

การควบคุมพฤติกรรมการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร
พอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์(II)ไอออน/ซิลิกา โดยการปรับเปลี่ยนค่าพีเอช



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CONTROLLING COLOR-TRANSITION BEHAVIOR OF POLYDIACETYLENE/ZINC(II)ION/SILICA
NANOCOMPOSITE
BY VARYING pH



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Ceramic Technology
Department of Materials Science
Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic Year 2019
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมพฤติกรรมการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบ ระดับนาโนเมตรพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์(II)ไอออน/ซิลิกา โดยการปรับเปลี่ยนค่าพีเอช
โดย	นายชนะชล แก้วลีน
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเซรามิก
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.นิศานาถ ไตรผล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.รักษชาติ ไตรผล

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กานต์ เสรีวัลย์สถิตย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.นิศานาถ ไตรผล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร.รักษชาติ ไตรผล)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.อภิรัฐ ชีรภาพิเศษพงษ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนทรี แสงจันทร์)

ชนะเลิศ แก้วรัตน์ : การควบคุมพฤติกรรม การเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโน
เมตรพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์(II)ไอออน/ซิลิกา โดยการปรับเปลี่ยนค่าพีเอช. (

CONTROLLING COLOR-TRANSITION BEHAVIOR OF

POLYDIACETYLENE/ZINC(II)ION/SILICA NANOCOMPOSITE BY VARYING pH) อ.ที่

ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.นิศานาถ ไตรผล, อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ. ดร.รักษชาติ ไตรผล

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการเตรียมวัสดุเชิงประกอบชนิดใหม่ของพอลิไดแอเซทิลีนเวสเซล
กับอนุภาคนาโนซิลิกาโดยมีการเติมซิงก์(II)ไอออนร่วมด้วย และทำการปรับเปลี่ยนค่าพีเอชในการ
เตรียม สำหรับประยุกต์ในเทคโนโลยีด้านการตรวจวัด โดยใช้ปริมาณอนุภาคนาโนซิลิการ้อยละ 10
โดยน้ำหนักของไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ 10,12-เพนตะโคซะไดโนอิกแอซิด อนุภาคนาโนซิลิกา
และซิงก์(II)ไอออนในวัสดุเชิงประกอบจะทำหน้าที่เป็นซัสเตรตให้ไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ยึดเกาะ
และจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ เมื่อทำการฉายแสงยูวีเพื่อให้เกิดกระบวนการพอลิเมอไรเซชันจะ
เกิดเป็นวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์(II)ไอออน/ซิลิกา ที่มีสีน้ำเงินได้
และเมื่อศึกษาพฤติกรรม การตอบสนอง โดยการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับการกระตุ้นจากอุณหภูมิ ความ
เป็นกรด - เบส กรดและเบสอินทรีย์ พบว่าวัสดุเชิงประกอบมีพฤติกรรม การเปลี่ยนสีที่แตกต่างไป
จากพอลิไดแอเซทิลีน/ซิลิกา อย่างมาก ในขณะที่ฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิลิกา เกิดการเปลี่ยนสี
แบบผันกลับไม่ได้ โดยเปลี่ยนเป็นสีแดงที่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส ฟิล์มวัสดุเชิง
ประกอบพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์(II)ไอออน/ซิลิกา จะเกิดการเปลี่ยนสีเป็น 2 ระดับเมื่ออุณหภูมิ
เพิ่มขึ้น คือกระบวนการผันกลับได้ในช่วงอุณหภูมิห้องถึง 170 องศาเซลเซียส และเกิดกระบวนการ
ผันกลับไม่ได้ที่อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียสขึ้นไป สำหรับการศึกษากิจกรรมการเปลี่ยนสีเมื่อ
ได้รับการกระตุ้นจากความเป็นกรด - เบส พบว่าวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดแอเซทิ
ลีน/ซิงก์(II)ไอออน/ซิลิกา เปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงที่ค่าพีเอชประมาณ 3.04 และ 11.98
ตามลำดับ และเมื่อทำการศึกษากิจกรรมการตอบสนองต่อกรดและเบสอินทรีย์พบว่าวัสดุเชิงประกอบระดับ
นาโนเมตรพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์(II)ไอออน/ซิลิกา สามารถตอบสนอง โดยการเปลี่ยนสีกับกรดซาลี
ซิลิกและออกทิลเอมีนได้

สาขาวิชา เทคโนโลยีเซรามิก

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6072040623 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEYWORD: polydiacetylene, color-transition, sensor, self-assembling

Chanachon Kaewlin : CONTROLLING COLOR-TRANSITION BEHAVIOR OF POLYDIACETYLENE/ZINC(II)ION/SILICA NANOCOMPOSITEBY VARYING pH.

Advisor: Assoc. Prof. Dr. NISANART TRAIIPHOL Co-advisor: Assoc. Prof. Dr. Rakchart Traiphol

This research presents a method to prepare a new class of polydiacetylene vesicle and silica (SiO_2) nanocomposite by incorporating Zn^{2+} and varying pH for sensing applications. The concentration of SiO_2 nanoparticles is 10 wt% of the diacetylene monomer, 10,12-pentacosadiynoic acid (PCDA). The SiO_2 nanoparticles and Zn^{2+} function as substrates for self-assembling of PCDA monomers in an ordered arrangement. After UV irradiation to induce polymerization, poly(PCDA)/ Zn^{2+} / SiO_2 nanocomposites with blue color can be prepared. The colorimetric responses of the nanocomposites to temperature, pH and organic acid/base are rather different compared to those of the polydiacetylene/ SiO_2 nanocomposites. While the polydiacetylene/ SiO_2 nanocomposite film exhibit irreversible color transition at 60°C , the poly(PCDA)/ Zn^{2+} / SiO_2 nanocomposite films show two-step color transition. Reversible process ranges from room temperature to 170°C and the irreversible process occurs over 175°C . For colorimetric response to pH, it is found that the poly(PCDA)/ Zn^{2+} / SiO_2 nanocomposites exhibit the color transition from blue to purple at pH3.04 and pH11.98. Study of the response to organic acid and base show that the poly(PCDA)/ Zn^{2+} / SiO_2 nanocomposites exhibit colorimetric response to salicylic acid and octylamine.

Field of Study: Ceramic Technology

Academic Year: 2019

Student's Signature

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความกรุณาช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ จากบุคคลและหน่วยงานที่ทำให้สามารถดำเนินงานวิจัยผ่านไปได้อย่างราบรื่น ดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.นิศานาถ ไตรผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และรองศาสตราจารย์ ดร.รักษชาติ ไตรผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งท่านทั้งสองกรุณามอบความรู้ คำแนะนำ ตลอดจนแนวทางในการดำเนินงานวิจัยและช่วยเหลือแก้ไขปัญหาต่าง ๆ อย่างดีมากมายโดยตลอด รวมไปถึงกรุณาให้คำปรึกษาและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินชีวิตอีกด้วย

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่กรุณาให้คำแนะนำเพื่อแก้ไขให้ งานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถูกต้องและมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านซึ่งได้มอบความรู้ทางวิชาการด้านวัสดุศาสตร์จนถึงระดับปริญญาโท รวมทั้งบุคลากรและเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ แก้ไข และอำนวยความสะดวกเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยและการดำเนินงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการศึกษาจากศูนย์ความเลิศทางด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ (PETROMAT) ซึ่งช่วยสนับสนุนการศึกษาจนถึงระดับปริญญาโท

ขอขอบคุณนักวิจัยและสมาชิกในกลุ่มวิจัยภายใต้การดูแลของอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ทั้งสองท่าน ที่ได้ให้คำปรึกษาในด้านวิชาการและช่วยเหลือจัดการในเรื่องต่าง ๆ ที่เอื้อให้งานวิจัยนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณเพื่อน พี่และน้อง ในภาควิชาวัสดุศาสตร์ ทั้งระดับปริญญาตรี โทและเอก ที่ให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษา และเป็นกำลังใจให้แก่กันในการทำงานวิจัย รวมถึงเพื่อน พี่และน้องกลุ่มอื่นที่คอยห่วงใยและเป็นกำลังใจให้ในระหว่างการศึกษาในระดับปริญญาโทนี้อย่างดีเสมอมาเช่นกัน

สุดท้ายนี้กราบขอบพระคุณบิดามารดา และสมาชิกทุกคนในครอบครัว ซึ่งเป็นกำลังใจสำคัญที่สุดที่ทำให้ประสบความสำเร็จ ต่อยช่วยเหลือและให้การสนับสนุนตั้งแต่แรกด้วยความรักและห่วงใยเสมอมา

ชนะชล แก้ววสิน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญรูป	1
สารบัญตาราง.....	6
บทที่ 1 บทนำ	7
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	7
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	9
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	9
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	9
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	10
2.1 พอลิไดอะเซทิลีน (Polydiacetylene, PDA).....	10
2.2 สมบัติการเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล	12
2.2.1 การเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล เมื่อได้รับการรบกวนจากความร้อน	13
2.2.2 การเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล เมื่อได้รับการรบกวนจากกรด – เบส	15
2.2.3 การเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล เมื่อได้รับการรบกวนจากตัวทำละลาย.....	16
2.3 ซิงก์ออกไซด์ (ZnO).....	16
2.4 วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์(II)ไอออน/ซิงก์ออกไซด์ หรือ poly(PCDA)/Zn ²⁺ /ZnO.....	18
2.5 ซิลิกา (SiO ₂)	25

2.6	วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดอะแซทิสีน/ซิลิกา หรือ poly(PCDA)/SiO ₂	26
2.7	เทคนิคและหลักการที่ใช้ในการวิเคราะห์	28
2.7.1	เทคนิคอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-Vis spectroscopy).....	28
2.7.2	การวิเคราะห์ค่าศักย์ซีต้า (Zeta potential).....	29
2.7.3	การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายขนาดอนุภาค (Particle size distribution).....	30
2.7.4	เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Infrared spectroscopy).....	31
2.7.5	เทคนิครามานสเปกโทรสโกปี (Raman spectroscopy).....	32
2.7.6	เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometry).....	33
2.7.7	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM)	34
บทที่ 3	วิธีการดำเนินงานวิจัย	36
3.1	สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	36
3.2	แผนผังการดำเนินงานวิจัย	37
3.3	วิธีการเตรียมสารแขวนลอยของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn ²⁺ /SiO ₂	39
3.3.1	การเตรียมมอนอเมอร์ 10,12-เพนตะโคเซไดอินอิกแอซิด (Purified PCDA).....	39
3.3.2	การเตรียมสารแขวนลอยซิลิกา (SiO ₂ suspension).....	39
3.3.3	การเตรียมวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn ²⁺ /SiO ₂	39
3.4	วิธีการเตรียมฟิล์มวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn ²⁺ /SiO ₂	40
3.5	วิธีการศึกษาสมบัติและวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn ²⁺ /SiO ₂ ที่เตรียมด้วยค่าพีเอชที่แตกต่างกัน	40
3.5.1	วิเคราะห์สมบัติการดูดกลืนแสง (Absorbance).....	40
3.5.2	วิเคราะห์ประจุโดยรวมที่พื้นผิวของอนุภาคนาโนซิลิกา	41
3.5.3	วิเคราะห์ขนาดและการกระจายขนาดอนุภาค (Particle size distribution).....	41
3.5.4	วิเคราะห์สัณฐานวิทยา (Morphology)	41

3.5.5 การวิเคราะห์และศึกษาโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร	
poly(PCDA)/Zn ²⁺ /SiO ₂	42
<u>ส่วนที่ 1</u> วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างสายโซ่หลัก (backbone chain) และสายโซ่ข้าง (side chain).....	42
<u>ส่วนที่ 2</u> วิเคราะห์โครงสร้างและการจัดเรียงตัว	42
3.6 ศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร	
poly(PCDA)/Zn ²⁺ /SiO ₂ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ.....	43
3.6.1 พฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn ²⁺ /SiO ₂ ในรูปของสารแขวนลอย (suspension).....	43
3.6.2 พฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn ²⁺ /SiO ₂ ในรูปของฟิล์ม (nanocomposite films).....	43
3.6.3 ความเสถียรทางสีต่อความร้อนของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn ²⁺ /SiO ₂ เมื่อได้รับความร้อนและปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง ..	43
3.7 ศึกษาและเปรียบเทียบพฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรชนิดต่าง ๆ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ.....	44
3.7.1 วิธีการเตรียมและพฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรชนิดต่าง ๆ โดยใช้ 10,12-pentacosadiynoic acid หรือ PCDA เป็นมอนอเมอร์ตั้งต้น.....	44
3.7.2 วิธีการเตรียมและพฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรชนิดต่าง ๆ โดยใช้ 10,12-tricosadiynoic acid หรือ TCDA เป็นมอนอเมอร์ตั้งต้น.....	44
3.8 ศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร	
poly(PCDA)/Zn ²⁺ /SiO ₂ ต่อกรดและเบส.....	45
3.8.1 พฤติกรรมการเปลี่ยนสีต่อกรดและเบส	45
3.8.2 พฤติกรรมการเปลี่ยนสีต่อกรดและเบสอินทรีย์	45
<u>ส่วนที่ 1</u> การตอบสนองต่อกรดซาลิซิลิก (Salicylic acid).....	45
<u>ส่วนที่ 2</u> การตอบสนองต่อออกทิลเอมีน (Octylamine base).....	46

3.9	เปรียบเทียบพฤติกรรม การตอบสนอง โดยการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร ชนิดต่าง ๆ ต่อกรดและเบส.....	46
3.9.1	พฤติกรรม การเปลี่ยนสีต่อกรดและเบส	46
3.9.2	พฤติกรรม การเปลี่ยนสีต่อกรดและเบสอินทรีย์	47
บทที่ 4	ผลการวิจัยและอภิปรายผล	48
4.1	การศึกษาสมบัติและวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn ²⁺ /SiO ₂ ที่เตรียมด้วยค่าพีเอชต่างกัน	48
4.1.1	สมบัติการดูดกลืนแสง (Absorbance).....	48
4.1.2	ประจุโดยรวมที่พื้นผิวของอนุภาคนาโนซิลิกา (Zeta potential)	52
4.1.3	ขนาดและการกระจายขนาดอนุภาค (Particle size distribution)	52
4.1.4	สัณฐานวิทยา (Morphology).....	54
4.1.5	โครงสร้างระดับโมเลกุลของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn ²⁺ /SiO ₂	56
	<u>ส่วนที่ 1</u> วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างสายโซ่หลัก (backbone chain) และสายโซ่ข้าง (side chain).....	56
	<u>ส่วนที่ 2</u> วิเคราะห์โครงสร้างและการจัดเรียงตัว	59
	<u>ส่วนที่ 3</u> ระยะห่างระหว่างชั้นในโครงสร้าง.....	62
4.2	การศึกษาพฤติกรรม การตอบสนอง โดยการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn ²⁺ /SiO ₂ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ.....	64
4.2.1	พฤติกรรม การตอบสนอง โดยการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn ²⁺ /SiO ₂ ในรูปของสารแขวนลอย (suspension)	64
4.2.2	พฤติกรรม การตอบสนอง โดยการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn ²⁺ /SiO ₂ ในรูปของฟิล์ม (nanocomposite films).....	70
4.2.3	ความเสถียรทางสีต่อความร้อนของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn ²⁺ /SiO ₂ เมื่อได้รับความร้อนและปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง ..	72

4.3	พฤติกรรมกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรชนิดต่าง ๆ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	73
4.3.1	พฤติกรรมกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรชนิดต่าง ๆ โดยใช้ 10,12-pentacosadiynoic acid เป็นมอนอเมอร์ตั้งต้น..	74
4.3.2	พฤติกรรมกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรชนิดต่าง ๆ โดยใช้ 10,12-tricosadiynoic acid เป็นมอนอเมอร์ตั้งต้น	77
4.4	การศึกษาพฤติกรรมกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn ²⁺ /SiO ₂ ต่อกรดและเบส.....	81
4.4.1	พฤติกรรมกรรมการเปลี่ยนสีต่อกรดและเบส	81
4.4.2	พฤติกรรมกรรมการเปลี่ยนสีต่อกรดและเบสอินทรีย์	88
	<u>ส่วนที่ 1</u> การตอบสนองต่อกรดซาลิซิลิก (Salicylic acid).....	88
	<u>ส่วนที่ 2</u> การตอบสนองต่อออกทิลเอมีน (Octylamine base).....	91
4.5	การศึกษาและเปรียบเทียบพฤติกรรมกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรชนิดต่าง ๆ ต่อกรดและเบส.....	96
4.5.1	พฤติกรรมกรรมการเปลี่ยนสีต่อกรดและเบส	96
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	103
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	103
5.1.1	พฤติกรรมกรรมการตอบสนองการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn ²⁺ /SiO ₂ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	103
5.1.2	พฤติกรรมกรรมการตอบสนองการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn ²⁺ /SiO ₂ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช	104
5.1.3	พฤติกรรมกรรมการตอบสนองการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn ²⁺ /SiO ₂ ต่อกรดและเบสอินทรีย์	104
5.2	ข้อเสนอแนะ	105
	บรรณานุกรม.....	106
	ภาคผนวก.....	111

ประวัติผู้เขียน..... 119



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 การเกิดโครงสร้างแบบไบเลเยอร์เวสิเคิลและพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล	11
รูปที่ 2.2 กลไกการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลแบบกระบวนการผันกลับไม่ได้และกระบวนการผันกลับได้ เมื่อได้รับการรบกวนจากความร้อน	13
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ที่เกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้	14
รูปที่ 2.4 ปฏิสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นที่ผิวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่เติมเข้าไปในโครงสร้างของ PDA	18
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร HDDA, TCDA และ PCDA	20
รูปที่ 2.6 ภาพถ่ายแสดงการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 30 ถึง 90 องศาเซลเซียส	20
รูปที่ 2.7 พฤติกรรมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีต่อค่า pH ที่แตกต่างกันระหว่างวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn ²⁺ /ZnO และ PDA.....	21
รูปที่ 2.8 ชนิดของมอนอเมอร์ตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn ²⁺ /ZnO ที่มีผลในการเปลี่ยนสีเมื่อเติมกรดอินทรีย์ชนิดเดียวกัน.....	22
รูปที่ 2.9 อัตราในการเกิดวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรของ poly(TCDA)/Zn ²⁺ /ZnO.....	23
รูปที่ 2.10 พฤติกรรมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(TCDA)/Zn ²⁺ /ZnO.....	24
รูปที่ 2.11 พฤติกรรมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีต่อกรดเบสของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(TCDA)/Zn ²⁺ /ZnO.....	24
รูปที่ 2.12 การดูดซับของกลุ่มก้อน PCDA บนผิวของอนุภาคนาโนซิลิกาและการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของ PCDA บนผิวของอนุภาคนาโนซิลิกา	27
รูปที่ 2.13 แผนภาพแสดงปริมาณประจุและค่าศักย์ไฟฟ้าเทียบระยะทางจากพื้นผิวอนุภาค.....	29

รูปที่ 2.14 ค่าประจุที่ผิวของอนุภาคนาโนซิลิกาเมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าพีเอช	30
รูปที่ 2.15 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD-pattern) และตารางค่าองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ได้จากเครื่องมือวิเคราะห์ของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn ²⁺ /ZnO..	33
รูปที่ 3.1 แผนผังการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn ²⁺ /SiO ₂	37
รูปที่ 3.2 แผนผังการศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn ²⁺ /SiO ₂	38
รูปที่ 3.3 แผนผังการศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรชนิดต่าง ๆ เมื่อใช้หมอนอเมอร์ตั้งต้นและโลหะออกไซด์ที่แตกต่างกัน.....	38
รูปที่ 4.1 แบบจำลองกระบวนการเกิดวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn ²⁺ /SiO ₂ .	48
รูปที่ 4.2 ความเข้มข้นสัมพัทธ์และภาพถ่ายของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn ²⁺ /SiO ₂ ที่เตรียมที่พีเอชต่างกัน	50
รูปที่ 4.3 สเปกตรารการดูดกลืนแสงที่อุณหภูมิห้องของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn ²⁺ /SiO ₂ ที่เตรียมได้ที่ pH4 pH7 pH9 และ pH11	51
รูปที่ 4.4 แสดงการกระจายขนาดอนุภาคของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn ²⁺ /SiO ₂ โดยเตรียมที่ pH4 pH7 pH9 และ pH11	53
รูปที่ 4.5 ค่ากลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (median diameter) ของอนุภาคสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn ²⁺ /SiO ₂ โดยเตรียมที่ pH4 pH7 pH9 และ pH11	53
รูปที่ 4.6 ลักษณะสัญญาณวิทยาจาก FESEM ของอนุภาคนาโนซิลิกาและวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn ²⁺ /SiO ₂	55
รูปที่ 4.7 รามานสเปกตรัมของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn ²⁺ /SiO ₂ เมื่อมีเฟสสีน้ำเงิน	58
รูปที่ 4.8 รามานสเปกตรัมของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn ²⁺ /SiO ₂ เมื่อมีเฟสสีแดง.....	58

- รูปที่ 4.9 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ เมื่อมีเฟสสีน้ำเงิน 60
- รูปที่ 4.10 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ เมื่อมีเฟสสีแดง..... 60
- รูปที่ 4.11 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่มีเฟสสีน้ำเงิน..... 63
- รูปที่ 4.12 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่มีเฟสสีแดง..... 64
- รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 30 ถึง 90 °C และปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง 65
- รูปที่ 4.14 ค่าความยาวคลื่น ณ ตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุดและเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของ วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂..... 65
- รูปที่ 4.15 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 30 ถึง 90 องศาเซลเซียส 66
- รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ เมื่อได้รับความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิ 25 ถึง 230 องศาเซลเซียส และปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง 71
- รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้และแบบผันกลับไม่ได้ของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ เมื่อได้รับความร้อนและปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง จำนวน 10 ครั้ง..... 72
- รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายแสดงการเปลี่ยนสีและสเปกตรากการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร โดยใช้ PCDA เป็นมอนอเมอร์ตั้งต้น 74
- รูปที่ 4.19 ค่าความยาวคลื่น ณ ตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุดและเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของ วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรชนิดต่าง ๆ โดยใช้ PCDA เป็นมอนอเมอร์ตั้งต้น..... 75

- รูปที่ 4.20 ภาพถ่ายแสดงการเปลี่ยนสีและสเปกตรากการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร โดยใช้ TCDA เป็นมอนอเมอร์ตั้งต้น..... 79
- รูปที่ 4.21 ค่าความยาวคลื่น ณ ตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุดและเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร ที่ใช้ TCDA เป็นมอนอเมอร์ตั้งต้น 80
- รูปที่ 4.22 ภาพถ่ายพฤติกรรมตอบสนองโดยเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ เมื่อได้รับกระตุ้นโดยการปรับค่าพีเอช..... 82
- รูปที่ 4.23 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ เมื่อได้รับกระตุ้นโดยการปรับค่าพีเอชจาก pH1 ถึง pH13..... 85
- รูปที่ 4.24 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ เมื่อได้รับกระตุ้นโดยการปรับค่าพีเอชจาก pH1 ถึง pH13 86
- รูปที่ 4.25 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมตอบสนองโดยเปลี่ยนสีและเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ เมื่อมีการเติมกรดซาลิซิลิกที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน..... 88
- รูปที่ 4.26 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ เมื่อมีการเติมกรดซาลิซิลิกที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน..... 89
- รูปที่ 4.27 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมตอบสนองโดยเปลี่ยนสี, สเปกตรากการดูดกลืนแสงและเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(TCDA)/Zn²⁺/SiO₂..... 91
- รูปที่ 4.28 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมตอบสนองโดยเปลี่ยนสีและเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ เมื่อมีการเติมออกทิลเอมีนที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน..... 93
- รูปที่ 4.29 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ เมื่อมีการเติมออกทิลเอมีนที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน 94

- รูปที่ 4.30 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรม การตอบสนองโดยเปลี่ยนสี, สเปกตรากการดูดกลืนแสงและ
เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร
poly(TCDA)/Zn²⁺/SiO₂..... 95
- รูปที่ 4.31 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรม การตอบสนองโดยเปลี่ยนสีและเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของวัสดุ
เชิงประกอบระดับนาโนเมตรชนิดต่าง ๆ โดยใช้ PCDA เป็นมอนอเมอร์..... 97
- รูปที่ 4.32 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรชนิดต่าง ๆ โดยใช้ PCDA
เป็นมอนอเมอร์ 98
- รูปที่ 4.33 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรม การตอบสนองโดยเปลี่ยนสีและเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของวัสดุ
เชิงประกอบระดับนาโนเมตรชนิดต่าง ๆ โดยใช้ TCDA เป็นมอนอเมอร์..... 100
- รูปที่ 4.34 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรชนิดต่าง ๆ โดยใช้ TCDA
เป็นมอนอเมอร์ 102



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 เลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันในอินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn ²⁺ /ZnO.....	31
ตารางที่ 2.2 เลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันในรามานสเปกตรัมของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn ²⁺ /ZnO.....	32
ตารางที่ 2.3 ค่า d-spacing ของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn ²⁺ /ZnO ที่ได้จากการวิเคราะห์พีคที่แสดงใน XRD-pattern.....	34
ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย	36
ตารางที่ 4.1 เลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันแอลคิลและแอลคีนของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn ²⁺ /SiO ₂ ที่เตรียมที่ pH4 pH7 pH9 และ pH11.....	57
ตารางที่ 4.2 เลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันในอินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn ²⁺ /SiO ₂ ที่เตรียมที่พีเอชต่าง ๆ ในกรณีเฟสสีน้ำเงิน.....	61
ตารางที่ 4.3 เลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันในอินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn ²⁺ /SiO ₂ ที่เตรียมที่พีเอชต่าง ๆ ในกรณีเฟสสีแดง	61
ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างชั้นภายในชั้นโครงสร้างของสวัสดเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn ²⁺ /SiO ₂ ที่เตรียมที่ pH4 pH7 pH9 และ pH11.....	63

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

พอลิไดอะเซทิลีน (Polydiacetylene) หรือพีดีเอ (PDA) เป็นสารที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในระดับนาโนเมตรชนิดหนึ่งในกลุ่มของคอนจูเกตพอลิเมอร์ (conjugated polymer) ซึ่งได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางในการศึกษาและพัฒนาคุณสมบัติด้านต่าง ๆ เนื่องจากสามารถเตรียมได้ง่ายในตัวกลางที่เป็นน้ำ อีกทั้งยังใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) เพื่อให้เกิดกระบวนการพอลิเมอร์โดยแสง (photopolymerization) โดยไม่จำเป็นต้องอาศัยตัวเร่งในการทำปฏิกิริยา^{1, 2} วัสดุชนิดนี้มีสมบัติเด่นคือสามารถเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงเมื่อถูกรบกวนด้วยสิ่งกระตุ้นภายนอก^{3, 4} เช่น อุณหภูมิ^{1, 5-13} ตัวทำละลายอินทรีย์^{1, 3, 14-16} ความเป็นกรด – เบส¹⁷⁻²⁰ ด้วยเหตุผลนี้พอลิไดอะเซทิลีนจึงเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นวัสดุตรวจวัด (sensor) ในด้านต่าง ๆ ตามความต้องการได้ สำหรับงานวิจัยเพื่อพัฒนาและปรับปรุงสมบัติของพอลิไดอะเซทิลีนนั้น ได้มีการศึกษาหลากหลายแนวทาง โดยการปรับเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมี ถือได้ว่าเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถควบคุมพฤติกรรมเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีนได้อย่างมีประสิทธิภาพ^{1, 12} แต่วิธีการดังกล่าวมีกระบวนการเตรียมสารที่ค่อนข้างซับซ้อน ใช้เวลานาน อีกทั้งต้องใช้สารเคมีหรือตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีราคาสูง นอกจากนี้ยังมีอีกวิธีการหนึ่งที่สามารถปรับปรุงสมบัติของพอลิไดอะเซทิลีนได้ นั่นก็คือการเติมอนุภาคนาโนของซิงก์ออกไซด์ เพื่อให้เกิดเป็นวัสดุเชิงประกอบ โดยวิธีการนี้มีวิธีการเตรียมที่ง่าย สามารถควบคุมพฤติกรรมเปลี่ยนสีได้^{6, 8-11, 13-22} อีกทั้งค่าใช้จ่ายไม่สูงเหมาะสำหรับการพัฒนาไปสู่กระบวนการผลิตในระดับอุตสาหกรรมในอนาคต

วัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิไดอะเซทิลีนและอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมได้จะมีพฤติกรรมเปลี่ยนสีซึ่งมีความแตกต่างอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับพอลิไดอะเซทิลีนบริสุทธิ์ (pure PDA) โดยเป็นผลมาจากแรงกระทำระหว่างประจุ (ionic interaction) ภายในชั้นของโครงสร้างระหว่างซิงก์ไอออน (Zinc ion หรือ Zn^{2+}) บนพื้นผิวของซิงก์ออกไซด์ (Zinc oxide หรือ ZnO nanoparticle) กับหมู่คาร์บอกซิเลตไอออน (carboxylate ion) ของพอลิเมอร์ โดยการยึดเกาะที่มีความแข็งแรงนี้ ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์เกิดการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิสูงกว่าพอลิไดอะเซทิลีนบริสุทธิ์และมีการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้ การควบคุมพฤติกรรมเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีนสามารถทำได้โดยการปรับเปลี่ยนชนิดของมอนอเมอร์โดยการเลือกใช้มอนอเมอร์ตั้งต้นที่มีส่วนหางที่ไม่ชอบน้ำ (alkyl hydrophobic tail) สั้นกว่าจะทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิต่ำกว่า นอกจากนี้การปรับเปลี่ยนระยะเวลาในการฉาย

แสงอัลตราไวโอเล็ตเพื่อให้เกิดกระบวนการพอลิเมอไรเซชันยังสามารถควบคุมพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบได้เช่นกัน โดยการฉายแสงที่ระยะเวลาานกว่าจะส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิต่ำกว่า¹⁰

การเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์ ทั้งในสภาวะที่เป็นกรดและเบสนั้น^{17, 19} ถือเป็นอีกพฤติกรรมที่มีความแตกต่างจากพอลิไดแอเซทิลีนบริสุทธิ์ โดยทั่วไปในกรณีของพอลิไดแอเซทิลีนบริสุทธิ์นั้นจะเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงเฉพาะในสภาวะที่เป็นเบส^{20, 23} ในขณะที่สภาวะเป็นกรดนั้นไม่เกิดการเปลี่ยนสีแต่จะเกิดการรวมกลุ่ม (agglomeration) ของอนุภาค จากการศึกษาที่ผ่านมา A. Chanakul และคณะ¹⁸ ได้ศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์ ต่อกรดอินทรีย์ที่มีโครงสร้างแตกต่างกันและทำการปรับเปลี่ยนชนิดของมอนอเมอร์ตั้งต้นที่มีความแตกต่างของความยาวสายโซ่อัลคิล (alkyl side chain) ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีที่มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนเมื่อตรวจวัดด้วยกรดอินทรีย์ชนิดเดียวกัน¹⁹

นอกจากนั้นแล้ว Y. L. Su และคณะ²⁴ ได้ทำการศึกษาสมบัติของ PDA โดยเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบกับอนุภาคระดับนาโนเมตรของซิลิกา (SiO_2) กลายเป็นวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดแอเซทิลีน/ซิลิกา (poly(PCDA)/ SiO_2) จากการศึกษาสมบัติการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรดังกล่าวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิพบว่ามีความไวต่อการเปลี่ยนสีเช่นเดียวกับ PDA กล่าวคือเริ่มเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงและเกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับไม่ได้เช่นเดียวกับ PDA เมื่อลดอุณหภูมิลงมาที่อุณหภูมิเริ่มต้น

จากสมบัติของซิลิกาที่สามารถทนสภาวะกรดได้มากกว่าซิงก์ออกไซด์ โดยซิลิกาสามารถทนได้ที่พีเอชประมาณ 4 หรือต่ำกว่าขึ้นอยู่กับโครงสร้าง^{25, 26} ส่วนซิงก์ออกไซด์สามารถทนได้ที่พีเอชประมาณ 6 ทำให้ซิลิกามีความน่าสนใจในการนำมาเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรระหว่างพอลิไดแอเซทิลีนและซิลิกา เพื่อใช้ในงานด้านการตรวจวัดในสภาวะที่มีความเป็นกรดสูง รวมถึงสามารถนำขึ้นรูปแบบ sol-gel ซึ่งต้องใช้สารละลายที่มีค่าพีเอชต่ำ นอกจากนี้ซิลิกายังมีสมบัติทางชีวภาพที่สำคัญ คือความเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อในร่างกาย (biocompatible) จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้ผู้วิจัยเลือกใช้ซิลิกาในการปรับปรุงสมบัติของพอลิไดแอเซทิลีน เพื่อให้สามารถใช้ประโยชน์จากวัสดุเชิงประกอบดังกล่าวได้ในช่วงการตรวจวัดที่กว้างมากยิ่งขึ้นและขยายการใช้งานได้หลากหลายมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามจากการศึกษาที่ผ่านมาก่อนหน้านี้พบว่าวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/ SiO_2 มีการเปลี่ยนสีแบบผันกลับไม่ได้ เมื่อทำการลดอุณหภูมิลงมาที่อุณหภูมิเริ่มต้น²⁴ แต่จากการศึกษาของ Traiphol N. และคณะ²² พบว่าซิงก์(II)ไอออนมีส่วนสำคัญในการ assemble

ของ PDA บนอนุภาคออกไซด์ อีกทั้งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรเกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจะทำการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรระหว่างพอลิไดแอเซทิลีนและซิลิกาโดยเติมซิงก์ไอออนร่วมด้วยเพื่อเพิ่มปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคนาโนของซิลิกาและพอลิไดแอเซทิลีน โดยผู้วิจัยมีความคาดหวังว่าวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมขึ้นได้นั้นจะมีสมบัติการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิที่มีความแตกต่างออกไปจากวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/SiO₂ ที่มีการศึกษามาก่อนหน้านี้ โดยวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ดังกล่าวจะสามารถเกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้และมีการเปลี่ยนสีภายใต้สภาวะความเป็นกรดที่แตกต่างไปจากวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/ZnO นอกจากนี้การควบคุมค่าพีเอชในขั้นตอนการเตรียมวัสดุเชิงประกอบจะเป็นการควบคุมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิให้เป็นไปตามที่ต้องการได้อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อเตรียมวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์(II)ไอออน/ซิลิกา
2. เพื่อศึกษาผลของค่าพีเอชที่ใช้ในการเตรียมต่อพฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์(II)ไอออน/ซิลิกา

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาสมบัติและพฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์(II)ไอออน/ซิลิกา เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ
2. ศึกษาสมบัติและพฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์(II)ไอออน/ซิลิกา เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช
3. ศึกษาสมบัติและพฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์(II)ไอออน/ซิลิกา ต่อกรดและเบสอินทรีย์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์(II)ไอออน/ซิลิกา ที่สามารถเกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้และสามารถควบคุมพฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีได้ มีความทนต่อสภาวะกรดสูงเหมาะสมสำหรับประยุกต์ใช้ในเทคโนโลยีการตรวจวัด

บทที่ 2

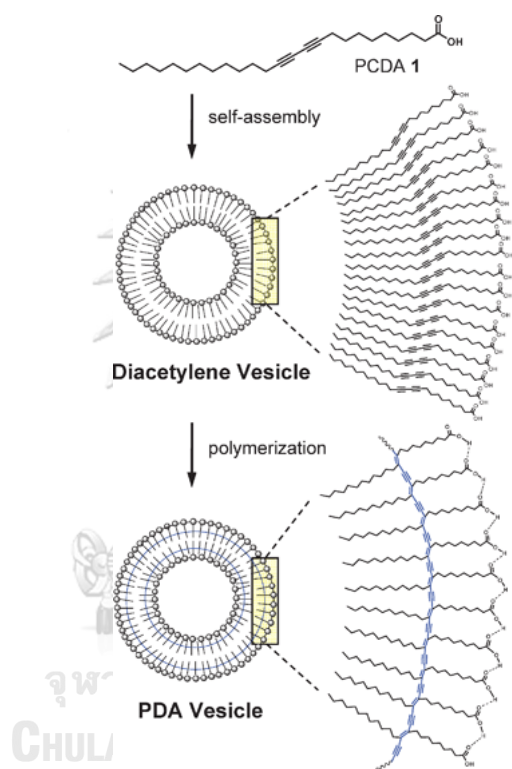
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิไดแอเซทิลีน (Polydiacetylene, PDA)

พอลิไดแอเซทิลีน เป็นสารที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในระดับนาโนเมตรในกลุ่มของคอนจูเกตพอลิเมอร์ (conjugated polymer) โดยภายในโครงสร้างจะมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (electron delocalization) ส่งผลให้มีการตอบสนองต่อสิ่งเร้าภายนอก จึงเหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุสำหรับตรวจวัด^{1, 2} เนื่องจากมีสมบัติการเปลี่ยนสีที่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า โดยในปี ค.ศ.1961 G. Wegner และคณะ²⁷ ได้ทำการค้นพบพอลิไดแอเซทิลีน (Polydiacetylene หรือ PDA) และได้มีการศึกษาการพัฒนาประสิทธิภาพในการตรวจวัดของสารชนิดนี้มาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน เนื่องจากสมบัติพื้นฐานที่มีความโดดเด่น^{1-5, 7, 28} ได้แก่ การเตรียมสารได้ง่ายในตัวกลางที่เป็นน้ำ โดยไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์มีการจัดเรียงตัวเองได้ (self-assembly) ในลักษณะเป็นเวสิเคิล การเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันภายใต้แสงยูวีหรือรังสีแกมมาเป็นการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงเมื่อได้รับการกระตุ้นจากสิ่งเร้าภายนอกไม่ว่าจะเป็นความร้อน ตัวทำละลายอินทรีย์และความเค็มเชิงกล

ไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์เป็นสารแอมฟิฟิลิก (amphiphilic molecule) ที่มีองค์ประกอบทั้งหมด 2 ส่วน คือส่วนหัวที่มีขั้ว (hydrophilic head) และส่วนหางที่ไม่มีขั้ว (hydrophobic tail) ซึ่งเมื่อมีการกระจายตัวน้ำจะมีการจัดเรียงตัวเป็นเวสิเคิลแบบสองชั้น (bilayer) โดยหันส่วนหัวที่ชอบน้ำออกทางด้านนอก ดังรูปที่ 2.1 หลังจากเกิดการพอลิเมอร์ไรเซชันแบบการเติม (1-4 addition polymerization) ด้วยแสงยูวีหรือรังสีแกมมาเป็นพอลิไดแอเซทิลีนซึ่งมีการเชื่อมต่อโครงสร้างภายในด้วยสายโซ่หลัก (backbone) ที่มีการจัดเรียงตัวของพันธะคู่และพันธะสามสลับกับพันธะเดี่ยวตลอดสายโซ่ ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในสายโซ่หลักได้ตลอดเวลาและทำให้เกิดการนำไฟฟ้าขึ้น โดยปกติแล้วพอลิไดแอเซทิลีนจะมีสีน้ำเงินที่มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตรและเมื่อถูกรบกวนด้วยสิ่งเร้าภายนอกจะเปลี่ยนเป็นสีแดงที่มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตร การเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียสและเป็นการเปลี่ยนสีแบบผันกลับไม่ได้ (irreversible process) เมื่อลดอุณหภูมิลงมาที่อุณหภูมิเริ่มต้น

การศึกษากลไกการเปลี่ยนสี (colorimetric mechanism) ของพอลิไดแอเซทิลีนนั้น มีการศึกษามากมายต่อเนื่อง แต่ก็ยังไม่สามารถหาข้อสรุปที่ชัดเจนได้ อย่างไรก็ตามทฤษฎีที่มีการค้นพบและมีการยอมรับอย่างกว้างขวางคือการเปลี่ยนสีที่เป็นผลมาจากการจัดเรียงตัวใหม่ของสายโซ่หลัก (conjugated backbone) และสายโซ่ข้าง (alkyl chain) ของโครงสร้างพอลิไดแอเซทิลีน^{2, 4, 17} โดยสายโซ่หลักที่มีหมู่คอนจูเกตในโครงสร้างเกิดการบิดตัว ส่งผลให้อิเล็กตรอนในสายโซ่เคลื่อนที่ได้ยากขึ้นจึงต้องใช้ระดับพลังงาน (HOMO-LUMO) เพิ่มขึ้นและส่งผลต่อการดูดกลืนแสงในช่วงพลังงานที่สูงขึ้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากน้ำเงินเป็นแดง



รูปที่ 2.1 การเกิดโครงสร้างแบบไบเลเยอร์เวสิเคิลและพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล²⁹

สำหรับในงานวิจัยนี้เลือกใช้สารที่เป็นมอนอเมอร์ตั้งต้นคือ 10,12-เพนตะโคเซไดออยน์ - อิกแอซิด (PCDA) มีสูตรโมเลกุลคือ $C_{25}H_{42}O_2$ ซึ่งเป็นหนึ่งในไดแอเซทิลีนลิปิดที่ได้รับความนิยมและสนใจนำมาใช้ในงานต่าง ๆ อย่างมาก จากโครงสร้างของ PCDA จะพบว่าหมู่ไดแอเซทิลีนซึ่งประกอบด้วยพันธะสาม 2 พันธะ ซึ่งจะอยู่ที่ตำแหน่ง 10 และ 12 ของโครงสร้างบริเวณส่วนหางของโครงสร้างที่เป็นสายโซ่แอลคิลจะมีสมบัติไฮโดรโฟบิก (hydrophobic) ซึ่งไม่ชอบน้ำและที่บริเวณส่วนหัวของโครงสร้างจะมีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล ($-COOH$) ซึ่งแสดงควมมีขั้วอยู่ทำให้สามารถรวมตัวเข้ากับน้ำได้หรือมีสมบัติไฮโดรฟิลิก (hydrophilic) จึงทำให้สามารถเตรียม PCDA ให้อยู่ในรูปของเวสิเคิลซึ่งกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในน้ำได้ง่าย โดยใช้กระบวนการอัลตราซอไนส์ซึ่งมี

ความเหมาะสมอย่างมากที่จะนำไปใช้เป็นเซนเซอร์ระดับโมเลกุล เนื่องจากส่วนใหญ่แล้วโมเลกุลเป้าหมายที่ต้องการตรวจวัดในงานด้านชีววิทยา เช่น โพรตีน คาร์โบไฮเดรต นิวคลีอิกแอซิด จะสามารถละลายได้ในน้ำเท่านั้น ดังนั้นความสามารถในการละลายน้ำ (water solubility) หรือสภาพเข้ากันได้กับน้ำ (water compatibility) จึงเป็นเกณฑ์สำคัญที่ใช้ในการออกแบบคอนจูเกตพอลิเมอร์เซนเซอร์ (conjugated polymer sensors)

2.2 สมบัติการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนเวลิเคิล

จุดเด่นของพอลิไดแอเซทิลีนที่มีความน่าสนใจเป็นอย่างมากคือสมบัติเรืองสีและการเปลี่ยนสีของวัสดุ พลังงานการกระตุ้นของอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยมากมาย อาทิเช่น สภาพการเกาะตัวตั้งต้นของมอนอเมอร์ การได้รับการรบกวนจากสิ่งกระตุ้นภายนอก เช่น ความร้อน ความเค้นเชิงกล ความเป็นกรด - เบส หรือตัวทำละลาย เป็นต้น สิ่งต่าง ๆ เหล่านี้ล้วนส่งผลต่อการเปลี่ยนสีของวัสดุทั้งสิ้น โดยปกติแล้วเมื่อพอลิไดแอเซทิลีนเวลิเคิลได้รับการรบกวนจากสิ่งกระตุ้นต่าง ๆ จะเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดง โดยจะมีค่าการดูดกลืนแสงมากที่สุดของรูปแบบสีน้ำเงิน (blue form) อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 620 ถึง 640 นาโนเมตร และรูปแบบสีแดง (red form) ในช่วงความยาวคลื่น 490 ถึง 540 นาโนเมตร ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการประเมินค่าการเปลี่ยนสีจึงมีการให้คำจำกัดความของการตอบสนองต่อสิ่งกระตุ้นในการเปลี่ยนสี (colorimetric response) ซึ่งเป็นเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของรูปแบบสีน้ำเงินไปเป็นรูปแบบสีแดง (%CR) โดยสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้³⁰

$$\%CR = [(PB_0 - PB)/PB_0] \times 100$$

$$PB = [A_{\text{blue}}/(A_{\text{blue}} + A_{\text{red}})] \times 100$$

โดยที่ PB คือ เปอร์เซ็นต์สีน้ำเงินสิ้นสุดหลังจากเกิดการเปลี่ยนสีแล้ว

PB₀ คือ เปอร์เซ็นต์สีน้ำเงินเริ่มต้น

A_{blue} คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่มากที่สุดในช่วงความยาวคลื่นของรูปแบบสีน้ำเงิน

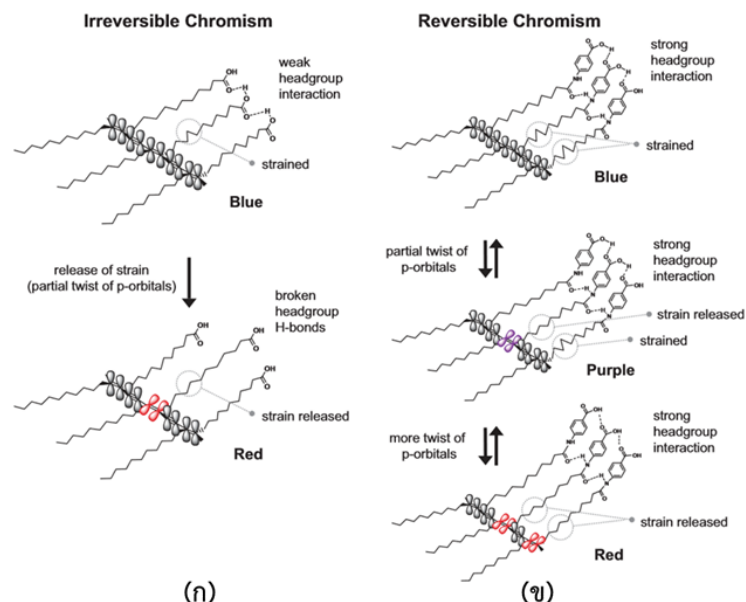
A_{red} คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่มากที่สุดในช่วงความยาวคลื่นของรูปแบบสีแดง

กลไกการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับการตอบสนองต่อสิ่งกระตุ้นเป็นผลมาจากโครงสร้างรูปโซ่หลักของคอนจูเกตพอลิเมอร์เกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น เกิดการรวมกลุ่มกันของโซ่ข้าง ทิศทางการจัดเรียงตัวเปลี่ยนไป เป็นต้น จึงทำให้เกิดความเค้นที่สายโซ่หลักและส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างขึ้น ดังนั้นจึงทำให้สถานะของอิเล็กทรอนิกส์ (electron states) และการดูดกลืนแสงเกิดการเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสีขึ้น ซึ่งความแตกต่างของพอลิไดแอเซทิลีนที่เป็นเฟสสีน้ำเงินและเฟสสีแดง

อยู่ที่ความแตกต่างของโครงสร้างโซ่หลักหรือความแตกต่างจากผลของ head group เช่น เกิดการบิดของพันธะส่งผลให้มุมพันธะของออร์บิทัลพี (p-orbitals) เกิดการเปลี่ยนแปลง นอกจากนี้การเติมอนุภาคในระดับนาโนเมตรเข้าไปในระบบเพื่อทำให้เกิดเป็นวัสดุเชิงประกอบขึ้น อาจทำให้โครงสร้างรูปโซ่หลักของคอนจูเกตพอลิเมอร์เกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลที่ไม่มีอนุภาคระดับนาโนเมตรอยู่ในระบบ เช่น โซ่ข้างของพอลิไดแอเซทิลีนเกิดการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบมากขึ้นหรือน้อยลง ทำให้อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นที่โซ่ข้างเกิดการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากมีอนุภาคระดับนาโนเมตรซึ่งทำหน้าที่เสมือนเป็นซัปสเตอร์ทให้ไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์มายึดเกาะอยู่ที่ผิว จึงส่งผลต่อโครงสร้างโซ่หลักของพอลิไดแอเซทิลีน เช่น ระยะคอนจูเกต (conjugation length) เพิ่มขึ้นหรือลดลง ทำให้สมบัติการดูดกลืนแสงเกิดการเปลี่ยนแปลงนำไปสู่การเปลี่ยนสีในระดับที่แตกต่างจากพอลิไดแอเซทิลีนบริสุทธิ์

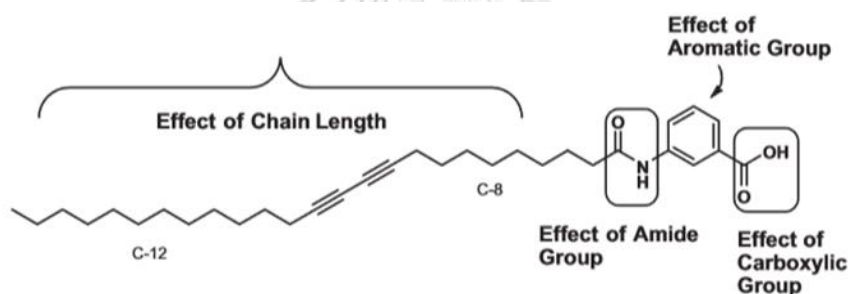
2.2.1 การเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล เมื่อได้รับการรบกวนจากความร้อน

ในบรรดาสีกระตุ้นต่าง ๆ ที่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลนั้น พบว่าการเปลี่ยนสีเนื่องจากได้รับอิทธิพลจากความร้อนมีความน่าสนใจและมีการศึกษาอย่างละเอียดถี่ถ้วน โดยการเปลี่ยนสีเนื่องจากความร้อนของพอลิไดแอเซทิลีนโดยส่วนมากมักจะเป็นกระบวนการเปลี่ยนสีแบบผันกลับไม่ได้ แต่ยังมีพอลิไดแอเซทิลีนบางชนิดที่สามารถเกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้เช่นกัน



รูปที่ 2.2 กลไกการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล (ก) แบบกระบวนการผันกลับไม่ได้ (reversible process) และ (ข) แบบกระบวนการผันกลับได้ (irreversible process) เมื่อได้รับการรบกวนจากความร้อน¹

สำหรับกลไกการเปลี่ยนสีแบบผันกลับไม่ได้ของพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล เมื่อได้รับอิทธิพลจากความร้อนอันตรกิริยาที่ head group เช่น การเกิดพันธะไฮโดรเจนเชื่อมระหว่าง head groups ที่อยู่ติดกัน มีบทบาทสำคัญในการควบคุมการจัดเรียงตัวของโมเลกุลของสายโซ่เมทิลีนของพอลิไดแอเซทิลีน ซึ่งอาจเกิดการจัดเรียงตัวอย่างบิดเบี้ยวผิดปกติขึ้นได้ในระหว่างการเกิดกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน จึงส่งผลให้เกิดความเครียดเชิงกลขึ้นมา ซึ่งพันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่าง head groups ที่อยู่ติดกันของพอลิไดแอเซทิลีนค่อนข้างอ่อน ดังนั้นเมื่อพอลิไดแอเซทิลีนได้รับการกระตุ้นจากความร้อนที่อุณหภูมิสูง จะมีการปลดปล่อยความเครียดเชิงกลออกมาและทำให้พันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่าง head group เกิดการแตกออก ส่งผลให้ออร์บิทัลพีที่สายโซ่หลักที่มีโครงสร้างเป็นแบบคอนจูเกตเกิดการบิดตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ก) ระยะคอนจูเกตจึงลดลง ทำให้สถานะของอิเล็กตรอนและการดูดกลืนแสงเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยแถบวาเลนซ์ (valence band) จะต่ำลงและมีช่องว่างแถบพลังงานกว้างขึ้น ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนจากสีน้ำเงินเป็นสีแดง



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ที่เกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้¹

กลไกการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนแบบผันกลับไม่ได้ เมื่อได้รับการกระตุ้นจากความร้อน เช่น พอลิไดแอเซทิลีนที่สร้างขึ้นจากไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ ดังรูปที่ 2.3 เกิดเนื่องจากอันตรกิริยาที่ head groups มีความแข็งแรงมาก พันธะไฮโดรเจนที่ head groups ยังคงไม่แตกออกแม้จะได้รับการกระตุ้นจากความร้อนที่อุณหภูมิสูงก็ตาม โดยเมื่อมีการให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิหนึ่งซึ่งสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วง ความเครียดเชิงกลที่โซ่ข้างจะถูกปลดปล่อยออกมา เป็นสาเหตุให้การจัดเรียงตัวของออร์บิทัลพีที่สายโซ่หลักมีโครงสร้างเป็นแบบคอนจูเกตเกิดการบิดตัวไปบางส่วนและเมื่อมีการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้น พบว่ามีออร์บิทัลพีที่เกิดการบิดตัวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความยาวของสายโซ่หลักที่มีโครงสร้างแบบคอนจูเกตลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ข) จึงทำให้สถานะของอิเล็กตรอนและการดูดกลืนแสงเกิดการเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้สารละลายพอลิไดแอเซทิลีนเปลี่ยนเป็นสีแดงโดยไม่เกิดการแตกออกของพันธะไฮโดรเจนที่ head groups ขึ้น ความแตกต่างของพลังงานของพอลิไดแอเซทิลีนในสถานะที่เป็นเฟสสีน้ำเงินและ

สีแดงจึงมีเพียงแค่เล็กน้อย ส่งผลให้พอลิไดแอเซทิลีนสามารถเปลี่ยนจากเฟสสีแดงกลับเป็นเฟสน้ำเงินได้ง่าย เมื่อไม่ได้รับการกระตุ้นจากความร้อนแล้ว

สำหรับปัจจัยพื้นฐานที่ทำให้พอลิไดแอเซทิลีนมีความไวในการตอบสนองต่อสิ่งกระตุ้นทางความร้อน มี 3 ประการ¹ ได้แก่

1. ตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชันไดแอเซทิลีนและ head groups โดยพอลิไดแอเซทิลีนที่เตรียมขึ้นจากไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันไดแอเซทิลีนอยู่ใกล้กับ head groups จะมีความเสถียรในการเปลี่ยนสีต่ำกว่าหรือเปลี่ยนสีได้เร็วกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิไดแอเซทิลีนที่เตรียมขึ้นจากไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันไดแอเซทิลีนอยู่ที่ช่วงกลางหรือใกล้ช่วงกลางของสายโซ่แอลคิล

2. อันตรกิริยาที่ head groups ถ้าอันตรกิริยาที่ head groups แข็งแรงจะมีความไวในการเปลี่ยนสีน้อยกว่า เช่น พอลิไดแอเซทิลีนที่เตรียมจากไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่ head groups ไม่มีหมู่เอไมด์หรือหมู่คาร์บอกซิล จะเกิดการเปลี่ยนสีได้ไวกว่าพอลิไดแอเซทิลีนที่เตรียมได้จากไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่ head groups มีหมู่คาร์บอกซิลหรือหมู่เอไมด์ตามลำดับ

3. สภาพที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิไดแอเซทิลีน โดยปกติแล้วพอลิไดแอเซทิลีนที่เตรียมขึ้นที่อุณหภูมิสูงจะมีความเสถียรในการเปลี่ยนสีสูงกว่าเมื่อเทียบกับพอลิไดแอเซทิลีนที่เตรียมที่อุณหภูมิต่ำกว่า

นอกจากนี้การเติมอนุภาคระดับนาโนเมตรเพื่อให้เกิดเป็นวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร ยังส่งผลต่ออันตรกิริยาที่ head groups ด้วย เช่น พันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่าง head groups ของพอลิไดแอเซทิลีนที่อยู่ติดกันมีความแข็งแรงมากขึ้นหรือน้อยลง ดังนั้นเมื่อได้รับอิทธิพลจากความร้อนพันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่าง head groups ก็จะทำให้เกิดการแตกออกยากหรือง่ายมากขึ้น ระดับการปลดปล่อยความเครียดเชิงกลในสายโซ่ก็จะมีผลแตกต่างกันออกไป ส่งผลต่อความยากง่ายในการบิดตัวของออร์บิทัลพีที่สายโซ่หลัก และนำไปสู่กระบวนการเปลี่ยนแปลงระยะคอนจูเกตทำให้การดูดกลืนแสงและการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรเกิดการเปลี่ยนแปลงในระดับที่แตกต่างกันจากพอลิไดแอเซทิลีนที่บริสุทธิ์

2.2.2 การเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนเวลิเคิล เมื่อได้รับการรบกวนจากกรด - เบส

โครงสร้างของพอลิไดแอเซทิลีนเวลิเคิลในน้ำเป็นแบบไบเลเยอร์ (bilayer) โดยพบว่ามีหมู่คาร์บอกซิล ($-\text{COOH}$) อยู่บริเวณผิวด้านนอกและด้านใน สำหรับกลไกในการเปลี่ยนสี

ของพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลเมื่อมีการเพิ่มค่าความเป็นกรด - เบส เกี่ยวข้องกับการแตกออกของพันธะไฮโดรเจนที่หมู่คาร์บอกซิล²⁰ ทำให้เกิดแรงผลักระหว่างคาร์บอกซิเลตไอออน ($-\text{COO}^-$) ที่อยู่ติดกัน จึงส่งผลให้เกิดความไม่เป็นระเบียบของหมู่โซ่ข้าง (side chain) นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสายโซ่หลักที่มีโครงสร้างเป็นแบบคอนจูเกตและทำให้ระยะคอนจูเกตลดลง ส่งผลต่อสถานะของอิเล็กตรอนและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของโมเลกุลไปยังความยาวคลื่นที่สั้นกว่าจึงปรากฏให้เห็นเป็นสารละลายสีแดงขึ้น แต่การปรับค่าความเป็นกรด - เบส ให้มีสภาพความเป็นกรดจะไม่ส่งผลต่อสมบัติการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล สำหรับการเติมอนุภาคระดับนาโนเมตรเข้าไปในระบบคาดว่าจะส่งผลต่อความเป็นระเบียบของโซ่ข้างและโครงสร้างของสายโซ่หลัก ดังนั้นแล้วระยะคอนจูเกตจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงแตกต่างจากกรณีของพอลิไดแอเซทิลีนบริสุทธิ์ เมื่อได้รับการรบกวนจากความเป็นกรด - เบส

2.2.3 การเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล เมื่อได้รับการรบกวนจากตัวทำละลาย

การเปลี่ยนสีขึ้นอยู่กับสภาพของตัวทำละลายนั้นและโครงสร้างของไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์เมื่อใช้ตัวทำละลายหรือไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ต่างชนิดกันจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสีในระดับที่แตกต่างกันออกไป การเปลี่ยนสีเมื่อได้รับการรบกวนจากตัวทำละลายจะมีกลไกการเปลี่ยนสีที่คล้ายคลึงกับเมื่อได้รับการรบกวนจากความเป็นเบส³¹ โดยพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลจะเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลของตัวทำละลายที่ผิวร่วม (interface) เช่นเดียวกัน จึงส่งผลให้พันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่างหมู่คาร์บอกซิลเกิดการแตกออก ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบขึ้นที่หมู่โซ่ข้างและรบกวนความเป็นระนาบของสายโซ่หลักที่มีโครงสร้างเป็นแบบคอนจูเกตทำให้ระยะคอนจูเกตลดลงเป็นสาเหตุให้พอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลเกิดการเปลี่ยนสีเป็นสีแดงขึ้น

ในกรณีของการเตรียมวัสดุเชิงประกอบของพอลิไดแอเซทิลีนกับอนุภาคระดับนาโนเมตรที่เติมเข้าไปในระบบจะส่งผลให้พอลิไดแอเซทิลีนเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลของตัวทำละลายในระดับที่แตกต่างออกไปจากพอลิไดแอเซทิลีนที่ไม่มีการเติมอนุภาคระดับนาโนเมตร เช่น ทำให้พันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่างหมู่คาร์บอกซิลเกิดการแตกออกยากหรือง่ายมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลต่อการจัดเรียงตัวของโซ่ข้างและโครงสร้างของสายโซ่หลัก เป็นสาเหตุให้วัสดุเชิงประกอบเกิดการเปลี่ยนสีในระดับที่แตกต่างจากพอลิไดแอเซทิลีนที่บริสุทธิ์

2.3 ซิงก์ออกไซด์ (ZnO)

ซิงก์ออกไซด์ (ZnO)³² เป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะสังกะสี (Zn) มีมวลโมเลกุล 81.408 กรัมและเป็นแอมโฟเทอริกออกไซด์ (amphoteric oxide)

คือสามารถทำหน้าที่ได้ทั้งกรดและเบส โดยแทบจะไม่ละลายน้ำและแอลกอฮอล์ รูปผลึกของ ZnO สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ดังต่อไปนี้

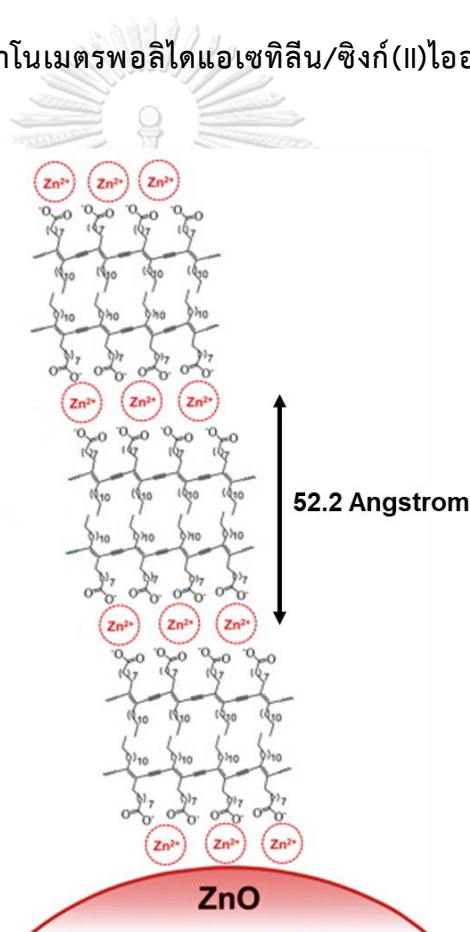
1. เฮกซะโกนอลเวิร์ทไซด์ (hexagonal wurtzite) เป็นโครงสร้างที่มีความเสถียรมากที่สุด ที่สภาวะปกติจึงเป็นรูปแบบที่พบได้มากที่สุด
2. คิวบิกซิงค์เบลน (cubic zincblend) เป็นรูปแบบที่สามารถสร้างขึ้นโดยการปลูกซิงก์ออกไซด์ขึ้นบนชั้นสเตรตด้วยโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก
3. คิวบิกร็อกซอลท์ (cubic rocksalt) พบได้ที่ความดันสูงประมาณ 10 จิกะปาสกาล (GPa) เท่านั้น

ซิงก์ออกไซด์ เป็นวัสดุที่มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำมีสมบัติทางไฟฟ้า (electronic) และสมบัติทางแสง (photonic) ที่ยอดเยี่ยมและมีสมบัติเด่นอีกต่าง ๆ มากมาย เช่น มีช่องว่างแถบพลังงาน (bandgap) กว้างโดยมีความกว้างประมาณ 3.37 อิเล็กตรอนโวลต์ มีความโปร่งใสสูง อิเล็กตรอนโมบิลิตีสูง มีสมบัติการเปล่งแสง (luminescence) ที่อุณหภูมิห้องที่ดีและนอกจากนี้ยังมีสมบัติด้านเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric) ที่ดีอีกด้วย เนื่องจากคุณสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้ ซิงก์ออกไซด์จึงมีความน่าดึงดูดใจเป็นอย่างมากที่จะนำไปประยุกต์ใช้เป็นงานต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็น เซนเซอร์ (sensors) เซลล์แสงอาทิตย์ (solar cells) อุปกรณ์เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric devices) ทำฟิล์มบางทรานซิสเตอร์และใช้เป็นไดโอดเปล่งแสง (light-emitting diodes) เป็นต้น

สมบัติการเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) ของซิงก์ออกไซด์สามารถทำให้เกิดขึ้นได้ง่ายโดยการแทนที่สังกะสีด้วยธาตุในหมู่ 3 เช่น อะลูมิเนียม แกลเลียมและอินเดียม หรืออาจแทนที่ออกซิเจนด้วยธาตุหมู่ 7 เช่น คลอรีนหรือไอโอดีน ส่งผลให้มีความสามารถในการนำไฟฟ้า เนื่องจากสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะมีอิเล็กตรอนที่เกินมาในโครงสร้างหรือเรียกว่า ดอนเนอร์ (donor) ซึ่งอิเล็กตรอนจะถูกดึงดูดไว้ด้วยแรง electrostatic อย่างอ่อน ๆ มีระดับพลังงานอยู่ในช่องว่างแถบและอยู่ใกล้กับชั้นของแถบการนำ (conduction band) เมื่อเกิดการกระตุ้นด้วยแสงหรือความร้อนอิเล็กตรอนที่เกินมาจะกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระขึ้นไปอยู่ในชั้นของแถบการนำ ทำให้ไม่เกิดโฮล (hole) ในแถบวาเลนซ์ การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดขึ้นส่งผลให้เกิดการนำไฟฟ้าขึ้นในวัสดุนั่นเอง นอกจากซิงก์ออกไซด์จะมีสมบัติการเป็นสารกึ่งตัวนำที่ดีแล้ว ยังมีสมบัติที่ดีในด้านอื่น ๆ อีกมากมาย ได้แก่ มีดัชนีหักเหแสงที่สูง มีค่าความจุความร้อนและสภาพการนำความร้อนสูง การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำ มีอุณหภูมิการหลอมเหลวสูง มีความเสถียรทางเคมี (chemical stability) สูง มีสมบัติในการยับยั้งการแบ่งเซลล์ของแบคทีเรียที่ดี

ด้วยเหตุผลนี้ซิงก์ออกไซด์จึงเป็นหนึ่งในสาระสำคัญในการใช้เป็นยาต้านแบคทีเรีย นอกจากนี้ผงซิงก์ออกไซด์มักถูกใช้เป็นสารเติม (additive) ลงในวัสดุและผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น พลาสติก แก้ว ซีเมนต์ ยาง สารหล่อลื่น สี กาว อาหาร แบตเตอรี่ เป็นต้น และจากสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้ จึงทำให้มีการนำผงซิงก์ออกไซด์ไปใช้ประโยชน์ในงานด้านต่าง ๆ มากมาย เช่น นำซิงก์ออกไซด์ไปประยุกต์ใช้ในไบโอเซนเซอร์ เนื่องจากซิงก์ออกไซด์มีความเข้ากันได้ทางชีววิทยา (biocompatibility) ที่สูง อีกทั้งไม่มีความเป็นพิษต่อร่างกายและมีจลนศาสตร์ในการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนที่เร็ว ดังนั้นจึงมีการนำซิงก์ออกไซด์มาใช้เป็นเมมเบรนที่มีการเลียนแบบโครงสร้างในธรรมชาติ (biomimic membrane) เพื่อปรับปรุงสมบัติของสารชีวโมเลกุล

2.4 วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์(II)ไอออน/ซิงก์ออกไซด์ หรือ poly(PCDA)/Zn²⁺/ZnO



รูปที่ 2.4 ปฏิสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นที่ผิวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่เติมเข้าไปในโครงสร้างของ PDA²²

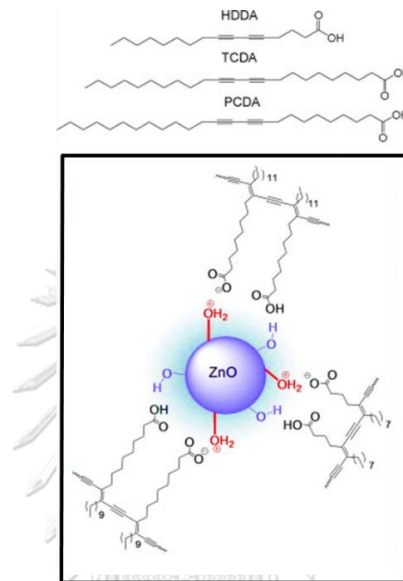
เนื่องจากสมบัติการเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีนที่มีลักษณะเฉพาะตัวและมีความน่าสนใจ ทำให้นักวิจัยเลือกศึกษาค้นคว้าและพัฒนาพอลิไดอะเซทิลีนมากยิ่งขึ้น เช่น การปรับแต่งโครงสร้างของพอลิไดอะเซทิลีนทำให้เกิดการเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิต่างกันออกไปจากเดิม การเติมอนุภาคซิงก์ออกไซด์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้ เป็นต้น เพื่อให้เกิดการตอบสนองต่อสิ่งกระตุ้น

ในลักษณะและระดับที่มีความแตกต่างออกไป การพัฒนาสมบัติของพอลิไดแอเซทิลีนโดยการเติมอนุภาคระดับนาโนเมตรของซิงก์ออกไซด์ (ZnO) เข้าไปในโครงสร้างเวสซิเคิลของพอลิไดแอเซทิลีน เพื่อให้เกิดเป็นวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์ ที่มีซิงก์ออกไซด์ทำหน้าที่เป็นตัวรองรับโดยที่หมู่คาร์บอกซิเลท ($-\text{COO}^-$) ที่ส่วนหัวของสายโซ่ข้างของพอลิไดแอเซทิลีนจะเข้าไปยึดเกาะกับประจุบวกบนพื้นผิวของซิงก์ออกไซด์ด้วยแรงระหว่างประจุ รวมไปถึงส่วนหัวของ PDA กับซิงก์ไอออน (Zn^{2+}) ระหว่างชั้นโครงสร้างภายในดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งแรงกระทำดังกล่าวที่เกิดขึ้นนี้ทำให้วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/ Zn^{2+} /ZnO มีสมบัติที่แตกต่างจาก PDA^{6, 8, 11, 13, 17-19, 22} อย่างชัดเจนและทำให้ระยะห่างระหว่างชั้น (d-spacing) ภายในโครงสร้างของ PDA มีความกว้างขึ้นจากการแทรกตัวของ Zn^{2+} ด้วยทำให้การจัดเรียงของพอลิไดแอเซทิลีนมีความเป็นระเบียบเรียบร้อยมากยิ่งขึ้น

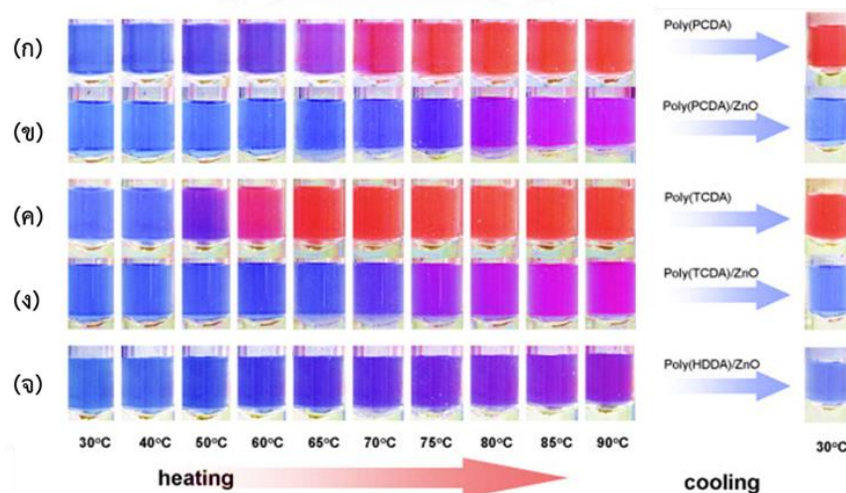
ในปี ค.ศ. 2011 Traiphol N. และคณะ¹¹ ได้ศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/ Zn^{2+} /ZnO กับพอลิไดแอเซทิลีนเวสซิเคิลบริสุทธิ์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยเตรียมวัสดุเชิงประกอบจากมอนอเมอร์ 10,12-Pentacosadiynoic acid (PCDA) และอนุภาคระดับนาโนเมตรซิงก์ออกไซด์ที่มีขนาดเฉลี่ยประมาณ 65 นาโนเมตร เมื่อเพิ่มอุณหภูมิพบว่าวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/ Zn^{2+} /ZnO เกิดการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิสูงกว่าพอลิไดแอเซทิลีนเวสซิเคิลบริสุทธิ์ โดยเริ่มเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงที่อุณหภูมิประมาณ 90 องศาเซลเซียสและสามารถเกิดกระบวนการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้ (reversible process) เมื่อลดอุณหภูมิลงมาที่อุณหภูมิห้อง อีกทั้งเมื่อทำการทดสอบในรูปแบบฟิล์มบางพบว่าวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/ Zn^{2+} /ZnO จะเกิดการเปลี่ยนสีแบบ 2 ชั้น คือชั้นแรกเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงและสามารถเกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้ที่อุณหภูมิประมาณ 90 และ 100 องศาเซลเซียส ในตัวกลางที่เป็นน้ำและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ตามลำดับ ชั้นที่สองเกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับไม่ได้ โดยจะเปลี่ยนจากสีม่วงไปเป็นสีแดงที่อุณหภูมิประมาณ 145 องศาเซลเซียส

ในปี ค.ศ. 2013 Chanakul A. และคณะ⁶ ได้ศึกษาผลของความยาวของสายโซ่แอลคิลของมอนอเมอร์ (ซึ่งประพอดิตัวเป็นสายโซ่ข้างของพอลิเมอร์) ที่ใช้เตรียมวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร Poly(PCDA)/ Zn^{2+} /ZnO เกิดการเปลี่ยนสีได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าพอลิไดแอเซทิลีนบริสุทธิ์ที่เตรียมจากมอนอเมอร์ชนิดเดียวกัน นอกจากนี้ยังพบว่าสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร Poly(PCDA)/ Zn^{2+} /ZnO มีสมบัติการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้เมื่อลดอุณหภูมิลงมาที่อุณหภูมิห้องและวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากมอนอเมอร์ที่มีความยาวของสายโซ่แอลคิลสั้นกว่า

จะเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิต่ำกว่า ทั้งนี้เนื่องจากแรงดิสเพอร์ชัน (dispersion interaction) ภายในพอลิไดแอเซทิลีนที่อยู่ในนาโนคอมโพสิตลดลง โดยรูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของสายโซ่แอลคิลที่ถูกศึกษา ในงานวิจัยนี้และรูปที่ 2.6 แสดงพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนที่มีขนาดสายโซ่ต่างกัน นอกจากนี้การปรับเปลี่ยนเวลาที่ใช้ในการเกิดพอลิเมอร์เชนของวัสดุเชิงประกอบก็สามารถควบคุมระดับอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนสีได้และรวมไปถึงการผันกลับของสีได้อีกเช่นเดียวกัน

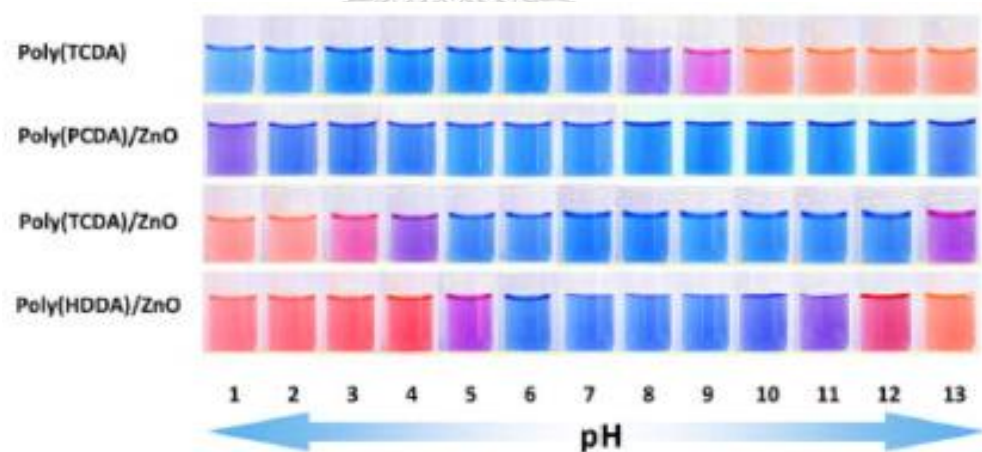


รูปที่ 2.5 โครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร 5,7-hexadecadiynoic acid (HDDA), 10,12-tricosadiynoic acid (TCDA) และ 10,12-pentacosadiynoic acid (PCDA)⁶



