

การเตรียมและสมบัติเชิงแสงของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนพอลิไดอะแซทรีน/ซิงค์ออกไซด์

นางสาวนพรัตน์ รุ่งเรืองวิริยะ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION AND OPTICAL PROPERTIES OF POLYDIACETYLENE/ZnO
NANOCOMPOSITES

Miss Nopparat Rungruangviriya

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Ceramic Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเตรียมและสมบัติเชิงแสงของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโน
พอลิไดแอเซทิลีน/ซิงค์ออกไซด์

โดย

นางสาวนพรัตน์ รุ่งเรืองวิริยะ

สาขาวิชา

เทคโนโลยีเซรามิก

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิตานาถ ไตรผล

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิตานาถ ไตรผล)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.กนกทิพย์ บุญเกิด)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รักษชาติ ไตรผล)

นพรัตน์ รุ่งเรืองวิริยะ : การเตรียมและสมบัติเชิงแสงของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงค์ออกไซด์. (PREPARATION AND OPTICAL PROPERTIES OF POLYDIACETYLENE/ZnO NANOCOMPOSITES) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
หลัก : ผศ.ดร.นิตานาถ ไตรผล, 96 หน้า.

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการเตรียมวัสดุเชิงประกอบชนิดใหม่ของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคลกับอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์สำหรับประยุกต์ในเทคโนโลยีการตรวจวัด โดยปรับเปลี่ยนปริมาณของซิงค์ออกไซด์เป็นร้อยละ 5 9 17 33 และ 50 โดยน้ำหนักของไดอะเซทิลีนมอนอเมอร์ 10,12-เพนตะโคเซโด้ไฮดรอกไซด์ไดอะนีนอิกแอซิด อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบจะทำหน้าที่เป็นซับสเตรตให้ไดอะเซทิลีนมอนอเมอร์ยึดเกาะและจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบเมื่อทำการฉายแสงยูวีเพื่อให้เกิดกระบวนการพอลิเมอไรเซชันจะสามารถเตรียมวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคลกับอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีสีฟ้าได้ และเมื่อศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับการกระตุ้นจากอุณหภูมิ ความเป็นกรด-เบส ชนิดและความเข้มข้นของตัวทำละลายประเภทแอลกอฮอล์พบว่า วัสดุเชิงประกอบมีพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีที่แตกต่างไปจากพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคลบริสุทธิ์อย่างมาก ในขณะที่ฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคลบริสุทธิ์เกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับไม่ได้ โดยเปลี่ยนเป็นสีแดงที่อุณหภูมิ ~80 องศาเซลเซียส ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบจะเกิดการเปลี่ยนสีเป็น 2 ระดับเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น คือ กระบวนการผันกลับได้ในช่วงอุณหภูมิห้องถึง 140 องศาเซลเซียส และเกิดกระบวนการผันกลับไม่ได้ที่อุณหภูมิ 145 องศาเซลเซียสขึ้นไป สำหรับการศึกษากิจกรรมการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับการกระตุ้นจากความเป็นกรด-เบส พบว่า สารละลายพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคลบริสุทธิ์เปลี่ยนสีจากน้ำเงินเป็นแดงที่ค่าพีเอช 8 ในขณะที่สารละลายวัสดุเชิงประกอบจะเกิดการเปลี่ยนสีจากสีฟ้าเป็นสีม่วงที่ค่าพีเอช 12.5 ขึ้นไป และเมื่อศึกษาการตอบสนองต่อตัวทำละลาย พบว่า การเติมแอลกอฮอล์ทำให้สารละลายพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคลบริสุทธิ์เปลี่ยนสีจากน้ำเงินเป็นแดงที่ความเข้มข้นของเอทานอลร้อยละ 45 และความเข้มข้นของไอโซโพรพานอลร้อยละ 35 โดยปริมาตร สำหรับสารละลายวัสดุเชิงประกอบจะไม่สังเกตพบการเปลี่ยนสีเมื่อเติมแอลกอฮอล์

ภาควิชา ...วัสดุศาสตร์..... ลายมือชื่อนิสิต ..
สาขาวิชา ...เทคโนโลยีเซรามิก..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา ..2553

5172328223 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEYWORDS : POLYDIACETYLENE VESICLES / ZnO / COLORIMETRIC RESPONSES

NOPPARAT RUNGRUANGVIRIYA : PREPARATION AND OPTICAL
PROPERTIES OF POLYDIACETYLENE/ZnO NANOCOMPOSITES.

THESIS ADVISOR : ASST.PROF.NISANART TRAIIPHOL, Ph.D., 96 pp.

This research presents a method to prepare a new class of polydiacetylene/ZnO nanocomposites for sensing applications. The ZnO concentrations are varied from 5, 9, 17, 33 and 50 wt% of the diacetylene monomer 10,12-pentacosadiynoic acid (PCDA). ZnO nanoparticles function as substrates for self-assembling of PCDA monomers in an ordered arrangement. After UV irradiation to induce polymerization, blue colored poly(10,12-pentacosadiynoic acid) (PPCDA)/ZnO nanocomposites can be prepared. The colorimetric responses of the nanocomposites to temperature, pH, types and concentrations of solvents are rather different compared to those of the pure PPCDA vesicles. While the pure PPCDA vesicles film exhibit irreversible color transition at $\sim 80^{\circ}\text{C}$, the nanocomposite films show two steps reversible and irreversible color transition upon increasing of temperature. The reversible process ranges from room temperature to 140°C and the irreversible process occurs over 145°C . For colorimetric response to pH, it is found that pure PPCDA solution changes from blue to red at pH of 8 while the nanocomposite solutions exhibit the color transition from blue to purple at pH higher than 12.5. Study of the response to solvents show that the addition of alcohols into pure PPCDA vesicles solution causes the transition from blue to red color at 45 vol% ethanol and 35 vol% isopropanol. For nanocomposite solutions, a chromic transition from blue to red color is not observed.

Department : Materials Science..... Student's Signature

Field of Study : Ceramic Technology..... Advisor's Signature

Academic Year : 2010.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ต้องขอขอบพระคุณบุคคลและหน่วยงานต่างๆ ที่ให้ความความอนุเคราะห์ช่วยเหลือทั้งในด้านวิชาการและการดำเนินการวิจัย ซึ่งมีรายนามดังต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิตานาด ไตรผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) ซึ่งกรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ แนวทางในการดำเนินงานวิจัย และแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ด้วยดีตลอดมา

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และคณาจารย์สาขาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกๆ ท่านที่สั่งสอนวิชาและให้คำปรึกษาปัญหาต่างๆ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชชาติ ไตรผล (ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร) ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ ตลอดจนให้ความรู้ ความช่วยเหลือ และให้คำปรึกษาปัญหาต่างๆ ในการทำวิจัยมาโดยตลอด

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เต็มศักดิ์ ศรีศิริพันธ์ และศุภณัฐนาโนเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหิดล ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย

หน่วยปฏิบัติการวิจัยเซรามิกขั้นสูง ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนทางด้านบุคลากร สถานที่ เครื่องมือ และค่าใช้จ่ายในระหว่างทำวิจัย

ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง ที่ให้การสนับสนุนด้านทุนการศึกษาและทุนวิจัยตลอดระยะเวลาการศึกษา

โครงการส่งเสริมการทำงานวิจัยเชิงลึกในสาขาวิชาที่มีศักยภาพสูง กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช ปีงบประมาณ 2553 กลุ่มวิจัยวัสดุขั้นสูง (Advanced Materials Cluster)

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ และคณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์สารเคมีที่ใช้ในการทำวิจัย

เพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ สาขาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษา และคอยเป็นกำลังใจด้วยดีเสมอมา

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และสมาชิกในครอบครัว ที่อบรมสั่งสอน ให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจในการศึกษามาโดยตลอด

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 พอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล (Polydiacetylene Vesicles).....	4
2.2 ซิงค์ออกไซด์.....	8
2.3 การเตรียมพอลิ (10,12-เพนตะโคซะไดอายนโนอิกแอซิด) (PPCDA) เวสิเคิล และ วัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์.....	10
2.4 สมบัติการเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล.....	12
2.4.1. การเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลเมื่อได้รับการรบกวนจากความร้อน.....	13
2.4.2. การเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลเมื่อได้รับการรบกวนจากความเป็น กรด-เบส.....	16
2.4.3. การเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลเมื่อได้รับการรบกวนจากตัวทำละลาย... ..	17
2.5 फिल्मพอลิไดอะเซทิลีน และฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคระดับ นาโนที่ฝังตรึงในพอลิไวนิลแอลกอฮอล์.....	18
2.6 หลักการและเทคนิคในการวิเคราะห์.....	19
2.6.1. อัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี.....	19
2.6.2. Laser light scattering.....	23
2.6.3. อิเล็กตรอนไมโครสโคปี (Electron microscopy).....	25

2.6.4. กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic force microscope, AFM).....	27
2.7 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	29
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	38
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย	38
3.1.1. ไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์	38
3.1.2. ซิงค์ออกไซด์	38
3.1.3. ตัวทำละลาย.....	38
3.1.4. สารปรับสภาพความเป็นเบส	38
3.1.5. พอลิเมอร์สำหรับสร้างแผ่นฟิล์ม.....	39
3.2 สมบัติของอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์	39
3.2.1. สมบัติทางกายภาพ	39
3.2.2. สมบัติการดูดกลืนรังสียูวี.....	39
3.3 กระบวนการเตรียมสารละลาย PPCDA เวลลิล	39
3.4 กระบวนการเตรียมสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลลิลกับอนุภาคนาโนของ ซิงค์ออกไซด์	40
3.5 สมบัติของ PPCDA เวลลิล และวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลลิลกับอนุภาคนาโน ของซิงค์ออกไซด์	41
3.5.1. ขนาดและการกระจายขนาดของอนุภาค.....	41
3.5.2. สัณฐานวิทยา	41
3.5.3. โครงสร้างจุลภาคของอนุภาคเดี่ยว	42
3.5.4. สมบัติการดูดกลืนแสง	42
3.6 การศึกษาพฤติกรรมกรรมการเปลี่ยนสีของสารละลาย PPCDA เวลลิล และสารละลาย วัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลลิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ต่อสิ่งกระตุ้น ภายนอก	42
3.6.1. การศึกษาการตอบสนองต่ออุณหภูมิ	42
3.6.2. การศึกษาการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบส	43
3.6.3. การศึกษาการตอบสนองต่อชนิดและความเข้มข้นของตัวทำละลาย.....	43
3.7 การเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์ม PPCDA เวลลิล และฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลลิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์	43

3.7.1. กระบวนการเตรียมฟิล์ม PPCDA เวลลเคิล และฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลลเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์	43
3.7.2. การศึกษาการตอบสนองต่ออุณหภูมิของฟิล์ม PPCDA เวลลเคิล และฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลลเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ โดยวิเคราะห์สมบัติการดูดกลืนแสง.....	44
3.8 แผนผังงานวิจัย	45
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	46
4.1 สมบัติของอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์	46
4.1.1. สมบัติทางกายภาพ	46
4.1.2. สมบัติการดูดกลืนรังสียูวี.....	46
4.2 สมบัติของ PPCDA เวลลเคิล และวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลลเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์	48
4.2.1. ขนาดและการกระจายขนาดของอนุภาค.....	48
4.2.2. สัณฐานวิทยา	49
4.2.3. โครงสร้างจุลภาคของอนุภาคเดี่ยว.....	49
4.2.4. สมบัติการดูดกลืนแสง	50
4.3 พฤติกรรมการเปลี่ยนสีของ PPCDA เวลลเคิล และวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลลเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ 5.9 และ 17 wt.% เมื่อได้รับการรบกวนจากสิ่งกระตุ้นภายนอก	54
4.3.1. การตอบสนองต่ออุณหภูมิของสารละลาย PPCDA เวลลเคิล และสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลลเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์	54
4.3.2. การตอบสนองต่ออุณหภูมิของฟิล์ม PPCDA เวลลเคิล และฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลลเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์	63
4.3.3. การตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบส.....	68
4.3.4. การตอบสนองต่อชนิดและความเข้มข้นของตัวทำละลาย	74
4.4 พฤติกรรมการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลลเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ 33 และ 50 wt.% เมื่อได้รับการรบกวนจากสิ่งกระตุ้นภายนอก	80
4.4.1. การตอบสนองต่ออุณหภูมิ.....	80
4.4.2. การตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบส.....	83

4.4.3. การตอบสนองต่อชนิดและความเข้มข้นของตัวทำละลาย	84
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	86
5.1 สรุปผลการวิจัย	86
5.2 ข้อเสนอแนะ	87
รายการอ้างอิง.....	88
ภาคผนวก.....	93
ภาคผนวก ก	94
ภาคผนวก ข	95
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	96

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 โครงสร้างของไดอะเซทิลีนมอนอเมอร์ชนิดต่างๆ การเกิดไฮเดรชัน และสีของสาร แขวนลอยเวสิเคิลเมื่อเกิดพอลิเมอร์ขึ้น โดย Y แสดงถึงการเกิดไฮเดรชัน และ N แสดงถึงไม่เกิดไฮเดรชัน หรือ ไม่เกิดพอลิเมอร์ขึ้น	7
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมของ PCDA และผงซิงค์ออกไซด์ในการเตรียมสารแขวนลอยวัสดุเชิง ประกอบ.....	41

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล.....	4
รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลเมื่อได้รับการกระตุ้นจากความเป็นกรด-เบส...4	4
รูปที่ 2.3 ความสามารถในการจัดเรียงตัวได้เองของโมเลกุล	6
รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงสมบัติของพอลิไดแอเซทิลีนเมื่อได้รับการกระตุ้นจากสิ่งแวดล้อม.....	6
รูปที่ 2.5 โครงสร้างโมเลกุลของ 10,12-เพนตะโคเซไดอายนโนอิกแอซิด (PCDA)	8
รูปที่ 2.6 รูปผลึกของซิงค์ออกไซด์ที่พบมากที่สุด	9
รูปที่ 2.7 การเตรียมพอลิ (10,12-เพนตะโคเซไดอายนโนอิกแอซิด) (PPCDA) เวสิเคิล โดยใช้ PCDA เป็นสารตั้งต้น.....	11
รูปที่ 2.8 กลไกการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีน (ก) แบบผันกลับไม่ได้ (ข) แบบผันกลับได้ เมื่อได้รับการรบกวนจากความร้อน	14
รูปที่ 2.9 โครงสร้างของไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ที่เกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้	15
รูปที่ 2.10 กลไกการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนเมื่อทำการเพิ่มค่าความเป็นกรด-เบส.....	16
รูปที่ 2.11 กลไกการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนเมื่อได้รับการรบกวนจากเอทานอล.....	17
รูปที่ 2.12 ฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลที่ฝังตรึงในพอลิไวนิลแอลกอฮอล์	18
รูปที่ 2.13 แบบจำลองการฉายแสงผ่านสารตัวอย่าง	20
รูปที่ 2.14 การจัดเรียงระดับพลังงานและการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอน	22
รูปที่ 2.15 การเปลี่ยนแปลงของสเปกตรากการดูดกลืนแสง.....	23
รูปที่ 2.16 แบบจำลองการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Laser light scattering.....	24
รูปที่ 2.17 รูปแบบการกระเจิงของแสงตามทฤษฎีของมี (Mie theory)	25
รูปที่ 2.18 แบบจำลองแสดงการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม.....	28
รูปที่ 2.19 โหมดการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (ก) แบบสัมผัส (ข) แบบไม่สัมผัส (ค) แบบกึ่งสัมผัส	29
รูปที่ 2.20 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล (ก) เมื่อทำการเติมเอทานอล และ 1-เพนทานอลที่ปริมาณต่างๆ (ข) เมื่อทำการเติม CTAB SDS และ Triton X-100 ที่ปริมาณต่างๆ (ค) เมื่อทำการเติม CTAB และปรับค่าความเป็นกรด-เบส และ (ง) เมื่อทำการเติม alkylamine hydrochloric salts ที่ความยาวโซ่แอลคิลแตกต่างกัน	31

รูปที่ 2.21 การสังเคราะห์ไดอะเซทิลีนมอนอเมอร์ชนิดใหม่ที่มีโครงสร้างที่หัวของโซ่ข้างด้าน
หนึ่งเป็น phenylacetamide..... 32

รูปที่ 2.22 การเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดอะเซทิลีนที่สังเคราะห์ขึ้นใหม่ เมื่อมีการให้ความ
ร้อนจากอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และทำให้
เย็นตัวลงมา..... 32

รูปที่ 2.23 การเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดอะเซทิลีนที่ทำการปรับ head groups 33

รูปที่ 2.24 การสร้างฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลบนซับสเตรตของแข็งโดยเทคนิคการยัดติด
ด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้า 34

รูปที่ 2.25 การสร้างฟิล์มบางแบบหลายชั้นของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลบนซับสเตรตของแข็ง
โดยเทคนิคการยัดติดด้วยประจุทางไฟฟ้าของพอลิอิเล็กโทรไลต์ 34

รูปที่ 2.26 การดูดซับของกลุ่มก้อน PCDA บนผิวของอนุภาคนาโนซิลิกา และการจัดเรียงตัว
อย่างเป็นระเบียบของ PCDA บนผิวของอนุภาคนาโนซิลิกา 35

รูปที่ 2.27 ภาพจากเทคนิค TEM แสดงโครงสร้างของผลึกลูกผสมระดับนาโนซึ่งประกอบด้วย
อนุภาคนาโนของโลหะเงินอยู่ที่แกนและมีพอลิไดอะเซทิลีนหุ้มอยู่..... 36

รูปที่ 2.28 สเปกตรารายวิ-วิสิเบิลของ (ก) ผลึกลูกผสมระดับนาโนในน้ำทั้งก่อน (เส้นประ) และ
หลังฉายแสงยูวี (เส้นทึบ) (ข) ผลึกพอลิไดอะเซทิลีนระดับนาโนในน้ำในเฟสสีน้ำเงิน
(เส้นประ) 37

รูปที่ 4.1 ภาพจากเทคนิค TEM แสดงลักษณะการกระจายตัวและขนาดของอนุภาคซิงค์
ออกไซด์ที่ใช้ในงานวิจัย (ก) กำลังขยาย 18,500 เท่า และ (ข) กำลังขยายเท่ากับ
59,000 เท่า 47

รูปที่ 4.2 ขนาดและการกระจายขนาดอนุภาคของสารแขวนลอยซิงค์ออกไซด์ในน้ำขจัดไออน
แล้ว ก่อนผ่านการกรองด้วยฟิลเตอร์ขนาด 0.8 ไมโครเมตร..... 47

รูปที่ 4.3 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยซิงค์ออกไซด์ในน้ำขจัดไออนแล้ว
ที่ผ่านการกรองด้วยฟิลเตอร์ขนาด 0.8 ไมโครเมตร 48

รูปที่ 4.4 ขนาดและการกระจายขนาดอนุภาคของสารละลาย PPCDA เวสิเคิล (ZnO 0 wt.%)
และสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์
ที่เตรียมโดยใช้ปริมาณซิงค์ออกไซด์ 5 9 และ 17 wt.%..... 52

รูปที่ 4.5 สันฐานวิทยาจาก AFM ของ (ก) PPCDA เวสิเคิล และ (ข) วัสดุเชิงประกอบ PPCDA
เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ที่ปริมาณซิงค์ออกไซด์ 17 wt.% 52

- รูปที่ 4.6 สัณฐานวิทยาจาก SEM ของวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของ ซิงค์ออกไซด์ ที่ปริมาณซิงค์ออกไซด์ 17 wt.% (ก) กำลังขยาย 4,000 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 10,000 เท่า..... 53
- รูปที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคของ (ก) PPCDA เวสิเคิล (ข) อนุภาคของวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ที่ปริมาณซิงค์ออกไซด์เป็น 17 wt.% ที่ กำลังขยาย 195,000 เท่า และ (ค) ที่กำลังขยาย 500,000 เท่า 53
- รูปที่ 4.8 สเปกตรากการดูดกลืนแสงที่อุณหภูมิห้องของสารละลาย PPCDA เวสิเคิล (ZnO 0 wt.%) และสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโน ของซิงค์ออกไซด์ ที่ปริมาณซิงค์ออกไซด์ 5.9 และ 17 wt.% 54
- รูปที่ 4.9 สเปกตรากการดูดกลืนแสงเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 100 °C ของ (ก) สารละลาย PPCDA เวสิเคิล และ (ข) – (ง) สารละลายวัสดุเชิง ประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ที่ปริมาณซิงค์ออกไซด์ 5.9 และ 17 wt.% ตามลำดับ 59
- รูปที่ 4.10 การเปลี่ยนสีเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 100 °C ของ (ก) สารละลาย PPCDA เวสิเคิล และ (ข) สารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิล..... 60
- รูปที่ 4.11 กลไกการเปลี่ยนสีของสารละลาย PPCDA เวสิเคิลแบบผันกลับไม่ได้ เมื่อได้รับการ รบกวนจากความร้อน 60
- รูปที่ 4.12 (ก) ค่าความยาวคลื่น ณ ตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) และ (ข) เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสี (%CR) ของสารละลาย PPCDA เวสิเคิล (ZnO 0 wt.%) และสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ที่ปริมาณซิงค์ออกไซด์ 5.9 และ 17 wt.% เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้อง จนถึงอุณหภูมิ 100 °C..... 61
- รูปที่ 4.13 โครงสร้างและลักษณะพื้นผิวของ PPCDA เวสิเคิล และวัสดุเชิงประกอบ 61
- รูปที่ 4.14 อันตรกิริยาของ PPCDA บนผิวของอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์..... 62
- รูปที่ 4.15 ลักษณะการจัดเรียงตัวของ PPCDA ในน้ำ และในวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับ อนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ 62
- รูปที่ 4.16 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสี เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องถึง 100 °C และ เมื่อเย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้องของ (ก) สารละลาย PPCDA เวสิเคิล และ (ข) – (ง)

สารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสเซลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ 5 9 และ 17 wt.% ตามลำดับ	63
รูปที่ 4.17 สเปกตรากการดูดกลืนแสงและสีของฟิล์ม PPCDA เวสเซลในเมทริกซ์ของ PVA ที่ อุณหภูมิต่างๆ ที่ทำการอบฟิล์ม	66
รูปที่ 4.18 (ก) – (ค) สเปกตรากการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสเซลกับ อนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ในเมทริกซ์ของ PVA ที่ปริมาณซิงค์ออกไซด์ 5 9 และ 17 wt.% ตามลำดับ (ง) สีของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ทำการอบ ฟิล์ม และเมื่อฟิล์มเย็นตัวลงถึงอุณหภูมิห้อง	67
รูปที่ 4.19 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของฟิล์ม PPCDA เวสเซล (ZnO 0 wt.%) และฟิล์มวัสดุเชิง ประกอบ PPCDA เวสเซลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ที่ปริมาณซิงค์ออกไซด์ 5 9 และ 17 wt.% เมื่อผ่านการให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 160 °C	68
รูปที่ 4.20 กลไกการเปลี่ยนสีของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสเซลกับอนุภาคนาโนของ ซิงค์ออกไซด์ เมื่อได้รับการรบกวนจากความร้อน	68
รูปที่ 4.21 สเปกตรากการดูดกลืนแสงและการเปลี่ยนสีเมื่อเพิ่มค่าความเป็นเบสของ (ก) สารละลาย PPCDA เวสเซล และ (ข) – (ง) สารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสเซลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ที่ปริมาณซิงค์ออกไซด์ 5 9 และ 17 wt.% ตามลำดับ	73
รูปที่ 4.22 พฤติกรรมการเปลี่ยนสีเมื่อเพิ่มค่าความเป็นเบสของสารละลาย PPCDA เวสเซล และสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสเซลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ที่ปริมาณซิงค์ออกไซด์ 5 9 และ 17 wt.% (ก) เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสี (%CR) และ (ข) ความยาวคลื่น ณ ตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}).....	73
รูปที่ 4.23 กลไกการเปลี่ยนสีของ (ก) สารละลาย PPCDA เวสเซล และ (ข) สารละลายวัสดุเชิง ประกอบ PPCDA เวสเซลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ เมื่อได้รับการรบกวน จากความเป็นเบส	74
รูปที่ 4.24 สเปกตรากการดูดกลืนแสงและการเปลี่ยนสีของสารละลาย PPCDA เวสเซล เมื่อ เพิ่มความเข้มข้นของ (ก) เอทานอล และ (ข) ไอโซโพรพานอล	77
รูปที่ 4.25 (ก) – (ค) สเปกตรากการดูดกลืนแสงของสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสเซล กับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ที่ปริมาณซิงค์ออกไซด์ 5 9 และ 17 wt.%	

	ตามลำดับ และ (ง) สีของสารละลายวัสดุเชิงประกอบเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ เอทานอลและไอโซโพรพานอล.....	78
รูปที่ 4.26	ค่าความยาวคลื่น ณ ตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารละลาย PPCDA เวสิเคิล (ZnO 0 wt.%) และสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาค นาโนของซิงค์ออกไซด์ ที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 5.9 และ 17 wt.% เมื่อได้รับการ กระตุ้นจาก (ก) เอทานอล (ข) ไอโซโพรพานอล	79
รูปที่ 4.27	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของสารละลาย PPCDA เวสิเคิล (ZnO 0 wt.%) และสาร ละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 5.9 และ 17 wt.% เมื่อได้รับการกระตุ้นจาก (ก) เอทานอล (ข) ไอโซโพรพานอล.....	79
รูปที่ 4.28	(ก) – (ข) สเปกตรากการดูดกลืนแสงของสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 33 และ 50 wt.% ตามลำดับ และ (ค) สีของสารละลายวัสดุเชิงประกอบ เมื่อผ่านการให้ความร้อนที่ อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 100 °C.....	82
รูปที่ 4.29	(ก) – (ข) สเปกตรากการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิล กับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 33 และ 50 wt.% ตามลำดับ และ (ค) สีของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ เมื่อผ่านการให้ความร้อนในช่วง อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 160 °C.....	82
รูปที่ 4.30	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโน ของซิงค์ออกไซด์ ที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 33 และ 50 wt.% เมื่อผ่านการให้ความ ร้อนในช่วงอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 160 °C	83
รูปที่ 4.31	(ก) – (ข) สเปกตรากการดูดกลืนแสงของสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 33 และ 50 wt.% ตามลำดับ และ (ค) สีของสารละลายวัสดุเชิงประกอบ เมื่อทำการเพิ่มความ เป็นเบส.....	84
รูปที่ 4.32	(ก) – (ข) สเปกตรากการดูดกลืนแสงของสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 33 และ 50 wt.% ตามลำดับ และ (ค) สีของสารละลายวัสดุเชิงประกอบ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ เอทานอลและไอโซโพรพานอล.....	85

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันนี้ได้มีการคิดค้นนวัตกรรมที่เกี่ยวข้องกับนาโนเทคโนโลยีขึ้นอย่างมากมายเพื่อเพิ่มความสะดวกสบายและความปลอดภัยในการใช้งานให้แก่ผู้บริโภค หนึ่งในนวัตกรรมที่น่าสนใจและเป็นประโยชน์ต่อผู้บริโภคเป็นอย่างมากคือการพัฒนาเซนเซอร์ระดับโมเลกุลที่มีประสิทธิภาพโดยใช้คอนจูเกตพอลิเมอร์เป็นวัสดุตรวจวัด (sensing materials)⁽¹⁻²⁾ เนื่องจากวัสดุชนิดนี้มีความสามารถในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อมโดยรอบที่เข้ามากระตุ้นได้เป็นอย่างดี จึงมีตัวอย่างการนำมาใช้เป็นวัสดุตรวจวัดสารเคมีหรือโมเลกุลชีวภาพที่มีความเป็นพิษ เช่น เชื้อไวรัส และแบคทีเรีย *Escherichia coli* เป็นต้น โดยวัสดุหนึ่งที่น่าสนใจในกลุ่มนี้คือพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล ซึ่งเป็นอนุภาคในระดับนาโนเมตรของสารในกลุ่มคอนจูเกตพอลิเมอร์ที่สามารถเตรียมได้ง่ายในน้ำและทำให้เกิดกระบวนการพอลิเมอไรเซชันได้ง่ายโดยการฉายแสงยูวี สมบัติเด่นของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลที่ทำให้มีการนำมาใช้ในงานต่างๆ มากมายคือความสามารถในการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินไปเป็นสีแดงเมื่ออยู่ในสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกันหรือเกิดการจับกับสารบางชนิด ยกตัวอย่างเช่น เกิดการเปลี่ยนสีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-เบส หรือเติมสารบางชนิดเข้าไปในระบบ⁽³⁾ ซึ่งจากสมบัติดังกล่าวนี้ทำให้นักวิทยาศาสตร์มีแนวคิดที่จะนำพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลมาประยุกต์เป็นเซนเซอร์เพื่อตรวจวัดอุณหภูมิ สารเคมี และสารชีวภาพต่างๆ ที่สนใจ

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเพื่อพัฒนาสมบัติของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลให้มีความสามารถในการตอบสนองต่อสิ่งแวดล้อมที่เข้ามากระตุ้นในระดับที่แตกต่างออกไป เช่น เกิดการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิ และ/หรือค่าความเป็นกรด-เบสที่สูงขึ้นหรือต่ำลง หรือตอบสนองต่อปริมาณตัวทำละลายแตกต่างกันไปจากพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล เป็นต้น ซึ่งพบว่าวิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงสมบัติของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลสามารถทำได้โดยการปรับเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีของโซ่ข้างของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล⁽⁴⁻⁵⁾ ซึ่งจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสายโซ่หลักที่มีโครงสร้างเป็นแบบคอนจูเกต จึงทำให้สถานะของอิเล็กทรอนิกส์และการดูดกลืนแสงเกิดการเปลี่ยนแปลง และส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสีขึ้นในระดับที่แตกต่างกันไป อย่างไรก็ตาม

วิธีการนี้มีความซับซ้อนในการสังเคราะห์สารเป็นอย่างมากและจำเป็นต้องใช้สารเคมีตั้งต้นที่มีราคาแพงอีกด้วย

การเตรียมพอลิไดออกไซด์ในรูปของวัสดุเชิงประกอบเป็นอีกวิธีการหนึ่งในการพัฒนาสมบัติของพอลิไดออกไซด์เวสิเคิลเพื่อใช้งานเป็นเซนเซอร์ระดับโมเลกุลให้มีการตอบสนองต่อสิ่งกระตุ้นในระดับที่แตกต่างออกไปซึ่งสามารถทำได้โดยการเติมอนุภาคนาโนของโลหะออกไซด์เพื่อให้เกิดเป็นวัสดุเชิงประกอบขึ้น ตัวอย่างงานวิจัยที่ผ่านมา ได้แก่ การเตรียมวัสดุเชิงประกอบของพอลิไดออกไซด์และอนุภาคนาโนของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)⁽⁶⁾ โดยอนุภาคนาโนของซิลิกอนไดออกไซด์จะทำหน้าที่เป็นเทมเพลต (template) เพื่อช่วยปรับปรุงความสามารถในการจัดเรียงตัวได้เองของโมเลกุลไดออกไซด์พอลิไดออกไซด์มอนอเมอร์ ซึ่งวิธีการนี้สามารถเตรียมขึ้นได้ง่าย รวดเร็ว และสารเคมีที่ใช้เป็นสารตั้งต้นมีราคาไม่แพงมากอีกด้วย

การเติมอนุภาคนาโนของโลหะออกไซด์เพื่อให้เกิดเป็นวัสดุเชิงประกอบพอลิไดออกไซด์กับอนุภาคนาโนของโลหะออกไซด์ นอกจากจะช่วยพัฒนาความสามารถในการจัดเรียงตัวได้เองของโมเลกุลไดออกไซด์พอลิไดออกไซด์แล้ว สมบัติเด่นของโลหะออกไซด์ที่เลือกใช้ยังช่วยในการปรับปรุงสมบัติของวัสดุเชิงประกอบให้เป็นไปตามต้องการได้อีกด้วย ตัวอย่างของอนุภาคนาโนของโลหะออกไซด์ที่มีความน่าสนใจ อย่างเช่น อนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ (ZnO)⁽⁷⁾ และไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)⁽⁸⁾ ซึ่งเป็นสารที่มีสมบัติที่ดีในด้านการดูดซับรังสียูวี และอนุภาคนาโนของเหล็กออกไซด์ เช่น แมกนีไทต์ (Fe_3O_4)⁽⁹⁾ ที่มีสมบัติความเป็นแม่เหล็ก เป็นต้น อย่างไรก็ตามจากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่ผ่านมา ยังไม่พบการเตรียมวัสดุเชิงประกอบของพอลิไดออกไซด์เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของโลหะออกไซด์ดังกล่าวข้างต้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาวิธีการเตรียมวัสดุเชิงประกอบพอลิไดออกไซด์เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของพอลิไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ และทำการศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้เมื่อได้รับการรบกวนจากสิ่งกระตุ้นภายนอก ได้แก่ อุณหภูมิ ความเป็นกรด-เบส ชนิดและความเข้มข้นของตัวทำละลาย ซึ่งคาดว่าวัสดุเชิงประกอบชนิดใหม่ที่เตรียมได้จะมีสมบัติการตอบสนองต่อสิ่งกระตุ้นภายนอกที่แตกต่างไปจากพอลิไดออกไซด์เวสิเคิลที่ไม่มีอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์อยู่ในระบบ และนำไปสู่การพัฒนาสมบัติในการตรวจวัดของวัสดุในกลุ่มนี้ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อเตรียมและศึกษาสมบัติเชิงแสงของพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลที่มีอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์เป็นแกน
2. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลที่มีอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์เป็นแกน เมื่อได้รับการรบกวนจากสิ่งแวดล้อมภายนอก

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. เตรียมและศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงแสงของพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลที่มีอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์เป็นแกน โดยเปรียบเทียบกับสมบัติของพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลที่ไม่มีอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์อยู่ในระบบ
2. ศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลที่มีอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์เป็นแกน เมื่อได้รับการรบกวนจากสิ่งแวดล้อมภายนอก โดยเปรียบเทียบกับพฤติกรรมของพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลที่ไม่มีอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์อยู่ในระบบ

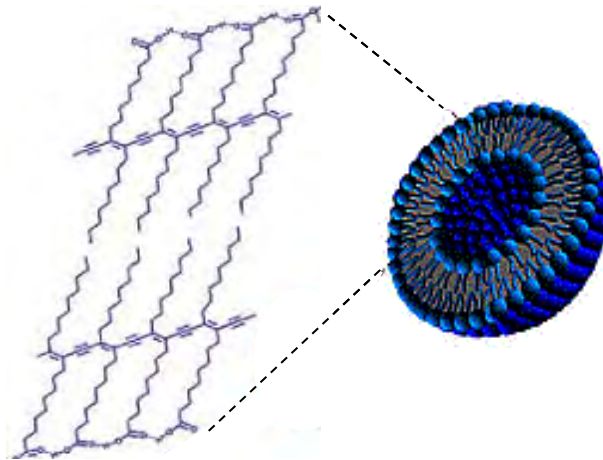
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้วัสดุเชิงประกอบพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลที่มีอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์เป็นแกนซึ่งมีสมบัติเหมาะสมสำหรับประยุกต์ในเทคโนโลยีการตรวจวัด

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล (Polydiacetylene Vesicles)

พอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลเป็นอนุภาคในระดับนาโนเมตรของสารในกลุ่มคอนจูเกตพอลิเมอร์ (conjugated polymers) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งมีสมบัติเด่นคือมีความสามารถในการเปลี่ยนสีได้เมื่ออยู่ในสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกันหรือเกิดการจับกับสารบางชนิด ยกตัวอย่างเช่น เกิดการเปลี่ยนสีเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่า ความเป็นกรด-เบส ดังแสดงในรูปที่ 2.2 นอกจากนี้ยังเกิดการเปลี่ยนสีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ หรือเติมสารบางชนิดเข้าไปในระบบ⁽¹⁰⁾ ซึ่งจากสมบัตินี้ทำให้นักวิทยาศาสตร์มีแนวคิดที่จะนำพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลมาประยุกต์เป็นเซนเซอร์ เพื่อตรวจวัดโมเลกุลเป้าหมายที่สำคัญในงานทางด้านชีววิทยา สิ่งแวดล้อม และเคมี



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล⁽¹⁰⁾



เพิ่มค่าความเป็นกรด-เบส →

รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลเมื่อได้รับการกระตุ้นจากความเป็นกรด-เบส

คอนจูเกตพอลิเมอร์ เป็นวัสดุที่มีความน่าดึงดูดใจในการนำมาใช้เป็นวัสดุตรวจวัดต่างๆ เพราะมีสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าที่น่าสนใจ เนื่องจากอิเล็กทรอนิกส์สามารถเคลื่อนที่ภายในโครงสร้างได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในสมบัติการดูดกลืนแสง การเปล่งแสง และรีดอกซ์ ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่มีความไวต่อการรบกวนจากสิ่งแวดล้อมต่างๆ จึงทำให้สามารถนำมาประยุกต์เป็นวัสดุตรวจวัดที่มีประสิทธิภาพได้เป็นอย่างดี

คอนจูเกตพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นวัสดุตรวจวัดมีมากมายหลายชนิด⁽¹¹⁾ เช่น พอลิไทโอฟิน (polythiophenes) พอลิแอนิลีน (polyanilines) พอลิฟีนิลีน (polyphenylenes) พอลิฟีนิลีนเอทิลีน (polyphenylene ethynylenes) พอลิแอเซทิลีน (polyacetylenes) และ พอลิไดแอเซทิลีน (polydiacetylene) แต่พอลิไดแอเซทิลีนเป็นคอนจูเกตพอลิเมอร์ที่มีความน่าดึงดูดใจในการนำมาใช้เป็นวัสดุตรวจวัดเป็นอย่างมาก เนื่องจากพอลิไดแอเซทิลีนแสดงสมบัติทางด้านโครงสร้างและสมบัติทางแสงที่น่าสนใจซึ่งแตกต่างจากคอนจูเกตพอลิเมอร์ตัวอื่นๆ⁽¹²⁾ ได้แก่

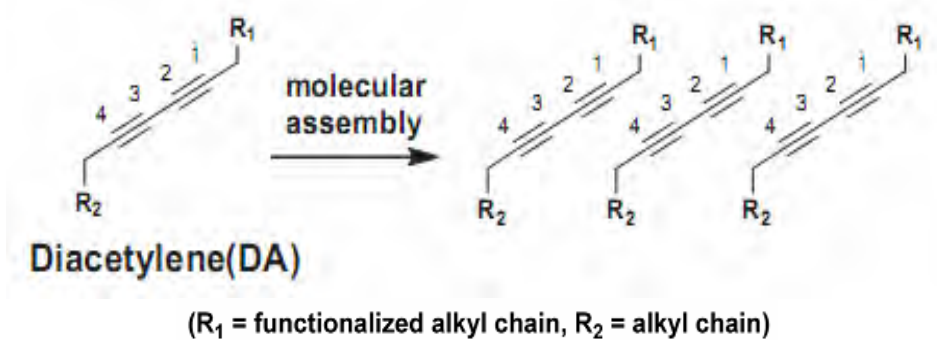
1. พอลิไดแอเซทิลีนสามารถเตรียมได้จากไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ที่สามารถเกิดการจัดเรียงตัวของโมเลกุลให้ประกอบเข้ากันได้เอง ดังแสดงในรูปที่ 2.3

2. พอลิไดแอเซทิลีนสามารถเกิดขึ้นได้โดยการฉายรังสียูวีหรือแกมมา ของไดแอเซทิลีน โดยไม่จำเป็นต้องมี ตัวเริ่มต้น (initiator) หรือ ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ทางเคมี ดังนั้นพอลิไดแอเซทิลีนที่ได้จึงไม่มีการปนเปื้อนจากผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่ไม่ต้องการ

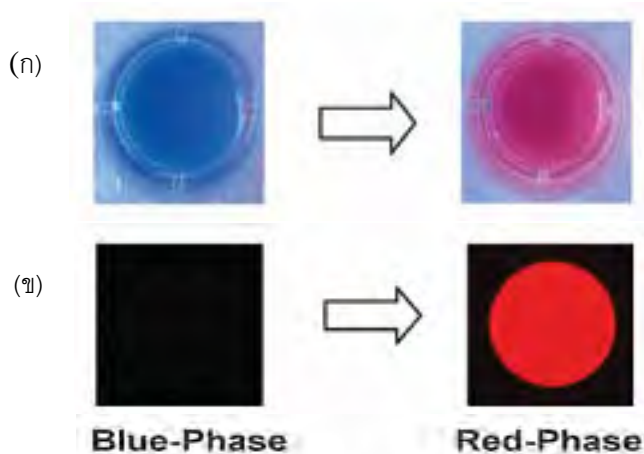
3. พอลิไดแอเซทิลีนสามารถเตรียมได้ง่ายในน้ำในรูปของไลโปโซม (liposomes) หรือเวสิเคิล ซึ่งทำให้สามารถนำมาใช้เป็นเมทริกซ์สำหรับไบโอเซนเซอร์ ซึ่งโดยปกติแล้วการสังเคราะห์คอนจูเกตพอลิเมอร์ที่สามารถละลายหรือเข้ากันได้กับน้ำนั้น จะต้องอาศัยขั้นตอนการสังเคราะห์ที่ยุ่งยากและยาวนาน เนื่องจากได้รับอิทธิพลจากหมู่ฟังก์ชันของโซ่ข้าง (side chain) ที่มีความเป็นขั้วเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ดังนั้น พอลิไดแอเซทิลีนจึงมีความน่าดึงดูดใจเป็นอย่างมากเพราะสามารถเตรียมได้อย่างง่ายในน้ำ

4. พอลิไดแอเซทิลีนมีสมบัติพิเศษด้านการเปลี่ยนสี โดยสามารถเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินซึ่งมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 nm ไปเป็นสีแดงซึ่งมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 nm เมื่อได้รับการตอบสนองต่อสิ่งกระตุ้นต่างๆ เช่น ความร้อน ความเป็นกรด-เบส ตัวทำละลายอินทรีย์ ความเค้นเชิงกล และ ปฏิกิริยาของลิแกนด์กับตัวรับ (ligand-receptor) เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ก) ซึ่งสมบัติข้อนี้ถือเป็นสมบัติเด่นที่ทำให้พอลิไดแอเซทิลีนเป็นที่สนใจนำมาประยุกต์เป็นเซนเซอร์เพื่อตรวจวัดสารต่างๆ

