที่ 5.6 (ก) เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองการเปลี่ยนสีของ PDA/PDA-SH/ZnO ที่เตรียมโดยใช้ปริมาตร PCDA-SH 15 ไมโครลิตร เมื่อทดสอบฟอร์มาลิน ความเข้มข้น 1000 พีพีเอ็ม ดังแสดงในภาพที่ 5.6 (ข) พบว่าสารละลายที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 20 10 30 และ 0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของสารละลายเรียงลำดับจากสูงสุดไปต่ำสุด สอดคล้องกับขนาดอนุภาค แสดงว่าขนาดของอนุภาคมีผลต่อการตอบสนองฟอร์มาลิน ดังนั้น PDA/PDA-SH/ZnO ที่เตรียมโดยใช้ปริมาตร PCDA-SH 15 ไมโครลิตร และปริมาณของซิงค์ออกไซด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดในการทดลองขั้นต่อไป สำหรับการใช้เป็นเซนเซอร์สำหรับตรวจวัดฟอร์มาลินในงานวิจัยบนี้

การศึกษาสมบัติความจำเพาะเจาะจงในการตรวจวัดหรือการเลือกตอบสนองต่อสารที่ต้องการวิเคราะห์ เมื่อศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงและค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของสารละลายวัสดุผสม PDA/PDA-SH/ZnO ที่เตรียมโดยใช้ปริมาตร PCDA-SH 15 ไมโครลิตร และปริมาณของซิงค์ออกไซด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทดสอบผลการตอบสนองต่อฟอร์มาลิน อะซีทัลดีไฮด์ แอมโมเนีย คลอรีน กรดไฮโดรคลอริก กรดอะซิติก เมทานอล เอทานอล อะซิโตน และไอโซโพรพานอล ที่ความเข้มข้น 1000 พีพีเอ็ม พบว่าชนิดของสารทดสอบมีผลต่อการเปลี่ยนสีของสารละลายตัวอย่าง เมื่อเติม คลอรีน เมทานอล เอทานอล อะซิโตน ไอโซโพรพานอล อะซีทัลดีไฮด์ และแอมโมเนีย ใน PDA/PDA-SH/ZnO พบว่าสีของสารละลายวัสดุผสมยังคงเป็นสีน้ำเงินแต่สีอาจจางลงเล็กน้อยจากการสังเกตด้วยตาเปล่า เมื่อวิเคราะห์การดูดกลืนแสงได้ผลดังแสดงในภาพที่ 5.7 (ก) พบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงไม่เปลี่ยนแปลงแต่ค่าการดูดกลืนแสงจะมีค่าต่ำลงเนื่องจากสารมีความเข้มข้นน้อยลง โดยมีค่าความยาวคลื่นที่ตำแหน่งการดูดกลืนแสงสูงสุดคงที่ที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร แสดงว่าการเติมสารดังกล่าวไม่ส่งผลต่อโครงสร้างที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของพอลิไดแอเซทิลีนและพอลิไดแอเซทิลีนที่มีหมู่ฟังก์ชันนัลไทโอลบนผิวของซิงค์ออกไซด์ โดยชั้นของพอลิไดแอเซทิลีนและพอลิไดแอเซทิลีนที่มีหมู่ฟังก์ชันนัลไทโอลด้านในสุดมีการยึดเกาะกับพื้นผิวของซิงค์ออกไซด์อย่างแข็งแรง ทำให้สายโซ่ข้างและสายโซ่หลักที่มีพันธะคู่สลับพันธะเดี่ยวแบบต่อเนื่องบิดออกนอกระนาบได้ยากขึ้น ในขณะที่สารละลายวัสดุผสมเมื่อได้รับการกระตุ้นจากกรดอะซิติกและกรดไฮโดรคลอริกจะพบการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงเกิดขึ้น โดยพบว่ายอดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตรลดต่ำลง และมียอดการดูดกลืนแสงในช่วง

ความยาวคลื่น 490 ถึง 540 นาโนเมตรปรากฏขึ้นมา ซึ่งเมื่อสังเกตจากตาเปล่าจะเห็นว่าสารละลายวัสดุผสมเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วง การเติมกรดอะซิติกและกรดไฮโดรคลอริกลงไปในสารละลายวัสดุผสม เป็นการเติมไฮโดรเจนไอออน (H^+) ลงไปในระบบ พบว่าสารละลายวัสดุผสมเกิดการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสี ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากหมู่ไทออล ($-SH$) ที่บริเวณส่วนหัวของ PCDA-SH โดยไฮโดรเจนไอออน (H^+) เข้าไปเกิดพันธะกับ S อะตอมในหมู่ไทออล ทำให้เกิดแรงผลักระหว่างประจุบวกที่เกิดขึ้น ส่งผลให้เกิดการยับยั้งและจัดเรียงตัวใหม่ของโครงสร้างเวสิเคิล เมื่อเติมฟอร์มาลีนลงในสารละลายวัสดุผสมพบว่าความเข้มของการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงินลดต่ำลงอย่างมาก ในขณะที่ความเข้มของการดูดกลืนแสงของเฟสสีแดงในช่วงความยาวคลื่น 490 ถึง 540 นาโนเมตร เพิ่มขึ้นอย่างมาก ซึ่งเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าจะพบว่าสารละลายวัสดุผสมปรากฏเป็นสีแดง โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีสูงสุดเมื่อเทียบกับสารทดสอบชนิดอื่น ๆ ดังแสดงในภาพที่ 5.7 (ข) แสดงถึงสารละลายวัสดุผสม PDA/PDA-SH/ZnO มีความจำเพาะต่อการเลือกตอบสนองต่อฟอร์มาลีนได้ดี



(ก)

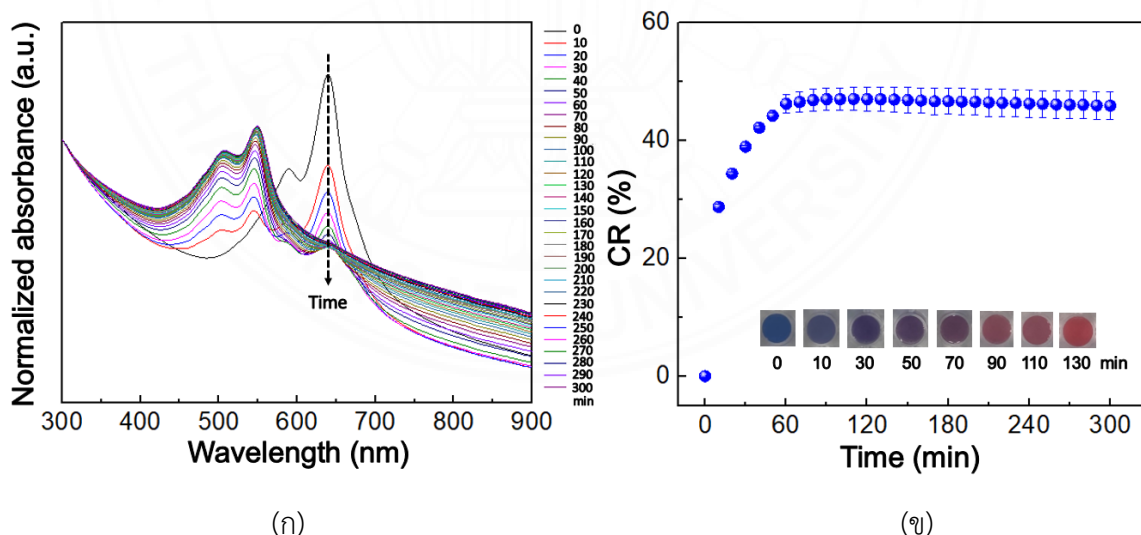


(ข)

ภาพที่ 5.7 (ก) สเปกตรัมการดูดกลืนแสง และ (ข) เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของ PDA/PDA-SH/ZnO ต่อสารทดสอบชนิดต่าง ๆ ที่ความเข้มข้น 1000 พีพีเอ็ม

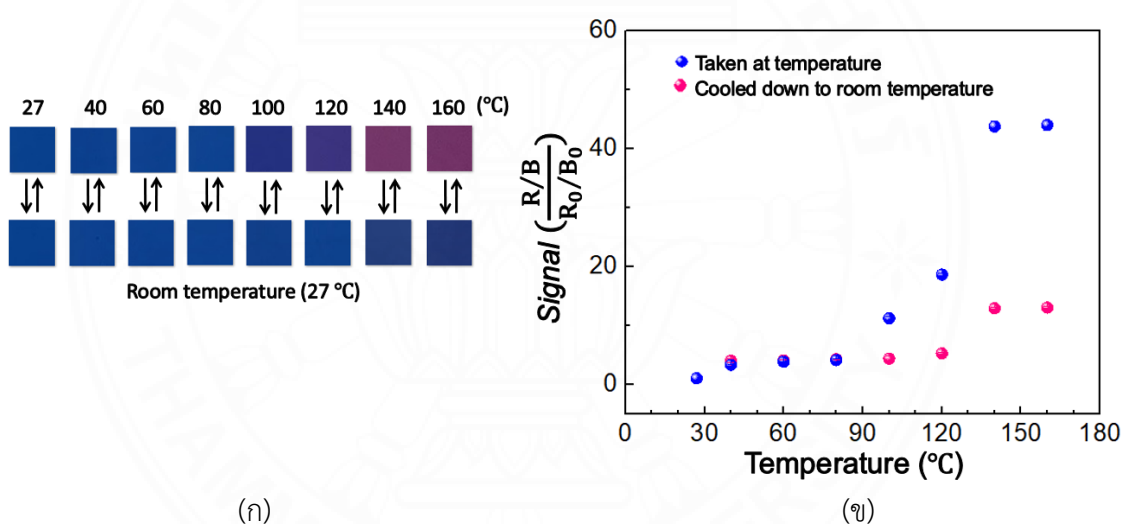
การศึกษาเวลาในการตอบสนองการเปลี่ยนสีของ PDA/PDA-SH/ZnO ที่เตรียมโดยใช้ปริมาตร PCDA-SH 15 ไมโครลิตร และปริมาณของซิงค์ออกไซด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ต่อฟอร์มาลีนความเข้มข้น 1000 พีพีเอ็ม โดยศึกษาค่าการดูดกลืนแสง ทุก ๆ 10 นาที เป็นระยะเวลา 300 นาที พบว่าปฏิกิริยาระหว่างสารละลายวัสดุผสมกับฟอร์มาลีนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ได้สเปกตรัม

การดูดกลืนแสงดังแสดงในภาพที่ 5.8 (ก) จากผลการทดลองพบว่า ภายหลังจากเติมฟอร์มาลีนลงไป ในสารละลายวัสดุผสม ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (27 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 10 นาที สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายวัสดุผสมเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมากโดยความเข้มของการดูดกลืนแสง ในช่วงความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร ลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่เดียวกันยอดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นในช่วง 490 ถึง 540 นาโนเมตรปรากฏขึ้นมา เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นยอดการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตรลดลงเรื่อย ๆ และยอดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น ในช่วง 490 ถึง 540 นาโนเมตรที่ปรากฏขึ้นมาจะเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณากราฟเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีที่ระยะเวลาต่าง ๆ ในภาพที่ 5.8 (ข) พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมากในช่วงเวลา 0 ถึง 10 นาที โดยเพิ่มขึ้นถึง 28.73 ± 0.40 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าจะเห็นว่า สารละลายวัสดุผสมปรากฏเป็นสีม่วง และค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีเพิ่มอย่างต่อเนื่องในช่วง 10 ถึง 60 นาที ซึ่งเพิ่มไปอยู่ที่ค่า 46.24 ± 1.51 เปอร์เซ็นต์ และค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีจะเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจนถึง 90 นาที ซึ่งเป็นเวลาที่สารละลายวัสดุผสมเกิดการเปลี่ยนสีเป็นสีแดง หลังจากนั้นค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีค่อนข้างคงที่เมื่อเวลาผ่านไปจนถึง 300 นาที ดังนั้นการศึกษานี้ จึงเลือกระยะเวลาที่ 90 นาที เป็นเวลาที่เหมาะสมและถือว่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ในการตรวจวัดการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีสำหรับเซนเซอร์ตรวจวัดฟอร์มาลีน



ภาพที่ 5.8 (ก) สเปกตรัมการดูดกลืนแสง และ (ข) เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของ PDA/PDA-SH/ZnO ต่อฟอร์มาลีนความเข้มข้น 1000 พีพีเอ็ม ที่ระยะเวลาต่าง ๆ

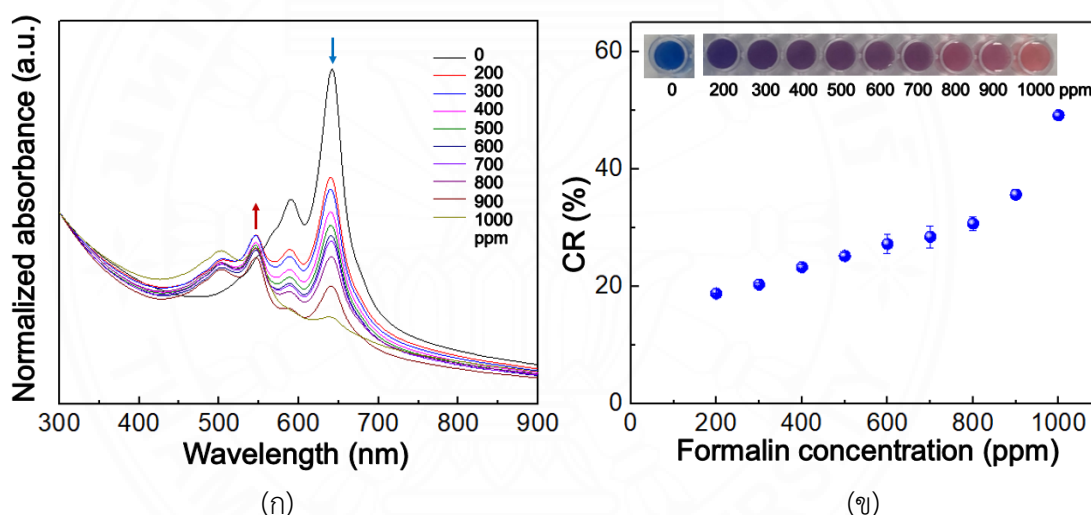
การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนสีของ PDA/PDA-SH/ZnO การที่ชั้นของพอลิไดแอเซทิลีนและพอลิไดแอเซทิลีนที่มีหมู่ฟังก์ชันนัลไทออลที่อยู่ด้านในสุดมีการยึดเกาะกับพื้นผิวของซิงค์ออกไซด์อย่างแข็งแรง ทำให้เกิดการจำกัดการขยับตัวของโครงสร้างที่ส่วนต่าง ๆ ของเวสิเคิลคือ สายโซ่แอลคิลที่ส่วนหาง ส่วนหัวที่มีขั้ว และบริเวณสายโซ่หลักที่เกิดการคอนจูเกต การเปลี่ยนสีจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อการขยับตัวที่เกิดจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของโครงสร้างทั้งหมด มีค่ามากกว่าแรงกระทำระหว่างและภายในเวสิเคิล ส่งผลให้โครงสร้างทั้งหมดเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ ส่งผลต่อการจัดเรียงตัวของสายโซ่หลักที่เกิดการคอนจูเกต ทำให้สถานะของอิเล็กตรอนและการดูดกลืนแสง เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยแถบเวเลนซ์ (valence band) จะต่ำลง ช่องว่างพลังงาน HOMO-LUMO มีค่าเพิ่มขึ้น และระยะห่างระหว่าง $\pi-\pi^*$ กว้างขึ้น ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสีของ PDA/PDA-SH/ZnO เวสิเคิล



ภาพที่ 5.9 (ก) ภาพการเปลี่ยนแปลงสีที่ได้จากกล้องถ่ายภาพนอร์สฟท์เคลื่อนที่ (ข) ค่าอัตราส่วนของการเปลี่ยนสีของ PDA/PDA-SH/ZnO เมื่อผ่านการให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 27 ถึง 160 องศาเซลเซียส และเมื่อกลับสู่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส

เมื่อสารละลายวัสดุผสมได้รับการกระตุ้นโดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิ 27 ถึง 160 องศาเซลเซียส พบการเปลี่ยนสีของสารละลายวัสดุผสมที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส โดยสารละลายวัสดุผสมเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นแดงอมม่วง ดังแสดงในภาพที่ 5.9 (ก) แสดงว่าการเพิ่มอุณหภูมิในช่วงนี้ทำให้เกิดการขยับของโครงสร้างของเวสิเคิลเพียงบางส่วนเท่านั้น โดยความเครียดเชิงกลที่โซ่ข้างจะถูกปลดปล่อยออกมา เป็นสาเหตุให้การจัดเรียงตัวของออบิทัลฟิที่สายโซ่หลักที่มีโครงสร้างแบบคอนจูเกตเกิดการบิดตัวไปบางส่วน และเมื่อมีการให้ความร้อนที่

อุณหภูมิสูงขึ้น ออปีทัลฟิอาจเกิดการบิดตัวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความยาวของสายโซ่หลักที่มีโครงสร้างเป็นแบบคอนจูเกตลดลง สารละลายวัสดุผสมเกิดการเปลี่ยนเป็นสีม่วงมากขึ้น อีกทั้งความแตกต่างของพลังงานของ PDA/PDA-SH/ZnO ในสถานะที่เป็นสีน้ำเงินและสีม่วงมีเพียงแค่น้อย ส่งผลให้สารละลายวัสดุผสมสามารถเปลี่ยนจากสีม่วงกลับเป็นสีน้ำเงินได้ง่ายเมื่อไม่ได้รับการกระตุ้นจากความร้อน มีกระบวนการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้ เมื่อทำการพล็อตกราฟระหว่างค่าอัตราส่วนของการเปลี่ยนสีของสารละลายวัสดุผสมกับอุณหภูมิพบว่าให้ผลการทดลองไปในทางเดียวกันดังแสดงในภาพที่ 5.9 (ข) คือสารละลายวัสดุผสมเริ่มมีการเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินอมม่วงที่อุณหภูมิ 100 ถึง 120 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียสแสดงการเปลี่ยนสีเป็นสีม่วงได้อย่างชัดเจน เมื่อปล่อยให้เย็นตัวกลับลงมาจะพบว่าสีของสารละลายวัสดุผสมค่อย ๆ เกิดการเปลี่ยนสีกลับจากสีม่วงเป็นสีน้ำเงินเมื่อเย็นตัวลงถึงอุณหภูมิห้อง



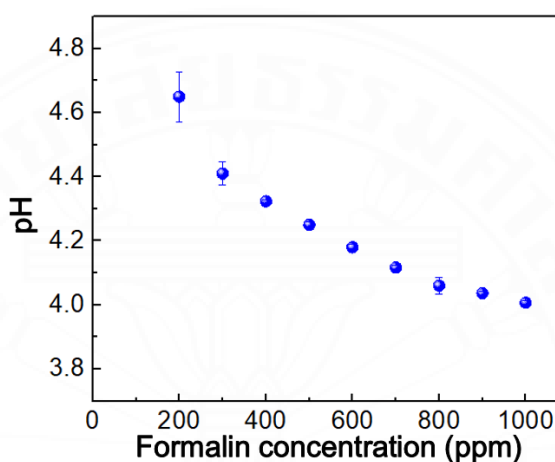
ภาพที่ 5.10 (ก) สเปกตรัมการดูดกลืนแสง และ (ข) เปอร์เซนต์การเปลี่ยนสีของ PDA/PDA-SH/ZnO ต่อฟอร์มาลีนความเข้มข้นในช่วง 200 ถึง 1000 พีพีเอ็ม

การศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีด้วยตาเปล่าและวิเคราะห์สมบัติการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี ของ PDA/PDA-SH/ZnO เมื่อได้รับการกระตุ้นโดยการเติมฟอร์มาลีน ซึ่งศึกษาที่ความเข้มข้นของฟอร์มาลีนในช่วง 200 ถึง 1000 พีพีเอ็ม พบว่าการเปลี่ยนสีของสารละลายวัสดุผสมเป็นกระบวนการผันกลับไม่ได้ และเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วง และสีแดง ตามความเข้มข้นของฟอร์มาลีนที่เพิ่มขึ้น เริ่มต้นสารละลายวัสดุผสมมีสีน้ำเงินจากการสังเกด้วยตาเปล่า และเมื่อวิเคราะห์การดูดกลืนแสงได้ผลดังแสดงในภาพที่ 5.10 (ก) พบตำแหน่งการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร และแถบ vibronic ที่

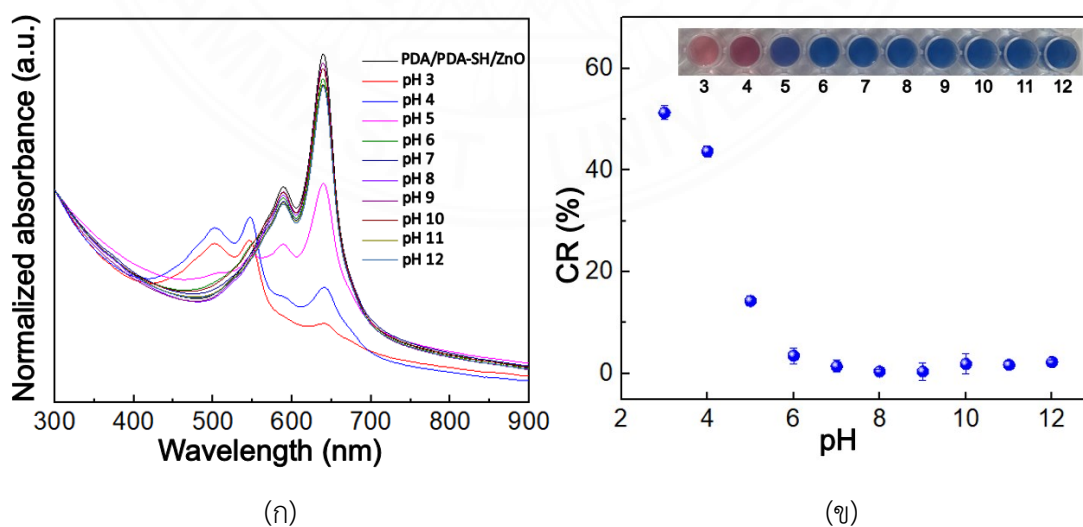
ความยาวคลื่น 590 นาโนเมตร ซึ่งเป็นสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงิน เมื่อเติมสารละลายฟอร์มาลินความเข้มข้น 200 พีพีเอ็ม ลงไปในสารละลายวัสดุผสมและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 90 นาที สีของสารละลายวัสดุผสมจะเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วง และเมื่อวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนแสงจะพบว่ามียอดการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 490 ถึง 540 นาโนเมตร ซึ่งเป็นสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเฟสสีแดงปรากฏอยู่ร่วมกับเฟสสีน้ำเงิน เมื่อความเข้มข้นของฟอร์มาลินเพิ่มขึ้นความเข้มของแถบการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงินจะลดลงเรื่อย ๆ ในขณะที่เดียวกันความเข้มของแถบการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตรจะเพิ่มขึ้น เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าพบว่าสารละลายวัสดุผสมค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นสีม่วงมากขึ้น และเมื่อความเข้มข้นของฟอร์มาลินเพิ่มขึ้นจนถึง 800 และ 900 พีพีเอ็ม สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายวัสดุผสมเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยความเข้มของการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงินลดต่ำลงอย่างมาก ในขณะที่ความเข้มของการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตรกลับเพิ่มสูงขึ้นอย่างมากเช่นกัน ซึ่งจะมองเห็นสารละลายวัสดุผสมเป็นสีม่วงอมแดง เมื่อความเข้มข้นฟอร์มาลินเป็น 1000 พีพีเอ็ม แถบการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 640 นาโนเมตรลดลงจนเกือบเป็นศูนย์ มีเพียงแถบการดูดกลืนแสงในช่วงของเฟสสีแดงปรากฏขึ้นมาเท่านั้น ซึ่งเมื่อสังเกตด้วยตาจะเห็นว่าสารละลายวัสดุผสมมีสีแดง เมื่อพิจารณากราฟเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของสารละลายวัสดุผสมที่ความเข้มข้นของฟอร์มาลินในช่วง 200 ถึง 1000 พีพีเอ็ม ดังภาพที่ 5.10 (ข) พบว่าสารละลายวัสดุผสมมีค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของฟอร์มาลิน และเมื่อความเข้มข้นฟอร์มาลินสูงขึ้นเป็น 1000 พีพีเอ็ม ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีเพิ่มขึ้นไปอยู่ที่ค่าสูงสุดที่ 49.17 ± 0.42 เปอร์เซ็นต์ โดยกราฟที่ได้มีความเป็นเส้นตรงอยู่ในช่วงความเข้มข้นของฟอร์มาลิน 200 ถึง 900 พีพีเอ็ม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสารละลายพอลิไดออกซีเททราไฮโดรฟอสเฟต/พอลิไดออกซีเททราไฮโดรฟอสเฟตที่มีหมู่ฟังก์ชันนัลไทออกซิล/ซิงค์ออกไซด์สามารถตรวจวัดฟอร์มาลินที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ได้ และสามารถสังเกตการเปลี่ยนสีด้วยตาเปล่าที่ระดับความเข้มข้นของฟอร์มาลิน 200 พีพีเอ็ม

จากการตรวจวัดค่าพีเอชของฟอร์มาลินที่ความเข้มข้นในช่วง 200 ถึง 1000 พีพีเอ็ม ด้วยเครื่องวัดค่าความเป็นกรดต่างแบบดิจิตอล (pH meter) รุ่น ST3100-B บริษัท OHAUS ประเทศสหรัฐอเมริกา พบว่าค่าพีเอชจะอยู่ในช่วงประมาณ 4.0 ถึง 4.7 ดังแสดงในภาพที่ 5.11 นอกจากนี้จากการศึกษาการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบสของ PDA/PDA-SH/ZnO ด้วยการเติมสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ในช่วงพีเอช 3 ถึง 12 พบว่าการเพิ่มพีเอชจาก 6 ไปที่ 12 ไม่ทำให้สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเกิดการเปลี่ยนแปลง และสารละลายวัสดุผสมไม่เกิดการเปลี่ยนสีดังแสดงในภาพที่ 5.12 (ก) แต่เมื่อเติมสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์พีเอช 5 จะพบพีการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร สารละลายวัสดุผสมเริ่มเกิดการเปลี่ยนสีเป็นสีม่วง และจะเกิดการเปลี่ยนสีจาก

สีน้ำเงินเป็นสีแดงที่พีเอช 3 และ 4 โดยสเปกตรัมการดูดกลืนแสงสูงสุดเกิดการเปลี่ยนตำแหน่งมาอยู่ที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร และเมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีจากเฟสสีน้ำเงินเป็นเฟสสีแดงในภาพที่ 5.12 (ข) พบว่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงพีเอชต่ำกว่า 5 โดยมีค่าสูงถึง 51.26 ± 1.34 เปอร์เซ็นต์ ที่พีเอช 3 ซึ่งแสดงถึงสารละลายวัสดุผสมมีการตอบสนองต่อความเป็นกรด สอดคล้องกับผลการศึกษาการตอบสนองของสารละลายวัสดุผสมต่อฟอร์มาลีนที่ความเข้มข้นในช่วง 200 ถึง 1000 พีพีเอ็ม

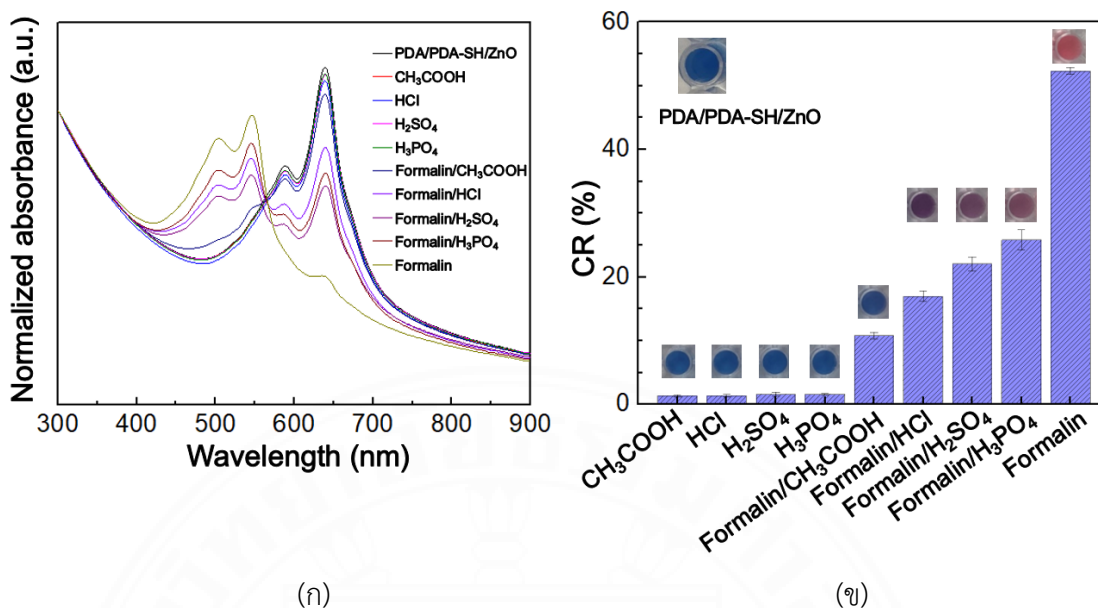


ภาพที่ 5.11 ค่าพีเอชของสารละลายฟอร์มาลีนที่ความเข้มข้นในช่วง 200 ถึง 1000 พีพีเอ็ม โดยใช้เครื่องวัดค่าความเป็นกรดต่างแบบดิจิทัล



ภาพที่ 5.12 การตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบสของ PDA/PDA-SH/ZnO

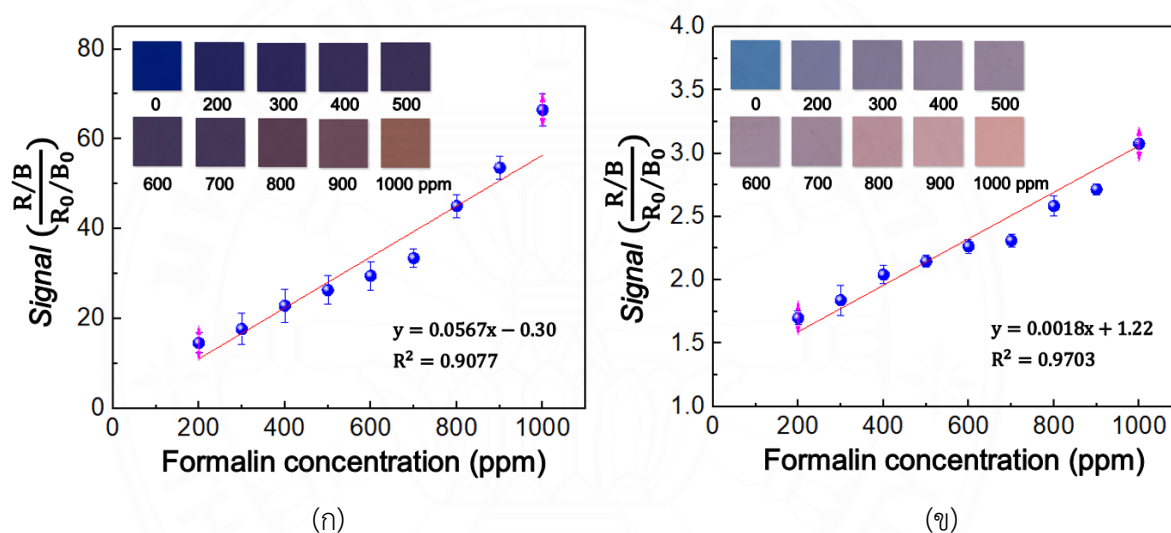
(ก) สเปกตรัมการดูดกลืนแสง และ (ข) เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสี



ภาพที่ 5.13 (ก) สเปกตรัมการดูดกลืนแสง และ (ข) เพอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของ PDA/PDA-SH/ZnO ต่อสารทดสอบชนิดต่าง ๆ ที่ค่าพีเอช 4.0