รูปที่ 2.6 ภาพถ่ายแสดงการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร (ก) poly(PCDA), (ข) poly(PCDA)/Zn²⁺/ZnO, (ค) poly(TCDA), (ง) poly(TCDA)/Zn²⁺/ZnO และ(จ) poly(HDDA)/Zn²⁺/ZnO เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 30 ถึง 90 องศาเซลเซียส⁶

โดยปกติแล้ว PDA จะเกิดการเปลี่ยนสีในช่วง pH สูง (เบส)²⁰ แต่สำหรับวัสดุเชิงประกอบสามารถเกิดการเปลี่ยนสีได้ทั้งในสภาวะที่เป็นกรดและเป็นเบส ดังแสดงในงานวิจัยปี ค.ศ. 2014 Chanakul A. และคณะ¹⁷ ที่ศึกษาการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบต่อค่า pH เปรียบเทียบกับ PDA ในสภาวะที่เป็นกรดวัสดุเชิงประกอบเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดง เช่นเดียวกับสภาวะที่เป็นเบสโดยเกิดการเปลี่ยนสีที่ค่า pH สูงกว่า PDA นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมวัสดุเชิงประกอบให้เกิดการเปลี่ยนสีที่ระดับต่าง ๆ ได้ด้วยการเลือกใช้มอนอเมอร์ที่มีความยาวสายโซ่อัลคิลต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.7 สำหรับกลไกการเปลี่ยนสีที่สภาวะกรดและเบสของวัสดุเชิงประกอบนั้นพบว่าการละลายของอนุภาค ZnO มีความเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนสีโดยในสภาวะที่เป็นกรดอนุภาค ZnO จะเริ่มเกิดการละลายที่ pH ประมาณ 6.8 ซึ่งเป็นการทำลายแรงระหว่างประจุที่ส่วนหัวของ PDA ยึดเกาะกับประจุบวกบนพื้นผิวของอนุภาค ZnO ดังนั้นจึงทำให้เกิดแรงผลักระหว่างประจุของหมู่ $-COO^-$ ด้วยกันเองส่งผลให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของสายโซ่ข้างและสายโซ่หลักทำให้เกิดการเปลี่ยนสี สำหรับการเปลี่ยนสีที่สภาวะเบสเริ่มจากไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เข้าไปดึงโปรตอน (H^+) จากหมู่คาร์บอกซิล ($-COOH$) ที่ส่วนหัวของ PDA จึงเปลี่ยนเป็นหมู่ $-COO^-$ เกิดการผลักกันระหว่างประจุลบที่ส่วนหัวทำให้ส่วนหางเกิดการขยับและเกิดการการจัดเรียงตัวใหม่อย่างต่อเนื่องไปยังสายโซ่หลัก จึงนำไปสู่การเปลี่ยนสีโดยพบว่าที่ประมาณ pH13 จะเกิดการละลายของ ZnO ร่วมด้วย

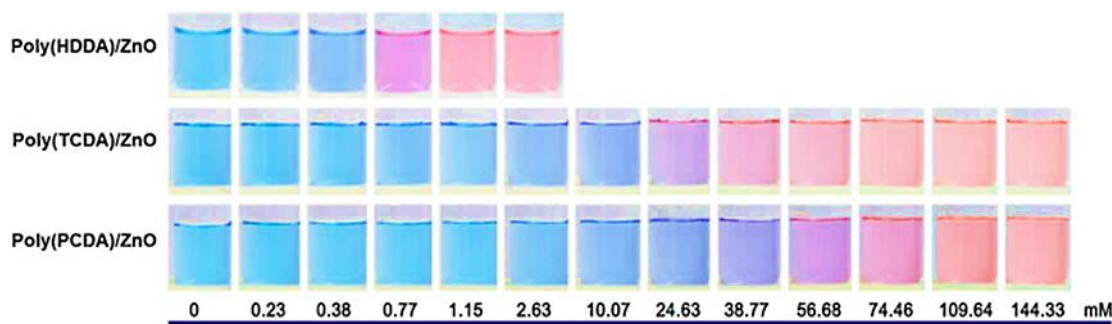


รูปที่ 2.7 พฤติกรรมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีต่อค่า pH ที่แตกต่างกันระหว่างวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/ZnO และ PDA¹⁷

ในปี ค.ศ. 2016 Chanakul A. และคณะ⁶ ได้ศึกษาการใช้วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์ เป็นตัวตรวจวัดสารจำพวกกรดอินทรีย์ที่มีโครงสร้างทางเคมีและค่าคงที่ในการแตกตัวของกรด (K_a) แตกต่างกัน โดยใช้มอนอเมอร์สามชนิดที่มีความยาวสายโซ่อัลคิล

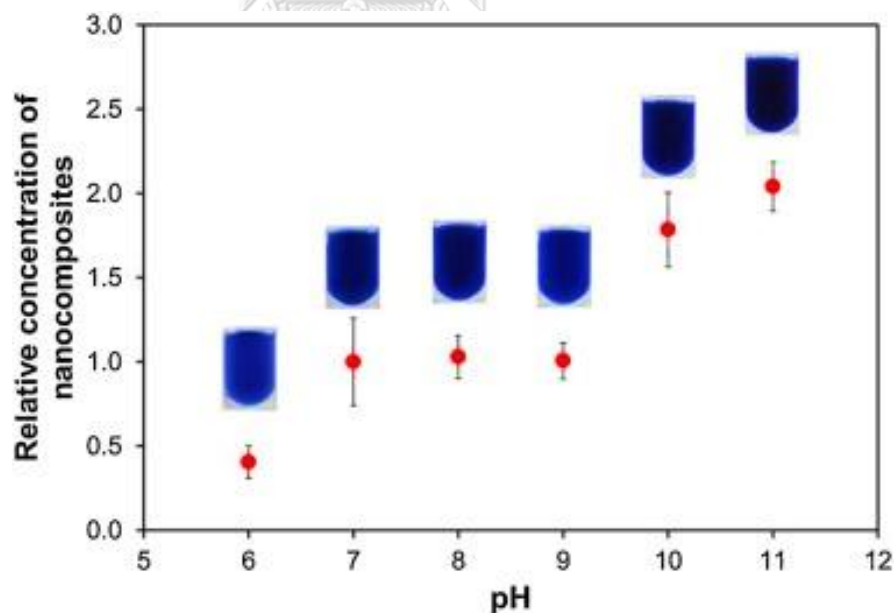
แตกต่างกันในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ ได้แก่ 5,7-Hexadecadiynoic acid (HDDA) 10,12-Tricosadiynoic acid (TCDA) และ 10,12-Pentacosadiynoic acid (PCDA) พบว่า PDA ที่เตรียมจากมอนอเมอร์ที่มีความยาวสายโซ่อัลคิลที่สั้นกว่าจะเกิดการเปลี่ยนสีต่อกรดอินทรีย์ชนิดเดียวกันที่ความเข้มข้นต่ำกว่าซึ่งเป็นผลมาจากความแข็งแรงภายในโครงสร้างของ PDA เอง ดังรูปที่ 2.8 นอกจากนี้ยังพบว่าความสามารถในการแตกตัวและโครงสร้างของกรดมีผลต่อการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบอย่างมีนัยสำคัญ โดยวัสดุเชิงประกอบมีความไวในการตอบสนองต่อกรดที่มีค่า K_a สูงกว่า แต่เมื่อกรดมีค่า K_a เท่ากัน ความยาวสายโซ่ของกรดอินทรีย์จะเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีในระดับที่แตกต่างกัน โดยกรดที่มีความยาวมากกว่าจะทำให้วัสดุเชิงประกอบเกิดการเปลี่ยนสีที่ความเข้มข้นต่ำกว่าซึ่งเป็นผลมาจากการแทรกตัวของส่วนหางของกรดเข้าไปในชั้นโครงสร้างของ PDA ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของสายโซ่และเกิดการเปลี่ยนสี ในทางกลับกันกรดอินทรีย์ที่มีโครงสร้างแบบกิ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนสีที่ความเข้มข้นสูงขึ้นเนื่องจากโครงสร้างลักษณะนี้จะเป็นตัวขัดขวางไม่ให้โมเลกุลของกรดแทรกตัวเข้าไปในชั้นโครงสร้างของ PDA ได้

ในปี ค.ศ. 2017 Traiphol N. และคณะ²² ได้ทำการศึกษาการเกิดวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์ โดยใช้มอนอเมอร์ชนิด 10,12-Tricosadiynoic acid (TCDA) และ 10,12-Pentacosadiynoic acid (PCDA) โดยจากการศึกษาสามารถพิสูจน์ได้ว่ามีซิงก์(II)ไอออนจากอนุภาคนาโนของซิงก์ออกไซด์ในสารละลายและพบการเพิ่มขึ้นของค่า d-spacing ในชั้นของวัสดุเชิงประกอบโดยเป็นการบ่งบอกถึงการแทรกตัวของซิงก์ไอออนในระหว่างชั้นของ PDA ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดปฏิสัมพันธ์ที่แข็งแรงระหว่างส่วนหัวของ PDA และอนุภาค ZnO ทำให้สามารถตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้



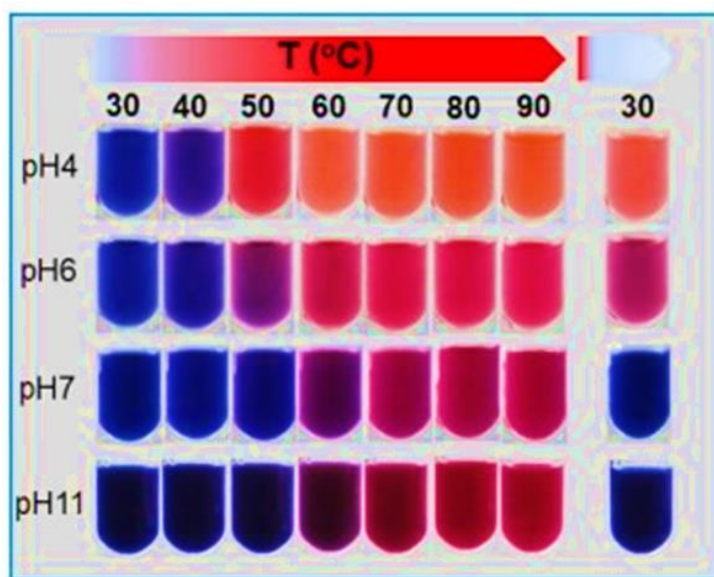
รูปที่ 2.8 ชนิดของมอนอเมอร์ตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/ZnO ที่มีผลในการเปลี่ยนสีเมื่อเติมกรดอินทรีย์ชนิดเดียวกันในระดับที่แตกต่าง¹⁷

นอกจากนั้นแล้วในปี ค.ศ. 2019 Seetha S. และคณะ³³ ได้ศึกษาการควบคุมพฤติกรรม การเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์(II)ไอออน/ ซิงก์ออกไซด์ โดยการปรับเปลี่ยนค่าพีเอช จากการศึกษาพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้นั้น จะมีปริมาณการเกิดวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรเพิ่มขึ้น เมื่อค่าพีเอชที่ใช้ในการเตรียมสูงขึ้น ซึ่งสามารถสังเกตได้จากวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้มีสีน้ำเงินเข้มขึ้น ดังรูปที่ 2.9 และเมื่อนำวัสดุ ดังกล่าวไปศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนสีต่อการตอบสนองของอุณหภูมิพบว่าวัสดุเชิงประกอบ ระดับนาโนเมตร poly(TCDA)/Zn²⁺/ZnO สามารถเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้เมื่อค่าพีเอชที่ใช้ใน การเตรียมอยู่ที่ประมาณ pH7 (เริ่มเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส) เนื่องจาก มีการละลายของ ZnO ไปเมื่อค่าพีเอชของระบบประมาณ 6.8 ส่งผลให้ที่ pH ต่ำกว่า 7 หรือในสภาวะ ที่วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรมีความเป็นกรดยังสามารถเตรียมสารดังกล่าวให้เป็นวัสดุ เชิงประกอบระดับนาโนเมตรได้ แต่เมื่อนำไปทดสอบกับอุณหภูมิพบว่าวัสดุดังกล่าวเกิดการเปลี่ยนสี แบบไม่ผันกลับ ดังรูปที่ 2.10 นอกจากนี้ได้มีการศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิ เมื่อ เตรียมวัสดุเชิงประกอบในรูปของฟิล์มบาง โดยจากการศึกษาพบว่าวัสดุเชิงประกอบในสภาวะของสาร ที่มีความเป็นเบสจะเริ่มเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิประมาณ 90 องศาเซลเซียสและเกิดการเปลี่ยนสีแบบ ผันกลับได้เมื่ออุณหภูมิสูงถึง 120 องศาเซลเซียส

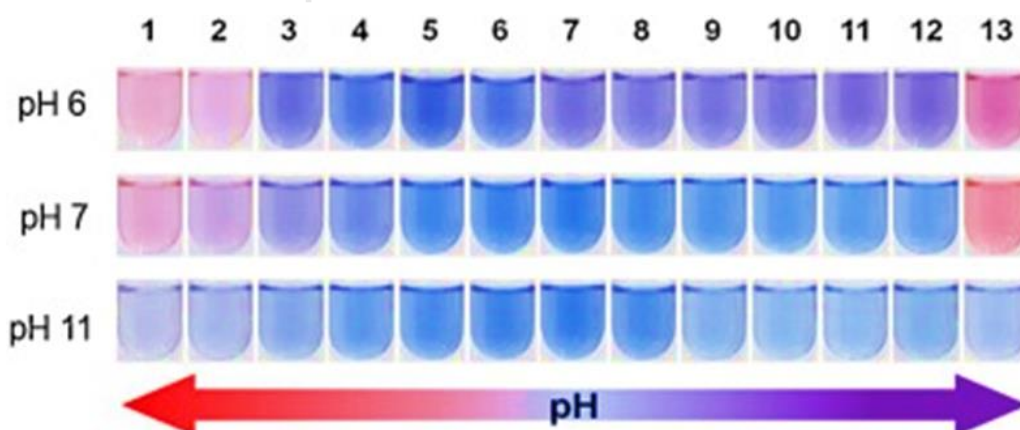


รูปที่ 2.9 อัตราในการเกิดปริมาณวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรของ poly(TCDA)/Zn²⁺/ZnO โดยเตรียมได้ที่ค่าพีเอชแตกต่างกัน³³

นอกจากนั้นเมื่อทำการศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อกรดและเบส พบว่าเมื่อมีการปรับค่าพีเอชของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(TCDA)/Zn²⁺/ZnO ที่เตรียมได้ที่พีเอช 7 จะเริ่มเปลี่ยนสีที่ประมาณพีเอช 2 และ 13 ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งเป็นการบ่งบอกว่าวัสดุเชิงประกอบดังกล่าวมีความเสถียรต่อกรดและเบสที่สูงมากหรืออาจจะกล่าวได้ว่าวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรที่เตรียมได้นั้นมีความทนกรดและเบสสูงมาก จึงเหมาะสำหรับนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุตรวจวัดในสถานะที่มีความเป็นกรดและเบสสูง



รูปที่ 2.10 พฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(TCDA)/Zn²⁺/ZnO ที่เตรียมได้ที่ค่าพีเอชแตกต่างกัน³³



รูปที่ 2.11 พฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อกรดและเบสของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(TCDA)/Zn²⁺/ZnO ที่เตรียมได้ที่ค่าพีเอชแตกต่างกัน³³

2.5 ซิลิกา (SiO₂)

ซิลิกา (SiO₂)^{25, 34} เป็นสารประกอบของซิลิกอนและออกซิเจนมีลักษณะเป็นผลึกไม่มีสีหรือเป็นผลึกสีขาว ไม่มีกลิ่นและรส พบมากในดินและหิน โดยซิลิกาเป็นธาตุที่มีมากเป็นอันดับ 2 บนเปลือกโลกรองจากออกซิเจนและถูกนำมาใช้ประโยชน์ในหลายด้าน อาทิเช่น ใช้เป็นสารดูดซับความชื้น ใช้เป็นสารเพิ่มความเงา ใช้เป็นส่วนผสมของวัสดุก่อสร้างและใช้เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ เป็นต้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงสมบัติการละลายของซิลิกาพบว่าซิลิกาไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อย ซึ่งซิลิกาก็มีความทนต่อสภาวะที่เป็นกรดสูงหรืออาจจะกล่าวได้ว่าไม่ละลายในกรดทุกชนิดยกเว้นกรดไฮโดรฟลูออริก โดยปกติซิลิกาจะสามารถละลายได้โดยการหลอมกับด่างหรือเบสที่ค่า pH ประมาณ 8 โดยจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของซิลิกา ถือได้ว่าซิลิกามีความทนกรดและเบสสูงมากเมื่อเทียบกับออกไซด์ตัวอื่น

ซิลิกามีสมบัติทางเคมีที่ค่อนข้างเสถียรที่อุณหภูมิปกติหรืออุณหภูมิห้องและไม่ทำปฏิกิริยาต่อสารเคมีหลายชนิดแต่สามารถเปลี่ยนรูปแบบได้ โดยซิลิกาชนิดอสัณฐานจะมีความไวต่อปฏิกิริยามากกว่าซิลิกาชนิดผลึก เนื่องจากซิลิกาอสัณฐานมีพื้นที่ผิวมากกว่าส่วนสารละลายกรดแทบจะไม่มีผลต่อซิลิกา ยกเว้นกรดไฮโดรฟลูออริกซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกาจนได้ H₂SiF₆ ทั้งนี้ซิลิกาในรูปแบบที่ต่างกันจะเกิดปฏิกิริยากับกรดไฮโดรฟลูออริกได้ต่างกัน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นของซิลิกาเป็นหลัก โดยซิลิกาที่มีความหนาแน่นสูงจะเกิดปฏิกิริยาเคมีได้น้อยกว่าซิลิกาที่มีความหนาแน่นต่ำ ซิลิกาแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังต่อไปนี้

1. ซิลิกาผลึก (Crystalline Silica) เป็นซิลิกาที่พบในรูปแบบสินแร่ที่มีการจัดเรียงอะตอมของโครงสร้างอย่างมีระเบียบและต่อเนื่อง โดยมีรูปร่างเป็นระบบผลึกที่แน่นอนภายใต้ความดันปกติ มี 3 รูปแบบ ได้แก่ ควอร์ตซ์ (Quartz) ไทริดไมท์ (Tridymite) และคริสโตบาไลท์ (Cristobalite) ซึ่งควอร์ตซ์เป็นรูปที่พบมากที่สุด

2. ซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous silica) เป็นซิลิกาที่เกิดจากสิ่งมีชีวิตและสามารถสังเคราะห์ขึ้นได้โดยมีลักษณะเป็นของแข็งที่มีรูปไม่แน่นอน ไม่มีความเป็นผลึกและมีการจัดเรียงอะตอมภายในโครงสร้างอย่างไม่เป็นระเบียบ อาจอยู่ในรูปของไฮเดรต (Hydrate) หรือแอนไฮเดรต (Anhydrate) มีพันธะหลายรูปแบบ เช่น siloxane, silanol, silane และ Organic silicon เป็นต้น การสังเคราะห์จะสามารถสังเคราะห์ได้จากการให้ความร้อนจนมีสถานะเป็นไอและการตกตะกอนสารละลาย โดยแบ่งเป็น 3 ประเภทตามลักษณะผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้ ได้แก่ วิเทรียซิลิกา (vitreous silica) จะมีลักษณะเป็นของแข็งที่ไม่มีรูพรุน สามารถผลิตได้จากการหลอมเหลวผลึกซิลิกาอสัณฐานแล้ว

ปล่อยให้เย็นตัว ซิลิกาเจล (silica gel) มีลักษณะแข็งมีรูพรุนสูงโดยโครงสร้างรูพรุนเป็นแบบเปิดและมีพื้นที่ผิวสูง ส่วนประเภทสุดท้ายคือซิลิกาผง (powder silica) เป็นซิลิกาที่เตรียมได้จากสภาวะกลายเป็นไอและการตกตะกอนของสารละลาย โดยเมื่อตกตะกอนจะได้ซิลิกาที่มีขนาดเล็กมากและมีพื้นที่ผิวสูง

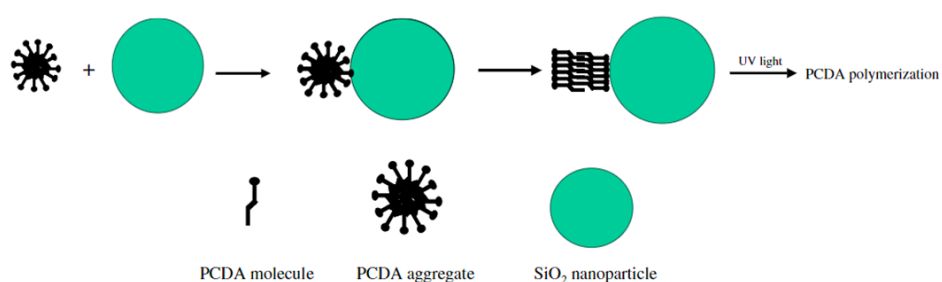
ซิลิกาเป็นวัสดุที่มีประโยชน์หลายอย่าง เช่น ใช้เป็นองค์ประกอบตัวเร่งปฏิกิริยาใช้เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงและความหนาแน่นในผลิตภัณฑ์ประเภทยาง พลาสติกและโพลีเมอร์ ใช้เป็นสารเพิ่มแรงยึดติดในผลิตภัณฑ์กาว ใช้เป็นสารลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างของแข็งที่แขวนลอยในของเหลว ใช้เป็นสารเพิ่มความหนืดในผลิตภัณฑ์หลายชนิด ใช้เป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ทำให้สารที่ไม่ละลายกันผสมเข้ากันได้ดี นอกจากนั้นแล้วยังสามารถใช้เป็นสารปรับสภาพพื้นผิวให้มีคุณสมบัติชอบน้ำได้จากสมบัติและประโยชน์ของซิลิกาที่ได้กล่าวมาข้างต้น จึงเหมาะสมที่จะนำซิลิกามาเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในช่วงที่กว้างขึ้นและหลากหลายมากขึ้น

2.6 วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดอะเซทิลีน/ซิลิกา หรือ poly(PCDA)/SiO₂

เนื่องจากศักยภาพของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล ในการใช้งานเป็นเซนเซอร์ในระดับโมเลกุล ทำให้มีความสนใจที่จะควบคุมให้พอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลมีการตอบสนองต่อสิ่งกระตุ้นในระดับที่แตกต่างกันออกไปและนำไปสู่การศึกษาเพื่อพัฒนาสมบัติของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล โดยหนึ่งในวิธีการพัฒนาสมบัติดังกล่าวสามารถทำได้โดยการเติมอนุภาคระดับนาโนเมตรของโลหะออกไซด์เพื่อให้เกิดเป็นวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรขึ้น โดยสมบัติเด่นของโลหะออกไซด์ที่เลือกใช้อย่างช่วยปรับปรุงสมบัติของวัสดุเชิงประกอบให้เป็นที่ไปตามต้องการได้ ตัวอย่างโลหะออกไซด์ที่น่าสนใจ เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงก์ออกไซด์ ซึ่งมีสมบัติที่ดีในการดูดซับรังสียูวีและอนุภาคนาโนเมตรของเหล็กออกไซด์ เช่น แมกนีไทต์ (Fe₃O₄) ที่มีสมบัติความเป็นแม่เหล็ก เป็นต้น

ในปี ค.ศ. 2006 Y. L. Su และคณะ²⁴ ได้ทำการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรของพอลิไดอะเซทิลีนและซิลิกาเพื่อใช้เป็นเซนเซอร์ทางเคมี โดยพบว่ากลุ่มก้อนของ PCDA สามารถดูดซับอยู่บนผิวของอนุภาคนาโนซิลิกาในน้ำได้ โดยอนุภาคนาโนซิลิกาทำหน้าที่เป็นเทมเพลต (template) ที่ช่วยให้โมเลกุล PCDA ที่จัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบเกิดการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.12 วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรของพอลิไดอะเซทิลีนและซิลิกาที่เตรียมได้มีสีน้ำเงินหลังจากฉายแสงยูวีและเมื่อได้รับการรบกวนจากสิ่งกระตุ้น เช่น อุณหภูมิ ความเป็นกรด-เบสและโมเลกุลแอมพิฟิลิก จากการศึกษาพบว่าวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดอะเซทิลีนและซิลิกาเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงได้เมื่อได้รับการกระตุ้น

จากความร้อน โดยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรดังกล่าวเริ่มเกิดการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียสและเกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับไม่ได้เช่นเดียวกับ PDA เมื่อลดอุณหภูมิลงมาที่อุณหภูมิเริ่มต้น กลไกที่ทำให้มอนอเมอร์ของกลุ่มก้อน PCDA ที่ดูดซับอยู่บนผิวของอนุภาคนาโนซิลิกาเกิดการจัดเรียงตัวใหม่อย่างเป็นระเบียบและอยู่ในสภาวะที่มีโครงสร้างเสถียรมากที่สุดซึ่งเกิดจากปฏิสัมพันธ์ของหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้ว นั่นก็คือหมู่คาร์บอกซิลของ PCDA มอนอเมอร์และหมู่ไฮดรอกซีของอนุภาคนาโนซิลิกา ดังนั้นอนุภาคนาโนซิลิกาในน้ำจึงทำหน้าที่เป็นเทมเพลตให้ PCDA มอนอเมอร์ที่เกาะบนผิวเกิดการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบขึ้นมา



รูปที่ 2.12 การดูดซับของกลุ่มก้อน PCDA บนผิวของอนุภาคนาโนซิลิกาและการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของ PCDA บนผิวของอนุภาคนาโนซิลิกา²⁴

ในงานวิจัยนี้จะทำการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรชนิดใหม่ระหว่างพอลิไดออกเซทีลีนและซิลิกา จากสมบัติของซิลิกาที่สามารถทนสภาวะกรดได้สูงกว่าซิงก์ออกไซด์ จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้ผู้วิจัยเลือกใช้ซิลิกาในการปรับปรุงสมบัติของพอลิไดออกเซทีลีน เพื่อให้สามารถใช้ประโยชน์จากวัสดุเชิงประกอบดังกล่าวได้ในช่วงที่กว้างมากยิ่งขึ้นและจากการศึกษาของ Traiphol N. และคณะ²² พบว่าซิงก์(II)ไอออนมีส่วนสำคัญในการ assemble ของพอลิไดออกเซทีลีนบนอนุภาคออกไซด์ อีกทั้งยังเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรเกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจะทำการเติมซิงก์(II)ไอออนร่วมด้วยเพื่อเพิ่มปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคนาโนของซิลิกาและพอลิไดออกเซทีลีน โดยผู้วิจัยมีความคาดหวังว่าวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมขึ้นได้นั้นจะมีสมบัติการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิที่มีความแตกต่างออกไปจากวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/SiO₂ ที่มีการศึกษามาก่อนหน้านี้ โดยวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ดังกล่าวจะสามารถเกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้และมีการเปลี่ยนสีภายใต้สภาวะความเป็นกรดที่ค่า pH ต่ำกว่า ในกรณีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร Poly(PCDA)/Zn²⁺/ZnO นอกจากนี้การควบคุมค่า pH ในขั้นตอนการเตรียมวัสดุเชิงประกอบจะเป็นการควบคุมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิให้ เป็นไปตามที่ต้องการได้อีกด้วย

2.7 เทคนิคและหลักการที่ใช้ในการวิเคราะห์

ในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิคต่าง ๆ ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ดังต่อไปนี้ 1. เทคนิคอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-Vis spectroscopy) โหมตการดูดกลืนแสง ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมขึ้นในช่วงความยาวคลื่น 300 – 800 นาโนเมตร เพื่อศึกษาสีเริ่มต้นและพฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสี 2. วิเคราะห์ค่าศักย์ซีต้า (Zeta potential) ด้วยเทคนิค electrophoresis เพื่อศึกษาค่าประจุที่ผิวของอนุภาคนาโนซิลิกาเมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าพีเอช 3. วิเคราะห์ขนาดและการกระจายขนาดอนุภาค (Particle size distribution) ของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรด้วยเทคนิคการกระเจิงแสงแบบไดนามิกส์ (dynamic light scattering) 4. วิเคราะห์พันธะในโครงสร้างโมเลกุลของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Infrared spectroscopy) และเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี (Raman spectroscopy) 5. วิเคราะห์โครงสร้างและการจัดเรียงตัวของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometry) และ 6. วิเคราะห์ลักษณะของสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) โดยมีหลักการดังต่อไปนี้

2.7.1 เทคนิคอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-Vis spectroscopy)

เทคนิคอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี³⁵ ใช้สำหรับวิเคราะห์สารประเภทสารอินทรีย์ (organic compound) สารประกอบเชิงซ้อน (complex compound) สารอนินทรีย์ (inorganic compound) ที่มีการดูดกลืนแสงในช่วงประมาณ 190 ถึง 800 นาโนเมตร โดยสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ สารตัวอย่างที่วัดส่วนใหญ่จะอยู่ในสถานะของเหลว แต่สารที่อยู่ในสถานะของแข็งและแก๊สก็สามารถวัดหรือวิเคราะห์ได้เช่นกัน โดยเมื่อโมเลกุลของสารได้รับพลังงานในช่วงแสงที่เหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในระดับชั้นพลังงานที่สูงขึ้น ซึ่งความแตกต่างของระดับชั้นพลังงานนี้จะมีค่าเท่ากับพลังงานของคลื่นแสงที่อิเล็กตรอนนั้นดูดกลืนไว้และตามกฎการดูดกลืนแสงของเบียร์และแลมเบิร์ต (Beer-Lambert's law) ที่อธิบายไว้ว่า “อัตราของแสงที่ถูกดูดกลืนไว้จะผันแปรเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มและระยะทางที่แสงนั้นส่องผ่าน” ดังสมการ

$$A = \epsilon bc$$

โดยที่ A คือ ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)

ϵ คือ ค่า Molar absorptivity หน่วยลิตร/โมล-เซนติเมตร

b คือ ความหนาแน่นของสาร หน่วยเซนติเมตร

c คือ ความเข้มข้นของสาร หน่วยโมลาร์ (โมล/ลิตร)

เมื่อกำหนดให้ค่าการส่องผ่าน (Transmittance) เป็นดังนี้

$$T = P/P_0$$

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

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

$$\log \%T = 2 + \log(P/P_0)$$

จาก $A = \log(P/P_0)$

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

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

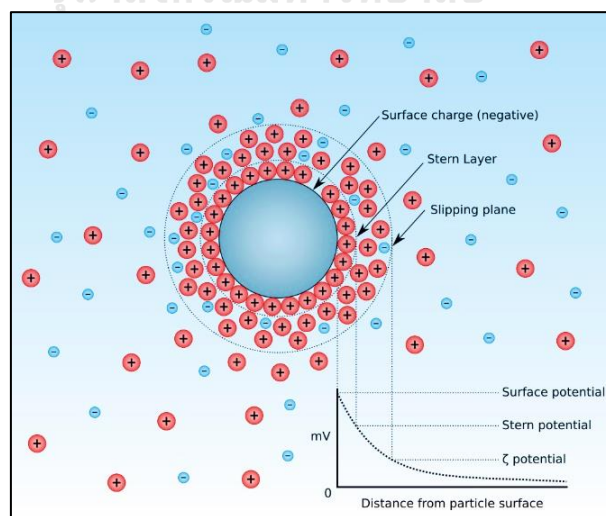
โดยที่ T คือ ค่าการส่องผ่าน (Transmittance)

P คือ ความเข้มแสงที่ทะลุผ่านสารตัวอย่างออกมา

P_0 คือ ความเข้มแสงเริ่มต้นที่ผ่านเข้าไป

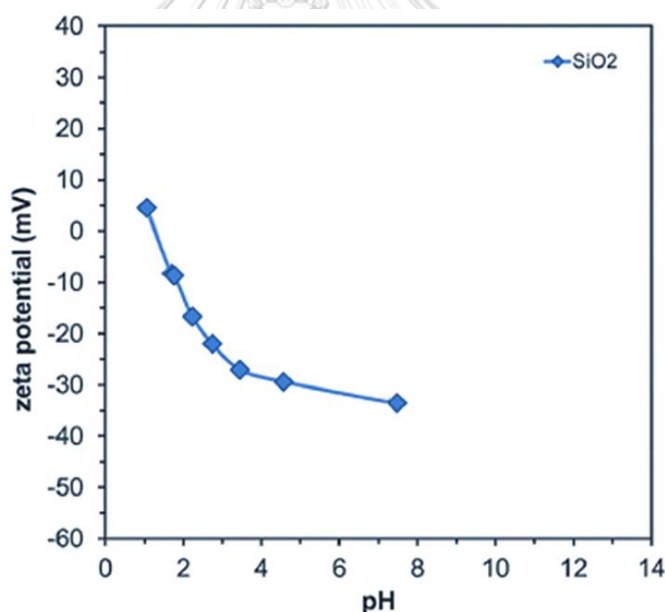
อย่างไรก็ตามกฎของเบียร์และแลมเบิร์ตจะสามารถใช้ได้ก็ต่อเมื่อแสงที่ส่องผ่านสารตัวอย่างเป็นคลื่นแสงที่มีความถี่เดียว (monochromatic radiation) ในขณะที่สารตัวอย่างต้องเป็นเนื้อเดียวกันและมีความเจือจางมากพอที่สามารถให้แสงส่องผ่านได้

2.7.2 การวิเคราะห์ค่าศักย์ซีต้า (Zeta potential)



รูปที่ 2.13 แผนภาพแสดงปริมาณประจุและค่าศักย์ไฟฟ้าเทียบกับระยะทางจากพื้นผิวอนุภาค³⁶

ค่าศักย์ซีต้า (Zeta potential)^{36, 37} ไม่ใช่ค่าประจุที่แท้จริงของอนุภาคแต่เป็นค่าศักย์ไฟฟ้าที่ชั้น Slipping plane ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ซึ่งบ่งบอกถึงค่าประจุโดยรวมที่พื้นผิวของอนุภาคและค่าที่วัดได้นี้จะสามารถนำไปพิจารณาสมบัติการกระจายตัวในระบบคอลลอยด์ของอนุภาคได้ โดยทั่วไประบบที่มีความเสถียรภาพจะมีค่า Zeta potential ของอนุภาคอยู่นอกเหนือช่วง +30 มิลลิโวลต์ ถึง -30 มิลลิโวลต์ หนึ่งในวิธีการวัดค่า Zeta potential คือหลักการอิเล็กโทรโฟรีซิส (Electrophoresis) โดยเมื่อให้สนามไฟฟ้าเข้าไปในระบบอนุภาคก็จะเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าตรงข้ามกับศักย์ไฟฟ้าที่พื้นผิวของประจุโดยความเร็วของการเคลื่อนที่จะขึ้นอยู่กับปริมาณประจุโดยรวมที่พื้นผิวรวมไปถึงขนาดและรูปร่างของอนุภาคด้วย นอกจากนี้ปัจจัยที่มีผลต่อค่า Zeta potential ที่วัดได้ยังเปลี่ยนแปลงไปตามค่า pH ของระบบและค่าการนำไฟฟ้า (conductivity) ของตัวกลางที่ใช้ โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ค่าประจุที่ผิวของอนุภาคนาโนซิลิกา เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าพีเอช ดังแสดงในรูปที่ 2.14 มาใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรที่เตรียมได้



รูปที่ 2.14 ค่าประจุที่ผิวของอนุภาคนาโนซิลิกาเมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าพีเอช²²

2.7.3 การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายขนาดอนุภาค (Particle size distribution)

การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายอนุภาคที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้หลักการของการกระเจิงแสงแบบพลวัต (dynamic light scattering)³⁸ เทคนิคนี้เหมาะสำหรับวัดอนุภาคที่มีขนาดนาโนเมตร โดยมีลักษณะการเคลื่อนที่แบบไร้ทิศทาง (random motion) แต่ในขณะที่เดียวกันก็สามารถทำให้เกิด

การกระเจิงของแสงได้ ซึ่งการเคลื่อนที่แบบบราวน์เนียน (Brownian motion) อยู่ตลอดเวลาของอนุภาคนั้นจะส่งผลกระทบต่อความเข้มหรือปริมาณของแสงที่กระเจิงออกจากอนุภาคไม่คงที่และจากเทคนิคนี้จะนำปริมาณในการกระเจิงของแสงที่ตกกระทบบนผิวของอนุภาคที่วัดได้มาทำการคำนวณเพื่อหาขนาดของอนุภาค ทฤษฎีของ Rayleigh จะใช้ได้กรณีที่อนุภาคมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นของแสงที่ตกกระทบ พบว่าอนุภาคหรือโมเลกุลที่มีขนาดเล็กจะมีค่าความเข้มแสงที่ตรวจวัดได้หลังจากที่แสงตกกระทบแล้วกระเจิงออกมามากในขณะที่ความเข้มแสงที่ตรวจวัดได้หลังจากตกกระทบอนุภาคที่มีขนาดใหญ่แล้วกระเจิงออกมาจะมีค่าความเข้มแสงที่วัดได้นั้นน้อยกว่า

2.7.4 เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Infrared spectroscopy)

เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี^{39, 40} ใช้สำหรับวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบและศึกษาโครงสร้างของโมเลกุลของสารได้ทั้ง 3 สถานะคือ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส เทคนิคนี้เป็นการวัดการดูดกลืนช่วงคลื่นอินฟราเรดของโมเลกุลที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นพลังงานในการสั่นของโมเลกุล การฉายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่อินฟราเรดไปที่โมเลกุลจะทำให้โมเลกุลเกิดการสั่น เมื่อความถี่ที่ฉายคลื่นเข้าไปมีค่าเท่ากับความถี่ในการสั่นของโมเลกุลนั้น ๆ แต่การสั่นนั้นจะต้องอยู่ที่ตำแหน่งสมดุลโดยไม่ทำให้จุดศูนย์กลางเปลี่ยนไป ซึ่งแต่ละโมเลกุลก็จะมีโหมดการสั่นเฉพาะแตกต่างกันออกไป โหมดการสั่นของโมเลกุลแบ่งออกเป็น 4 แบบ ได้แก่ 1. Stretching vibration 2. In-plan bending vibration 3. Out-of planer bending vibration และ 4. Torsion vibration