5. พอลิไดแอเซทิลีนมีสมบัติด้านฟลูออเรสเซนซ์ โดยพอลิไดแอเซทิลีนจะไม่ปรากฏสมบัติฟลูออเรสเซนซ์ในเฟสสีน้ำเงิน แต่จะปรากฏสมบัติฟลูออเรสเซนซ์ในเฟสสีแดง ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ข) ซึ่งการเปลี่ยนเฟสจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงนี้ สามารถตรวจสอบได้อย่างง่ายโดยใช้ fluorescence microscopy จากสมบัติด้านฟลูออเรสเซนซ์นี้ จึงทำให้สามารถใช้ในการตรวจติดตามอุณหภูมิภายใน microchannel ได้ โดยไม่จำเป็นต้องใช้เทอร์มอคัปเปิล



รูปที่ 2.3 ความสามารถในการจัดเรียงตัวได้เองของโมเลกุล⁽¹³⁾


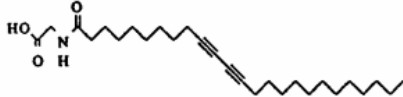

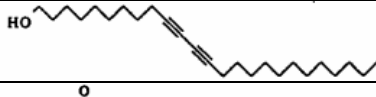
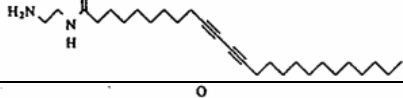
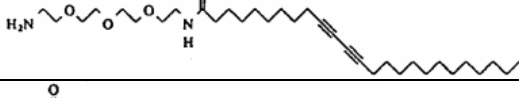
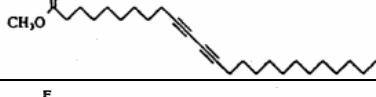
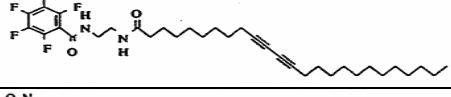
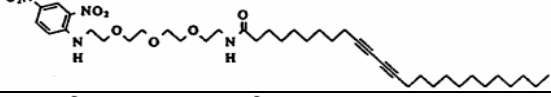
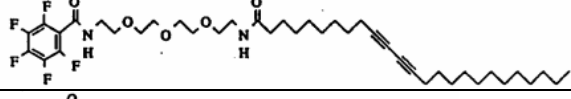
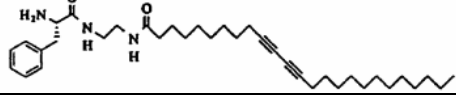
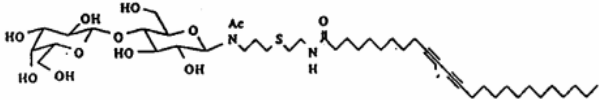
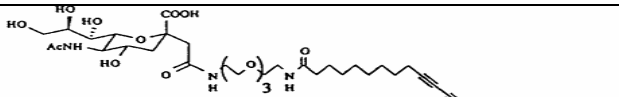
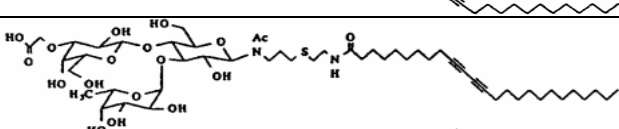


รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงสมบัติของพอลิไดแอเซทิลีนเมื่อได้รับการกระตุ้นจากสิ่งแวดล้อม

(ก) การเปลี่ยนสี และ (ข) ฟลูออเรสเซนซ์⁽¹⁴⁾

พอลิไดแอเซทิลีนสามารถเตรียมได้จากการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันของไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์เมื่อได้รับแสงยูวีภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ซึ่งไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ต่างชนิดกัน จะมีความสามารถในการรวมตัวกับน้ำจนเกิดเป็นลักษณะเวสิเคิลได้ต่างกัน นอกจากนี้ยังมี ความสามารถในการเกิดพอลิเมอร์แตกต่างกันไปด้วย โดยจะสามารถสังเกตกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันที่เกิดขึ้นได้ จากการพิจารณาการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยเวสิเคิลหลังจากทำการฉายแสงยูวี ซึ่งโครงสร้างของไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ชนิดต่างๆ ความสามารถในการรวมตัวกับน้ำ รวมถึงสีของสารแขวนลอยเวสิเคิลเมื่อเกิดพอลิเมอร์ขึ้น แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 โครงสร้างของไดแอเซทิลีนลิพิดชนิดต่างๆ การเกิดไฮเดรชัน และสีของสารแขวนลอยเวสิเคิลเมื่อเกิดพอลิเมอร์ขึ้น โดย Y แสดงถึงการเกิดไฮเดรชัน และ N แสดงถึงไม่เกิดไฮเดรชัน หรือ ไม่เกิดพอลิเมอร์ขึ้น⁽¹⁵⁾

Diacetylene Lipid Structure	Hydration	Polymer Formation
	Y	Blue
	Y	Blue
	Y	Purple
	Y	Orange
	Y	Purple
	Y	Purple
	Y	Red
	Y	N
	Y	Black
	Y	Red
	N	N
	Y	N
	Y	N
	Y	N

สำหรับในงานวิจัยนี้เลือกใช้สารตั้งต้นคือ 10,12-เพนตะโคซะไดอายนโนอิกแอซิด (PCDA) มีสูตรโมเลกุลคือ $C_{25}H_{42}O_2$ ซึ่งเป็นหนึ่งในไดแอเซทิลีนลิปิดที่ได้รับความนิยมและสนใจนำมาใช้ในงานต่างๆอย่างมาก จากโครงสร้างของ PCDA ดังแสดงในรูปที่ 2.5 จะพบว่ามีหมู่ไดแอเซทิลีนซึ่งประกอบด้วยพันธะสาม 2 พันธะ อยู่ที่ตำแหน่ง 10 และ 12 ของโครงสร้าง บริเวณส่วนหางของโครงสร้างที่เป็นสายโซ่แอลคิลจะมีสมบัติไฮโดรโฟบิก (hydrophobic) ซึ่งไม่ชอบน้ำ และที่บริเวณส่วนหัวของโครงสร้างจะมีหมู่ฟังก์ชัน คาร์บอกซิล (-COOH) ซึ่งแสดงควมมีขั้วอยู่ ทำให้สามารถรวมตัวเข้ากับน้ำได้หรือมีสมบัติไฮโดรฟิลิก (hydrophilic) จึงทำให้สามารถเตรียม PCDA ให้อยู่ในรูปของเวสิเคิลซึ่งกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในน้ำได้ง่ายโดยใช้กระบวนการอัลตราโซนิกส์ ซึ่งมีความเหมาะสมอย่างมากที่จะนำไปใช้เป็นเซนเซอร์ระดับโมเลกุล เนื่องจากโดยส่วนใหญ่แล้วโมเลกุลเป้าหมายที่ต้องการตรวจวัดในงานทางด้านชีววิทยา เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และ นิวคลีอิกแอซิด เป็นต้น จะสามารถละลายได้ในน้ำเท่านั้น ดังนั้น ความสามารถในการละลายน้ำ (water solubility) หรือ สภาพเข้ากันได้กับน้ำ (water compatibility) จึงเป็นเกณฑ์สำคัญที่ใช้ในการออกแบบ คอนจูเกตพอลิเมอร์เซนเซอร์ (conjugated polymer sensors)

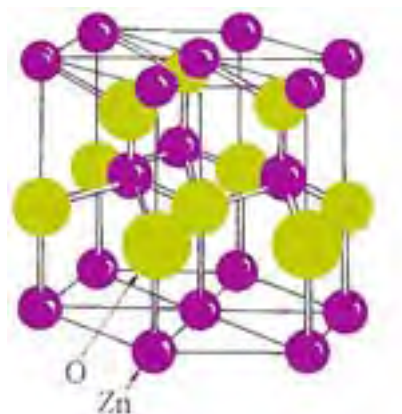


รูปที่ 2.5 โครงสร้างโมเลกุลของ 10,12-เพนตะโคซะไดอายนโนอิกแอซิด (PCDA)⁽¹⁶⁾

2.2 ซิงค์ออกไซด์

ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)⁽¹⁷⁾ เป็นสารประกอบอนินทรีย์ โดยเป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะสังกะสี (Zn) มีมวลโมเลกุล 81.408 กรัม เป็นแอมโฟเทอริกออกไซด์ (amphoteric oxide) คือสามารถทำหน้าที่ได้ทั้งกรดและเบส แทบจะไม่ละลายน้ำและแอลกอฮอล์ รูปผลึกของซิงค์ออกไซด์แบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ดังต่อไปนี้

1. เฮกซะโกนอล เวอร์ทไซต์ (hexagonal wurtzite) เป็นโครงสร้างที่มีความเสถียรมากที่สุดที่สภาวะปกติ จึงเป็นรูปแบบที่พบมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.6
2. คิวบิก ซิงค์เบลน (cubic zincblend) เป็นรูปแบบที่สามารถสร้างขึ้นโดยการปลูกซิงค์ออกไซด์ขึ้นบนซับสเตรตด้วยโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก
3. คิวบิก ร็อกซอลท์ (cubic rocksalt) จะพบได้ที่ความดันสูงประมาณ 10 จิกะปาสกาล (GPa) เท่านั้น



รูปที่ 2.6 รูปผลึกของซิงค์ออกไซด์ที่พบมากที่สุด⁽¹⁸⁾

ซิงค์ออกไซด์ เป็นวัสดุที่มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ มีสมบัติทางไฟฟ้า (electronic) และทางแสง (photonic) ที่ยอดเยี่ยม และมีสมบัติเด่นต่างๆ มากมาย⁽¹⁹⁻²⁰⁾ เช่น มีช่องว่างแถบ (bandgap) กว้างโดยกว้างประมาณ 3.37 อิเล็กตรอนโวลต์ มีความโปร่งใสสูง อิเล็กตรอนโมบิลิตีสูง มีสมบัติการเปล่งแสง (luminescence) ที่อุณหภูมิห้องที่ดี และมีสมบัติด้านเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric) ที่ดีอีกด้วย เนื่องจากคุณสมบัติต่างๆ เหล่านี้ ซิงค์ออกไซด์จึงมีความน่าดึงดูดใจเป็นอย่างมากที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ เช่น เซนเซอร์ (sensors) เซลล์แสงอาทิตย์ (solar cells) อุปกรณ์เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric devices) ทำฟิล์มบางทรานซิสเตอร์ และไดโอดเปล่งแสง (light-emitting diodes) นอกจากนี้ยังนำมาประยุกต์ใช้ในนวัตกรรมใหม่ๆ เช่น ใช้เป็นอิเล็กโทรดโปร่งใส (transparent electrodes) ในจอภาพผลึกเหลว (liquid crystal display) และในวินโดว์ประหยัดพลังงาน (energy-saving windows) เป็นต้น

สมบัติการเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) ของซิงค์ออกไซด์ สามารถทำให้เกิดขึ้นได้ง่าย โดยการแทนที่สังกะสีด้วยธาตุในหมู่ 3 เช่น อะลูมิเนียม แกลเลียม และอินเดียม หรือโดยการแทนที่ออกซิเจนด้วยธาตุหมู่ 7 เช่น คลอรีน หรือ ไอโอดีน ทำให้มีความสามารถในการนำไฟฟ้า เนื่องจากสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะมีอิเล็กตรอนที่เกินมาในโครงสร้าง หรือเรียกว่า ดอนเนอร์ (donor) ซึ่งอิเล็กตรอนจะถูกดึงดูดไว้ด้วยแรง electrostatic อย่างอ่อนๆ มีระดับพลังงานอยู่ใน ช่องว่างแถบ และอยู่ใกล้กับชั้นของแถบการนำ (conduction band) เมื่อเกิดการกระตุ้นด้วยแสงหรือความร้อน อิเล็กตรอนที่เกินมาจะกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระขึ้นไปอยู่ในชั้นของแถบการนำ ทำให้ไม่เกิดโฮล (hole) ในแถบเวเลนซ์ การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดขึ้นส่งผลให้เกิดการนำไฟฟ้าขึ้นในวัสดุได้นั่นเอง

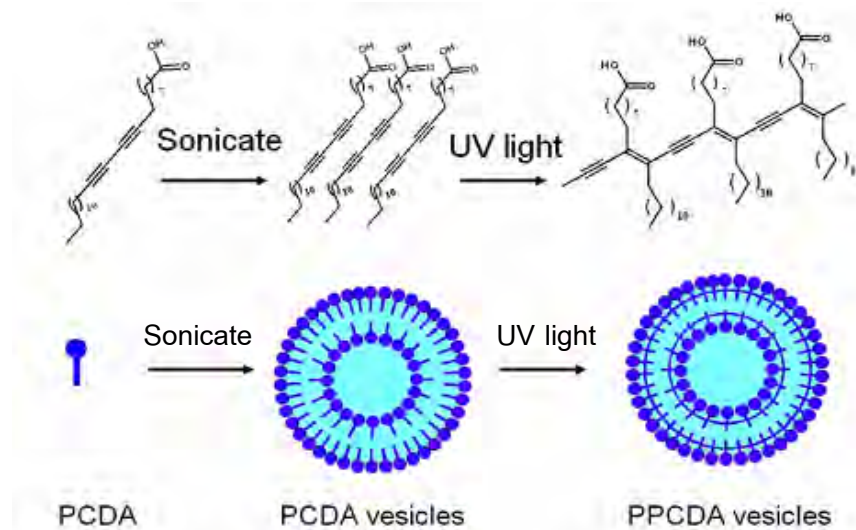
นอกจากซิงค์ออกไซด์จะมีสมบัติความเป็นสารกึ่งตัวนำที่ดีแล้ว ยังมีสมบัติที่ดีในด้านอื่นๆ อีกมากมาย ได้แก่ มีดัชนีการหักเหแสงที่สูง มีค่าความจุความร้อนและสภาพการนำความร้อนสูง การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำ มีอุณหภูมิการหลอมเหลวสูง มีความเสถียรทางเคมี (chemical stability) สูง มีสมบัติในการยับยั้งแบคทีเรียที่ดี นอกจากฆ่าแบคทีเรียแล้วยังช่วยป้องกันและยับยั้งการแบ่งเซลล์ของแบคทีเรีย ด้วยเหตุผลนี้ ซิงค์ออกไซด์จึงเป็นหนึ่งในสารที่สำคัญในการใช้เป็นยาต้านแบคทีเรีย มีสมบัติในการป้องกันรังสียูวีที่ดี โดยสามารถป้องกันได้ทั้งรังสียูวีเอ (UV-A) ที่มีความยาวคลื่นในช่วง 320 ถึง 400 นาโนเมตร และรังสียูวีบี (UV-B) ที่มีความยาวคลื่น 280 ถึง 320 นาโนเมตร ดังนั้นซิงค์ออกไซด์จึงถูกใช้เป็นส่วนผสมในสารกันแดด โดยที่ซิงค์ออกไซด์จะไม่เกิดการดูดกลืนเข้าไปในผิวหนัง นอกจากนี้ผงซิงค์ออกไซด์มักถูกใช้เป็นสารตัวเติม (additive) ลงในวัสดุและผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น พลาสติก แก้ว ซีเมนต์ ยาง สารหล่อลื่น สี กาว อาหาร แบตเตอรี่ เป็นต้น จากสมบัติต่างๆ เหล่านี้จึงทำให้มีการนำผงซิงค์ออกไซด์ไปใช้ประโยชน์ในงานต่างๆ มากมาย เช่น นำซิงค์ออกไซด์ไปประยุกต์ใช้ในไบโอเซนเซอร์ เนื่องจากซิงค์ออกไซด์มีความเข้ากันได้ทางชีววิทยา (biocompatibility) ที่สูง ไม่มีความเป็นพิษต่อร่างกาย และมีจลศาสตร์ในการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนที่เร็ว ดังนั้นจึงมีการนำซิงค์ออกไซด์มาใช้เป็นเมมเบรนที่มีการเลียนแบบโครงสร้างในธรรมชาติ (biomimic membrane) เพื่อปรับปรุงสมบัติของสารชีวโมเลกุล

2.3 การเตรียมพอลิ (10,12-เพนตะโคซะไดอายนโนอิกแอซิด) (PPCDA) เวสิเคิล และ วัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์

สารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียม PPCDA เวสิเคิล คือ PCDA ซึ่งเป็นไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ที่มีสมบัติแอมฟิฟิลิก โดยส่วนปลายของโซ่ข้าง (side chain) ด้านหนึ่งซึ่งมีหมู่คาร์บอกซิลอยู่จะแสดงสมบัติไฮโดรฟิลิก ส่วนโซ่ข้างอีกด้านหนึ่งที่เป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน จะแสดงสมบัติไฮโดรโฟบิก จึงทำให้สามารถเตรียม PCDA ให้มีรูปร่างของโครงสร้างเป็นเวสิเคิลในน้ำได้

เวสิเคิลเป็นโครงสร้างซึ่งประกอบด้วยโมเลกุลแอมฟิฟิลิก 2 ชั้น จัดเรียงตัวล้อมรอบเป็นลักษณะกลม ซึ่งลักษณะเวสิเคิลนี้จะเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลแอมฟิฟิลิกเกิดการรวมตัวกับน้ำ โดยอาศัยกระบวนการอัลตราโซนิกส์ (sonication) หรือการฉีดตัวทำละลาย (solvent injection) หรือการเขย่า (shaking) เข้าร่วมด้วย จึงจะทำให้เกิดลักษณะเวสิเคิลขึ้นมาได้ โดยปลายด้านหนึ่งของโมเลกุลแอมฟิฟิลิกซึ่งมีขั้วจะแสดงสมบัติไฮโดรฟิลิก ทำให้สามารถรวมเข้ากันกับน้ำได้ ส่วนที่ปลายอีกด้านหนึ่งซึ่งไม่มีขั้วจะแสดงสมบัติไฮโดรโฟบิก จึงทำให้โมเลกุลแอมฟิฟิลิกหันปลายด้านที่ไม่มีขั้วเข้าหากันโดยอัตโนมัติและหันปลายอีกด้านที่มีขั้วเข้าสัมผัสกับโมเลกุลของน้ำ

เมื่อนำ PCDA ผสมกับน้ำ โดยมีการอัลตราโซนิกส์ที่อุณหภูมิ 75 ถึง 80 องศาเซลเซียส ร่วมด้วย จะทำให้ PCDA มอนอเมอร์ที่เกาะตัวรวมกันเกิดการแตกออกเป็นโมเลกุลเดี่ยวและกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในน้ำ จากนั้นเมื่อนำไปแช่เย็น จะเกิด PCDA เวสิเคิลขึ้นมา และเมื่อทำการฉายแสงยูวีภายใต้สภาวะที่เหมาะสมจะเกิดกระบวนการพอลิเมอไรเซชันได้ PPCDA ขึ้น โดย PPCDA เวสิเคิลที่เตรียมได้จะปรากฏเป็นสีน้ำเงิน ซึ่งขั้นตอนการเกิด PPCDA เวสิเคิล แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การเตรียมพอลิ (10,12-เพนตะโคเซ-ไดออยน์โนอิกแอซิด) (PPCDA) เวสิเคิล โดยใช้ PCDA เป็นสารตั้งต้น⁽²¹⁾

วัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์สามารถเตรียมขึ้นได้ง่าย โดยนำผงซิงค์ออกไซด์ผสมกับน้ำและนำไปอัลตราโซนิกส์ด้วยโพรบ (probe) เพื่อให้เกิดการกระจายตัวที่ดีก่อนที่จะผสมกับ PCDA แล้วทำการอัลตราโซนิกส์ที่อุณหภูมิ 75 ถึง 80 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิดวัสดุเชิงประกอบ PCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ขึ้น โดยจะเกิดการจัดเรียงตัวได้เองของโมเลกุล PCDA บนผิวของอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ เนื่องจากเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (ionic interaction) และพันธะไฮโดรเจน ทำให้ PCDA สามารถยึดเกาะอยู่บนผิวของอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ได้ และเมื่อทำการฉายแสงยูวีภายใต้สภาวะที่เหมาะสม PCDA จะเกิดกระบวนการพอลิเมอไรเซชันขึ้น และได้วัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ในที่สุด

2.4 สมบัติการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล

จุดเด่นหนึ่งของพอลิไดแอเซทิลีนที่มีความน่าสนใจเป็นอย่างมากคือ สมบัติเรืองสี และการเปลี่ยนสีของวัสดุ พลังงานการกระตุ้นของอิเล็กตรอนซึ่งจะส่งผลให้เกิดสีของพอลิไดแอเซทิลีนนั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยมากมาย อาทิ สภาพการเกาะตัวตั้งต้นของมอนอเมอร์ การได้รับการรบกวนจากสิ่งกระตุ้นภายนอกต่างๆ เช่น ความร้อน ความเค้นเชิงกล ความเป็นกรด-เบส หรือตัวทำละลาย เป็นต้น สิ่งต่างๆเหล่านี้ล้วนส่งผลต่อการเปลี่ยนสีของวัสดุทั้งสิ้น โดยปกติแล้วเมื่อพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลได้รับการรบกวนจากสิ่งกระตุ้นต่างๆ จะเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดง โดยจะมีค่าการดูดกลืนแสงที่มากที่สุดของรูปแบบสีน้ำเงิน (blue form) อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 620 ถึง 640 นาโนเมตร และรูปแบบสีแดง (red form) ในช่วงความยาวคลื่น 490 ถึง 540 นาโนเมตร ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการประเมินค่าการเปลี่ยนแปลงสี จึงมีการให้คำจำกัดความของการตอบสนองต่อสิ่งกระตุ้นในการเปลี่ยนสี (colorimetric response) เป็นเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของรูปแบบสีน้ำเงินไปเป็นรูปแบบสีแดง (%CR) โดยสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้⁽¹⁵⁾

$$\%CR = \frac{(PB_0 - PB)}{PB_0} \times 100$$

$$PB = \frac{A_{\text{blue}}}{[A_{\text{blue}} + A_{\text{red}}]} \times 100\%$$

เมื่อ PB คือ เปอร์เซ็นต์สีน้ำเงินสิ้นสุด หลังจากเกิดการเปลี่ยนสีแล้ว

PB₀ คือ เปอร์เซ็นต์สีน้ำเงินเริ่มต้น

A_{blue} คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่มากที่สุดในช่วงความยาวคลื่นของรูปแบบสีน้ำเงิน

A_{red} คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่มากที่สุดในช่วงความยาวคลื่นของรูปแบบสีแดง

กลไกในการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับการตอบสนองต่อสิ่งกระตุ้นเป็นผลมาจากโครงรูปโซ่หลักของคอนจูเกตพอลิเมอร์เกิดการเปลี่ยนแปลงเช่น เกิดการรวมกลุ่มกันของโซ่ข้าง ทิศทางการเรียงตัวเปลี่ยนแปลงไป เป็นต้น จึงทำให้เกิดความเค้นที่สายโซ่หลักและส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงรูปโซ่ ดังนั้นจึงทำให้สถานะของอิเล็กตรอน (electronic states) และการดูดกลืนแสงเกิดการเปลี่ยนแปลงส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสีขึ้น ซึ่งความแตกต่างของพอลิไดแอเซทิลีนที่เป็นเฟสสีน้ำเงินและเฟสสีแดงอยู่ที่ความแตกต่างของโครงรูปโซ่หลัก หรือ ความแตกต่างจากผลของ head groups เช่น ส่งผลให้เกิดการบิดของพันธะ ทำให้มุมพันธะของออร์บิทัลพี (p-orbitals) เกิดการเปลี่ยนแปลง

การเติมอนุภาคระดับนาโนเข้าไปในระบบเพื่อทำให้เกิดเป็นวัสดุเชิงประกอบขึ้น อาจทำให้โครงสร้างหลักของคอนจูเกตพอลิเมอร์เกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลที่ไม่มีอนุภาคระดับนาโนอยู่ในระบบ เช่น โซ่ข้างของพอลิไดแอเซทิลีนเกิดการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบมากขึ้นหรือน้อยลง ทำให้อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นที่โซ่ข้างเกิดการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากมีอนุภาคระดับนาโนซึ่งทำหน้าที่เสมือนเป็นข้อต่อให้ไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์มายึดเกาะอยู่ที่ผิว จึงส่งผลต่อโครงสร้างหลักของพอลิไดแอเซทิลีน เช่น ระยะคอนจูเกต (conjugation length) เพิ่มขึ้นหรือลดลง ทำให้สมบัติการดูดกลืนแสงเกิดการเปลี่ยนแปลง นำไปสู่การเปลี่ยนสีในระดับที่แตกต่างจากพอลิไดแอเซทิลีนที่บริสุทธิ์

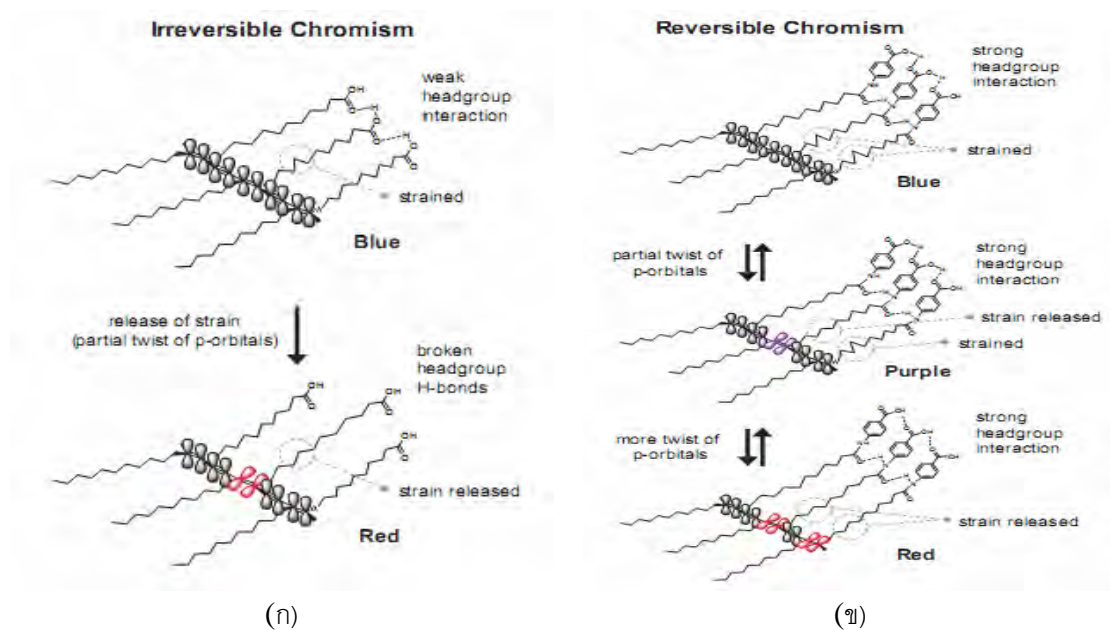
2.4.1. การเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลเมื่อได้รับการรบกวนจากความร้อน

ในบรรดาสิ่งกระตุ้นต่างๆ ที่จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลนั้น พบว่า การเปลี่ยนสีเนื่องจากได้รับอิทธิพลจากความร้อนมีความน่าสนใจและมีการศึกษาอย่างละเอียดถี่ถ้วน ซึ่งการเปลี่ยนสีเนื่องจากความร้อนของพอลิไดแอเซทิลีนโดยส่วนมากมักจะเป็นกระบวนการผันกลับไม่ได้ อย่างเช่น PPCDA ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แต่ยังมีพอลิไดแอเซทิลีนบางชนิดที่สามารถเกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้เช่นกัน

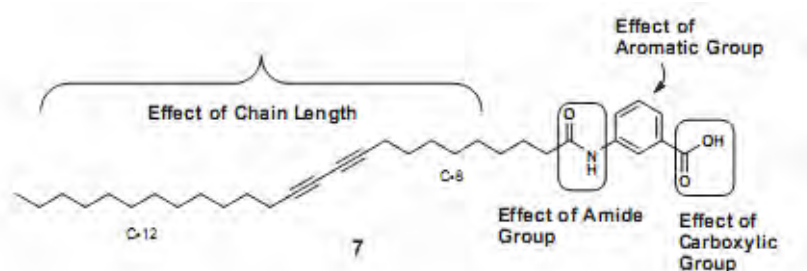
สำหรับกลไกการเปลี่ยนสีแบบผันกลับไม่ได้ของพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลเมื่อได้รับอิทธิพลจากความร้อน⁽²²⁾ อันตรกิริยาที่ head groups เช่น การเกิดพันธะไฮโดรเจนเชื่อมระหว่าง head groups ที่อยู่ติดกัน มีบทบาทสำคัญในการควบคุมการจัดเรียงตัวของโมเลกุลของสายโซ่เมทิลีนของพอลิไดแอเซทิลีน ซึ่งอาจเกิดการจัดเรียงตัวอย่างบิดเบี้ยวผิดปกติขึ้นได้ในระหว่างที่เกิดกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน จึงส่งผลให้เกิดความเครียดเชิงกลขึ้นมา ซึ่งพันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่าง head groups ที่อยู่ติดกันของพอลิไดแอเซทิลีนค่อนข้างอ่อน ดังนั้นเมื่อพอลิไดแอเซทิลีนได้รับการกระตุ้นจากความร้อนที่อุณหภูมิสูง จะมีการปลดปล่อยความเครียดเชิงกลออกมาและทำให้พันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่าง head groups เกิดการแตกออก ส่งผลให้ออร์บิทัลพีที่สายโซ่หลักที่มีโครงสร้างเป็นแบบคอนจูเกตเกิดการบิดตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.8 (ก) ระยะคอนจูเกตจึงลดลง ทำให้สถานะของอิเล็กตรอนและการดูดกลืนแสงเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยแถบเวเลนซ์ (valence band) จะต่ำลง และช่องว่าง $\pi-\pi^*$ กว้างขึ้น ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลจากสีน้ำเงินเป็นสีแดง

กลไกการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนแบบผันกลับได้ เมื่อได้รับการกระตุ้นจากความร้อน⁽²²⁾ เช่น พอลิไดแอเซทิลีนที่สร้างขึ้นจากไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 เกิด

เนื่องจากอันตรกิริยาที่ head groups มีความแข็งแรงมาก พันธะไฮโดรเจนที่ head groups ยังคงไม่แตกออกแม้จะได้รับการกระตุ้นจากร้อนที่อุณหภูมิสูงก็ตาม โดยเมื่อมีการให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิหนึ่งซึ่งสารละลายพอลิไดอะเซทิลีนเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วง ความเครียดเชิงกลที่โซ่ข้างจะถูกปลดปล่อยออกมา เป็นสาเหตุให้การจัดเรียงตัวของออร์บิทัลพีที่สายโซ่หลักที่มีโครงสร้างเป็นแบบคอนจูเกตเกิดการบิดตัวไปบางส่วน และเมื่อมีการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้น พบว่ามีออร์บิทัลพีที่เกิดการบิดตัวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความยาวของสายโซ่หลักที่มีโครงสร้างเป็นแบบคอนจูเกตลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.8 (ข) จึงทำให้สถานะของอิเล็กตรอนและการดูดกลืนแสงเกิดการเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้สารละลายพอลิไดอะเซทิลีนเปลี่ยนเป็นสีแดงโดยไม่เกิดการแตกออกของพันธะไฮโดรเจนที่ head groups ขึ้น ความแตกต่างของพลังงานของพอลิไดอะเซทิลีนในสถานะที่เป็นเฟสสีน้ำเงินและสีแดงจึงมีเพียงแค่น้อย ส่งผลให้พอลิไดอะเซทิลีนสามารถเปลี่ยนเฟสจากสีแดงกลับเป็นเฟสสีน้ำเงินได้ง่ายเมื่อไม่ได้รับการกระตุ้นจากร้อนแล้ว



รูปที่ 2.8 กลไกการเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีน (ก) แบบผันกลับไม่ได้ (ข) แบบผันกลับได้ เมื่อได้รับการรบกวนจากร้อน⁽²²⁾



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ที่เกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้⁽²²⁾

ปัจจัยพื้นฐานที่ส่งผลให้พอลิไดแอเซทิลีนมีความไวในการตอบสนองต่อสิ่งกระตุ้นทางความร้อน มี 3 ประการ⁽²²⁾ ได้แก่

1. ตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชันไดแอเซทิลีนและ head groups โดยพอลิไดแอเซทิลีนที่เตรียมขึ้นจาก ไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันไดแอเซทิลีนอยู่ใกล้กับ head groups จะมีความเสถียรในการเปลี่ยนสีต่ำกว่า เปลี่ยนสีได้ไวกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิไดแอเซทิลีนที่เตรียมขึ้นจาก ไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันไดแอเซทิลีนอยู่ที่ช่วงกลางหรือใกล้ช่วงกลางของสายโซ่แอลคิล

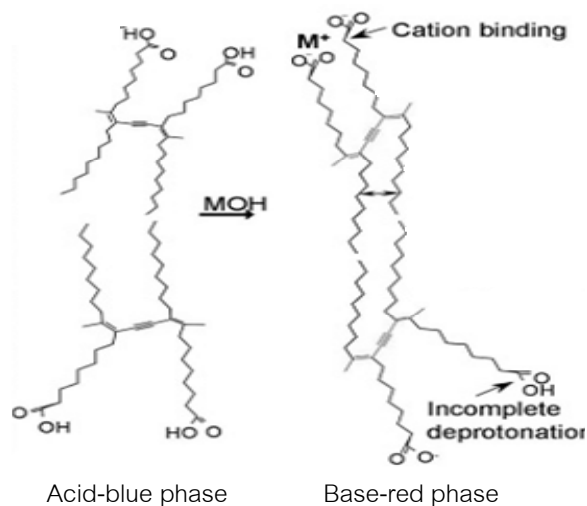
2. อันตรกิริยาที่ head groups ถ้าอันตรกิริยาที่ head groups แข็งแรง จะมีความไวในการเปลี่ยนสีน้อยกว่า ยกตัวอย่างเช่น พอลิไดแอเซทิลีนที่เตรียมจากไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่ head groups ไม่มีหมู่เอไมด์ หรือ หมู่คาร์บอกซิล จะเกิดการเปลี่ยนสีได้ไวกว่า พอลิไดแอเซทิลีนที่เตรียมจากไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่ head groups มีหมู่คาร์บอกซิล หรือ หมู่เอไมด์ ตามลำดับ

3. สภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิไดแอเซทิลีน ซึ่งโดยปกติแล้ว พอลิไดแอเซทิลีนที่เตรียมขึ้นที่อุณหภูมิสูงจะมีความเสถียรในการเปลี่ยนสีสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิไดแอเซทิลีนที่เตรียมที่อุณหภูมิต่ำ

นอกจากนี้การเติมอนุภาคระดับนาโนเพื่อให้เกิดเป็นวัสดุเชิงประกอบยังส่งผลต่ออันตรกิริยาที่ head groups ด้วย เช่น พันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่าง head groups ของพอลิไดแอเซทิลีนที่อยู่ติดกันมีความแข็งแรงมากขึ้นหรือน้อยลง ดังนั้นเมื่อได้รับอิทธิพลจากความร้อน พันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่าง head groups ก็จะมีการแตกออกยากหรือง่ายมากขึ้น ระดับการปลดปล่อยความเครียดเชิงกลในสายโซ่ก็จะแตกต่างกันออกไป ส่งผลต่อความยากง่ายในการบิดตัวของออร์บิทัลพีที่สายโซ่หลัก และนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงระยะคอนจูเกต ทำให้การดูดกลืนแสงและการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบเกิดการเปลี่ยนแปลงในระดับที่แตกต่างจากพอลิไดแอเซทิลีนที่บริสุทธิ์

2.4.2. การเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนเวลิเคิลเมื่อได้รับการรบกวนจากความเป็นกรด-เบส

โครงสร้างของพอลิไดแอเซทิลีนเวลิเคิลในน้ำเป็นแบบไบเลเยอร์ (bilayer) โดยมีหมู่คาร์บอกซิล ($-\text{COOH}$) อยู่บริเวณผิวด้านนอกและด้านใน ซึ่งกลไกการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนเวลิเคิลเมื่อมีการเพิ่มค่าความเป็นกรด-เบส เกี่ยวข้องกับการแตกออกของพันธะไฮโดรเจนที่หมู่คาร์บอกซิล⁽²³⁾ จึงทำให้เกิดแรงผลักระหว่างคาร์บอกซิเลตไอออน ($-\text{COO}^-$) ที่อยู่ติดกัน จึงส่งผลให้เกิดความไม่เป็นระเบียบของหมู่ไซ่ข้าง (side chain) นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสายไซ่หลักที่มีโครงสร้างเป็นแบบคอนจูเกตและทำให้ระยะคอนจูเกตลดลง ส่งผลต่อสถานะของอิเล็กตรอนและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของโมเลกุลไปยังความยาวคลื่นที่สั้นกว่า จึงปรากฏให้เห็นเป็นสารละลายสีแดงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.10 แต่การปรับค่าความเป็นกรด-เบสให้มีสภาพเป็นกรดจะไม่ส่งผลต่อสมบัติการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนเวลิเคิล

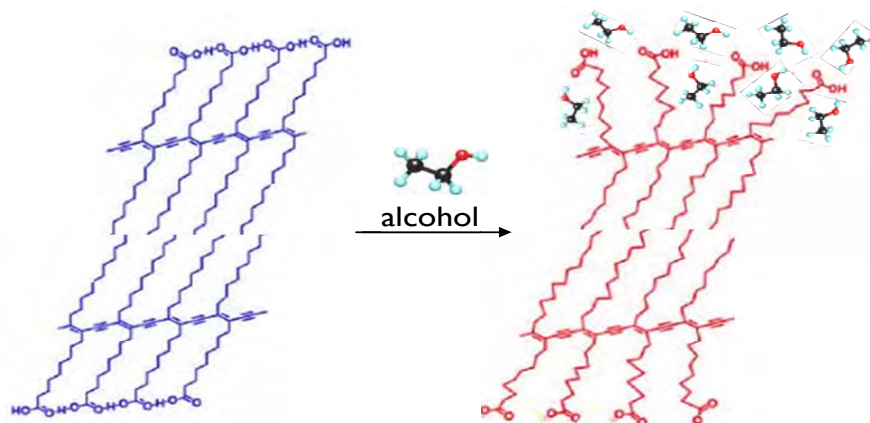


รูปที่ 2.10 กลไกการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนเมื่อทำการเพิ่มค่าความเป็นกรด-เบส⁽²³⁾

การเติมอนุภาคระดับนาโนเข้าไปในระบบคาดว่าจะส่งผลต่อความเป็นระเบียบของไซ่ข้างและโครงรูปของสายไซ่หลัก ดังนั้นระยะคอนจูเกตจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงแตกต่างจากกรณีของพอลิไดแอเซทิลีนที่บริสุทธิ์ เมื่อได้รับการรบกวนจากความเป็นกรด-เบส

2.4.3. การเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลเมื่อได้รับการรบกวนจากตัวทำละลาย

การเปลี่ยนสีขึ้นอยู่กับสภาพของตัวทำละลายนั้นและโครงสร้างของไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ เมื่อใช้ตัวทำละลายหรือไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ต่างชนิดกันจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสีในระดับที่แตกต่างกันไป การเปลี่ยนสีเมื่อได้รับการรบกวนจากตัวทำละลายจะมีกลไกการเปลี่ยนสีที่คล้ายคลึงกับเมื่อได้รับการรบกวนจากความเป็นเบส⁽¹⁰⁾ โดยพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลจะเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลของตัวทำละลายที่ผิวร่วม (interface) เช่นเดียวกัน จึงส่งผลให้พันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่างหมู่คาร์บอกซิลเกิดการแตกออก ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบขึ้นที่หมู่ไฮดรอกซิลและรบกวนความเป็นระนาบของสายโซ่หลักที่มีโครงสร้างเป็นแบบคอนจูเกต ทำให้ระยะคอนจูเกตลดลง เป็นสาเหตุให้พอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลเกิดการเปลี่ยนสีเป็นสีแดงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 กลไกการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนเมื่อได้รับการรบกวนจากเอทานอล⁽¹⁰⁾

ในกรณีของการเตรียมวัสดุเชิงประกอบของพอลิไดแอเซทิลีนกับอนุภาคระดับนาโน อนุภาคระดับนาโนที่เติมเข้าไปในระบบจะส่งผลให้พอลิไดแอเซทิลีนเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลของตัวทำละลายในระดับที่แตกต่างออกไปจากพอลิไดแอเซทิลีนที่ไม่มีการเติมอนุภาคระดับนาโน เช่น ทำให้พันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่างหมู่คาร์บอกซิลเกิดการแตกออกยากหรือง่ายมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลต่อการจัดเรียงตัวของโซ่ข้างและโครงรูปของสายโซ่หลัก เป็นสาเหตุให้วัสดุเชิงประกอบเกิดการเปลี่ยนสีในระดับที่แตกต่างจากพอลิไดแอเซทิลีนที่บริสุทธิ์

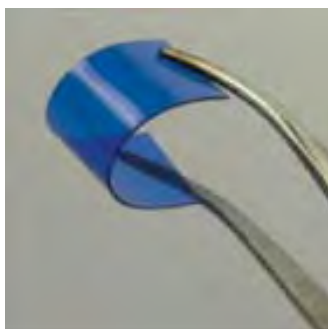
2.5 พอลิเมอร์โพลิไดอะเซทิลีน และพอลิเมอร์วัสดุเชิงประกอบโพลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคระดับนาโน ที่ฝังตรึงในโพลิไวนิลแอลกอฮอล์