การศึกษาการตอบสนองของ PDA/PDA-SH/ZnO ต่อสารทดสอบชนิดต่าง ๆ ที่มีสมบัติเป็นกรดที่ค่าพีเอช 4.0 และเมื่อละลายน้ำจะแตกตัวให้ไฮโดรเจนไอออน (H^+) ได้แก่ กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) กรดอะซิติก (CH_3COOH) สารผสมระหว่างฟอร์มาลีน (ความเข้มข้น 500 พีพีเอ็ม) กับสารทดสอบแต่ละชนิดโดยปรับค่าพีเอชของสารผสมเท่ากับ 4.0 และฟอร์มาลีน (ความเข้มข้น 1000 พีพีเอ็ม) เมื่อวิเคราะห์การดูดกลืนแสงได้ผลดังแสดงในภาพที่ 5.13 (ก) พบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ PDA/PDA-SH/ZnO เปลี่ยนแปลงอย่างมากเมื่อทดสอบกับฟอร์มาลีน (ความเข้มข้น 1000 พีพีเอ็ม) โดยความเข้มของการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร ลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว ในขณะเดียวกันแถบการดูดกลืนแสงสูงสุดจะเลื่อนไปอยู่ที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร และสีของ PDA/PDA-SH/ZnO ปรากฏเป็นสีแดง เมื่อเติมสารผสมระหว่างฟอร์มาลีน (ความเข้มข้น 500 พีพีเอ็ม) กับกรดอะซิติก (กรดอ่อนเป็นกรดที่แตกตัวให้ H^+ ได้ไม่สมบูรณ์) ใน PDA/PDA-SH/ZnO พบว่า PDA/PDA-SH/ZnO เกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วง และเปลี่ยนสีเป็นสีม่วงมากขึ้นเมื่อเติมสารผสมระหว่างฟอร์มาลีน (ความเข้มข้น 500 พีพีเอ็ม) กับกรดไฮโดรคลอริก (กรดที่แตกตัวให้ H^+ ได้ 1 ครั้ง) กรดซัลฟิวริก (กรดที่แตกตัวให้ H^+ ได้ 2 ครั้ง) และกรดฟอสฟอริก (กรดที่แตกตัวให้ H^+ ได้ 3 ครั้ง) ตามลำดับ ในขณะที่เมื่อทดสอบกับกรดอะซิติก กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟิวริก และกรดฟอสฟอริก สีของ PDA/PDA-SH/ZnO ยังคงเป็นสีน้ำเงินไม่เกิดการเปลี่ยนสี แต่พบว่าความเข้มของแถบ

การดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงินลดลง เมื่อพิจารณาค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสี ดังแสดงในภาพที่ 5.13 (ข) พบว่า PDA/PDA-SH/ZnO ให้ผลการตอบสนองต่อฟอร์มาลินสูงสุดคือ 52.28 ± 0.49 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้สารผสมระหว่างฟอร์มาลินกับสารทดสอบแต่ละชนิด 4 ชนิด มีค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสารทดสอบของแต่ละชนิดเนื่องจากผลของฟอร์มาลิน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า PDA/PDA-SH/ZnO ตอบสนองต่อฟอร์มาลินได้ดีกว่าสารทดสอบชนิดอื่น มีความจำเพาะต่อการตรวจวัดฟอร์มาลิน และสามารถแยกออกจากสารทดสอบชนิดต่าง ๆ ที่มีสมบัติเป็นกรดที่มีค่าพีเอชเท่ากันได้ ดังนั้น PDA/PDA-SH/ZnO เป็นเซนเซอร์ที่เหมาะสมสำหรับตรวจวัดฟอร์มาลิน



ภาพที่ 5.14 ภาพการเปลี่ยนแปลงสีและค่าอัตราส่วนของการเปลี่ยนสีของ PDA/PDA-SH/ZnO ต่อฟอร์มาลินความเข้มข้นต่าง ๆ ด้วยภาพที่ได้จาก (ก) กล้องถ่ายภาพบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ และ (ข) เครื่องสแกนเนอร์

การศึกษาผลการตอบสนองต่อฟอร์มาลินที่ความเข้มข้น 200 ถึง 1000 พีพีเอ็ม ของ PDA/PDA-SH/ZnO ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ทางสีเพื่อแปลผลการวิเคราะห์ที่ได้ออกมาเป็นเชิงปริมาณ นอกเหนือจากการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี ผลการวิเคราะห์ภาพที่ได้จากกล้องถ่ายภาพบนโทรศัพท์เคลื่อนที่และสแกนเนอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB® software ดังแสดงในภาพที่ 5.14 (ก) และภาพที่ 5.14 (ข) ตามลำดับ พบว่าเมื่อนำสารละลายวัสดุผสมที่ถูกรบกวนระบบด้วยการเติมฟอร์มาลิน สังเกตเห็นว่าสีของสารละลายวัสดุผสมมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อความเข้มข้นของฟอร์มาลินเพิ่มขึ้น โดยค่อย ๆ เกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงในเฉดสีที่แตกต่างกัน คือ เฉดสีน้ำเงิน (control) ปังบอกถึงเซนเซอร์

PDA/PDA-SH/ZnO สำหรับการตรวจวัดฟอร์มาลินที่สถานะเริ่มต้นไม่มีฟอร์มาลิน เจดสีม่วง (violet) บ่งบอกถึงระดับความเข้มข้นของฟอร์มาลิน 200 ถึง 700 พีพีเอ็ม และเจดสีแดงที่ระดับความเข้มข้นของฟอร์มาลินมากกว่า 700 พีพีเอ็ม ซึ่งภาพจากการสแกนด้วยเครื่องสแกนเนอร์จะมีความเข้มของสี (color intensity) ที่อ่อนกว่าภาพจากการถ่ายภาพด้วยกล้องโทรศัพท์เคลื่อนที่ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสารละลายวัสดุผสมสามารถตรวจวัดและแยกความแตกต่างของฟอร์มาลินที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ได้ ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนของการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงพบว่าสารละลายวัสดุผสมเมื่อถูกกระตุ้นด้วยความเข้มข้นของฟอร์มาลินที่สูงขึ้นจะมีค่าอัตราส่วนของการเปลี่ยนสีโดยรวมเพิ่มขึ้น และสูงที่สุดเท่ากับ 66.45 ± 3.62 ด้วยการวิเคราะห์ภาพจากกล้องโทรศัพท์เคลื่อนที่และ 3.07 ± 0.01 ด้วยการวิเคราะห์ภาพจากสแกนเนอร์ ที่ระดับความเข้มข้นของฟอร์มาลิน 1000 พีพีเอ็ม กราฟที่ได้ทั้งสองเทคนิคมีความเป็นเส้นตรงอยู่ในช่วงความเข้มข้นของฟอร์มาลิน 200 ถึง 1000 พีพีเอ็ม และมีแนวโน้มไม่แตกต่างกันมาก เมื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการตรวจวัดฟอร์มาลินด้วยภาพถ่ายจากกล้องโทรศัพท์เคลื่อนที่และสแกนเนอร์เปรียบเทียบกับเทคนิคมาตรฐาน (เทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี) พบว่าให้ผลการวิเคราะห์ที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ผลการศึกษาเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่าระบบการวิเคราะห์ภาพถ่ายจากกล้องถ่ายภาพบนโทรศัพท์เคลื่อนที่และสแกนเนอร์มีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดฟอร์มาลินได้ไม่ต่างกับเทคนิคมาตรฐาน ซึ่งสะดวก รวดเร็ว ไม่ต้องใช้เครื่องมือราคาสูงและขั้นตอนที่ยุ่งยาก

5.4 สรุปผลการทดลอง

การพัฒนาสารละลายวัสดุผสม PDA/PDA-SH/ZnO ในน้ำปราศจากไอออน โดยปรับเปลี่ยนปริมาตรของอนุพันธ์ไดแอเซทิลีนที่มีหมู่ไทออลเป็น 0, 5, 15, 25, 35, 50, 80, 100 และ 200 ไมโครลิตร และปรับเปลี่ยนปริมาณของซิงค์ออกไซด์เป็นร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักของ PCDA เพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิไดแอเซทิลีนและควบคุมการเปลี่ยนสีให้มีประสิทธิภาพสำหรับการใช้งานเป็นเซนเซอร์ตรวจวัดฟอร์มาลิน จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางแสง และสมบัติเชิงเซนเซอร์ของสารละลายวัสดุผสม PDA/PDA-SH/ZnO พบว่าสารละลายที่เตรียมโดยใช้ปริมาตร PCDA-SH 15 ไมโครลิตร และปริมาณของซิงค์ออกไซด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีความเหมาะสมสำหรับการสร้างเซนเซอร์ เนื่องจากให้ผลการตอบสนองต่อฟอร์มาลินที่ความเข้มข้น 1000 พีพีเอ็ม สูงที่สุดเมื่อเทียบกับอัตราส่วนผสมอื่น ขนาดอนุภาคของสารละลาย PDA/PDA-SH/ZnO เวสิเคิลสัมพันธ์กับการตอบสนองการเปลี่ยนสีต่อฟอร์มาลิน นอกจากนี้พบว่าสารละลายวัสดุผสมมีความจำเพาะต่อการเลือกตอบสนองต่อฟอร์มาลินได้ดีมากกว่าสารทดสอบชนิดอื่น มี

ระยะเวลาในการตอบสนอง 90 นาที่ อุณหภูมิมีผลต่อการเปลี่ยนสีของสารละลายวัสดุผสม โดยเริ่มเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และเป็นการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้ และสารละลายวัสดุผสมเริ่มเกิดการเปลี่ยนสีที่ค่าพีเอชต่ำกว่า 5

เมื่อทดสอบ PDA/PDA-SH/ZnO ด้วยฟอร์มาลินในช่วง 200 ถึง 1000 พีพีเอ็ม พบว่าสารละลายวัสดุผสมมีการเปลี่ยนแปลงสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงตามความเข้มข้นของฟอร์มาลินที่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับการวิเคราะห์เชิงปริมาณแสดงด้วยค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีโดยใช้เทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปีโดยการวัดการดูดกลืนแสง เมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสีด้วยภาพที่ได้จากกล้องถ่ายภาพบนโทรศัพท์เคลื่อนที่และสแกนเนอร์ร่วมกับโปรแกรมประมวลผลภาพ พบว่าให้ผลการวิเคราะห์ที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยความเข้มข้นต่ำสุดของฟอร์มาลินที่สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนสีด้วยตาเปล่าคือ 200 พีพีเอ็ม แสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์โดยการอ่านค่าความเข้มสีผ่านโปรแกรม MATLAB® software และใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่เป็นอุปกรณ์ช่วยมีประสิทธิภาพเทียบเคียงกับวิธีมาตรฐาน ดังนั้นสารละลายวัสดุผสม PDA/PDA-SH/ZnO สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ในการตรวจวัดฟอร์มาลินเบื้องต้นในตัวอย่างที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบหลักในสิ่งแวดล้อมได้ และเหมาะแก่การนำไปใช้งานในภาคสนาม ผลการวิจัยในบทวิจัยนี้เป็นความรู้พื้นฐานที่สำคัญในการออกแบบโครงสร้างของพอลิไดแอเซทิลีนเพื่อให้มีคุณสมบัติการเปลี่ยนสีได้ตามต้องการ

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาและพัฒนาเซนเซอร์ตรวจวัดการเปลี่ยนสีด้วยพอลิไดแอเซทิลีน และวัสดุผสมระหว่างพอลิไดแอเซทิลีนและซิงค์ออกไซด์ โดยเลือกใช้ 10,12-เพนตะโคเซไดอายนิกแอซิดเป็นสารตั้งต้น ปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของซิงค์ออกไซด์ให้มีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานตรวจวัดแอมโมเนียและฟอร์มาลีนในรูปของเหลวและแก๊ส โดยเซนเซอร์ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงสีได้รับการพัฒนาทั้งในรูปแบบสารละลายและฟิล์มบาง และตรวจวัดการเปลี่ยนสีด้วยสเปกตรัมการดูดกลืนแสงการวิเคราะห์ภาพถ่ายจากเครื่องสแกนเนอร์และกล้องถ่ายรูป ในงานวิจัยแบ่งเซนเซอร์ออกเป็น 3 กลุ่ม คือ สารละลายพอลิไดแอเซทิลีนสำหรับตรวจวัดแอมโมเนียในรูปของเหลว ฟิล์มวัสดุผสมระหว่างพอลิไดแอเซทิลีนและซิงค์ออกไซด์สำหรับตรวจวัดแอมโมเนียในรูปแก๊ส และสารละลายวัสดุผสมระหว่างพอลิไดแอเซทิลีน พอลิไดแอเซทิลีนที่มีหมู่ไทออลและซิงค์ออกไซด์สำหรับตรวจวัดฟอร์มาลีนในรูปของเหลว ดังแสดงในภาพที่ 6.1

Sensing Material	Sensor format	Properties (color transition temperature)	Target analytes	Detection mechanism
PDA	Solution	irreversible thermochromism color change at 40 °C	Dissolved ammonia in aqueous solution (in the range of 5-200 ppm)	
PDA/ZnO-embedded PDMS	Film	irreversible thermochromism color change at 120 °C	Gas ammonia (in the range of 20-1000 ppm) and Food spoilage detection (chicken and pork meat)	
PDA/PDA-SH/ZnO Thiol-Functionalized Polydiacetylene and Zinc Oxide Nanocomposites	Solution	reversible thermochromism color change at 100 °C	Dissolved formalin in aqueous solution (in the range of 200-1000 ppm)	

Poly(PCDA) → Poly(PCDA) + ammonia

Poly(PCDA)/ZnO/PDMS → Poly(PCDA)/ZnO/PDMS + ammonia gas

PDA/PDA-SH/ZnO → PDA/PDA-SH/ZnO + Formalin

ภาพที่ 6.1 ภาพสรุปผลการศึกษาและพัฒนาเซนเซอร์ตรวจวัดการเปลี่ยนสีด้วยพอลิไดแอเซทิลีน และวัสดุผสมระหว่างพอลิไดแอเซทิลีนและซิงค์ออกไซด์

6.1 เซนเซอร์ตรวจวัดสารละลายแอมโมเนียที่เตรียมจากพอลิไดแอเซทิลีนในรูปสารละลาย

สารละลายพอลิไดแอเซทิลีนในน้ำปราศจากไอออนที่เตรียมได้ปรากฏเป็นสีน้ำเงินเข้ม มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร การศึกษาสมบัติทางกายภาพของ

พอลิไดแอเซทิลีนพบว่าอนุภาคมีรูปร่างกลม มีขนาดอนุภาคประมาณ 220 นาโนเมตร และเปลี่ยนรูปร่างเป็นแบบแผ่นยาวเมื่อทดสอบด้วยสารละลายแอมโมเนีย โดยสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์ เป็นเซนเซอร์ที่เหมาะสมสำหรับตรวจวัดแอมโมเนีย ซึ่งให้ผลการตอบสนองต่อแอมโมเนียสูงสุดคือ 82.22 ± 0.63 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทดสอบแอมโมเนียความเข้มข้น 100 พีพีเอ็ม เซนเซอร์มีความจำเพาะต่อการเลือกตอบสนองต่อแอมโมเนียได้ดีกว่า ฟอร์มาลิน กรดซัลฟิวริก กรดอะซิติก โซเดียมไฮดรอกไซด์ เอทานอล เมทานอล ไอโซโพรพานอล และอะซิโตน มีระยะเวลาในการตอบสนองต่อแอมโมเนีย 120 นาที สามารถใช้งานได้อย่างน้อย 60 วัน ภายใต้การเก็บรักษาในที่มืดที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส อุณหภูมิห้องไม่มีผลต่อการเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีน โดยเกิดการเปลี่ยนเป็นสีแดงที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส

การทดสอบการเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนต่อแอมโมเนียความเข้มข้น 5 ถึง 200 พีพีเอ็ม พบว่าสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนมีการเปลี่ยนแปลงสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงตามความเข้มข้นของแอมโมเนียที่เพิ่มขึ้น โดยเกิดการเปลี่ยนสีในเฉดสีที่ต่างกัน เป็น 3 ระดับ คือ เฉดสีน้ำเงินที่สภาวะเริ่มต้น เฉดสีม่วงแดง (สารละลายแอมโมเนียความเข้มข้น 5 ถึง 20 พีพีเอ็ม) และเฉดสีแดง (สารละลายแอมโมเนียความเข้มข้นมากกว่า 60 พีพีเอ็ม) นอกจากนี้จากผลการศึกษาด้านเทคนิคการวิเคราะห์ทางสีด้วยภาพที่ได้จากสแกนเนอร์ร่วมกับโปรแกรมประมวลผลภาพโดยเปรียบเทียบกับเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปีซึ่งเป็นวิธีมาตรฐาน พบว่าการตรวจวัดการเปลี่ยนสีที่สัมพันธ์กับความเข้มข้นของแอมโมเนียมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าเทคนิคการวิเคราะห์ทางสีด้วยภาพที่ได้จากสแกนเนอร์มีศักยภาพในการนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัด เพื่อลดข้อจำกัดด้านการใช้เครื่องมือขั้นสูงที่มีราคาแพง และลดขั้นตอนที่ยุ่งยากซับซ้อน โดยไม่ต้องอาศัยทักษะหรือผู้เชี่ยวชาญในการตรวจวิเคราะห์ จากความรู้ดังกล่าวเป็นแนวทางที่ดีสำหรับการนำสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนไปประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ในการตรวจวัดแอมโมเนียในแหล่งน้ำเพื่อตรวจสอบคุณภาพน้ำร่วมกับการวิเคราะห์ผลภาพจากสแกนเนอร์ แสดงถึงความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ในอนาคตได้จริง

6.2 เซนเซอร์ตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียที่เตรียมจากวัสดุผสมระหว่างพอลิไดแอเซทิลีนและซิงค์ออกไซด์ในรูปฟิล์ม

ฟิล์มวัสดุผสมระหว่างพอลิไดแอเซทิลีนและซิงค์ออกไซด์ที่อยู่ในตัวกลางพอลิไดเมทิลไซโลเซน สำหรับตรวจวัดแก๊สแอมโมเนีย เตรียมโดยปรับเปลี่ยนปริมาณของซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ของ PCDA พบว่าฟิล์มวัสดุผสมที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 15 เปอร์เซ็นต์

โดยน้ำหนักของ PCDA เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมฟิล์มเซนเซอร์ เนื่องจากให้ผลการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียสูงที่สุด 1.96 ± 0.04 ด้วยการวิเคราะห์ภาพจากสแกนเนอร์ และ 5.46 ± 0.22 ด้วยการวิเคราะห์ภาพจากกล้องโทรศัพท์เคลื่อนที่ (แอมโมเนียความเข้มข้น 200 พีพีเอ็ม) เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่มีซิงค์ออกไซด์ในอัตราส่วนอื่น ฟิล์มเซนเซอร์ไม่เกิดการเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิ 27 ถึง 100 องศาเซลเซียส โดยฟิล์มเริ่มเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส และเกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับไม่ได้ เซนเซอร์ชนิดนี้จึงเหมาะสำหรับใช้งานในช่วงอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมจริง นอกจากนี้พบว่าฟิล์มเซนเซอร์ที่เตรียมได้มีความจำเพาะต่อการเลือกตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียได้ดีกว่าแก๊สทดสอบชนิดอื่น ฟิล์มสามารถใช้งานได้มากกว่า 30 วัน มีเสถียรภาพในการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียที่ดี และมีระยะเวลาในการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนีย 240 นาที

การตอบสนองการเปลี่ยนสีของฟิล์มวัสดุผสมพอลิไดแอเซทิลีนและซิงค์ออกไซด์ต่อแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 20 ถึง 1000 พีพีเอ็ม พบว่าฟิล์มเซนเซอร์มีการเปลี่ยนแปลงสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงตามความเข้มข้นของแก๊สแอมโมเนียที่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับการวิเคราะห์เชิงปริมาณแสดงด้วยค่าอัตราส่วนการเปลี่ยนสี โดยใช้การวิเคราะห์ทางสีด้วยภาพที่ได้จากเครื่องสแกนเนอร์และจากกล้องถ่ายภาพบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยความเข้มข้นต่ำสุดของแก๊สแอมโมเนียที่สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนสีด้วยตาเปล่าคือ 40 พีพีเอ็ม นอกจากนี้ฟิล์มเซนเซอร์สามารถเปลี่ยนสีตามระดับการเน่าเสียของเนื้อไก่และเนื้อหมูเพื่อบอกสถานะของเนื้อไก่และเนื้อหมูได้ แบ่งเป็น 3 ระดับคือ ปกติ ฟิล์มสีน้ำเงิน เน่าเสียเล็กน้อยถึงปานกลาง (เริ่มมีกลิ่น) ฟิล์มสีม่วง และเน่าเสียอย่างมาก (มีกลิ่นเหม็นรุนแรง) ฟิล์มสีแดง ซึ่งผลการตรวจวัดของฟิล์มเซนเซอร์สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าอย่างชัดเจนในตัวอย่างจริง จากความรู้ดังกล่าวเป็นก้าวสำคัญในการพัฒนาบรรจุภัณฑ์อัจฉริยะที่สามารถบ่งบอกระดับการเน่าเสียของเนื้อไก่และเนื้อหมูได้แบบ real-time เป็นนวัตกรรมที่เป็นประโยชน์ต่อผู้บริโภค

6.3 เซนเซอร์ตรวจวัดสารละลายฟอร์มาลินที่เตรียมจากวัสดุผสมระหว่างพอลิไดแอเซทิลีนพอลิไดแอเซทิลีนที่มีหมู่ไทออลและซิงค์ออกไซด์ในรูปสารละลาย

เซนเซอร์สารละลายวัสดุผสมพอลิไดแอเซทิลีน/พอลิไดแอเซทิลีนที่มีหมู่ฟังก์ชันนัลไทออล/ซิงค์ออกไซด์ในน้ำปราศจากไอออน สำหรับตรวจวัดฟอร์มาลินเตรียมโดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของอนุพันธ์ของไดแอเซทิลีนที่มีหมู่ไทออลและซิงค์ออกไซด์ พบว่าสารละลายที่เตรียมโดยใช้ปริมาตร PCDA-SH 15 ไมโครลิตร และปริมาณของซิงค์ออกไซด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ PCDA เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมในการเตรียมเป็นเซนเซอร์ โดยให้ผลการตอบสนองต่อฟอร์มาลิน

สูงสุดคือ 50.62 ± 1.69 เปอร์เซ็นต์ (ฟอร์มาลินความเข้มข้น 1000 พีพีเอ็ม) เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนอื่น แสดงให้เห็นว่าหมู่ที่ส่วนหัวของเวสิเคิลและการเพิ่มปฏิสัมพันธ์ระหว่างสายโซ่และภายในสายโซ่ของระบบเวสิเคิลมีผลต่อการเปลี่ยนสีของสารละลาย PDA/PDA-SH/ZnO นอกจากนี้ขนาดอนุภาคของสารละลาย PDA/PDA-SH/ZnO เวสิเคิล มีความสัมพันธ์กับการตอบสนองการเปลี่ยนสีต่อฟอร์มาลิน สารละลายวัสดุผสมที่เตรียมได้มีความจำเพาะต่อการเลือกตอบสนองต่อฟอร์มาลินได้ดีกว่า อะซีทัลดีไฮด์ แอมโมเนีย คลอรีนน้ำ กรดไฮโดรคลอริก กรดอะซิติก เมทานอล เอทานอล อะซิโตน และไอโซโพรพานอล มีระยะเวลาในการตอบสนองต่อฟอร์มาลิน 90 นาที เริ่มเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส โดยเกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้ จึงเหมาะสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิห้อง

การศึกษาผลการตอบสนองการเปลี่ยนสีของสารละลายวัสดุผสมพอลิไดแอเซทิลีน/พอลิไดแอเซทิลีนที่มีหมู่ฟังก์ชันนัลไทออล/ซิงค์ออกไซด์ต่อฟอร์มาลินความเข้มข้น 200 ถึง 1000 พีพีเอ็ม พบว่าสารละลายวัสดุผสมมีการเปลี่ยนแปลงสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงตามความเข้มข้นของฟอร์มาลิน สอดคล้องกับการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยใช้เทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปีวัดการดูดกลืนแสง เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ค่าสีจากภาพถ่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่และสแกนเนอร์ พบว่าให้ผลการวิเคราะห์ที่มีแนวโน้มในทางเดียวกัน โดยความเข้มข้นต่ำสุดของฟอร์มาลินที่สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนสีด้วยตาเปล่าคือ 200 พีพีเอ็ม ดังนั้นสารละลายวัสดุผสมสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ในการตรวจวัดฟอร์มาลินเบื้องต้นได้ และเหมาะแก่การนำไปใช้งานในภาคสนาม

6.4 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาและพัฒนาเซนเซอร์พอลิไดแอเซทิลีน และวัสดุผสมระหว่างพอลิไดแอเซทิลีนกับซิงค์ออกไซด์สำหรับประยุกต์เป็นเซนเซอร์ตรวจวัดทางเคมี พบว่างานวิจัยนี้มีแนวทางสำหรับการพัฒนาต่อยอด ดังนี้

6.4.1 ศึกษาและพัฒนาการเพิ่มประสิทธิภาพและสมบัติการเป็นเซนเซอร์สำหรับตรวจวัดแอมโมเนียและฟอร์มาลิน ในประเด็นของความไวในการตรวจวัด (sensitivity)

6.4.2 ศึกษาและพัฒนากระบวนการประมวลผลและแสดงผลของการตรวจวัดสำหรับการใช้งานเซนเซอร์บนแท็บเล็ตหรือโทรศัพท์เคลื่อนที่

6.4.3 ศึกษาและออกแบบโครงสร้างของพอลิไดแอเซทิลีนอื่นเพื่อทำให้มีคุณสมบัติการเปลี่ยนสีได้ตามต้องการ ในการนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นเซนเซอร์ตรวจวัดต่าง ๆ

รายการอ้างอิง

หนังสือและบทความในหนังสือ

- Beer P.D., Gale P.A., and Smith D.K., “Supramolecular Chemistry”, New York: Oxford University Press, **1999**.
- Bloor D., and Chance R.R., “Polydiacetylenes: Synthesis, Structure, and Electronic Properties”, Dordrecht: Martinus Nijhoff, **1985**.
- Burger W., and Burge M.J., “Principles of Digital Image Processing”, London: Springer, **2009**.
- Giorgianni E.J., and Madden T.E., “Digital Color Management: Encoding Solutions”, United Kingdom: Wiley, **1998**.
- International Agency for Research on Cancer, “A Review of Human Carcinogens. Part F: Chemical Agents and Related Occupations”, France: Lyon, **2012**.
- Lehn J.M., “Supramolecular Chemistry: Concepts and Perspective”, Weinheim: VCH publisher, **1995**.
- Mark J.E., “Physical Properties of Polymers Handbook”, New York: Woodbury, **1996**.
- Sharma G., “Digital Color Imaging Handbook: Color Fundamentals for Digital Imaging”, New York: CRC, **2002**.
- Steed J.W., and Atwood J.L., “Supramolecular Chemistry”, England: John Wiley & Sons Ltd., **2002**.
- Zumdahl S.S., and Zumdahl S.A., “Chemistry (10th ed.)”, Cengage Learning: Thompson, **2010**.

บทความวารสาร

- Ahn D.J., Lee S., and Kim J., “Rational Design of Conjugated Polymer Supramolecules with Tunable Colorimetric Responses”, *Advanced Functional Materials*, **2009**, vol.19, pp.1483-1496.

- Ahn D. J., and Kim J. M., "Fluorogenic Polydiacetylene Supramolecules: Immobilization, Micropatterning, and Application to Label-Free Chemosensors", *Accounts of Chemical Research*, **2008**, vol.41, no.7, pp.805-816.
- Algar W.R., Jong C.A.G.D., Maxwell E.J., and Atkins C.G., "Demonstration of The Spectrophotometric Complementary Color Wheel Using LEDs and Indicator Dyes", *Journal Chemical Education*, **2016**, vol.93, pp.162-165.
- Altintas Z., Akgun M., Kokturk G., and Uludag Y., "A fully Automated Mmicrofluidic-Based Electrochemical Sensor for Real-Time Bacteria Detection", *Biosensors and Bioelectronics*, **2018**, vol.100, pp.541-548.
- Azzam K. A. Al, Makahleh A., and Saad B., "HPLC Determination of Formaldehyde in Flour Samples Using 2,4,6-Trichlorophenyl Hydrazine as Derivatization Reagent", *Asian Journal of Chemistry*, **2021**, vol.33, no.4, pp.930-936.
- Barandun G., Soprani M., Naficy S., Grell M., Kasimatis M., Chiu K. L., Ponzoni A., and Güder F., "Cellulose Fibers Enable Near-Zero-Cost Electrical Sensing of Water-Soluble Gases", *ACS Sensors*, **2019**, vol.4, no.6, pp.1662-1669.
- Barratt R.S., "The Preparation of Standard Gas Mixtures. A Review", *The Analyst*, **1981**, vol.106, no.1265, pp.817-849.
- Belman S., "The Fluorimetric Determination of Formaldehyde", *Analytica Chimica Acta*, **1963**, vol.29, pp.120-126.
- Birch N.C., and Stickle D.F., "Example of Use of A Desktop Scanner for Data Acquisition in A Colorimetric Assay", *Clinica Chimica Acta*, **2003**, vol.333, pp.95-96.
- Byrne L., Barker J., Pennarun-Thomas G., Diamond D., and Edwards S., "Digital Imaging as A Detector for Generic Analytical Measurements", *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, **2000**, vol.19, no.8, pp.517-522.
- Cantrell K., Erenas M.M., Orbe-Payá I.de., and Capitán-Vallvey L.F., "Use of The Hue Parameter of The Hue, Saturation, Value Color Space as A Quantitative Analytical Parameter for Bitonal Optical Sensors", *Analytical Chemistry*, **2010**, vol.82, no.2, pp.531-542.

- Carpick R.W., Sasaki D.Y., Marcus M.S., Eriksson M.A., and Burns A.R., "Polydiacetylene Films: A Review of Recent Investigations into Chromogenic Transitions and Nanomechanical Properties", *Journal of Physics: Condensed Matter*, **2004**, vol.16, no.23, pp.679–697.
- Champaiboon T., Tumcharern G., Potisatityuenyong A., Wacharasindhu S., and Sukwattanasinitt M., "A Polydiacetylene Multilayer Film for Naked Eye Detection of Aromatic Compounds", *Sensors and Actuators B*, **2009**, vol.139, no.2, pp.532–537.
- Chan W.H., and Xie Ty., "Determination of Sub-ppbv Levels of Formaldehyde in Ambient Air Using Girard's Reagent T-Coated Glass Fiber Filters and Adsorption Voltammetry", *Analytical Chimica Acta*, **1997**, vol.349, pp.349-357.
- Chanakul A., Traiphol N., and Traiphol R., "Controlling The Reversible Thermochromism of Polydiacetylene/Zinc Oxide Nanocomposites by Varying Alkyl Chain Length", *Journal of Colloid and Interface Science*, **2013**, vol.389, no.1, pp.106-114.
- Chansuvarn W., "The Design of Chemosensors for Naked-Eye Detection of Mercury(II) Ion", *KKU Science Journal*, **2014**, vol.42, no.4, pp.748-760.
- Charoenthai N., Pattanatornchai T., Wacharasindhu S., Sukwattanasinitt M., and Traiphol R., "Roles of Head Group Architecture, Ethanol and pH", *Journal of Colloid and Interface Science*, **2011**, vol.360, no.2, pp.565-573.
- Charych D.H., Nagy J.O., Spevak W., and Bednarski M.D., "Direct Colorimetric Detection of A Receptor-Ligand Interaction by A Polymerized Bilayer Assembly", *Science*, **1993**, vol.261, pp.585–588.
- Chen J., Gu J., Zhang R., Mao Y., and Tian S., "Freshness Evaluation of Three Kinds of Meats Based on the Electronic Nose", *Sensors*, **2019**, vol.19, no.3, pp.605.
- Chen N.H., Djoko K.Y., Veyrier F.J., and McEwan A.G., "Formaldehyde Stress Responses in Bacterial Pathogens", *Frontiers in Microbiology*, **2016**, vol.7, pp.257.
- Chen X., Kang S., Kim M.J., Kim J., Kim Y.S., Kim H., Chi B., Kim S.J., Lee J.Y., and Yoon J., "Thin-Film Formation of Imidazolium-Based Conjugated Polydiacetylenes and Their Application for Sensing Anionic Surfactants", *Angewandte Chemie International Edition*, **2010**, vol.49, no.8, pp.1422-1425.