ตารางที่ 2.1 เลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันในอินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/ZnO

Wavenumber (cm ⁻¹)	Functional group	Vibration mode
1396	-COO ⁻	symmetric stretching
1539	-COO ⁻	antisymmetric stretching
1460	-CH ₂	scissoring
2848	-CH ₂	symmetric stretching
2918	-CH ₂	antisymmetric stretching
2959	-CH ₃	antisymmetric stretching

เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared spectroscopy) หรือ FT-IR เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมสำหรับการวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ให้สัญญาณที่ดีและมีการรบกวนน้อยกว่าวิธีอื่น รวมถึงมีความไวในการแปลงสัญญาณจากเครื่องมือเพื่อสร้างเส้นสเปกตรัมที่ได้จากการตรวจวัดสารสำหรับนำมาวิเคราะห์ ตัวอย่างการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏในอินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/ZnO จากการศึกษาที่ผ่านมา^{6, 11, 17, 22} ดังแสดงในตารางที่ 2.1

2.7.5 เทคนิครามานสเปกโทรสโกปี (Raman spectroscopy)

เทคนิครามานสเปกโทรสโกปี (Raman spectroscopy)^{41, 42} ใช้สำหรับวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบและศึกษาโครงสร้างของโมเลกุลของสารได้ทั้ง 3 สถานะเช่นเดียวกับเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี แต่เทคนิคนี้จะเป็นการวัดการกระเจิงของคลื่นแสงที่มีค่าความถี่เดียว (monochromatic radiation) ที่ชนกับโมเลกุลซึ่งมีลักษณะการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic collision) แล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของพลังงานที่โมเลกุลได้รับ ซึ่งอาจจะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงเท่ากับระดับพลังงานของการสั่นหรือหมุนของโมเลกุลและเกิดการกระเจิงแสงโดยการคายพลังงานที่ความถี่ต่าง ๆ เรียกว่า การกระเจิงแสงแบบรามาน (Raman scattering) อย่างไรก็ตามเทคนิคทั้งสองนี้มีความเกี่ยวเนื่องที่เป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์โครงสร้างของสาร นั่นคือการสั่นของโมเลกุลที่เห็นได้ชัดเจนในอินฟราเรดสเปกตรัมจะแสดงเพียงเล็กน้อยในรามานสเปกตรัมและในทางกลับกันในสารกลุ่มที่ไม่มีขั้วจะแสดงพีกอย่างชัดเจนในรามานสเปกตรัมและสังเกตเห็นได้น้อยในอินฟราเรดสเปกตรัมเช่นกัน ตัวอย่างการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏในอินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/ZnO ในการศึกษาที่ผ่านมา¹⁴ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 เลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันในรามานสเปกตรัมของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/ZnO

Functional group	Raman shift (cm ⁻¹)
C=C	1449
	1512
C≡C	2075
	2116

2.7.6 เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometry)

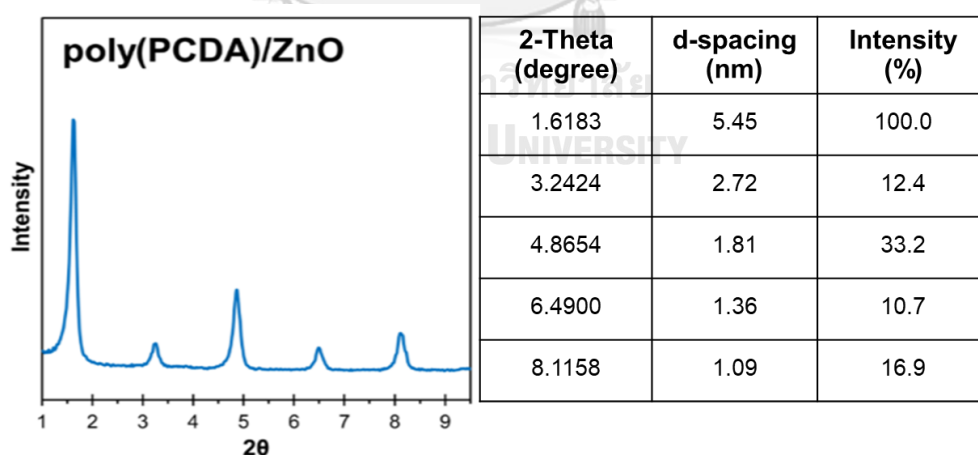
รังสีเอ็กซ์ (X-ray) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นในช่วง 0.01 ถึง 10 นาโนเมตร และมีอำนาจในการทะลุทะลวงสูง ถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1985 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมัน จากการศึกษาพบว่า X-ray เกิดอันตรกิริยากับสสารส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ต่าง ๆ เช่น การเลี้ยวเบน (diffraction) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของสารแต่ละชนิดทำให้สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ชนิดสารต่าง ๆ ได้ โดยทั่วไปแล้วเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometry)⁶¹ จะใช้ในการศึกษาโครงสร้างและคุณภาพของผลึกของสารจากการวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD-pattern) หรือดิฟแฟรกโตแกรม (diffractogram) ซึ่งได้จากการแปลงสัญญาณจากเครื่องมือวิเคราะห์เปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานจากฐานข้อมูลขององค์กร JCPD (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) โดยค่ามุม θ ที่ได้สามารถนำมาคำนวณเพื่อหาระยะห่างระหว่างชั้นของผลึก (d-spacing) ได้จากสมการของแบรกก์ (Bragg's equation)⁴³ ดังนี้

$$2d\sin\theta = n\lambda$$

โดยที่ d คือ ระยะห่างระหว่างชั้นของผลึก หน่วยนาโนเมตร

n คือ ตัวเลขจำนวนเต็ม

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีที่ใช้ หน่วยนาโนเมตร



รูปที่ 2.15 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD-pattern) และตารางแสดงค่าองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ได้จากเครื่องมือวิเคราะห์ของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/ZnO

จาก XRD-pattern ในรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าปรากฏพีการเลี้ยวเบน (diffraction peak) ลำดับที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 ตามลำดับอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นถึงลักษณะโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบที่เป็นแบบชั้น (lamella structure)¹⁴ โดยมีการจัดเรียงตัวภายในโครงสร้างอย่างเป็นระเบียบ เมื่อนำค่ามุมที่วัดได้ไปเข้าสมการของแบรกก์ก็จะได้ค่า d-spacing ออกมาแสดงดังตารางข้างต้น แต่ค่าที่แสดงนี้เครื่องมือวิเคราะห์จะแทนค่า n เท่ากับ 1 ตลอดการคำนวณ และเมื่อพิจารณาจากรูปดังกล่าวพบว่าค่า d-spacing ที่ได้จะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ เมื่อมุมที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ในความเป็นจริงแล้วค่า d-spacing ของสารที่วิเคราะห์จะมีเพียงค่าเดียว ดังนั้นต้องกำหนดค่า n ให้ตรงกับลำดับการเกิดพีคที่แสดงใน XRD-pattern ซึ่งสามารถคำนวณหาค่า d-spacing ของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรได้จากสมการของแบรกก์ซึ่งจะมีความสัมพันธ์ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่า d-spacing ของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/ZnO ซึ่งได้จากการวิเคราะห์พีคที่แสดงใน XRD-pattern

n	2-Theta (degree)	d-spacing (nm)
1	1.6183	5.45
2	3.2424	5.44
3	4.8654	5.44
4	6.4900	5.44
5	8.1158	5.44
Average		5.44

2.7.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM)⁴⁴ เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างที่มีขนาดเล็กในระดับจุลภาคและเป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในการวิจัยและการผลิตภาคอุตสาหกรรม โดย FESEM เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงถึง 1,000,000 เท่า ทำให้สามารถศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับไมโครเมตรหรือนาโนเมตรได้ นอกจากนี้ FESEM ยังสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-ray Spectrometer ; EDS) ซึ่งช่วยในการศึกษาชนิดปริมาณและการกระจายขององค์ประกอบธาตุของวัสดุที่ศึกษาได้

FESEM ที่ใช้ในการศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นรุ่น JSM-7001F เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบ Schottky type field-emission (T-FE) มี resolution สูงถึง 1.2 nm ที่ 30 kV เหมาะสำหรับงานทางด้านวิทยาศาสตร์กายภาพ ศักย์เร่งอิเล็กตรอนสามารถปรับเปลี่ยนได้ในช่วง 0.5 - 30 kV ซึ่งง่ายต่อการใช้งานเนื่องจากควบคุมการทำงานด้วยระบบคอมพิวเตอร์ ระบบสุญญากาศในระบบลำอิเล็กตรอนใช้ sputter-ion pump ส่วนห้องชิ้นงาน (sample chamber) ใช้ diffusion pump โดยหัววัดหลักสำหรับการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่ายของระบบจะประกอบด้วย 3 หัววัด คือ Secondary Electron Detector, Backscattered Electron Detector และ Scanning Transmission Electron Detector สัญญาณภาพที่ได้จาก FESEM รุ่น JSM-7001F แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามลักษณะของภาพที่ได้จากหัววัดที่ต่างกัน ดังนี้

1. Secondary Electron Image (SEI) เป็นสัญญาณภาพที่ได้จาก Secondary Electron Detector (SED) ที่รับเอาพลังงานจาก Secondary Electron ที่หลุดออกมาจากพื้นผิวของชิ้นงาน เมื่อถูกลำอิเล็กตรอนชนมาประมาณผล ภาพที่ได้จะแสดงลักษณะของพื้นผิวของตำแหน่งที่สนใจบนชิ้นงาน (Morphology)

2. Backscattered Electron Image (BEI) เป็นสัญญาณภาพที่ได้จาก Backscattered Electron Detector (BED) ที่รับเอาพลังงานจาก Backscattered Electron ที่สะท้อนจากพื้นผิวของชิ้นงานมาประมวลผล โดยสัญญาณที่ได้ในแต่ละบริเวณ จะแปรตามเลขอะตอม (atomic number, Z) ในเนื้อสารบริเวณนั้น ๆ ภาพที่ได้จึงมีความสว่างเข้มหรืออ่อนตามเลขอะตอมของธาตุที่เป็นส่วนประกอบของเนื้อสาร (atomic contrast) BEI จึงสามารถแสดงภาพที่แยกแยะความแตกต่างของแต่ละบริเวณที่มีธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกันได้

3. Transmission Electron Image (TEI) เป็นสัญญาณภาพที่ได้จาก Transmission Electron Detector (TED) อาศัยหลักการของ Transmission Electron Microscopy (TEM) ประยุกต์มาติดตั้งในระบบของ FESEM โดย TED จะอยู่ในตำแหน่งใต้ชิ้นงานเพื่อรับพลังงานจาก Transmission Electron ที่ทะลุผ่านชิ้นงาน ภาพที่ได้จะแสดงถึงรูปร่างโครงสร้างภายในของชิ้นงาน

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

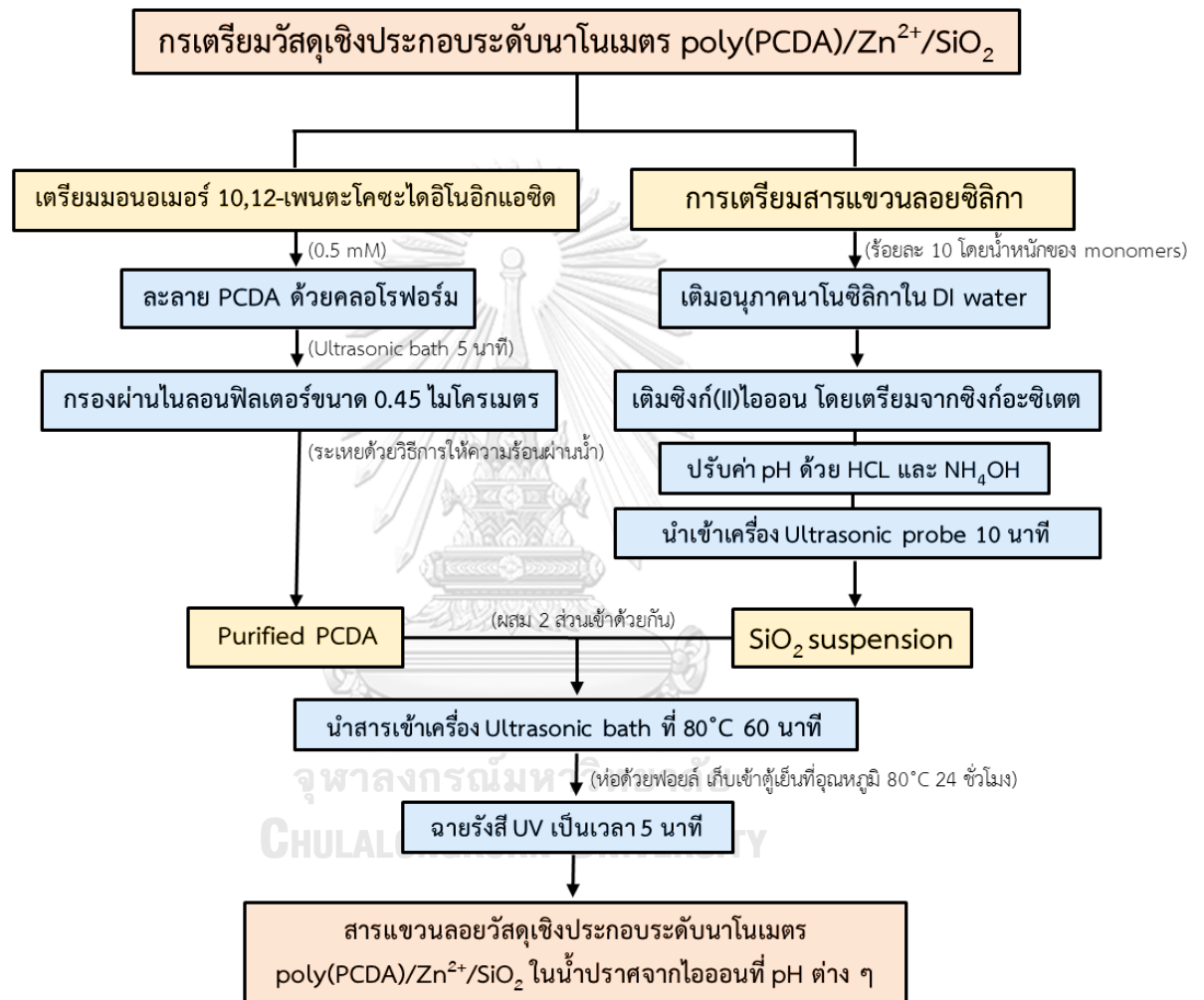
สารเคมีที่ใช้ในการศึกษาการควบคุมพฤติกรรม การตอบสนอง โดยการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดโอะเซทิลีน/ซิงก์(II)ไอออน/ซิลิกา หรือ poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ โดยการปรับเปลี่ยนค่าพีเอช สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

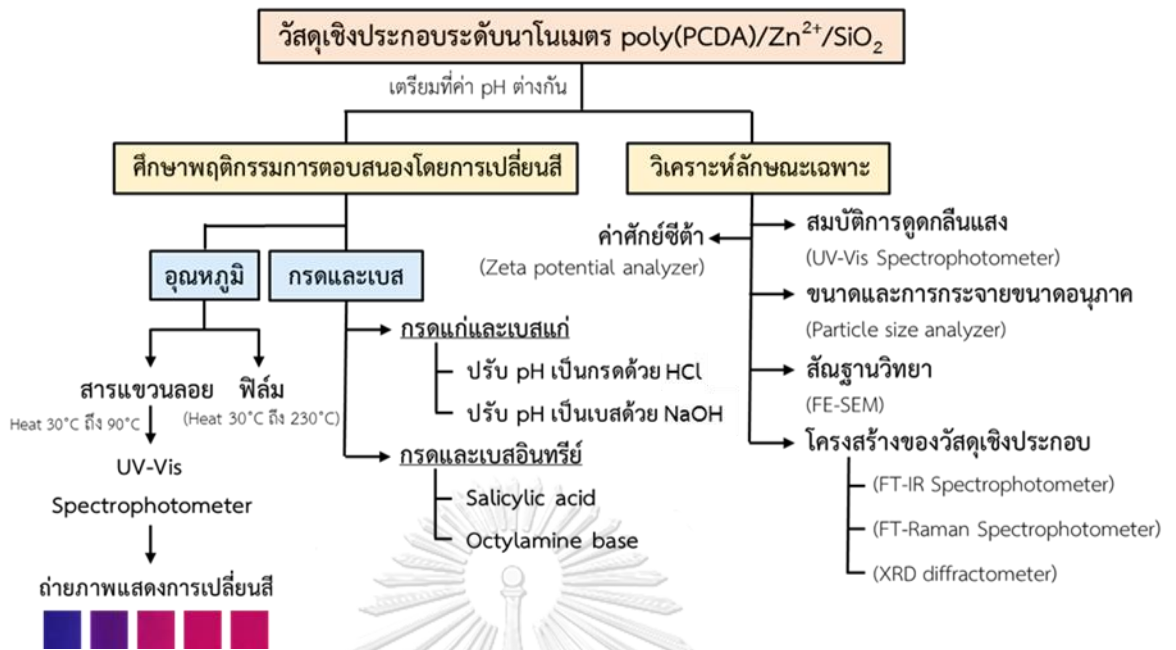
สารเคมี	บริษัท
1) มอนอเมอร์ตั้งต้น	
1.1) 10,12-Pentacosadiynoic acid (PCDA)	ซิกม่า-อัลดริช (Sigma-Aldrich Co., LLC.)
1.2) 10,12-Tricosadiynoic acid (TCDA)	
2) โลหะออกไซด์	
2.1) ซิลิกา (SiO ₂)	นาโน แมททีเรียล เทคโนโลยี จำกัด
2.2) ซิงก์ออกไซด์ (ZnO)	(NANO MATERIALS TECHNOLOGY CO., LTD)
2.3) ซิงก์อะซิเตต (Zn(CH ₃ CO ₂) ₂)	
3) ตัวทำละลาย	
3.1) น้ำปราศจากไอออน (DI water)	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาฯ
3.2) คลอโรฟอร์ม (Chloroform)	ซิกม่า-อัลดริช (Sigma-Aldrich Co., LLC.)
4) สารปรับสภาพความเป็นกรดและเบส	
4.1) กรดซาลิซิลิก (Salicylic acid)	
4.2) ออกทิลลามีน (Octylamine)	ซิกม่า-อัลดริช (Sigma-Aldrich Co., LLC.)
4.3) แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH ₄ OH)	บริษัท Ajax Finechem
4.4) กรดไฮโดรคลอริก (HCl)	
4.5) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)	

3.2 แผนผังการดำเนินงานวิจัย

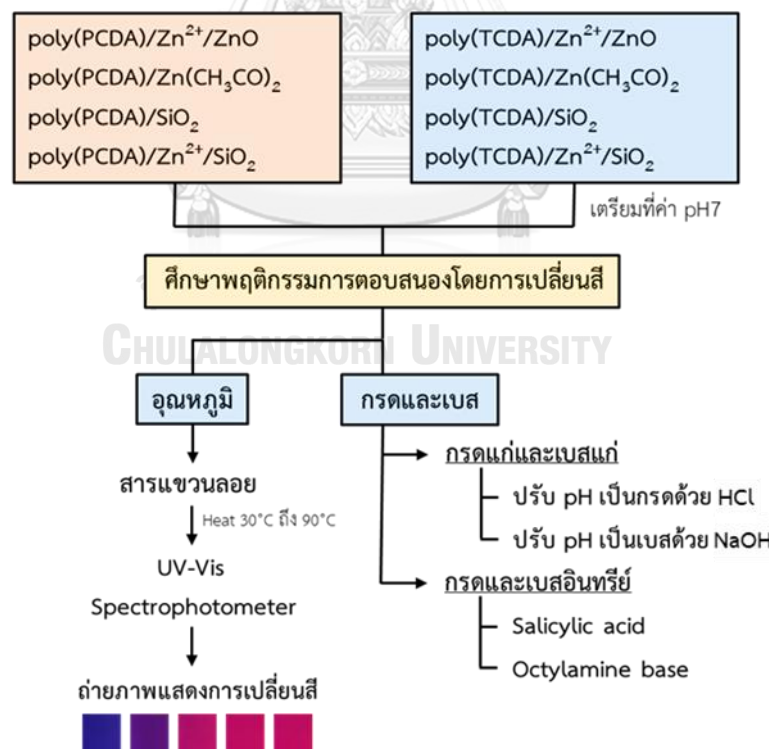
วิธีการดำเนินงานวิจัยของการศึกษาการควบคุมพฤติกรรมเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ โดยการปรับเปลี่ยนค่าพีเอชแสดงได้รูปที่ 3.1, 3.2 และ 3.3 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 แผนผังการเตรียมสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่ค่าเตรียมได้ที่ค่าพีเอชต่าง ๆ



รูปที่ 3.2 แผนผังการศึกษาสมบัติและพฤติกรรม การเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂



รูปที่ 3.3 แผนผังการศึกษาสมบัติและพฤติกรรม การเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร ชนิดต่าง ๆ เมื่อใช้หมอนอเมอร์ตั้งต้นและโลหะออกไซด์ที่แตกต่างกัน

3.3 วิธีการเตรียมสารแขวนลอยของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂

การเตรียมวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์(II)ไอออน/ซิลิกา หรือ poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ จากมอนอเมอร์ 10,12-เพนตะโคซะไดโอนิกแอซิด (PCDA) ที่ความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์ ร่วมกับอนุภาคนาโนซิลิกาในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของมอนอเมอร์ที่ใช้ ซึ่งจะทำให้การเติมซิงก์(II)ไอออนร่วมด้วย โดยปริมาณการเตรียมครั้งละ 20 มิลลิลิตรและมีวิธีการเตรียมสารตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.3.1 การเตรียมมอนอเมอร์ 10,12-เพนตะโคซะไดโอนิกแอซิด (Purified PCDA)

เตรียมมอนอเมอร์ 10,12-เพนตะโคซะไดโอนิกแอซิด (PCDA) ให้มีความบริสุทธิ์ โดยซึ่งสารปริมาณ 0.0076 กรัม ละลายในสารละลายคลอโรฟอร์มปริมาตร 5 มิลลิลิตร จากนั้นแล้วกรองผ่านแผ่นกรองไนลอนที่มีขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตรและนำไปกำจัดคลอโรฟอร์มที่ 80 องศาเซลเซียส โดยใช้กระบวนการให้ความร้อนผ่านน้ำ (Water bath) เพื่อให้คลอโรฟอร์มเกิดการระเหยออกจากสารอย่างช้า ๆ จนได้มอนอเมอร์ที่มีความบริสุทธิ์ (Purified PCDA)

3.3.2 การเตรียมสารแขวนลอยซิลิกา (SiO₂ suspension)

1. เตรียมสารแขวนลอยซิลิกา โดยเติมอนุภาคนาโนซิลิกาลงในน้ำปราศจากไอออน
2. เตรียมซิงก์(II)ไอออน (Zn²⁺) จากซิงก์อะซิเตต (Zinc acetate) โดยนำไปละลายในน้ำที่ปราศจากไอออน (DI water) ซึ่งมีการเติมอนุภาคนาโนซิลิกาลงไปข้างต้น
3. ปรับค่าพีเอชของสารแขวนลอยดังกล่าวด้วยการเติมกรดไฮโดรคลอริก (HCl) หรือสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH₄OH) ที่มีความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ เพื่อให้สารแขวนลอยที่เตรียมได้มีค่าพีเอชตามที่ต้องการ
4. นำสารแขวนลอยซิงก์(II)ไอออน/ซิลิกา ที่เตรียมได้ข้างต้นไปเข้าเครื่องให้ความถี่สูงด้วยโพรบ (ultrasonic probe) เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้อนุภาคเกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ

3.3.3 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂

1. นำสารแขวนลอยซิงก์(II)ไอออน/ซิลิกา ที่ปรับค่าพีเอชและเข้าเครื่องให้ความถี่สูงด้วยโพรบแล้วผสมกับมอนอเมอร์บริสุทธิ์ที่เตรียมไว้ นำสารผสมเข้าเครื่องล้างความถี่สูงที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที หลังจากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้อุณหภูมิสารเท่ากับอุณหภูมิห้องแล้วท่อ

ด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์เพื่อป้องกันแสงรบกวนจากภายนอก จากนั้นนำไปเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิประมาณ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 24 ชั่วโมง

2. นำสารแขวนลอยผสมที่เตรียมไว้มาฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้เกิดการพอลิเมอไรเซชันด้วยแสงกลายเป็นวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ (สารแขวนลอยสีน้ำเงิน) แล้วนำเข้าเครื่องล้างความถี่สูงอีกครั้งเป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้เกิดการกระจายตัวที่ดีของอนุภาควัสดุเชิงประกอบ จากนั้นนำไปกรองผ่านกระดาษกรองเซลลูโลสที่มีขนาดของรูพรุน 20 ถึง 25 ไมโครเมตร (Whatman® qualitative filter paper, Grade 4, 1004 - 110) เพื่อกรองอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ออกไป

3.4 วิธีการเตรียมฟิล์มวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂

1. ตัดกระจกสไลด์ (glass slide) ให้มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาด 1 ตารางนิ้ว
2. นำวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ เข้าเครื่องล้างความถี่สูงเป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้เกิดการกระจายตัวที่ดีของอนุภาควัสดุเชิงประกอบ
3. นำวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรที่เตรียมไว้ในขั้นตอนก่อนหน้านี้หยดลงบนกระจกสไลด์ 4 – 5 หยด จากนั้นทิ้งไว้ให้ชิ้นงานแห้งสนิท แล้วจึงหยดซ้ำอีกประมาณ 5 ครั้ง เพื่อให้วัสดุเชิงประกอบติดแน่นบนกระจกสไลด์จนเห็นเป็นสีน้ำเงินชัดเจน เมื่อชิ้นงานแห้งเรียบร้อยแล้วให้เก็บไว้ในตู้เย็นที่ ไม่มีแสงรบกวนหรือสัมผัสความชื้นเพื่อใช้งานต่อไป

3.5 วิธีการศึกษาสมบัติและวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมด้วยค่าพีเอชที่แตกต่างกัน

3.5.1 วิเคราะห์สมบัติการดูดกลืนแสง (Absorbance)

นำสารแขวนลอยของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมด้วยค่าพีเอชที่แตกต่างกันในช่วงที่สามารถเตรียมได้ตั้งแต่ pH3 ถึง pH12 ประมาณ 3 มิลลิตร ใส่ลงใน quartz cuvette เพื่อศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสง (absorbance) ด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 400 ถึง 800 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-Vis Spectroscopy (Specord S 100 B, Analytik Jena) และใช้น้ำที่ปราศจากไอออนเป็น blank พร้อมกับถ่ายภาพสีตั้งต้นของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂

3.5.2 วิเคราะห์ประจุโดยรวมที่พื้นผิวของอนุภาคนาโนซิลิกา

นำอนุภาคนาโนซิลิกาไปละลายในน้ำปราศจากไอออน จากนั้นปรับค่าพีเอชด้วยกรดไฮโดร - คลอริก (HCl) หรือสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) ที่มีความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ เพื่อให้สารแขวนลอยที่เตรียมได้มีค่าพีเอชตามที่ต้องการ แล้วนำเข้าเครื่องให้ความถี่สูงด้วยโพรมเป็น เวลา 10 นาที เพื่อให้อนุภาคนาโนซิลิกาเกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ จากนั้นนำสารแขวนลอยที่เตรียมได้มาวิเคราะห์ค่าประจุโดยรวมที่พื้นผิวของอนุภาคนาโนซิลิกาหรือค่าศักย์ซีต้า (Zeta potential) ด้วยเทคนิค electrophoresis เพื่อศึกษาค่าประจุที่ผิวของอนุภาคนาโนซิลิกา เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าพีเอชด้วยเครื่อง Zeta potential analyzer (Brookhaven, ZetaPaLs) โดยใช้สารแขวนลอยประมาณ 1.5 มิลลิลิตร

3.5.3 วิเคราะห์ขนาดและการกระจายขนาดอนุภาค (Particle size distribution)

สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร $\text{poly(PCDA)/Zn}^{2+}/\text{SiO}_2$ ที่เตรียมด้วยค่าพีเอชที่แตกต่างกันที่ใช้สำหรับการศึกษาในส่วนนี้ จะเตรียมจากสารแขวนลอยเริ่มต้นที่เจือจางด้วยน้ำปราศจากไอออนให้มีค่าการดูดกลืนแสงประมาณ 0.6 เพื่อให้ง่ายต่อการนำไปวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค จากนั้นนำเข้าเครื่องล้างความถี่สูงเพื่อให้สารแขวนลอยเกิดการกระจายขนาดอนุภาคที่ดีขึ้นก่อนนำไปวัด โดยการศึกษาจะเลือกใช้สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร $\text{poly(PCDA)/Zn}^{2+}/\text{SiO}_2$ ที่เตรียมได้ในช่วง pH4, pH7, pH9 และ pH11 ไปใช้ในการวิเคราะห์ จากนั้นนำสารแขวนลอยที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์เพื่อวัดขนาดและการกระจายขนาดอนุภาค (particle size distribution ; PSD) โดยใช้เครื่อง Particle size analyzer (Brookhaven, ZetaPaLs) ด้วยเทคนิคการกระเจิงแสงแบบไดนามิกส์ (dynamic light scattering)

3.5.4 วิเคราะห์สัณฐานวิทยา (Morphology)

นำสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร $\text{poly(PCDA)/Zn}^{2+}/\text{SiO}_2$ ที่เตรียมได้ในช่วง pH4 pH7 pH9 pH11 และสารแขวนลอยของอนุภาคนาโนซิลิกามาเจือจางด้วยน้ำปราศจากไอออนเพื่อให้ง่ายต่อการนำไปวิเคราะห์สัณฐานวิทยาหรือเห็นลักษณะของอนุภาคที่ชัดเจนมากขึ้น จากนั้นนำสารแขวนลอยที่เตรียมได้ข้างต้นหยดลงบนกระจกสไลด์ที่สะอาดขนาด 1 ตารางเซนติเมตร ทิ้งให้แห้งที่อุณหภูมิห้องแล้วจึงนำไปศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) รุ่น JSM-7001F

3.5.5 การวิเคราะห์และศึกษาโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂

สำหรับการวิเคราะห์และศึกษาโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ จะใช้วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรที่เตรียมได้ในช่วง pH4 pH7 pH9 และ pH11 โดยมีการแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน ดังต่อไปนี้

ส่วนที่ 1 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างสายโซ่หลัก (backbone chain) และสายโซ่ข้าง (side chain)

นำสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมได้ในช่วง pH4 pH7 pH9 และ pH11 ไประเหยแห้งที่อุณหภูมิห้องบนจานแก้วเพาะเชื้อ เมื่อแห้งแล้วให้ชูดวัสดุเชิงประกอบออกมาเบา ๆ จากนั้นนำผงวัสดุเชิงประกอบประมาณ 2 มิลลิกรัม ไปวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันในสายโซ่หลัก (backbone chain) ของโครงสร้าง โดยใช้เทคนิครามานสเปกโทรสโกปี (Raman spectroscopy) ด้วยเครื่อง FT-Raman spectrophotometer รุ่น NTEGRASPECTRA บริษัท NT-MDT

จากนั้นนำผงวัสดุเชิงประกอบที่เหลือไปผสมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) ในอัตราส่วน 1 ต่อ 10 แล้วอัดด้วยแรงกด 3 ถึง 4 เมกะปาสคาลเป็นเวลา 2 นาที นำแผ่นที่อัดเรียบร้อยแล้วไปวัดค่าการส่องผ่านของรังสีอินฟราเรด (Infrared ; IR) ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Infrared spectroscopy) โดยใช้เครื่อง FT-IR spectrophotometer (FT-IR Perkin Elmer Spectrum GX)

ส่วนที่ 2 วิเคราะห์โครงสร้างและการจัดเรียงตัว

นำสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมได้ในช่วง pH4 pH7 pH9 และ pH11 ไประเหยแห้งที่อุณหภูมิห้องบนกระจกสไลด์ โดยหดยดสารแขวนลอยซ้ำบริเวณเดิมจนมีความหนาพอที่แสงไม่สามารถส่องผ่านได้ จากนั้นนำไปวิเคราะห์โครงสร้างและการจัดเรียงตัวโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometry) ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (Bruker AXS Model D8 Discover)

3.6 ศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

3.6.1 พฤติกรรมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ในรูปของสารแขวนลอย (suspension)

นำวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมด้วยค่าพีเอชแตกต่างกัน มาศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีด้วยการเพิ่มอุณหภูมิทีละ 5 องศาเซลเซียส ตั้งแต่ 30 จนถึง 90 องศาเซลเซียส จากนั้นวิเคราะห์สมบัติการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 400 ถึง 800 นาโนเมตร โดยใช้เครื่อง UV-Vis Spectroscopy (Specord S 100 B, Analytik Jena) ที่มีการติดตั้งระบบหมุนเวียนน้ำซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ โดยในการศึกษานี้จะใช้สารประมาณ 4 มิลลิลิตร ใส่ใน quartz cuvette และใช้น้ำที่ปราศจากไอออนเป็น blank พร้อมกับถ่ายภาพเพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของสีของวัสดุ หลังจากนั้นทิ้งให้วัสดุเชิงประกอบมีอุณหภูมิลดลงเท่ากับอุณหภูมิของสารตอนเริ่มต้นและสังเกตการเปลี่ยนแปลงของสีอีกครั้ง

3.6.2 พฤติกรรมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ในรูปของฟิล์ม (nanocomposite films)

นำฟิล์มวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมด้วยค่าพีเอชที่แตกต่างกัน มาศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสี โดยการนำแผ่นฟิล์มไปให้ความร้อนด้วยเครื่องกวนสารชนิดให้ความร้อน (hot plate stirrer) ในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 230 องศาเซลเซียส จากนั้นถ่ายภาพการเปลี่ยนสีของฟิล์มแต่ละชนิด โดยจะทำการถ่ายภาพทุก 5 องศาเซลเซียส เพื่อดูความสามารถของการเปลี่ยนสีในแต่ละช่วงอุณหภูมิ นอกจากนี้ฟิล์มที่เย็นตัวลงสู่อุณหภูมิห้อง หลังจากได้รับความร้อนในแต่ละช่วงอุณหภูมิก็จะถูกถ่ายภาพเช่นกันเพื่อดูความสามารถในการเปลี่ยนสีแบบผันกลับสู่อุณหภูมิห้อง

3.6.3 ความเสถียรทางสีต่อความร้อนของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ เมื่อได้รับความร้อนและปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง

นำวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมด้วยค่าพีเอชที่แตกต่างกัน ใส่หลอดทดลองประมาณ 5 มิลลิลิตรและนำหลอดทดลองไปให้ความร้อนด้วยกระบวนการให้ความร้อนผ่านน้ำ (Water bath) โดยเพิ่มอุณหภูมิทีละ 5 องศาเซลเซียส ตั้งแต่ 30 ถึง

90 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นทิ้งให้วัสดุเชิงประกอบมีอุณหภูมิลดลงเท่ากับอุณหภูมิของสารตอนเริ่มต้นและสังเกตการเปลี่ยนแปลงของสีอีกครั้ง พร้อมกับถ่ายภาพของวัสดุเชิงประกอบก่อนและหลังให้ความร้อน จากนั้นนำวัสดุเชิงประกอบที่มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิของสารตอนเริ่มต้นไปให้ความร้อนต่อ โดยทำซ้ำตามขั้นตอนเดิมประมาณ 10 ครั้ง เพื่อศึกษาจำนวน Loop ของการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้และแบบผันกลับไม่ได้

3.7 ศึกษาและเปรียบเทียบพฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรชนิดต่าง ๆ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

3.7.1 วิธีการเตรียมและพฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรชนิดต่าง ๆ โดยใช้ 10,12-pentacosadiynoic acid หรือ PCDA เป็นมอนอเมอร์ตั้งต้น

เตรียมสารแขวนลอยของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรชนิดต่าง ๆ ได้แก่ poly(PCDA)/Zn²⁺/ZnO, poly(PCDA)/Zn(CH₃CO₂)₂ และ poly(PCDA)/SiO₂ โดยเลือกใช้ 10,12-pentacosadiynoic acid (PCDA) เป็นมอนอเมอร์ตั้งต้นในการเตรียม สำหรับขั้นตอนการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรข้างต้น จะใช้วิธีเดียวกับการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร Poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ดังแสดงในหัวข้อที่ 3.3 โดยต้องทำการเปลี่ยนชนิดของโลหะออกไซด์ให้ตรงกับวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรที่ต้องการและไม่ต้องปรับค่าพีเอชของสารแขวนลอย

จากนั้นนำสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรที่เตรียมได้จากขั้นตอนข้างต้นไปศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิ ตามขั้นตอนดังแสดงในหัวข้อที่ 3.6.1

3.7.2 วิธีการเตรียมและพฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรชนิดต่าง ๆ โดยใช้ 10,12-tricosadiynoic acid หรือ TCDA เป็นมอนอเมอร์ตั้งต้น

เริ่มจากการเตรียมสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรชนิดต่าง ๆ ได้แก่ poly(TCDA)/Zn²⁺/ZnO, poly(TCDA)/Zn(CH₃CO₂)₂ และ poly(TCDA)/SiO₂ โดยเลือกใช้ 10,12-tricosadiynoic acid (TCDA) เป็นมอนอเมอร์ตั้งต้นในการเตรียม สำหรับขั้นตอนการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรข้างต้น จะใช้วิธีเดียวกับการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร Poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ดังแสดงในหัวข้อที่ 3.3 โดยต้องทำการเปลี่ยนชนิดของมอนอเมอร์ตั้งต้น

และโลหะออกไซด์ให้ตรงกับวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรที่ต้องการและไม่ต้องปรับค่าพีเอชของสารแขวนลอย