เซนเซอร์ที่ทำจากโพลิไดอะเซทิลีนส่วนใหญ่มักจะเตรียมขึ้นในรูปของสารแขวนลอยในน้ำ (aqueous suspensions) หรือ พอลิเมอร์บางบนซับสเตรตของแข็ง (solid substrates) แต่ในปัจจุบันนี้ ได้มีการพัฒนาวิธีการใหม่ๆ ขึ้นมามากมายเพื่อที่จะปรับปรุงข้อจำกัดที่เกี่ยวกับการใช้เซนเซอร์ในรูปของสารละลายหรือฟิล์ม ยกตัวอย่างเช่น การฝังตรึง (embedding) โพลิไดอะเซทิลีนนาโนเวสิเคิลลงในเมทริกซ์ เช่น วัสดุโซล-เจล (sol-gel materials) คาร์โบไฮเดรต (carbohydrates) แผ่นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (LDH) ระดับนาโน โพลิไวนิลไพร์โรลิโดน (polyvinylpyrrolidone) (PVP) และ โพลิไวนิลแอลกอฮอล์ (polyvinylalcohol) (PVA) ซึ่งเซนเซอร์ที่มีการฝังตรึงโพลิไดอะเซทิลีนหรือวัสดุเชิงประกอบของโพลิไดอะเซทิลีนลงไปวัสดุต่างๆ เหล่านี้ จะมีความเสถียรเป็นเวลายาวนานกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเซนเซอร์ในรูปของสารละลาย

การใช้โพลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นเมทริกซ์ มีข้อดีหลายประการดังนี้⁽²⁴⁾

- 1) มีสมบัติไฮโดรฟิลิกซึ่งทำให้สามารถรวมตัวเข้ากันกับโมเลกุลน้ำได้เป็นอย่างดี
- 2) เป็นไฮโดรเจลฟิล์ม ซึ่งมีความสามารถพิเศษในการดูดซับน้ำ
- 3) มีความสามารถในการละลายน้ำ ซึ่งนำไปสู่ความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม
- 4) มีความเฉื่อยต่อโมเลกุลที่เข้ามาผสมด้วย

ฟิล์มโพลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลและวัสดุเชิงประกอบของโพลิไดอะเซทิลีนที่ฝังตรึงในโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ สามารถเตรียมได้ง่ายโดยใช้กระบวนการผสมและทำให้แห้ง (mixing-drying)⁽²⁵⁾ โดยนำสารละลายสีน้ำเงินของโพลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลหรือสารละลายวัสดุเชิงประกอบของโพลิไดอะเซทิลีนมาผสมกับสารละลายโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ในอัตราส่วนที่เท่ากัน จากนั้นเทใส่จานเพาะเชื้อและตั้งทิ้งไว้ให้แห้ง ก็จะสามารถเตรียมฟิล์มโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการฝังโพลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลหรือวัสดุเชิงประกอบของโพลิไดอะเซทิลีนได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ฟิล์มโพลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลที่ฝังตรึงในโพลิไวนิลแอลกอฮอล์⁽²⁵⁾

2.6 หลักการและเทคนิคในการวิเคราะห์

ในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิคต่างๆ ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุที่เตรียมได้ดังต่อไปนี้ (1) UV-Vis spectroscopy โหมดการดูดกลืนแสง ใช้ในการศึกษาลักษณะรูปร่าง การจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ในสารละลายและในฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ (2) laser light scattering technique ใช้ในการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายขนาดของอนุภาค (3) fourier transform Infrared spectroscopy ใช้ในการศึกษาการเกิดหมู่ฟังก์ชันในวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ (4) electron microscopy ใช้ในการศึกษาขนาดอนุภาคและโครงสร้างระดับจุลภาค และ (5) atomic force microscopy ใช้ในการศึกษาสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ พอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล และวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ โดยหลักการของเทคนิคดังกล่าวข้างต้นแสดงดังต่อไปนี้

2.6.1. อัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-VIS Absorption Spectroscopy)

อัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี⁽²⁶⁻²⁹⁾ เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงยูวีและวิสิเบิลของสารที่ต้องการวิเคราะห์ ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน และสารอนินทรีย์ ทั้งที่มีสีและไม่มีสี ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้ โดยอาศัยหลักการพื้นฐานคือ เมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงในช่วงรังสียูวีหรือแสงขาวที่มีพลังงานเหมาะสม จะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอม เกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า ทำให้สมบัติของวัสดุเปลี่ยนไปเนื่องจากมีอันตรกิริยาของโฟตอนเกิดขึ้นต่อโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์และพันธะของอะตอม ไอออน หรือโมเลกุลที่ใช้สร้างวัสดุชนิดนั้นๆ ส่วนแสงที่เหลือจะผ่านไปยังตัวตรวจวัดเพื่อทำการแปลงสัญญาณออกมา การฉายแสงผ่านตัวอย่าง แสดงในรูปที่ 2.13 เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆตามกฎของ Beer-Lambert ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถระบุชนิดและปริมาณของสารที่มีอยู่ในตัวอย่างได้

จากกฎของ Beer-Lambert : $A = \log(P_0/P) = abC = \epsilon bC$

กำหนดให้ค่าการส่งผ่าน (transmittance) : $T = P/P_0$

$$\%T = (P/P_0) \times 100$$

$$\log \%T = \log [(P/P_0) \times 100] = 2 + \log (P/P_0)$$

จาก $A = \log (P_0/P)$ จะได้ $\log \%T = 2 - A$

$$A = 2 - \log \%T$$

เมื่อ T คือ ค่าการส่งผ่านแสง

P คือ ความเข้มแสงที่ทะลุผ่านสารตัวอย่างออกมา

P_0 คือ ความเข้มแสงเริ่มต้นที่ให้เข้าไป

A คือ ค่าการดูดกลืนแสง

a คือ สภาพดูดกลืน (absorptivity) มีหน่วยเป็น ลิตร/กรัม-เซนติเมตร

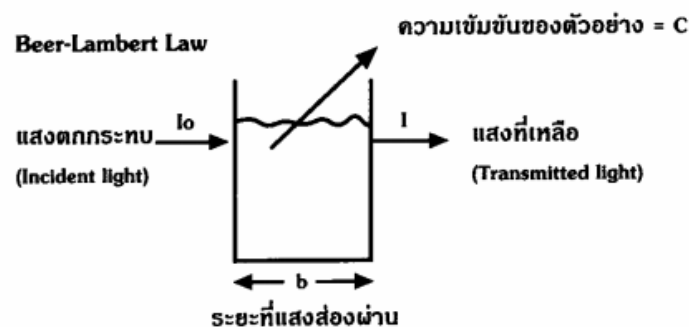
ϵ คือ molar absorptivity มีหน่วยเป็น ลิตร/โมล-เซนติเมตร

b คือ ความหนาของสาร มีหน่วยเป็น เซนติเมตร ในกรณีที่สารอยู่ในรูปของสารละลาย b คือ ความหนาของเซลล์ที่บรรจุสารละลายอยู่

C คือ ความเข้มข้นของสาร มีหน่วยเป็น โมล/ลิตร

กฎของ Beer-Lambert จะใช้ได้ต่อเมื่อ

- แสงที่ส่งผ่านสารเป็น monochromatic radiation
- สารตัวอย่างที่ใช้วัดจะต้องมีความเป็นเนื้อเดียวกัน
- กระบวนการดูดกลืนแสงแต่ละชนิดของแต่ละอนุภาคจะต้องไม่มีผลต่อกันและกัน นั่นคือ สารตัวอย่างที่ใช้วัดต้องเจือจางพอสมควร



รูปที่ 2.13 แบบจำลองการฉายแสงผ่านสารตัวอย่าง

เมื่อแสงส่องกระทบสารตัวอย่าง สารจะดูดกลืนพลังงานส่วนหนึ่งไว้ และปล่อยให้พลังงานส่วนที่เหลือผ่านออกไปจากสารโดยที่ความถี่จะยังคงเท่าเดิม พลังงานที่สารดูดกลืนไว้จะไปทำให้อิเล็กตรอน หรืออะตอม หรือโมเลกุล เปลี่ยนสภาวะ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงสภาวะนี้เป็นไปตาม

ทฤษฎีควอนตัม ซึ่งมีค่าพลังงานเป็นค่าเฉพาะ การเปลี่ยนแปลงสภาวะดังกล่าวเรียกว่า quantized transition ซึ่งมี 3 แบบ ได้แก่

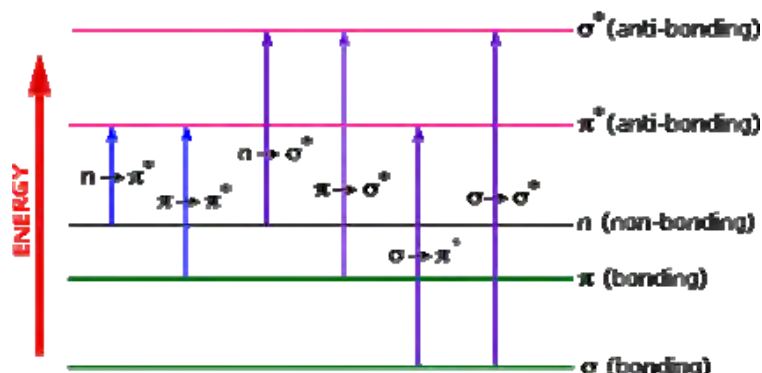
1. Electronic transition อิเล็กตรอนได้รับพลังงานและถูกกระตุ้นให้อยู่ในสถานะกระตุ้น (excited state) โดยอิเล็กตรอนจะเปลี่ยนไปอยู่ในชั้นระดับพลังงานที่สูงขึ้น โดยทั่วไปค่าพลังงานที่เกิด electronic transition จะอยู่ในช่วงแสงยูวีและวิสิเบิล

2. Vibration transition เนื่องจากอะตอมในโมเลกุลจะสั่นตลอดเวลาด้วยความถี่ที่ค่าหนึ่ง เมื่ออะตอมได้รับพลังงานจะเกิดการสั่นด้วยความถี่ที่สูงกว่าเดิม ค่าพลังงานที่เกิด vibration transition จะอยู่ในช่วงอินฟราเรด

3. Rotation transition เกิดในระดับโมเลกุลโดยโมเลกุลจะมีการหมุนรอบแกนต่างๆเป็นปกติและค่าพลังงานของการหมุนในแต่ละระดับมีค่าที่แน่นอน เมื่อสารดูดกลืนพลังงานมาจะสามารถทำให้การหมุนของโมเลกุลขึ้นไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงขึ้นได้ ซึ่งค่าพลังงานเหล่านี้อยู่ในช่วงแสงอินฟราเรดไกล (far infrared) และช่วงไมโครเวฟ

การดูดกลืนแสงจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อความแตกต่างของระดับพลังงานในสถานะพื้น (ground state) และสถานะกระตุ้น (excited state) เท่ากับพลังงานของคลื่นแสงหรือโฟตอนที่อะตอมหรือโมเลกุลนั้นดูดกลืน เมื่อสารดูดกลืนแสงจะมีการถ่ายเทพลังงานจากแสงไปยังสาร ทำให้อิเล็กตรอนของสารนั้นเปลี่ยนระดับพลังงานจากระดับต่ำหรือสถานะพื้นไปสู่สถานะกระตุ้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า อิเล็กตรอนจะอยู่ในสถานะกระตุ้น $10^{-8} - 10^{-9}$ วินาที และอิเล็กตรอนจะกลับลงสู่สถานะพื้นโดยการคายแสงหรือความร้อนออกมา พลังงานคลื่นแสงที่ถูกดูดกลืนจะมีค่าเท่ากับผลต่างของระดับพลังงานของสถานะพื้นและสถานะกระตุ้น

การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนของสารอินทรีย์ส่วนมากเป็นการเปลี่ยนแปลงของอิเล็กตรอนจากออร์บิทัลเชิงโมเลกุลที่สร้างพันธะ (bonding molecular orbital) ที่สถานะพื้นได้แก่ σ ออร์บิทัล (sigma orbital) และ π ออร์บิทัล (Pi orbital) ไปยังออร์บิทัลเชิงโมเลกุลที่ต้านพันธะ (antibonding molecular orbital) ที่สถานะกระตุ้น ได้แก่ σ^* และ π^* ซึ่งจะเกิดการแทนที่ขึ้นได้ 4 แบบดังต่อไปนี้ $\sigma \rightarrow \sigma^*$ $\sigma \rightarrow \pi^*$ $\pi \rightarrow \sigma^*$ $\pi \rightarrow \pi^*$ นอกจากนี้ยังมีการเปลี่ยนแปลงของอิเล็กตรอนจากอิเล็กตรอนชนิดไม่ก่อพันธะ (non bonding electron) หรือ n-electron ที่สถานะพื้น ได้แก่ อิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว (lone pair electron) ใน ออกซิเจน (O), ซัลเฟอร์ (S), ไนโตรเจน (N) และ แฮโลเจน (halogen) ไปยังออร์บิทัลเชิงโมเลกุลที่ต้านพันธะที่สถานะกระตุ้น ได้แก่ σ^* และ π^* ซึ่งเกิดการแทนที่ขึ้นแบบ $n \rightarrow \sigma^*$ และ $n \rightarrow \pi^*$ ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การจัดเรียงระดับพลังงานและการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอน⁽²⁷⁾

ประเภทของการแทนที่ชั้นที่เกิดขึ้น ขึ้นอยู่กับชนิดของพันธะในสารนั้น โดยสามารถจำแนกได้เป็น

- สารประกอบที่มีแต่พันธะ σ เพียงอย่างเดียว ได้แก่ สารที่มีพันธะชนิดอิ่มตัว (saturated compound) โดยไม่มีอะตอมวิวิธพันธุ์ (heteroatom) อยู่ในโครงสร้างโมเลกุล เช่น มีเทน (CH_4) และอีเทน (C_2H_6) เป็นต้น จะเกิดแทนที่ชั้นแบบ $\sigma \rightarrow \sigma^*$ เท่านั้น

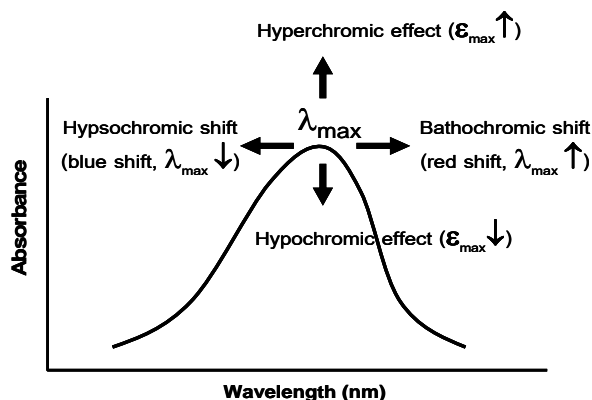
- สารประกอบที่มีพันธะ σ และ อิเล็กตรอนชนิดไม่ก่อบंधะ (n) ได้แก่ สารที่มีพันธะชนิดอิ่มตัวในโครงสร้าง โดยมีพันธะ σ แต่ไม่มีพันธะ π และมี heteroatom อยู่ในโมเลกุลซึ่งมีอิเล็กตรอนชนิดไม่ก่อบंधะ เช่น แอลกอฮอล์อิ่มตัว (saturated alcohol) (ROH) อีเทอร์อิ่มตัว (saturated ethers) (ROR') เอมีนอิ่มตัว (saturated amines) (RNH_2) แอลคิลเฮไลด์อิ่มตัว (saturated alkyl halides) (RX) และซัลไฟด์อิ่มตัว (saturated sulphides) (RSR') เป็นต้น สารประเภทนี้จะเกิด transition แบบ $\sigma \rightarrow \sigma^*$ และ $n \rightarrow \sigma^*$

- สารประกอบที่มีพันธะ π ได้แก่ สารที่มีพันธะแบบไม่อิ่มตัว (พันธะคู่หรือพันธะสาม) ในโครงสร้างแต่ไม่มี heteroatom เช่น เอทิลีน (ethylene) โพรพิลีน (propylene) และแอเซทิลีน (acetylene) เป็นต้น สารนี้จะเกิดแทนที่ชั้นได้ทั้งแบบ $\sigma \rightarrow \sigma^*$ $\sigma \rightarrow \pi^*$ $\pi \rightarrow \pi^*$ และ $\pi \rightarrow \sigma^*$ ถ้าในสารประกอบเกิดการคอนจูเกตกันของพันธะคู่จะทำให้เกิดการดูดกลืนรังสีที่มีความยาวคลื่นสูงขึ้นและปริมาณการดูดกลืน (molar absorptivity) มากขึ้น

- สารประกอบที่มีพันธะ π และ อิเล็กตรอนชนิดไม่ก่อบंधะอยู่ติดกัน ได้แก่ สารประกอบที่มีหมู่ฟังก์ชัน คาร์บอนิล (carbonyl) (C=O) อิมีน (imine) (C=N) ไนไตร (nitrile) ($\text{-C}\equiv\text{N}$) แอโซ (azo) (-N=N-) ไนโตรโซ nitroso (-N=O) ไนเตรต (nitrate) (-ONO_2) และไนโตร (nitro) (-NO_2)

เป็นต้น จะสามารถเกิดทรานซิชันแบบ $\sigma \rightarrow \sigma^* \sigma \rightarrow \pi^* n \rightarrow \sigma^* n \rightarrow \pi^* \pi \rightarrow \pi^*$ และ $\pi \rightarrow \sigma^*$

เมื่อสารตัวอย่างได้รับพลังงานในช่วงคลื่นแสงที่พอเหมาะกับการทรานซิชันของอิเล็กตรอนภายในโมเลกุล พลังงานจะถูกดูดกลืนเอาไว้ ความยาวคลื่นที่เกิดการดูดกลืนแสงและปริมาณการดูดกลืนแสงในแต่ละความยาวคลื่นจะสามารถพล็อตออกมาเป็นสเปกตรากการดูดกลืนแสงของสารนั้นๆ ได้ นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในการทดลอง เช่น การเปลี่ยนแปลงตัวทำละลายหรือเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโมเลกุล อาจมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของยอดหลักและรูปร่างของสเปกตรากการดูดกลืนแสง โดยถ้าสเปกตรากการดูดกลืนแสงเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่มากขึ้นจะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า bathochromic shift หรือ red shift ในทางตรงกันข้ามถ้าสเปกตรากการดูดกลืนแสงเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่สั้นลงจะเรียกว่า hypsochromic shift หรือ blue shift และถ้าความเข้มของการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นจะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า hyperchromic effect แต่ถ้าความเข้มของการดูดกลืนแสงลดลงจะเรียกว่า hypochromic effect ดังแสดงในรูปที่ 2.15

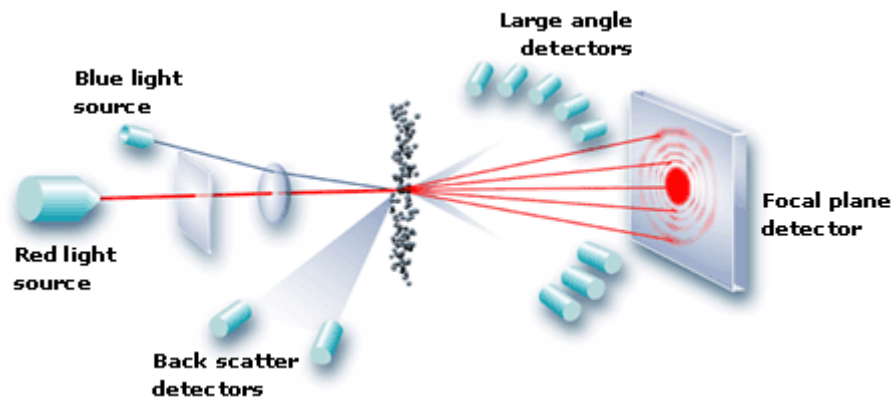


รูปที่ 2.15 การเปลี่ยนแปลงของสเปกตรากการดูดกลืนแสง

2.6.2. Laser light scattering

การวัดขนาดและการกระจายขนาดของอนุภาคสามารถวิเคราะห์ได้โดยอาศัยเทคนิคการกระเจิงของแสง โดยเลเซอร์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ เลเซอร์ชนิดแก๊สฮีเลียม-นีออน (He-Ne gas laser) ซึ่งมีความยาวคลื่นประมาณ 0.63 ไมโครเมตร เมื่อแสงเลเซอร์จากแหล่งกำเนิดแสงผ่านสารตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ แสงบางส่วนจะทะลุผ่านสารตัวอย่างและเกิดการหักเหเป็นมุมต่างๆ ส่วนแสงบางส่วนที่ไม่ทะลุผ่าน เมื่อตกกระทบกับสารตัวอย่างจะเกิดการกระเจิงของแสงขึ้นด้วยความเข้มแสงและมุมในการกระเจิงที่ต่างกัน ถ้าแสงตกกระทบสารตัวอย่างที่มีอนุภาค

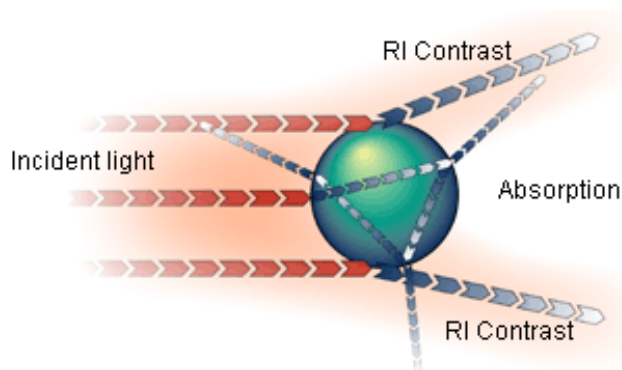
ขนาดเล็ก จะเกิดการกระเจิงของแสงขึ้นด้วยมุมที่กว้างมากกว่าเมื่อตกกระทบอนุภาคขนาดใหญ่ ซึ่งรูปแบบการกระเจิงของแสงที่เกิดขึ้นนี้จะถูกส่งไปยังตัวรับสัญญาณ และส่งไปประมวลผลต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แบบจำลองการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Laser light scattering⁽³⁰⁾

เมื่อพิจารณาการกระเจิงแสงของอนุภาคทรงกลม สามารถจำแนกการกระเจิงของแสงอย่างง่าย ๆ ออกเป็น 3 แบบ ตามช่วงขนาดของอนุภาค ซึ่งพิจารณาจากสัดส่วนความยาวคลื่นของแสงตกกระทบต่อขนาดของอนุภาค โดยอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นของแสงจะเป็นไปตามทฤษฎีของเรเลย์ (Rayleigh theory)⁽³¹⁾ ได้แก่ สารละลายพอลิเมอร์ ไมเซลล์ และอนุภาคระดับนาโนที่ได้จากวิธีนิวคลีเอชัน เป็นต้น สำหรับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าความยาวคลื่นของลำแสงเลเซอร์จะทำให้เกิดการเลี้ยวเบนแบบฟรอนโฮเฟอร์ (Fraunhofer diffraction)⁽³²⁾ ซึ่งจากสมมติฐานของฟรอนโฮเฟอร์ (Fraunhofer approximation) ความเข้มของแสงที่เกิดการเลี้ยวเบนมีความสัมพันธ์กับปริมาณของอนุภาคในแต่ละขนาด แต่มุมเลี้ยวเบนกลับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของอนุภาค การใช้ตัวกรองแสง เลนส์ และตัวตรวจจับทางแสง ร่วมกับคอมพิวเตอร์ ช่วยให้สามารถประมวลผลจากข้อมูลการเลี้ยวเบนเป็นการกระจายตัวของขนาดอนุภาคได้ เทคนิคนี้ไม่จำเป็นต้องทราบความหนาแน่นของวัสดุทดสอบ แต่สิ่งหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงอยู่เสมอคือ อนุภาคที่มีขนาดเล็กเกินช่วงความสามารถของเครื่องตรวจจับจะไม่ได้รับการบันทึก สมมติฐานของฟรอนโฮเฟอร์ มีข้อจำกัดตรงที่อนุภาคต้องมีขนาดใหญ่กว่าความยาวคลื่นของแสงที่ใช้วัด ถ้าใช้เลเซอร์ชนิดแก๊สฮีเลียม-นีออน อนุภาคควรมีขนาดใหญ่กว่า 25 ไมโครเมตร อนุภาคต้องทึบแสง และอนุภาคทุกขนาดต้องกระเจิงแสงออกไปอย่างมีประสิทธิภาพเท่ากัน จากข้อจำกัดเหล่านี้ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดอนุภาคที่มีขนาดเล็กใกล้ความยาวคลื่นของแสง ปัจจุบันได้มีการใช้ทฤษฎีของมี (Mie theory)⁽³³⁾ เพื่อให้สามารถวัดอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 50 ไมโครเมตรได้อย่างถูกต้อง

แต่ทฤษฎีนี้มีข้อจำกัดตรงที่จำเป็นต้องรู้ค่าดัชนีหักเห (refractive index) ของวัสดุที่นำมาทดสอบ และตัวกลาง รวมทั้งค่าการดูดกลืนแสงของวัสดุทั้งสองชนิดนั้นด้วย โดยแสงที่เข้ามาตกกระทบกับสารตัวอย่างแล้วเกิดการกระเจิงของแสงในมุมการกระเจิงต่างๆ จะมีความสัมพันธ์กับค่าดัชนีหักเหของสารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ ส่วนแสงบางส่วนที่สามารถทะลุผ่านสารตัวอย่างและเกิดการหักเหเป็นมุมต่างๆ นั้น จะมีความสัมพันธ์กับค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 2.17 จึงทำให้สามารถคำนวณหาขนาดอนุภาคออกมาได้ในที่สุด



รูปที่ 2.17 รูปแบบการกระเจิงของแสงตามทฤษฎีของมี (Mie theory)⁽³³⁾

2.6.3. อิเล็กตรอนไมโครสโคปี (Electron microscopy)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน⁽³⁴⁻³⁵⁾ เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ลำอนุภาคอิเล็กตรอนพลังงานสูงในการตรวจสอบวัตถุแทนแสงธรรมดา เนื่องจากความยาวคลื่นของลำอนุภาคอิเล็กตรอนนั้นสั้นกว่าความยาวคลื่นแสงถึง 100,000 เท่า ทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนสามารถให้ประสิทธิภาพของกำลังขยาย และการแจจจายละเอียดได้เหนือกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง โดยสามารถแยจจายละเอียดของวัตถุที่เล็กขนาด 10 อังสตรอม หรือ 0.1 นาโนเมตร (กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงจะแจจจายละเอียดได้ประมาณ 0.2 ไมโครเมตร) จึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมีกำลังขยายสูงมากถึง 500,000 เท่า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่จะกล่าวถึงในที่นี้ ได้แก่ transmission electron microscope (TEM) และ scanning electron microscope (SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope) (TEM)^(34, 36) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ศึกษาตัวอย่างชนิดบาง ซึ่งเตรียมขึ้นโดยวิธีพิเศษเพื่อให้ลำอนุภาคอิเล็กตรอนผ่านทะลุได้ การสร้างภาพจากกล้องประเภทนี้จะทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่างนั่นเอง เครื่อง TEM เหมาะสำหรับศึกษารายละเอียดขององค์ประกอบภายในของตัวอย่าง เช่น องค์ประกอบภายในเซลล์ ลักษณะของเยื่อหุ้มเซลล์ ผนัง

เซลล์ เป็นต้น ซึ่งจะให้รายละเอียดสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากมีกำลังขยายและประสิทธิภาพในการแจกแจงรายละเอียดสูงมาก (กำลังขยายสูงสุดประมาณ 0.1 นาโนเมตร)

เครื่อง TEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า ผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างที่จะศึกษา ซึ่งตัวอย่างที่จะศึกษาจะต้องมีลักษณะที่แบนและบางมาก (มักพบว่าอยู่ในช่วงระหว่าง 1 - 100 นาโนเมตร) จากนั้นจะเกิดการกระเจิงอนุภาคขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนทะลุผ่านตัวอย่างไป และอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่างนี้ก็จะถูกปรับโฟกัสของภาพโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่ขยายภาพให้ได้รายละเอียดมากที่สุด จากนั้นจะได้รับการขยายด้วยเลนส์ทอดภาพไปสู่จอรับ (projector lens) และปรับโฟกัสของลำอนุภาคอิเล็กตรอนให้ยาวพอดีที่จะปรากฏบนฉากเรืองแสง (fluorescence screen) สุดท้ายจะเกิดการสร้างภาพ 2 มิติขึ้นมา โดยวัตถุที่มีค่าเลขอะตอม (atomic number) มาก ภาพที่เห็นจะเป็นสีดำ ส่วนวัตถุที่มีค่าเลขอะตอมน้อย ภาพที่เห็นจะเป็นสีขาว

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope) (SEM)⁽³⁷⁻³⁸⁾ เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายไม่สูงเท่ากับเครื่อง TEM (เครื่อง SEM มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร) การเตรียมตัวอย่างเพื่อทำการศึกษากับเครื่อง SEM นี้ ตัวอย่างไม่จำเป็นต้องมีขนาดบางเท่ากับการใช้เครื่อง TEM เนื่องจากไม่ได้ตรวจวัดจากอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง แต่การสร้างภาพด้วย SEM สามารถทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการศึกษา ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพ 3 มิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของวัสดุ เป็นต้น

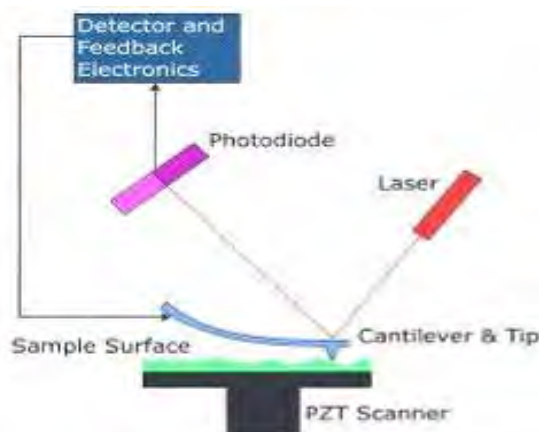
เครื่อง SEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า ผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา เมื่อลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะ

ถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า (electrical signal) ส่งไปยังจอภาพ (cathode ray tube, CRT) เพื่อทำให้เกิดภาพที่ตามองเห็นได้ โดยภาพที่ออกมา นั้นจะมีลักษณะเป็นภาพ 3 มิติ และสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้เลย

2.6.4. กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic force microscope, AFM)

กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม⁽³⁹⁻⁴¹⁾ เป็นเครื่องมือที่ใช้งานทางด้านวิทยาศาสตร์ระดับนาโน เพื่อใช้ในการศึกษาสมบัติทางโครงสร้าง รูปร่าง ขนาด รวมถึงลักษณะจำเพาะทางกายภาพของพื้นผิววัสดุต่างๆ ได้มากมายหลายชนิดเช่น พื้นผิวโลหะ แก้ว พอลิเมอร์ เซรามิก รวมถึงโมเลกุลทางชีวภาพต่างๆ เช่น โปรตีน เซลล์ ดีเอ็นเอ และยังสามารถตรวจวัดพื้นผิวที่ไม่เป็นฉนวนไฟฟ้าได้อีกด้วย กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมสามารถศึกษาพื้นผิวได้ทั้งในสภาพแห้งและในสภาพที่อยู่ในน้ำ โดยไม่จำเป็นต้องมีการเคลือบพื้นผิวด้วยโลหะหรือคาร์บอนให้เป็นพื้นผิวที่นำไฟฟ้านอกจากนี้ยังไม่จำเป็นต้องอาศัยระบบสุญญากาศซึ่งมีราคาแพงในการติดตั้งอีกด้วย โดยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมจะสามารถทำงานได้โดยการใช้อุปกรณ์ตรวจหรือโพรบ (probe) ที่มีปลายแหลมเล็ก (tip) ซึ่งติดอยู่กับคานยื่นที่สามารถโก่งงอตัวได้ที่เรียกว่า แคนทิลเวอร์ (cantilever) โพรบจะเคลื่อนที่สัมผัสไปบนพื้นผิวของวัตถุ และตรวจสอบสมบัติของพื้นผิวนั้นทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ เช่น วัดแรงกระทำระหว่างอะตอมที่ปลายเข็มกับอะตอมหรือโมเลกุลบนพื้นผิว หรือวัดเกี่ยวกับการลอดผ่านได้แบบควอนตัมของอิเล็กตรอน เนื่องจากการใช้ปลายแหลมที่มีขนาดเล็กมากจึงทำให้สามารถทำการตรวจวัดได้อย่างละเอียดในระดับอะตอมหรือโมเลกุล และสามารถศึกษาวัตถุที่มีขนาดเล็กระดับนาโนเมตรได้เป็นอย่างดี

หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมคือ ปลายแหลมของคานยื่นที่มีขนาดระดับอะตอมจะทำการสแกนพื้นผิวของตัวอย่าง โดยมี piezoelectric tube เป็นอุปกรณ์ควบคุมตำแหน่ง เมื่อส่วนปลายแหลมลากผ่านพื้นผิวที่มีความขรุขระไม่เท่ากัน แรงอันตรกิริยาที่กระทำในแนวตั้งฉากระหว่างอะตอมของพื้นผิวกับอะตอมของปลายแหลมจะเปลี่ยนไป ทำให้คานยื่นหรือโก่งงอตัว สามารถตรวจวัดขนาดของแรงเชิงอันตรกิริยาระหว่างความสัมพันธ์เชิงตำแหน่งของส่วนปลายแหลมและพื้นผิวของวัตถุ และสามารถทราบถึงระดับพลังงานที่เกิดขึ้นได้ สัญญาณที่ได้จะนำมาสร้างเป็นภาพพื้นผิวเชิงโครงสร้างระดับอะตอมที่มีกำลังขยายสูงแสดงบนจอภาพ โดยการทำงานของ AFM แสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 แบบจำลองแสดงการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม⁽⁴²⁾

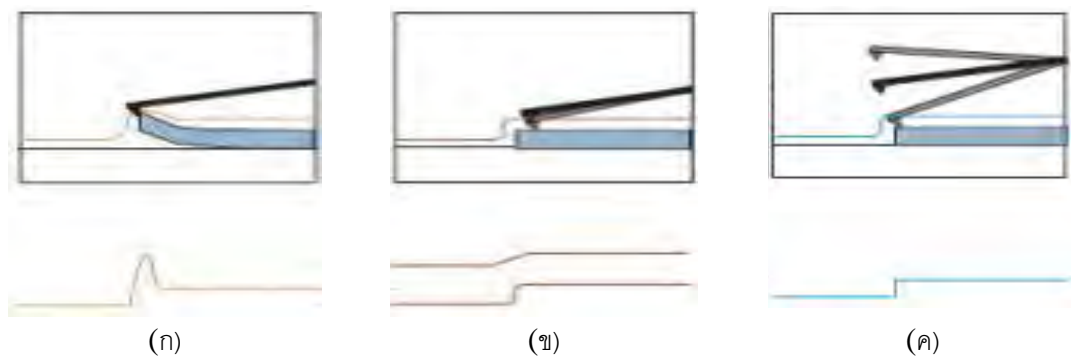
การทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 โหมด ได้แก่ แบบสัมผัส (contact mode) แบบไม่สัมผัส (dynamic non-contact mode) และแบบกึ่งสัมผัส (tapping mode)

1. Contact mode หรือ static mode เป็นการสัมผัสพื้นผิวพร้อมกับการลากปลายแหลมไปบนพื้นผิวนั้นๆ ตลอดเวลา ดังแสดงในรูปที่ 2.19 (ก) โดยแรงระหว่างปลายเข็มกับผิวตัวอย่างจะถูกควบคุมให้คงที่ ปลายสุดของ tip จะเป็นบริเวณที่เกิดแรงผลัก (repulsive force) ในขณะที่ส่วนที่เหลือของ tip จะเกิดแรงดึงดูดกับตัวอย่าง ซึ่งแรงผลักที่เกิดขึ้นบนส่วนปลายสุดของ tip จะมีความไวมากที่สุดต่อลักษณะโครงสร้างของตัวอย่าง ดังนั้นจึงช่วยให้เกิดภาพที่มีการแยกชัด (resolution) สูง การปรับ resolution จะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวสัมผัสที่ปลายสุดของ tip ซึ่งถูกควบคุมโดยรัศมีของ tip แรงที่ให้เข้าไปและสมบัติยืดหยุ่นของ tip และตัวอย่าง ข้อเสียของวิธีนี้ คือ จะทำให้เกิดแรงต้านในแนวของการเคลื่อนที่ซึ่งขนานกับพื้นผิวขึ้น ซึ่งอาจทำให้คานของโพรบที่ใช้วัดเกิดการโก่งงอตัวหรือเกิดบิดเบี้ยวไป โดยที่มิได้เกิดจากแรงดึงดูดที่ปลายเนื่องจากแรงในแนวตั้งฉากเพียงอย่างเดียว จึงทำให้ข้อมูลความสูงของพื้นผิวที่วัดได้นั้นอาจผิดไปจากความสูงที่แท้จริง นอกจากนี้หากใช้กับวัสดุที่อ่อนจะทำให้ผิวหน้าของชิ้นงานถูกทำลายได้

2. Dynamic non-contact mode การทำงานของโหมดนี้ tip จะไม่มีการสัมผัสกับพื้นผิวของตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 2.19 (ข) จึงนิยมใช้มากกับชิ้นงานที่อ่อน การสั่นของ tip จะเกิดใกล้กับผิวของชิ้นงานและเกิดแรงดึงดูดอย่างอ่อนระหว่าง tip กับตัวอย่างขึ้น แทนที่จะเกิดแรงผลักอย่างสูงเช่นใน contact mode แรงระหว่าง tip และพื้นผิวของตัวอย่างสามารถวัดได้จากการเปลี่ยนแปลงของ แอมพลิจูด เฟส รวมไปถึงความถี่ในการสั่นของคาน ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะของพื้นผิวซึ่งจะถูกนำมาใช้สร้างภาพ ข้อจำกัดของการใช้งานในโหมดนี้คือไม่สามารถ

ทำงานในสิ่งแวดล้อมที่มีของเหลวอยู่ได้ เพราะเมื่อของเหลวสัมผัสกับ tip อาจก่อให้เกิดความเสียหายขึ้นมาได้

3. Tapping mode เป็นการสแกนพื้นผิวโดยให้ปลายแหลมสัมผัสกับพื้นผิวเป็นระยะเวลาสั้นๆ ในแนวตั้งฉากกับพื้นผิว ดังแสดงในรูปที่ 2.19 (ค) ด้วยลักษณะการสัมผัสแบบนี้แรงต้านในแนวตั้งฉากจะไม่เกิดขึ้น แต่เนื่องจากปลายแหลมสัมผัสพื้นผิวเป็นระยะสั้นๆ จึงทำให้เกิดการสั่นของคาน จึงต้องมีการควบคุมระยะการสั่น (amplitude of oscillation) ให้คงที่ โดยระบบ feedback loop จะปรับเข็มวัดขึ้นลงเพื่อควบคุมระยะการสั่น การวัดด้วยวิธีนี้ช่วยลดการรบกวนจากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นกับผิวตัวอย่างและสัญญาณรบกวนอื่นๆ และใช้ระยะห่างของเข็มวัดไปสร้างเป็นภาพของตัวอย่าง โดยวิธีนี้จะให้ภาพที่มี resolution สูง โดยที่ไม่ทำลายพื้นผิวของตัวอย่างในระหว่างที่ทำการสแกนอีกด้วย นิยมใช้กับตัวอย่างที่อ่อนเช่น พอลิเมอร์ และ ตัวอย่างทางชีววิทยา เป็นต้น



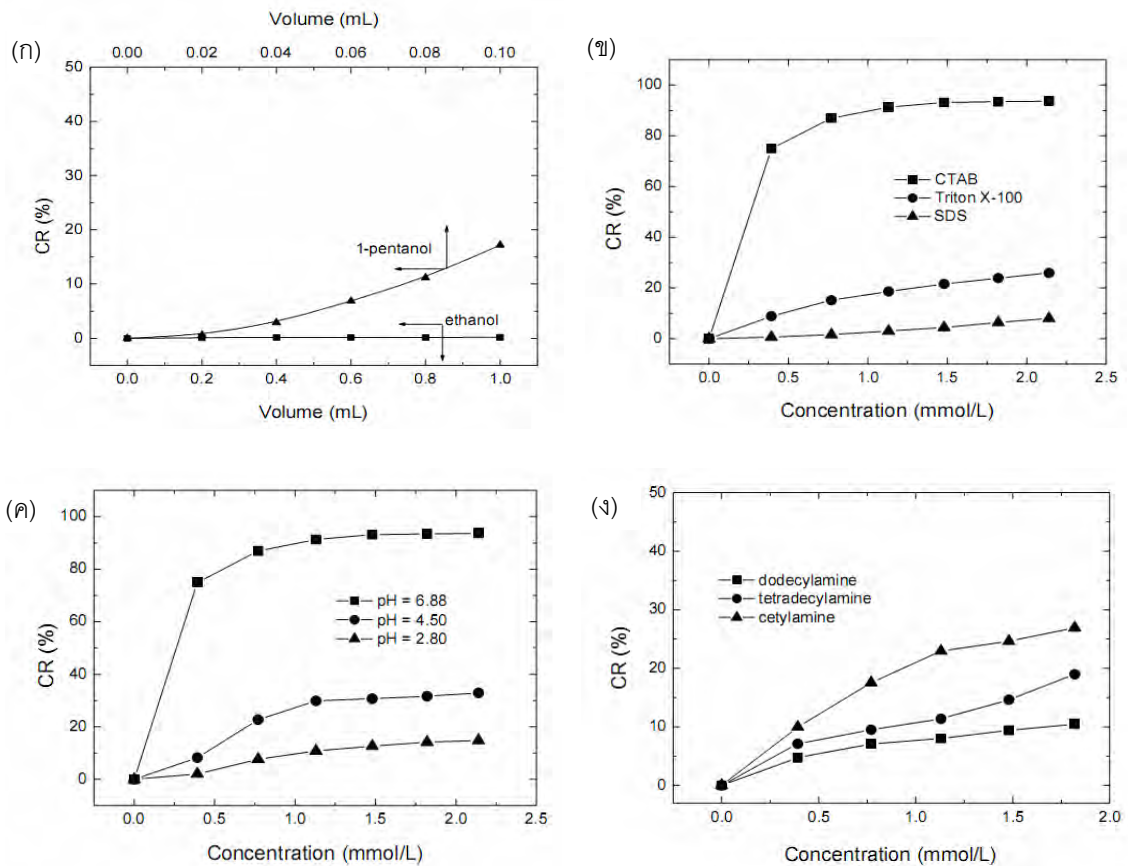
รูปที่ 2.19 โหมดการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (ก) แบบสัมผัส (ข) แบบไม่สัมผัส (ค) แบบกึ่งสัมผัส⁽⁴³⁾