- Choodum A., and Daeid N.N., “Rapid and Semi-Quantitative Presumptive Tests for Opiate Drugs”, *Talanta*, **2011**, vol.86, pp.284-292.
- Choodum A., Kanatharana P., Wongniramaikul W., and NicDaeid N., “Rapid Quantitative Colourimetric Tests for Trinitrotoluene (TNT) In Soil”, *Forensic Science International*, **2012**, vol.222, pp.340-345.
- Choodum A., Kanatharana P., Wongniramaikul W., and NicDaeid N., “Using The Iphone as A Device for A Rapid Quantitative Analysis of Trinitrotoluene in Soil”, *Talanta*, **2013**, vol.115, pp.143-149.
- Dossa G.G.O., Paudel E., Wang H., Cao K, Schaefer D., and Harrison R.D., “Correct Calculation of CO₂ Efflux Using A Closed-Chamber Linked to A Non-Dispersive Infrared Gas Analyzer”, *Methods in Ecology and Evolution*, **2015**, vol.6, pp.1435-1442.
- Eckhardt H., Boudreaux D.S., and Chance R.R., “Effects of Substituent-Induced Strain on The Electronic Structure of Polydiacetylenes”, *The Journal of Chemical Physics*, **1986**, vol.85, no.7, pp.4116-4119.
- Edita R., Darius G., Vinauskiene R., Eisinaite V., Balčiunas G., Dobiliene J., and Tamkute L., “Rapid Evaluation of Fresh Chicken Meat Quality by Electronic Nose”, *Czech Journal of Food Sciences*, **2018**, vol.36, no.5, pp.420-426.
- Epperson P.M., Sweedler J.V., Bilhorn R.B., Sims G.R., and Denton M.B., “High Performance Charge Transfer Device Detectors”, *Analytical Chemistry*, **1988**, vol.60, no.4, pp.282A-291A.
- Erna K. H., Rovina K., and Mantihal S., “Current Detection Techniques for Monitoring the Freshness of Meat-Based Products: A Review”, *Journal of Packaging Technology and Research*, **2021**, vol.5, no.3, pp.127-141.
- Feng H., Lu J., Li J., Tsow F., Forzani E., and Tao N., “Hybrid Mechanoresponsive Polymer Wires Under Force Activation”, *Advanced Materials*, **2013**, vol.25, no.12, pp.1729-1733.
- Feng Y., Xie L., Chen Q., and Zheng L., “Low-Cost Printed Chipless RFID Humidity Sensor Tag for Intelligent Packaging”, *IEEE Sensors Journal*, **2015**, vol.15, no.6, pp.3201-3208.

- Ferguson C.G., James R.D., Bigman C.S., Shepard D.A., Abdiche Y., Katsamba P.S., Myszkowski D.G., and Prestwich G.D., "Phosphoinositide-Containing Polymerized Liposomes: Stable Membrane-Mimetic Vesicles for Protein-Lipid Binding Analysis", *Bioconjugate Chemistry*, **2005**, vol.16, no.6, pp.1475-1483.
- Fernández-Salmerón J., Rivadeneyra A., Rodríguez M. A. C., Capitan-Vallvey L. F., and Palma A. J., "HF RFID Tag as Humidity Sensor: Two Different Approaches", *IEEE Sensors Journal*, **2015**, vol.15, no.10, pp.5726-5733.
- Gou M., Guo G., Zhang Juan, Men Ke, Song Jia, Luo F., Zhao Xia, Qian Z., Qian Z., and Wei Y., "Time-Temperature Chromatic Sensor Based on Polydiacetylene (PDA) Vesicle and Amphiphilic Copolymer", *Sensors and Actuators B: Chemical*, **2010**, vol.150, no.1, pp.406-411.
- Griffith M.J., Cottam S., Stamenkovic J., Posar J.A., and Petasecca M., "Printable Organic Semiconductors for Radiation Detection: From Fundamentals to Fabrication and Functionality", *Frontiers in Physics*, **2020**, vol.8, pp.1-21
- Gui M., Liu L., Wu R., Hu J., Wang S., and Li P., "Detection of New Quorum Sensing *N*-Acyl Homoserine Lactones from *Aeromonas veronii*", *Original Research*, **2018**, vol.9, pp.1712.
- Hankin S.H.W., Downey M.J., and Sandman D.J., "On The Structural Origins of Solid-State Urethane Polydiacetylene Thermochromism: Thermal and Structural Properties of IPUDO Monomer and Polymer", *Polymer*, **1992**, vol.33, no.23, pp.5098-5101.
- Hoshika Y., Imamura T., Muto G., Vangemert L.J., Don J.A., and Walpot J.I., "International Comparison of Odor Threshold Values of Several Odorants in Japan and in The Netherlands", *Environmental Research*, **1993**, vol.61, no.1, pp.78-83.
- Hu B., Sun S., Wu B., and Wu P., "Colloidally Stable Monolayer Nanosheets with Colorimetric Responses", *Small*, **2019**, vol.15, no.5, pp.1804975.
- Hu W., Wang D., and Li G., "HPLC Method for Determining the Formaldehyde Content of Beer", *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, **2015**, vol.73, pp.124-129.

- Huang X., Jiang S., and Liu M., “Metal Ion Modulated Organization and Function of The Langmuir-Blodgett Films of Amphiphilic Diacetylene: Photopolymerization, Thermochromism, and Supramolecular Chirality”, *Journal of Physical Chemistry B*, **2005**, vol.109, pp.114-119.
- Jannah F., and Kim J.-M., “pH-Sensitive Colorimetric Polydiacetylene Vesicles for Urease Sensing”, *Dyes and Pigments*, **2019**, vol.169, pp.15-21.
- Jayawardane B.M., McKelvie I., and Kolev S., “A Paper-Based Device for Measurement of Reactive Phosphate in Water”, *Talanta*, **2012**, vol.100, pp.454-460.
- Jayawardane B.M., Wei S., McKelvie I.D., and Kolev S.D., “Microfluidic Paper-Based Analytical Device for The Determination of Nitrite and Nitrate”, *Analytical Chemistry*, **2014**, vol.86, pp.7274-2579.
- Jayawardane B.M., Wongwilai W., Grudpan K., Kolev S.D., Heaven M.W., Nash D.M., and McKelvie I.D., “Evaluation and Application of A Paper-Based Device for The Determination of Reactive Phosphate in Soil Solution”, *Journal of Environmental Quality*, **2014**, vol.43, no.3, pp.1081-1085.
- Jelinek R., and Ritenberg M., “Polydiacetylenes – Recent Molecular Advances and Applications”, *RSC Advances*, **2013**, vol.3, pp.21192–21201.
- Ji E.K., Ahn D.J., and Kim J.M., “The Fluorescent Polydiacetylene Liposome”, *Bulletin of the Korean Chemical Society*, **2003**, vol.24, pp.667-670.
- Jia C., Tang J., Lu S., Han Y., and Huang H., “Enhanced Sensitivity for Hydrogen Peroxide Detection: Polydiacetylene Vesicles with Phenylboronic Acid Head Group”, *Journal of Fluorescence*, **2015**, vol.26, no.1, pp.121-127.
- Kataky R., Bryce M.R., Goldenberg L., Hayes S., and Nowak A., “A Biosensor for Monitoring Formaldehyde Using a New Lipophilic Tetrathiafulvalene-Tetracyanoquino-Dimethane Salt and a Polyurethane Membrane”, *Talanta*, **2002**, vol.56, pp.451-458.
- Kawamura K., Kerman K., Fujihara M., Nagatani N., Hashiba T., and Tamiya E., “Development of a Novel Hand-Held Formaldehyde Gas Sensor for The Rapid Detection of Sick Building Syndrome”, *Sensors and Actuators B*, **2005**, vol.105, pp.495-501.

- Kew S.J., and Hall E.A.H., “pH Response of Carboxy-Terminated Colorimetric Polydiacetylene Vesicles”, *Analytical Chemistry*, **2006**, vol.78, no.7, pp.2231–2238.
- Kim J.-M., Lee Y.B., Chae S.K., and Ahn D.J., “Patterned Color and Fluorescent Images with Polydiacetylene Supramolecules Embedded In Poly(vinyl alcohol) Films”, *Advanced Functional Materials*, **2006**, vol.16, pp.2103-2109.
- Kim J.-M., Lee J.-S., Choi H., Sohn D., and Ahn D.J., “Rational Design and in-Situ FTIR Analyses of Colorimetrically Reversible Polydiacetylene Supramolecules”, *Macromolecules*, **2005**, vol.38, no.22, pp.9366–9376.
- Korpan Y.I., Gonchar M.V., Sibirny A.A., Martelet C., Elskaya A.V., Gibson T.D., and Soldatkin A.P., “Development of Highly Selective and Stable Potentiometric Sensors for Formaldehyde Determination”, *Biosensors and Bioelectronics*, **2000**, vol.15, pp.77-83.
- Kwon Y. K., Jung J. M., and Lee K. H., “Preparation of Polydiacetylene-Attached TiO₂ Nanoparticles”, *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, **2007**, vol.463, no.1, pp. 263-269.
- LeDuy A., and Samson R., “Testing of an Ammonia Ion Selective Electrode for Ammonia Nitrogen Measurement in The Methanogenic Sludge”, *Biotechnology Letters*, **1982**, vol.4, no.5, pp.303-306.
- Lee S., and Kim J.-M., “ α -Cyclodextrin: A Molecule for Testing Colorimetric Reversibility of Polydiacetylene Supramolecules”, *Macromolecules*, **2007**, vol.40, no.26, pp.9201-9204.
- Lee S.B., Koepsel R.R., and Russell A.J., “Surface Dispersion and Hardening of Self-Assembled Diacetylene Nanotubes”, *Nano Letters*, **2005**, vol.5, no.11, pp.2202-2206.
- Lee J., Pyo M., Lee S. H., Kim J., Ra M., Kim W. Y., Park B.J., Lee C. W., and Kim J.M., “Hydrochromic Conjugated Polymers for Human Sweat Pore Mapping”, *Nature Communications*, **2014**, vol.5, no.1, pp.3736-3746.

- Liu J., Kelley M.S., Wu W., Banerjee A., Douvalis A.P., Wu, J., Zhang Y., Schatz G.C., and Kanatzidis M.G., “Nitrogenase-Mimic Iron-Containing Chalcogels for Photochemical Reduction of Dinitrogen to Ammonia”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **2016**, vol.113, no.20, pp.5530-5535.
- Liufu S.-C., Xiao H.-N., and Li Y.-P., “Investigation of PEG Adsorption on The Surface of Zinc Oxide Nanoparticles”, *Powder Technology*, **2004**, vol.145, no.1, pp.20-24.
- Liufu S.-C., Xiao H.-N., and Li Y.-P., “Adsorption of MA-Na Copolymer at The ZnO-Aqueous Solution Interface”, *Materials Chemistry and Physics*, **2006**, vol.95, no.1, pp.117-121.
- Máñez R.M., and Sancenón F., “Fluorogenic and Chromogenic Chemosensors and Reagents for Anions”, *Chemical Reviews*, **2003**, vol.103, no.11, pp.4419-4476.
- Masawat P., Harfield A., and Namwong A., “An iPhone-Based Digital Image Colorimeter for Detecting Tetracycline in Milk”, *Food Chemistry*, **2015**, vol.184, pp.23-29.
- Matindoust S., Farzi A., Baghaei Nejad M., Shahrokh Abadi M. H., Zou Z., and Zheng L.R., “Ammonia Gas Sensor Based on Flexible Polyaniline Films for Rapid Detection of Spoilage in Protein-Rich Foods”, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, **2017**, vol.28, no.11, pp.7760-7768.
- Mergu N., and Son Y.-A., “Design and Synthesis of Polydiacetylenes, and Their Low Temperature Irreversible Thermochromic Properties”, *Dyes and Pigments*, **2021**, vol.184, pp. 108839.
- Mills A. and Chang Q., “Fluorescence Plastic Thin-Film Sensor for Carbon Dioxide”, *Analyst*, **1993**, vol.118, no.7, pp.839-843.
- Mino N., Tamura H., and Ogawa K., “Analysis of Color Transitions and Changes on Langmuir-Blodgett Films of A Polydiacetylene Derivative”, *Langmuir*, **1991**, vol.7, no.10, pp.2336-2341.
- Morsy M. K., Zór K., Kostasheva N., Alstrøm T. S., Heiskanen A., El-Tanahi H., Sharoba A., Papkovsky D., Larsen J., Khalaf H., Jakobsen M. H., and Emnéus J., “Development and Validation of a Colorimetric Sensor Array for Fish Spoilage Monitoring”, *Food Control*, **2016**, vol.60, pp.346-352.
- Nagao M., “Physisorption of Water on Zinc Oxide Surface”, *The Journal of Physical Chemistry*, **1971**, vol.75, no.25, pp.3822-3828.

- Naorungroj S., Teengam P., Vilaivan T., and Chailapakul O., "Paper-Based DNA Sensor Enabling Colorimetric Assay Integrated with Smartphone for Human Papillomavirus Detection", *New Journal of Chemistry*, **2021**, vol.45, no.15, pp.6960-6967.
- Narkwiboonwong P., Tumcharern G., Potisatityuenyong A., Wacharasindhu S., and Sukwattanasinitt M., "Aqueous Sols of Oligo(ethylene glycol) Surface Decorated Polydiacetylene Vesicles for Colorimetric Detection of Pb^{2+} ", *Talanta*, **2011**, vol.83, no.3, pp.872-878.
- Nash T., "The Colorimetric Estimation of Formaldehyde by Means of The Hantzsch Reaction", *Biochemical Journal*, **1953**, vol.55, pp.416-21.
- Nguyen L.H., Naficy S., McConchie R., Dehghani F., and Chandrawati R., "Polydiacetylene-Based Sensors to Detect Food Spoilage at Low Temperatures", *Journal of Materials Chemistry C*, **2019**, vol.7, no.7, pp.1919-1926.
- Nguyen L.H., Oveissi F., Chandrawati R., Dehghani F., and Naficy S., "Naked-Eye Detection of Ethylene Using Thiol Functionalized Polydiacetylene-Based Flexible Sensors", *ACS Sensors*, **2020**, vol.5, no.7, pp.1921-1928.
- Nie W., Chen Y., Zhang H., Liu J., Peng Z., and Li Y., "A Novel Colorimetric Sensor Array for Real-Time and On-Site Monitoring of Meat Freshness", *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, **2022**, vol.414, no.20, pp.6017-6027.
- Nopwinyuwong A., Boonsupthip W., Pechyen C., and Suppakul P., "Formation of Polydiacetylene/Silica Nanocomposite as a Colorimetric Indicator: Effect of Time and Temperature", *Advances in Polymer Technology*, **2013**, vol.32, no.S1, pp.E724-E731.
- Nuck J., and Sugihara K., "Mechanism of Polydiacetylene Blue-to-Red Transformation Induced by Antimicrobial Peptides", *Macromolecules*, **2020**, vol.53, no.15, pp.6469-6475.
- Okada S., Peng S., Spevak W., and Charych D.H., "Color and chromism of polydiacetylene vesicles", *Accounts of Chemical Research*, **1998**, vol.31, no.5, pp.229-239.