จากนั้นนำสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรที่เตรียมได้จากขั้นตอนข้างต้นมาศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิ ตามขั้นตอนดังแสดงในหัวข้อที่ 3.6.1

3.8 ศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ต่อกรดและเบส

3.8.1 พฤติกรรมเปลี่ยนสีต่อกรดและเบส

นำวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมด้วยค่าพีเอชที่แตกต่างกันมาศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสี เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด - เบส จากค่าพีเอชตั้งต้นของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ ในการศึกษานี้จะทำการปรับค่าพีเอชของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ตั้งแต่ pH1 ถึง pH13 โดยใช้กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ในการปรับค่าความเป็นกรดและใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ในการปรับค่าความเป็นเบสของสารแขวนลอย หลังจากการปรับค่าพีเอชแต่ละครั้งให้นำวัสดุเชิงประกอบเข้าเครื่องล้างความถี่สูง (ultrasonic bath) โดยทิ้งระยะเวลาไว้ประมาณ 10 นาที ที่อุณหภูมิห้องเพื่อให้วัสดุเชิงประกอบทำปฏิกิริยากับกรดหรือเบสที่เติมลงไป จากนั้นถ่ายภาพการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบทุกค่าพีเอชที่ปรับได้เพื่อดูความสามารถของการเปลี่ยนสีในแต่ละช่วงพีเอช จากนั้นวิเคราะห์สมบัติการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 400 ถึง 800 นาโนเมตร โดยใช้เครื่อง UV-Vis Spectroscopy (Specord S 100 B, Analytik Jena) และใช้น้ำที่ปราศจากไอออนเป็น blank

3.8.2 พฤติกรรมเปลี่ยนสีต่อกรดและเบสอินทรีย์

นำวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมด้วยค่าพีเอชที่แตกต่างกันเจือจางด้วยน้ำปราศจากไอออนให้มีค่าการดูดกลืนแสงประมาณ 0.8 เพื่อให้สังเกตการเปลี่ยนสีที่เห็นได้ชัดขึ้นเมื่อมีการเติมกรดและเบสอินทรีย์ลงไป

ส่วนที่ 1 การตอบสนองต่อกรดซาลิซิลิก (Salicylic acid)

นำวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร Poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมด้วยค่าพีเอชที่แตกต่างกันปริมาตร 2 มิลลิลิตร ใส่ใน quartz cuvette เพื่อศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองโดย

การเปลี่ยนสีเมื่อเติมกรดอินทรีย์ ซึ่งในการศึกษานี้จะใช้กรดซาลิซิลิก (Salicylic acid) ความเข้มข้น 50 มิลลิโมลาร์ เติมลงในสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร Poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ด้วยไมโครปิเปต แล้วนำเข้าเครื่องล้างความถี่สูงโดยทิ้งระยะเวลาไว้ประมาณ 5 นาที ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อให้สารแขวนลอยทำปฏิกิริยากับกรดซาลิซิลิกที่เติมลงไป พร้อมกับถ่ายภาพเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของสีที่เกิดขึ้น จากนั้นวิเคราะห์สมบัติการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 400 ถึง 800 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-Vis Spectroscopy (Specord S 100 B, Analytik Jena) และใช้น้ำที่ปราศจากไอออนเป็น blank

ส่วนที่ 2 การตอบสนองต่อออกทิลเอมีน (Octylamine base)

นำวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร Poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมด้วยค่าพีเอชที่แตกต่างกันปริมาตร 2 มิลลิลิตร ใส่ใน quartz cuvette เพื่อศึกษาพฤติกรรมตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีเมื่อเติมเบสอินทรีย์ ซึ่งในการศึกษานี้จะใช้ออกทิลเอมีน (Octylamine base) ความเข้มข้น 20 มิลลิโมลาร์ เติมลงในสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร Poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ด้วยไมโครปิเปต แล้วนำเข้าเครื่องล้างความถี่สูงโดยทิ้งระยะเวลาไว้ประมาณ 5 นาที ที่อุณหภูมิห้องเพื่อให้สารแขวนลอยทำปฏิกิริยากับออกทิลเอมีนที่เติมลงไป พร้อมกับถ่ายภาพเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของสีที่เกิดขึ้น จากนั้นวิเคราะห์สมบัติการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 400 ถึง 800 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-Vis Spectroscopy (Specord S 100 B, Analytik Jena) และใช้น้ำที่ปราศจากไอออนเป็น blank

3.9 เปรียบเทียบพฤติกรรมตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรชนิดต่าง ๆ ต่อกรดและเบส

3.9.1 พฤติกรรมเปลี่ยนสีต่อกรดและเบส

ในการศึกษานี้จะเปรียบเทียบพฤติกรรมตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีต่อกรดและเบสของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/ZnO และ poly(PCDA)/Zn(CH₃CO₂)₂ โดยใช้ PCDA เป็นมอนอเมอร์ตั้งต้นและวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(TCDA)/Zn²⁺/ZnO, poly(TCDA)/Zn(CH₃CO₂)₂ และ poly(TCDA)/SiO₂ โดยใช้ TCDA เป็นมอนอเมอร์ตั้งต้น โดยใช้ขั้นตอนเดียวกับการศึกษาพฤติกรรมตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ต่อกรดและเบส ดังแสดงในหัวข้อที่ 3.8.1

3.9.2 พฤติกรรมการเปลี่ยนสีต่อกรดและเบสอินทรีย์

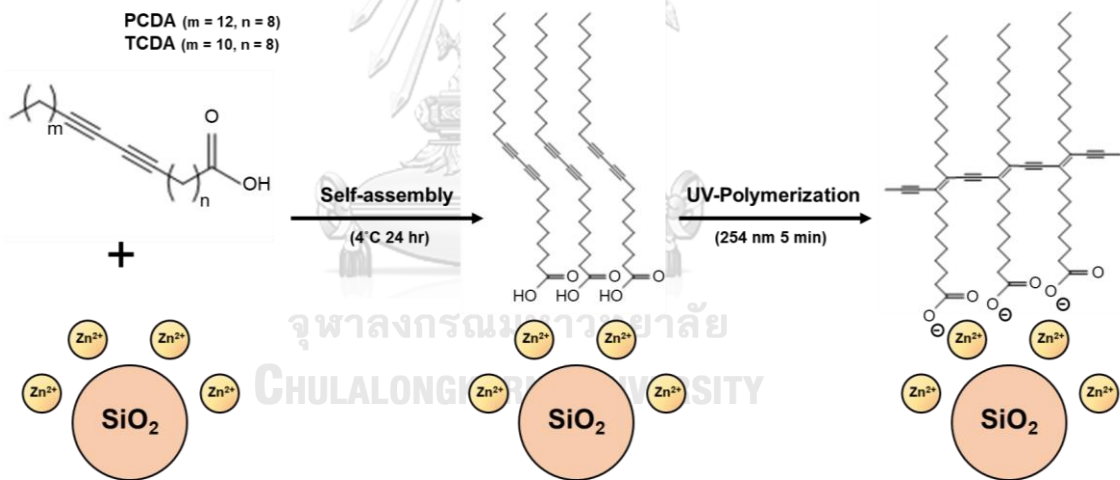
ในการศึกษานี้จะทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีต่อกรดและเบสอินทรีย์ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ และ poly(TCDA)/Zn²⁺/SiO₂ โดยใช้ขั้นตอนเดียวกับการศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ต่อกรดและเบสอินทรีย์ ดังแสดงในหัวข้อที่ 3.8.2



บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมและปรับปรุงสมบัติของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร พอลิไดแอเซทิลีน/ซิลิกา หรือ poly(PCDA)/SiO₂ ให้มีการตอบสนองต่อสิ่งกระตุ้นภายนอกในระดับที่แตกต่างออกไปจากเดิม โดยการเติมอนุภาคซิงก์(II)ไอออน (Zn²⁺) ที่เตรียมได้จากซิงก์อะซีเตตลงในระบบของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบโดยใช้ 10,12-เพนตะโคเซไดโนอิกแอซิด (PCDA) เป็นมอนอเมอร์ตั้งต้นในการเตรียม กลายเป็นวัสดุชนิดใหม่ที่สามารถใช้งานได้ในช่วงกว้างมากขึ้น เรียกว่า สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์(II)ไอออน/ซิลิกา หรือ poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ดังรูปที่ 4.1 โดยในการศึกษานี้จะมีการเตรียมวัสดุเชิงประกอบที่ค่าพีเอชแตกต่างกันเพื่อศึกษาผลของค่าพีเอชต่อการจัดเรียงตัวเป็นวัสดุเชิงประกอบและพฤติกรรม การตอบสนองต่อสิ่งกระตุ้นหรือสิ่งรบกวน ซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดของผลการวิจัยและทำการวิเคราะห์ผลการวิจัยในประเด็นต่าง ๆ ดังหัวข้อต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 แบบจำลองกระบวนการเกิดวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂

4.1 การศึกษาสมบัติและวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมด้วยค่าพีเอชต่างกัน

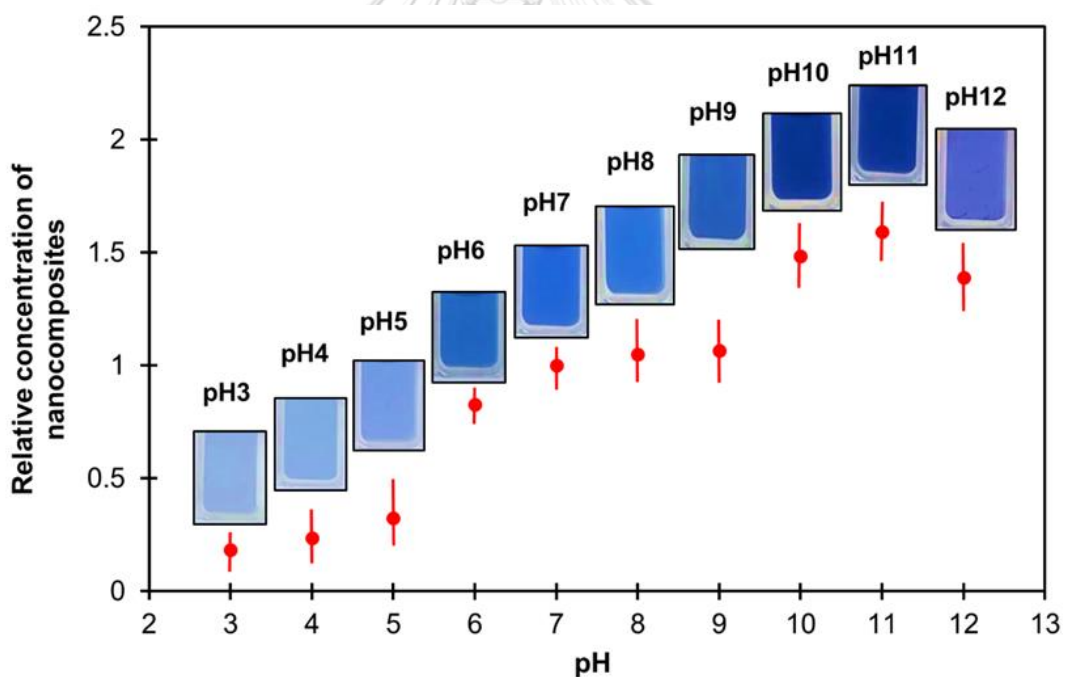
4.1.1 สมบัติการดูดกลืนแสง (Absorbance)

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของรังสียูวีและวิสิเบิล ด้วยเทคนิค UV-Vis Spectrophotometry เพื่อใช้ค่าความเข้มของการดูดกลืนแสงในการวิเคราะห์ปริมาณการเกิด

วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ในสารแขวนลอยที่เตรียมด้วยค่าพีเอชที่แตกต่างกันและศึกษาการจัดเรียงตัวและระยะคอนจูเกต (conjugation length) ของสายโซ่พอลิเมอร์ โดยสามารถพิจารณาได้จากค่าของความยาวคลื่นที่ตำแหน่งการดูดกลืนแสงสูงสุดหรือ λ_{\max} ในสเปกตรารการดูดกลืนแสง ถ้าตำแหน่งของแถบการดูดกลืนแสง (absorption band) อยู่ที่ค่าความยาวคลื่นสูงกว่าหรือเรียกว่า การเกิด red shift จะแสดงถึงการเพิ่มขึ้นของระยะคอนจูเกตของสายโซ่พอลิเมอร์ แต่ถ้าตำแหน่งของแถบการดูดกลืนแสงปรากฏที่ความยาวคลื่นต่ำกว่าหรือเรียกว่าการเกิด blue shift จะแสดงถึงการลดลงของระยะคอนจูเกตของสายโซ่พอลิเมอร์ จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/ZnO ในน้ำปราศจากไอออนจะมีสีน้ำเงินที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่าและมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตร พร้อมกับแถบการดูดกลืนแสงที่ประมาณ 590 นาโนเมตร นอกจากนี้ยังมีลักษณะสำคัญของการเกิดเป็นวัสดุเชิงประกอบคือแถบการดูดกลืนแสงที่ประมาณ 680 นาโนเมตร ซึ่งแสดงถึงการมีระยะคอนจูเกตที่ยาวในโครงสร้างเวสิเคิล แม้ว่าจะเปลี่ยนตัวกลางเป็นตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น โทลูอิน เอทานอล หรือคลอโรฟอร์ม สารแขวนลอยที่เตรียมได้ก็ยังคงมีสีน้ำเงินและลักษณะการดูดกลืนแสงดังกล่าว นอกจากนี้ยังมีการศึกษาสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/ZnO ที่เตรียมขึ้นที่ค่าพีเอชแตกต่างกัน จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรดังกล่าวสามารถเตรียมได้ที่ค่าพีเอชตั้งแต่ 6 ขึ้นไป เนื่องจากสารแขวนลอยมีสีน้ำเงินที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าและจากการปรับค่าพีเอชที่ใช้ในการเตรียมพบว่าปริมาณในการเกิดวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามค่าพีเอชที่สูงขึ้น ซึ่งจากการสังเกตด้วยตาเปล่าจะเห็นได้ว่าวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรที่เตรียมได้มีสีน้ำเงินเข้มขึ้นเมื่อค่าพีเอชของสารแขวนลอยสูงขึ้น ดังนั้นการปรับค่าพีเอชที่ใช้ในการเตรียมจึงมีส่วนสำคัญในการทำให้เกิดวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรและจากการศึกษาเดียวกันนี้ พบว่าวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/ZnO ที่เตรียมได้ในสภาวะที่เป็นกรดหรือมีค่าพีเอชต่ำกว่า 6 จะมีปริมาณน้อยกว่าหรือสีจางกว่า ทั้งนี้อาจเป็นเพราะซิงก์ออกไซด์ (ZnO) ที่อยู่ในวัสดุเชิงประกอบเกิดการละลายไปเมื่ออยู่ในสภาวะที่มีความเป็นกรด

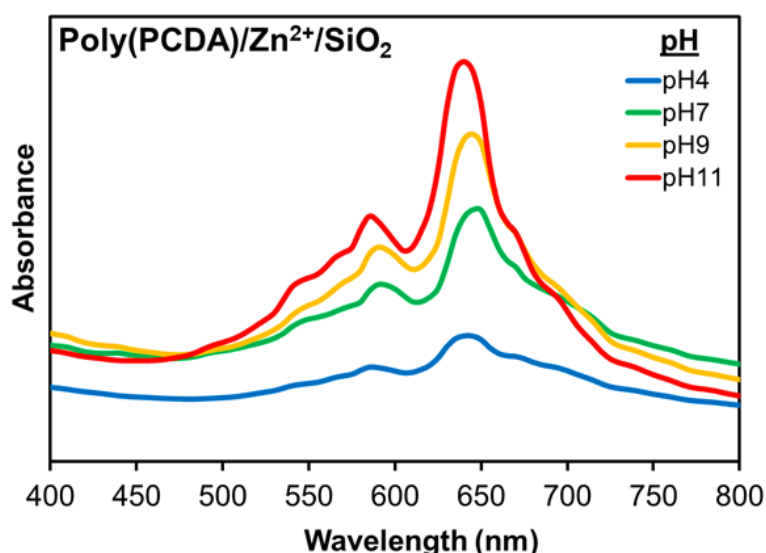
ผลจากการศึกษาค่าการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมด้วยค่าพีเอชที่แตกต่างกัน พบว่าสารแขวนลอยที่ได้มีสีน้ำเงินและมีค่าการดูดกลืนแสงที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมา แม้ว่าการศึกษานี้จะมีการเปลี่ยนโลหะออกไซด์จากซิงก์ออกไซด์เป็นอนุภาคนาโนซิลิกา นอกจากนี้ยังสามารถเตรียมสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ได้ในช่วงพีเอช pH4 ถึง pH11 ซึ่งเป็นการเตรียมได้ในช่วงความเป็นกรดและเบสที่กว้างกว่าสารแขวนลอยของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร

poly(PCDA)/Zn²⁺/ZnO ที่ได้มีการศึกษามาก่อนหน้านี้ นอกจากนั้นพบว่าการปรับค่าพีเอชที่ใช้ในการเตรียมสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ทำให้ปริมาณการเกิดวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรมีค่าเพิ่มมากขึ้นในสถานะที่มีค่าพีเอชสูงขึ้น เนื่องจากสารแขวนลอยที่เตรียมได้เป็นสีน้ำเงินเข้มขึ้นตามค่าพีเอชที่สูงขึ้นเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าและเมื่อนำสารแขวนลอยไปวัดค่าการดูดกลืนแสง พบว่าค่าการดูดกลืนแสงจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นในสถานะของสารแขวนลอยที่ช่วงพีเอชสูงขึ้นตามลำดับ ในการศึกษาี้ผู้วิจัยได้ทำการเตรียมสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบใหม่ที่สถานะความเป็นกรด - เบส เดียวกันกับครั้งแรกซ้ำทั้งหมดอีก 5 ครั้ง เพื่อยืนยันว่าปริมาณการเกิดวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรมีค่าแปรผันโดยตรงกับค่าพีเอชที่ใช้ในการเตรียมและนำสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรที่เตรียมได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงตอนเริ่มต้นด้วยเทคนิค UV-Vis Spectrophotometry และนำค่าที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสัมพัทธ์ของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร (Relative concentration of nanocomposites) กับค่าพีเอช ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ความเข้มข้นสัมพัทธ์และภาพถ่ายของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมที่พีเอชต่างกัน โดยแถบข้อผิดพลาดได้จากการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรทั้งหมด 5 ชุดการทดลอง

จากการศึกษาสเปกตรากการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ โดยเตรียมที่ค่า pH4 pH7 pH9 และ pH11 ดังรูปที่ 4.3 เมื่อพิจารณาสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมในสภาวะที่มีความเป็นกรด (pH4) และเบส (pH11) สูงพบว่าตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุดปรากฏที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตรและปรากฏยอดการดูดกลืนแสง (vibronic band) ที่ความยาวคลื่นประมาณ 585 นาโนเมตร ซึ่งเป็นสเปกตรากการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงินทำให้มองเห็นสารแขวนลอยเป็นสีน้ำเงินและเมื่อพิจารณาสเปกตรากการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยดังกล่าวที่เตรียมได้ที่ค่า pH7 และ pH9 จะพบว่าตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุดและแถบ vibronic เลื่อนไปอยู่ในตำแหน่งที่ความยาวคลื่นสูงขึ้นหรือเกิด red shift โดยความยาวคลื่น ณ ตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุดมีค่าเท่ากับ 645 นาโนเมตรและปรากฏแถบ vibronic ที่ความยาวคลื่น 590 นาโนเมตร แสดงให้เห็นว่าสายโซ่หลักที่มีโครงสร้างเป็นแบบคอนจูเกตของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ในสภาวะปกติที่ไม่ได้ทำการปรับค่าพีเอช (pH7) และสภาวะที่มีการปรับพีเอชเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย (pH9) มีการจัดเรียงตัวอยู่ในระนาบเดียวกันมากกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมในสภาวะที่มีความเป็นกรด (pH4) และเบส (pH11) สูง ส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของระยะคอนจูเกตของ PCDA จึงทำให้เกิด red shift ขึ้น แม้ว่าจะเกิด red shift ไม่มากนักก็ตาม นอกจากนี้ยังปรากฏแถบการดูดกลืนแสงเล็ก ๆ ที่ความยาวคลื่นประมาณ 670 นาโนเมตรในสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ในช่วงพีเอชทั้ง 4 ช่วงอีกด้วย



รูปที่ 4.3 สเปกตรากการดูดกลืนแสงที่อุณหภูมิห้องของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมได้ที่ pH4 pH7 pH9 และ pH11

จากสเปกตรากการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ในสภาวะปกติที่ไม่ได้ทำการปรับค่าพีเอช (pH7) แสดงแถบการดูดกลืนแสงที่แคบมากกว่าสเปกตรากการดูดกลืนแสงของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมขึ้นที่ pH4 pH9 และ pH11 โดยปกติแล้วความกว้างของแถบการดูดกลืนแสงจะขึ้นอยู่กับสิ่งแวดล้อมของโครโมฟอร์ ถ้าสิ่งแวดล้อมของโครโมฟอร์มีความเป็นระเบียบหรือจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกัน จะส่งผลให้แถบการดูดกลืนแสงมีความแคบ ดังนั้นการที่สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมโดยไม่ปรับค่าพีเอช (pH7) ในการเตรียมมีแถบการดูดกลืนแสงที่แคบกว่าสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ในช่วง pH4 pH9 และ pH11 แสดงให้เห็นว่าสิ่งแวดล้อมโดยรอบโครโมฟอร์ อาทิเช่น โซ่ข้าง (side chain) มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบมากกว่า เนื่องจากในสภาวะดังกล่าวสารแขวนลอยไม่ถูกรบกวนด้วยกรดและเบสที่เติมเข้าไปในระหว่างการเตรียม ทำให้โซ่ข้างไม่เกิดการขยับและยังคงจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกัน

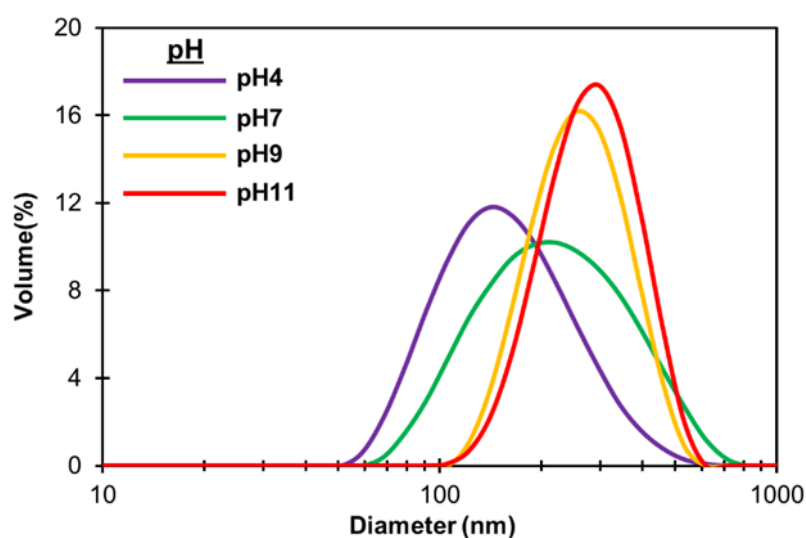
4.1.2 ประจุโดยรวมที่พื้นผิวของอนุภาคนาโนซิลิกา (Zeta potential)

การจัดเรียงตัวของโครงสร้าง PCDA ที่มีลักษณะเป็น bilayer จะหันส่วนหัวที่เป็นหมู่คาร์บอกซิลออกด้านนอก ซึ่งจะแตกตัวเป็นหมู่คาร์บอกซิเลทที่มีประจุลบ ทำให้ประจุโดยรวมที่พื้นผิวของอนุภาคมีค่าเป็นลบ จากการวิเคราะห์ค่าศักย์ซีต้า (Zeta potential) ของอนุภาคนาโนซิลิกาในตัวกลางน้ำ ในสภาวะปกติที่ไม่มีการปรับค่าพีเอชในระหว่างการเตรียม (pH7) มีค่าประมาณ - 30 มิลลิโวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.14 เมื่อเติมกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ลงไปในอนุภาคนาโนซิลิกาเพื่อปรับค่าพีเอชให้ได้ตามต้องการ ในสภาวะกรดระหว่างช่วง pH1 ถึง pH6 พบว่าการเติมกรดลงไปทำให้ค่า Zeta potential มีแนวโน้มเป็นบวกมากขึ้นและในช่วงพีเอชต่ำนี้ทำให้ประจุที่บริเวณพื้นผิวเกาะกันไม่ดีเท่าที่ควร ส่งผลให้อนุภาคมีขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับในสภาวะที่เป็นเบส โดยในทางกลับกันพบว่าการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) นั้น ทำให้ลักษณะของประจุที่ผิวเกิดการเกาะกันได้ดี โดยพบว่าอนุภาคที่อยู่ในสภาวะเบสนี้มีขนาดใหญ่ขึ้น

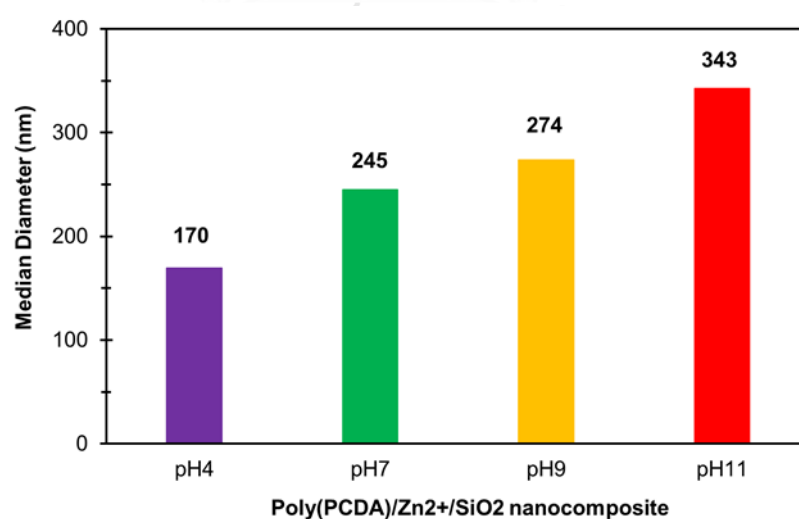
4.1.3 ขนาดและการกระจายขนาดอนุภาค (Particle size distribution)

เมื่อนำสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ซึ่งเตรียมได้ที่ค่า pH4 pH7 pH9 และ pH11 มาทำการศึกษขนาดและการกระจายขนาดของอนุภาคด้วยเทคนิคการกระเจิงแสงแบบไดนามิกส์ (dynamic light scattering) ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 4.4 โดยจากการศึกษาพบว่าขนาดของอนุภาคกระจายตัวอยู่ในช่วง 10 ถึง 1000 นาโนเมตร เมื่อพิจารณาค่ากลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคสำหรับสารแขวนลอยที่เตรียมได้

ในช่วง pH4 pH7 pH9 และ pH11 ดังรูปที่ 4.5 มีค่า 170, 245, 274 และ 343 นาโนเมตร ตามลำดับ และจากการวิเคราะห์พบว่าการเติมกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ลงในสารแขวนลอย เพื่อปรับค่าพีเอชให้ได้ pH4 ส่งผลให้อนุภาคมีขนาดเล็กลงเพียงเล็กน้อย แต่จากการศึกษา การกระจายขนาดของอนุภาคพบว่าสารแขวนลอยที่เตรียมที่พีเอชดังกล่าวมีการกระจายขนาดอนุภาค ในช่วงที่กว้างที่สุดหรืออาจกล่าวได้ว่าในสภาวะนี้มีอนุภาคหลายขนาดทั้งเล็กและใหญ่ผสมกัน โดยอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเกิดจากการเกาะกลุ่มกันของอนุภาค



รูปที่ 4.4 แสดงการกระจายขนาดอนุภาคของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ โดยเตรียมที่ pH4 pH7 pH9 และ pH11 ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 ค่ากลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (median diameter) ของอนุภาคสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ โดยเตรียมที่ pH4 pH7 pH9 และ pH11

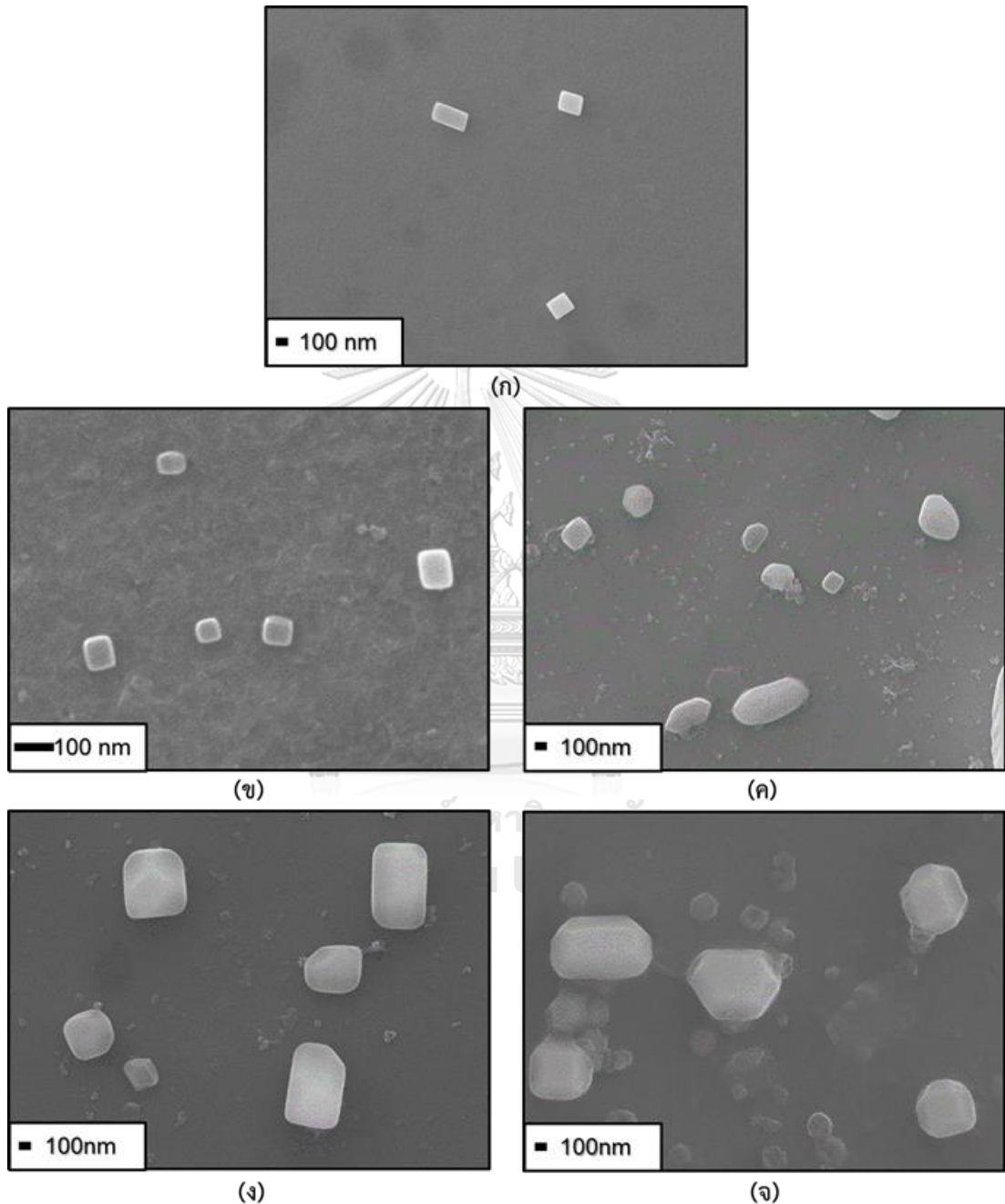
สำหรับการเติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) เพื่อปรับค่าพีเอชให้เป็น pH9 และ pH11 จะทำให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับสารแขวนลอยที่ไม่ได้ทำการปรับพีเอช (pH7) เนื่องจากในช่วงพีเอชสูงลักษณะของประจุลบที่ผิวอนุภาคและประจุลบของหมู่คาร์บอกซิเลท จะทำให้เกิดการเกาะกันได้ดีโดยมี Zn^{2+} เป็นตัวช่วย และจะเกิดการเข้าเกาะกันอย่างรวดเร็วจนทำให้มีโอกาสที่ PDA จะหุ้มอนุภาคนาโนซิลิกาหลาย ๆ อนุภาคเข้าด้วยกัน ส่งผลให้มีขนาดที่ใหญ่ขึ้นเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้น อย่างไรก็ตามจากการศึกษาที่สรุปได้ว่าการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/ Zn^{2+} /SiO₂ ที่ค่าพีเอชสูงขึ้นไปทำให้ขนาดของอนุภาคใหญ่ขึ้นตามลำดับ

4.1.4 สัณฐานวิทยา (Morphology)

การศึกษาสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/ Zn^{2+} /SiO₂ โดยเตรียมวัสดุเชิงประกอบดังกล่าวที่ช่วง pH4 pH7 pH9 และ pH11 และใช้ Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM) ในการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร ได้ผลดังรูปที่ 4.6

จากการศึกษาเมื่อนำอนุภาคนาโนซิลิกาและวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรที่เตรียมได้ที่ pH4 pH7 pH9 และ pH11 มาศึกษาลักษณะของอนุภาคหรือสัณฐานวิทยาโดยใช้เทคนิค Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM) และถ่ายภาพที่กำลังขยายต่าง ๆ เพื่อให้เห็นลักษณะของอนุภาคที่เกิดขึ้นจากการเตรียมวัสดุเชิงประกอบในช่วงพีเอชที่แตกต่างกัน พบว่าเมื่อถ่ายภาพที่กำลังขยาย 30,000 เท่า อนุภาคนาโนซิลิกาที่ใช้ในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร มีลักษณะรูปร่างของอนุภาคเป็นทรงสี่เหลี่ยม มีการกระจายตัวของอนุภาคอย่างสม่ำเสมอและมีขนาดของอนุภาคเดี่ยวอยู่ในช่วงประมาณ 100 ถึง 200 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ก) และเมื่อพิจารณาวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/ Zn^{2+} /SiO₂ ที่เตรียมได้ที่ pH4 โดยใช้กำลังขยายเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ข) พบว่าอนุภาคของวัสดุเชิงประกอบดังกล่าวมีรูปร่างเป็นทรงสี่เหลี่ยมเหมือนกับอนุภาคนาโนซิลิกามีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วงประมาณ 50 ถึง 200 นาโนเมตร ซึ่งจะเห็นได้ว่าวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/ Zn^{2+} /SiO₂ ที่เตรียมได้ที่ pH4 จะมีขนาดของอนุภาคเล็กกว่าอนุภาคของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ในช่วง pH7 pH9 และ pH11 ดังรูปที่ 4.6 (ค) (ง) และ (จ) ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าอนุภาคของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ที่ pH11 มีการเกาะกันเป็นกลุ่มโดยมีขนาดของกลุ่มอนุภาคอยู่ในช่วง 200 ถึง 400 นาโนเมตรและพบว่าขนาดของอนุภาคดังกล่าวมีขนาดใหญ่ขึ้นกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ที่พีเอชเนื่องจากในช่วงพีเอชสูงลักษณะของประจุที่ผิวจะทำให้เกิดการเกาะกันได้ดีดังที่อธิบายในหัวข้อก่อนหน้า โดยอาจเกิดการเข้าเกาะกันอย่างรวดเร็ว

ทำให้มีโอกาที่ PDA จะหุ้มอนุภาคนาโนซิลิกาหลาย ๆ อนุภาคเข้าด้วยกัน ส่งผลให้มีขนาดที่ใหญ่ขึ้น เมื่อค่าพีเอชสูงขึ้น ดังนั้นจากการศึกษาจะเห็นได้ว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมที่ค่าพีเอชสูงขึ้นจะทำให้ขนาดของอนุภาคใหญ่ขึ้นตามลำดับ



รูปที่ 4.6 ลักษณะสัณฐานวิทยาจาก FESEM ของ (ก) อนุภาคนาโนซิลิกา (ข) วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมที่ pH4 (ค) pH7 (ง) pH9 และ (จ) pH11 ตามลำดับ

4.1.5 โครงสร้างระดับโมเลกุลของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂

การศึกษาในส่วนนี้จำเป็นต้องใช้สารปริมาณค่อนข้างมากในการวิเคราะห์ ดังนั้นการเตรียมจะต้องใช้ปริมาณและความเข้มข้นของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่มากขึ้น ดังรายละเอียดที่ได้ระบุไว้ในบทที่ 3 โดยในการศึกษาโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรดังกล่าวจะแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือการวิเคราะห์พันธะในโครงสร้างโมเลกุลซึ่งจะทำการศึกษาหมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างสายโซ่หลัก (backbone) และสายโซ่ข้าง (sidechain) และการวิเคราะห์การจัดเรียงตัวของโครงสร้างซึ่งจะเป็นการศึกษาระยะห่างระหว่างชั้นในโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เกิดขึ้น โดยผลการศึกษาดังกล่าวสามารถวิเคราะห์และอธิบายได้ดังนี้

ส่วนที่ 1 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างสายโซ่หลัก (backbone chain) และสายโซ่ข้าง (side chain)

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปีสามารถบ่งบอกการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในสายโซ่หลัก (backbone) ของโครงสร้าง PDA ได้ จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าโดยทั่วไปแล้ววัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/ZnO (เฟสสีน้ำเงิน) จะแสดงพีกการสั่นของหมู่ฟังก์ชันแอลคีน (C=C) และแอลไคน์ (C≡C) ที่เลขคลื่นประมาณ 1449 cm⁻¹ และ 2075 cm⁻¹ ตามลำดับ หลังจากให้ความร้อนจนเปลี่ยนเป็นเฟสสีแดง เกิดพีกการสั่นที่เลขคลื่นที่ประมาณ 1512 cm⁻¹ และ 2116 cm⁻¹ ซึ่งเป็นการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน C=C และ C≡C ในเฟสสีแดงตามลำดับ การปรากฏของสองพีกใหม่นี้แสดงถึงการปลดปล่อยความเครียด (strain) ที่อยู่ในสายโซ่หลัก