2.7 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การเตรียมพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลและวัสดุเชิงประกอบพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์สำหรับประยุกต์ใช้ในงานทางด้านเทคโนโลยีการตรวจวัดนั้น มีปัจจัยต่างๆมากมายที่ส่งผลต่อสมบัติของวัสดุที่เตรียมได้ โดยเฉพาะสมบัติการเปลี่ยนสีเมื่ออยู่ในสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกันหรือเกิดการจับกับสารบางชนิด ยกตัวอย่างเช่น เกิดการเปลี่ยนสีเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-เบส อุณหภูมิ หรือเติมสารบางชนิดเข้าไปในระบบ ซึ่งถือได้ว่าเป็นเอกลักษณ์ของวัสดุในกลุ่มนี้

ที่ผ่านมาได้มีเอกสารงานวิจัยที่ทำการศึกษเกี่ยวกับพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลในรูปแบบต่างๆ ดังนี้

ในปี ค.ศ.2004 Yan-lei Su และคณะ⁽⁴⁴⁾ ได้ศึกษาอิทธิพลของโมเลกุลแอมฟิฟิลิก ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลในน้ำ โดยศึกษาผลของสิ่งกระตุ้นที่มีสมบัติทางกายภาพแตกต่างกันต่อการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษผลของสมบัติไฮโดรโฟบิกของตัวกระตุ้นโดยเปรียบเทียบ 1-เพนทานอลซึ่งมีสมบัติไฮโดรโฟบิกสูงกับเอทานอลซึ่งมีสมบัติไฮโดรโฟบิกต่ำกว่า และพบว่า การเติม 1-เพนทานอล จะส่งผลให้ PPCDA เปลี่ยนสีได้ดีกว่าเอทานอล ดังแสดงในรูปที่ 2.20 (ก) จากนั้นทำการศึกษผลของความเป็นประจุของ head groups ของสารลดแรงตึงผิว ได้แก่ เซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (cetyltrimethylammonium bromide, CTAB) โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (sodium dodecyl sulfate, SDS) และ ไตรตัน เอ็กซ์-100 (Triton X-100) พบว่า CTAB ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุของ head groups เป็นบวก สามารถทำอันตรกิริยากับหมู่คาร์บอกซิเลตที่มีความเป็นประจุลบที่ผิวของเวสิเคิลได้ดีกว่า Triton X-100 และ SDS ซึ่งมีประจุของ head groups เป็นกลางและลบ ตามลำดับ ส่งผลให้เกิดการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีได้ดีกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.20 (ข) โดยเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของ PPCDA เมื่อตอบสนองต่อ CTAB จะมีค่ามากเมื่อสารละลายมีความเป็นเบส ดังแสดงในรูปที่ 2.20 (ค) นอกจากนี้ในงานวิจัยยังศึกษาถึงผลของตัวกระตุ้นเกลือแอลคิลามีนไฮโดรคลอริก (alkylamine hydrochloric salts) ที่มีความยาวโซ่แอลคิล (alkyl) ต่างๆ กันไป และพบว่า ถ้าสารที่ใช้ทดสอบมีความยาวโซ่แอลคิลที่ยาวกว่า จะส่งผลให้การเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลเกิดขึ้นอย่างชัดเจนมากกว่าด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.20 (ง)

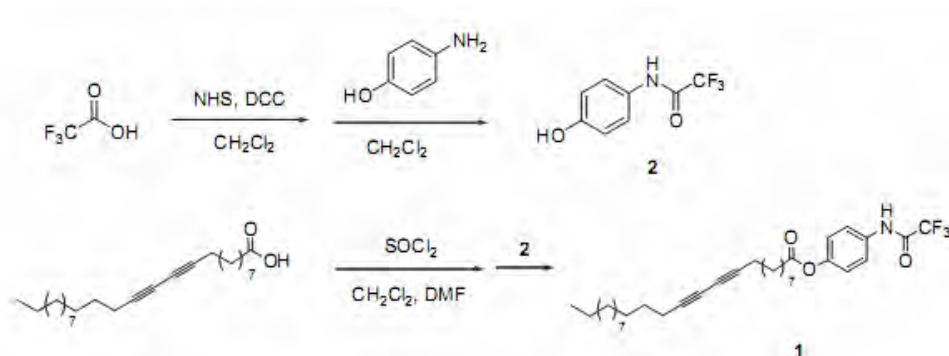


รูปที่ 2.20 เปรอ์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดอะเซทิลีนเวคิล (44) (ก) เมื่อทำการเติมเอทานอล และ 1-เพนทานอลที่ปริมาณต่างๆ (ข) เมื่อทำการเติม CTAB SDS และ Triton X-100 ที่ปริมาณต่างๆ (ค) เมื่อทำการเติม CTAB และปรับค่าความเป็นกรด-เบส และ (ง) เมื่อทำการเติม alkylamine hydrochloric salts ที่ความยาวโซ่แอลคิลแตกต่างกัน

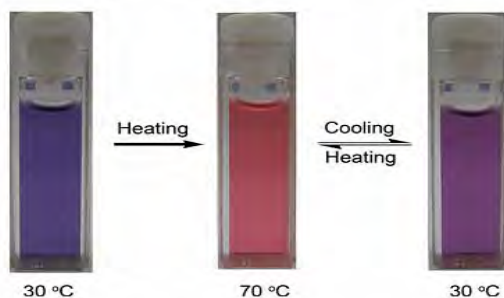
โดยปกติแล้วการตอบสนองต่อสิ่งกระตุ้นต่างๆ ทั้ง อุณหภูมิ ความเป็นกรด-เบส หรือแม้แต่ตัวทำละลาย ที่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีนขึ้นนั้น มักจะเป็นกระบวนการผันกลับไม่ได้ คือเมื่อพอลิไดอะเซทิลีนเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงแล้ว จะยังคงเป็นสีแดงอยู่ แม้ว่า จะไม่ได้รับการกระตุ้นแล้วก็ตาม ซึ่งทำให้เกิดข้อจำกัดในการใช้งานพอลิไดอะเซทิลีนสำหรับเป็นเซนเซอร์ตรวจวัดการเปลี่ยนสี จึงมีงานวิจัยที่ทำการศึกษาเพื่อให้ PPCDA เกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้ออกมามากมาย

ในปี 2010 Xiaoqiang Chen และคณะ⁽⁴⁵⁾ ได้ทำการสังเคราะห์คอนจูเกตพอลิเมอร์ของไดอะเซทิลีนตัวใหม่ขึ้น โดยทำการปรับ head groups ของ PCDA มอนอเมอร์ จากเดิมเป็นหมู่คาร์บอกซิลได้ปรับเป็นฟีนิลอะเซทาไมด์ (phenylacetamide) ดังแสดงในรูปที่ 2.21 และทำการศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับความ ซึ่งจากการศึกษาพบว่า เมื่อมีการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจาก

อุณหภูมิ 30 ไปจนถึง 70 องศาเซลเซียส สารละลายพอลิไดแอเซทิลีนเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงิน เป็นสีแดง และเมื่ออุณหภูมิลดลงจนถึง 30 องศาเซลเซียส สารละลายพอลิไดแอเซทิลีนเกิดการ เปลี่ยนสีแบบผันกลับจากสีแดงเป็นสีม่วง ดังแสดงในรูปที่ 2.22 นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ทำการ เตรียมฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการฝังโมเลกุลพอลิไดแอเซทิลีนลงไป และศึกษาการเปลี่ยนสี ในลักษณะเดียวกันกับการศึกษาในระบบสารละลาย ซึ่งพบว่าฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการ ฝังโมเลกุลพอลิไดแอเซทิลีนลงไปแสดงการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้ในลักษณะเดียวกันกับ สารละลายพอลิไดแอเซทิลีน



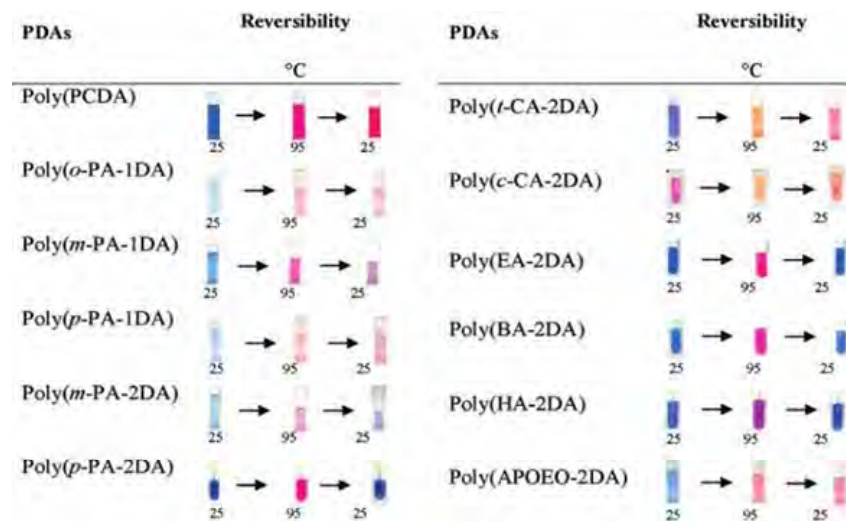
รูปที่ 2.21 การสังเคราะห์ไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ชนิดใหม่ที่มีโครงสร้างที่หัวของโซ่ข้างด้านหนึ่ง เป็น phenylacetamide⁽⁴⁵⁾



รูปที่ 2.22 การเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนที่สังเคราะห์ขึ้นใหม่ เมื่อมีการให้ความ ร้อนจากอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และทำให้เย็นตัวลงมา⁽⁴⁵⁾

ในปีเดียวกันนี้ Sumrit Wacharasindhu และคณะ⁽⁴⁶⁾ ได้ทำการศึกษาการปรับสมบัติการ เปลี่ยนสีเมื่อได้รับการรบกวนจากความร้อนของพอลิไดแอเซทิลีนโดยการปรับ head groups ของ PCDA จากเดิมที่เป็นหมู่คาร์บอกซิลให้เป็นหมู่โมโนเอไมด์ (monoamide) และ ไดเอไมด์ (diamide) โดยการควบแน่น (condensation) PCDA ด้วยสารประกอบไดเอมีนชนิดต่างๆ และ ทำการศึกษาสมบัติการเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนที่เตรียมขึ้นมาได้ จากการศึกษา พบว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสีและความสามารถในการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้ขึ้นอยู่กับจำนวนของ

หมู่เอไมด์ และโครงสร้างของสารที่เชื่อมระหว่างหมู่เอไมด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.23 โดยถ้า head groups ของพอลิไดแอเซทิลีนมีหมู่เอไมด์อยู่ 1 หมู่ เช่น พอลิ (N-(2-แอมิโนฟีนิล) เพนตะโคเซ-10,12-ไดอายนินาไมด์) (poly(o-PA-1DA)) จะเกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับไม่ได้หรือผันกลับได้บางส่วน แต่ถ้า head groups ของพอลิไดแอเซทิลีนมีหมู่เอไมด์อยู่ 2 หมู่ เช่น พอลิ (N,N'-(1,3-ฟีนิลีน) ไดเพนตะโคเซ-10,12-ไดอายนินาไมด์) (poly(m-PA-2DA)) จะทำให้ได้พอลิไดแอเซทิลีนที่สามารถเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้แบบสมบูรณ์ ในขณะที่พอลิไดแอเซทิลีน เช่น poly(c-CA-2DA) และ poly(t-CA-2DA) จะเกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้บางส่วนเท่านั้นแม้ว่าที่ head groups จะมีหมู่เอไมด์อยู่ 2 หมู่ก็ตาม ซึ่งเป็นผลมาจากโครงสร้างที่ไม่เป็นระนาบของสารที่เชื่อมระหว่างหมู่เอไมด์ จากผลที่ได้นี้จึงมีการนำวัสดุที่พัฒนาขึ้นมาได้ไปประยุกต์เป็นอินดิเคเตอร์ทางความร้อน

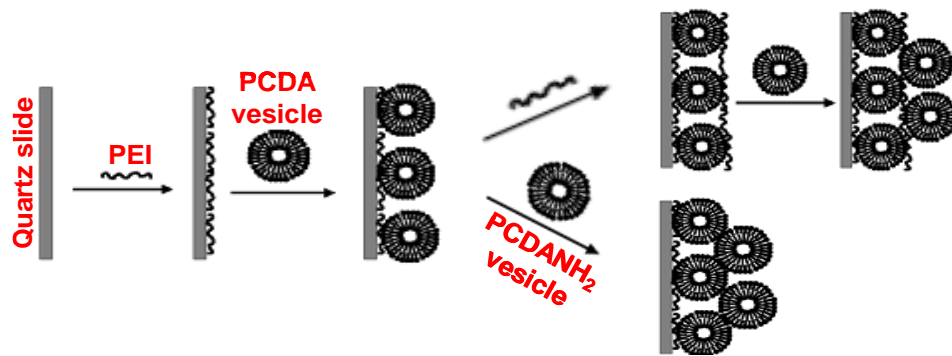


รูปที่ 2.23 การเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนที่ทำการปรับ head groups ด้วยหมู่เอไมด์ต่างๆ เมื่อมีการให้ความร้อนจากอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส และทำให้เย็นตัวลงมา⁽⁴⁶⁾

เนื่องจากพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลในรูปของสารละลายทำให้เกิดข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน จึงมีการพัฒนาการเตรียมเป็นฟิล์มบางขึ้นเพื่อให้สะดวกสำหรับการนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์เซนเซอร์ต่อไป

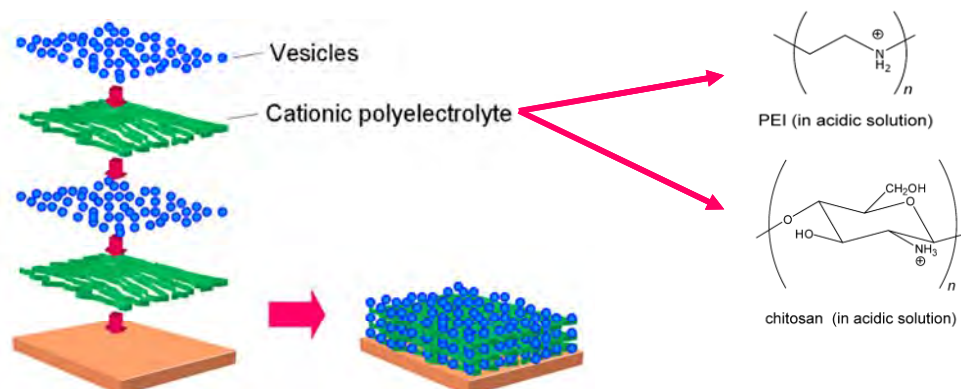
ในปี ค.ศ.2005 Yan-lei Su⁽⁴⁷⁾ ได้ศึกษาการเตรียมพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลบนขั้วสเตรตของแข็งโดยอาศัยเทคนิคการยึดติดด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าที่ละชั้น โดยใช้ความเป็นประจุบวกของ PCDA เวสิเคิลกับความเป็นประจุบวกของพอลิเอทิลีนอิมีน (PEI) หรือ PCDA-2'-อะมิโนเอทิลเอไมด์ (PCDANH₂) เวสิเคิล ดังแสดงในรูปที่ 2.24 ซึ่งจากการศึกษาพบว่า วิธีนี้สามารถเตรียมฟิล์ม

เซนเซอร์ของพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลที่มีสีน้ำเงินได้อย่างมีประสิทธิภาพหลังจากทำการฉายแสงยูวี และพบว่าฟิล์มที่เตรียมได้มีการตอบสนองต่อการรบกวนจากสิ่งกระตุ้น ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น กรด-เบส และโมเลกุลแอมพิฟิลิก โดยเกิดการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลจากสีน้ำเงินเป็นสีแดง



รูปที่ 2.24 การสร้างฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลบนขั้วสเตรตของแข็งโดยเทคนิคการยึดติดด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้า⁽⁴⁷⁾

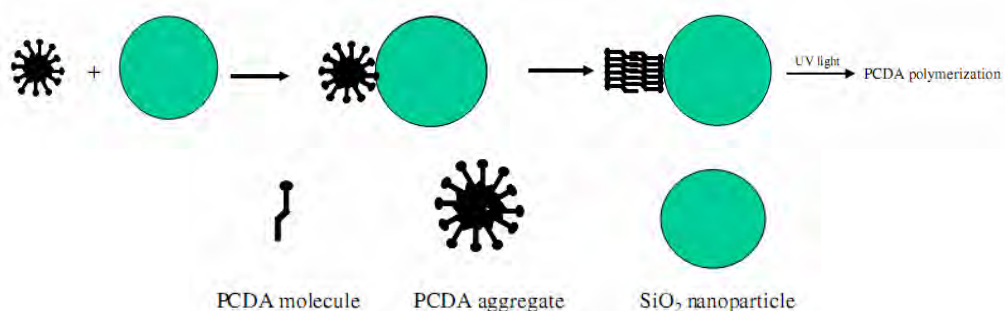
ในปี ค.ศ.2006 Anupat Potisituyenyong และคณะ⁽²¹⁾ ได้ศึกษาการเตรียมฟิล์มบางหลายชั้นของ PPCDA โดยอาศัยเทคนิคการยึดติดกันด้วยประจุทางไฟฟ้าของพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่มีไคโตซานหรือ PEI เป็นแคทไอออนและมีเวสิเคิลเป็นแอนไอออน ดังแสดงในรูปที่ 2.25 ผลการศึกษาพบว่าฟิล์มบางยังคงสีน้ำเงินของเวสิเคิลเอาไว้ได้ ซึ่งแสดงการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 635 นาโนเมตร และมีค่าการดูดกลืนแสงที่เพิ่มขึ้นตามจำนวนชั้นของเวสิเคิลอย่างเป็นเส้นตรงซึ่งแสดงให้เห็นถึงการประกอบแบบทีละชั้นที่มีความหนาของแต่ละชั้นคงที่ และเมื่อทดสอบสมบัติการเปลี่ยนสีของฟิล์มพบว่าสามารถเปลี่ยนสีได้เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิ การเปลี่ยนตัวทำละลายจากน้ำเป็นเอทานอล หรือการปรับความเป็นกรด-เบส ให้มีสภาวะเป็นด่าง



รูปที่ 2.25 การสร้างฟิล์มบางแบบหลายชั้นของพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลบนขั้วสเตรตของแข็งโดยเทคนิคการยึดติดด้วยประจุทางไฟฟ้าของพอลิอิเล็กโทรไลต์⁽²¹⁾

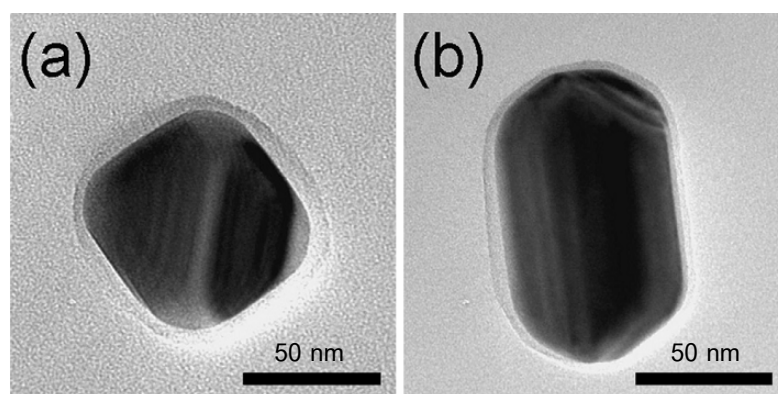
เนื่องจากศักยภาพของพอลิไดแอเซทิลีนเวลิเคิลในการใช้งานเป็นเซนเซอร์ระดับโมเลกุล ทำให้มีความสนใจที่จะควบคุมให้พอลิไดแอเซทิลีนเวลิเคิลมีการตอบสนองต่อสิ่งกระตุ้นในระดับที่แตกต่างออกไป และนำไปสู่การศึกษาเพื่อพัฒนาสมบัติของพอลิไดแอเซทิลีนเวลิเคิล โดยหนึ่งในวิธีการพัฒนาสมบัติดังกล่าวสามารถทำได้โดยการเติมอนุภาคระดับนาโนของโลหะออกไซด์เพื่อให้เกิดเป็นวัสดุเชิงประกอบขึ้น โดยสมบัติเด่นของโลหะออกไซด์ที่เลือกใ้ยังช่วยในการปรับปรุงสมบัติของวัสดุเชิงประกอบให้เป็นไปตามต้องการได้ ตัวอย่างโลหะออกไซด์ที่น่าสนใจ เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ ซึ่งมีสมบัติที่ดีในด้านการดูดซับรังสียูวี และอนุภาคนาโนของเหล็กออกไซด์เช่น แมกนีไทต์ (Fe_3O_4) ที่มีสมบัติความเป็นแม่เหล็ก เป็นต้น

ในปี ค.ศ.2006 Yan-lei Su⁽⁶⁾ ได้ศึกษาการเตรียมวัสดุเชิงประกอบขนาดนาโนของพอลิไดแอเซทิลีนและซิลิกาเพื่อใช้เป็นเซนเซอร์ทางเคมี โดยพบว่ากลุ่มก้อนของ PCDA สามารถดูดซับอยู่บนผิวของอนุภาคนาโนซิลิกาในน้ำได้ โดยอนุภาคนาโนซิลิกาทำหน้าที่เป็นเทมเพลต (template) ที่ช่วยให้โมเลกุล PCDA ที่จัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบเกิดการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.26 วัสดุเชิงประกอบขนาดนาโนของพอลิไดแอเซทิลีนและซิลิกาที่เตรียมได้มีสีน้ำเงินหลังจากฉายแสงยูวี และเมื่อได้รับการรบกวนจากสิ่งกระตุ้นเช่น อุณหภูมิ ความเป็นกรด-เบส และโมเลกุลแอมพิฟิลิก พบว่าวัสดุเชิงประกอบขนาดนาโนของพอลิไดแอเซทิลีนและซิลิกาเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงได้ ซึ่งกลไกที่ทำให้มอนอเมอร์ของกลุ่มก้อน PCDA ที่ดูดซับอยู่บนผิวของอนุภาคนาโนซิลิกาเกิดการจัดเรียงตัวใหม่อย่างเป็นระเบียบและอยู่ในสภาวะที่โครงสร้างมีความเสถียรมากที่สุด เกิดจากปฏิสัมพันธ์ของหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้ว คือหมู่คาร์บอกซิลของ PCDA มอนอเมอร์และหมู่ไฮดรอกซีของอนุภาคนาโนซิลิกา ดังนั้นอนุภาคนาโนซิลิกาในน้ำจึงทำหน้าที่เป็นเทมเพลตให้ PCDA มอนอเมอร์ที่เกาะบนพื้นผิวเกิดการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบขึ้นมา

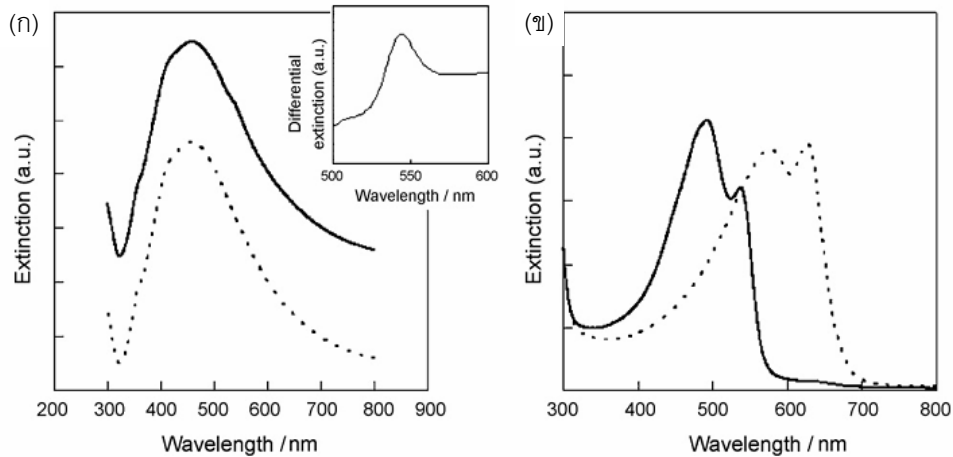


รูปที่ 2.26 การดูดซับของกลุ่มก้อน PCDA บนผิวของอนุภาคนาโนซิลิกา และการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของ PCDA บนผิวของอนุภาคนาโนซิลิกา⁽⁶⁾

ในปี ค.ศ.2009 Takahiro Yokoyama และคณะ⁽⁴⁸⁾ ได้ทำการพัฒนากระบวนการสร้างผลึกลูกผสมขนาดนาโนของพอลิไดอะเซทิลีนและโลหะเงินที่มีอนุภาคนาโนของโลหะเงินเป็นแกน และมีพอลิไดอะเซทิลีนหุ้มอยู่ด้านนอก โดยอาศัยกระบวนการการตกตะกอนซ้ำร่วมกับการฉายรังสีไมโครเวฟ และทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค transmission electron microscopy และ UV-Vis absorption spectroscopy จากการศึกษพบว่า การให้ความร้อนด้วยการฉายรังสีไมโครเวฟมีความจำเป็นอย่างมากในการทำให้พอลิไดอะเซทิลีนหุ้มบนผิวของอนุภาคนาโนของโลหะเงินที่เป็นแกนได้ ซึ่งจากการศึกษาด้วยเทคนิค transmission electron microscopy พบว่าสามารถเตรียมผลึกลูกผสมขนาดนาโนที่มีโลหะเงินเป็นแกนและหุ้มด้วยพอลิไดอะเซทิลีนที่มีความหนาประมาณ 5 นาโนเมตรได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.27 และเมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค UV-Vis absorption spectroscopy พบว่า ผลึกลูกผสมขนาดนาโนของพอลิไดอะเซทิลีนและโลหะเงินปรากฏยอดการดูดกลืนแสงเล็กๆ ที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตรหลังการฉายแสงยูวี ดังแสดงในรูปที่ 2.28 (ก) ซึ่งเป็นผลจากเฟสสีแดงของพอลิไดอะเซทิลีน ซึ่งจะปรากฏยอดการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 500 ถึง 550 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.28 (ข) การที่พอลิไดอะเซทิลีนที่หุ้มอยู่ด้านนอกของผลึกลูกผสมนี้ปรากฏเป็นเฟสสีแดง โดยไม่เกิดเฟสสีน้ำเงินขึ้นมาก่อน เนื่องจากโครงสร้างสายโซ่หลักที่มีโครงสร้างเป็นแบบคอนจูเกตของพอลิไดอะเซทิลีนเกิดการบิดเบี้ยวผิดรูปไป ในกรณีที่เตรียมผลึกลูกผสมขนาดนาโนของพอลิไดอะเซทิลีนและโลหะเงินโดยไม่มีการฉายรังสีไมโครเวฟ พอลิไดอะเซทิลีนจะปรากฏเฟสสีน้ำเงินเท่านั้น ซึ่งถ้าต้องการให้เปลี่ยนเป็นเฟสสีแดงจะต้องได้รับการรบกวนจากสิ่งกระตุ้นภายนอก เช่น การปรับค่าความเป็นกรด-เบส เป็นต้น



รูปที่ 2.27 ภาพจากเทคนิค TEM แสดงโครงสร้างของผลึกลูกผสมระดับนาโนซึ่งประกอบด้วยอนุภาคนาโนของโลหะเงินอยู่ที่แกนและมีพอลิไดอะเซทิลีนหุ้มอยู่⁽⁴⁸⁾



รูปที่ 2.28 สเปกตรารายวิ-วิสิเบิลของ (ก) ผลิตึกลูกผสมระดับนาโนในน้ำทั้งก่อน (เส้นประ) และหลังฉายแสงยูวี (เส้นทึบ) (ข) ผลิตึกพอลิไดอะเซทิลีนระดับนาโนในน้ำในเฟสสีน้ำเงิน (เส้นประ) และเฟสสีแดง (เส้นทึบ)⁽⁴⁸⁾

สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการศึกษากการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ด้วยวิธีการใหม่ โดยทำการผสมพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลและอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์โดยปรับเปลี่ยนปริมาณของซิงค์ออกไซด์เป็นร้อยละ 5 9 17 33 และ 50 โดยน้ำหนัก และทำการศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ต่อสิ่งกระตุ้นภายนอก ได้แก่ อุณหภูมิ ความเป็นกรด-เบส ชนิดและความเข้มข้นของตัวทำละลาย ซึ่งคาดว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จะมีสมบัติการตอบสนองต่อสิ่งกระตุ้นภายนอกที่แตกต่างไปจากพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลบริสุทธิ์ และนำไปสู่การพัฒนาสมบัติในการตรวจวัดของวัสดุในกลุ่มนี้ต่อไป

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1. ไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์

ในงานวิจัยนี้ใช้ไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ชนิด 10,12-pentacosadiynoic acid (PCDA) ของบริษัท Fluka ที่มีสูตรโมเลกุล คือ $C_{25}H_{42}O_2$ เป็นมอนอเมอร์เริ่มต้นสำหรับการเตรียม poly(10,12-pentacosadiynoic acid) (PPCDA) โดยทำให้ PCDA เกิดกระบวนการพอลิเมอไรเซชันภายใต้แสงยูวีในสภาวะที่เหมาะสม โดยสมบัติของ PCDA ที่ใช้ แสดงดังรายละเอียดในภาคผนวก ก

3.1.2. ผงซิงค์ออกไซด์

ผงซิงค์ออกไซด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นผงซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนเมตร จากบริษัท นาโนแมททีเรียลส์ เทคโนโลยี จำกัด โดยมีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคเดี่ยวประมาณ 20 นาโนเมตร โดยสมบัติของผงซิงค์ออกไซด์ที่ใช้ แสดงดังรายละเอียดในภาคผนวก ข

3.1.3. ตัวทำละลาย

ตัวทำละลายที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ น้ำขจัดไอออนแล้ว (deionized water) ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จาก คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คลอโรฟอร์ม ($CHCl_3$) จากบริษัท RCI Labscan เอทานอล (C_2H_6O) (AR Grade) จากบริษัท Lab Scan และไอโซโพรพานอล (C_3H_8O) จากบริษัท Merck KGaA, Germany

3.1.4. สารปรับสภาพความเป็นเบส

สารปรับสภาพความเป็นเบสที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จากบริษัท Ajax Finechem

3.1.5. พอลิเมอร์สำหรับสร้างแผ่นฟิล์ม

พอลิเมอร์ที่ใช้ในการสร้างแผ่นฟิล์มในงานวิจัยนี้คือ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (C_2H_4O)_x ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จาก ผศ.ดร.รัชชาติ ไตรผล ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

3.2 สมบัติของอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์

3.2.1. สมบัติทางกายภาพ

ศึกษาสัณฐานวิทยา ลักษณะการกระจายตัวและขนาดอนุภาคเดี่ยวด้วยเทคนิค Transmission Electron Microscopy (JEM-2100) โดยทำการหยดสารแขวนลอยซิงค์ออกไซด์ในน้ำลงบนกริดทองแดง จากนั้นทิ้งไว้ให้แห้ง แล้วนำไปศึกษาสัณฐานวิทยาและขนาดอนุภาคเดี่ยว

จากนั้นศึกษาขนาดและการกระจายขนาดอนุภาคของซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิค laser light scattering (Mastersizer 2000, Malvern Instruments) โดยนำผงซิงค์ออกไซด์มากระจายตัวในน้ำขจัดไอออนแล้วโดยการอัลตราโซนิกส์ด้วยโพรบ และนำไปศึกษาขนาดและการกระจายขนาดอนุภาค

3.2.2. สมบัติการดูดกลืนรังสียูวี

ตรวจสอบอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ในสารแขวนลอยที่ผ่านการกรองด้วยฟิลเตอร์ขนาด 0.8 ไมโครเมตร โดยการวัดการดูดกลืนรังสียูวีของสารแขวนลอยซิงค์ออกไซด์ในน้ำขจัดไอออนแล้ว ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer (Specord S 100 B, Analytik Jena) ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 250 ถึง 800 นาโนเมตร โดยใช้ น้ำขจัดไอออนแล้วเป็น blank

3.3 กระบวนการเตรียมสารละลาย PPCDA เวลีเคิล

ในงานวิจัยนี้ทำการเตรียมสารละลาย PPCDA เวลีเคิลในน้ำขจัดไอออนแล้ว ที่ความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์ โดยมีวิธีการและขั้นตอน ดังนี้

1. คำนวณและชั่ง PCDA โดยใช้ปริมาณ PCDA 0.0019 กรัม
2. นำ PCDA ไปละลายในคลอโรฟอร์ม และกรองผ่านไนลอนฟิลเตอร์ขนาด 0.45 ไมโครเมตร

3. ระเหยคลอโรฟอร์มออกที่อุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส จะได้ PCDA ที่มีความบริสุทธิ์
4. ผสม PCDA ที่บริสุทธิ์กับน้ำขจัดไอออนแล้ว โดยใช้ปริมาณน้ำขจัดไอออนแล้วเท่ากับ 10 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปอัลตราโซนิกส์ด้วยเครื่อง ultrasonic bath (Elmasonic, D-78224) ที่อุณหภูมิ 75-80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
5. นำสารแขวนลอยที่เตรียมได้ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง และเก็บในตู้เย็นเป็นเวลา 1 คืน
6. นำสารแขวนลอยไปผ่านการฉายแสงยูวีเป็นเวลา 5 นาที แล้วกรองผ่านเซลลูโลสฟิลเตอร์ขนาด 0.8 ไมโครเมตร จะได้สารละลาย PPCDA เกล็ดที่มีสีน้ำเงิน

3.4 กระบวนการเตรียมสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เกล็ดกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์

ในงานวิจัยนี้ทำการเตรียมสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เกล็ดกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ในน้ำขจัดไอออนแล้ว โดยใช้ความเข้มข้นของ PCDA เป็น 0.5 มิลลิโมลาร์ และปรับเปลี่ยนปริมาณของซิงค์ออกไซด์เป็นร้อยละ 5 9 17 33 และ 50 โดยน้ำหนักของ PCDA ซึ่งมีวิธีการและขั้นตอนดังนี้

1. คำนวณและชั่งส่วนผสมระหว่าง PCDA และผงซิงค์ออกไซด์ในอัตราส่วนต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 โดยกำหนดปริมาณของน้ำขจัดไอออนแล้วให้เท่ากับ 100 มิลลิลิตร
2. นำ PCDA ไปละลายในคลอโรฟอร์ม และกรองผ่านไนลอนฟิลเตอร์ขนาด 0.45 ไมโครเมตร จากนั้นระเหยคลอโรฟอร์มออกที่อุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส จะได้ PCDA ที่มีความบริสุทธิ์
3. นำผงซิงค์ออกไซด์ผสมกับน้ำขจัดไอออนแล้ว และนำไปอัลตราโซนิกส์ด้วยโพรบ (Ultrasonic liquid processors, Vibra-Cell™ VC 505) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้ผงซิงค์ออกไซด์เกิดการกระจายตัวที่ดี
4. ผสมสารแขวนลอยซิงค์ออกไซด์ กับ PCDA ที่บริสุทธิ์ จากนั้นนำไปอัลตราโซนิกส์ด้วยเครื่อง ultrasonic bath (Elmasonic, D-78224) ที่อุณหภูมิ 75-80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
5. นำสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง และเก็บในตู้เย็นเป็นเวลา 1 คืน

6. ฉายแสงยูวีสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบเป็นเวลา 5 นาที แล้วกรองผ่านเซลลูโลสฟิลเตอร์ขนาด 0.8 ไมโครเมตร จะได้สารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ที่มีสีฟ้า

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมของ PPCDA และผงซิงค์ออกไซด์ในการเตรียมสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ

ปริมาณ ZnO (wt.%)	อัตราส่วน PCDA : ZnO	PCDA (กรัม)	ZnO (กรัม)
5	20 : 1	0.019	0.00095
9	10 : 1	0.019	0.0019
17	5 : 1	0.019	0.0038
33	2 : 1	0.019	0.0095
50	1 : 1	0.019	0.019

3.5 สมบัติของ PPCDA เวสิเคิล และวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์

ทำการศึกษเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ของ PPCDA เวสิเคิล และวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ที่มีปริมาณของซิงค์ออกไซด์เป็นร้อยละ 5 9 17 33 และ 50 โดยน้ำหนัก โดยศึกษาสมบัติต่างๆ ดังนี้

3.5.1. ขนาดและการกระจายขนาดของอนุภาค

นำสารละลาย PPCDA เวสิเคิล และสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมได้มาศึกษาขนาดและการกระจายขนาดอนุภาคด้วยเทคนิค laser light scattering (Mastersizer 2000, Malvern Instruments)

3.5.2. สัณฐานวิทยา

นำสารละลาย PPCDA เวสิเคิล และสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมได้หยดลงบนแผ่นซิลิกอนที่ทำความสะอาดแล้ว ทิ้งให้แห้งที่

อุณหภูมิห้อง แล้วจึงนำไปศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic Force Microscope, AFM) (SPI3800N Nanoscope II, Seiko Instrument Inc., Japan) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) (JEOL JSM 6400)

3.5.3. โครงสร้างจุลภาคของอนุภาคเดี่ยว

นำสารละลาย PPCDA เวสิเคิล และสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์หยดลงบนบนกริดทองแดง จากนั้นทิ้งไว้ให้แห้ง แล้วนำไปศึกษาโครงสร้างจุลภาคของอนุภาคเดี่ยวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM) (JEM-2100)

3.5.4. สมบัติการดูดกลืนแสง

ศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของสารละลาย PPCDA เวสิเคิล และสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer (Specord S 100 B, Analytik Jena) โดยดูดสารละลายที่ต้องการศึกษาประมาณ 4 มิลลิลิตร ใส่ลงใน quartz cuvette แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 300 ถึง 800 นาโนเมตร โดยใช้น้ำจัดไอออนแล้วเป็น blank

3.6 การศึกษาพฤติกรรมและการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลาย PPCDA เวสิเคิล และสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ต่อสิ่งกระตุ้นภายนอก

3.6.1. การศึกษาการตอบสนองต่ออุณหภูมิ

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลาย PPCDA เวสิเคิลและสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ในช่วงอุณหภูมิห้อง ถึง 100 องศาเซลเซียส โดยวิเคราะห์สมบัติการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer (Specord S 100 B, Analytik Jena) ที่มีการติดตั้งระบบหมุนเวียนน้ำที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ ในการทดลองนี้ใช้สารละลายประมาณ 4 มิลลิลิตร ใส่ใน quartz cuvette และทำการศึกษาการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 250 ถึง 800 นาโนเมตร โดยใช้น้ำจัดไอออนแล้วเป็น blank

3.6.2. การศึกษาการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบส

ศึกษาการเปลี่ยนสีของสารละลาย PPCDA เกล็ดและสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เกล็ดกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-เบส โดยวิเคราะห์สมบัติการดูดกลืนแสงในช่วงพีเอช 6 ถึง 13 ด้วยเทคนิค UV-VIS Spectrophotometry (Specord S 100 B, Analytik Jena) ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 250 ถึง 800 นาโนเมตร และใช้น้ำจืดไอออนแล้วเป็น blank โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ปรับค่าความเป็นเบสของสารละลาย

3.6.3. การศึกษาการตอบสนองต่อชนิดและความเข้มข้นของตัวทำละลาย

ศึกษาการเปลี่ยนสีของสารละลาย PPCDA เกล็ดและสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เกล็ดกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ เมื่อเติมตัวทำละลายเข้าไปในระบบ โดยตัวทำละลายที่ใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้คือ เอทานอล และไอโซโพรพานอล และทดสอบที่ความเข้มข้นในช่วงร้อยละ 5 ถึง 90 โดยปริมาตร โดยเติมตัวทำละลายที่ต้องการทดสอบครั้งละร้อยละ 5 โดยปริมาตร จากนั้นทำการเขย่าจนตัวทำละลายและสารละลายที่ทำการทดสอบรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน และวัดการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค UV-VIS Spectrophotometry (Specord S 100 B, Analytik Jena) ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 250 ถึง 800 นาโนเมตร โดยใช้น้ำจืดไอออนแล้วเป็น blank

3.7 การเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์ม PPCDA เกล็ด และฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เกล็ดกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์

3.7.1. กระบวนการเตรียมฟิล์ม PPCDA เกล็ด และฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เกล็ดกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์

การเตรียมฟิล์ม PPCDA เกล็ด และฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เกล็ดกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ มีวิธีการและขั้นตอนในการเตรียมดังนี้

1. เตรียมสารละลาย PPCDA เกล็ด และสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เกล็ดกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ที่ปริมาณซิงค์ออกไซด์เป็นร้อยละ 5 9 17 33 และ 50 โดยน้ำหนัก ตามวิธีการในหัวข้อ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ
2. เตรียมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในน้ำจืดไอออนแล้วที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของของแข็ง โดยทำการ stirred พร้อมกับให้ความร้อนแก่ผงพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่

อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้ผงพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ละลายในน้ำขจัดไอออนแล้ว

3. นำสารละลาย PPCDA เวลีเคิล และสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ผสมเข้ากับสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปริมาตร 3 มิลลิลิตร และคนด้วยแท่งคนแม่เหล็ก (magnetic stir bar) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4. เทลงจานเพาะเชื้อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร จากนั้นเก็บไว้ในที่มืดที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งน้ำระเหยออกไปจนหมด โดยใช้ระยะเวลาประมาณ 5 วัน จะเกิดเป็นฟิล์มขึ้น

5. ตัดฟิล์มเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดกว้าง 12 มิลลิเมตร ยาว 40 มิลลิเมตร

3.7.2. การศึกษาการตอบสนองต่ออุณหภูมิของฟิล์ม PPCDA เวลีเคิล และฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ โดยวิเคราะห์สมบัติการดูดกลืนแสง