- Orchard B.J., and Tripathy S.K., “Electronic Structure and Property Modification of Poly(diacetylenes)”, *Macromolecules*, **1986**, vol.19, no.7, pp.1844-1851.
- Park H., Lee J.-S., Choi H., Anh D.J., and Kim J.-M., “Rational Design of Supramolecular Conjugated Polymers Displaying Unusual Colorimetric Stability upon Thermal Stress”, *Advanced Functional Materials*, **2007**, vol.17, no.17, pp.3447-3455.
- Park S., Lee G, Sun C., Chunzhi A., and Dong J., “Simple Detection of Food Spoilage Using Polydiacetylene/Poly(Vinyl Alcohol) Hybrid Films”, *Macromolecular Research*, **2016**, vol.24, no.4, pp.380-384.
- Peng H., Tang J., Pang J., Chen D., Yang L., Ashbaugh H.S., Brinker C.J., Yang Z., and Lu T., “Polydiacetylene/Silica Nanocomposites with Tunable Mesosstructure and Thermochromatism from Diacetylenic Assembling Molecules”, *Journal of the American Chemical Society*, **2005**, vol.127, no.37, pp.12782-12783.
- Peng H., Tang J., Yang L., Pang J., Ashbaugh H.S., Brinker C.J., Yang Z., and Lu Y., “Responsive Periodic Mesoporous Polydiacetylene/Silica Nanocomposites”, *Journal of the American Chemical Society*, **2006**, vol.128, no.16, pp.5304-5305.
- Petričević S., Marušić Radovčić N., Lukić K., Listeš E., and Medić H., “Differentiation of Dry-Cured Hams from Different Processing Methods by Means of Volatile Compounds, Physico-Chemical and Sensory Analysis”, *Meat Science*, **2018**, vol.137, pp.217-227.
- Phonchai N., Khanantong C., Kielar F., Traiphon R., and Traiphon N., “Enhancing Thermal and Chemical Sensitivity of Polydiacetylene Colorimetric Sensors: The Opposite Effect of Zinc Oxide Nanoparticles”, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **2020**, vol.589, pp.124459.
- Phonchai N., Khanantong C., Kielar F., Traiphon R., and Traiphon N., “Low-Temperature Reversible Thermochromic Polydiacetylene/Zinc(II)/ZincOxide Nanocomposites for Colorimetric Sensing”, *ACS Applied Nano Materials*, **2019**, vol.2, pp.4489-4498.
- Pospíšilová M., Kuncová G., and Trögl J., “Fiber-Optic Chemical Sensors and Fiber-Optic Bio-Sensors” *Sensors*, **2015**, vol.15, no.10, pp.25208–25259.

- Potisatityuenyong A., Rojanathanes R., Tumcharern G., and Sukwattanasinitt M., “Electronic Absorption Spectroscopy Probed Side-Chain Movement in Chromic Transitions of Polydiacetylene Vesicles”, *Langmuir*, **2008**, vol.24, no.9, pp.4461–4463.
- Race A., Barford W., and Bursill R.J., “Low-Lying Excitations of Polydiacetylene”, *Physical Review B*, **2001**, vol.64, no.3, 035208(9).
- Rattanakaroonjit W., Meelapsom R., Supasorn S., and Jarujamrus P., “Use of Smartphone As Colorimetric Analyzer for Determination of Iron Ions in Water by Using Anthocyanin As The Indicator”, *Journal of Research Unit on Science, Technology and Environment for Learning*, **2020**, vol.11, no.1, pp.144-163
- Reppy M.A., and Pindzola B.A., “Biosensing with polydiacetylene materials: structures, optical properties and applications”, *Chemical Communications*, **2007**, vol.42, pp.4317–4338.
- Rungruangviriya N., and Traiphol N., “Versatile Route for Preparation of Polydiacetylene/ZnO Nanocomposites and Their Colorimetric Response to pH and Ethanol”, *Journal of Metals, Materials and Minerals*, **2010**, vol.20, no.2, pp.35-41.
- Saenz-García C.E., Castañeda-Serrano P., Mercado Silva E.M., Alvarado C.Z., and Nava G.M., “Insights into the Identification of the Specific Spoilage Organisms in Chicken Meat”, *Foods*, **2020**, vol.9, no.2, pp.225.
- Sagong H.Y., Son M.H., Park S.W., Kim J.S., Li T., and Jung Y.K., “Dual-Signal Optical Detection of Lead(II) Ions (Pb^{2+}) Using Galloyl Group-Functionalized Polydiacetylene”, *Analytica Chimica Acta*, **2022**, vol.1230, pp.340403.
- Seo D., and Kim J., “Effect of the Molecular Size of Analytes on Polydiacetylene Chromism”, *Advanced Functional Materials*, **2010**, vol.20, no.9, pp.1397-1403.
- Siribunbandal P., Kim Y.-H., Osotchan T., Zhu Z., and Jaisutti R., “Quantitative Colorimetric Detection of Dissolved Ammonia Using Polydiacetylene Sensors Enabled by Machine Learning Classifiers”, *ACS Omega*, **2022**, vol.7, no.22, pp.18714-18721.

- Su Y.L., "Preparation of Polydiacetylene/Silica Nanocomposite for Use as A Chemosensor", *Reactive & Functional Polymers*, **2006**, vol.66, no.9, pp.967-973.
- Sun X.M., Chen T., Huang S.Q., Cai F.J., Chen X.L., Yang Z.B., Li L., Cao H., Lu Y.F., and Peng H.S., "UV-Induced Chromatism of Polydiacetylenic Assemblies", *Journal of Physical Chemistry B*, **2010**, vol.114, no.7, pp.2379-2382.
- Suziki Y., Endo M., Jin J., Iwase K., and Iwatsuki M., "Tristimulus Colorimetry Using A Digital Still Camera and Its Application to Determination of Iron and Residual Chlorine in Water Samples", *Analytical Sciences*, **2006**, vol.22, pp.411-414.
- Tachibana H., Yamanaka Y., Sakai H., Abe M., and Matsumoto M., "Effect of Position of Butadiyne Moiety in Amphiphilic Diacetylenes on The Polymerization in The Langmuir–Blodgett Films", *Macromolecules*, **1999**, vol.32, no.25, pp.8306-8309.
- Thani M.Z., Al-Ameri S.A., and Sultan M.S., "Spectrophotometric Determination of Ponceau 4R in the Several Beverages Using Mixed Micelles after Cloud Point Extraction", *Journal of Al-Nahrain University*, **2018**, vol.21. no.1, pp.8-13.
- Thomas D.H., Rey M., and Jackson P.E., "Determination of Inorganic Cations and Ammonium in Environmental Waters by Ion Chromatography with A High-Capacity Cation-Exchange Column", *Journal of Chromatography A*, **2002**, vol.956, no.1-2, pp.181-186.
- Thompson B.C., Schottland P., Zong K.W., and Reynolds J.R., "In Situ Colorimetric Analysis of Electrochromic Polymers and Devices", *Chemistry of Materials*, **2000**, vol.12, no.6, pp.1563-1571.
- Tjandra A.D., Weston M., Junwei Tang J., Kuchel R.P., and Chandrawati R., "Solvent Injection for Polydiacetylene Particle Synthesis – Effects of Varying Solvent, Injection Rate, Monomers and Needle Size on Polydiacetylene Properties", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **2021**, vol.619, no.20, pp.126497

- Tokel O., Yildiz U. H., Inci F., Durmus N. G., Ekiz O. O., Turker B., Cetin C., Rao S., Sridhar K., Natarajan N., Shafiee H., Dana A., and Demirci U., “Portable Microfluidic Integrated Plasmonic Platform for Pathogen Detection”, *Scientific Reports*, **2015**, vol.5, no.1, pp.9152.
- Traiphol N., Chanakul A., Kamphan A. Traiphol R., “Role of Zn^{2+} Ion on The Formation of Reversible Thermochromic Polydiacetylene/Zinc Oxide Nanocomposites”, *Thin Solid Films*, **2017**, vol.622, pp.122-129.
- Traiphol N., Rungruangviriyana N., Potai R., and Traiphol R., “Stable Polydiacetylene/ZnO Nanocomposites with Two-Steps Reversible and Irreversible Thermochromism: The Influence of Strong Surface Anchoring”, *Journal of Colloid and Interface Science*, **2011**, vol.356, no.2, pp.481-489.
- Uppa Y., “Supramolecular Chemistry, Chemical Sensors”, *Rajamangala University of Technology Srivijaya Research Journal*, **2014**, vol.6, no.2, pp.82-89.
- Valdez M., Gupta S.K., Lozano K., and Mao Y., “ForceSpun Polydiacetylene Nanofibers as Colorimetric Sensor for Food Spoilage Detection”, *Sensors and Actuators B: Chemical*, **2019**, vol.297, 126734.
- Van Den Heuvel M., Löwik D.W.P.M., and Van Hest J.C.M., “Effect of The Diacetylene Position on The Chromatic Properties of Polydiacetylenes from Self-Assembled Peptide Amphiphiles”, *Biomacromolecules*, **2010**, vol.11, no.6, pp.1676-1683.
- Wacharasindhu S., Montha S., Boonyiseng J., Potisatityuenyong A., Phollookin C., Tumcharern G., and Sukwattanasinitt M., “Tuning of Thermochromic Properties of Polydiacetylene toward Universal Temperature Sensing Materials through Amido Hydrogen Bonding”, *Macromolecules*, **2010**, vol.43, no.2, pp.716-724.
- Wang W., Feng X., Zhang D., Li B., Sun B., Tian H., and Liu Y., “Analysis of Volatile Compounds in Chinese Dry-Cured Hams by Comprehensive Two-Dimensional Gas Chromatography with High-Resolution Time-of-Flight Mass Spectrometry”, *Meat Science*, **2018**, vol.140, pp.14-25.
- Wang L.H., Liu X.F., Yang Q., Fan Q.L., Song S.P., Fan C.H., and Huang W., “A Colorimetric Strategy Based on A Water-Soluble Conjugated Polymer for Sensing pH-Driven Conformational Conversion of DNA i-Motif Structure”, *Biosensors and Bioelectronics*, **2010**, vol.25, no.7, pp.1838-1842.

- Wang G., Nie X., Cheuk S., and Williams K., "Synthesis and Self-assembling Properties of Functionalized Glycolipids", *NSTI-Nanotech Proceedings*, **2006**, vol.2, pp.766-767.
- Wang D.E., Wang Y., Tian C., Zhang L., Han X., Tu Q., Yuan M., Chen S., and Wang J., "Polydiacetylene Liposome-Encapsulated Alginate Hydrogel Beads for Pb²⁺ Detection with Enhanced Sensitivity", *Journal of Materials Chemistry A*, **2015**, vol.3, no.43, pp.1-8.
- Wenz G., Mueller M. A., Schmidt M., and Wegner G., "Structure of Poly(diacetylenes) in Solution", *Macromolecules*, **1984**, vol.17, no.4, pp.837-850.
- Weston M., Kuchel R. P., and Chandrawati R., "Digital Analysis of Polydiacetylene Quality Tags for Contactless Monitoring of Milk", *Analytica Chimica Acta*, **2021**, vol.1148, pp.238190.
- Weston M., Kuchel R. P., Ciftci M., Boyer C., and Chandrawati R., "A Polydiacetylene-Based Colorimetric Sensor as an Active Use-by Date Indicator for Milk," *Journal of Colloid and Interface Science*, **2020**, vol.572, pp.31-38.
- Wojnowski W., Majchrzak T., Dymerski T., Gebicki J., and Namiesnik J., "Electronic Noses: Powerful Tools in Meat Quality Assessment", *Meat Science*, **2017**, vol.131, pp.119-131.
- Wu A., Gu Y., Tian H., Federici J.F., and Iqbal Z., "Effect of Alkyl Chain Length on Chemical Sensing of Polydiacetylene and Polydiacetylene/Zno Nanocomposites", *Colloid and Polymer Science*, **2014**, vol.292, no.12, pp.3137-3146.
- Wu S., Niu L., Shen J., Zhang Q., and Bubeck C., "Aggregation-Induced Reversible Thermochromism of Novel Azo Chromophore-Functionalized Polydiacetylene Cylindrical Micelles", *Macromolecules*, **2009**, vol.42, no.1, pp.362-367.
- Wu L., Pu H., and Sun D.-W., "Novel Techniques for Evaluating Freshness Quality Attributes of Fish: A Review of Recent Developments", *Trends in Food Science & Technology*, **2019**, vol.83, pp.259-273.
- Xiaoqiang Ch., and Juyoung Y., "A Thermally Reversible Temperature Sensor Based on Polydiacetylene: Synthesis and Thermochromic Properties", *Dyes and Pigments*, **2011**, vol.89, no.3, pp.194-198.

- Yimkaew W., Traiphol R., and Traiphol N., "Colorimetric Detection of Acid-Base in Organic Solvents, Water, and Food Products Using Polydiacetylene/Zn²⁺/ZnO Nanocomposites with Tunable Sensitivity", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **2022**, vol.652, pp.129856.
- Yoon B., Lee S., and Kim J.-M., "Recent Conceptual and Technological Advances in Polydiacetylene-Based Supramolecular Chemosensors", *Chemical Society Reviews*, **2009**, vol.38, pp.1958-1968.
- Yousefi H., Su H.-M., Imani S. M., Alkhalidi K., Filipe C. D. M., and Didar T. F., "Intelligent Food Packaging: A Review of Smart Sensing Technologies for Monitoring Food Quality", *ACS Sensors*, **2019**, vol.4, no.4, pp.808-821.
- Yuan Z., Lee C.-W., and Lee S.-H., "Reversible Thermochromism in Hydrogen-Bonded Polymers Containing Polydiacetylenes", *Angewandte Chemie International Edition*, **2004**, vol.43, no.32, pp.4197-4200.
- Yuan Z., Lee C.-W., and Lee S.-H., "Reversible Thermochromism in Self-Layered Hydrogen-Bonded polydiacetylene Assembly", *Polymer*, **2006**, vol.47, no.9, pp.2970-2975.
- Zhan X.-Q., Li D.-H., Zhu Q.-Z., Zheng H., and Xu J.-G., "Sensitive Fluorimetric Determination of Formaldehyde by The Co-Quenching Effect of Formaldehyde and Sulfite on The Fluorescence of Tetra-Substituted Amino Aluminium Phthalocyanine", *Analyst*, **2000**, vol.125, pp.2330-2334.
- Zhang Z., Wei T., Chen Y., Chen T., Chi B., Wang F., and Chen X., "A Polydiacetylenes-based Colorimetric and Fluorescent Probe for L-Arginine and L-Lysine and Its Application for Logic Gate", *Sensors and Actuators B: Chemical*, **2018**, vol.255, pp.2211-2217.
- Zhou L., and Boyd C.E., "Comparison of Nessler, Phenate, Salicylate and Ion Selective Electrode Procedures for Determination of Total Ammonia Nitrogen in Aquaculture", *Aquaculture Journal*, **2016**, vol.450, no.1, pp.187-193.
- Zhu Y., Yuan D., Lin H., and Zhou T., "Determination of Ammonium in Seawater by Purge-and-Trap and Flow Injection with Fluorescence Detection", *Analytical Letters*, **2015**, vol.49, no.5, pp.665-675.

วิทยานิพนธ์

เข็มจิรา มะลิซ้อน, “การพัฒนาชุดการทดลองวัดค่าการส่องผ่านและการกระเจิงแสงอย่างง่ายโดยใช้สมาร์ทโฟน”, วิทยานิพนธ์การศึกษามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, คณะวิทยาศาสตร์, สาขาวิชาฟิสิกส์, **2562**.

วิภาวี ปัญญานันทกิตติ์, “พอลิไดออกซีเทลิโน/ซิงค์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตฟิล์มและการตอบสนองด้านการตรวจวัดสี”, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, คณะวิทยาศาสตร์, สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์, **2558**.

สื่ออิเล็กทรอนิกส์

เรวัตร ใจสุทธิ, “ระบบตรวจวัดแก๊สแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับสอบเทียบคุณสมบัติของตัวตรวจรู้แก๊ส: รายงานฉบับสมบูรณ์”, สืบค้นเมื่อวันที่ 26 สิงหาคม 2564, จาก https://digital.library.tu.ac.th/tu_dc/frontend/Info/item/dc:177432, **2562**.

สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้, “สีและแสง การวัดและการดูกลืน”, สืบค้นเมื่อวันที่ 22 สิงหาคม 2564, จาก <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/color-light/content.html>, **2561**.

Environmental Protection Agency, “Final Aquatic Life Ambient Water Quality Criteria for Ammonia-Freshwater 2013”, สืบค้นเมื่อวันที่ 2 สิงหาคม 2565, จาก <https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2013-08-22/pdf/2013-20307.pdf>, **2013**.

Mehta A., “Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spectroscopy-Derivation of Beer-Lambert Law”, สืบค้นเมื่อวันที่ 25 สิงหาคม 2564, จาก <https://pharmaxchange.info/category/notes/analytical-chemistry>, **2012**.