เมื่อนำสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมที่พีเอชต่าง ๆ ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี พบว่าสารแขวนลอยที่เตรียมที่ pH4 ในกรณีของเฟสสีน้ำเงิน (blue phase) ดังรูปที่ 4.7 จะแสดงพีกการสั่นของหมู่ฟังก์ชันแอลคีน (C=C) และหมู่ฟังก์ชันแอลไคน์ (C≡C) ที่เลขคลื่นประมาณ 1512 cm⁻¹ และ 2104 cm⁻¹ ตามลำดับ โดยจะมีพีก 1446 cm⁻¹ และ 2079 cm⁻¹ เพิ่มขึ้นมาด้วยโดยมีลักษณะเป็นพีกที่เกิดขึ้นคู่กันและในการเกิดพีกคู่กันนี้แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของสายโซ่หลักมีการผ่อนคลาย (relax) หลังจากให้ความร้อนจนกลายเป็นสีแดง จะปรากฏเลขคลื่นที่ประมาณ 1514 cm⁻¹ และ 2117 cm⁻¹ ซึ่งเป็นการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน C=C และ C≡C ในเฟสสีแดงตามลำดับ ดังรูปที่ 4.8 โดยจะเห็นได้ว่าการปรากฏพีกดังกล่าวข้างต้นมีลักษณะเช่นเดียวกับวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร

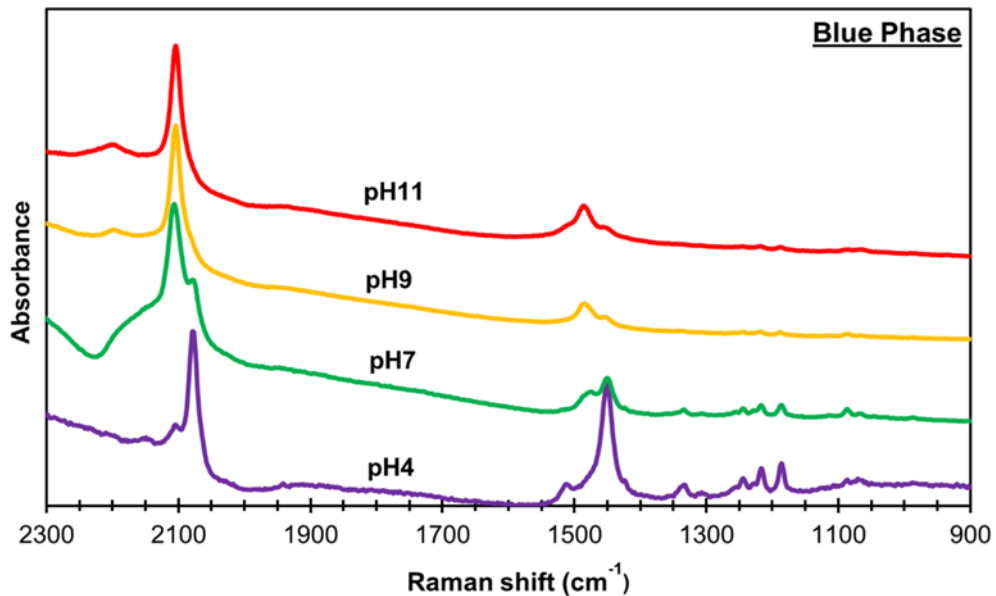
poly(PCDA)/Zn²⁺/ZnO (เฟสสีแดง) โดยการปรากฏของของสองพีกใหม่นี้แสดงถึงการปลดปล่อยความเครียดที่อยู่ในโครงสร้างสายโซ่หลักซึ่งจะไม่เกิดการผันกลับของสีได้อีก

ตารางที่ 4.1 เลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันแอลคีน (C=C) และแอลไคน์ (C≡C) ของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมที่ pH4 pH7 pH9 และ pH11

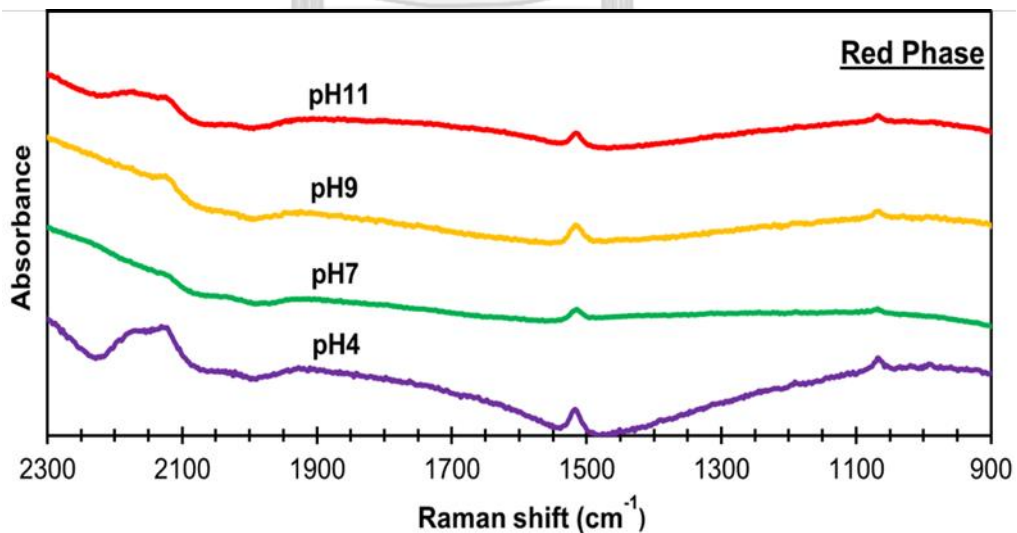
พีเอช	Blue phase		Red phase	
	$\nu(\text{C}=\text{C})$ cm ⁻¹	$\nu(\text{C}\equiv\text{C})$ cm ⁻¹	$\nu(\text{C}=\text{C})$ cm ⁻¹	$\nu(\text{C}\equiv\text{C})$ cm ⁻¹
pH4	1512, 1446	2104, 2079	1514	2117
pH7	1473, 1448	2115, 2076	1514	2116
pH9	1482, 1448	2115	1514	2116
pH11	1485, 1451	2104	1512	2116

นอกจากนี้วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมขึ้นที่ pH9 และ pH11 จากรูปที่ 4.7 ในกรณีที่เฟสสีน้ำเงิน พบว่าการปรากฏพีกของรามานสเปกตราจะมีลักษณะเหมือนกัน โดยสารแขวนลอยที่เตรียมที่ pH9 จะปรากฏพีกการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน C=C และ C≡C ที่เลขคลื่นประมาณ 1482 cm⁻¹ และ 2115 cm⁻¹ ในขณะที่สารแขวนลอยที่เตรียมที่ pH7 จะปรากฏพีกการสั่นที่เลขคลื่นประมาณ 1485 cm⁻¹ และ 2104 cm⁻¹ ตามลำดับ โดยพบว่าการเลื่อนตำแหน่งของพีกเพียงเล็กน้อย ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งจากการศึกษาพบว่าการเตรียมวัสดุเชิงประกอบที่ช่วงพีเอชสูงหรือมีความเป็นเบสสูงจะทำให้พีกการสั่นที่เลขคลื่นประมาณ 2075 cm⁻¹ หายไปและมีพีกการสั่นที่เลขคลื่นประมาณ 1148 cm⁻¹ เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย เป็นการบ่งบอกว่าสายโซ่หลักในโครงสร้าง PDA เริ่มถูกรบกวนจากเบสที่เติมลงไปในช่วงขั้นตอนการเตรียมวัสดุเชิงประกอบทำให้สายโซ่หลักเกิดการผ่อนคลายมากขึ้น หลังจากให้ความร้อนจนทำให้วัสดุเชิงประกอบดังกล่าวเปลี่ยนไปเป็นเฟสสีแดงอย่างสมบูรณ์ ดังรูปที่ 4.8 เมื่อพิจารณาสารแขวนลอยที่เตรียมที่ pH9 พบว่ารามานสเปกตรัมปรากฏพีกการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน C=C และ C≡C ที่เลขคลื่นประมาณ 1514 cm⁻¹ และ 2116 cm⁻¹ ตามลำดับ สำหรับสารแขวนลอยที่เตรียมที่ pH11 ปรากฏพีกการสั่น

ของหมู่ฟังก์ชัน C=C และ C≡C ที่เลขคลื่นประมาณ 1512 cm^{-1} และ 2116 cm^{-1} ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.1 ทำให้วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรเกิดการเปลี่ยนสีแบบไม่ผันกลับ เนื่องจากสายโซ่หลักภายในโครงสร้างของ PDA ถูกรวบจนอย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้โครงสร้างบิดตัวไปจนไม่สามารถบิดกลับหรือเกิดการเปลี่ยนสีกลับมาเป็นเฟสสีน้ำเงินได้



รูปที่ 4.7 รามานสเปกตรัมของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ เตรียมที่ pH4 pH7 pH9 และ pH11 เมื่อมีเฟสสีน้ำเงิน

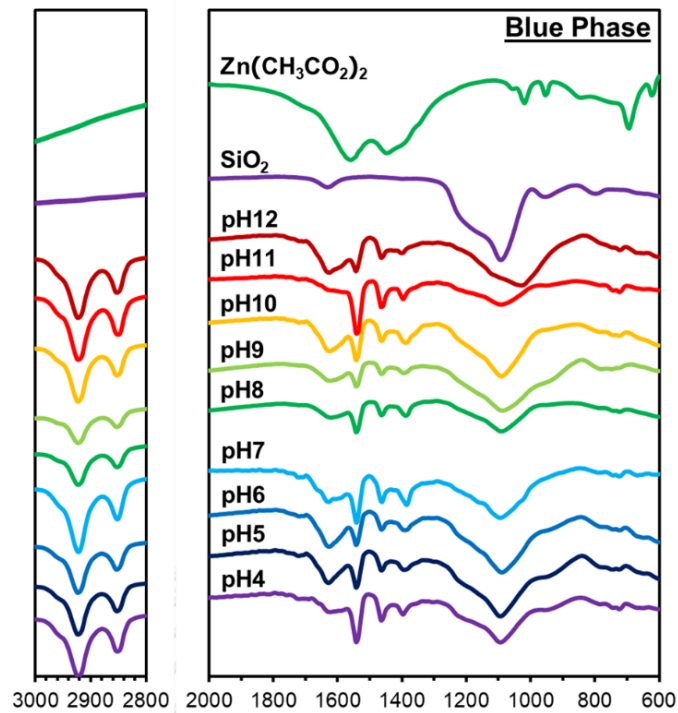


รูปที่ 4.8 รามานสเปกตรัมของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ เตรียมที่ pH4 pH7 pH9 และ pH11 เมื่อมีเฟสสีแดง

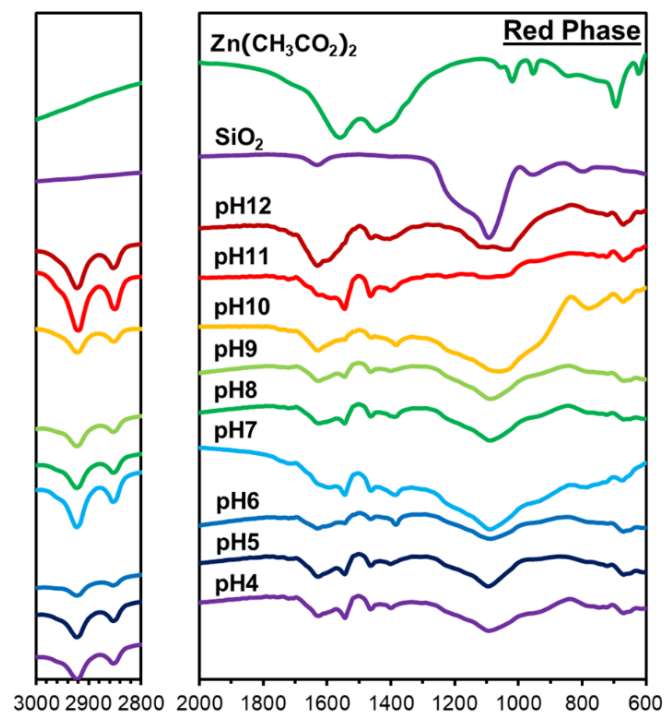
ส่วนที่ 2 วิเคราะห์โครงสร้างและการจัดเรียงตัว

ส่วนต่อมาเป็นการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี จากการศึกษาในงานวิจัยก่อนหน้านี้ พบว่าอินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/ZnO ในกรณีเฟสสีน้ำเงินจะพบพีกการสั่นที่เลขคลื่นประมาณ 2848 2918 และ 2959 cm⁻¹ โดยจะเป็นการสั่นแบบสมมาตรของหมู่เมทิลีน [$\nu_s(-CH_2)$] การสั่นแบบไม่สมมาตรของหมู่เมทิลีน [$\nu_{as}(-CH_2)$] และการสั่นแบบไม่สมมาตรของหมู่เมทิล [$\nu_{as}(-CH_3)$] ตามลำดับ รวมทั้งการสั่นแบบ scissoring ของหมู่เมทิลีนที่เลขคลื่นประมาณ 1460 cm⁻¹ และลักษณะเฉพาะของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรคือปรากฏพีกการสั่นของหมู่คาร์บอกซิเลท (-COO⁻) ที่เลขคลื่นประมาณ 1539 [$\nu_{as}(-COO^-)$] และ 1396 [$\nu_s(-COO^-)$] cm⁻¹ ซึ่งเป็นการบ่งชี้ถึงการเกิดแรงระหว่างประจุระหว่างประจุบวกที่พื้นผิวของซิงก์ออกไซด์และประจุลบของ -COO⁻ ที่ส่วนหัวของ PDA

จากการศึกษาเมื่อนำซิงก์อะซิเตต (Zinc acetate) และอนุภาคนาโนซิลิกา (SiO₂) เป็นส่วนประกอบสำคัญที่ใช้ในการเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร ส่งผลให้ได้วัสดุชนิดใหม่ที่มีพฤติกรรมตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้ ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกตรัม ดังรูปที่ 4.9 พบว่าซิงก์อะซิเตตปรากฏพีกการสั่นที่เลขคลื่นประมาณ 1558, 1442, 1057, 1018, 957, 841, 694 และ 625 cm⁻¹ ในขณะที่อนุภาคนาโนซิลิกาจะปรากฏพีกการสั่นที่เลขคลื่นประมาณ 1628, 1088, 957 และ 795 cm⁻¹ เมื่อพิจารณาสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมได้ในช่วงพีเอชต่ำ (pH4) ในกรณีเฟสสีน้ำเงิน ดังรูปที่ 4.9 จะพบพีกการสั่นที่เลขคลื่นประมาณ 2846 2924 และ 2954 cm⁻¹ โดยจะเป็นการสั่นแบบสมมาตรของหมู่เมทิลีน [$\nu_s(-CH_2)$] การสั่นแบบไม่สมมาตรของหมู่เมทิลีน [$\nu_{as}(-CH_2)$] และการสั่นแบบไม่สมมาตรของหมู่เมทิล [$\nu_{as}(-CH_3)$] ตามลำดับ รวมทั้งการสั่นแบบ scissoring ของหมู่เมทิลีนที่เลขคลื่นประมาณ 1458 cm⁻¹ และลักษณะเฉพาะของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรคือปรากฏพีกการสั่นของหมู่คาร์บอกซิเลทที่เลขคลื่นประมาณ 1543 [$\nu_{as}(-COO^-)$] และ 1396 [$\nu_s(-COO^-)$] cm⁻¹ ดังตารางที่ 4.2 ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร ในสถานะที่มีความเป็นกรดสูงไม่มีผลทำให้หมู่ฟังก์ชัน -COO⁻ หายไปจากระบบ เนื่องจากยังคงพบพีกการสั่นอยู่ในเส้นสเปกตรัมแสดงว่าที่สถานะนี้ยังคงมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างส่วนหัวของ PDA กับประจุที่พื้นผิวของอนุภาคนาโนซิลิกาเกิดขึ้นอยู่ ส่วนพีกการสั่นในช่วงเลขคลื่น 1628, 1095, 941 และ 725 cm⁻¹ ที่ปรากฏเพิ่มขึ้นมาเป็นเอกลักษณ์เฉพาะของอนุภาคนาโนซิลิกาและซิงก์อะซิเตตที่อยู่ในโครงสร้างสำหรับวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรที่เตรียมได้ในสถานะอื่น ได้แก่ pH5 pH6 และ pH7 ก็ปรากฏพีกเช่นเดียวกันหรืออาจมีการเลื่อนตำแหน่งของพีกเล็กน้อยเมื่อเตรียมที่พีเอชสูงขึ้น



รูปที่ 4.9 อินฟราเรดสเปกตรัมของซิงก์อะซีเตตกับอนุภาคนาโนซิลิกาและวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมที่ pH4 pH7 pH9 และ pH11 เมื่อมีเฟสสีน้ำเงิน



รูปที่ 4.10 อินฟราเรดสเปกตรัมของซิงก์อะซีเตตกับอนุภาคนาโนซิลิกาและวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมที่ pH4 pH7 pH9 และ pH11 เมื่อมีเฟสสีแดง

ตารางที่ 4.2 เลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันในอินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมที่พีเอชต่าง ๆ ในกรณีเฟสสีน้ำเงิน

พีเอช	หมู่ฟังก์ชันและโหมดการสั่น						
	$\nu_s(-COO^-)$ cm ⁻¹	$\nu_{as}(-COO^-)$ cm ⁻¹	Scissoring cm ⁻¹	$\nu_s(-CH_2)$ cm ⁻¹	$\nu_{as}(-CH_2)$ cm ⁻¹	$\nu_{as}(-CH_3)$ cm ⁻¹	$\nu(-COO^-)$ cm ⁻¹
pH4	1396	1543	1466	2846	2924	2954	1628
pH5	1396	1543	1466	2846	2924	2954	1628
pH6	1388	1543	1466	2846	2924	2954	1628
pH7	1385	1539	1462	2850	2920	2954	1631
pH8	1388	1543	1466	2846	2924	2954	1628
pH9	1388	1542	1458	2846	2924	2954	1620
pH10	1381	1543	1466	2846	2924	2954	1628
pH11	1396	1543	1466	2846	2924	2954	1635
pH12	1396	1543	1466	2846	2924	2954	1635

ตารางที่ 4.3 เลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันในอินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมที่พีเอชต่าง ๆ ในกรณีเฟสสีแดง

พีเอช	หมู่ฟังก์ชันและโหมดการสั่น						
	$\nu_s(-COO^-)$ cm ⁻¹	$\nu_{as}(-COO^-)$ cm ⁻¹	Scissoring cm ⁻¹	$\nu_s(-CH_2)$ cm ⁻¹	$\nu_{as}(-CH_2)$ cm ⁻¹	$\nu_{as}(-CH_3)$ cm ⁻¹	$\nu(-COO^-)$ cm ⁻¹
pH4	1396	1543	1458	2846	2916	2962	1628
pH5	1396	1543	1466	2854	2924	2954	1635
pH6	1388	1543	1466	2845	2924	2954	1628
pH7	1388	1543	1458	2854	2924	2954	1635
pH8	1396	1543	1466	2854	2924	2954	1628
pH9	1381	1543	1458	2854	2924	2962	1635
pH10	1388	1543	1466	2854	2924	2962	1635
pH11	1388	1543	1466	2854	2916	2962	1628
pH12	1404	1543	1458	2854	2924	2954	1628

หลังจากนำวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ในช่วงพีเอชดังกล่าวไปให้ความร้อนจนเปลี่ยนจากเฟสสีน้ำเงินเป็นเฟสสีแดง ดังรูปที่ 4.10 พบว่ามีการลดลงของพีการสั่น $\nu_{as}(-COO^-)$ ที่เลขคลื่นประมาณ 1543 cm^{-1} ในขณะที่แถบการสั่นในช่วงเลขคลื่นประมาณ 1620 cm^{-1} เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันระหว่าง COO^- กับ Zn^{2+} ที่มีความแข็งแรงลดลง และจากการพิจารณาวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรที่เตรียมได้ที่ pH5 pH6 และ pH7 ดังรูปที่ 4.10 พบว่าพิกที่ปรากฏมีลักษณะเดียวกันกับพิกของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ที่ pH4 ดังตารางที่ 4.3

สำหรับวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/ Zn^{2+} /SiO₂ ที่เตรียมได้ในสภาวะเบสที่ pH8 pH9 pH10 และ pH11 ในกรณีเฟสสีน้ำเงิน ดังรูปที่ 4.9 พบว่าลักษณะของเส้นสเปกตรัมมีรูปแบบที่เหมือนกัน โดยอาจมีการเลื่อนตำแหน่งของพิกเล็กน้อย ดังตารางที่ 4.2 และหลังจากนำวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ในช่วงพีเอชดังกล่าวไปให้ความร้อนจนเปลี่ยนจากเฟสสีน้ำเงินเป็นเฟสสีแดง ดังรูปที่ 4.10 พบว่าพีการสั่น $\nu_{as}(-COO^-)$ ที่เลขคลื่นประมาณ 1543 cm^{-1} ยังคงอยู่ในขณะที่แถบการสั่นในช่วงเลขคลื่นประมาณ 1628 cm^{-1} โตขึ้นจากเฟสสีน้ำเงิน แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของหมู่ฟังก์ชันระหว่าง COO^- กับ Zn^{2+} ที่มีความแข็งแรงต่ำกว่า นอกจากนี้วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ที่ช่วง pH12 เมื่ออยู่ในเฟสสีแดงจะเห็นได้ว่าพิก 1628 cm^{-1} โตกว่าที่พีเอชอื่น ๆ มาก เกิดจากการจัดเรียงตัวของโครงสร้างภายในที่มีความเป็นระเบียบต่ำ ทำให้วัสดุเชิงประกอบดังกล่าวนี้เกิดการเปลี่ยนสีแบบไม่ผันกลับ

ส่วนที่ 3 ระยะห่างระหว่างชั้นในโครงสร้าง

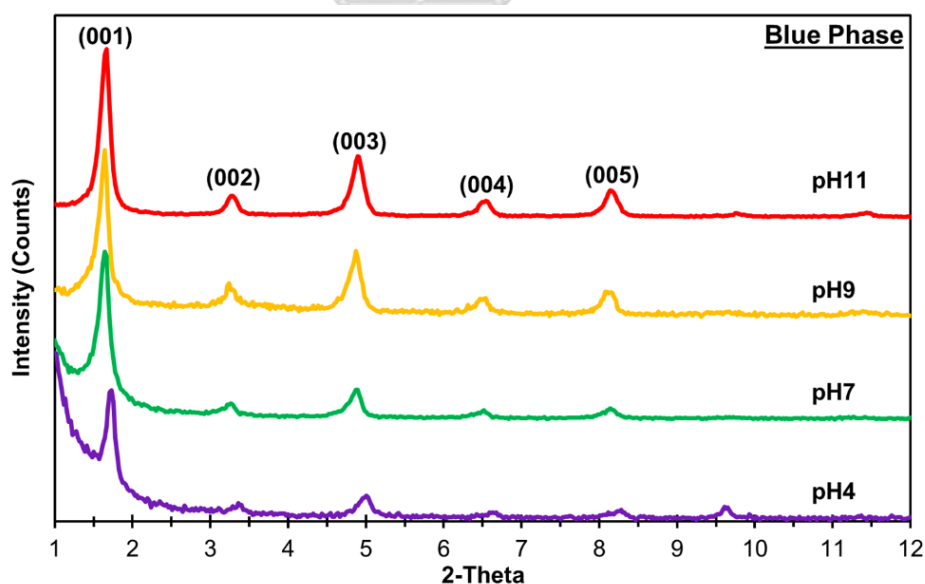
การศึกษาในส่วนนี้จะใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างภายในของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/ Zn^{2+} /SiO₂ ที่เตรียมที่พีเอชต่าง ๆ จากงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่าโดยปกติแล้วโครงสร้างของ poly(PCDA)/ Zn^{2+} /ZnO จะเรียงตัวเป็นชั้น (lamella structure) มีระยะห่างระหว่างชั้น (d-spacing) อยู่ที่ 5.4 นาโนเมตร

รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD-pattern) ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/ Zn^{2+} /SiO₂ ที่เตรียมที่พีเอชต่าง ๆ กรณีเฟสสีน้ำเงินและเมื่อพิจารณา XRD-pattern ดังรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าพีเอชที่ใช้ในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบมีค่ามากขึ้นส่งผลให้ค่า d-spacing เพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาสารแขวนลอยของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมที่ pH4 pH7 pH9 และ pH11 พบว่ามีค่าเฉลี่ย d-spacing ที่ได้จากการคำนวณแสดงในตารางที่ 4.4 เท่ากับ 5.27, 5.41, 5.42 และ 5.48 นาโนเมตร ตามลำดับ

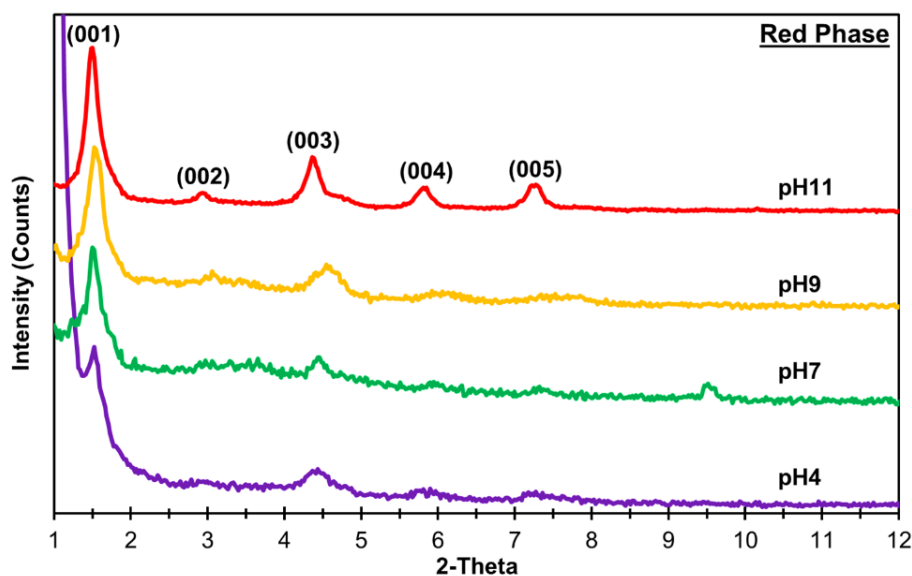
ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างชั้น (d-spacing) ภายในชั้นโครงสร้างของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมที่ pH4 pH7 pH9 และ pH11

พีเอช	Average d-spacing (nm)	
	Blue phase	Red phase
pH4	5.27	5.30
pH7	5.41	5.91
pH9	5.42	5.98
pH11	5.48	6.03

จากการพิจารณาค่า d-spacing ในตารางเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของค่า d-spacing เมื่อเตรียมวัสดุเชิงประกอบที่พีเอชต่างกัน ซึ่งเป็นการบ่งบอกว่าลักษณะของโครงสร้างภายในของวัสดุเชิงประกอบมีระยะห่างระหว่างชั้นไม่เท่ากันนั่นเองและหลังจากนำวัสดุเชิงประกอบไปให้ความร้อนจนเปลี่ยนจากเฟสสีน้ำเงินเป็นสีแดงและเมื่อพิจารณา XRD-pattern ดังรูปที่ 4.12 พบว่าค่าเฉลี่ย d-spacing มีค่าเพิ่มขึ้นจากเฟสสีน้ำเงิน โดยมีค่าเท่ากับ 5.30, 5.91, 5.98 และ 6.03 นาโนเมตร ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.4 แสดงถึงการจัดเรียงตัวที่เปลี่ยนแปลงไปของสายโซ่พอลิเมอร์



รูปที่ 4.11 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมที่พีเอชต่าง ๆ ที่มีเฟสสีน้ำเงิน



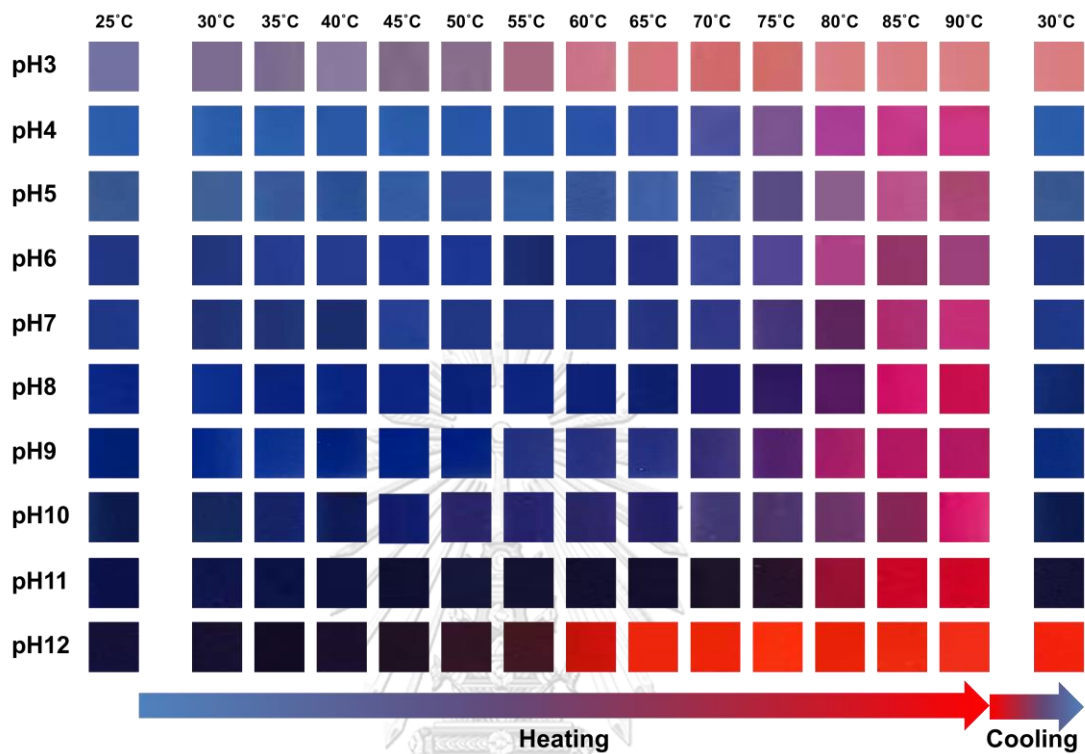
รูปที่ 4.12 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมที่พีเอชต่าง ๆ ที่มีเฟสสีแดง

4.2 การศึกษาพฤติกรรมตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

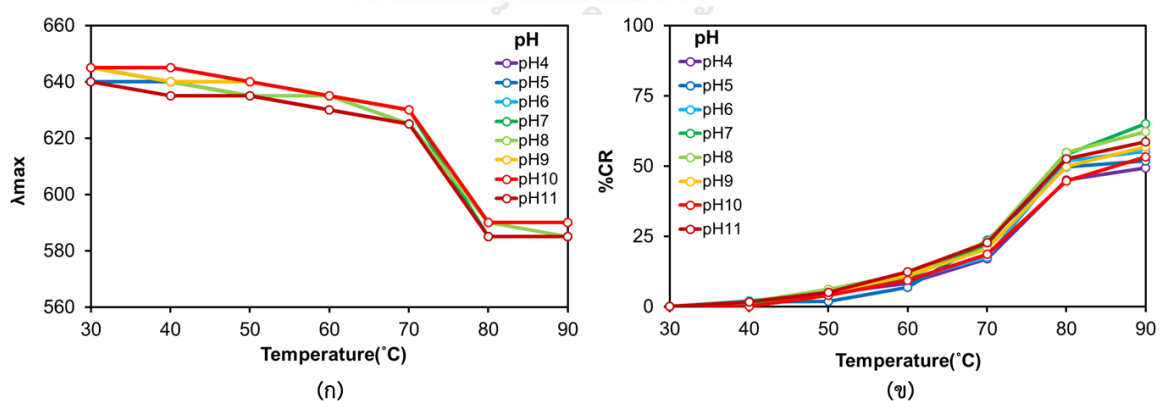
4.2.1 พฤติกรรมตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ในรูปของสารแขวนลอย (suspension)

จากการศึกษาก่อนหน้านี้พบว่าวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/SiO₂ เกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงได้เมื่อได้รับการกระตุ้นจากความร้อน โดยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรดังกล่าวเริ่มเกิดการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียสและเกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับไม่ได้เช่นเดียวกับ poly(PCDA) เมื่อลดอุณหภูมิลงมาที่อุณหภูมิเริ่มต้น นอกจากนี้ได้มีการศึกษาพฤติกรรมตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/ZnO ภายในกลุ่มวิจัย และพบว่าวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรสามารถเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้เมื่อ ค่าพีเอชที่ใช้ในการเตรียมอยู่ที่ประมาณ pH7 โดยเริ่มเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส นอกจากนั้นยังพบว่า การเติมซิงก์ออกไซด์เข้าไป ทำให้ระยะห่างระหว่างชั้น (d-spacing) ภายในโครงสร้างของ poly(PCDA) มีความกว้างขึ้นจากการแทรกตัวของซิงก์ไอออน (Zn²⁺) ทำให้การจัดเรียงของพอลิไดอะเซทิลีนมีความเป็นระเบียบเรียบร้อย ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบดังกล่าวมีการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้มีการเตรียมสารแขวนลอยของวัสดุเชิงประกอบชนิดใหม่ โดยผู้วิจัยจะทำการเติมซิงก์(II)ไอออนร่วมด้วยเพื่อเพิ่มปฏิสัมพันธ์ระหว่าง

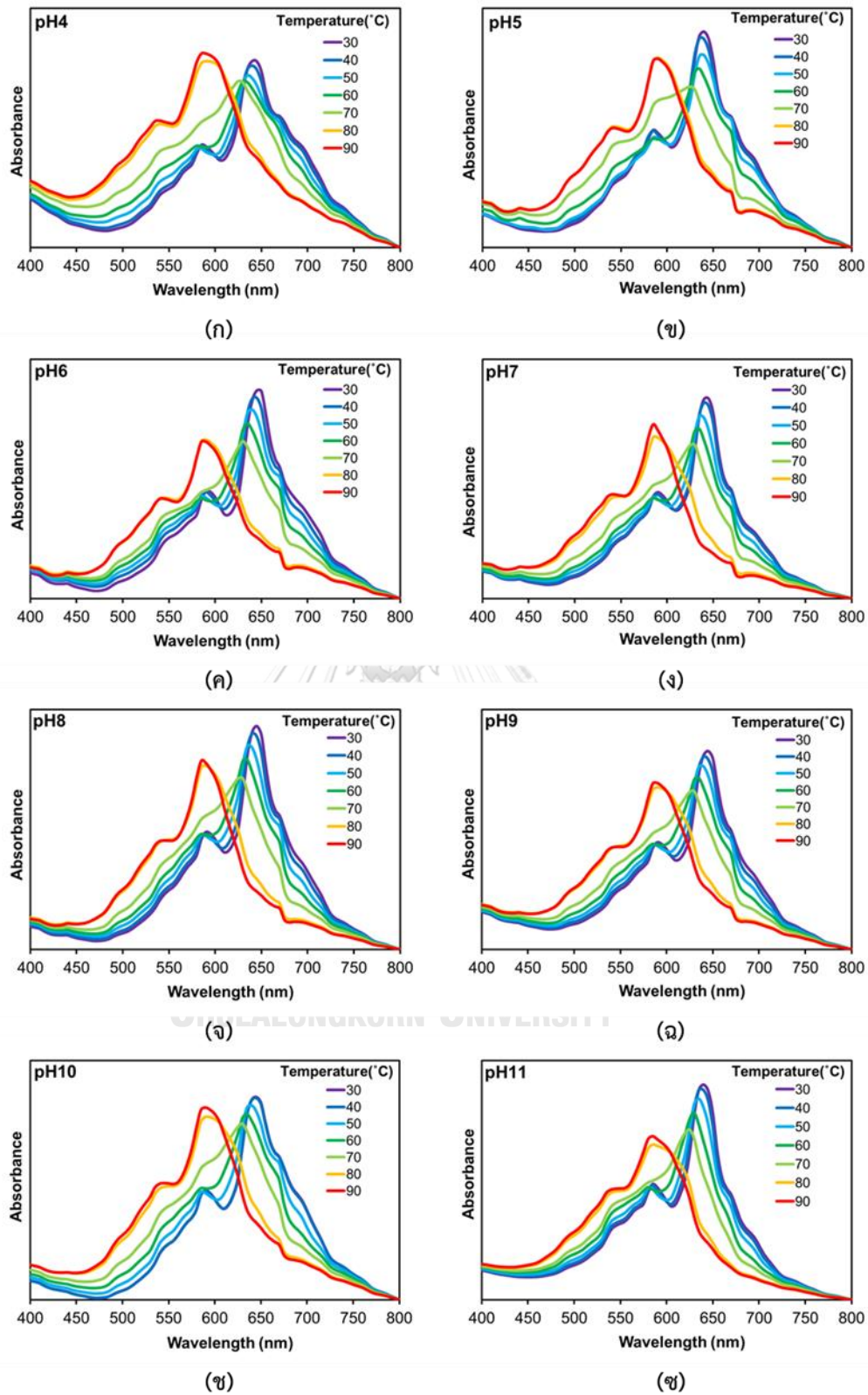
อนุภาคนาโนของซิลิกาและพอลิไดอะอะซีทีลีน กลายเป็นวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่มีพฤติกรรมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่พีเอชต่าง ๆ เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 30 ถึง 90 °C และปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 4.14 (ก) ค่าความยาวคลื่น ณ ตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) และ (ข) เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสี (%CR) ของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมได้ที่พีเอชต่าง ๆ เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 30 ถึง 90 °C



รูปที่ 4.15 สเปกตราราดูดกลืนแสงของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมที่ pH4 ถึง pH11 เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 30 ถึง 90 องศาเซลเซียส