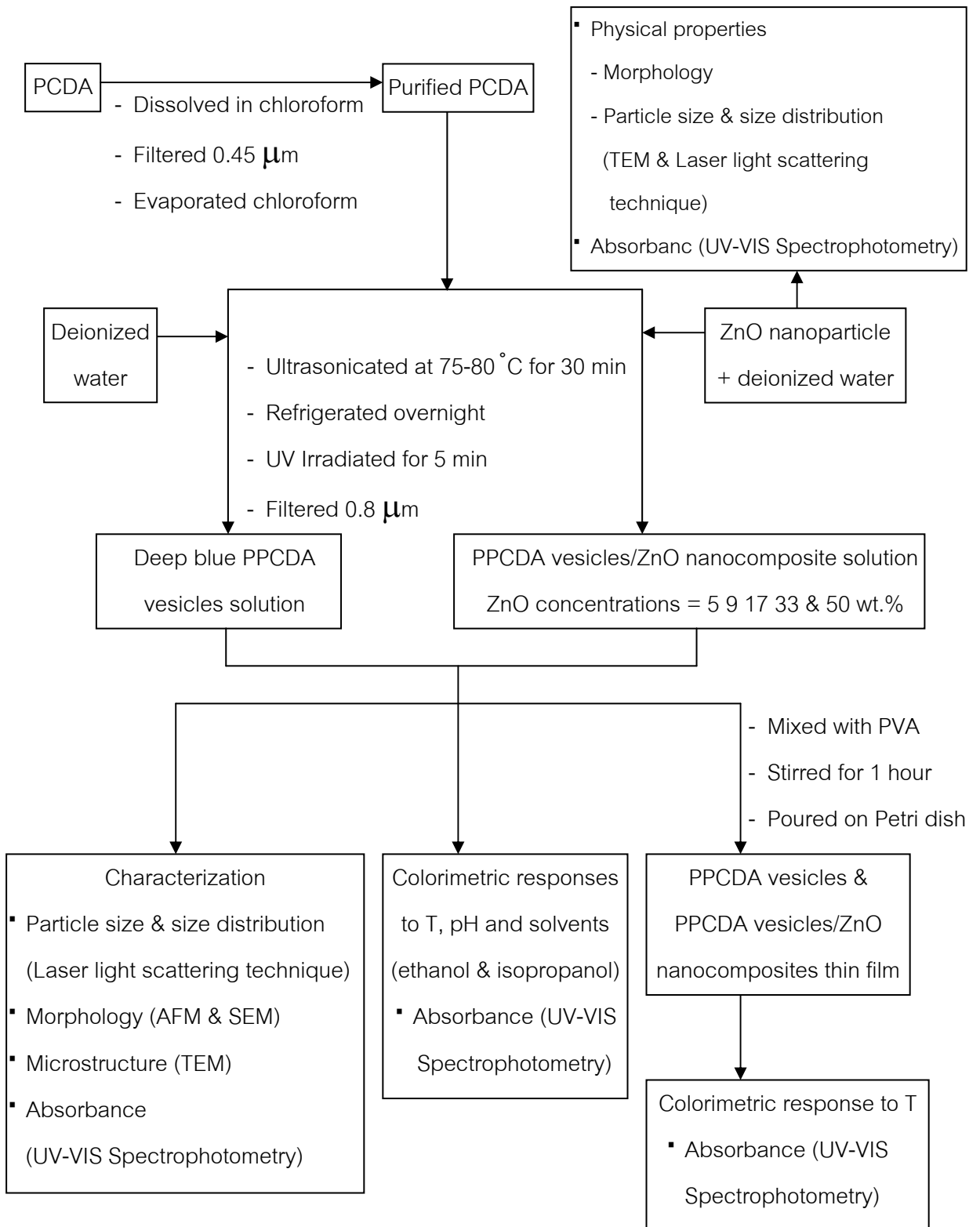
ศึกษาการเปลี่ยนสีของฟิล์ม PPCDA เวลีเคิล และฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ในช่วงอุณหภูมิห้องถึง 160 องศาเซลเซียส โดยทำการวิเคราะห์สมบัติการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 250 ถึง 800 นาโนเมตร ด้วยเทคนิค UV-VIS Spectrophotometry (Specord S 100 B, Analytik Jena) โดยใช้ glass slide เป็น blank ซึ่งขั้นตอนการเตรียมและทดสอบการตอบสนองต่ออุณหภูมิของฟิล์ม PPCDA เวลีเคิลและฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ มีดังต่อไปนี้

1. นำฟิล์ม PPCDA เวลีเคิล และฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ขนาดกว้าง 12 มิลลิเมตร ยาว 40 มิลลิเมตร ที่เตรียมขึ้นได้ตามวิธีการในหัวข้อ 3.5.1 วางลงบน glass slide ขนาดเดียวกัน และพันเทพลอนไว้ที่ส่วนหัวและท้าย เพื่อยึดฟิล์มวัสดุเชิงประกอบให้ติดอยู่บน glass slide ได้

2. นำฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่ประกบลงบน glass slide ที่เตรียมขึ้นมาได้ ไปทำการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงที่อุณหภูมิห้อง

3. นำฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่ประกบลงบน glass slide ไปอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที แล้วนำไปศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสง จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิการอบให้สูงขึ้นครั้งละ 5 องศาเซลเซียส โดยอบฟิล์มที่แต่ละอุณหภูมิเป็นเวลา 5 นาที และนำไปศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสง ทำเช่นนี้ไปจนถึงอุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส

3.8 แผนผังงานวิจัย



บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

ในงานวิจัยนี้ได้เตรียมวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิล กับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ทั้งในรูปของสารละลายและรูปของฟิล์มที่วัสดุเชิงประกอบกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ โดยใช้ปริมาณอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์เป็น 5 9 17 33 และ 50 wt.% และศึกษาสมบัติการเปลี่ยนสีเมื่อถูกรบกวนจากสิ่งกระตุ้นภายนอก ได้แก่ อุณหภูมิ ความเป็นกรด-เบส ชนิดและความเข้มข้นของตัวทำละลาย นอกจากนี้ยังศึกษาสมบัติอื่นๆ ได้แก่ สัณฐานวิทยา ขนาดและการกระจายขนาดอนุภาค และโครงสร้างระดับโมเลกุล โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบกับ PPCDA เวลีเคิลบริสุทธิ์ที่ไม่ได้เติมอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ลงไปในระบบ ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดของผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผลการวิจัยในหัวข้อต่อไป

4.1 สมบัติของอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์

4.1.1. สมบัติทางกายภาพ

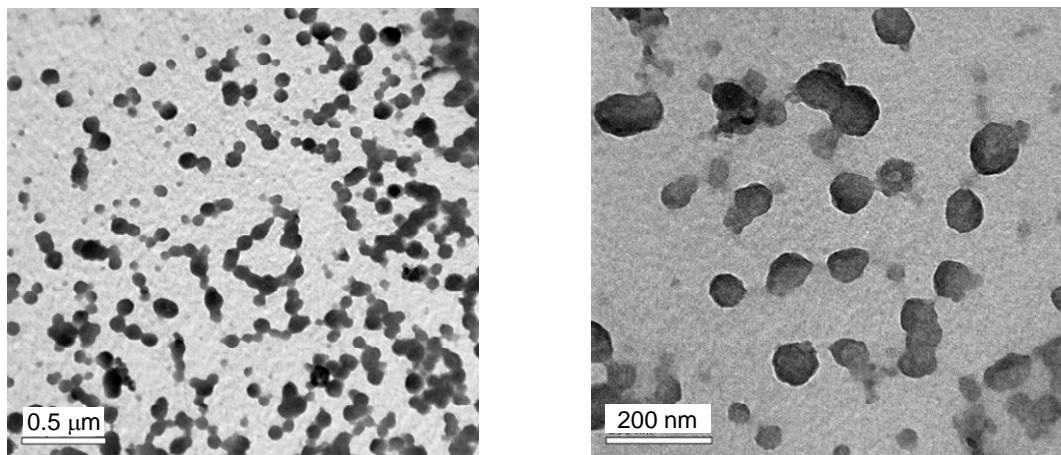
จากการนำผงซิงค์ออกไซด์มาศึกษาสัณฐานวิทยา ลักษณะการกระจายตัวและขนาดอนุภาคเดี่ยวด้วยเทคนิค Transmission Electron Microscopy พบว่าอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ที่ใช้มีลักษณะรูปร่างของอนุภาคเป็นทรงกลม มีการกระจายตัวของอนุภาคอย่างสม่ำเสมอ และมีขนาดของอนุภาคเดี่ยวอยู่ในช่วงประมาณ 20 ถึง 200 นาโนเมตร โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 50 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.1

เมื่อนำสารแขวนลอยซิงค์ออกไซด์ในน้ำขจัดไอออนแล้วที่ผ่านการอัลตราโซนิคส์ด้วยโพรบมาทำการศึกษขนาดและการกระจายขนาดของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ ด้วยเทคนิค Laser light scattering พบว่า อนุภาคซิงค์ออกไซด์มีการเกาะกันเป็นกลุ่มโดยมีขนาดของกลุ่มอนุภาคอยู่ในช่วง 700 ถึง 4000 นาโนเมตร และมีค่ากลางของขนาดกลุ่มอนุภาคเท่ากับ 1355 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.2

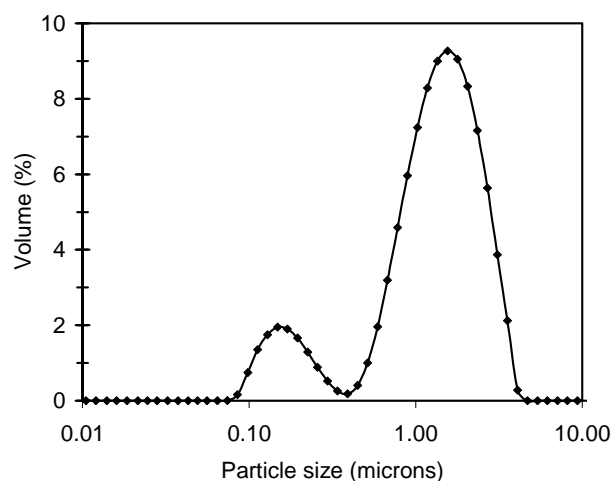
4.1.2. สมบัติการดูดกลืนรังสียูวี

สมบัติการดูดกลืนรังสียูวีถูกนำมาประยุกต์เพื่อตรวจสอบอนุภาคระดับนาโนของซิงค์ออกไซด์ ในสารแขวนลอยที่ผ่านการคัดขนาดด้วยวิธีการกรองผ่านเซลลูโลสฟิลเตอร์ขนาด 0.8 ไมโครเมตร เนื่องจาก หลังการกรองสารแขวนลอยซิงค์ออกไซด์นี้จะได้สารแขวนลอยที่ใส แสดงถึง

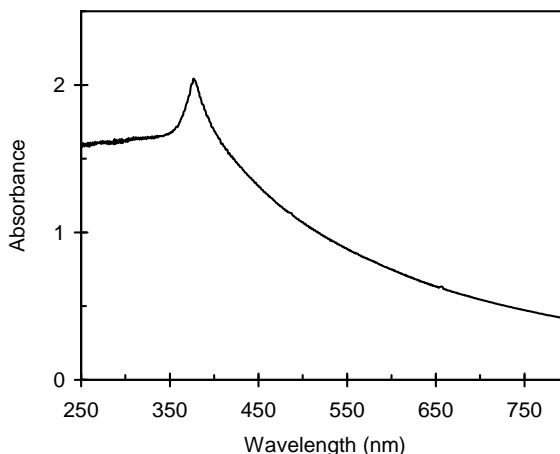
การมีอนุภาคระดับนาโนที่มีความเข้มข้นต่ำเกินไปหรืออนุภาคระดับนาโนที่ได้มีขนาดเล็กเกินไป ทำให้ไม่สามารถทำการศึกษาด้วยเทคนิค laser light scattering ได้ จึงต้องอาศัยเทคนิค UV-VIS Spectrophotometry ช่วยในการวิเคราะห์โดยทำการวิเคราะห์ในช่วงความยาวคลื่น 250 – 800 นาโนเมตร ซึ่งจากการศึกษาพบค่าการดูดกลืนแสงที่สูงในช่วงความยาวคลื่น 280 ถึง 400 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.3 แสดงถึงการดูดกลืนแสงในช่วงยูวี ซึ่งเป็นสมบัติเด่นของซิงค์ออกไซด์ แสดงให้เห็นว่ามีอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์อยู่ในสารแขวนลอยสีที่ผ่านการกรองแล้ว



รูปที่ 4.1 ภาพจากเทคนิค TEM แสดงลักษณะการกระจายตัวและขนาดของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ใช้
ในงานวิจัย (ก) กำลังขยาย 18,500 เท่า และ (ข) กำลังขยายเท่ากับ 59,000 เท่า



รูปที่ 4.2 ขนาดและการกระจายขนาดอนุภาคของสารแขวนลอยซิงค์ออกไซด์ในน้ำขจัดไอนอน
แล้ว ก่อนผ่านการกรองด้วยฟิลเตอร์ขนาด 0.8 ไมโครเมตร



รูปที่ 4.3 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยซิงค์ออกไซด์ในน้ำจืดไอออนแล้ว ที่ผ่านการกรองด้วยฟิลเตอร์ขนาด 0.8 ไมโครเมตร

4.2 สมบัติของ PPCDA เวสิเคิล และวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์

4.2.1. ขนาดและการกระจายขนาดของอนุภาค

เมื่อนำสารละลาย PPCDA เวสิเคิลและสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมโดยใช้ปริมาณของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เป็น 5 9 และ 17 wt.% มาทำการศึกษขนาดและการกระจายขนาดของอนุภาค ด้วยเทคนิค laser light scattering ได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.4 โดยพบว่า มีขนาดอนุภาคกระจายอยู่ในช่วง 40 ถึง 300 นาโนเมตร และค่ากลางของขนาดอนุภาคของสารละลาย PPCDA เวสิเคิลที่ไม่ได้เติมอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ลงไปในระบบมีค่าน้อยกว่าค่ากลางของสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์เล็กน้อย โดยค่ากลางของขนาดอนุภาคของสารละลาย PPCDA เวสิเคิลและสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ 5 9 และ 17 wt.% มีค่าเท่ากับ 110 115 116 และ 121 นาโนเมตร ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าการเพิ่มปริมาณของอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ลงในวัสดุเชิงประกอบส่งผลให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

4.2.2. สัณฐานวิทยา

การศึกษาสัณฐานวิทยาของ PPCDA เวลิลเคิล และวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลิลเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ที่เตรียมโดยใช้ปริมาณของซิงค์ออกไซด์เป็น 5.9 และ 17 wt.% โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (AFM) พบว่า PPCDA เวลิลเคิล และวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลิลเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ มีรูปร่างเป็นทรงกลม มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วงประมาณ 100 ถึง 300 นาโนเมตร โดยขนาดอนุภาคของวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลิลเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ 17 wt.% มีขนาดใหญ่กว่าขนาดอนุภาคของ PPCDA เวลิลเคิลเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.5 นอกจากนี้ เมื่อศึกษาสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลิลเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ 17 wt.% ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) โดยใช้กำลังขยาย 4,000 เท่า และ 10,000 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ก) และ (ข) ตามลำดับ พบว่าอนุภาคมีรูปร่างเป็นทรงกลม มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วงประมาณ 150 ถึง 300 นาโนเมตร ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาด้วยเทคนิค atomic force microscopy นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดอนุภาคของวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลิลเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ 17 wt.% ที่ศึกษาจากเครื่อง AFM และ SEM อยู่ในช่วงของขนาดอนุภาคที่ศึกษาจากเทคนิค laser light scattering เพียงแต่ขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า 100 นาโนเมตร ไม่อาจสามารถสังเกตได้ชัดเจนจากเครื่อง AFM และ SEM สำหรับวัสดุเชิงประกอบที่มีอัตราส่วนของอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ 5 และ 9 wt.% แสดงผลที่คล้ายคลึงกับวัสดุเชิงประกอบที่มีอัตราส่วนของอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ 17 wt.%

4.2.3. โครงสร้างจุลภาคของอนุภาคเดี่ยว

จากการใช้เทคนิค Transmission Electron Microscopy ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของอนุภาคเดี่ยว PPCDA เวลิลเคิล และอนุภาคของวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลิลเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ พบว่าอนุภาคเดี่ยวของ PPCDA เวลิลเคิลมีรูปร่างเป็นทรงกลม ภายในโครงสร้างปรากฏเป็นเนื้อเดียวกัน ไม่มีลักษณะพิเศษเกิดขึ้น และมีขนาดของอนุภาคเดี่ยวประมาณ 180 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ก) ส่วนโครงสร้างจุลภาคของอนุภาคเชิงประกอบ PPCDA เวลิลเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ที่กำลังขยาย 195,000 เท่า พบว่าโครงสร้างภายในมีลักษณะซ้อนกันเป็นชั้น โดยมี PPCDA เกาะอยู่บนผิวของอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ข) และเมื่อพิจารณาที่กำลังขยายสูงขึ้นที่ 500,000 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ค) จะพบความแตกต่างอย่างชัดเจนระหว่างบริเวณของ PPCDA และบริเวณของอนุภาคนาโน

ของซิงค์ออกไซด์ ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นอิเล็กตรอนในเฟสของสารประเภทออร์แกนิก (organic) และอินออร์แกนิก (inorganic) โดยบริเวณสีดำที่บัพที่อยู่ภายในจะเป็นบริเวณของอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ และถัดออกมาจะเป็นบริเวณของ PPCDA ซึ่งปรากฏลักษณะโครงสร้างเป็นชั้นอย่างชัดเจน โดยระยะห่างระหว่างชั้นอยู่ในช่วงประมาณ 4 ถึง 6 นาโนเมตร ซึ่งค่าที่ได้นี้มีความใกล้เคียงกับค่า d-spacing ของ PPCDA ซึ่งงานวิจัยของ Yu Gu และคณะ⁽⁴⁹⁾ รายงานไว้ว่ามีค่าเท่ากับ 4.7 นาโนเมตร การตรวจพบโครงสร้างที่เป็นชั้นๆ ในวัสดุเชิงประกอบแสดงให้เห็นว่า PPCDA มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบมากขึ้นเมื่อเกาะบนอนุภาคซิงค์ออกไซด์ โดยหมู่คาร์บอกซิลที่ head groups ของ PPCDA เกิดการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบและเป็นระนาบเดียวกัน ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของความหนาแน่นอิเล็กตรอนระหว่างบริเวณของ head groups กับบริเวณของโซ่ข้างที่ประกอบด้วยหมู่แอลคิลมากขึ้น จึงปรากฏลักษณะโครงสร้างเป็นชั้นๆ ของ PPCDA ขึ้นมาบนผิวของซิงค์ออกไซด์ ซึ่งจากการตรวจสอบพบว่ามีชั้นของ PPCDA เรียงซ้อนกันอยู่บนผิวของซิงค์ออกไซด์ประมาณ 6 ชั้น

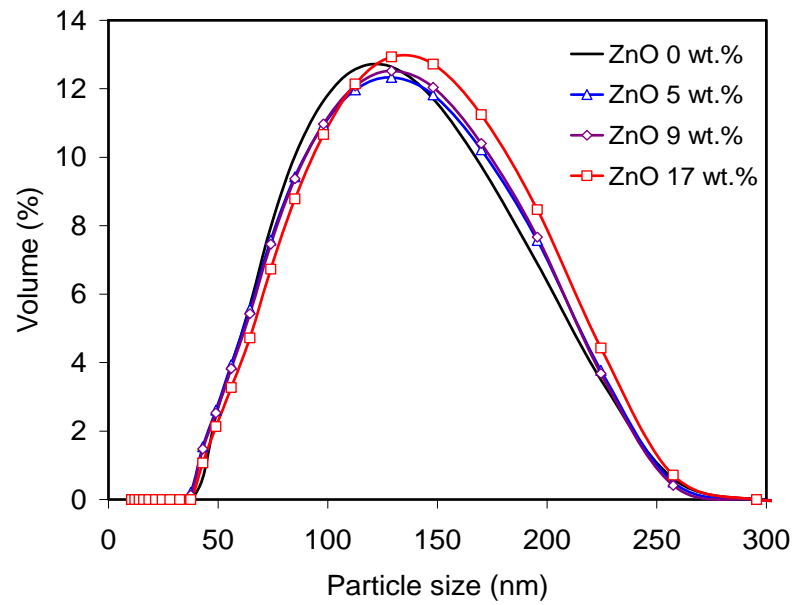
4.2.4. สมบัติการดูดกลืนแสง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติการดูดกลืนรังสียูวีและวิสิเบิล ด้วยเทคนิค UV-VIS Spectrophotometry เพื่อใช้ในการวิเคราะห์สีของสารละลาย PPCDA เกล็ดเคล็ด และสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เกล็ดเคล็ดกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมได้ และศึกษาการจัดเรียงตัวและระยะคอนจูเกต (conjugation length) ของสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากค่าความยาวคลื่นที่ตำแหน่งการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) ในสเปกตรากการดูดกลืนแสง ถ้าตำแหน่งของแถบการดูดกลืนแสง (absorption band) อยู่ที่ค่าความยาวคลื่นสูงกว่า หรือเรียกว่าการเกิด red shift จะแสดงถึงการเพิ่มขึ้นของระยะคอนจูเกตของสายโซ่พอลิเมอร์ แต่ถ้าตำแหน่งของแถบการดูดกลืนแสงปรากฏที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า หรือเรียกว่าการเกิด blue shift จะแสดงถึงการลดลงของระยะคอนจูเกตของสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งจากการศึกษาสเปกตรากการดูดกลืนแสงของสารละลาย PPCDA เกล็ดเคล็ดและสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เกล็ดเคล็ดกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ที่เตรียมด้วยปริมาณซิงค์ออกไซด์เป็น 5 9 และ 17 wt.% ดังแสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารละลาย PPCDA เกล็ดเคล็ด ปรากฏที่ความยาวคลื่น 636 นาโนเมตร และปรากฏยอดการดูดกลืนแสง (vibronic band) ที่ความยาวคลื่น 590 นาโนเมตร ซึ่งเป็นสเปกตรากการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงิน ทำให้มองเห็นสารละลายมีสีน้ำเงิน เมื่อพิจารณาสเปกตรากการดูดกลืนแสงของสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เกล็ดเคล็ดกับอนุภาคนาโน

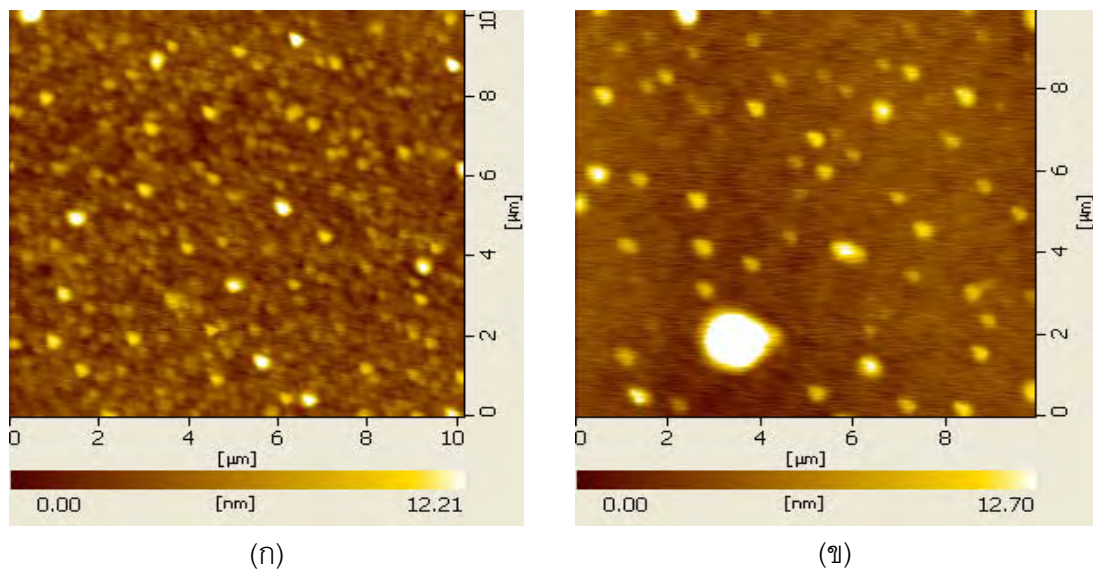
โนของซิงค์ออกไซด์ 5.9 และ 17 wt.% จะพบว่าตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุด และแถบ vibronic เลื่อนไปอยู่ในตำแหน่งที่ความยาวคลื่นสูงขึ้นหรือเกิด red shift โดยความยาวคลื่น ณ ตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุดมีค่าเท่ากับ 643 นาโนเมตร และปรากฏแถบ vibronic ที่ความยาวคลื่น 593 นาโนเมตร แสดงให้เห็นว่าสายโซ่หลักที่มีโครงสร้างเป็นแบบคอนจูเกตของ PPCDA เวลิลเคิลในวัสดุเชิงประกอบมีการจัดเรียงตัวอยู่ในระนาบเดียวกันมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของระยะคอนจูเกตของ PPCDA ในวัสดุเชิงประกอบเมื่อเปรียบเทียบกับ PPCDA เวลิลเคิลที่บริสุทธิ์ จึงทำให้เกิด red shift ขึ้น แม้ว่าเกิด red shift ไม่มากนักก็ตาม นอกจากนี้ยังพบแถบการดูดกลืนแสงเล็กๆ ที่ความยาวคลื่นประมาณ 675 นาโนเมตร ในสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลิลเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ 5.9 และ 17 wt.% ปรากฏขึ้นมาอีกด้วย

สเปกตรากการดูดกลืนแสงของสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลิลเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ 5.9 และ 17 wt.% แสดงแถบการดูดกลืนแสงที่แคบมากกว่าสเปกตรากของสารละลาย PPCDA เวลิลเคิล ซึ่งโดยปกติแล้วความกว้างของแถบการดูดกลืนแสงจะขึ้นอยู่กับสิ่งแวดล้อมของโครโมฟอร์ ถ้าสิ่งแวดล้อมของโครโมฟอร์มีความเป็นระเบียบ หรือจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกัน จะส่งผลให้แถบการดูดกลืนแสงมีความแคบ ดังนั้นการที่สารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลิลเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์มีแถบการดูดกลืนแสงที่แคบกว่าของสารละลาย PPCDA เวลิลเคิล แสดงให้เห็นว่าสิ่งแวดล้อมโดยรอบโครโมฟอร์ อาทิ โซ่ข้าง มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบมากกว่าของสารละลาย PPCDA เวลิลเคิล

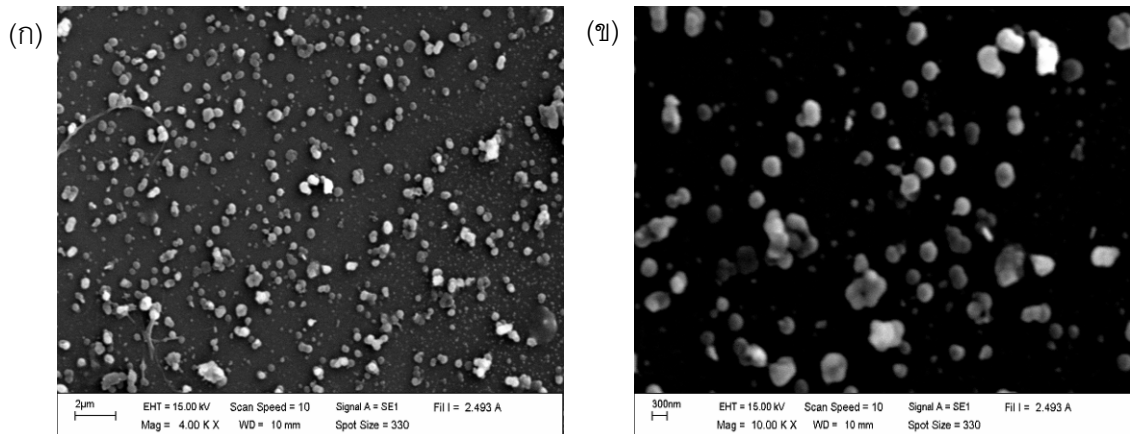
นอกจากนี้ยังพบการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 375 นาโนเมตร ในสเปกตรากของสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลิลเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ 17 wt.% ซึ่งแสดงถึงการมีอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์อยู่ในระบบ เนื่องจากอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์สามารถดูดกลืนรังสียูวีซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 280 ถึง 400 นาโนเมตรได้ อย่างไรก็ตามในสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลิลเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ 5 และ 9 wt.% ไม่แสดงสเปกตรากการดูดกลืนรังสียูวี ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากซิงค์ออกไซด์ในระบบมีความเข้มข้นต่ำ ทำให้ความเข้มของการดูดกลืนรังสียูวีอยู่ในระดับที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับความเข้มของการดูดกลืนแสงสูงสุด หรืออาจเกิดจากรังสียูวีจากแหล่งกำเนิดแสงตกกระทบไม่โดนอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ที่อยู่ในสารละลายวัสดุเชิงประกอบ จึงทำให้ไม่แสดงการดูดกลืนแสงในช่วงยูวี แต่จากสเปกตรากการดูดกลืนแสง (รูปที่ 4.8) รวมถึงการวิเคราะห์ผลการทดลองจากเทคนิค laser light scattering AFM SEM และ TEM (รูปที่ 4.4 – 4.7) แสดงให้เห็นว่ามีอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์อยู่ในระบบ



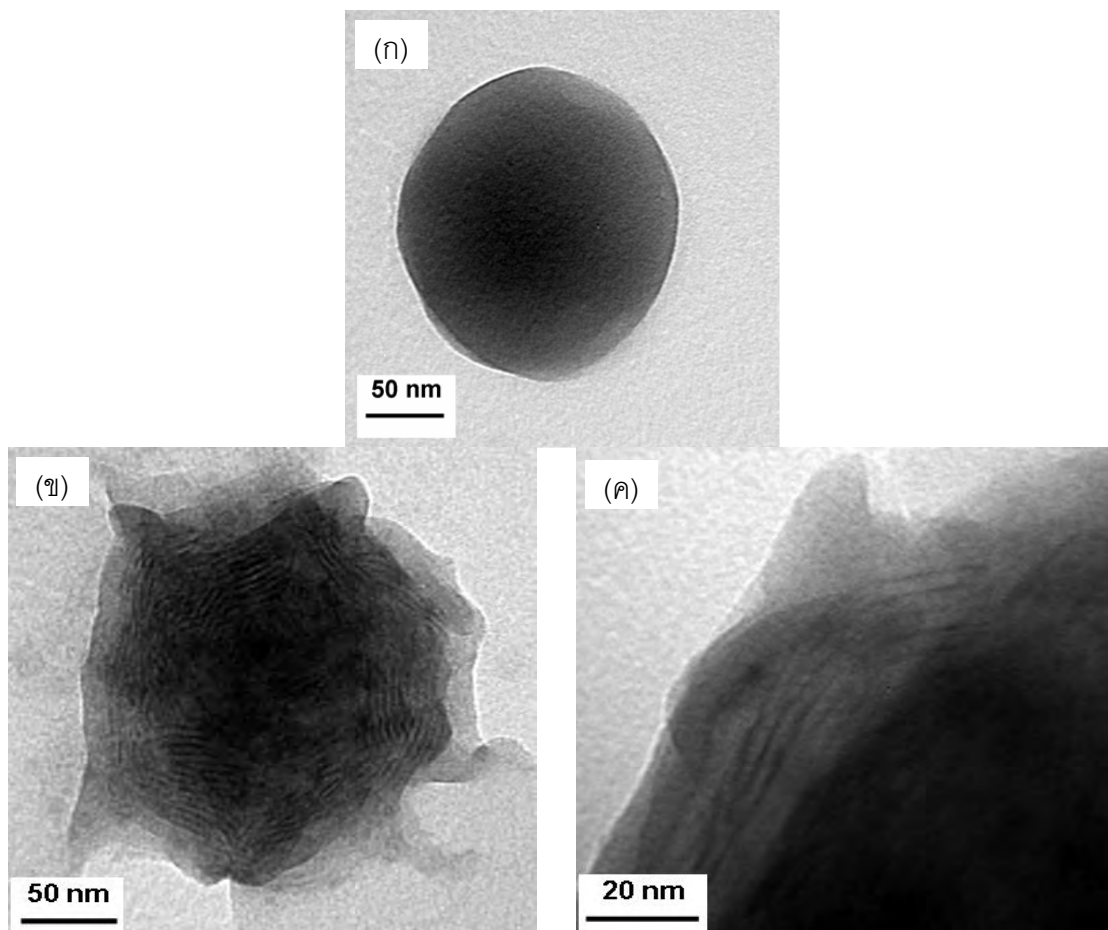
รูปที่ 4.4 ขนาดและการกระจายขนาดอนุภาคของสารละลาย PPCDA เวสิเคิล (ZnO 0 wt.%) และสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ที่เตรียมโดยใช้ปริมาณซิงค์ออกไซด์ 5 9 และ 17 wt.%



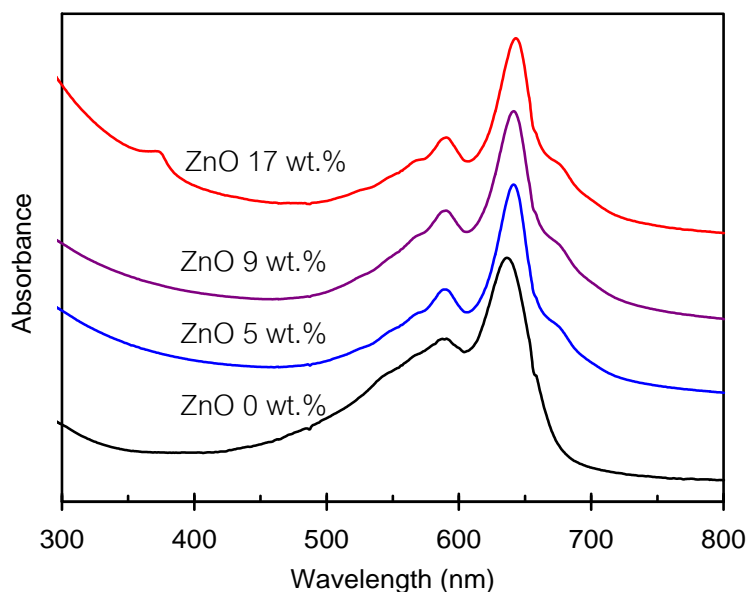
รูปที่ 4.5 สัณฐานวิทยาจาก AFM ของ (ก) PPCDA เวสิเคิล และ (ข) วัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ที่ปริมาณซิงค์ออกไซด์ 17 wt.%



รูปที่ 4.6 สัณฐานวิทยาจาก SEM ของวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เติสเคลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ที่ปริมาณซิงค์ออกไซด์ 17 wt.% (ก) กำลังขยาย 4,000 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 10,000 เท่า



รูปที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคของ (ก) PPCDA เติสเคล (ข) อนุภาคของวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เติสเคลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ที่ปริมาณซิงค์ออกไซด์เป็น 17 wt.% ที่กำลังขยาย 195,000 เท่า และ (ค) ที่กำลังขยาย 500,000 เท่า



รูปที่ 4.8 สเปกตรากการดูดกลืนแสงที่อุณหภูมิห้องของสารละลาย PPCDA เวสิเคิล (ZnO 0 wt.%) และสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ที่ปริมาณซิงค์ออกไซด์ 5 9 และ 17 wt.%

4.3 พฤติกรรมการเปลี่ยนสีของ PPCDA เวสิเคิล และวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ 5 9 และ 17 wt.% เมื่อได้รับการรบกวนจากสิ่งกระตุ้นภายนอก

4.3.1. การตอบสนองต่ออุณหภูมิของสารละลาย PPCDA เวสิเคิล และสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์

เมื่อนำสารละลาย PPCDA เวสิเคิล และสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ที่ปริมาณซิงค์ออกไซด์เป็น 5 9 และ 17 wt.% ที่เตรียมได้ มาทำการศึกษาการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับการกระตุ้นโดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิห้องถึง 100 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิห้อง สารละลาย PPCDA เวสิเคิล มีสีน้ำเงินจากการสังเกตด้วยตาเปล่า และเมื่อวิเคราะห์การดูดกลืนแสงได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ก) โดยพบตำแหน่งการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 636 นาโนเมตร และปรากฏแถบ vibronic ที่ความยาวคลื่น 590 นาโนเมตร ซึ่งเป็นสเปกตรากการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงิน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความเข้มของแถบการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงินจะลดลงเรื่อยๆ ในขณะที่เดียวกันความเข้มของแถบการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตร จะเพิ่มขึ้น และเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าจะ

พบว่าสารละลาย PPCDA เวสิเคิล จะค่อยๆ เปลี่ยนเป็นสีม่วงมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ก) เมื่อให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจนอุณหภูมิสูงกว่า 64 องศาเซลเซียส สเปกตรารการดูดกลืนแสงของสารละลาย PPCDA เวสิเคิล เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุดจะเลื่อนไปอยู่ที่ความยาวคลื่น 542 นาโนเมตร ในขณะที่แถบ vibronic จะปรากฏที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร หรือเรียกได้ว่าเป็นสเปกตรารการดูดกลืนแสงของเฟสสีแดง ซึ่งจะมองเห็นสารละลายมีสีแดง โดยสารละลาย PPCDA เวสิเคิล เกิดการเปลี่ยนเฟสจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิประมาณ 74 องศาเซลเซียส โดยกลไกในการเปลี่ยนสีเกิดจากพลังงานความร้อนที่สูงทำให้พันธะไฮโดรเจนของหมู่คาร์บอกซิลที่เชื่อมระหว่าง head groups ของ PPCDA เวสิเคิลเกิดการแตกออก ดังแสดงในรูปที่ 4.11 โซ่ข้างที่เป็นหมู่แอลคิลเกิดการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ออร์บิทัลไพ (π -orbital) เกิดการบิดออกนอกระนาบ ทำให้ π อิเล็กตรอนที่สายโซ่หลักที่มีโครงสร้างเป็นแบบคอนจูเกตเคลื่อนที่ไม่สะดวก ส่งผลให้ระยะคอนจูเกตลดลง ช่องว่างพลังงานของ HOMO และ LUMO กว้างขึ้น อิเล็กตรอนต้องใช้พลังงานมากขึ้นในการกระโดดข้ามช่องว่างพลังงาน จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของสเปกตรารการดูดกลืนแสงไปยังความยาวคลื่นที่สั้นกว่า ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสีของ PPCDA เวสิเคิลเป็นสีแดง⁽²²⁾

เมื่อศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิต่างๆ ของสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ที่ปริมาณซิงค์ออกไซด์ 5, 9 และ 17 wt.% ได้ สเปกตรารการดูดกลืนแสง ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ข) (ค) และ (ง) ตามลำดับ และการเปลี่ยนสีของสารละลายวัสดุเชิงประกอบ แสดงดังรูปที่ 4.10 (ข) จากผลการทดลองพบว่า การเปลี่ยนสีของสารละลายวัสดุเชิงประกอบทั้งหมดมีความคล้ายคลึงกันมาก โดยพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความเข้มของแถบการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงินลดลงเรื่อยๆ อย่างไรก็ตาม เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 74 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สารละลาย PPCDA เวสิเคิลเกิดการเปลี่ยนสีเป็นสีแดงอย่างสมบูรณ์ สารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ยังคงไม่เปลี่ยนเป็นสีแดง โดยจะพบว่าสเปกตรารการดูดกลืนแสงยังไม่เกิดการเปลี่ยนตำแหน่งที่ชัดเจน แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นจนถึงประมาณ 85 องศาเซลเซียส จะพบว่าสเปกตรารการดูดกลืนแสงเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก โดยยอดการดูดกลืนแสงสูงสุดเลื่อนไปปรากฏที่ความยาวคลื่น 588 นาโนเมตร นั้นแสดงให้เห็นว่าในสารละลายวัสดุเชิงประกอบต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าสารละลาย PPCDA เวสิเคิลประมาณ 20 องศาเซลเซียส ในการที่จะทำให้เกิดการเลื่อนตำแหน่งของยอดการดูดกลืนแสงสูงสุดอย่างเห็นได้ชัดเจน และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นจนถึงประมาณ 94 องศาเซลเซียส ยอดการดูดกลืนแสงสูงสุดเลื่อนไปอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 580 นาโนเมตร ซึ่งเมื่อสังเกตจากตาเปล่า

จะเห็นว่าสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสเซลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ปรากฏเป็นสีม่วงอมชมพู ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ข)

เมื่อพิจารณาค่าความยาวคลื่น ณ ตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) ที่อุณหภูมิที่ทำการทดสอบของสารละลาย PPCDA เวสเซล และสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสเซลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.12 (ก) โดยพบว่าค่า λ_{max} ของสารละลาย PPCDA เวสเซล (ZnO 0 wt.%) จะค่อยๆ ลดต่ำลงมาเรื่อยๆ ด้วยอัตราค่อนข้างคงที่ จากความยาวคลื่นเริ่มต้นที่ 636 นาโนเมตรที่อุณหภูมิห้อง จนเมื่อถึงอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อัตราการเปลี่ยนเฟสสีเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมาก ค่า λ_{max} เคลื่อนจากความยาวคลื่น 618 นาโนเมตร มาอยู่ที่ 542 นาโนเมตร จากนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิต่อไปจนถึง 94 องศาเซลเซียส จะพบว่าไม่มีการเปลี่ยนเฟสสีเกิดขึ้นอีกต่อไปโดยค่า λ_{max} คงที่ที่ 542 นาโนเมตร เมื่อพิจารณาค่า λ_{max} ของสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสเซลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ จะพบว่าค่า λ_{max} เริ่มต้นอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 643 นาโนเมตรที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นค่า λ_{max} ค่อยๆ ลดต่ำลงด้วยอัตราค่อนข้างคงที่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับสารละลาย PPCDA เวสเซล แต่จะเกิดการเปลี่ยนเฟสสีอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงกว่า 80 องศาเซลเซียส โดย λ_{max} ของสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสเซลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ 5 และ 9 wt.% จะเคลื่อนจากความยาวคลื่น 610 นาโนเมตร ไปอยู่ที่ความยาวคลื่น 583 นาโนเมตร ในขณะที่ λ_{max} ของสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสเซลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ 17 wt.% จะเคลื่อนจากความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร ไปอยู่ที่ 587 นาโนเมตร และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิต่อไปพบว่า λ_{max} สามารถลดต่ำลงได้อีก ซึ่งแตกต่างจากพฤติกรรมของสารละลาย PPCDA เวสเซล ที่ค่า λ_{max} จะคงที่หลังจากเกิดการเปลี่ยนเฟสสี เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 94 องศาเซลเซียส λ_{max} ของสารละลายวัสดุเชิงประกอบปรากฏที่ความยาวคลื่นประมาณ 580 นาโนเมตร ซึ่งมีค่าแตกต่างจาก λ_{max} ของสารละลาย PPCDA เวสเซลที่อุณหภูมิเดียวกันถึงประมาณ 40 นาโนเมตร