Siyavula Education, “Absorption of light”, สืบค้นเมื่อวันที่ 22 สิงหาคม 2564, จาก <http://dixondraws.blogspot.com/p/color-studies-semester-1.html>, **2015**.

Thai Business Information Center in USA, “ไทยตกอันดับผู้ส่งออกอาหารโลก สถาบันอาหาร คาดปีนี้จะดีขึ้นหลังโควิด-19 ควบคุมได้”, สืบค้นเมื่อวันที่ 14 ตุลาคม 2564, จาก <https://www.thaibicusa.com/2021/03/11/foodsupply-covid>, **2021**.

The Institute for Reduction of Cognitive Entropy in Organic Chemistry, “Light Absorption of Conjugated Materials”, สืบค้นเมื่อวันที่ 13 สิงหาคม 2564, จาก <http://www.chem.ucla.edu>, **2021**.

University of Illinois Archives, “Absorption of Light by Organic Molecules”, สืบค้นเมื่อวันที่ 19 สิงหาคม 2564, จาก <https://archives.library.illinois.edu>, **1999**.

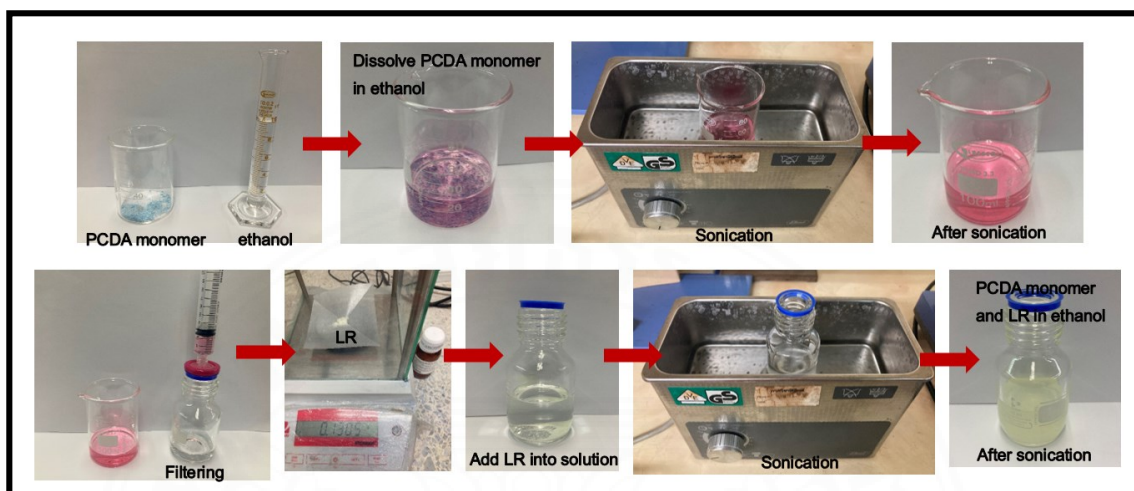




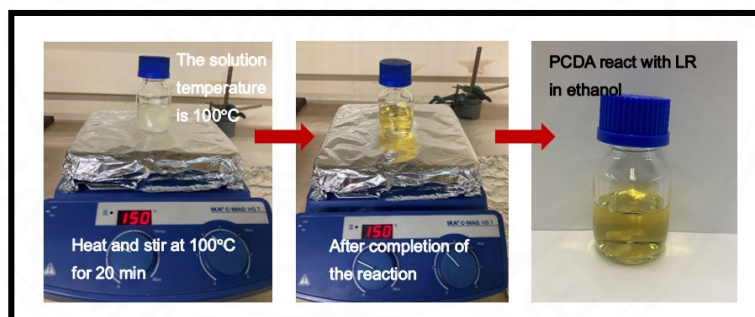
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

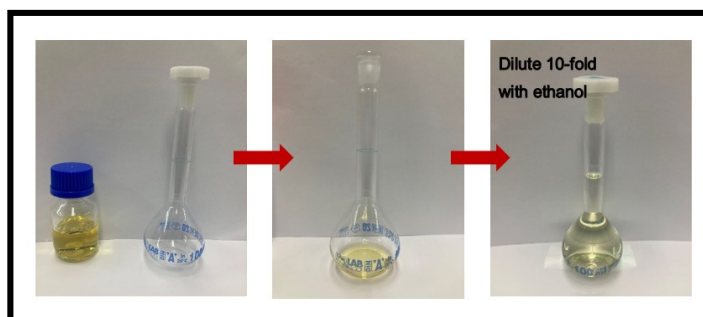
ภาพขั้นตอนการสังเคราะห์อนุพันธ์ของไดแอเซทิลีนที่มีหมู่ไทอล



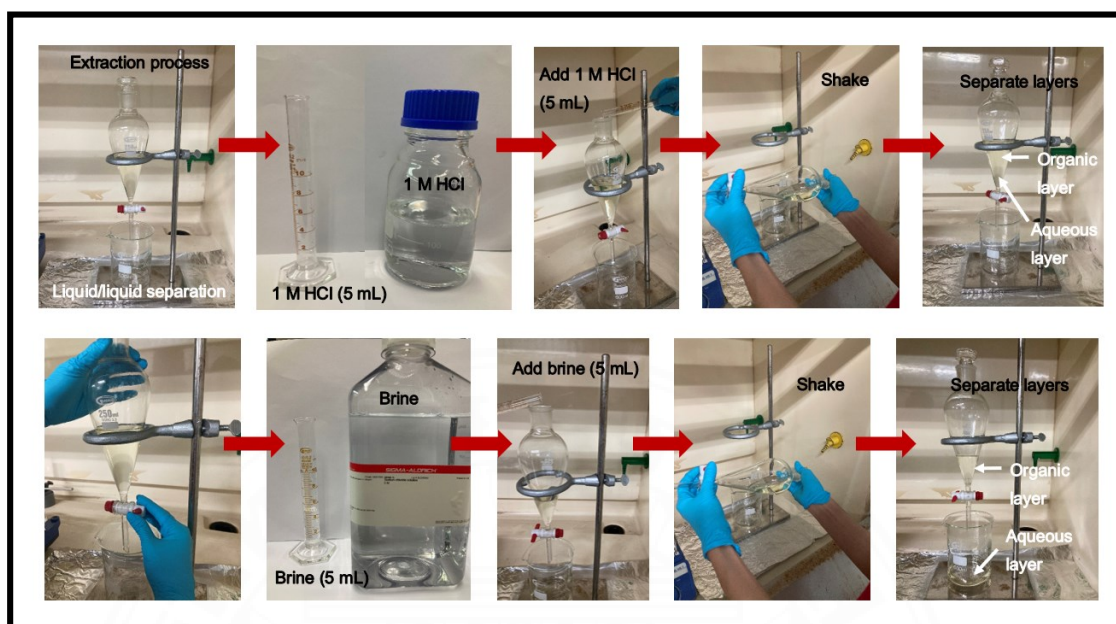
การผสม PCDA กับรีเอเจนต์ของลอร์สสันในเอทานอล



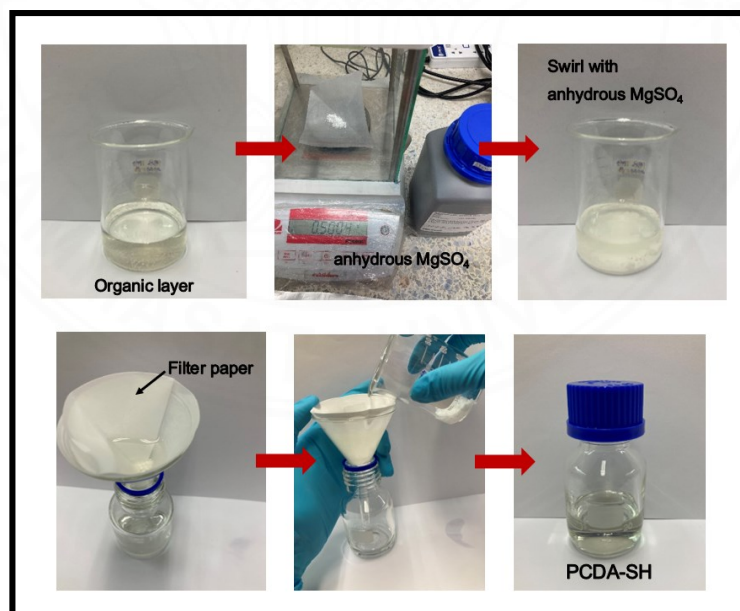
การทำปฏิกิริยาระหว่าง PCDA กับรีเอเจนต์ของลอร์สสันในเอทานอล



การเจือจางสารให้มีความเข้มข้นลดลงสิบเท่าด้วยเอทานอล



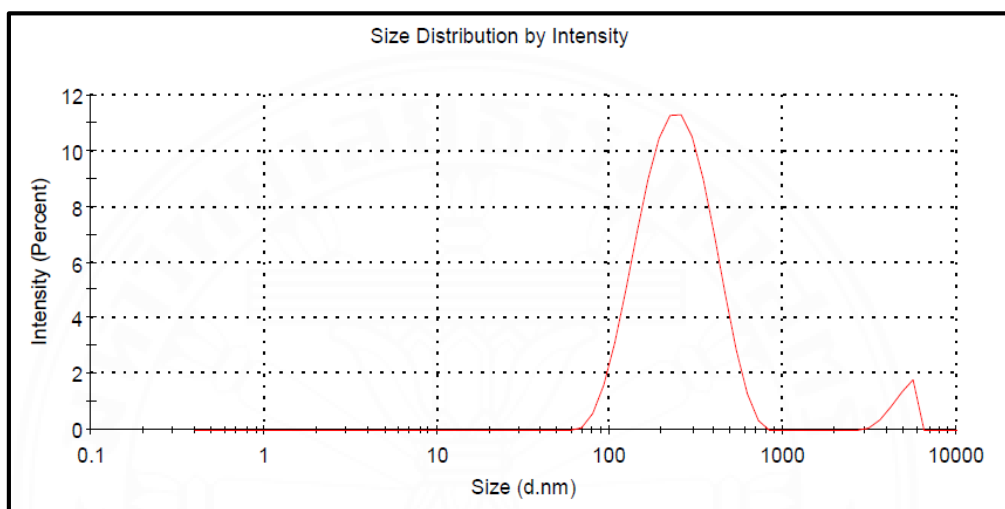
การสกัดแยกชั้นตัวทำละลายอินทรีย์ออกจากชั้นน้ำ



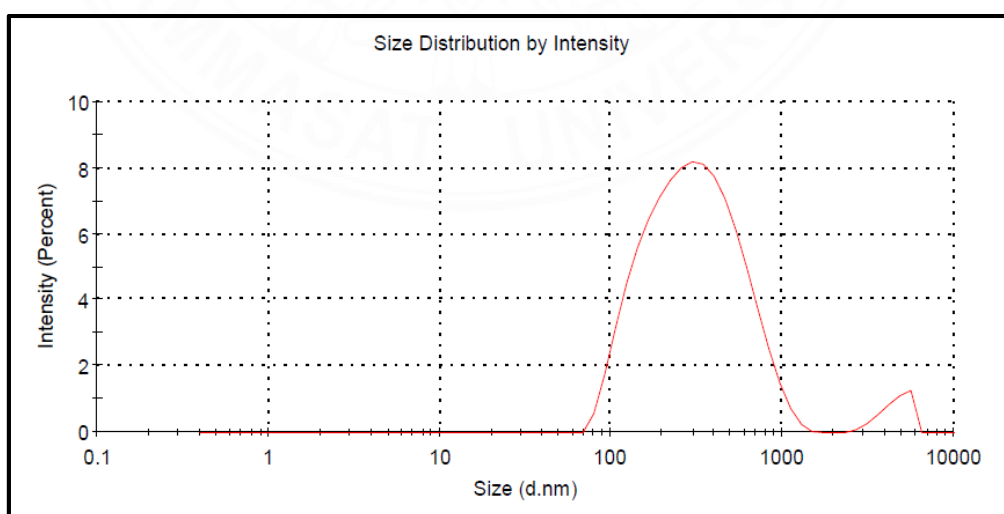
การกำจัดน้ำออกโดยใส่สารดูดน้ำและการกรองสารดูดน้ำออก

ภาคผนวก ข

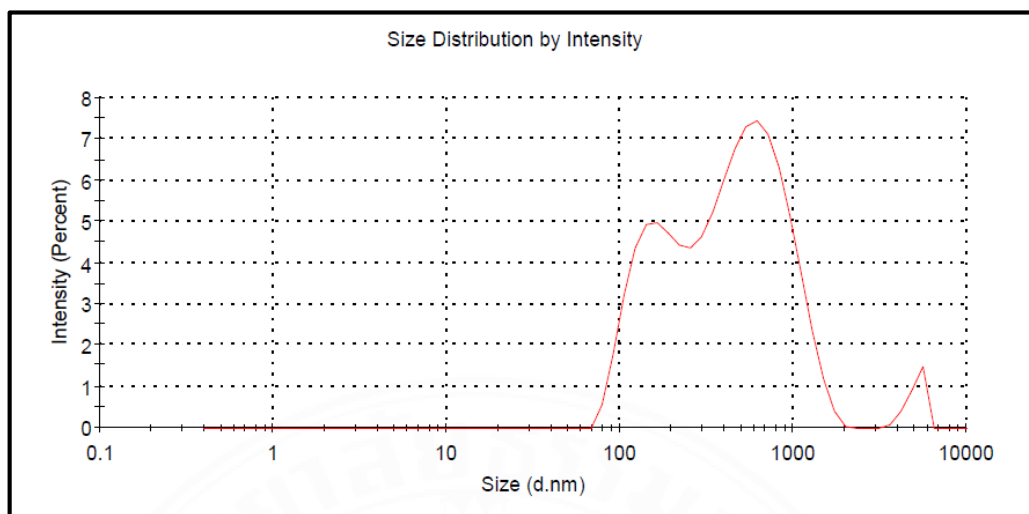
ขนาดและการกระจายขนาดอนุภาคของสารละลายวัสดุผสมระหว่าง
พอลิไดแอเซทิลีน พอลิไดแอเซทิลีนที่มีหมู่ไทออลและซิงค์ออกไซด์
ด้วยเทคนิคการกระเจิงของแสง



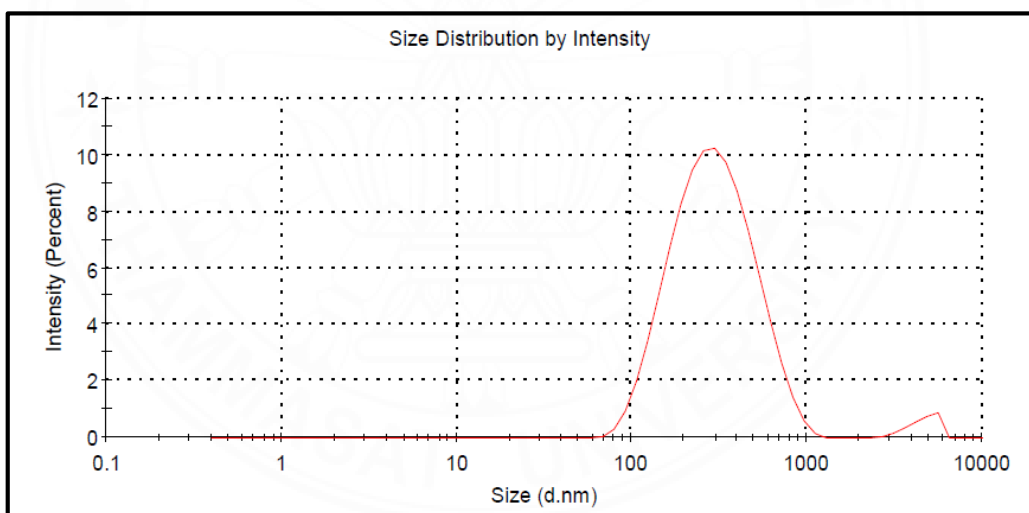
ขนาดและการกระจายขนาดของอนุภาคของ PDA/PDA-SH/ZnO ในน้ำปราศจากไอออน ที่เตรียม
โดยใช้ปริมาตร PCDA-SH 15 ไมโครลิตร และปริมาณของซิงค์ออกไซด์ 0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



ขนาดและการกระจายขนาดของอนุภาคของ PDA/PDA-SH/ZnO ในน้ำปราศจากไอออน ที่เตรียม
โดยใช้ปริมาตร PCDA-SH 15 ไมโครลิตร และปริมาณของซิงค์ออกไซด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