จากผลการศึกษาการเตรียมสารแขวนลอยของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ในสภาวะค่าพีเอชแตกต่างกัน พบว่าวัสดุเชิงประกอบสามารถเตรียมได้ในช่วงพีเอชตั้งแต่ pH4 ถึง pH12 โดยมีสีน้ำเงินจากการสังเกตด้วยตาเปล่า ในขณะที่สภาวะ pH3 พบว่าไม่สามารถเตรียมวัสดุเชิงประกอบดังกล่าวได้หรืออาจเตรียมได้บ้างในบางครั้งแต่ปริมาณการเกิดวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร มีน้อยมากสังเกตจากสารที่เตรียมได้แทบมองไม่เห็นเป็นสีน้ำเงิน เมื่อนำวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ไปศึกษาพฤติกรรม การตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับการกระตุ้นโดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตั้งแต่ 30 ถึง 90 องศาเซลเซียส พบว่าวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรที่เตรียมได้ในสภาวะที่เป็นกรดสูง (pH3) เริ่มเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินไปเป็นสีแดงอมม่วงที่อุณหภูมิประมาณ 55 องศาเซลเซียสและท้ายที่สุดเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นเรื่อย ๆ จนถึง 90 องศาเซลเซียส วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ในสภาวะดังกล่าวเปลี่ยนเป็นเฟสสีแดงทั้งหมด และเกิดการเปลี่ยนสีแบบไม่ผันกลับ (irreversible thermochromism) เมื่อทำการลดอุณหภูมิของสารให้เท่ากับอุณหภูมิตอนเริ่มต้น สังเกตได้จากวัสดุเชิงประกอบดังกล่าวไม่เกิดการเปลี่ยนสีกลับเป็นสีน้ำเงินเหมือนตอนเริ่มต้น

ในขณะที่สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมได้ในสภาวะพีเอชตั้งแต่ pH4 ถึง pH11 เกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้ (reversible thermochromism) เมื่อลดอุณหภูมิให้เท่ากับอุณหภูมิของสารตอนเริ่มต้น โดยวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ในช่วงพีเอชดังกล่าวเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงอมแดง ซึ่งมีสาเหตุมาจากความร้อนทำให้เกิดการบิดตัวของโครงสร้างภายในสายโซ่หลักส่งผลให้ระยะคอนจูเกตเปลี่ยนไปจากการทดลองพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ในช่วงพีเอชดังกล่าวจะเริ่มเกิดการเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงอมน้ำเงินที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส โดยการเปลี่ยนสีในช่วง 80 ถึง 90 องศาเซลเซียส จะเห็นเป็นสีม่วงอมแดง เนื่องจากการปนกันของเฟสสีน้ำเงินและเฟสสีแดง เมื่อลดอุณหภูมิของสารลงมาเท่ากับอุณหภูมิตอนเริ่มต้น จะเห็นได้ว่าวัสดุเชิงประกอบดังกล่าวเกิดการเปลี่ยนสีกลับมาเป็นสีน้ำเงินเหมือนตอนเริ่มต้นอีกครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 4.13 นอกจากนี้วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมได้ในสภาวะเป็นเบสสูง (pH12) อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส พบว่ามีสีน้ำเงินเข้มมากซึ่งเป็นการบ่งบอกถึงปริมาณนาโนคอมโพสิตที่เกิดขึ้นในปริมาณมากและจากการนำวัสดุดังกล่าวไปวัดค่าการดูดกลืนแสงพบว่าวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมในสภาวะนี้มีค่าการดูดกลืน (absorbance) สูงสุดเมื่อเทียบกับวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ในช่วงพีเอชอื่น ๆ และจากการศึกษาพฤติกรรม การตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีพบว่าวัสดุดังกล่าวเริ่มเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเข้มเป็นสีม่วงเข้มที่อุณหภูมิประมาณ 55 องศาเซลเซียสและเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 60 องศาเซลเซียส ปรากฏว่า

เกิดการเปลี่ยนสีจากสีม่วงเข้มเป็นสีแดงโดยไม่มีเฟสสีน้ำเงินผสมอยู่เลยและเมื่อลดอุณหภูมิลงมาเท่ากับตอนเริ่มต้นเกิดการเปลี่ยนสีแบบไม่ผันกลับ เนื่องจากวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ในสภาวะนี้ถูกรบกวนจากเบสจนทำให้โครงสร้างภายในของสายโซ่หลักบิดไปมากก่อนจะถูกกระตุ้นด้วยความร้อนแล้วส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิต่ำกว่าและเกิดการเปลี่ยนสีเป็นเฟสสีแดงจนหมด อาจกล่าวได้ว่าโครงสร้างของสายโซ่หลักถูกทำลายหรือบิดไปจนไม่สามารถกลับมาเป็นเหมือนเดิม

เมื่อนำสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมได้ในช่วง pH4 ถึง pH11 ไปวิเคราะห์สมบัติการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิธีเบิลสเปกโทรสโกปี ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 400 ถึง 800 นาโนเมตร โดยเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง 30 ถึง 90 องศาเซลเซียส ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.15 และการเปลี่ยนสีแสดงดังรูปที่ 4.13 จากผลการทดลองพบว่าการเปลี่ยนสีวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมได้ในช่วงพีเอชดังกล่าวทั้งหมดมีความคล้ายคลึงกันมาก โดยพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความเข้มของแถบการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงินจะลดลงเรื่อย ๆ อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงประมาณ 70 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมได้ทั้งหมดทุกช่วงพีเอชยังคงไม่เปลี่ยนสี โดยจะพบว่าสเปกตรากการดูดกลืนแสงยังไม่เกิดการเปลี่ยนตำแหน่งที่ชัดเจน แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึงประมาณ 80 องศาเซลเซียส จะพบว่าสเปกตรากการดูดกลืนแสงเปลี่ยนแปลงอย่างมาก โดยยอดการดูดกลืนแสงสูงสุดเลื่อนไปปรากฏที่ความยาวคลื่นประมาณ 590 นาโนเมตรและเมื่ออุณหภูมิขึ้นจนถึงประมาณ 90 องศาเซลเซียส ยอดการดูดกลืนแสงสูงสุดเลื่อนไปอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 580 นาโนเมตร เมื่อสังเกตจากตาเปล่าจะเห็นว่าวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมได้ทั้งหมดทุกช่วงพีเอช ปรากฏเป็นสีม่วงอมแดง ดังแสดงในรูปที่ 4.13

เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสี (%CR) ณ อุณหภูมิทำการทดสอบในรูปที่ 4.14 (ข) จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนสีไม่ได้มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมได้ทั้งหมดทุกช่วงพีเอช จะต้องใช้อุณหภูมิที่สูงมากในการทำให้เกิดการเปลี่ยนสี เช่น วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ในสภาวะกรดที่ pH4 ในการทำให้เกิดการเปลี่ยนสีไป 45 เปอร์เซ็นต์ (ที่ 45%CR) จะต้องใช้อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมโดยไม่ปรับค่าพีเอช (pH7) ต้องใช้อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส เช่นกัน ในการทำให้เกิดการเปลี่ยนสีไปประมาณ 54.24 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ในสภาวะเบสที่ pH9 จะใช้อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส ในการทำให้เปลี่ยนสีไปประมาณ 49.95 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂

ที่เตรียมได้ในสภาวะความเป็นกรด-เบส ที่แตกต่างกัน ณ อุณหภูมิการเปลี่ยนสีเดียวกันคือ 80 องศาเซลเซียส มีเปอร์เซ็นต์ในการเปลี่ยนสีที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งจากการพิจารณาการเตรียมได้ใน 3 ช่วงพีเอชดังกล่าวพบว่าที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมโดยไม่ปรับค่าพีเอชมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีที่สูงกว่าในสภาวะเบสและกรดตามลำดับ

เมื่อพิจารณาค่าความยาวคลื่น ณ ตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) ที่อุณหภูมิที่ทำการทดสอบของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่ได้เตรียมได้ในทุกช่วงพีเอช ได้ผลดังแสดงในรูป 4.14 (ก) โดยพบว่าค่า λ_{max} ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมขึ้นที่ pH4 ในสภาวะที่มีความเป็นกรดสูง จะค่อย ๆ ลดต่ำลงมาเรื่อย ๆ ด้วยอัตราค่อนข้างคงที่จากความยาวคลื่นเริ่มต้น 640 นาโนเมตรที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จนเมื่อถึงอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อัตราการเปลี่ยนเฟสสีเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมาก ค่า λ_{max} เคลื่อนจากความยาวคลื่น 625 นาโนเมตรมาอยู่ที่ 590 นาโนเมตร จากนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิต่อไปจนถึง 90 องศาเซลเซียส จะพบว่าไม่มีการเปลี่ยนเฟสสีเกิดขึ้นอีกต่อไป โดยค่า λ_{max} คงที่ที่ 590 นาโนเมตร สำหรับวัสดุเชิงประกอบในสภาวะกรดที่เตรียมขึ้นที่ค่า pH5 และ pH6 พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่า λ_{max} มีลักษณะเหมือนกับวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ที่ช่วง pH4 เมื่อพิจารณาค่า λ_{max} ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมขึ้นโดยไม่มีการปรับค่าพีเอชหรือเตรียมได้ในช่วง pH7 จะพบว่า λ_{max} เริ่มต้นอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 645 นาโนเมตร จากนั้นค่อย ๆ ลดต่ำลงด้วยอัตราค่อนข้างคงที่ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ในสภาวะความเป็นกรด และเกิดการเปลี่ยนเฟสสีอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส โดย λ_{max} จะเคลื่อนจากความยาวคลื่น 630 นาโนเมตรไปอยู่ที่ความยาวคลื่น 585 นาโนเมตร และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิต่อไปจนถึง 90 องศาเซลเซียส พบว่า λ_{max} ไม่สามารถลดลงต่ำได้ จะเห็นได้ว่าการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรโดยไม่มีการปรับค่าพีเอช มีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิแตกต่างจากวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมในสภาวะความเป็นกรดเพียงเล็กน้อย ในขณะที่วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ในสภาวะความเป็นเบส (pH8 ถึง pH11) พบว่า λ_{max} เริ่มต้นอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 645 นาโนเมตร จากนั้นค่อย ๆ ลดต่ำลงด้วยอัตราค่อนข้างคงที่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและเกิดการเปลี่ยนเฟสสีอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส โดย λ_{max} จะเคลื่อนจากความยาวคลื่น 630 นาโนเมตรไปอยู่ที่ความยาวคลื่น 590 นาโนเมตร และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิต่อไปจนถึง 90 องศาเซลเซียส พบว่าไม่มีการเปลี่ยนเฟสสีเกิดขึ้นอีกต่อไป จากผลการศึกษาดังกล่าวข้างบบอกได้ว่าวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ไม่ว่าจะเตรียมในช่วงพีเอชใดพฤติกรรมการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิก็น่าจะมีลักษณะเหมือนกันคือสามารถทนอุณหภูมิได้สูงถึง 80 องศาเซลเซียส

โดยปกติแล้วเมื่อวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรได้รับความร้อนมากขึ้น จะค่อย ๆ เกิด blue shift ขึ้น นั่นคือ λ_{\max} จะเคลื่อนไปที่ความยาวคลื่นที่ต่ำลง ดังกราฟในรูปที่ 4.14 (ข) จะพบว่าค่า λ_{\max} ในช่วงแรกก่อนที่จะเกิดการเปลี่ยนเฟสมีค่าลดน้อยลงอย่างต่อเนื่อง การเปลี่ยนสีในช่วงนี้จึงค่อย ๆ เปลี่ยนไปอย่างต่อเนื่องจนเกิดการเปลี่ยนสีอย่างชัดเจนที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส ซึ่งการเปลี่ยนสีในวัสดุเชิงประกอบนี้เกิดจากการเคลื่อนที่ของโซ่ข้าง (side chain) ที่เพิ่มขึ้นเมื่อได้รับอุณหภูมิที่สูงขึ้น ส่งผลให้ออร์บิทัลไพบางส่วนเกิดการบิดออกนอกระนาบ ทำให้ความเป็นระนาบของออร์บิทัลพ็นน้อยลง ระยะคอนจูเกตจึงลดลง

4.2.2 พฤติกรรมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ในรูปของฟิล์ม (nanocomposite films)

เนื่องจากการนำวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ในรูปของสารแขวนลอยไปใช้งานมีข้อจำกัดมากมาย อาทิ อายุการใช้งานและความเสถียรในการเปลี่ยนสี เนื่องจากเกิดการตกตะกอนของอนุภาคในสารละลาย นอกจากนี้อุณหภูมิสูงสุดที่จะสามารถวัดการตอบสนองต่ออุณหภูมิได้คือ 100 องศาเซลเซียสเท่านั้น ซึ่งเป็นจุดเดือดของตัวทำละลายที่ใช้คือน้ำปราศไอออน (DI water) แต่จากผลการศึกษาการตอบสนองต่ออุณหภูมิของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรนี้มีแนวโน้มที่สามารถเกิดการเปลี่ยนสีต่อได้อีกถ้าเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่า 90 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงมีการเตรียมฟิล์มวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมได้ในช่วง pH4 pH7 pH9 และ pH11 ทำให้สามารถศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนสีได้ที่อุณหภูมิสูงขึ้น โดยทำการเพิ่มอุณหภูมิให้กับฟิล์มด้วยเครื่องกวนสารชนิดให้ความร้อน (hot plate stirrer) ช่วง 25 ถึง 230 องศาเซลเซียส จากนั้นทิ้งไว้ที่อุณหภูมิที่ต้องการศึกษาเป็นเวลา 5 นาที พร้อมถ่ายภาพเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของสีและทิ้งให้วัสดุเชิงประกอบมีอุณหภูมิลดลงเท่ากับอุณหภูมิของสารตอนเริ่มต้นและสังเกตพฤติกรรมการเปลี่ยนสีอีกครั้ง

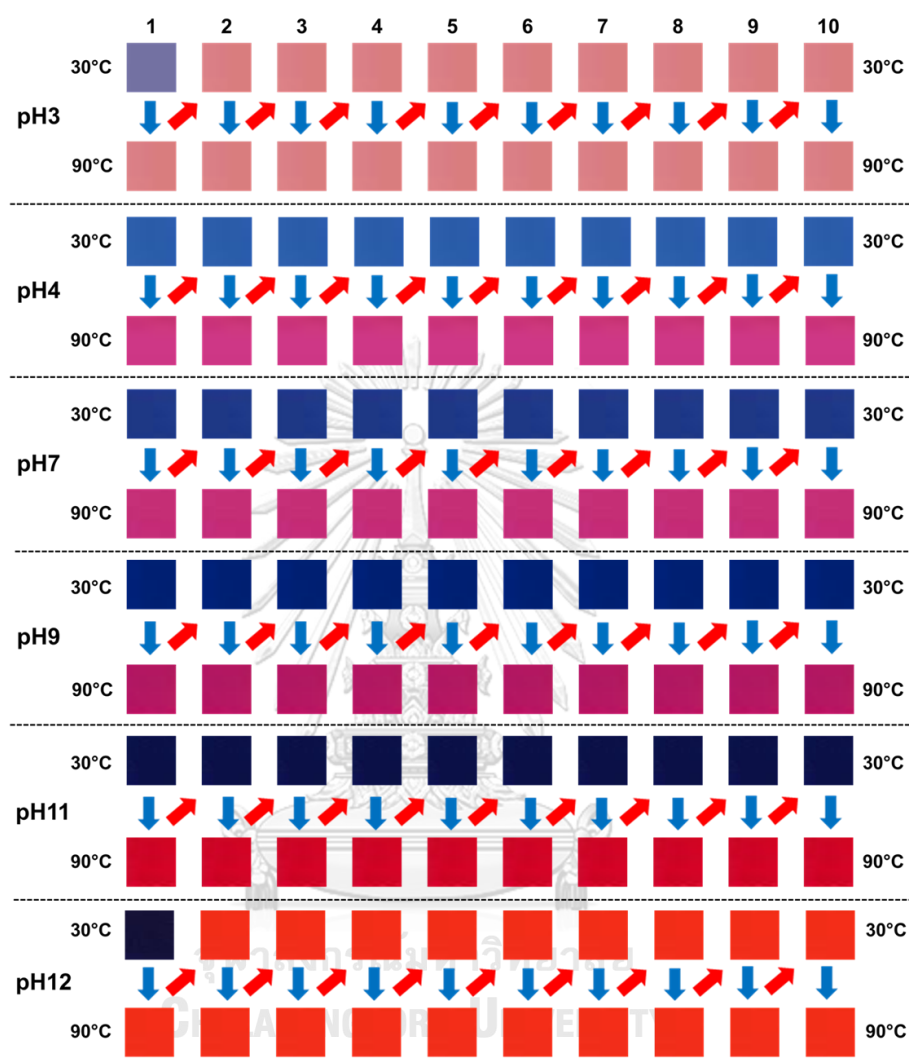
รูปที่ 4.16 แสดงพฤติกรรมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ซึ่งเตรียมได้ที่ช่วง pH4 pH7 pH9 และ pH11 จากการทดลองพบว่าฟิล์มวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรที่เตรียมได้ทั้ง 4 พีเอชดังกล่าว แสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนสี 2 ช่วง โดยช่วงแรกจะแสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้ (reversible thermochromism) ในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึงอุณหภูมิประมาณ 170 องศาเซลเซียส โดยจะเริ่มเปลี่ยนที่อุณหภูมิเริ่มต้นประมาณ 80 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิในการเปลี่ยนสีเดียวกันกับกรณีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ เมื่อให้ความร้อนแก่ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่อุณหภูมิสูงประมาณ 170 องศาเซลเซียส ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบจะเปลี่ยนเป็นสีม่วงอมชมพูและ

เมื่อฟิล์มวัสดุเชิงประกอบดังกล่าวเย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้องฟิล์มจะสามารถเปลี่ยนสีกลับไปเป็นสีน้ำเงินได้ แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าความร้อนในช่วงอุณหภูมินี้ทำให้โครงสร้างของโซ่ข้างเกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะการเคลื่อนที่ของโซ่ข้างหรือเปลี่ยนทิศทางการจัดเรียงตัว ส่งผลให้ออร์บิทัลไพบางส่วนบิดตัว เกิดการรบกวนความเป็นระนาบของสายโซ่หลักที่มีโครงสร้างเป็นแบบคอนจูเกตส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสีขึ้น แต่เนื่องจากยังไม่เกิดการแตกออกของพันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่าง head groups จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้ เมื่อฟิล์มวัสดุเชิงประกอบเย็นตัวลงถึงอุณหภูมิห้อง สำหรับการเปลี่ยนสีของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบช่วงที่สอง เมื่อให้ความร้อนแก่ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่อุณหภูมิสูงกว่า 170 องศาเซลเซียส พบว่าจะเกิดการเปลี่ยนสีจากสีม่วงอมชมพูเป็นสีแดงอมส้มและเมื่อฟิล์มเย็นตัวลงถึงอุณหภูมิห้องก็ยังคงปรากฏสีเดิม ซึ่งเป็นการแสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนสีแบบผันกลับไม่ได้ (irreversible thermochromism) ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่อุณหภูมิสูงกว่า 170 องศาเซลเซียส เนื่องจากความร้อนในช่วงอุณหภูมินี้ทำให้พันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่าง head group ขาดออกจากกัน จึงไปทำลายความเป็นระเบียบของสายโซ่ข้างและสายโซ่หลักทำให้ค่าเอนโทรปีเพิ่มขึ้นอย่างมาก จึงเริ่มเกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับไม่ได้



รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนสีของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมในช่วง pH4 pH7 pH9 และ pH11 เมื่อได้รับความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิ 25 ถึง 230 องศาเซลเซียสและปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง

4.2.3 ความเสถียรทางสีต่อความร้อนของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ เมื่อได้รับความร้อนและปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้ (reversible thermochromism) และแบบผันกลับไม่ได้ (irreversible thermochromism) ของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ เมื่อได้รับความร้อนและปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง จำนวน 10 ครั้ง

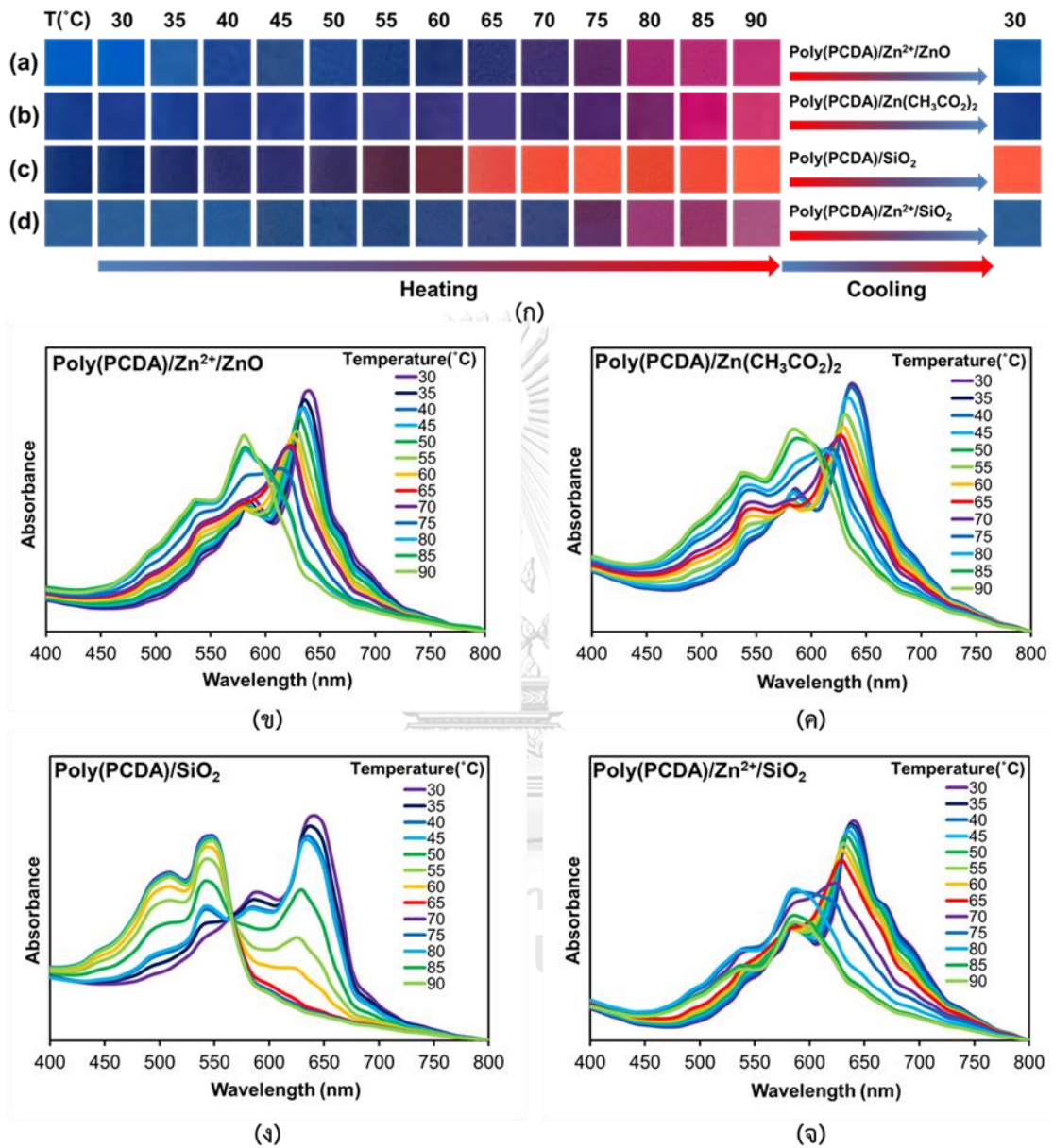
เมื่อนำสารแขวนลอยของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมด้วยค่าพีเอชที่แตกต่างกันไปให้ความร้อนด้วยกระบวนการให้ความร้อนผ่านน้ำ (Water bath) โดยเพิ่มอุณหภูมิตั้งแต่ 30 ถึง 90 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นทิ้งให้วัสดุเชิงประกอบมีอุณหภูมิลดลงเท่ากับอุณหภูมิของสารตอนเริ่มต้นและสังเกตการเปลี่ยนแปลงของสี พบว่าวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมได้ในสภาวะกรดและเบสสูง

(pH3 และ pH12) เกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับไม่ได้ (irreversible thermochromism) ในขณะที่วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ในช่วง pH4 ถึง pH11 เกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้ (reversible thermochromism) เมื่อลดอุณหภูมิของวัสดุเชิงประกอบให้เท่ากับอุณหภูมิตอนเริ่มต้น และเมื่อนำวัสดุเชิงประกอบที่มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิตอนเริ่มต้นไปให้ความร้อนซ้ำจำนวน 10 รอบ ในช่วงอุณหภูมิที่ทำการศึกษา พบว่าสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมได้ในช่วงพีเอชดังกล่าวเกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้เช่นเดิม ดังรูปที่ 4.17

4.3 พฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรชนิดต่าง ๆ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/SiO₂ มีการเปลี่ยนสีแบบผันกลับไม่ได้เมื่อทำการลดอุณหภูมิลงมาที่อุณหภูมิเริ่มต้น แต่จากการศึกษาของ Traiphol N. และคณะ พบว่าซิงก์(II)ไอออน (Zn²⁺) มีส่วนสำคัญในการ assemble ของ PDA บนอนุภาคออกไซด์ อีกทั้งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรเกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจะทำการเติมซิงก์ไอออนร่วมด้วยเพื่อเพิ่มปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคนาโนของซิลิกาและพอลิไดอะเซทิลีน กลายเป็นวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ซึ่งได้มีการศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบทั้งในรูปแบบของสารแขวนลอยและฟิล์มวัสดุเชิงประกอบมาแล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้และพบว่าวัสดุเชิงประกอบดังกล่าวเกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้ เมื่อลดอุณหภูมิลงมาที่อุณหภูมิเริ่มต้น ซึ่งตรงตามสมมติฐานที่ผู้วิจัยได้คาดการณ์ไว้ นอกจากนี้วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรที่เตรียมได้ยังมีพฤติกรรมการตอบสนองโดยเปลี่ยนสีที่แตกต่างจากวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/SiO₂ ที่ไม่มีการเติม Zn²⁺ ร่วมด้วย ดังนั้นเพื่อเป็นการยืนยันพฤติกรรมการเปลี่ยนสีที่แตกต่างออกไปนี้ ผู้วิจัยจึงเปรียบเทียบวัสดุเชิงประกอบชนิดต่าง ๆ ที่มีความเกี่ยวข้องกับวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ โดยเลือกใช้ PCDA และ TCDA เป็นมอนอเมอร์ตั้งต้นในการเตรียม เนื่องจากมอนอเมอร์ดังกล่าวส่งผลให้พฤติกรรมการเปลี่ยนสีมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน

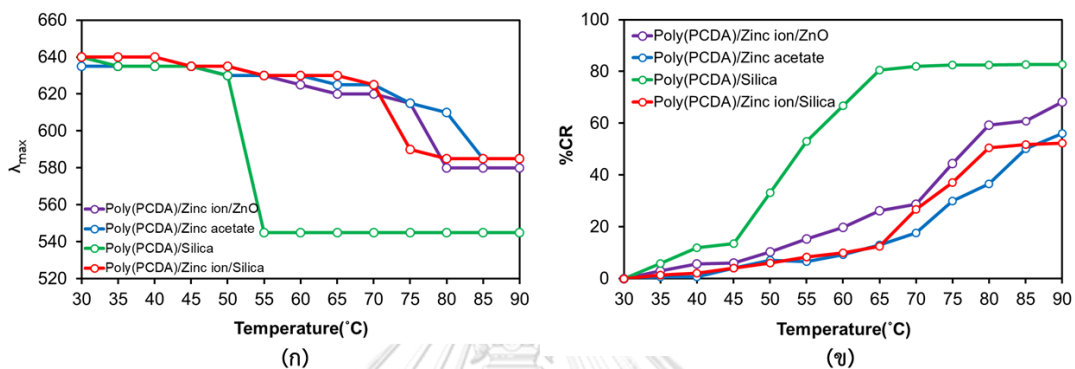
4.3.1 พฤติกรรมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรชนิดต่าง ๆ โดยใช้ 10,12-pentacosadiynoic acid เป็นมอนอเมอร์ตั้งต้น



รูปที่ 4.18 (ก) ภาพถ่ายแสดงการเปลี่ยนสี และ(ข) – (จ) สเปกตรากการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร ที่ใช้ PCDA เป็นมอนอเมอร์ตั้งต้น เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 30 ถึง 90 องศาเซลเซียสและปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง

การศึกษานี้เริ่มจากการเตรียมสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบชนิดต่าง ๆ โดยใช้ 10,12-pentacosadiynoic acid (PCDA) เป็นมอนอเมอร์ตั้งต้น และทำการเตรียมโดยไม่ปรับพีเอช

ได้แก่ วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺ZnO, poly(PCDA)/Zn(CH₃CO₂)₂, poly(PCDA)/SiO₂ และ poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ เพื่อศึกษาผลการเปลี่ยนโลหะออกไซด์จากอนุภาคนาโนของซิงก์ออกไซด์ (ZnO) เป็นอนุภาคนาโนซิลิกา (SiO₂) และผลจากการเติมซิงก์(II)ไอออน (Zn²⁺) ที่เกิดจากการแตกตัวของซิงก์อะซิเตต (Zinc acetate) เข้าไปในการเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ต่อพฤติกรรมตอบสนองต่อการเปลี่ยนสี โดยผลการศึกษสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.19 (ก) ค่าความยาวคลื่น ณ ตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) และ (ข) เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสี (%CR) ของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรชนิดต่าง ๆ โดยใช้ PCDA เป็นมอนอเมอร์ตั้งต้น เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 30 ถึง 90 องศาเซลเซียส

เมื่อพิจารณาวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/SiO₂ พบว่าที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส มีสีน้ำเงินจากการสังเกตด้วยตาเปล่าและเมื่อวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงดังแสดงในรูปที่ 4.18 (ง) พบตำแหน่งการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตรและปรากฏแถบ vibronic ที่ความยาวคลื่น 585 นาโนเมตร ซึ่งเป็นสเปกตรากการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงิน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความเข้มของแถบการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงินจะลดลงเรื่อย ๆ ในขณะเดียวกันความเข้มของแถบการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตรจะเพิ่มขึ้น เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าจะพบว่าวัสดุเชิงประกอบดังกล่าวค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นสีม่วงมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.18 (งค) เมื่อให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจนอุณหภูมิสูงกว่า 55 องศาเซลเซียส สเปกตรากการดูดกลืนแสงของวัสดุเชิงประกอบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน โดยตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุดจะเลื่อนไปอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตร ในขณะที่แถบ vibronic ปรากฏที่ความยาวคลื่นประมาณ 510 นาโนเมตรหรือเรียกได้ว่าเป็นสเปกตรากการดูดกลืนแสงของเฟสสีแดง ซึ่งจะมองเห็นสารละลายมีสีแดงส้มโดยไม่มีเฟสสีน้ำเงินปรากฏอยู่และเมื่อลดอุณหภูมิของสารลงมาเท่ากับอุณหภูมิตอนเริ่มต้นจะเกิดการเปลี่ยนสีแบบไม่ผันกลับ

เมื่อทำการศึกษาและวิเคราะห์สารแขวนลอยของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/ZnO, poly(PCDA)/Zn(CH₃CO₂)₂ และ poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ พบว่า พฤติกรรมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิมีลักษณะคล้ายกัน โดยพบว่าวัสดุเชิงประกอบดังกล่าวมีสีน้ำเงินที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสและเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นจะเริ่มเกิดการเปลี่ยนสีเป็นสีม่วง โดยเกิดการเปลี่ยนสีชัดเจนเป็นสีม่วงอมน้ำเงินที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นจนถึง 90 องศาเซลเซียสพบว่าวัสดุเชิงประกอบดังกล่าวเกิดการเปลี่ยนสีเป็นสีม่วงอมแดง และจากการพิจารณาสเปกตรากการดูดกลืนแสง ดังรูปที่ 4.18 (ข) (ค) และ (จ) ตามลำดับ พบว่ามีลักษณะคล้ายกันความคล้ายกันโดยเปลี่ยนเป็นสีม่วงอมแดงที่ความยาวคลื่นประมาณ 580 นาโนเมตร และเมื่อลดอุณหภูมิของสารลงมาเท่ากับอุณหภูมิตอนเริ่มต้นจะเกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับกลับ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการเติมอนุภาค Zn²⁺ ลงไปในการเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ จะทำให้วัสดุเชิงประกอบดังกล่าวมีพฤติกรรมการเปลี่ยนสีที่แตกต่างออกไปจาก poly(PCDA)/SiO₂ โดยพฤติกรรมที่เห็นได้ชัดเจนคือสามารถเปลี่ยนสีได้ที่อุณหภูมิสูงขึ้นจาก 55 องศาเซลเซียสเป็น 80 องศาเซลเซียสและเกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้เมื่อลดอุณหภูมิลงมาที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งบ่งบอกว่า Zn²⁺ เติมลงไปมีส่วนสำคัญในการ assemble ของ PDA บนอนุภาคนาโนซิลิกาทำให้โครงสร้างภายในมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบและมีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากต้องใช้พลังงานสูงในการทำลายโครงสร้างให้เกิดการบิดตัว อีกทั้งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรเกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้ อย่างไรก็ตามจากการศึกษานี้ยังไม่สามารถสรุปได้ชัดเจนว่าการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้ของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ แท้จริงแล้วเป็นผลมาจากการเติม ซึ่งก็อะซีเตตเพียงอย่างเดียวได้หรือไม่ เนื่องจากพฤติกรรมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของ poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ และ poly(PCDA)/Zn(CH₃CO₂)₂ ค่อนข้างไม่เห็นความแตกต่าง อาจเป็นเพราะ PCDA ซึ่งเป็นมอนอเมอร์ตั้งต้นที่ใช้มีสายโซ่อัลคิลยาว ทำให้มีความเสถียรในตัวเองสูงมาก ผู้ศึกษาจึงได้ทำการศึกษาต่อโดยทำการเปลี่ยนมอนอเมอร์ตั้งต้นที่ใช้เป็น TCDA ซึ่งมีสายโซ่อัลคิลสั้นกว่าและสามารถเกิดการเปลี่ยนสีได้ในช่วงที่อุณหภูมิต่ำกว่า PCDA เพื่อหาข้อสรุปดังกล่าวต่อไป โดยจะแสดงผลการทดลองในหัวข้อถัดไป

เมื่อพิจารณาค่าความยาวคลื่น ณ ตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) ณ อุณหภูมิที่ทำการศึกษาของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร ที่ใช้ PCDA เป็นมอนอเมอร์ตั้งต้นดังกล่าว ได้ผลดังแสดงในรูป 4.19 (ก) โดยพบว่าค่า λ_{max} ของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/SiO₂ จะค่อย ๆ ลดต่ำลงมาเรื่อย ๆ ด้วยอัตราค่อนข้างคงที่จากความยาวคลื่นเริ่มต้น 640 นาโนเมตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จนเมื่อถึงอุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส อัตราการเปลี่ยน

เฟสสีเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมาก ทำให้ค่า λ_{\max} เคลื่อนจากความยาวคลื่น 630 นาโนเมตร มาอยู่ที่ 545 นาโนเมตร โดยเมื่อพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสี (%CR) ดังรูปที่ 4.19 (ข) พบว่าในช่วงอุณหภูมินี้ เกิดการเปลี่ยนสีไป 53 เปอร์เซ็นต์ (ที่ 53%CR) จากนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิต่อไปจนถึง 90 องศาเซลเซียส จะพบว่าไม่มีการเปลี่ยนเฟสสีเกิดขึ้นอีกต่อไป โดยค่า λ_{\max} คงที่ที่ 545 นาโนเมตร ซึ่งมีการเปลี่ยนสีจากเฟสสีน้ำเงินไปเป็นเฟสสีแดง 83 เปอร์เซ็นต์ (ที่ 83%CR) สำหรับวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn(CH₃CO₂)₂ พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่า λ_{\max} เริ่มต้นอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 645 นาโนเมตร จากนั้นค่อย ๆ ลดต่ำลงด้วยอัตราค่อนข้างคงที่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และเกิดการเปลี่ยนเฟสสีอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิประมาณ 85 องศาเซลเซียสและเกิดการเปลี่ยนสีไป 50 เปอร์เซ็นต์ (ที่ 50%CR) โดย λ_{\max} จะเคลื่อนจากความยาวคลื่น 610 นาโนเมตร ไปอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 585 นาโนเมตร ในขณะที่สารแขวนลอยของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/ZnO และ poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยพบว่า poly(PCDA)/Zn²⁺/ZnO เกิดการเปลี่ยนเฟสสีอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียสและเกิดการเปลี่ยนสีไป 59 เปอร์เซ็นต์ (ที่ 59%CR) โดย λ_{\max} จะเคลื่อนจากความยาวคลื่น 615 นาโนเมตร ไปอยู่ที่ความยาวคลื่น 580 นาโนเมตร ในขณะที่ poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ เกิดการเปลี่ยนเฟสสีอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิประมาณ 75 องศาเซลเซียส และเกิดการเปลี่ยนสีไปประมาณ 37 เปอร์เซ็นต์ (ที่ 37%CR) โดย λ_{\max} จะเคลื่อนจากความยาวคลื่น 625 นาโนเมตร ไปอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 590 นาโนเมตรและเมื่อเพิ่มอุณหภูมิต่อไปจนถึง 90 องศาเซลเซียส พบว่าไม่มีการเปลี่ยนเฟสสีเกิดขึ้นที่ความยาวคลื่นประมาณ 685 นาโนเมตร จากผลการศึกษาดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรที่มีซิงก์(II)ไอออนในโครงสร้างจะเกิดการเปลี่ยนสีได้ยากกว่าในกรณีที่ไม่ได้มี Zn²⁺ และสำหรับ poly(PCDA)/Zn(CH₃CO₂)₂, poly(PCDA)/Zn²⁺/ZnO และ poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ จะเกิดการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิแตกต่างกันประมาณ 5 องศาเซลเซียส โดยที่ poly(PCDA)/Zn(CH₃CO₂)₂ ต้องใช้อุณหภูมิในการเปลี่ยนสีสูงสุด 85 เซลเซียส รองลงมาคือ poly(PCDA)/Zn²⁺/ZnO และ poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่อุณหภูมิ 80 และ 75 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