เมื่อพิจารณากราฟเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสี (%CR) ที่อุณหภูมิที่ทำการทดสอบในรูปที่ 4.12 (ข) จะเห็นความแตกต่างของการเปลี่ยนสีระหว่างสารละลาย PPCDA เวสเซล กับสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสเซลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์อย่างชัดเจนตั้งแต่อุณหภูมิประมาณ 35 องศาเซลเซียสขึ้นไป โดยสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสเซลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์จะต้องใช้อุณหภูมิที่สูงกว่ามากในการทำให้เกิดการเปลี่ยนสีในระดับเดียวกันกับสารละลาย PPCDA เวสเซล เช่น ในการทำให้เกิดการเปลี่ยนสีไป 60 เปอร์เซ็นต์

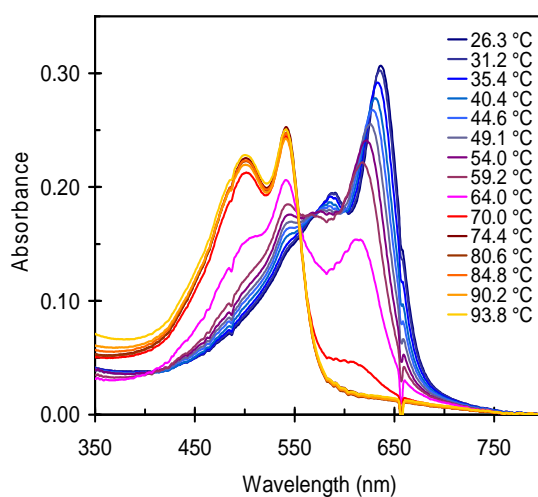
(ที่ 60%CR) สารละลายวัสดุเชิงประกอบที่มีอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ 17 wt.% จะต้องใช้ อุณหภูมิสูงกว่าสารละลาย PPCDA เวลึเคิล ประมาณ 22 องศาเซลเซียส เป็นต้น ในช่วง อุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิประมาณ 50 องศาเซลเซียส สารละลาย PPCDA เวลึเคิล จะค่อยๆ เกิด การเปลี่ยนสีไปด้วยอัตราค่อนข้างคงที่ แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการเปลี่ยนสีเพิ่มขึ้น โดยอัตรา การเปลี่ยนสีเพิ่มขึ้นเร็วที่สุดในช่วงอุณหภูมิ 65 ถึง 70 องศาเซลเซียส และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึง ประมาณ 75 องศาเซลเซียส %CR เพิ่มขึ้นไปอยู่ที่ค่าสูงสุดที่ประมาณ 92 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือได้ว่าเป็น อุณหภูมิที่สารละลาย PPCDA เวลึเคิลเกิดการเปลี่ยนสีเป็นสีแดงอย่างสมบูรณ์ และเมื่อเพิ่ม อุณหภูมิให้สูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิ 94 องศาเซลเซียส จะพบว่า %CR ของสารละลาย PPCDA เวลึ เคิล ไม่เปลี่ยนแปลงคงที่อยู่ที่ประมาณ 92 เปอร์เซ็นต์ นั่นคือสารละลาย PPCDA เวลึเคิล ก็ยังคง เป็นสีแดงอยู่ แต่เมื่อพิจารณา %CR ของสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลึเคิลกับอนุภาค นาโนของซิงค์ออกไซด์ทั้ง 3 อัตราส่วน จะพบว่าที่อุณหภูมิประมาณ 75 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็น อุณหภูมิที่สารละลาย PPCDA เวลึเคิล เปลี่ยนเป็นสีแดงอย่างสมบูรณ์นั้น (%CR ประมาณ 92 เปอร์เซ็นต์) สารละลายวัสดุเชิงประกอบมีค่า %CR อยู่ที่ 30 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น เมื่อทำการเพิ่ม อุณหภูมิจนถึง 94 องศาเซลเซียส จะพบว่าสารละลายวัสดุเชิงประกอบมีค่า %CR สูงสุด ที่ ประมาณ 73 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแตกต่างจาก %CR สูงสุดของสารละลาย PPCDA เวลึเคิลเกือบ 20% โดยสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลึเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์จะปรากฏเป็นสี ม่วงอมชมพู เมื่อเปรียบเทียบ %CR ของสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลึเคิลกับอนุภาค นาโนของซิงค์ออกไซด์ ที่ปริมาณอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ต่างกัน จะพบว่าสารละลายวัสดุ เชิงประกอบที่มีอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์มากกว่าจะต้องใช้อุณหภูมิต่ำกว่าเล็กน้อยในการทำ ให้เกิดการเปลี่ยนสีในระดับเดียวกัน เช่น ที่ 30%CR สารละลายวัสดุเชิงประกอบที่มีอนุภาคนาโน ของซิงค์ออกไซด์ 17 wt.% จะเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิต่ำกว่าสารละลายวัสดุเชิงประกอบที่มีอนุภาคนา นาโนของซิงค์ออกไซด์ 5 wt.% ประมาณ 3 องศาเซลเซียส จึงอาจกล่าวได้ว่าการเพิ่มอัตราส่วนของ อนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์จะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการยึดเกาะและจัดเรียงตัวของ PCDA มอนอ เมอร์ ส่งผลให้ความหนาของชั้น PPCDA ในวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้นและมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็น ระเบียบมากขึ้นด้วย ดังนั้นสารละลายวัสดุเชิงประกอบที่มีอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ 17 wt.% จึงเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิต่ำกว่าเล็กน้อย

โดยปกติแล้วเมื่อสารได้รับความร้อนมากขึ้น จะค่อยๆ เกิด blue shift ขึ้น นั่นคือ λ_{\max} จะ เคลื่อนไปที่ความยาวคลื่นที่ต่ำลง ดังนั้นจากกราฟในรูปที่ 4.12 (ก) จะพบว่าค่า λ_{\max} ในช่วงแรก ซึ่งเป็นช่วงก่อนที่จะเกิดการเปลี่ยนเฟส มีค่าลดน้อยลงอย่างต่อเนื่อง การเปลี่ยนสีในช่วงนี้จึงค่อยๆ

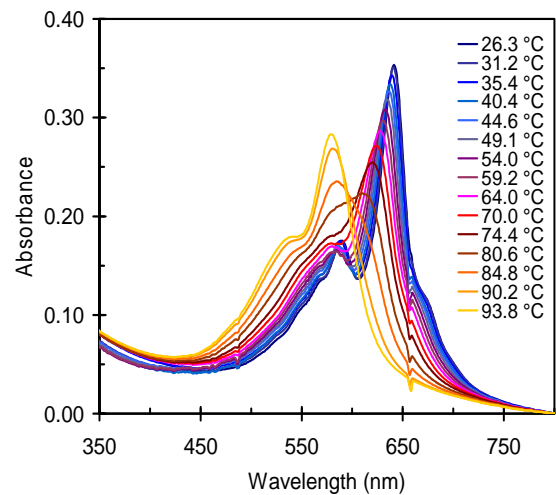
เปลี่ยนแปลงไปอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของโซ่ข้างที่เพิ่มขึ้นเมื่อได้รับอุณหภูมิที่สูงขึ้น ส่งผลให้ออร์บิทัลไพบางส่วนเกิดการบิดออกนอกระนาบ ทำให้ความเป็นระนาบของออร์บิทัลไพ น้อยลงอย่างเป็นระบบ ระยะคอนจูเกตจึงลดลง เมื่อเปรียบเทียบความชันของกราฟในช่วงแรกนี้ ของสารละลาย PPCDA เวลีเคิล กับสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ จะพบว่าสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ทั้ง 3 อัตราส่วน มีความชันน้อยกว่า คือ λ_{max} ลดลงด้วยอัตราที่ต่ำกว่าของสารละลาย PPCDA เวลีเคิล เช่นเดียวกับความชันของกราฟ %CR (รูปที่ 4.12 (ข)) ในช่วงอุณหภูมิเดียวกัน ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยลักษณะพื้นผิวของซิงค์ออกไซด์ในน้ำ และอันตรกิริยาของ PCDA กับพื้นผิวอนุภาคซิงค์ออกไซด์ โดยปกติแล้วพื้นผิวของอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ในน้ำจะประกอบด้วยหมู่ $Zn-OH$ $Zn-OH_2^+$ และ $Zn-O^-$ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 โดยอัตราส่วนของหมู่เหล่านี้ขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของสารละลาย ถ้าค่าพีเอชน้อยกว่า 7 พื้นผิวของซิงค์ออกไซด์จะมีหมู่ $Zn-OH$ และ $Zn-OH_2^+$ อยู่เป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้สารตั้งต้นคือ PCDA มอนอเมอร์ ซึ่งมีความเป็นกรดอ่อนอยู่ ดังนั้นเมื่อเตรียมสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ จะทำให้มีหมู่ $Zn-OH$ และ $Zn-OH_2^+$ อยู่พื้นผิวของซิงค์ออกไซด์เป็นส่วนใหญ่ ส่งผลให้ PCDA มอนอเมอร์ซึ่งมีหมู่คาร์บอกซิลอยู่ที่ head groups สามารถยึดเกาะบนพื้นผิวของอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ได้ด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าและพันธะไฮโดรเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.14 เนื่องจากในวัสดุเชิงประกอบมีซิงค์ออกไซด์ทำหน้าที่เป็นซับสเตรต PPCDA จึงสามารถยึดเกาะและต่อเป็นชั้นๆ ขึ้นไปอย่างเป็นระเบียบ ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ซึ่งจากภาพ TEM (รูปที่ 4.7 (ค)) จะพบชั้นของ PPCDA ในวัสดุเชิงประกอบประมาณ 6 ชั้น PPCDA ในวัสดุเชิงประกอบเมื่อเปรียบเทียบกับ PPCDA ในน้ำแล้วจึงมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบมากขึ้น โซ่ข้างเกิดการเคลื่อนที่ได้มากขึ้น ทำให้เกิดการบิดของออร์บิทัลไพที่สายโซ่หลักที่มีโครงสร้างเป็นแบบคอนจูเกต น้อยกว่า ดังนั้นสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ จึงเกิดการเปลี่ยนสีได้ยากกว่าสารละลาย PPCDA เวลีเคิล

นอกจากนี้ในการทดสอบการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับการกระตุ้นจากอุณหภูมิยังพบกระบวนการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้เกิดขึ้นในสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ด้วย โดยเมื่อมีการให้ความร้อนขึ้นไปจนถึงอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสแล้วปล่อยให้เย็นตัวกลับลงมาจะพบว่าสีของสารละลายวัสดุเชิงประกอบค่อยๆ เกิดการเปลี่ยนสีกลับจากสีม่วงอมชมพูเป็นสีฟ้าเมื่อเย็นตัวลงถึงอุณหภูมิห้อง จากการวัดค่าการดูดกลืนแสงขณะที่อุณหภูมิลดต่ำลงมาแล้วคำนวณเป็น %CR จะพบว่า %CR ของสารละลายวัสดุเชิง

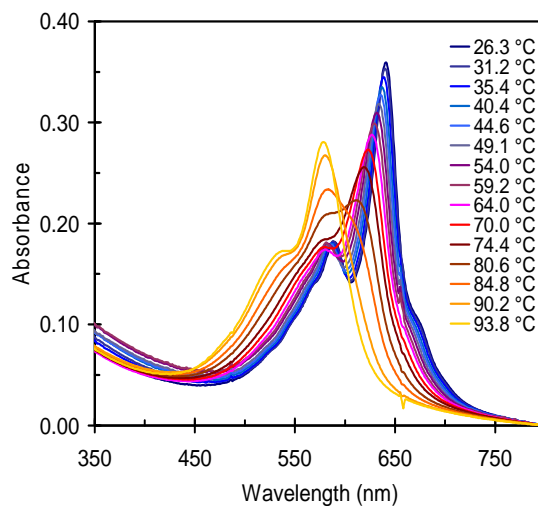
ประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ 5.9 และ 17 wt.% เมื่อเย็นตัวลงมาเกือบจะซ้อนทับเป็นเส้นเดียวกันกับเมื่อให้ความร้อนขึ้นไป ดังแสดงในรูปที่ 4.16 (ข) (ค) และ (ง) ตามลำดับ ในขณะที่ % CR ของสารละลาย PPCDA เวสิเคิล เมื่อเย็นตัวลงมามีค่าเป็น 0 ดังแสดงในรูปที่ 4.16 (ก) ซึ่งแสดงว่าสารละลาย PPCDA เวสิเคิลไม่มีการเปลี่ยนสีเกิดขึ้น นั่นคือมีกระบวนการเปลี่ยนสีแบบผันกลับไม่ได้นั่นเอง



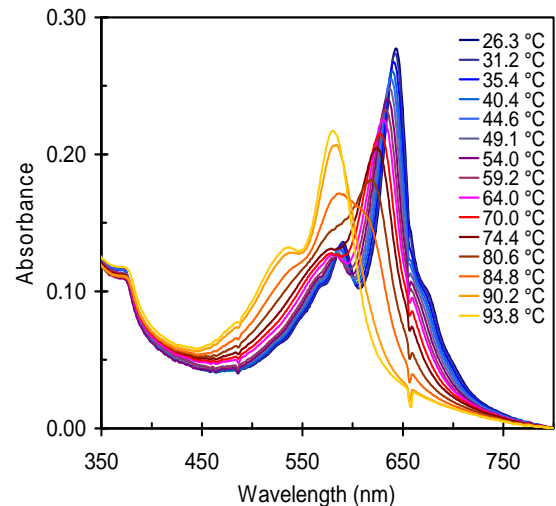
(ก)



(ข)

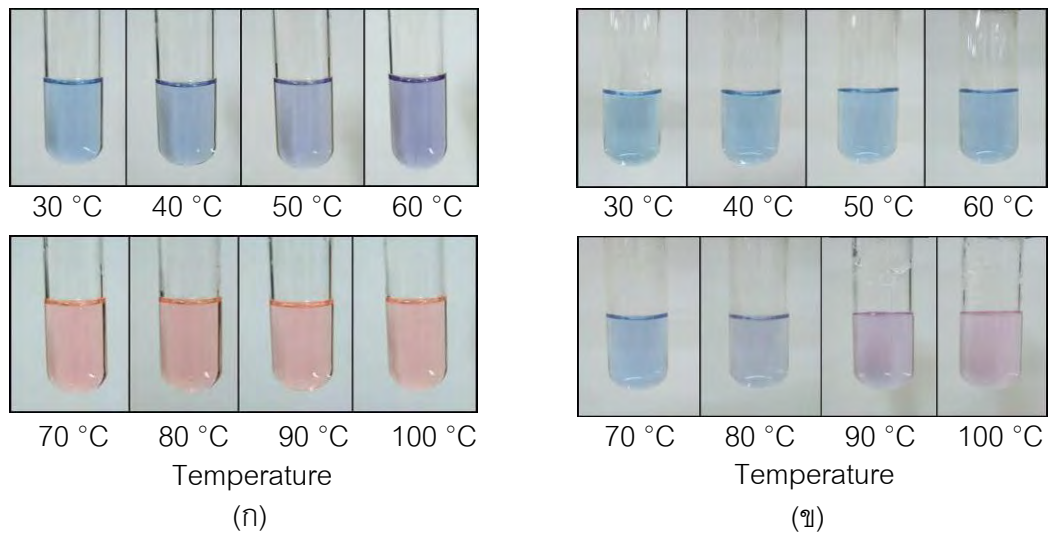


(ค)

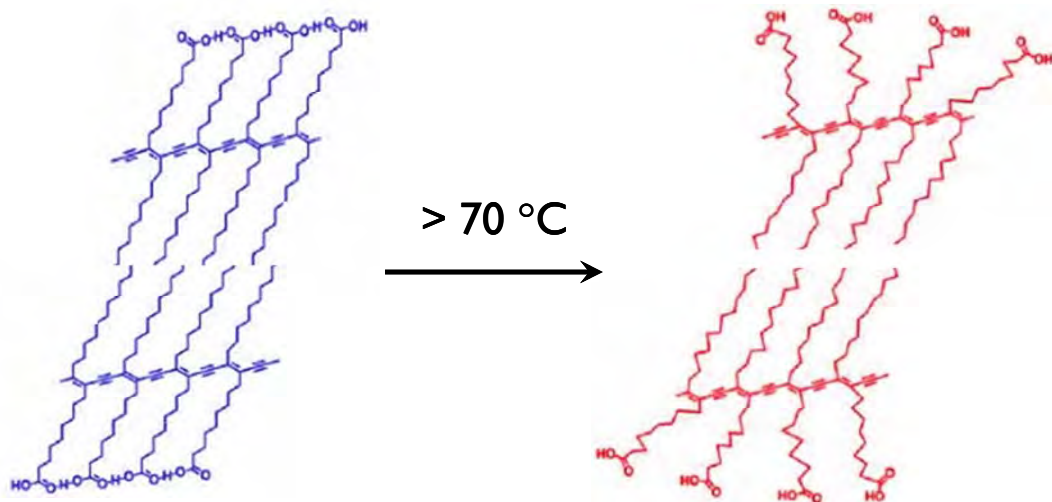


(ง)

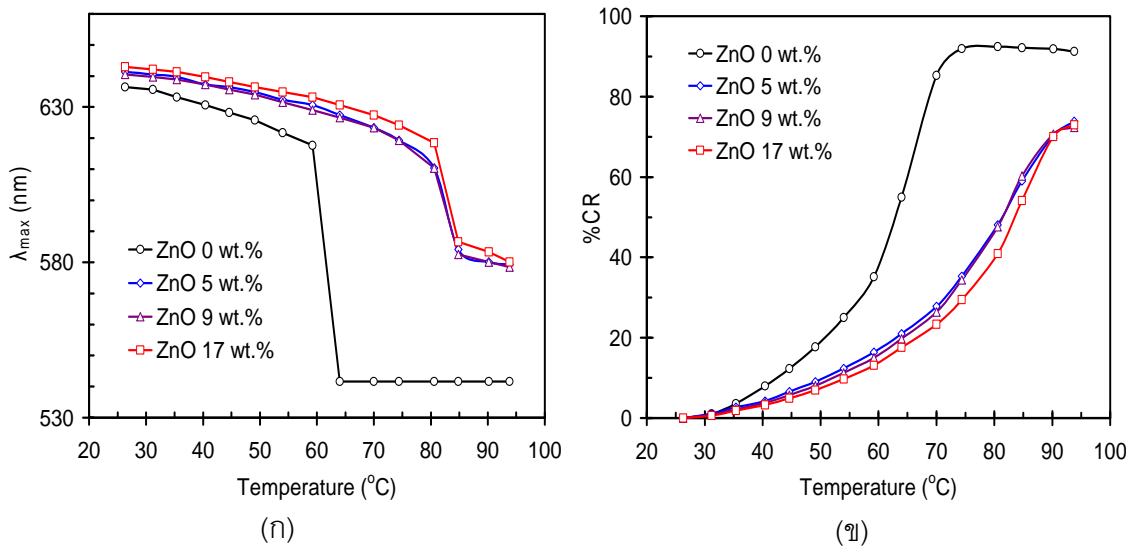
รูปที่ 4.9 สเปกตรากการดูดกลืนแสงเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 100 °C ของ (ก) สารละลาย PPCDA เวสิเคิล และ (ข) – (ง) สารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ที่ปริมาณซิงค์ออกไซด์ ที่ปริมาณซิงค์ออกไซด์ 5.9 และ 17 wt.% ตามลำดับ



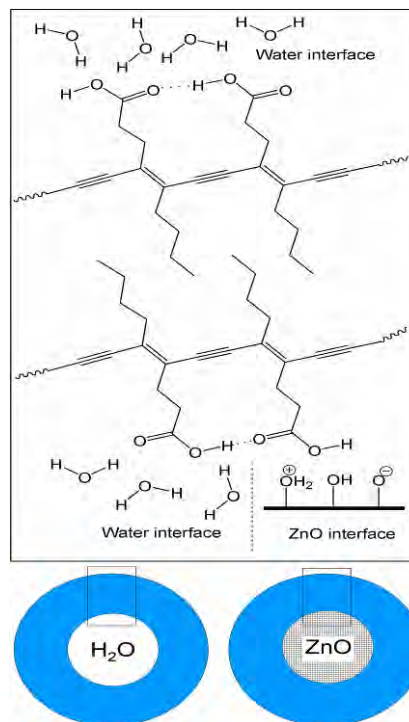
รูปที่ 4.10 การเปลี่ยนสีเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 100 °C ของ
 (ก) สารละลาย PPCDA เวลีเคิล และ (ข) สารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิล
 กับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์



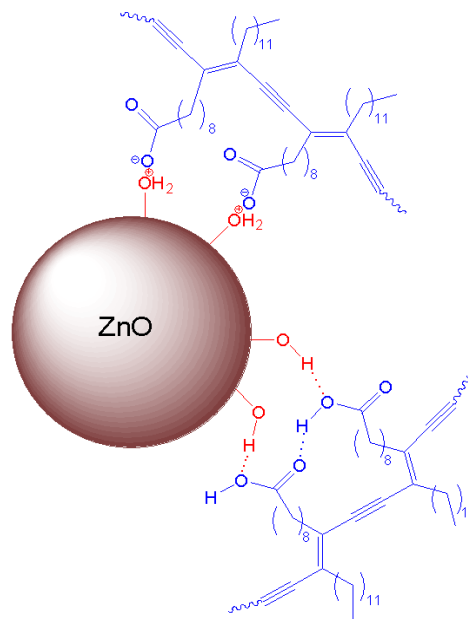
รูปที่ 4.11 กลไกการเปลี่ยนสีของสารละลาย PPCDA เวลีเคิลแบบผันกลับไม่ได้ เมื่อได้รับการ
 รบกวนจากความร้อน⁽¹⁰⁾



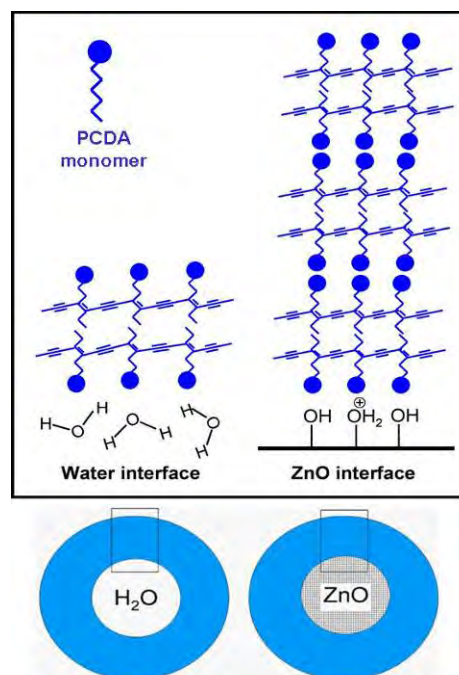
รูปที่ 4.12 (ก) ค่าความยาวคลื่น ณ ตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) และ (ข) เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสี (%CR) ของสารละลาย PPCDA เวสเคิล (ZnO 0 wt.%) และสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ที่ปริมาณซิงค์ออกไซด์ 5, 9 และ 17 wt.% เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 100 °C



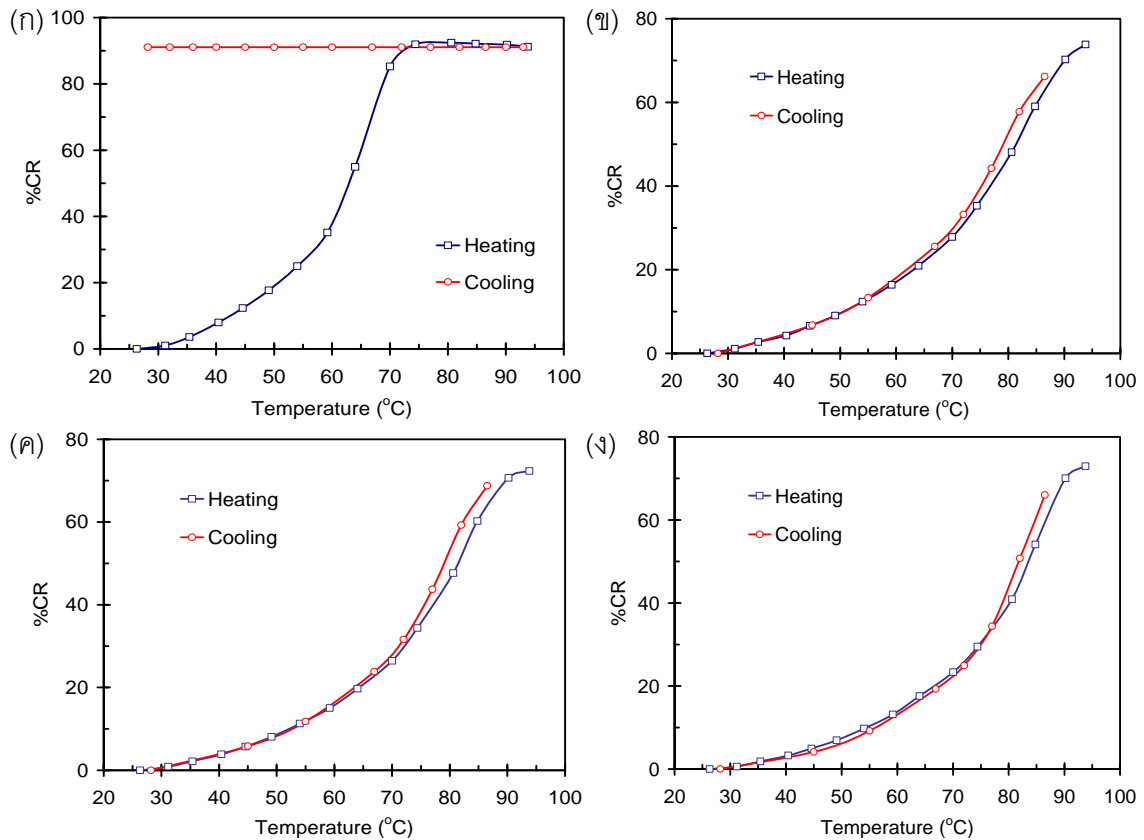
รูปที่ 4.13 โครงสร้างและลักษณะพื้นผิวของ PPCDA เวสเคิล และวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ในน้ำ⁽⁵⁰⁾



รูปที่ 4.14 อันตรกิริยาของ PPCDA บนผิวของอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์⁽⁵⁰⁾



รูปที่ 4.15 ลักษณะการจัดเรียงตัวของ PPCDA ในน้ำ และในวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคลือบ
กับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์



รูปที่ 4.16 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสี เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องถึง 100 °C และเมื่อเย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้องของ (ก) สารละลาย PPCDA เวสิเคิล และ (ข) – (ง) สารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ 59 และ 17 wt.% ตามลำดับ

4.3.2. การตอบสนองต่ออุณหภูมิของฟิล์ม PPCDA เวสิเคิล และฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์

เนื่องจากการนำ PPCDA เวสิเคิล และวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ในรูปของสารละลายไปใช้งานมีข้อจำกัดมากมาย อาทิ อายุการใช้งาน และความเสถียรในการเปลี่ยนสี เนื่องจากเกิดการตกตะกอนของอนุภาคในสารละลาย นอกจากนี้อุณหภูมิสูงสุดที่สามารถวัดการตอบสนองต่ออุณหภูมิได้คือ 100 องศาเซลเซียสเท่านั้น เนื่องจากตัวทำละลายที่ใช้คือน้ำจัดไอออนแล้ว แต่จากผลการศึกษากการตอบสนองต่ออุณหภูมิของสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ พบว่าสารละลายวัสดุเชิงประกอบนี้มีแนวโน้มที่สามารถเกิดการเปลี่ยนสีต่อไปได้อีกถ้าเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่า 94 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงมีการเตรียมฟิล์ม PPCDA เวสิเคิล และฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ที่ปริมาณซิงค์ออกไซด์เป็น 59 และ 17 wt.% ขึ้น โดยใช้พอลิโ

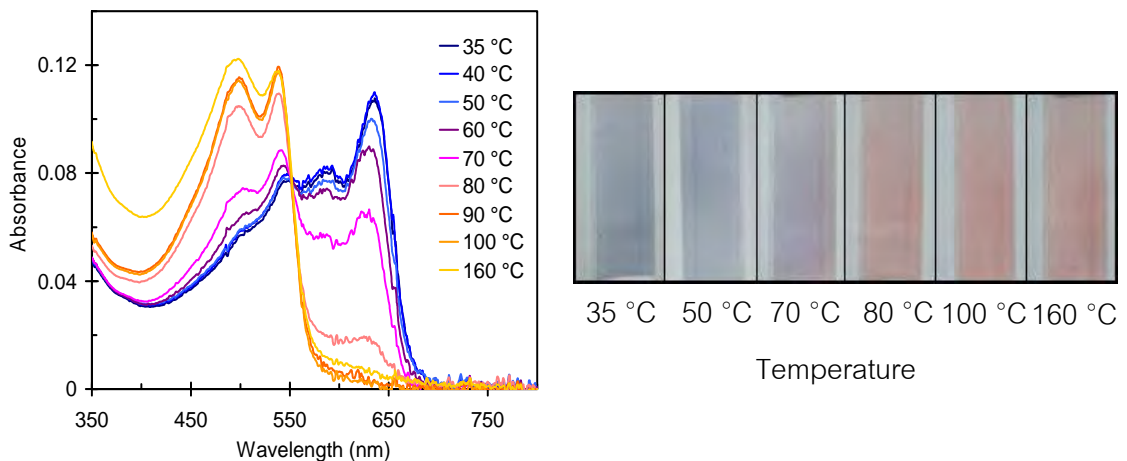
นิลแอลกอฮอล์ (PVA) เป็นเมทริกซ์ ทำให้สามารถศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนสีได้ที่อุณหภูมิสูงขึ้น โดยทำการอบฟิล์มในช่วงอุณหภูมิ 35 ถึง 160 องศาเซลเซียส โดยทิ้งไว้ที่อุณหภูมิที่ต้องการศึกษาเป็นเวลา 5 นาที และทำการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของฟิล์มที่อุณหภูมิห้อง ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.17 และ 4.18 จากการทดลองพบว่าฟิล์ม PPCDA เวลิกเซล มีพฤติกรรมการเปลี่ยนสีแบบผันกลับไม่ได้ ซึ่งคล้ายคลึงกับพฤติกรรมของสารละลาย PPCDA เวลิกเซล เป็นอย่างมาก ดังแสดงในรูปที่ 4.17 โดยที่อุณหภูมิห้อง ฟิล์ม PPCDA เวลิกเซล ปรากฏเป็นสีน้ำเงิน และตำแหน่งการดูดกลืนแสงสูงสุดของสเปกตรากการดูดกลืนแสงอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตร เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้น ความเข้มของการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นในช่วงนี้จะลดลง ในขณะที่ความเข้มของการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 490 ถึง 540 นาโนเมตร ซึ่งเป็นความยาวคลื่นของเฟสสีแดงจะเพิ่มขึ้น จนกระทั่งเมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 70 องศาเซลเซียส สเปกตรากการดูดกลืนแสงจะมีความแตกต่างอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับอุณหภูมิเริ่มต้น โดยจะพบว่าค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดเคลื่อนจากที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตร ไปอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตร และเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าจะเห็นฟิล์ม PPCDA เวลิกเซล มีสีม่วงชมพู เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงกว่า 70 องศาเซลเซียส จะพบว่าความเข้มของการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงินจะลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ความเข้มของการดูดกลืนแสงของเฟสสีแดงเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเช่นกัน ซึ่งในช่วงอุณหภูมินี้ฟิล์มปรากฏเป็นสีแดง นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์ม PPCDA เวลิกเซล เกิดการเปลี่ยนเฟสจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิประมาณ 90 องศาเซลเซียส โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีสูงถึง 96 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.19 ซึ่งอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสอย่างสมบูรณ์ในฟิล์มนี้มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสอย่างสมบูรณ์ในสารละลาย PPCDA เวลิกเซลประมาณ 15 องศาเซลเซียส ซึ่งอาจเกิดจากการเคลื่อนที่ที่ช้าลงของโมเลกุลเมื่ออยู่ในสถานะของแข็ง นอกจากนี้ อาจเกิดจากผลของพันธะไฮโดรเจนที่ยึดระหว่างหมู่คาร์บอกซิลที่ head groups ของ PPCDA กับหมู่ไฮดรอกซิลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ดังนั้นจึงต้องใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นเล็กน้อยเพื่อให้เกิดการทำลายพันธะไฮโดรเจนในฟิล์มและเกิดการเปลี่ยนสีขึ้น

รูปที่ 4.18 แสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนสีของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลิกเซลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ที่ปริมาณซิงค์ออกไซด์เป็น 5.9 และ 17 wt.% จากการทดลองพบว่าฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลิกเซลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์แสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนสี 2 ระดับ โดยระดับแรกแสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้ในช่วงอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิประมาณ 140 องศาเซลเซียส จากนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะเกิดพฤติกรรมการเปลี่ยนสี

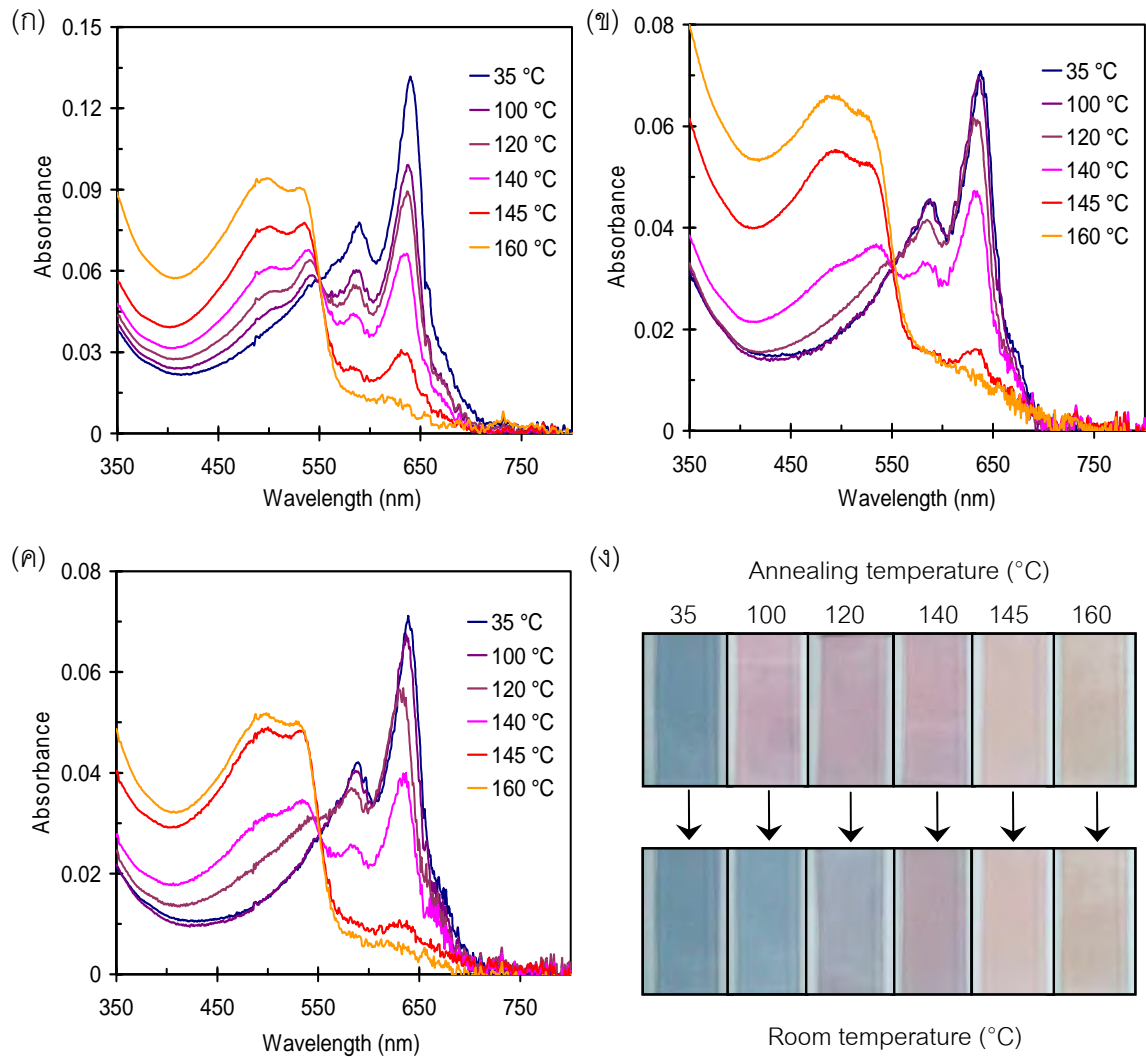
แบบผันกลับไม่ได้ เมื่อทำการอบฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบจะเปลี่ยนเป็นสีม่วงอมชมพู ดังแสดงในรูปที่ 4.18 (ง) ซึ่งคล้ายกับสีของสารละลายวัสดุเชิงประกอบเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 90 องศาเซลเซียส แต่เมื่อฟิล์มวัสดุเชิงประกอบเย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้องฟิล์มจะเปลี่ยนสีกลับไปเป็นสีฟ้า เมื่อพิจารณาสเปกตรารการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ ที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 5 wt.% ในรูปที่ 4.18 (ก) จะพบว่าที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส มียอดการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 490 ถึง 540 นาโนเมตร ปรากฏอยู่ร่วมกับเฟสสีน้ำเงิน แสดงถึงการเปลี่ยนสีแบบผันกลับไม่สมบูรณ์ ซึ่งไม่สามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่า สำหรับสเปกตรารการดูดกลืนแสงที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์เป็น 9 และ 17 wt.% (รูปที่ 4.18 (ข) และ (ค) ตามลำดับ) พบว่า เกือบจะซ้อนทับกับสเปกตรารการดูดกลืนแสงที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ซึ่งเมื่อทำการคำนวณเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีจะพบว่าที่อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 5 wt.% มีการเปลี่ยนสี 12 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 9 และ 17 wt.% มีการเปลี่ยนสีเพียง 2 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.19 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบฟิล์มให้อยู่ในช่วงอุณหภูมิมากกว่า 100 องศาเซลเซียสจนถึง 140 องศาเซลเซียส จะพบว่าฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ 5 9 และ 17 wt.% ยังคงปรากฏสีม่วงอมชมพู และเกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้เมื่อฟิล์มเย็นตัวลงถึงอุณหภูมิห้อง ซึ่งเมื่อพิจารณาจากสเปกตรารการดูดกลืนแสงจะพบว่าความเข้มของการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงินลดลง ในขณะที่เดียวกันความเข้มของการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นในช่วง 490 ถึง 540 นาโนเมตรจะเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่า 140 องศาเซลเซียส จะพบว่าสเปกตรารการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยความเข้มของการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงินลดต่ำลงอย่างมาก ในขณะที่ความเข้มของการดูดกลืนแสงของเฟสสีแดงกลับเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก ซึ่งเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าจะพบว่าฟิล์มวัสดุเชิงประกอบปรากฏเป็นสีแดงอมส้ม และเมื่อฟิล์มเย็นตัวลงถึงอุณหภูมิห้องก็ยังคงปรากฏเป็นสีแดงอมส้ม แสดงถึงพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีแบบผันกลับไม่ได้ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่อุณหภูมิสูงกว่า 140 องศาเซลเซียส

จากการศึกษาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสี ดังรูปที่ 4.19 จะพบว่า ค่า %CR ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ 5 wt.% เกือบจะเป็นศูนย์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 90 องศาเซลเซียส และค่า %CR ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ 9 และ 17 wt.% เกือบจะเป็นศูนย์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส แสดง

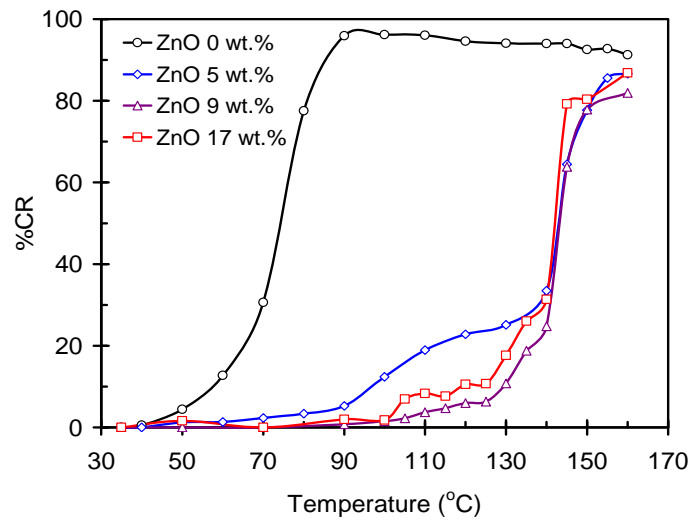
ให้เห็นถึงการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งอธิบายได้ว่าความร้อนในช่วงอุณหภูมินี้ทำให้โครงสร้างของโซ่ข้างเกิดการเปลี่ยนแปลง ในลักษณะการเคลื่อนที่ของโซ่ข้างหรือเปลี่ยนแปลงทิศทางการจัดเรียงตัว ส่งผลให้ออร์บิทัลไพบางส่วนบิดตัว เกิดการรบกวนความเป็นระนาบของสายโซ่หลักที่มีโครงสร้างเป็นแบบคอนจูเกต ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีขึ้น แต่เนื่องจากยังไม่เกิดการแตกออกของพันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่าง head groups จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้เมื่อฟิล์มวัสดุเชิงประกอบเย็นตัวลงถึงอุณหภูมิห้อง ดังแสดงในรูปที่ 4.20 และเมื่อนำฟิล์มเข้าอบที่อุณหภูมิสูงขึ้นจนถึง 140 องศาเซลเซียส ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ยังคงเกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้แต่ไม่สมบูรณ์ โดยจะเกิดการผันกลับแบบไม่สมบูรณ์มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิการอบฟิล์มสูงขึ้น และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการอบฟิล์มวัสดุเชิงประกอบให้สูงขึ้นเป็น 145 องศาเซลเซียส พันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่าง head groups เกิดการแตกออก (รูปที่ 4.20) จึงไปทำลายความเป็นระเบียบของโซ่ข้างและสายโซ่หลัก ทำให้เอนโทรปีเพิ่มขึ้นอย่างมาก จึงเริ่มเกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับไม่ได้ ดังแสดงให้เห็นว่าค่า %CR เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมากที่อุณหภูมิ 145 องศาเซลเซียส และจะเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดย %CR มีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสอย่างสมบูรณ์ของฟิล์ม PPCDA เวลีเคิล ถึงประมาณ 70 องศาเซลเซียส