ขนาดและการกระจายขนาดของอนุภาคของ PDA/PDA-SH/ZnO ในน้ำปราศจากไอออน ที่เตรียมโดยใช้ปริมาตร PCDA-SH 15 ไมโครลิตร และปริมาณของซิงค์ออกไซด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



ขนาดและการกระจายขนาดของอนุภาคของ PDA/PDA-SH/ZnO ในน้ำปราศจากไอออน ที่เตรียมโดยใช้ปริมาตร PCDA-SH 15 ไมโครลิตร และปริมาณของซิงค์ออกไซด์ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ภาคผนวก ค

รายละเอียดคุณสมบัติเฉพาะของเครื่องสแกนเนอร์รุ่น

Epson Perfection Flatbed Photo Scanner V600 และ V370

PERFECTION™ V600 PHOTO

รุ่น	V600			
ข้อมูลพื้นฐาน	สแกนเนอร์ภาพสีแบบราบ			
ประสิทธิภาพการสแกน	Main 6,400 dpi x Sub 9,600 dpi			
ขนาดเอกสาร	216 x 297 มม. (A4, เอกสารขนาดจดหมาย US)			
แบบสกรีนแสง	68.6 x 242.4 มม. (35 มม. x 12 frames Strip film, 35 มม. x 4 frames mounted film), 6 x 22 ซม. x 1 frames Medium format film			
ฟิล์ม	Hi-speed USB 2.0			
การเชื่อมต่อ	Epson Matrix CCD™ (CCD สี 12 เส้นสแกนพร้อมไมโครเลนส์แบบออนเซ็น)			
ระบบเครื่อง	170,880 พิกเซล (14,240 x 4 เส้น x 3 สี)			
อุปกรณ์ไฟโตอิเล็กทรอนิกส์	LED สีขาว			
แหล่งกำเนิดแสง	เอกสารอยู่ภายในที่แสงกระเด็น			
วิธีการสแกน	50 - 6,400, 9,600, 12,800 dpi (50 - 6400 dpi เพิ่มขึ้น 1 dpi)			
ประสิทธิภาพ	ภายใน 48 วินาที, เอกสาร 48 วินาที, สี 24 วินาที, 16 วินาที, 8 วินาที, 1 วินาที, 1 วินาที, 1 วินาที			
ความเร็วการสแกน				
การสแกนแบบสกรีนแสง (A4) ไมโคร	Dpi	อัตราสแกน/วินาที	โหมดการสแกนแบบให้ค่าความละเอียดสูง	Best Mode
	300	-	6 วินาที	9 วินาที
	600	ประมาณ 1.8	18 วินาที	23 วินาที
	1,200	ประมาณ 5.9	90 วินาที	149 วินาที
สี 24 วินาที	300	-	6 วินาที	9 วินาที
	600	ประมาณ 1.8	18 วินาที	23 วินาที
	1,200	ประมาณ 5.9	91 วินาที	150 วินาที
การสแกนฟิล์ม	Dpi	อัตราสแกน/วินาที	โหมดการสแกนแบบให้ค่าความละเอียดสูง	Best Mode
สแกนฟิล์ม (ฟิล์ม 35 มม.)	2,400	ประมาณ 8.6	33 วินาที	33 วินาที
	3,200	ประมาณ 8.6	51 วินาที	51 วินาที
	4,800	ประมาณ 10.9	71 วินาที	81 วินาที
	6,400	ประมาณ 10.9	101 วินาที	108 วินาที
Negative Film 35 มม.	2,400	ประมาณ 8.2	39 วินาที	39 วินาที
	3,200	ประมาณ 8.2	62 วินาที	62 วินาที
	4,800	ประมาณ 9.7	88 วินาที	100 วินาที
	6,400	ประมาณ 9.7	126 วินาที	134 วินาที
ฟังก์ชัน				
Driver & Software ภายในตัวเครื่อง	Epson Scan v3.9 Epson Copy Utility Epson Event Manager ABBYY® FineReader® Sprint 9.0 (Win) / 8.0 (Mac) Adobe Photoshop Elements 10 (Win / Mac)			
รองรับระบบ				
USB 1.1 & 2.0	Microsoft® Windows® XP Home Edition/XP Professional/ XP Professional x64 Edition/ Windows Vista™/ Windows® 7/ 8 Mac OS® X 10.5.8 หรือสูงกว่า			
สภาพแวดล้อมการทำงาน				
อุณหภูมิ	อุณหภูมิ	10-35°C		
	จุดเก็บ	-25-60°C		
ความชื้น	อุณหภูมิ	10-80% (ไม่มีการควบแน่น)		
	จุดเก็บ	10-85% (ไม่มีการควบแน่น)		
ข้อมูลจำเพาะทางไฟฟ้า				
แรงดัน	AC100-240V 50-60Hz			
การสิ้นเปลืองพลังงาน				
	อุณหภูมิ	16.5W		
	เตรียมพร้อม	5.5W		
	สLEEP	1.6W		
	ปิดเครื่อง	0.4W		

ขนาดและน้ำหนัก

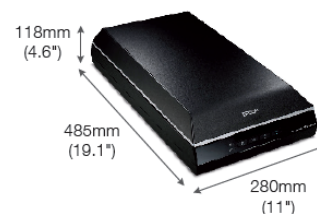
V600
น้ำหนัก: 4.1 กก. (9 ปอนด์)

PERFECTION™ V600 PHOTO

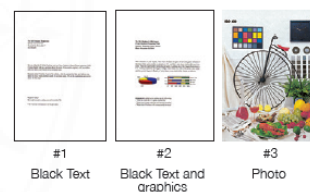
MODEL NUMBER		V600
Basic		
Scanner Type		Flatbed colour image scanner
Optical Resolution ¹		Main 6400 dpi x Sub 9600 dpi
Document Size	Reflective	216 x 297 mm (A4, US Letter size document)
	Transparency	68.6 x 242.4 mm (35mm x 12 frames strip film, 35mm x 4 frames mounted film, 6 x 22 cm x 1 frame medium format film)
Interface ²		USB 2.0
Configuration		
Photoelectric Device		Epson Matrix CCD™ (12 line colour CCD with On Chip Micro Lens)
Light Source		White LED, IR LED
Sub-Scanning Method		Fixed document and moving carriage
Performance		
Output Resolution ³		50 to 6400, 9600, 12800 dpi (50 to 6400 dpi in 1 dpi increments)
Pixel Depth	Colour	48-bit input, 48/24-bit output
	Grayscale	16-bit input, 16/8-bit output
	Black and White	16-bit input, 1-bit output
Scanning Speed⁴		
Reflective Scanning (A4)		
1-bit Monochrome ⁵	Resolution	Speed Priority Mode
	300 dpi	6 sec
	600 dpi	18 sec
	1200 dpi	92 sec
24-bit Colour ²	300 dpi	9 sec
	600 dpi	23 sec
	1200 dpi	152 sec
Film Scanning (35mm Film) ⁶		
Positive Film	Resolution	Speed Priority Mode
	2400 dpi	31 sec
	3200 dpi	46 sec
	4800 dpi	72 sec
Negative Film	6400 dpi	92 sec
	2400 dpi	37 sec
	3200 dpi	60 sec
	4800 dpi	95 sec
		125 sec
Functions		
Driver and Bundled Software		Epson Scan v3.9
		Epson Copy Utility
		Epson Event Manager
		ABBYY® FineReader® Sprint 9.0 (Win) / 8.0 (Mac)
		Easy Photo Scan
		SilverFast SE (Web Download)
Supported Platforms		
Operating System		Microsoft Windows XP / Vista / 7 / 8 / 8.1 / 10
		Mac OS® X 10.5.8 or later
Environmental Conditions		
Temperature	Operating	10 – 35°C
	Storage	-25 – 60°C
Humidity	Operating	10 – 80% (No Condensation)
	Storage	10 – 85% (No Condensation)
Electrical Specifications		
Rated Voltage		AC 100-240 V
Rated Frequency		50~60Hz
Power Consumption	Operating	16.5W
	Ready	5.5W
	Sleep	1.6W
	Power Off	0.4W

Dimensions & Weight

V600
Weight: 4.1kg (9lb)



- Optical resolution as defined by ISO14473.
- To use the USB port, consult the documentation provided with your PC for further information about USB connectivity. Please note that errors may occur if nonstandard cables or multiple hub connections are used.
- With interpolation. Scanning area may be restricted if resolution setting is large.
- Scanning speed is based on the PC specifications below and may vary according to system configuration, dpi setting and scan mode setting.
PC specifications: Intel Core i7 3537U@2.0GHz, 4GB RAM, Windows 8.1 x64, Epson Scan V3.9.30, USB 2.0.
Documents and photos other than that pictured below can be substituted without significantly affecting test results.

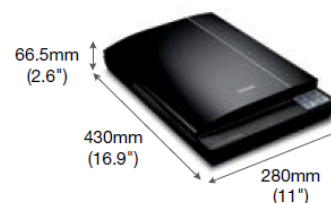


PERFECTION™ V370 PHOTO

MODEL NUMBER		V370 Photo			
Basic					
Scanner Type		Flatbed colour image scanner			
Optical Resolution		Main 4800 dpi x Sub 9600 dpi			
Document Size					
	Reflective	216 x 297mm (A4, US Letter size document)			
	Transparency	32.9 x 244.4mm (35mm strip film x 6 frames, 35mm mounted film x 4 frames)			
	Interface	Hi-speed USB 2.0			
Configuration					
Photoelectric Device		Epson Matrix CCD™ (12 line colour CCD with On Chip Micro Lens)			
		122,400 pixels (10,200 x 4 lines x 3 colours)			
Light Source		White LED			
Sub-Scanning Method		Fixed document and moving carriage			
Performance					
Output Resolution		50 to 6400, 9600, 12800 dpi (50 to 6400 dpi in 1 dpi increments)			
Colours		Internal 48 bit, Output 48 bit, 24 bit Colour, 16 bit, 8 bit Grayscale, 1 bit Monochrome			
Scanning Speed					
Reflective Scanning		Dpi	Msec/line	Speed Priority Mode	Best Mode
Monochrome		300	N.A	11 sec	16 sec
		600	Approx. 2.9	25 sec	30 sec
		1200	Approx. 10.1	102 sec	129 sec
		4800	Approx. 21.8	N.A.	N.A.
24 bit Colour		300	N.A	14 sec	16 sec
		600	Approx. 3.5	31 sec	37 sec
		1200	Approx. 10.1	101 sec	130 sec
		4800	Approx. 21.8	N.A.	N.A.
Film Scanning (V370 Photo only)		Dpi	Msec/line	Speed Priority Mode	Best Mode
35mm Positive Film		2400	Approx. 8.5	36 sec	42 sec
		3200	Approx. 8.5	41 sec	57 sec
		4800	Approx. 8.5	63 sec	85 sec
35mm Negative Film		2400	Approx. 12.3	42 sec	52 sec
		3200	Approx. 12.3	53 sec	72 sec
		4800	Approx. 12.3	81 sec	110 sec
Functions					
Driver and Bundled Software		Document Capture Pro (Win) / Document Capture (Mac)			
		Epson Scan V3.9			
		ABBYY® FineReader® Sprint 9.0 (Win) / 8.0 (Mac)			
		ArcSoft® MediaImpression®			
		ArcSoft® Scan-n-Stitch™ Deluxe (Win only)			
		Epson Event Manager			
Supported Platforms					
USB1.1 & 2.0		Microsoft® Windows® XP Home Edition / XP Professional / XP Professional x64 Edition			
		Windows Vista™ / Windows® 7 / Windows® 8 / Windows® 10			
		Mac OS® X 10.5.8 or later			
Environmental Conditions					
Temperature	Operating	10 – 35°C			
	Storage	-25 – 60°C			
Humidity	Operating	10 – 80% (No Condensation)			
	Storage	10 – 85% (No Condensation)			
Electrical Specifications					
Rated Voltage		AC 100-240 V			
Rated Frequency		50-60Hz			
Power Consumption					
	Operating	12W			
	Ready	5.5W			
	Sleep	3.7W			
	Power Off	0.5W			

Dimensions & Weight

Weight: 2.8kg (6.2lb)



ภาคผนวก ง
รายละเอียดคุณสมบัติเฉพาะของกล้องถ่ายภาพ
บนโทรศัพท์เคลื่อนที่ ยี่ห้อ iPhone SE (รุ่นที่ 2)

ความจุ

- 64GB, 128GB, 256GB

จอภาพ

- จอภาพ Retina HD
- จอภาพ Multi-Touch ไวต์สกรีน แบบ LCD ขนาด 4.7 นิ้ว (แนวทแยง) พร้อมเทคโนโลยี IPS
- ความละเอียด 1334 x 750 พิกเซลที่ 326 ppi
- อัตราส่วนคอนทราสต์ 1400:1 (ทั่วไป)
- การแสดงผลแบบ True Tone
- จอภาพขอบเขตสีกว้าง (P3)
- การแตะค้างแบบสั้น
- ความสว่างสูงสุด 625 นิต (ทั่วไป)
- เคลื่อนสาร์กัณรอยนิ้วมือ
- คุณสมบัติ "การซูมหน้าจอ"
- คุณสมบัติ "การดึงจอลงเพื่อแตะ"



ชิป

- ชิพ A13 Bionic
- CPU แบบ 6-core ซึ่งมีคอร์ด้านประสิทธิภาพ 2 คอร์ และคอร์ด้านประหยัดพลังงาน 4 คอร์
- GPU แบบ 4-core
- Neural Engine แบบ 8-core

กล้อง

- กล้องไวด์ ความละเอียด 12MP
- รูรับแสงขนาด $f/1.8$
- ซูมดิจิทัลได้สูงสุด 5 เท่า
- โหมดภาพถ่ายบุคคลพร้อมโบเก้ที่สมจริงและการควบคุมระยะชัดลึก

- การจัดแสงภาพถ่ายบุคคลพร้อมแฟลชแฟกต์ 6 แบบ
(แสงไฟธรรมชาติ, แสงไฟสตูดิโอ, แสงไฟคอนทัวร์, แสงไฟเวที, แสงไฟเวทีขาวดำ, แสงไฟขาวดำไฮคีย์)
- ระบบป้องกันภาพสั่นไหวแบบออปติคอลล
- ชดเชย 6 ชั้น
- แฟลช True Tone แบบ LED พร้อมคุณสมบัติสโลว์ชิ่งค์
- พาโนรามา (สูงสุด 63MP)
- ผลึกแซฟไฟร์ป้องกันหน้าเลนส์
- ออโต้โฟกัสด้วย Focus Pixels
- บันทึกภาพถ่ายและ Live Photos ด้วยขอบเขตสีกว้าง
- HDR อัจฉริยะเจเนอเรชันถัดไปสำหรับภาพถ่าย
- ระบบป้องกันภาพสั่นไหวอัตโนมัติ
- โหมดภาพถ่ายต่อเนื่อง
- แแนข้อมูลพิกัดตำแหน่งในภาพถ่าย
- รูปแบบไฟล์ภาพที่บันทึก: HEIF และ JPEG

กล้องหน้า

- กล้องความละเอียด 7MP
- รูรับแสงขนาด $f/2.2$
- โหมดภาพถ่ายบุคคลพร้อมโบเก้ที่สมจริงและการควบคุมระยะชัดลึก
- การจัดแสงภาพถ่ายบุคคลพร้อมแฟลชแฟกต์ 6 แบบ
(แสงไฟธรรมชาติ, แสงไฟสตูดิโอ, แสงไฟคอนทัวร์, แสงไฟเวที, แสงไฟเวทีขาวดำ, แสงไฟขาวดำไฮคีย์)
- บันทึกวิดีโอระดับ HD 1080p ที่ 25 fps หรือ 30 fps
- Retina Flash
- วิดีโอ QuickTake
- บันทึกภาพถ่ายและ Live Photos ด้วยขอบเขตสีกว้าง
- HDR อัตโนมัติสำหรับภาพถ่าย
- ระบบป้องกันภาพสั่นไหวอัตโนมัติ
- โหมดภาพถ่ายต่อเนื่อง
- ระบบป้องกันภาพวิดีโอสั่นไหวในคุณภาพระดับภาพยนตร์ (1080p และ 720p)