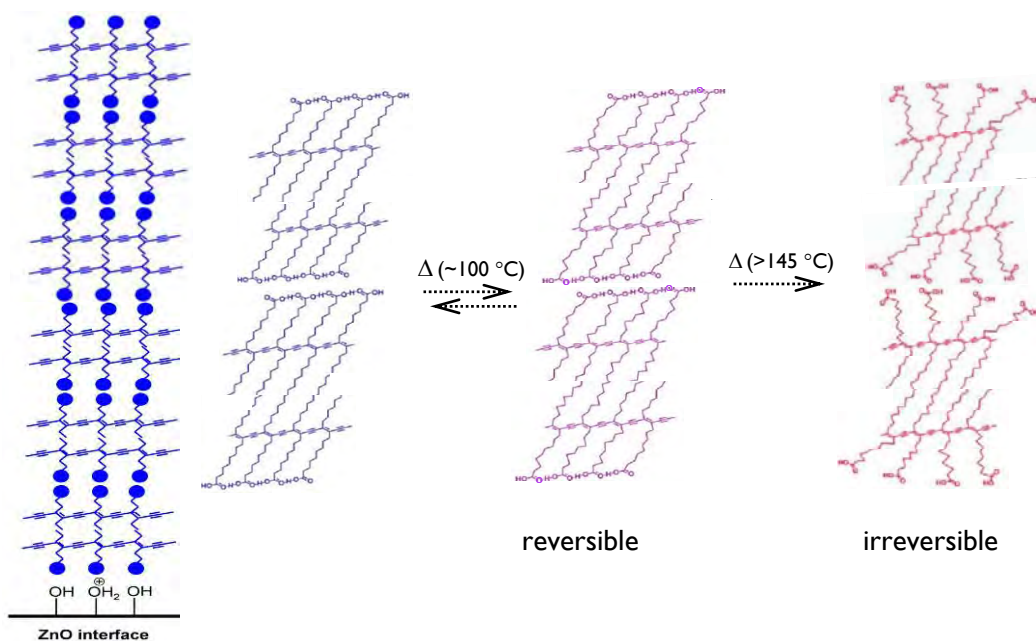
รูปที่ 4.17 สเปกตรากการดูดกลืนแสงและสีของฟิล์ม PPCDA เวลีเคิลในเมทริกซ์ของ PVA ที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ทำการอบฟิล์ม



รูปที่ 4.18 (ก) – (ค) สเปกตรากการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ในเมทริกซ์ของ PVA ที่ปริมาณซิงค์ออกไซด์ 5 9 และ 17 wt.% ตามลำดับ (ง) สีของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ทำการอบฟิล์ม และเมื่อฟิล์มเย็นตัวลงถึงอุณหภูมิห้อง



รูปที่ 4.19 เปรอเซ็นต์การเปลี่ยนสีของฟิล์ม PPCDA เวสเคิล (ZnO 0 wt.%) และฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ที่ปริมาณซิงค์ออกไซด์ 5 9 และ 17 wt.% เมื่อผ่านการให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 160 °C



รูปที่ 4.20 กลไกการเปลี่ยนสีของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ เมื่อได้รับการรบกวนจากความร้อน

4.3.3. การตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบส

จากการศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีด้วยตาเปล่าและวิเคราะห์สมบัติการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค UV-VIS Spectrophotometry ของสารละลาย PPCDA เกล็ดเคลือบและสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เกล็ดเคลือบอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์เป็น 5 9 และ 17 wt.% เมื่อได้รับการกระตุ้นโดยการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไปเพื่อปรับค่าความเป็นเบส พบว่าพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของสารละลาย PPCDA เกล็ดเคลือบ และสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เกล็ดเคลือบอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์เป็นกระบวนการผันกลับไม่ได้ เมื่อทำการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไปโดยสารละลาย PPCDA เกล็ดเคลือบ ที่มีค่าพีเอชเริ่มต้น 6.35 ซึ่งมีความเป็นกรดอ่อนๆ จนค่าพีเอชของสารละลาย PPCDA เกล็ดเคลือบเปลี่ยนเป็น 7 สีของสารละลาย PPCDA เกล็ดเคลือบจะเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีน้ำเงินอมม่วง และเมื่อวิเคราะห์สเปกตรากการดูดกลืนแสง ดังแสดงในรูปที่ 4.21 (ก) จะพบว่ายอดการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตรลดลง และมียอดการดูดกลืนแสงเล็กๆ ที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตรปรากฏขึ้นมา และเมื่อปรับค่าพีเอชให้สูงขึ้นจนถึง 8 จะพบว่าสเปกตรากการดูดกลืนแสงเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก โดยความเข้มของการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 640 นาโนเมตรลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่เดียวกันแถบการดูดกลืนแสงสูงสุดจะเลื่อนไปอยู่ที่ความยาวคลื่น 537 นาโนเมตร และสีของสารละลาย PPCDA เกล็ดเคลือบปรากฏเป็นสีแดง และเมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีจากเฟสสีน้ำเงินเป็นสีแดง ในรูปที่ 4.22 (ก) จะพบว่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงพีเอช 7 ถึง 8 โดยเพิ่มขึ้นประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อปรับค่าพีเอชให้สูงขึ้นต่อไปอีก จะพบว่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและเพิ่มขึ้นสูงสุดถึงประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์ที่พีเอช 12

สำหรับสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เกล็ดเคลือบอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ มีค่าพีเอชเริ่มต้นสูงกว่าสารละลาย PPCDA เกล็ดเคลือบเล็กน้อย โดยค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เกล็ดเคลือบอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 5 9 และ 17 wt.% มีค่าเท่ากับ 6.70 6.44 และ 7.08 ตามลำดับ เมื่อปรับค่าพีเอชให้เพิ่มขึ้นจนถึงพีเอช 12 ซึ่งเป็นค่าพีเอชที่สารละลาย PPCDA เกล็ดเคลือบมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีจากสีฟ้าเป็นสีแดงสูงสุด พบว่าสีของสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เกล็ดเคลือบอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ทั้ง 3 อัตราส่วน ยังคงปรากฏเป็นสีฟ้าเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า แต่เมื่อพิจารณาสเปกตรากการดูดกลืนแสงในรูปที่ 4.21 (ข) (ค) และ (ง) จะพบว่าค่าการดูดกลืนแสงของเฟสสีฟ้าลดลง เมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มค่าพีเอชของสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เกล็ดเคลือบอนุภาคนาโนของ

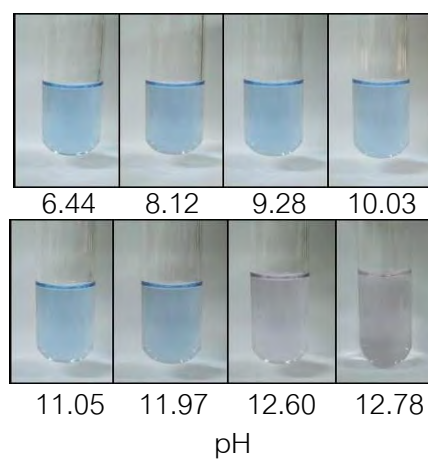
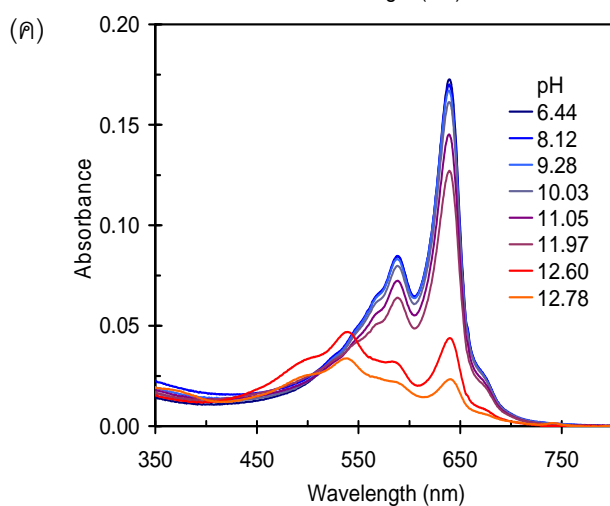
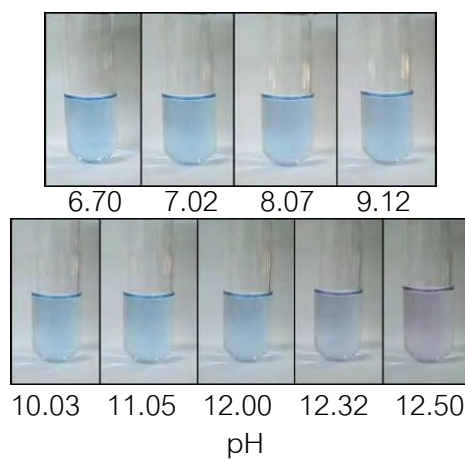
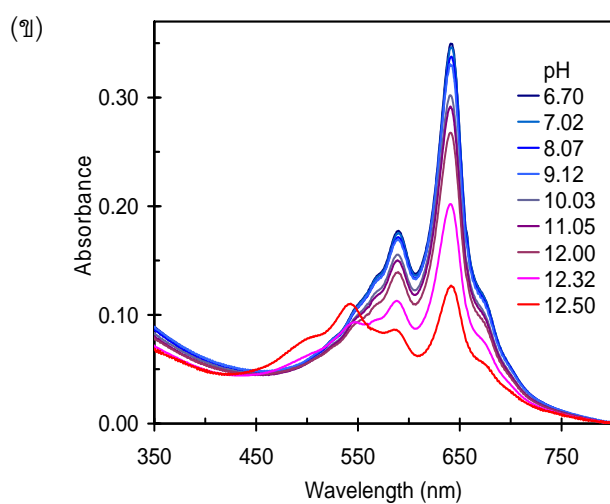
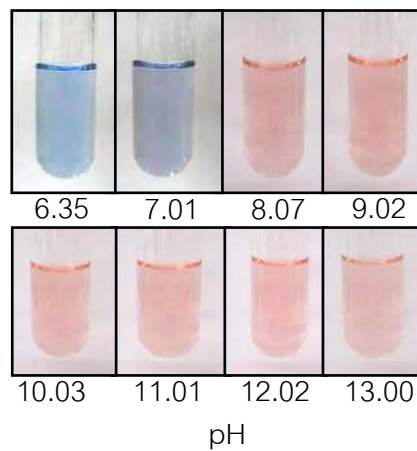
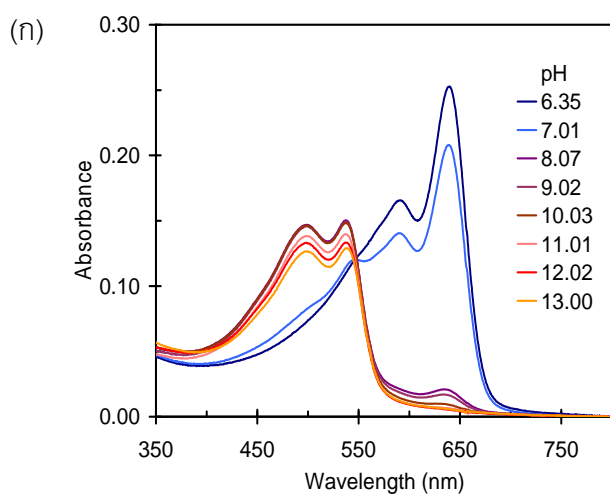
ซิงค์ออกไซด์ ที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 5 9 และ 17 wt.% ไปจนถึงค่า 12.50 12.60 และ 12.70 ตามลำดับ จะพบการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรากการดูดกลืนแสงเกิดขึ้นอย่างชัดเจน โดยจะพบว่ายอดการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 640 นาโนเมตรลดต่ำลงมามาก และมียอดการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตรปรากฏขึ้นมา โดยมีความสูงของยอดใกล้เคียงกับความสูงของยอดการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตร ซึ่งเมื่อสังเกตด้วยตาจะเห็นว่าสารละลายมีสีม่วง และเมื่อพิจารณากราฟเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีในรูปที่ 4.22 (ก) จะพบว่าที่ค่าพีเอชดังกล่าว สารละลายวัสดุเชิงประกอบมีการเปลี่ยนสีอยู่ที่ประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแตกต่างจากค่าการเปลี่ยนสีสูงสุดของสารละลาย PPCDA เวลีเคิลประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบค่าพีเอชที่ทำให้สารละลายเริ่มเกิดการเปลี่ยนสีในรูปที่ 4.22 (ก) จะพบว่าสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์เริ่มเกิดการเปลี่ยนสีที่ค่าพีเอช 12 ขึ้นไป ในขณะที่สารละลาย PPCDA เวลีเคิล เริ่มเปลี่ยนสีอย่างชัดเจนที่ค่าพีเอช 7 ขึ้นไป

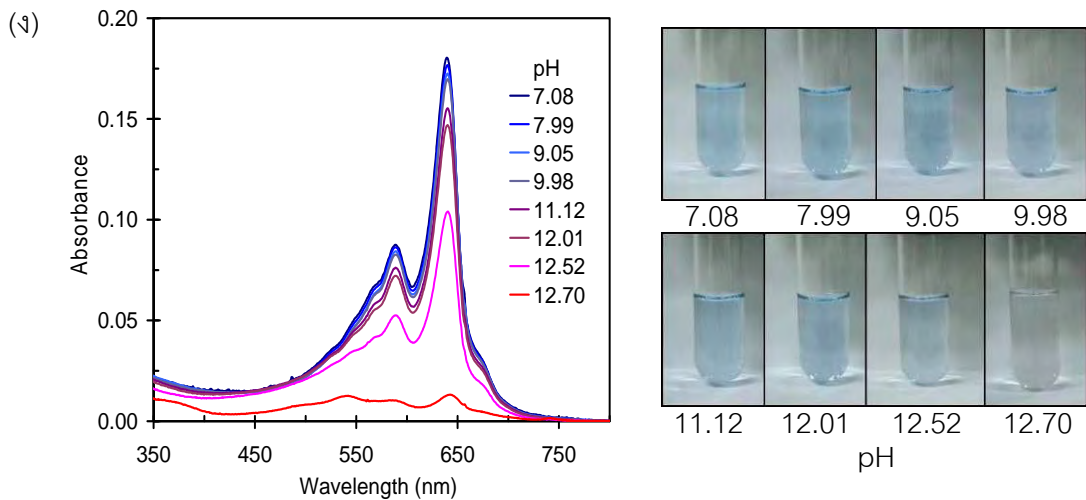
เมื่อเปรียบเทียบสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่างกัน จะพบว่าสารละลายวัสดุเชิงประกอบที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 17 wt.% จะเกิดการเปลี่ยนสีช้ากว่าสารละลายวัสดุเชิงประกอบที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 5 และ 9 wt.% เล็กน้อย (รูปที่ 4.22 (ก)) โดยเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของสารละลายวัสดุเชิงประกอบที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 5 และ 9 wt.% อยู่ที่ประมาณ 34 เปอร์เซ็นต์ที่พีเอช 12.5 ในขณะที่สารละลายวัสดุเชิงประกอบที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 17 wt.% มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีแค่เพียง 5 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น หรือเมื่อพิจารณาที่เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีที่เท่ากัน เช่นที่ 20%CR จะต้องปรับค่าพีเอชของสารละลายวัสดุเชิงประกอบที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 17 wt.% ให้มีค่าพีเอชประมาณ 12.6 ในขณะที่ปรับค่าพีเอชของสารละลายวัสดุเชิงประกอบที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 5 และ 9 wt.% ให้มีค่าประมาณ 12.2 ก็เกิดการเปลี่ยนสีที่ระดับเดียวกันแล้ว

เมื่อพิจารณาค่าความยาวคลื่น ณ ตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) ที่ค่าพีเอชต่างๆ ที่ทำการทดสอบในรูปที่ 4.22 (ข) จะพบว่าค่า λ_{max} ของสารละลาย PPCDA เวลีเคิล จะย้ายตำแหน่งอย่างรวดเร็วจากความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร มาอยู่ที่ความยาวคลื่น 537 นาโนเมตร เมื่อปรับค่าพีเอชจาก 7 เป็น 8 หลังจากนั้นเมื่อปรับค่าพีเอชให้สูงขึ้น ค่า λ_{max} จะมีค่าคงที่ เมื่อพิจารณาค่า λ_{max} ของสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์จะพบว่าค่า λ_{max} คงที่อยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตร ที่ทุกค่าพีเอชที่ทำการทดสอบ ยกเว้นสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ 9

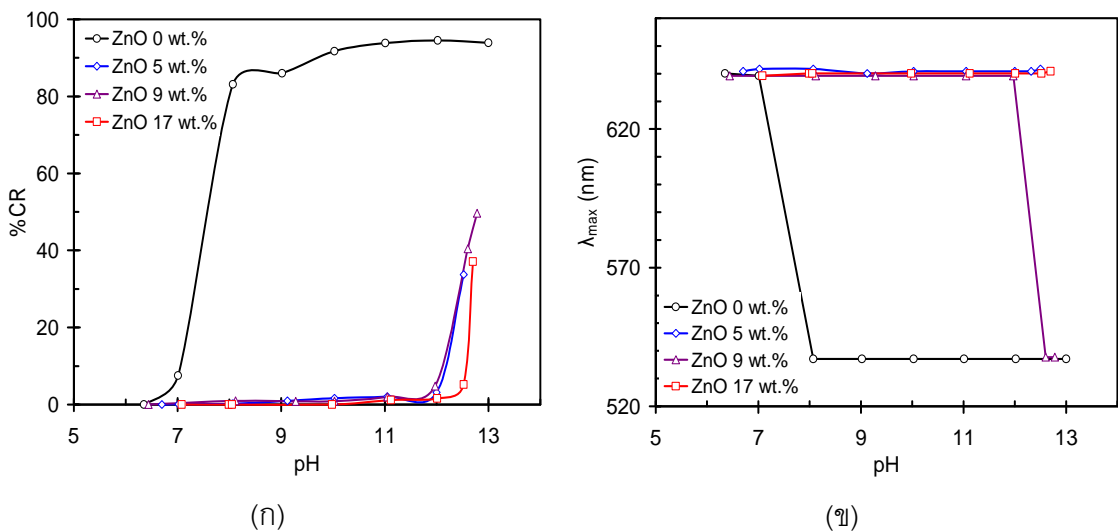
wt.% ที่พบว่าเมื่อปรับค่าพีเอชให้ถึง 12.6 ตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนสูงสุดจะเลื่อนมาอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 538 นาโนเมตร และเมื่อปรับค่าให้เพิ่มขึ้นถึงค่าสูงสุดที่สามารถปรับได้คือ 12.78 พบว่าตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนสูงสุดยังคงอยู่ตำแหน่งเดิม ซึ่งสาเหตุที่ไม่พบพฤติกรรมดังกล่าวนี้ในสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ 5 และ 17 wt.% นั้น อาจเนื่องมาจากค่าพีเอชสูงสุดที่สามารถปรับได้คือ 12.50 และ 12.70 ตามลำดับ ซึ่งอาจยังไม่ถึงจุดที่จะเกิดการเปลี่ยนตำแหน่งของค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดแม้ว่าจะเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงถึง 10 โมลาร์ลงไปแล้วก็ตาม นอกจากนี้ข้อจำกัดของอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจวัดค่าพีเอชอาจมีผลด้วย อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากกราฟการดูดกลืนแสงพบว่าแนวโน้มที่จะเกิดการเปลี่ยนตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนสูงสุดมาอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 538 นาโนเมตรได้ ที่พีเอชสูงขึ้น

กลไกในการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับการรบกวนจากความเป็นกรด-เบสเกิดจากไฮดรอกไซด์ไฮดรอกไซด์ (OH⁻) ไปดึงโปรตอนจากหมู่คาร์บอกซิลที่ head groups ของ PPCDA ส่งผลให้พันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่าง head groups ของ PPCDA เกิดการแตกออก และเกิดแรงผลักระหว่างคาร์บอกซิเลตไฮดรอกไซด์ (-COO⁻) ที่อยู่ติดกันอีกด้วย จึงทำให้เกิดความไม่เป็นระเบียบของโซ่ข้าง ส่งผลให้การจัดเรียงตัวอย่างเป็นระนาบของสายโซ่หลักที่มีโครงสร้างเป็นแบบคอนจูเกตลดน้อยลง และทำให้ระยะคอนจูเกตของสายโซ่หลักลดลง ส่งผลต่อสถานะของอิเล็กทรอนิกส์และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของโมเลกุลไปยังความยาวคลื่นที่สั้นกว่า ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีของสารขึ้น โดยสารละลาย PPCDA เวลีเคิลจะเปลี่ยนเป็นสีแดง เมื่อเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จนถึงค่าพีเอช 8 ดังแสดงในรูปที่ 4.23 (ก) และสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์จะเปลี่ยนสีที่พีเอชมากกว่า 12.5 ซึ่งการเปลี่ยนสีที่พีเอชสูงกว่าของสารละลายวัสดุเชิงประกอบอาจเป็นผลจากการจัดเรียงตัวของ PPCDA บนผิวของซิงค์ออกไซด์อย่างเป็นระเบียบและมีการเรียงซ้อนกันเป็นชั้นๆ โดยโซเดียมไฮดรอกไซด์จะเข้าไปทำปฏิกิริยาที่ชั้นด้านนอกก่อน ทำให้ชั้นของ PPCDA ที่อยู่ด้านนอกสุดจะได้รับแรงกระทำจากโซเดียมไฮดรอกไซด์มากที่สุด และระดับแรงกระทำที่ได้รับจะลดลงตามลำดับชั้นของ PPCDA ที่อยู่ถัดเข้ามาด้านในทำให้การเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบไล่จากชั้นด้านนอกมาด้านในเป็นลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.23 (ข) ลักษณะโครงสร้างแบบเป็นชั้นๆ นี้ส่งผลให้ต้องใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนสีในวัสดุเชิงประกอบมากกว่าในสารละลาย PPCDA เวลีเคิล จึงต้องทำการปรับพีเอชของสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ให้สูงกว่าสารละลาย PPCDA เวลีเคิลอย่างมากจึงจะเกิดการเปลี่ยนสี

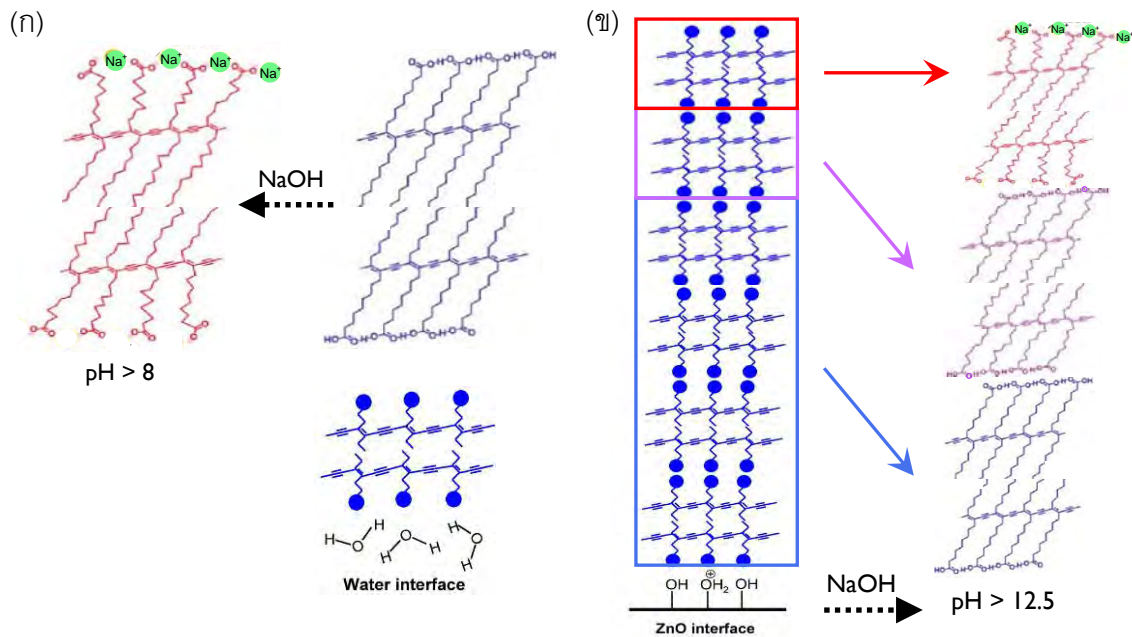




รูปที่ 4.21 สเปกตรากการดูดกลืนแสงและการเปลี่ยนสีเมื่อเพิ่มค่าความเป็นเบสของ (ก) สารละลาย PPCDA เวสิเคิล และ (ข) – (ง) สารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ที่ปริมาณซิงค์ออกไซด์ 5.9 และ 17 wt.% ตามลำดับ



รูปที่ 4.22 พฤติกรรมการเปลี่ยนสีเมื่อเพิ่มค่าความเป็นเบสของสารละลาย PPCDA เวสิเคิล และสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ที่ปริมาณซิงค์ออกไซด์ 5.9 และ 17 wt.% (ก) เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสี (%CR) และ (ข) ความยาวคลื่น ณ ตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max})



รูปที่ 4.23 กลไกการเปลี่ยนสีของ (ก) สารละลาย PPCDA เวสิเคิล และ (ข) สารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ เมื่อได้รับการรบกวนจากความความเป็นเบส

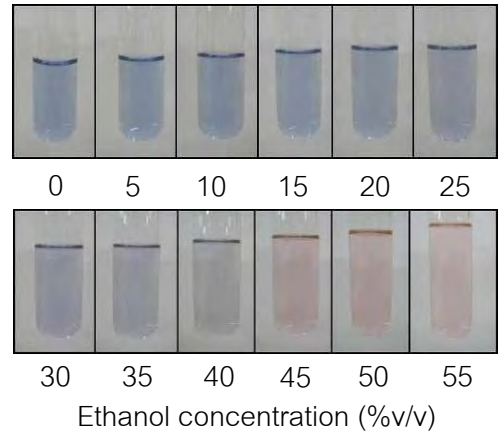
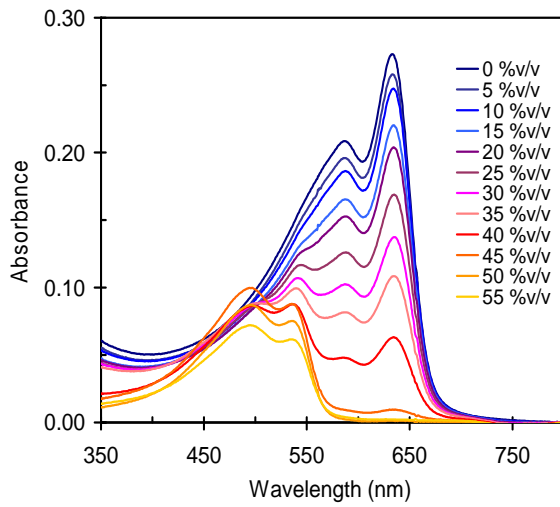
4.3.4. การตอบสนองต่อชนิดและความเข้มข้นของตัวทำละลาย

ผลการทดลองในส่วนนี้จะทำการศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของสารละลาย PPCDA เวสิเคิล และสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ที่ปริมาณซิงค์ออกไซด์เป็น 5, 9 และ 17 wt.% เมื่อได้รับการรบกวนจากตัวทำละลายคือ เอทานอล และไอโซโพรพานอล ที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยสังเกตการเปลี่ยนสีด้วยตาเปล่าและวิเคราะห์สมบัติการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค UV-VIS Spectrophotometry จากการศึกษาพบว่าชนิดและความเข้มข้นของตัวทำละลายมีผลต่อการเปลี่ยนสีของสารละลาย PPCDA เวสิเคิล ดังแสดงในรูปที่ 4.24 (ก) และ (ข) จากรูปที่ 4.24 (ก) เมื่อเพิ่มปริมาณของเอทานอลในสารละลาย PPCDA เวสิเคิล ความเข้มของแถบการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงินที่ความยาวคลื่นประมาณ 635 นาโนเมตร ลดลงเรื่อยๆ ในขณะที่เดียวกันแถบการดูดกลืนแสงของเฟสสีแดงในช่วงความยาวคลื่น 490 ถึง 540 นาโนเมตร จะเพิ่มขึ้น จากการสังเกตด้วยตาเปล่าจะพบว่าสารละลาย PPCDA เวสิเคิลเปลี่ยนเป็นสีม่วงมากขึ้น เมื่อเติมเอทานอลมากกว่า 35 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรจะพบว่าตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุดเปลี่ยนจากความยาวคลื่น 635 นาโนเมตร มาอยู่ที่ความยาวคลื่น 537 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.26 (ก) โดยที่สารละลาย PPCDA เวสิเคิลปรากฏสีม่วง และเมื่อเพิ่ม

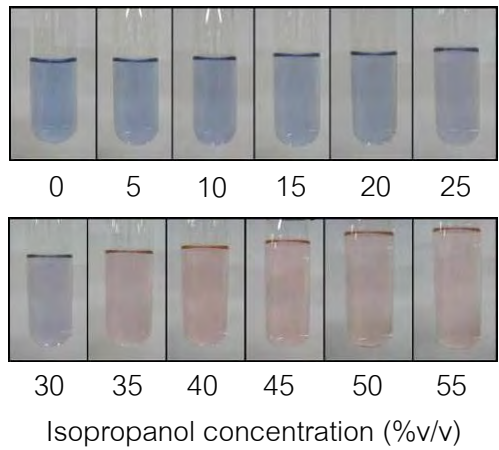
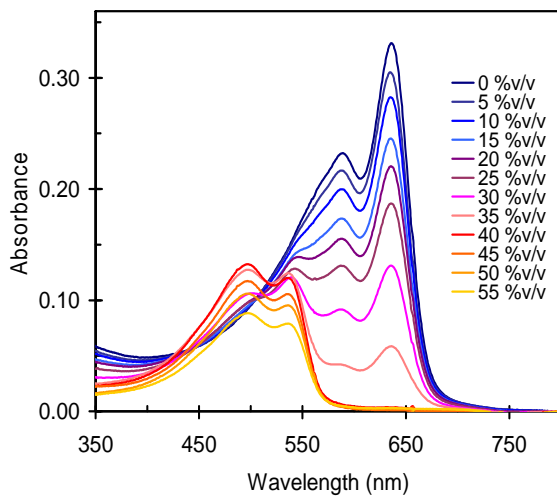
ปริมาณเอทานอลเป็น 45 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรขึ้นไป จะพบว่าสารละลาย PPCDA เวลิกัลเปลี่ยนเป็นสีแดง เมื่อพิจารณาจากสเปกตรากการดูดกลืนแสงจะพบว่าแถบการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 640 นาโนเมตรลดลงจนเกือบเป็นศูนย์ มีเพียงแถบการดูดกลืนแสงในช่วงของเฟสสีแดงปรากฏขึ้นมาเท่านั้น และเมื่อพิจารณาจากกราฟ λ_{max} ในรูปที่ 4.26 (ก) จะพบว่าตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุดย้ายจากที่ความยาวคลื่น 537 นาโนเมตร มาอยู่ที่ความยาวคลื่น 495 นาโนเมตร

เมื่อเปลี่ยนตัวทำละลายเป็นไอโซโพรพานอล พบว่าสารละลาย PPCDA เวลิกัลตอบสนองต่อไอโซโพรพานอลได้ไวกว่าเอทานอล จากกราฟการดูดกลืนแสงในรูปที่ 4.24 (ข) จะพบว่าเมื่อความเข้มข้นของไอโซโพรพานอลในสารละลาย PPCDA เวลิกัลมากขึ้น ความเข้มของแถบการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงินที่ความยาวคลื่นประมาณ 635 นาโนเมตรลดลง ในขณะที่เดียวกันแถบการดูดกลืนแสงของเฟสสีแดงในช่วงความยาวคลื่น 490 ถึง 540 นาโนเมตรมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเติมไอโซโพรพานอลลงในสารละลาย PPCDA เวลิกัลมากกว่า 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรจะพบว่าตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุดย้ายจากที่ความยาวคลื่น 635 นาโนเมตรมาอยู่ที่ความยาวคลื่น 497 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.26 (ข) และสารละลาย PPCDA เวลิกัลเริ่มเปลี่ยนสีเป็นสีแดง เมื่อเปรียบเทียบปริมาณตัวทำละลายที่ใช้ในการทำให้สารละลาย PPCDA เวลิกัลเกิดการเปลี่ยนเฟสสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงอย่างสมบูรณ์ จะพบว่าเกิดการเปลี่ยนเฟสสีอย่างสมบูรณ์จะเกิดขึ้นเมื่อเติมเอทานอลในปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และเมื่อเติมไอโซโพรพานอลในปริมาณ 45 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ดังแสดงในรูปที่ 4.27 โดยกระบวนการเปลี่ยนสีที่เกิดขึ้นเมื่อได้รับการกระตุ้นจากเอทานอลหรือไอโซโพรพานอลของสารละลาย PPCDA เวลิกัลเป็นกระบวนการผันกลับไม่ได้ ซึ่งสาเหตุที่ทำให้สารละลาย PPCDA เวลิกัลเกิดการเปลี่ยนสีเนื่องจากโมเลกุลของเอทานอลหรือไอโซโพรพานอลพยายามจัดเรียงตัวโดยหันหมู่ไฮดรอกซิลเข้าหาหมู่คาร์บอกซิลที่ head groups ของ PPCDA เนื่องจากมีความเป็นขั้วเหมือนกัน และหันหมู่เอทิลของเอทานอลหรือหมู่โพรพิลของไอโซโพรพานอลซึ่งเป็นส่วนที่ไม่มีขั้วเข้าหาโซ่ข้างที่เป็นหมู่แอลคิลของ PPCDA ลักษณะการจัดเรียงตัวเช่นนี้อาจทำให้เกิดการแทรกของโมเลกุลของแอลกอฮอล์ระหว่างโซ่ข้างของ PPCDA จึงเกิดการแตกออกของพันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่าง head groups ทำให้โซ่ข้างบิดงอและเกิดการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ ส่งผลให้ออร์บิทัลไพเกิดการบิดออกนอกกระนาบ ทำให้ π อีเล็กตรอนที่สายโซ่หลักที่มีโครงสร้างเป็นแบบคอนจูเกตเคลื่อนที่ไม่สะดวก ส่งผลให้ระยะคอนจูเกตลดลง เป็นสาเหตุให้เกิดการเปลี่ยนสีขึ้น⁽¹⁰⁾ ดังแสดงในรูปที่ 2.11

การตอบสนองต่อเอทานอลและไอโซโพรพานอลของสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคลือบอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 5.9 และ 17 wt.% แสดงผลที่คล้ายคลึงกันมากดังแสดงในรูปที่ 4.25 โดยจากการสังเกตด้วยตาเปล่าพบว่า เมื่อเติมเอทานอลหรือไอโซโพรพานอลลงไป สารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคลือบอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ตั้งแต่ 10 ถึง 90 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สีของสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคลือบอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ยังคงเป็นสีฟ้า แต่สีอาจจางลงเมื่อเพิ่มปริมาณเอทานอลหรือไอโซโพรพานอลที่เติมลงไป และเมื่อวิเคราะห์การดูดกลืนแสงของสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคลือบอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ 5.9 และ 17 wt.% ในรูปที่ 4.25 (ก) (ข) และ (ค) ตามลำดับ จะพบว่าความเข้มของแถบการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตรลดลงอย่างต่อเนื่องตามความเข้มข้นของเอทานอลหรือไอโซโพรพานอลที่เพิ่มขึ้น โดยไม่ปรากฏยอดการดูดกลืนแสงของเฟสสีแดงในช่วงความยาว 490 ถึง 540 นาโนเมตร แม้จะใช้ความเข้มข้นของเอทานอลหรือไอโซโพรพานอลสูงถึง 90 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรแล้วก็ตาม ซึ่งสาเหตุที่สารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคลือบอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ไม่เกิดการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับการกระตุ้นจากเอทานอลหรือไอโซโพรพานอลนั้น คล้ายคลึงกับการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบส โดยอาจเป็นผลมาจากการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบและซ้อนกันหลายชั้นของ PPCDA บนผิวของซิงค์ออกไซด์ โดยชั้นของ PPCDA ที่อยู่ด้านในสุดมีการยึดเกาะกับพื้นผิวของอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์อย่างแข็งแรงอีกด้วย ทำให้สายโซ่ข้างและสายโซ่หลักที่มีโครงสร้างเป็นแบบคอนจูเกตเปิดออกจนกระทั่งสามารถขยับได้ยากขึ้น แม้ว่าโมเลกุลของเอทานอลหรือไอโซโพรพานอล อาจจะมีปริมาณมากพอที่จะทำให้พันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่าง head groups ของ PPCDA เกิดการแตกออก แต่อาจไม่มีแรงกระทำมากพอที่จะทำให้ออร์บิทัลไพเกิดการบิดออกจนกระทั่งและเกิดการเปลี่ยนสีในที่สุด เมื่อทำการพล็อตค่าความยาวคลื่น ณ ตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุด (รูปที่ 4.26) และเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสี (รูปที่ 4.27) เปรียบเทียบกับปริมาณตัวทำละลายที่เติมลงไป จึงไม่พบการเปลี่ยนแปลงในสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคลือบอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์

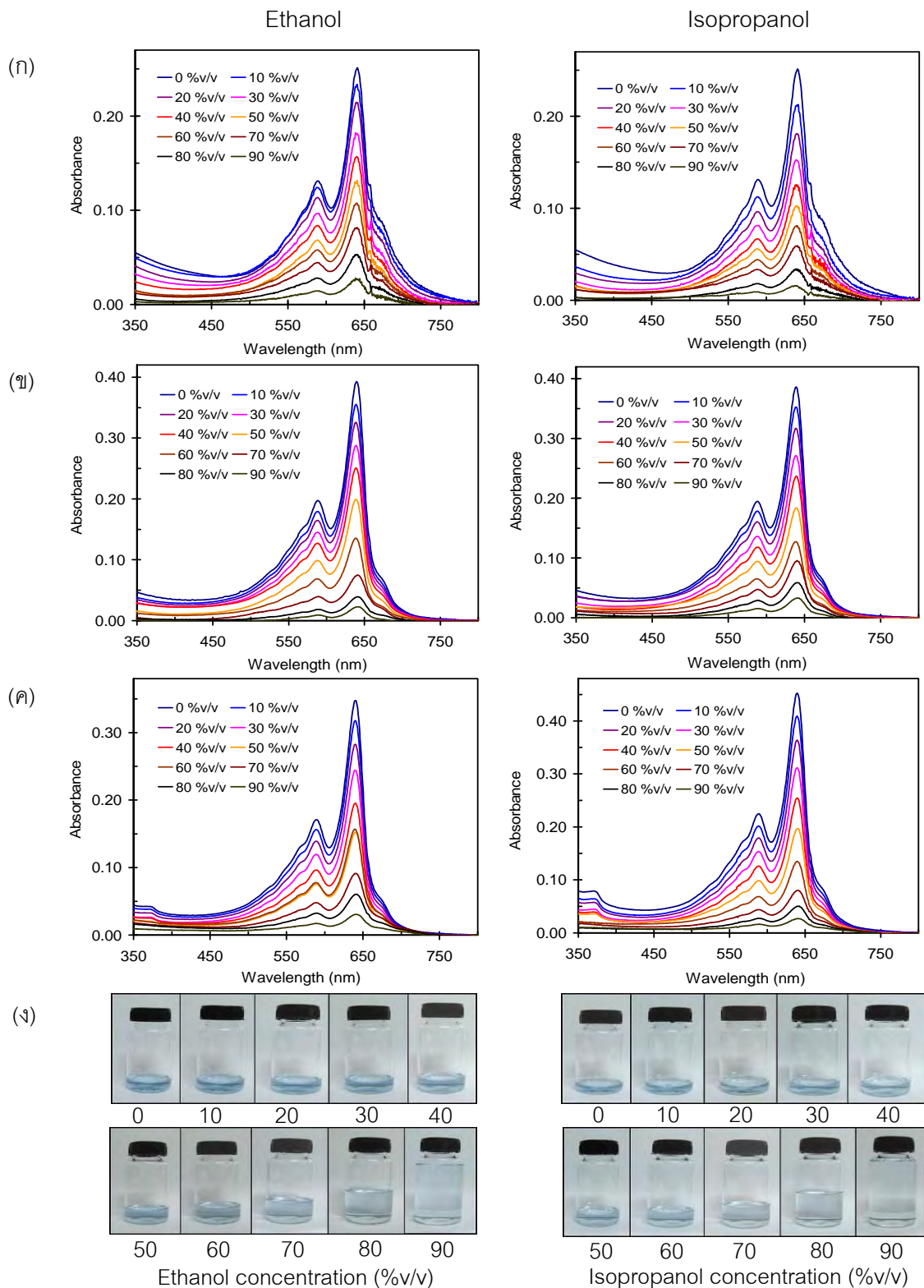


(ก)

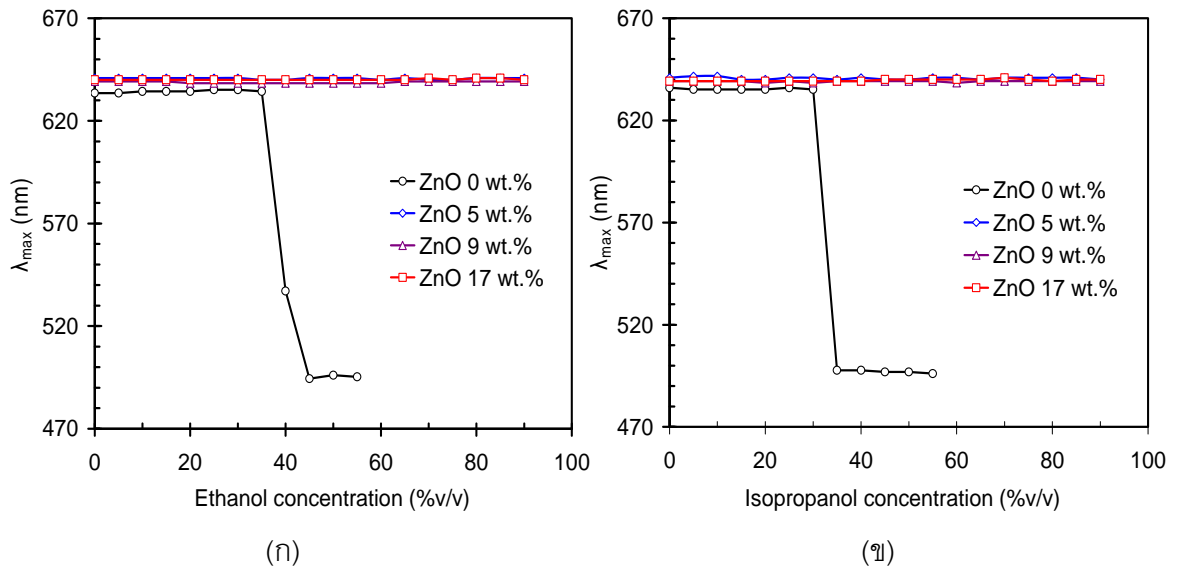


(ข)

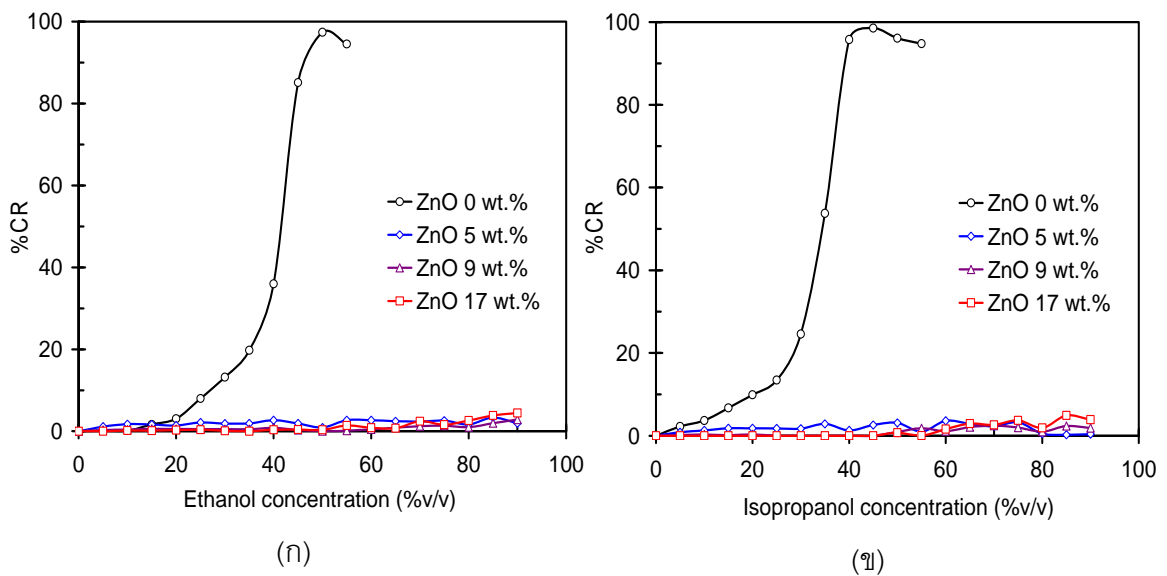
รูปที่ 4.24 สเปกตรากการดูดกลืนแสงและการเปลี่ยนสีของสารละลาย PPCDA เวลีเคิล เมื่อเพิ่ม
ความเข้มข้นของ (ก) เอทานอล และ (ข) ไอโซโพรพานอล



รูปที่ 4.25 (ก) – (ค) สเปกตรากการดูดกลืนแสงของสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ที่ปริมาณซิงค์ออกไซด์ 5.9 และ 17 wt.% ตามลำดับ และ (ง) สีของสารละลายวัสดุเชิงประกอบเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลและไอโซโพรพานอล



รูปที่ 4.26 ค่าความยาวคลื่น ณ ตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารละลาย PPCDA เวสิเคิล (ZnO 0 wt.%) และสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ที่ปริมาณซิงค์ออกไซด์ 5 9 และ 17 wt.% เมื่อได้รับการกระตุ้นจาก (ก) เอทานอล (ข) ไอโซโพรพานอล



รูปที่ 4.27 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของสารละลาย PPCDA เวสิเคิล (ZnO 0 wt.%) และสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ที่ปริมาณซิงค์ออกไซด์ 5 9 และ 17 wt.% เมื่อได้รับการกระตุ้นจาก (ก) เอทานอล (ข) ไอโซโพรพานอล

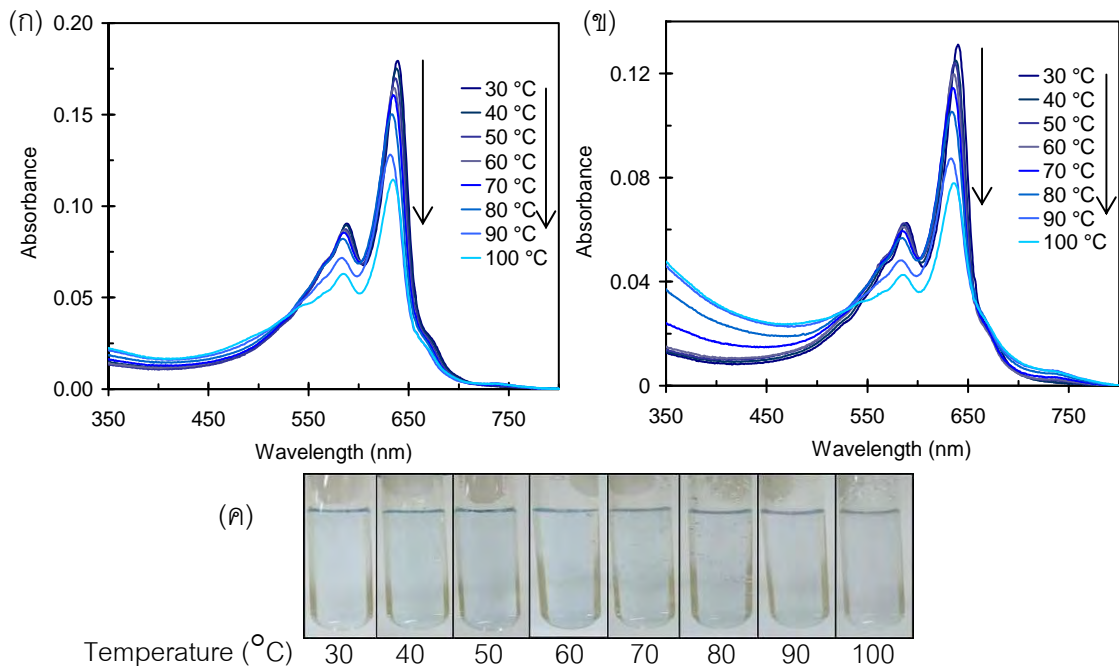
4.4 พฤติกรรมการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เกล็ดเคลือบอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ 33 และ 50 wt.% เมื่อได้รับการรบกวนจากสิ่งแวดล้อมภายนอก

จากการศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เกล็ดเคลือบอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ที่ปริมาณซิงค์ออกไซด์ 5 9 และ 17 wt.% เมื่อได้รับการรบกวนจากอุณหภูมิ ความเป็นกรด-เบส ชนิดและความเข้มข้นของตัวทำละลาย พบพฤติกรรมการเปลี่ยนสีที่น่าสนใจ เช่น เมื่อให้ความร้อนแก่วัสดุเชิงประกอบ PPCDA เกล็ดเคลือบอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ จะพบว่าเกิดการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิที่สูงกว่า PPCDA เกล็ดเคล็ดมาก เป็นต้น อัตราส่วนของซิงค์ออกไซด์ที่เติมลงไป PPCDA เกล็ดเคล็ด ก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่จะส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบ ดังนั้นการทดลองในส่วนนี้จึงศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เกล็ดเคล็ดกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ โดยใช้ปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่สูงขึ้นเป็น 33 และ 50 wt.% และทำการรบกวนระบบด้วยสิ่งแวดล้อม ได้แก่ อุณหภูมิ ความเป็นกรด-เบส ชนิดและความเข้มข้นของตัวทำละลาย

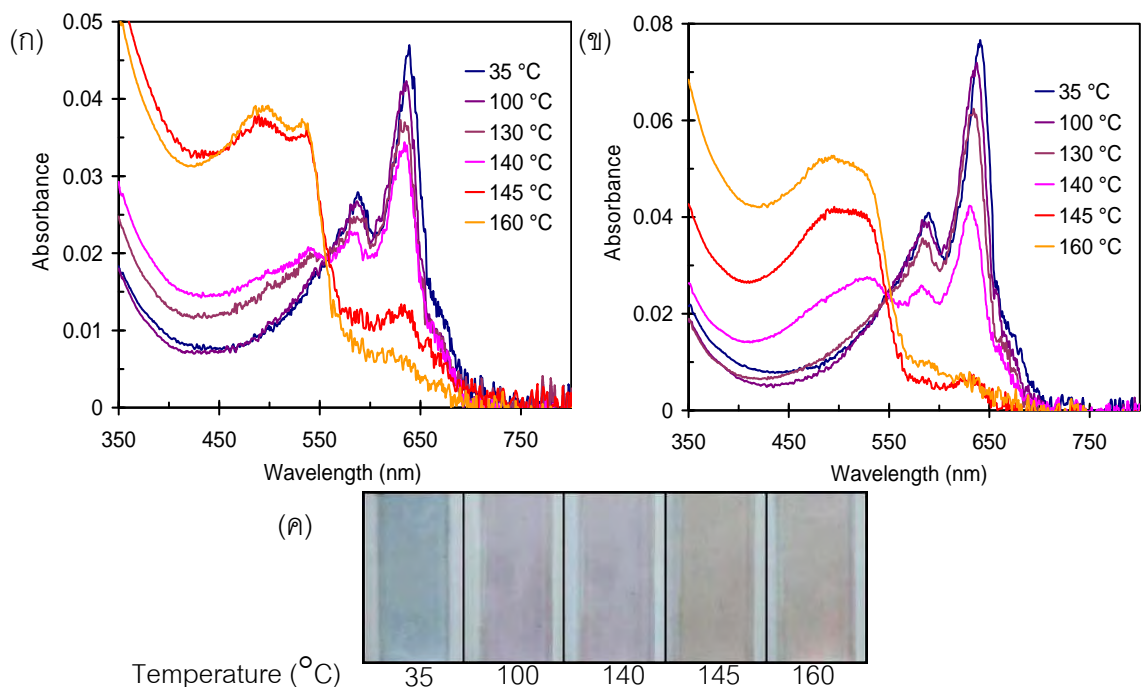
4.4.1. การตอบสนองต่ออุณหภูมิ

เมื่อศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนสีของสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เกล็ดเคล็ดกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ 33 และ 50 wt.% โดยให้ความร้อนจากอุณหภูมิห้องที่ 30 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จะพบพฤติกรรมการเปลี่ยนสีที่คล้ายคลึงกันมาก ดังแสดงในรูปที่ 4.28 ซึ่งจากการสังเกตด้วยตาเปล่าพบว่า เมื่อให้ความร้อนแก่สารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เกล็ดเคล็ดกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ทั้ง 2 อัตราส่วนจนถึงอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส สีของสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เกล็ดเคล็ดกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ทั้ง 2 อัตราส่วน ยังคงมีสีฟ้า และเมื่อวิเคราะห์การดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค UV-VIS Spectrophotometry จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความเข้มของแถบการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงินที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตร ลดลงเรื่อยๆ โดยไม่ปรากฏยอดการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 490 ถึง 540 นาโนเมตร ซึ่งเป็นสเปกตรากการดูดกลืนแสงของเฟสสีแดงขึ้นมา จนกระทั่งให้ความร้อนถึงอุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส จะพบยอดการดูดกลืนแสงเล็กๆ ที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตร ดังนั้นเพื่อทำการทดสอบที่อุณหภูมิสูงขึ้นจึงทำการเตรียมฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เกล็ดเคล็ดกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ที่ปริมาณซิงค์ออกไซด์ 33 และ 50 wt.% โดยใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นเมทริกซ์ และศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนสี โดยนำฟิล์มเข้าอบในเตาอบที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 35 องศาเซลเซียส จนถึง 160 องศา

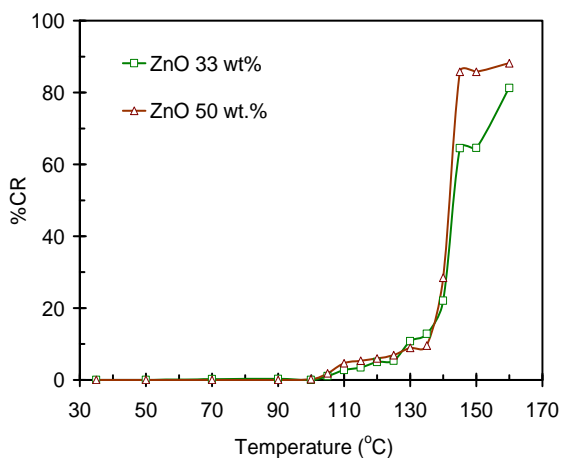
เซลเซียส ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.29 และ 4.30 จากการศึกษาพบว่าฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคลือบอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ 33 และ 50 wt.% แสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนสีที่คล้ายคลึงกับฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 5 9 และ 17 wt.% เป็นอย่างมาก โดยพฤติกรรมการเปลี่ยนสียังคงเป็น 2 ชั้น ชั้นแรกแสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้ในช่วงอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิประมาณ 140 องศาเซลเซียส ซึ่งจากการสังเกตด้วยตาเปล่าพบว่าฟิล์มวัสดุเชิงประกอบเริ่มเปลี่ยนเป็นสีม่วงอมชมพูเมื่ออบฟิล์มที่อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส และเปลี่ยนสีกลับเป็นสีฟ้าเมื่อฟิล์มวัสดุเชิงประกอบเย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้อง เมื่อพิจารณาสเปกตรากการดูดกลืนแสงจะพบว่าแถบการดูดกลืนแสงไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงไปจากที่อุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 4.29 และเมื่อทำการคำนวณกราฟเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีในรูปที่ 4.30 จะพบว่าค่า %CR ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 33 และ 50 wt.% มีค่าเป็นศูนย์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส แสดงถึงการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้อย่างสมบูรณ์ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบฟิล์มจนถึงประมาณ 140 องศาเซลเซียสยังคงพบว่าฟิล์มเปลี่ยนเป็นสีม่วงอมชมพูและเกิดการเปลี่ยนสีกลับเมื่อเย็นตัวลงถึงอุณหภูมิห้องแต่เป็นการผันกลับแบบไม่สมบูรณ์ ซึ่งค่า %CR ในช่วงนี้จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบฟิล์มเป็น 145 องศาเซลเซียส สเปกตรากการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคลือบอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ 33 และ 50 wt.% เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน โดยความเข้มของการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงินลดลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ความเข้มของการดูดกลืนแสงของเฟสสีแดงกลับเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก ดังแสดงในรูปที่ 4.29 (ก) และ (ข) เมื่อสังเกตจากตาเปล่าจะพบว่าฟิล์มวัสดุเชิงประกอบปรากฏเป็นสีแดงอมส้มและไม่มีการเปลี่ยนสีเกิดขึ้นเมื่อฟิล์มเย็นตัวลงถึงอุณหภูมิห้องซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมการเปลี่ยนสีแบบผันกลับไม่ได้ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคลือบอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ 33 และ 50 wt.% ซึ่งอุณหภูมิที่เริ่มเกิดกระบวนการเปลี่ยนสีแบบผันกลับไม่ได้นี้เป็นอุณหภูมิเดียวกันกับที่เกิดขึ้นในฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคลือบที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 5 9 และ 17 wt.% เมื่อพิจารณากราฟการเปลี่ยนสีจะพบว่า ค่า %CR เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมากในช่วงอุณหภูมิ 140 ถึง 145 องศาเซลเซียส หลังจากนั้น ค่า %CR จะเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกับในฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคลือบอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ 5 9 และ 17 wt.%



รูปที่ 4.28 (ก) – (ข) สเปกตรากการดูดกลืนแสงของสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคลือบกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 33 และ 50 wt.% ตามลำดับ และ (ค) สีของสารละลายวัสดุเชิงประกอบ เมื่อผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 100 °C



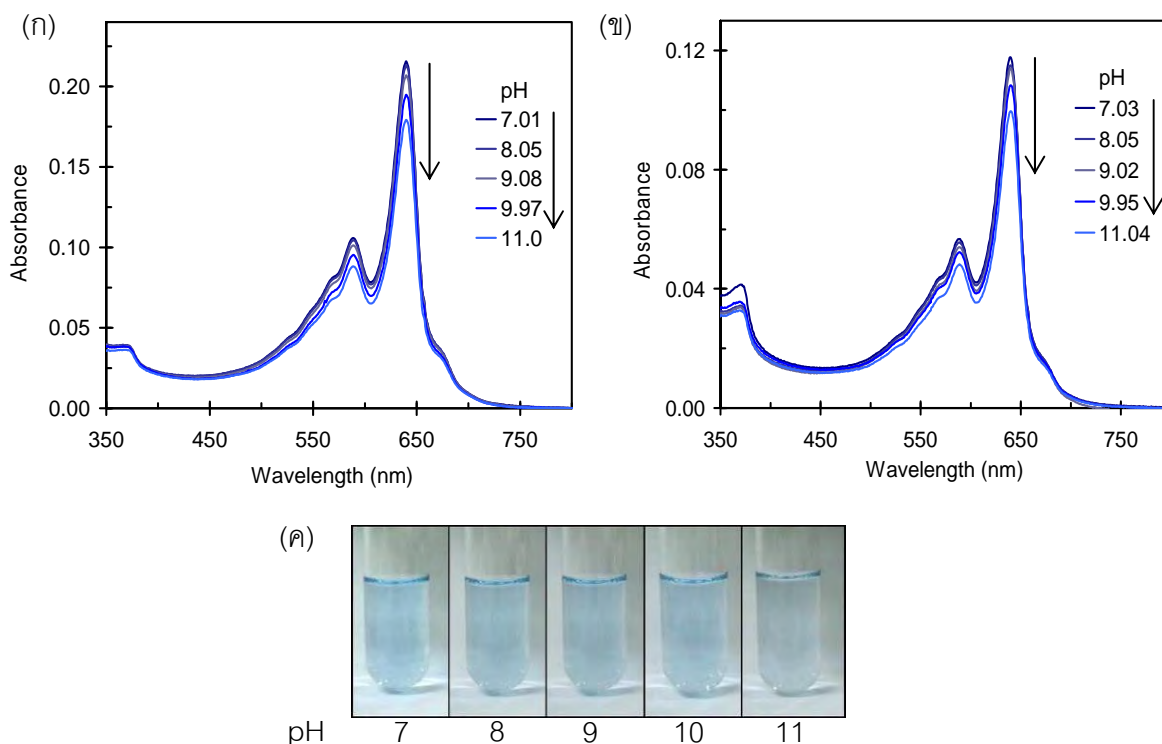
รูปที่ 4.29 (ก) – (ข) สเปกตรากการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคลือบกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 33 และ 50 wt.% ตามลำดับ และ (ค) สีของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ เมื่อผ่านการให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 160 °C



รูปที่ 4.30 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนสีของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคลือบอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 33 และ 50 wt.% เมื่อผ่านการให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 160 °C

4.4.2. การตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบส

รูปที่ 4.31 แสดงการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบสของสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคลือบอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์เป็น 33 และ 50 wt.% โดยสารละลายดังกล่าวมีค่าพีเอชเริ่มต้นอยู่ที่พีเอช 7 เมื่อทำการปรับค่าพีเอชให้สูงขึ้นจนถึงพีเอช 11 พบว่า สารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคลือบอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ 33 และ 50 wt.% ยังคงมีสีฟ้าเมื่อสังเกตจากตาเปล่า และเมื่อพิจารณาสเปกตรารการดูดกลืนแสงของสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคลือบอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ 33 และ 50 wt.% ดังแสดงในรูปที่ 4.31 (ก) และ (ข) ตามลำดับ จะพบว่าความเข้มของการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงินลดลงเล็กน้อยเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้น โดยไม่ปรากฏแถบการดูดกลืนแสงของเฟสสีแดงที่ความยาวคลื่นในช่วง 490 ถึง 540 นาโนเมตร แสดงว่าไม่เกิดการบดออกนอกกระนาบของออร์บิทัลไพที่สายโซ่หลักที่มีโครงสร้างเป็นแบบคอนจูเกต จึงไม่เกิดการเปลี่ยนสีขึ้น ทั้งนี้อาจอธิบายได้จากการมีซิงค์ออกไซด์ในปริมาณมากซึ่งทำหน้าที่เป็นซับสเตรตให้โมเลกุล PCDA ไปเกาะบนพื้นผิว โดยเกิดการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบและเรียงต่อกันเป็นชั้นๆ ขึ้นไป สายโซ่ข้างจึงเกิดการบดออกนอกกระนาบได้ยากขึ้น ทำให้ออร์บิทัลไพไม่เกิดการบดออกนอกกระนาบ ระยะเวลาคอนจูเกตไม่มีการเปลี่ยนแปลง จึงไม่เกิดการเปลี่ยนสีขึ้น

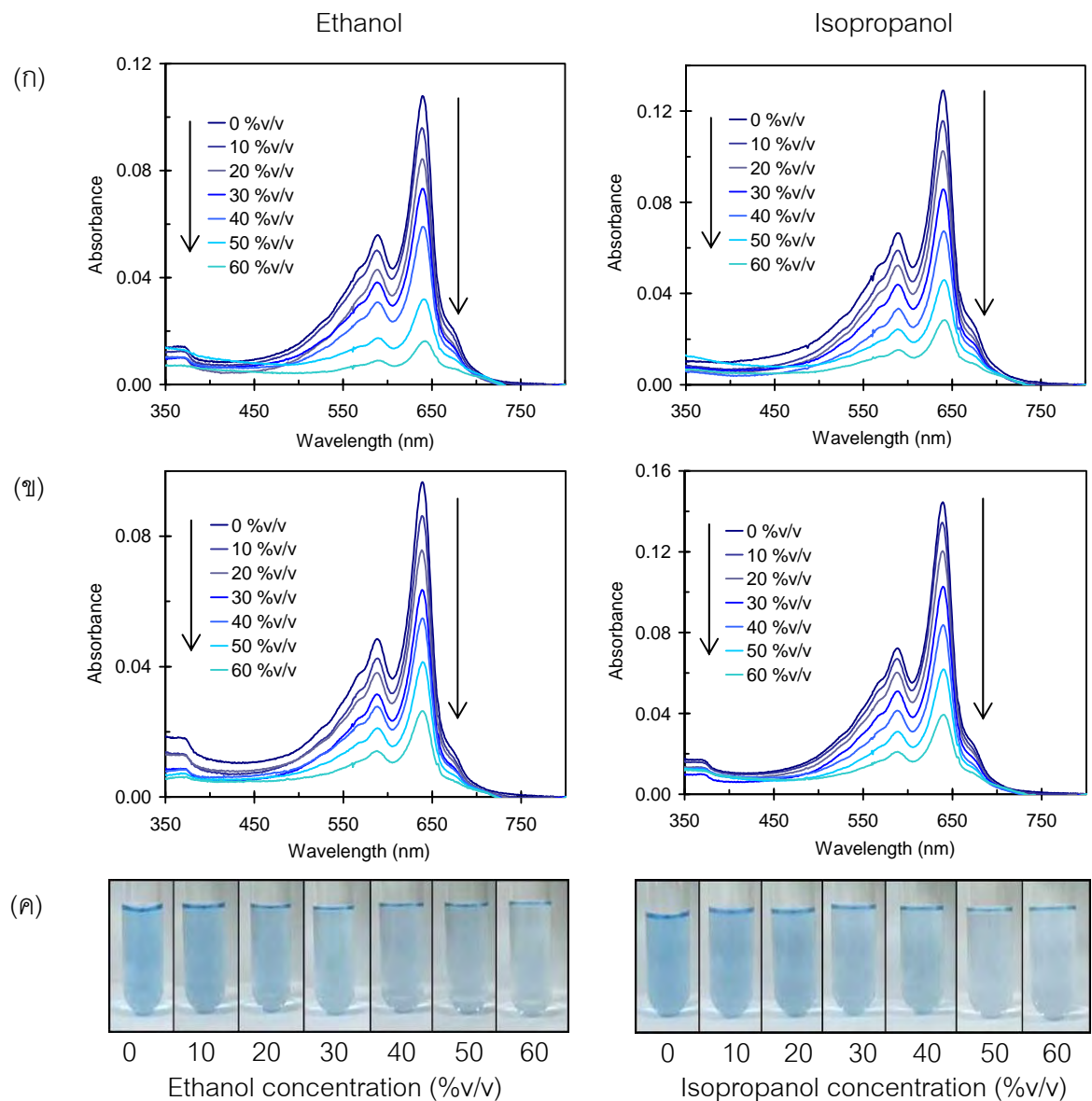


รูปที่ 4.31 (ก) – (ข) สเปกตรารการดูดกลืนแสงของสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 33 และ 50 wt.% ตามลำดับ และ (ค) สีของสารละลายวัสดุเชิงประกอบ เมื่อทำการเพิ่มค่าความเป็นเบส

4.4.3. การตอบสนองต่อชนิดและความเข้มข้นของตัวทำละลาย

จากการศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 33 และ 50 wt.% เมื่อได้รับการรบกวนจากตัวทำละลายคือเอทานอลและไอโซโพรพานอล ที่ความเข้มข้นต่างๆ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.32 จากผลการทดลองพบว่าพฤติกรรมการตอบสนองที่เกิดขึ้นมีลักษณะเดียวกับสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ 5.9 และ 17 wt.% โดยจากการสังเกตด้วยตาเปล่าจะพบว่าเมื่อเติมเอทานอลหรือไอโซโพรพานอลที่ปริมาณ 10 ถึง 60 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรลงไป ในสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ 33 และ 50 wt.% สีของสารละลายวัสดุเชิงประกอบทั้งสองอัตราส่วนจะยังคงเป็นสีฟ้าอยู่ แต่สีจะจางลงตามปริมาณของเอทานอลหรือไอโซโพรพานอลที่เพิ่มขึ้น และเมื่อวิเคราะห์การดูดกลืนแสงพบว่าเมื่อปริมาณของเอทานอลหรือไอโซโพรพานอลเพิ่มขึ้น ความเข้มของการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงินที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตรจะลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยไม่ปรากฏแถบ

การดูดกลืนแสงของเฟสสีแดงในช่วงความยาวคลื่น 490 ถึง 540 นาโนเมตร แสดงให้เห็นว่าออร์บิทัลไฟไม่เกิดการบิดออกนอกระนาบ ระยะคอนจูเกตไม่มีการเปลี่ยนแปลง จึงไม่เกิดการเปลี่ยนสี เนื่องจากการจัดเรียงตัวของ PPCDA ในวัสดุเชิงประกอบที่มีความเป็นระเบียบและมีการเรียงซ้อนกันหลายชั้น นอกจากนี้ชั้นของ PPCDA ที่อยู่ด้านในสุดมีการยึดเกาะกับพื้นผิวของอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์อย่างแข็งแรงอีกด้วย จึงทำให้สารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เติลเคลือบอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ 33 และ 50 wt.% ไม่เกิดการเปลี่ยนสี



รูปที่ 4.32 (ก) – (ข) สเปกตรารการดูดกลืนแสงของสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เติลเคลือบอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ 33 และ 50 wt.% ตามลำดับ และ (ค) สีของสารละลายวัสดุเชิงประกอบ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลและไอโซโพรพานอล

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคลือบอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ โดยปรับเปลี่ยนปริมาณของซิงค์ออกไซด์เป็น 5 9 17 33 และ 50 wt.% และศึกษาสมบัติการเปลี่ยนสีเมื่อถูกรบกวนจากสิ่งกระตุ้นภายนอก ได้แก่ อุณหภูมิ ความเป็นกรด-เบส ชนิดและความเข้มข้นของตัวทำละลาย ซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. วัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคลือบอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมได้ปรากฏสีฟ้าหลังทำการฉายแสงยูวี

2. จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคลือบอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ พบว่า วัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคลือบอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์มีรูปร่างเป็นทรงกลม มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าอนุภาคของ PPCDA เวลีเคลือบบริสุทธิ์เล็กน้อย โดยอนุภาคของวัสดุเชิงประกอบมี PPCDA เกาะอยู่บนผิวของอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ และ PPCDA มีลักษณะซ้อนกันเป็นชั้น ซึ่งแตกต่างจากโครงสร้างจุลภาคของอนุภาคเดี่ยว PPCDA เวลีเคลือบบริสุทธิ์ที่มีลักษณะภายในโครงสร้างปรากฏเป็นเนื้อเดียว

3. จากการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคลือบอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ พบว่าตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุดของวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคลือบอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์เลื่อนไปอยู่ในตำแหน่งที่ความยาวคลื่นสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุดของ PPCDA เวลีเคลือบ นอกจากนี้วัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคลือบอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ยังแสดงแถบการดูดกลืนแสงที่แคบมากกว่าแถบการดูดกลืนแสงของ PPCDA เวลีเคลือบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า PPCDA ที่เกาะอยู่บนพื้นผิวของอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบและเป็นระนาบเดียวกันมากกว่า PPCDA เวลีเคลือบบริสุทธิ์

4. เมื่อสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคลือบอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ได้รับการกระตุ้นจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะเกิดการเปลี่ยนเป็นสีม่วงอมชมพูที่อุณหภูมิประมาณ 90 องศาเซลเซียส และมีพฤติกรรมการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้ ในขณะที่สารละลาย PPCDA เวลีเคลือบเปลี่ยนเป็นสีแดงอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิประมาณ 75 องศาเซลเซียส โดยไม่เกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับ

5. เมื่อฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ได้รับการกระตุ้นจากอุณหภูมิจะเกิดการเปลี่ยนสีเป็น 2 ระดับ โดยเกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้ในช่วงอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิประมาณ 140 องศาเซลเซียส และเปลี่ยนสีแบบผันกลับไม่ได้ที่อุณหภูมิ 145 องศาเซลเซียสขึ้นไป ในขณะที่ฟิล์ม PPCDA เวลีเคิลจะเกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับไม่ได้โดยเปลี่ยนเป็นสีแดงอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิประมาณ 90 องศาเซลเซียส

6. จากการศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับการกระตุ้นจากความเป็นกรด-เบส พบว่าสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์เกิดการเปลี่ยนสีจากสีฟ้าเป็นสีม่วงที่ค่าพีเอช 12.5 ขึ้นไป ในขณะที่สารละลาย PPCDA เวลีเคิลบริสุทธิ์เปลี่ยนสีเป็นสีแดงที่พีเอช 8

7. เมื่อได้รับการกระตุ้นจากเอทานอลและไอโซโพรพานอล สารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ไม่เกิดการเปลี่ยนสี แต่พบว่าความเข้มของการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงินลดลง ตามปริมาณของเอทานอลและไอโซโพรพานอลที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่สารละลาย PPCDA บริสุทธิ์เปลี่ยนสีจากน้ำเงินเป็นแดงที่ความเข้มข้นของเอทานอลและไอโซโพรพานอลเป็นร้อยละ 45 และ 35 โดยปริมาตร ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาในเชิงลึกถึงผลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อความหนาของชั้น PPCDA และความเป็นระเบียบของสายโซ่พอลิเมอร์

2. ศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ เมื่อได้รับการกระตุ้นจากตัวทำละลายชนิดอื่น

3. ศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ เมื่อได้รับการกระตุ้นจากความเป็นกรด-เบส ชนิดและความเข้มข้นของตัวทำละลาย

4. ศึกษาการเตรียมและพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิลกับอนุภาคนาโนของโลหะออกไซด์ชนิดอื่น เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ และเหล็กออกไซด์ เป็นต้น

รายการอ้างอิง

- (1) 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 & Bioelectronics 25 (2010): 1838-1842.
- (2) Thompson, B. C., Schottland, P., Zong, K. W., and Reynolds, J. R., In situ colorimetric analysis of electrochromic polymers and devices. Chemistry of Materials 12 (2000): 1563-1571.
- (3) Sung, 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 114 (2010): 2379-2382.
- (4) van den Heuvel, M., Lowik, 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 11 (2010): 1676-1683.
- (5) 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 32 (1999): 8306-8309.
- (6) Su, Y. L., Preparation of polydiacetylene/silica nanocomposite for use as a chemosensor. Reactive & Functional Polymers 66 (2006): 967-973.
- (7) Hong, R. Y., Li, J. H., Chen, L. L., Liu, D. Q., Li, H. Z., Zheng, Y., and Ding, J., Synthesis, surface modification and photocatalytic property of ZnO nanoparticles. Powder Technology 189 (2009): 426-432.
- (8) Yang, S. W., and Gao, L., Preparation of titanium dioxide nanocrystallite with high photocatalytic activities. Journal of the American Ceramic Society 88 (2005): 968-970.
- (9) Meng, J. H., Yang, G. Q., Yan, L. M., and Wang, X. Y., Synthesis and characterization of magnetic nanometer pigment Fe_3O_4 . Dyes and Pigments 66 (2005): 109-113.

- (10) Potisatityuenyong, A., Rojanathanes, R., Turncharern, G., and Sukwattanasinitt, M., Electronic absorption spectroscopy probed side-chain movement in chromic transitions of polydiacetylene vesicles. Langmuir 24 (2008): 4461-4463.
- (11) 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 38 (2005): 9366-9376.
- (12) Yoon, B., Lee, S., and Kim, J. M., Recent conceptual and technological advances in polydiacetylene-based supramolecular chemosensors. Chemical Society Reviews 38 (2009): 1958-1968.
- (13) Kim, J., Kim, J. M., and Ahn, D. J., Layer-by-layer deposition of polydiacetylene vesicles and linear poly(sulfonates). Macromolecular research 14 (2006): 478-482.
- (14) Hwang, H., Song, S., and Kim, J. M., Reversible modulation of fluorescence signals of conjugated polydiacetylene supramolecules in a microfluidic sensor chip. Bulletin of the Korean Chemical Society 31 (2010): 273-274.
- (15) Okada, S., Peng, S., Spevak, W., and Charych, D., Color and chromism of polydiacetylene vesicles. Accounts of Chemical Research 31 (1998): 229-239.
- (16) Balakrishnan, S., Lee, S., and Kim, J. M., Thermochromic reversibility of conjugated polymers derived from a diacetylenic lipid containing lithium salt. Journal of Materials Chemistry 20 (2010): 2302-2304.
- (17) Morkoc, H., and Özgür, Ü. Zinc Oxide: Fundamentals, Materials and Device Technology. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009.
- (18) Zinc Oxide[Online]. Available from: http://staff.ustc.edu.cn/~bxlin/index_e.htm [2010, July 3]
- (19) Zhang, P., Xu, F., Navrotsky, A., Lee, J. S., Kim, S. T., and Liu, J., Surface enthalpies of nanophase ZnO with different morphologies. Chemistry of Materials 19 (2007): 5687-5693.

- (20) Salavati-Niasari, M., Davar, F., and Fereshteh, Z., Synthesis and characterization of ZnO nanocrystals from thermolysis of new precursor. Chemical Engineering Journal 146 (2009): 498-502.
- (21) Potisatityuenyong, A., Tumcharern, G., Dubas, S. T., and Sukwattanasinitt, M., Layer-by-layer assembly of intact polydiacetylene vesicles with retained chromic properties. Journal of Colloid and Interface Science 304 (2006): 45-51.
- (22) Ahn, D. J., Lee, S., and Kim, J. M., Rational design of conjugated polymer supramolecules with tunable colorimetric responses. Advanced Functional Materials 19 (2009): 1483-1496.
- (23) Kew, S. J., and Hall, E. A. H., pH response of carboxy-terminated colorimetric polydiacetylene vesicles. Analytical Chemistry 78 (2006): 2231-2238.
- (24) 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 16 (2006): 2103-2109.
- (25) Kim, J. M., Chae, S. K., Lee, Y. B., Lee, J. S., Lee, G. S., Kim, T. Y., and Ahn, D. J., Polydiacetylene supramolecules embedded in PVA film for strip-type chemosensors. Chemistry Letters 35 (2006): 560-561.
- (26) อัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี[Online]. Available from: <http://10ampika20.multiply.com/journal/item/5> [2010, July 10]
- (27) Visible and Ultraviolet Spectroscopy[Online]. Available from: <http://www2.chemistry.msu.edu/faculty/reusch/VirtTxtJml/Spectrpy/UV-Vis/spectrum.htm> [2010, July 10]
- (28) Spectroscopy[Online]. Available from: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/558901/spectroscopy/80631/Visible-and-ultraviolet-spectroscopy> [2010, July 11]
- (29) Ultraviolet-Visible Spectroscopy[Online]. Available from: http://las.perkinelmer.com/local/Thailand/AS_UV.htm [2010, July 12]

- (30) Laser Diffraction Particle Sizing[Online]. Available from: http://www.malvern.com/LabEng/technology/laser_diffraction/particle_sizing.htm [2010, July 13]
- (31) Rayleigh Scattering[Online]. Available from: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/Hbase/atmos/blusky.html> [2010, July 13]
- (32) Allen, T. Particle Size Measurement. 3rd ed. New York: Chapman and Hall, 1981.
- (33) Analyzing Light Scattering Data[Online]. Available from: http://www.malvern.com/LabEng/technology/laser_diffraction/analyzing_light_scattering.htm [2010, July 14]
- (34) Electron Microscope[Online]. Available from: <http://www.atom.rmutphysics.com/charud/scibook/nanotech/page/Unit4-5.html> [2010, July 25]
- (35) กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้อิเล็กทรอนิกส์[Online]. Available from: http://www.electron.rmutphysics.com/science-news/index.php?option=com_content&task=view&id=122&Itemid=1 [2010, August 2]
- (36) The Transmission Electron Microscope[Online]. Available from: <http://nobelprize.org/educational/physics/microscopes/tem/index.html> [2010, August 3]
- (37) SEM[Online]. Available from: <http://mse.iastate.edu/microscopy/home.html> [2010, August 4]
- (38) Scanning Electron Microscopy (SEM)[Online]. Available from: http://www.nano.kmitl.ac.th/index.php?option=com_content&view=article&id=218:scanning-electron-microscopysem-&catid=39:2009-06-05-03-28-18&Itemid=37 [2010, August 5]
- (39) Leng, Y. Materials Characterization: Introduction to Microscopic and Spectroscopic Methods. Singapore: John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, 2008.
- (40) การศึกษาทางชีววิทยาสัมัยใหม่ด้วยเครื่อง Atomic Force Microscopy[Online]. Available from: <http://www.vcharkarn.com/varticle/38293> [2010, August 6]
- (41) Scanning Probe Microscope[Online]. Available from: <http://www.atom.rmutphysics.com/charud/scibook/nanotech/Page/Unit4-3.html> [2010, August 7]
- (42) Optical Microscopes[Online]. Available from: <http://universe-review.ca/R11-13-microscopes.htm> [2010, August 9]

- (43) Conventional Methods of AFM Imaging[Online]. Available from: <http://www.azom.com/details.asp?ArticleID=3279> [2010, August 10]
- (44) Su, Y. L., Li, J. R., and Jiang, L., Effect of amphiphilic molecules upon chromatic transitions of polydiacetylene vesicles in aqueous solutions. Colloids and Surfaces B-Biointerfaces 39 (2004): 113-118.
- (45) Chen, X., and Yoon, J., A thermally reversible temperature sensor based on polydiacetylene: Synthesis and thermochromic properties. Dyes and Pigments (2010): 1-5.
- (46) 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 43 (2010): 716-724.
- (47) Su, Y. L., Assembly of polydiacetylene vesicles on solid substrates. Journal of Colloid and Interface Science 292 (2005): 271-276.
- (48) Yokoyama, T., Masuhara, A., Onodera, T., Kasai, H., and Oikawa, H., Development of fabrication process for Ag/polydiacetylene (core/shell) hybridized nanocrystals. Synthetic Metals 159 (2009): 897-899.
- (49) Gu, Y., Cao, W. Q., Zhu, L., Chen, D. Y., and Jiang, M., Polymer mortar assisted self-assembly of nanocrystalline polydiacetylene bricks showing reversible thermochromism. Macromolecules 41 (2008): 2299-2303.
- (50) Traiphol, N., Rungruangviriya, N., Potai, R., Traiphol, R., Stable polydiacetylene/ZnO nanocomposites with two-steps reversible and irreversible thermochromism. submitted to Advanced Functional Materials.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

Certificate of Analysis ของ 10,12-Pentacosadiynoic acid (MFCD00041684, Sigma-Aldrich Production GmbH, Switzerland)

Empirical formula	$C_{25}H_{42}O_2$
Molecular weight	374.60
CAS Number	66990-32-7
LOT	1345283
Beilstein registry number	4189973
MDL number	MFCD00041684
PubChem substance ID	24887001
Appearance (color)	Slightly blue
Appearance (form)	Crystalline chunks
Purity (HPLC area %)	99.3%
Melting point	65 °C
Carbon content	80.65 %
Hydrogen content	11.14 %
NMR spectrum ¹³ C	Corresponds to standard spectrum

ภาคผนวก ข

สมบัติทั่วไปของผงซิงค์ออกไซด์ (Nano Materials Technology Co., Ltd., Thailand)

Product name	ZoNoP (Zinc Oxide Nano Particles)
Molecular formula	ZnO
Molecular weight	81.39 g/mole
Appearance	White powder
Crystal phase	Zincite (hexagonal)
Purity	99.5 % +
Average particles size	20-40 nm
Specefic surface area	26.22 m ² /g
Bulk density	0.14 g/cc
True density	5.6 g/cc
P.H.	7-8
Melting point	1975 °C

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวนพรัตน์ รุ่งเรืองวิริยะ เกิดเมื่อวันที่ 7 กรกฎาคม พ.ศ. 2529 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาในระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนศึกษานารี และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2550 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551 และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2553

ผลงานทางวิชาการระดับชาติ

Nopparat Rungruangviriya, Nisanart Traiphol and Rakchart Traiphol. "Preparation and optical properties of polydiacetylene vesicles with ZnO nanoparticle core," Proceedings of the 27th MST Annual Conference, 20-22 January 2010, Samui, Thailand.