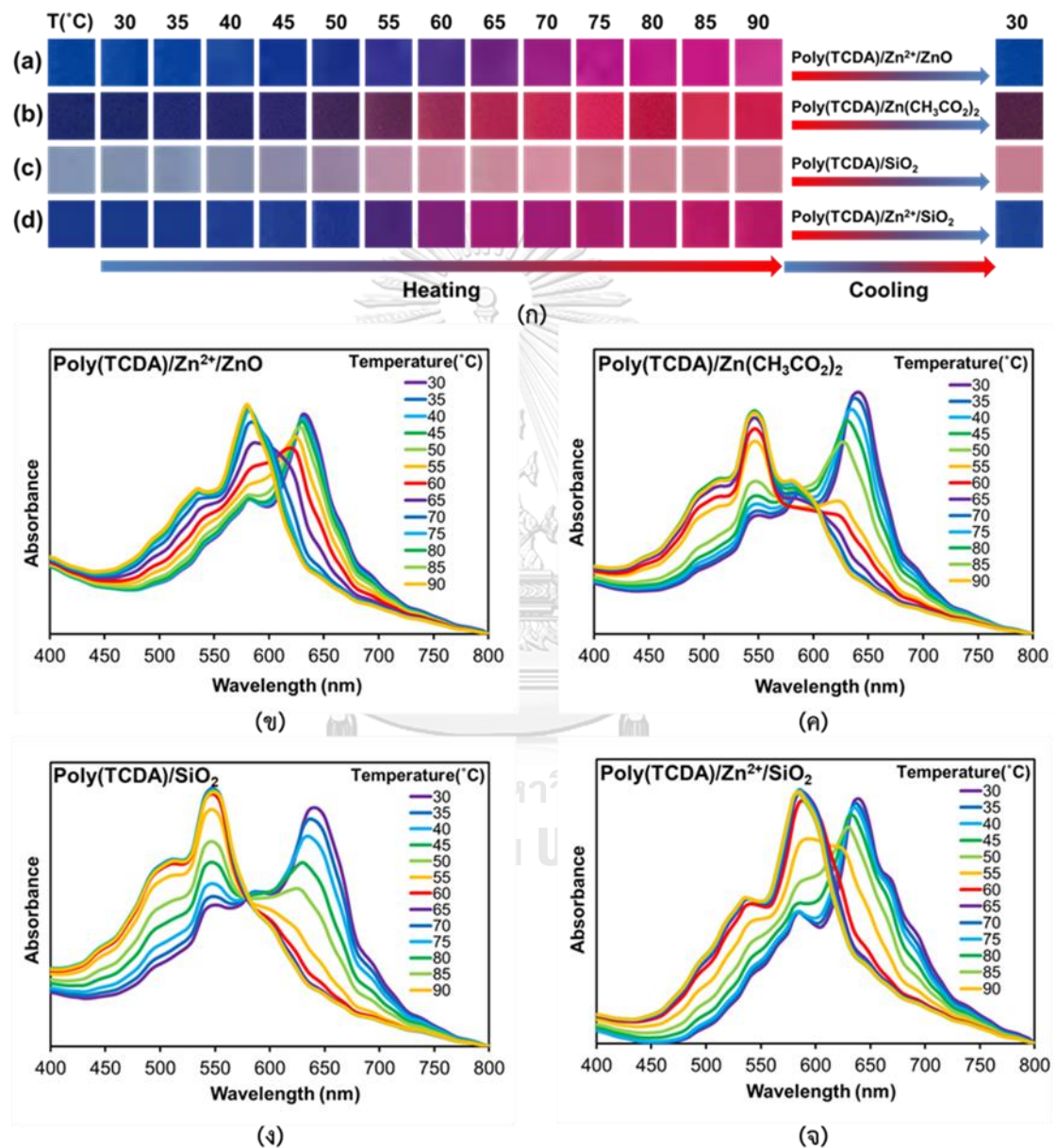
4.3.2 พฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรชนิดต่าง ๆ โดยใช้ 10,12-tricosadiynoic acid เป็นมอนอเมอร์ตั้งต้น

จากการศึกษาในหัวข้อก่อนหน้านี้ยังไม่สามารถหาข้อสรุปได้เกี่ยวกับพฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ว่ามีผลมาจากองค์ประกอบใด เนื่องจากพฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีมีลักษณะที่คล้ายกัน นอกจากนั้น PCDA ที่ใช้เป็นมอนอเมอร์ตั้งต้นในการเตรียม มีสายโซ่อัลคิลที่ยาวทำให้วัสดุ

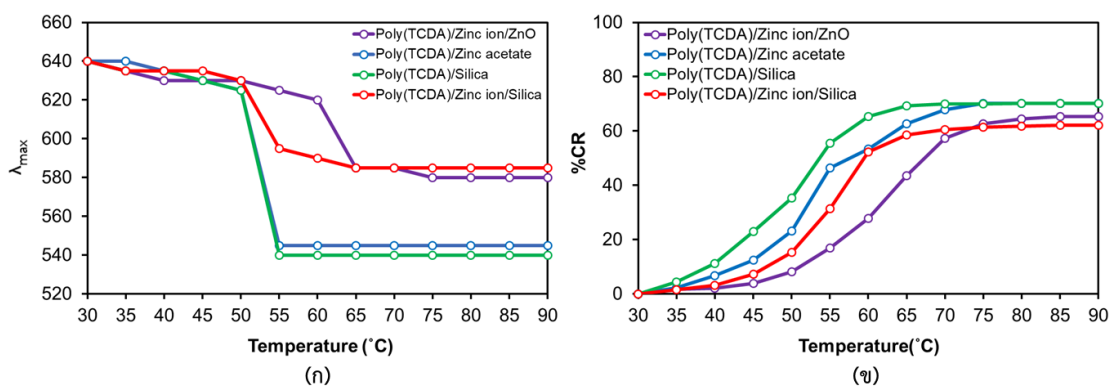
เชิงประกอบที่เตรียมได้ในก่อนหน้ามีความเสถียรสูงแทบไม่เห็นความแตกต่างที่ต้องการ ดังนั้นแล้วในการศึกษานี้จะมีการเปลี่ยนมอนอเมอร์ตั้งต้นเป็น 10,12-tricosadiynoic acid หรือ TCDA ซึ่งเป็นสารที่มีสายโซ่อัลคิลสั้นกว่าและมีแนวโน้มที่จะทำให้สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบเกิดการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิต่ำกว่า อีกทั้งมีความเสถียรทางสีต่ำกว่าเมื่อทำการเพิ่ม - ลดอุณหภูมิ ในการศึกษานี้จะทำการเตรียมและเปรียบเทียบพฤติกรรมของการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร โดยเตรียมในสภาวะปกติ (pH7) ได้แก่ poly(TCDA)/Zn²⁺/ZnO, poly(TCDA)/Zn(CH₃CO₂)₂, poly(TCDA)/SiO₂ และ poly(TCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ผลการศึกษาสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.20

เมื่อนำสารแขวนลอยของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(TCDA)/SiO₂ ที่เตรียมได้มาศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับการกระตุ้นโดยเปลี่ยนแปลงในช่วงอุณหภูมิ 30 จนถึง 90 องศาเซลเซียส เมื่อสังเกตจากรูปที่ 4.20 (ก) จะเห็นว่าวัสดุเชิงประกอบมีสีฟ้าอ่อนและเมื่อวิเคราะห์สมบัติการดูดกลืนแสงจากสเปกตร้าในรูปที่ 4.20 (ง) พบการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตร และปรากฏแถบ vibronic ที่ความยาวคลื่นประมาณ 585 นาโนเมตร ซึ่งเป็นสเปกตร้าการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงิน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความเข้มของแถบการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงินจะลดลงเรื่อย ๆ เมื่อพิจารณาจากค่า λ_{max} ดังแสดงในรูปที่ 4.21 (ก) พบว่าในช่วงอุณหภูมินี้ λ_{max} จะค่อย ๆ ลดต่ำลงมาด้วยอัตราค่อนข้างคงที่ ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่เล็กน้อยของโซ่ข้างที่เพิ่มขึ้นเมื่อได้รับอุณหภูมิที่สูงขึ้น ส่งผลให้ออร์บิทัลไพบางส่วนเกิดการบิดออกนอกกระนาบ ทำให้ความเป็นระนาบของออร์บิทัลไพน้อยลง ระยะคอนจูเกตจึงลดลงจึงทำให้เกิดการเปลี่ยนสีเล็กน้อยในช่วงแรก ในขณะที่ความเข้มของแถบการดูดกลืนที่ความยาวคลื่นประมาณ 545 นาโนเมตร จะเพิ่มขึ้น และเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าจะพบว่าวัสดุเชิงประกอบค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นสีม่วงมากขึ้น เมื่อให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจนอุณหภูมิสูงกว่า 55 องศาเซลเซียส สเปกตร้าการดูดกลืนแสงเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุดจะเลื่อนไปที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร ในขณะที่แถบ vibronic จะปรากฏที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร หรืออาจจะเรียกได้ว่าเป็น สเปกตร้าการดูดกลืนแสงของเฟสสีแดง ซึ่งจะมองเห็นสารละลายมีสีแดง เมื่อพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสี (%CR) พบว่าวัสดุเชิงประกอบดังกล่าวเกิดการเปลี่ยนสีไป 55 เปอร์เซ็นต์ (ที่ 55%CR) และเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส สำหรับกลไกในการเปลี่ยนสีเกิดจากพลังงานความร้อนที่สูงทำให้พันธะไฮโดรเจนของหมู่คาร์บอกซิลที่เชื่อมระหว่าง head groups ของ TCDA กับอนุภาคนาโนซิลิกาเกิดการแตกออกทำให้โซ่ข้างที่เป็นหมู่แอลคิลเกิดการเคลื่อนที่ไปมาก ส่งผลให้ออร์บิทัลไพเกิดการบิดออกนอกกระนาบเป็นเหตุให้ π อิเล็กตรอนที่สายโซ่หลักที่มีโครงสร้างเป็นแบบคอนจูเกตเคลื่อนที่ไม่สะดวก

นั่นคือระยะคอนจูเกตลดลง ช่องว่างพลังงานของ HOMO และ LUMO กว้างขึ้น อิเล็กตรอนต้องใช้พลังงานมากในการกระโดดข้ามช่องว่างพลังงานจึงเกิดการเปลี่ยนตำแหน่งของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงไปยังความยาวคลื่นที่สั้นกว่า ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสีของ poly(TCDA)/SiO₂ เป็นสีแดงและเกิดการเปลี่ยนสีแบบไม่ผันกลับเมื่อลดอุณหภูมิกลับลงมายังเริ่มต้น



รูปที่ 4.20 (ก) ภาพถ่ายแสดงการเปลี่ยนสี และ(ข) – (จ) สเปกตรากการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร โดยใช้ TCDA เป็นมอนอเมอร์ตั้งต้น เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 30 ถึง 90 องศาเซลเซียสและปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 4.21 (ก) ค่าความยาวคลื่น ณ ตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) และ (ข) เปอร์เซนต์การเปลี่ยนสี (%CR) ของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร ที่ใช้ TCDA เป็นมอนอเมอร์ตั้งต้นเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 30 ถึง 90 องศาเซลเซียส

เมื่อศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(TCDA)/Zn(CH₃CO₂)₂ ได้สังเกตเห็นการดูดกลืนแสงดังแสดงในรูปที่ 4.20 (ค) และการเปลี่ยนสีดังรูปที่ 4.20 (กข) จากผลการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ความเข้มของแถบการดูดกลืนแสงสีน้ำเงินจะลดลงเรื่อย ๆ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงถึง 50 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนเฟสสีจะเกิดขึ้นอย่างชัดเจน โดยค่า λ_{max} เคลื่อนจากความยาวคลื่น 625 นาโนเมตร มาอยู่ที่ 545 นาโนเมตร จากนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิต่อไปจนถึง 90 องศาเซลเซียส พบว่าไม่เกิดการเปลี่ยนเฟสสีเกิดขึ้นอีก ค่า λ_{max} จึงคงที่ที่ 545 นาโนเมตร และจากการพิจารณาภาพถ่ายการเปลี่ยนสีพบว่าวัสดุเชิงประกอบดังกล่าวเปลี่ยนเป็นสีม่วงอมแดงและมีแนวโน้มเป็นสีแดงเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.21 (ข) เพื่อดูเปอร์เซนต์การเปลี่ยนสีจะเห็นว่าในช่วงอุณหภูมินี้วัสดุเชิงประกอบมีการเปลี่ยนสีไป 46 เปอร์เซนต์ (ที่ 46%CR) และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 65 องศาเซลเซียส พบว่ามีการเปลี่ยนสีไป 63 เปอร์เซนต์ และเมื่อลดอุณหภูมิของวัสดุเชิงประกอบลงมาที่อุณหภูมิห้องพบว่าวัสดุเชิงประกอบดังกล่าวเกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับแบบไม่สมบูรณ์หรืออาจกล่าวได้ว่ามีเฟสสีแดงเหลืออยู่ เนื่องจากเมื่อวัสดุเชิงประกอบได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นพันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่าง head groups เกิดการแตกออกไปบางส่วน จึงไปทำลายความเป็นระเบียบของโซ่ข้างและโซ่หลักทำให้วัสดุเชิงประกอบเกิดการเปลี่ยนสีผันกลับแบบไม่สมบูรณ์ขึ้น

สำหรับพฤติกรรมที่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(TCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ซึ่งเป็นวัสดุเชิงประกอบที่ได้จากการเตรียมอนุภาคนาโนซิลิกาและมีการเติม Zn²⁺ ร่วมด้วย และจากการศึกษาพบว่าวัสดุเชิงประกอบดังกล่าวเริ่มเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงอมน้ำเงินในช่วงอุณหภูมิประมาณ 55 องศาเซลเซียส โดยที่ช่วงอุณหภูมินี้เกิดการเปลี่ยนเฟสสีเพิ่มขึ้น

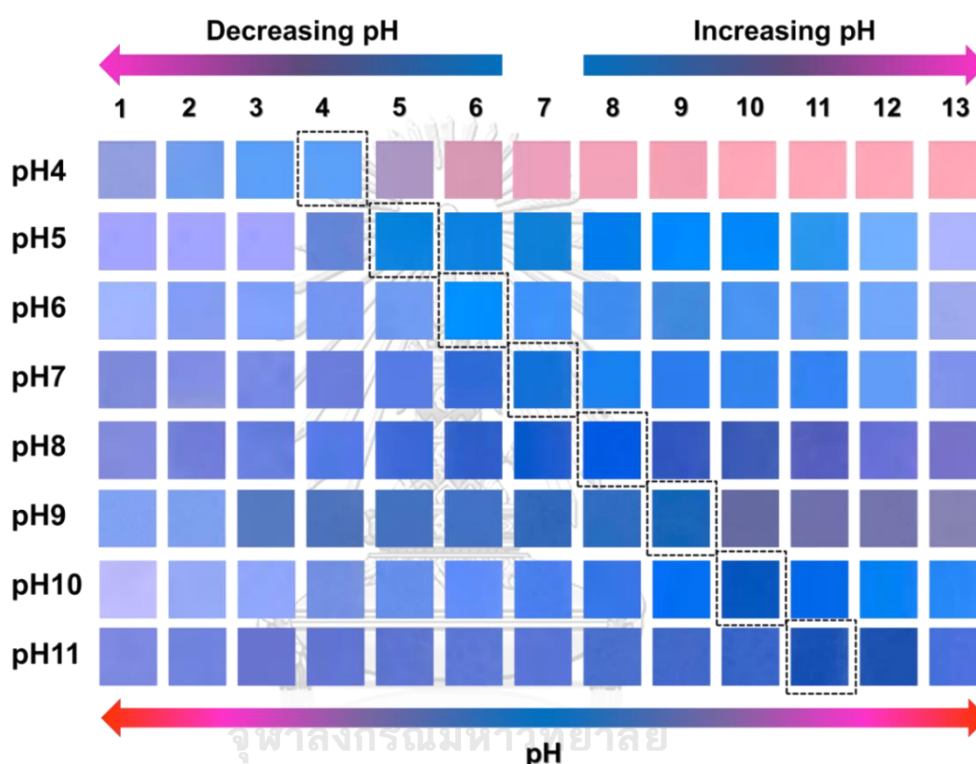
อย่างชัดเจนทำให้ค่า λ_{\max} เคลื่อนจากความยาวคลื่น 630 นาโนเมตร มาอยู่ที่ 595 นาโนเมตร ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีไป 31 เปอร์เซ็นต์ (ที่ 31%CR) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นถึง 90 องศาเซลเซียสให้กับวัสดุเชิงประกอบพบว่าวัสดุดังกล่าวมีการเปลี่ยนตำแหน่ง λ_{\max} มาอยู่ที่ 585 นาโนเมตรและเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าจะเห็นเป็นสีม่วงอมแดง และมีการเปลี่ยนสีของวัสดุไป 62 เปอร์เซ็นต์ ภายหลังจากลดอุณหภูมิของวัสดุเชิงประกอบให้เท่ากับอุณหภูมิตอนเริ่มต้น พบว่าวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(TCDA)/Zn²⁺/SiO₂ เกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้อย่างสมบูรณ์โดยไม่มีเฟสสีแดงอยู่ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นการเปลี่ยนสีที่แตกต่างจากวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(TCDA)/SiO₂ และ poly(TCDA)/Zn(CH₃COO)₂ อย่างสิ้นเชิง ดังนั้นแล้วจึงได้ข้อสรุปว่าในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรระหว่างพีดีเอและซิลิกาเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้อย่างสมบูรณ์จำเป็นต้องมีทั้งอนุภาคนาโนซิลิกาและอนุภาคของซิงก์(II)ไอออน (Zn²⁺) ที่มีแหล่งกำเนิดมาจากซิงก์อะซีเตต เนื่องจากถ้าขาดตัวใดตัวหนึ่งไปอาจจะทำให้วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้มีสมบัติการเปลี่ยนสีแบบผันกลับไม่ได้หรือผันกลับได้แบบไม่สมบูรณ์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าความร้อนในช่วงอุณหภูมินี้ทำให้โครงรูปของสายโซ่ข้าง (side chain) เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือเกิดการขยับในลักษณะการเคลื่อนที่ของโซ่ข้างหรือการเปลี่ยนทิศทางของการจัดเรียงตัว ส่งผลให้ออร์บิทัลไพบางส่วนบิดตัว เกิดการรบกวนความเป็นระนาบของสายโซ่หลักที่มีโครงสร้างเป็นแบบคอนจูเกตทำให้เกิดการเปลี่ยนสี แต่เนื่องจากยังไม่เกิดการแตกออกของพันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่าง head groups เนื่องจากโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบมี Zn²⁺ ที่เชื่อมระหว่างอนุภาคนาโนซิลิกากับ TCDA ทำให้การจัดเรียงตัวมีความแข็งแรงและมีความเป็นระเบียบแม้จะได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงก็ไม่สามารถทำให้พันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่าง head groups เกิดการแตกออกได้ทำให้เมื่อลดอุณหภูมิลงมาที่อุณหภูมิเริ่มต้นโครงสร้างจึงบิดกลับมาเป็นแบบเดิมหรือมีความเป็นระเบียบเหมือนเดิมเป็นเหตุทำให้สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(TCDA)/Zn²⁺/SiO₂ เกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้อย่างสมบูรณ์

4.4 การศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ต่อกรดและเบส

4.4.1 พฤติกรรมการเปลี่ยนสีต่อกรดและเบส

ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมได้ในช่วง pH4 ถึง pH11 ด้วยการวิเคราะห์สมบัติการดูดกลืนแสง โดยใช้เทคนิคอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 400 ถึง 800 นาโนเมตร จากการศึกษาพบว่าเมื่อสารแขวนลอยของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร

ดังกล่าว ได้รับการกระตุ้นโดยการปรับเปลี่ยนค่าพีเอชให้เปลี่ยนแปลงไปจากค่าพีเอชของสารที่เตรียมได้ในตอนเริ่มต้น โดยทำการศึกษาในช่วงพีเอชตั้งแต่ pH1 ถึง pH13 ด้วยการเติมกรดไฮโดรคลอริก (HCl) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 1 โมลาร์ เพื่อปรับค่าความเป็นกรดและเบสตามลำดับ พบว่าพฤติกรรมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมได้ในช่วง pH ดังกล่าวเกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับไม่ได้ (irreversible thermochromism)



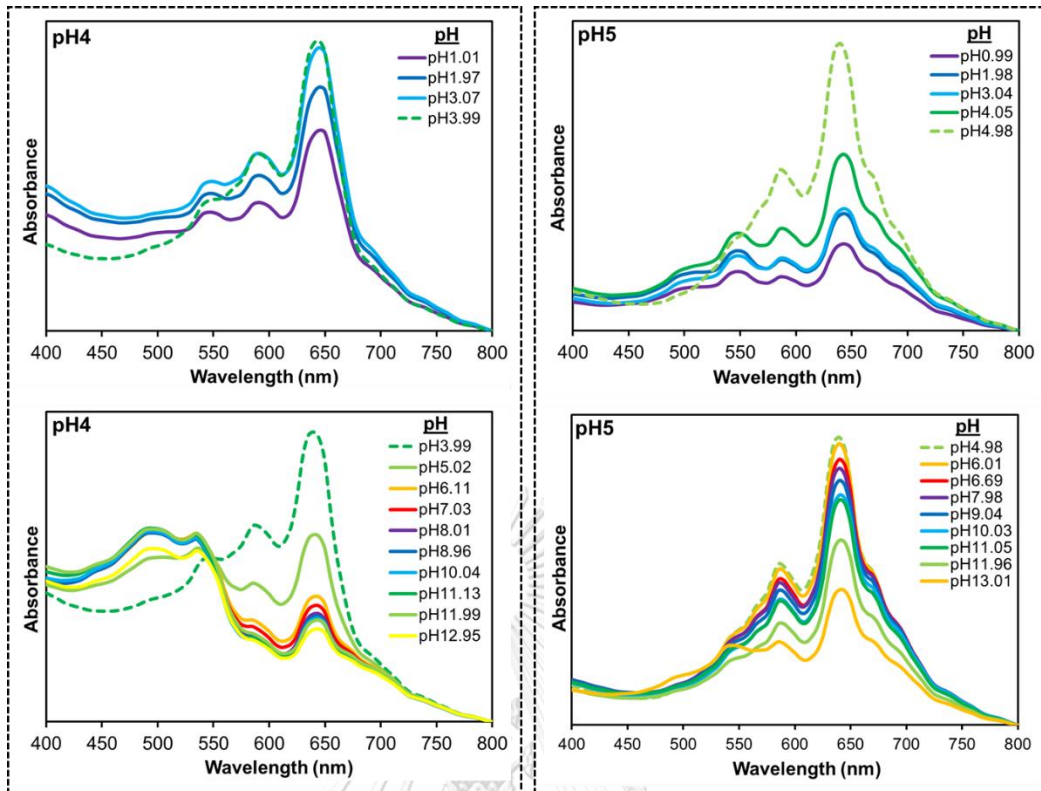
รูปที่ 4.22 ภาพถ่ายพฤติกรรมตอบสนองโดยเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมที่ค่าพีเอชต่าง ๆ เมื่อได้รับกระตุ้นโดยการปรับค่าพีเอช

จากการศึกษาพบว่าเมื่อเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้นประมาณ 1 โมลาร์ ลงไปในสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่มีค่าพีเอชเริ่มต้น 3.99 (เตรียมที่ pH4) ซึ่งมีความเป็นกรดสูง จนค่าพีเอชของสารแขวนลอยเปลี่ยนเป็น 5.02 จะสังเกตเห็นสีของสารแขวนลอยเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วง ดังแสดงในรูปที่ 4.22 และเมื่อวิเคราะห์จากสเปกตรารการดูดกลืนแสง ดังรูป 4.23 (ก) พบว่ายอดการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร ลดลงและมียอดการดูดกลืนแสงเล็ก ๆ ที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตร ปรากฏขึ้นมาและเมื่อปรับค่าพีเอชให้สูงขึ้นถึง 6.11 พบว่าสเปกตรารการดูดกลืนแสงเปลี่ยนไปอย่างมาก โดยความเข้มของการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร ลดต่ำลง

อย่างรวดเร็ว ในขณะที่เดียวกันแถบการดูดกลืนแสงสูงสุดจะเลื่อนไปอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตร และเมื่อสังเกตสีของสารแขวนลอยพบว่าเปลี่ยนจากสีม่วงไปเป็นสีแดงอมชมพูอย่างชัดเจน

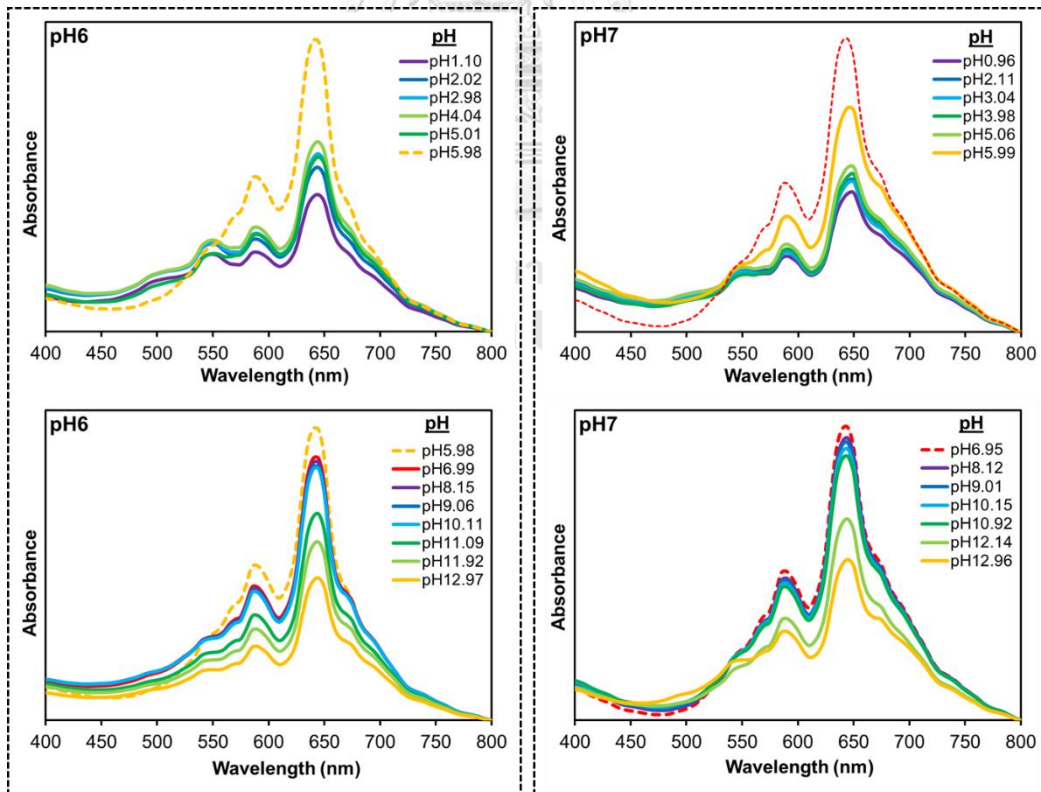
จากการพิจารณาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสี (%CR) จากเฟสสีน้ำเงินเป็นแดง ดังรูปที่ 4.24 พบว่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง pH3.99 ถึง pH6.11 โดยเพิ่มขึ้นประมาณ 41.5เปอร์เซ็นต์ (ที่ 45%CR) และเมื่อปรับค่าพีเอชให้สูงขึ้นอีกต่อไป จะพบว่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและเพิ่มขึ้นสูงสุดถึงประมาณ 49 เปอร์เซ็นต์ ที่ pH12.95 และสำหรับการเติมกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ลงไปในสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่มีค่าพีเอชเริ่มต้น 3.99 จนค่าพีเอชของสารแขวนลอยเปลี่ยนเป็น 1.01 จะสังเกตเห็นสีของสารแขวนลอยเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีน้ำเงินอมม่วงโดยการเปลี่ยนสีที่ช่วงพีเอชนี้เกิดขึ้นไม่ชัดเจน และเมื่อวิเคราะห์จากสเปกตรากการดูดกลืนพบว่าความเข้มของการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร ค่อย ๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อพีเอชมีค่าต่ำลง นอกจากนี้ยังพบยอดการดูดกลืนแสงเล็ก ๆ ที่ความยาวคลื่นประมาณ 590 และ 545 นาโนเมตร จากการศึกษาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีพบว่าการเปลี่ยนสีจะเพิ่มขึ้นต่อเนื่องอย่างช้า ๆ และเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ประมาณ 9.8 เปอร์เซ็นต์ที่ pH1.01 ดังรูปที่ 4.24 จากผลการศึกษาดังกล่าวจะเห็นได้ว่าวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่มีค่าพีเอชเริ่มต้น 3.99 หรือประมาณ pH4 เกิดการเปลี่ยนสีอย่างชัดเจนในสถานะที่มีความเป็นเบสสูงขึ้น ในขณะที่สถานะความเป็นกรดสูงจะเกิดการเปลี่ยนสีอย่างช้า ๆ อาจกล่าวได้ว่าในสถานะนี้วัสดุเชิงประกอบมีความเสถียรต่อกรดสูง

สำหรับสารแขวนลอยของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่มีค่าพีเอชเริ่มต้น 4.98 และ 5.98 (เตรียมที่ pH5 ถึง pH6) ซึ่งเป็นสารแขวนลอยที่อยู่ในสถานะที่มีความเป็นกรด โดยเมื่อปรับค่าพีเอชให้เพิ่มขึ้นจนถึงประมาณ pH12 พบว่าสีของสารแขวนลอยที่มีค่าพีเอชเริ่มต้น 4.98 และ 5.98 ยังคงปรากฏเป็นสีน้ำเงินเมื่อสังเกตได้ด้วยตาเปล่า แต่เมื่อพิจารณาเส้นสเปกตรากการดูดกลืนแสงในรูปที่ 4.23 (ข) และ (ค) พบว่าค่าการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงินลดลงเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มค่าพีเอชของสารแขวนลอยที่มีค่าพีเอชเริ่มต้น 4.98 และ 5.98 ไปจนถึงค่าพีเอช 13.01 และ 12.97 ตามลำดับ จะพบการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่เกิดแตกต่างกันเล็กน้อย โดยพบว่ายอดการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตร ลดต่ำลงมากและมียอดการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตร ปรากฏขึ้นมาเล็กน้อย โดยมีความสูงของยอดต่ำกว่าความสูงของยอดการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตร สังเกตด้วยตาจะเห็นสารแขวนลอยเป็นสีฟ้าอมม่วง



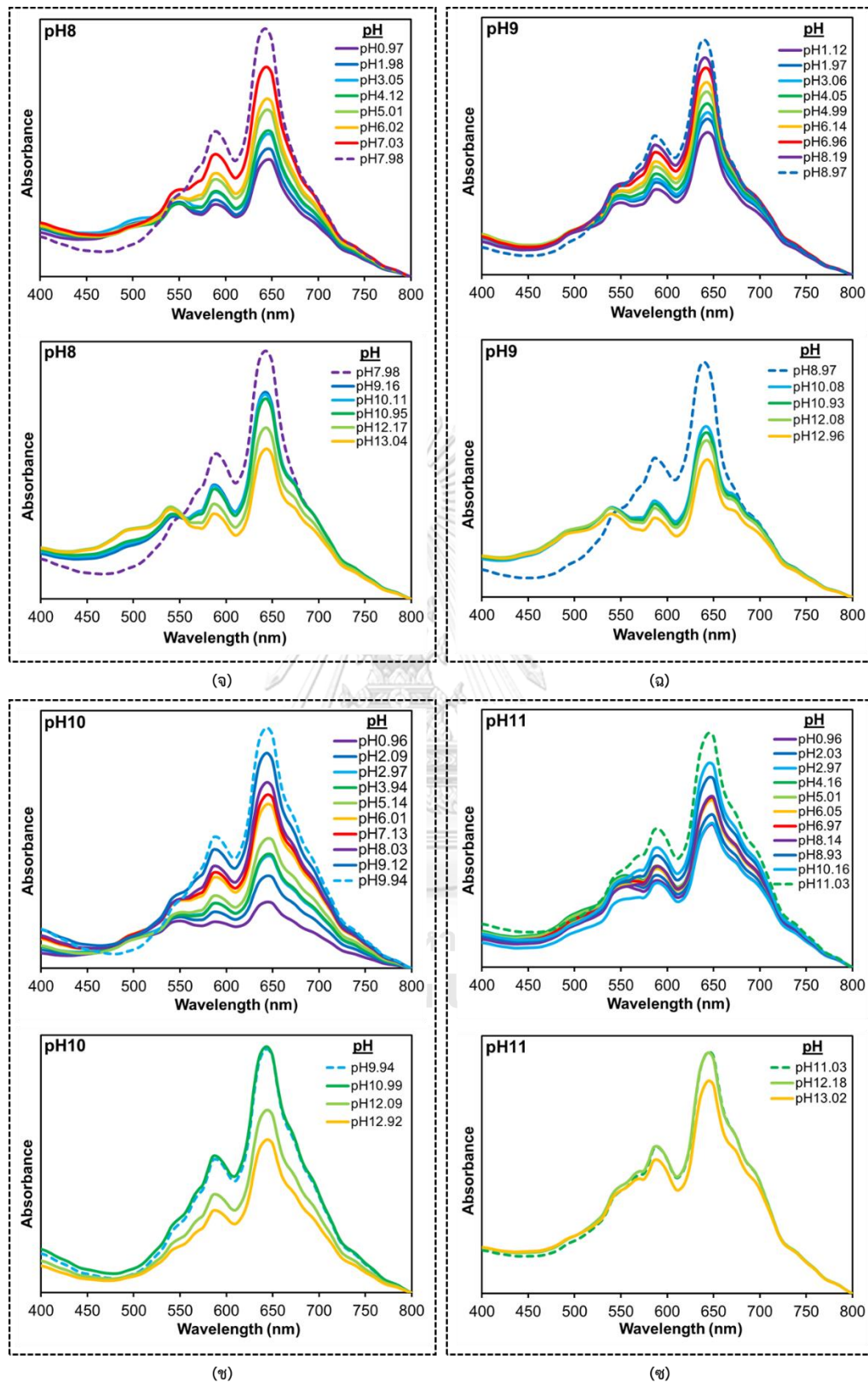
(n)

(u)

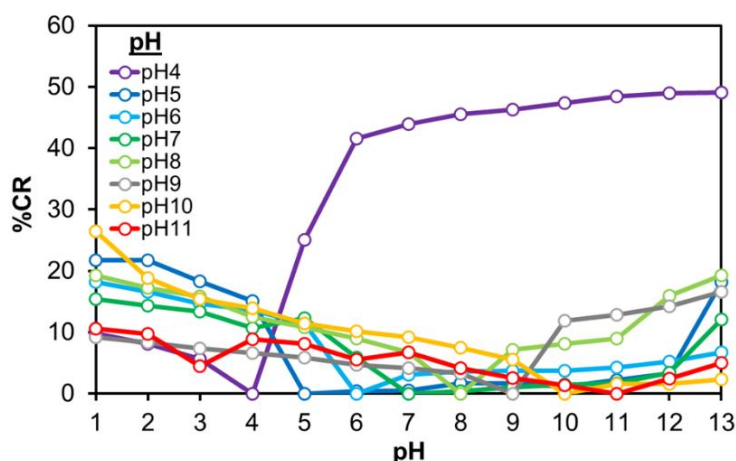


(r)

(s)



รูปที่ 4.23 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมที่ค่าพีเอชต่าง ๆ เมื่อได้รับกระตุ้นโดยการปรับค่าพีเอชจาก pH1 ถึง pH13



รูปที่ 4.24 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสี (%CR) ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ในพีเอชต่าง ๆ เมื่อได้รับกระตุ้นโดยการปรับค่าพีเอชจาก pH1 ถึง pH13

เมื่อวิเคราะห์จากสเปกตรารการดูดกลืนพบว่าความเข้มของการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร ค่อย ๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อพีเอชมีค่าต่ำลง นอกจากนี้ยังพบยอดการดูดกลืนแสงเล็ก ๆ ที่ความยาวคลื่นประมาณ 590 และ 545 นาโนเมตร จากการศึกษาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่มีพีเอชเริ่มต้น 4.98 และ 5.98 พบว่าการเปลี่ยนสีจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ประมาณ 21.67 เปอร์เซ็นต์ ที่ pH0.99 และ 18.21 เปอร์เซ็นต์ ที่ pH1.10 ตามลำดับ แสดงได้ดังรูปที่ 4.24

นอกจากนี้วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่มีพีเอชเริ่มต้น 6.95, 7.98, 8.97, 9.94 และ 11.03 (เตรียมที่ pH7 ถึง pH11) พบว่าพฤติกรรมตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ในช่วงพีเอชดังกล่าว มีพฤติกรรมการเปลี่ยนสีที่คล้ายกันกับวัสดุเชิงประกอบที่มีพีเอชเริ่มต้น 4.98 และ 5.98 ดังที่ได้กล่าวมาแล้วก่อนหน้านี้ ซึ่งจากการสังเกตการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยพบว่าเมื่อปรับให้ค่าพีเอชสูงขึ้นหรือต่ำลง สารแขวนลอยจะค่อย ๆ เปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีน้ำเงินอมม่วง ดังรูปที่ 4.22 ซึ่งจากการสังเกตภาพถ่ายการเปลี่ยนสีแทบจะมองไม่เห็นการเปลี่ยนสี แต่เมื่อวิเคราะห์จากสเปกตรารการดูดกลืนแสง ดังรูปที่ 4.23 (ง) (จ) (ฉ) (ช) และ (ซ) พบว่าการเปลี่ยนของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงมีความแตกต่างเพียงเล็กน้อย แต่สิ่งที่ปรากฏเหมือนกันคือความเข้มของการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตร ลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อมีการปรับค่าพีเอชของสารแขวนลอยให้สูงขึ้นและต่ำลง สำหรับเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสี (%CR) ของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่มีพีเอชเริ่มต้น 6.95, 7.98, 8.97, 9.94 และ 11.03 เกิดการเปลี่ยนสีที่เห็นได้ชัด เมื่อค่าพีเอชในสารแขวนลอยที่ปรับได้อยู่ในช่วง

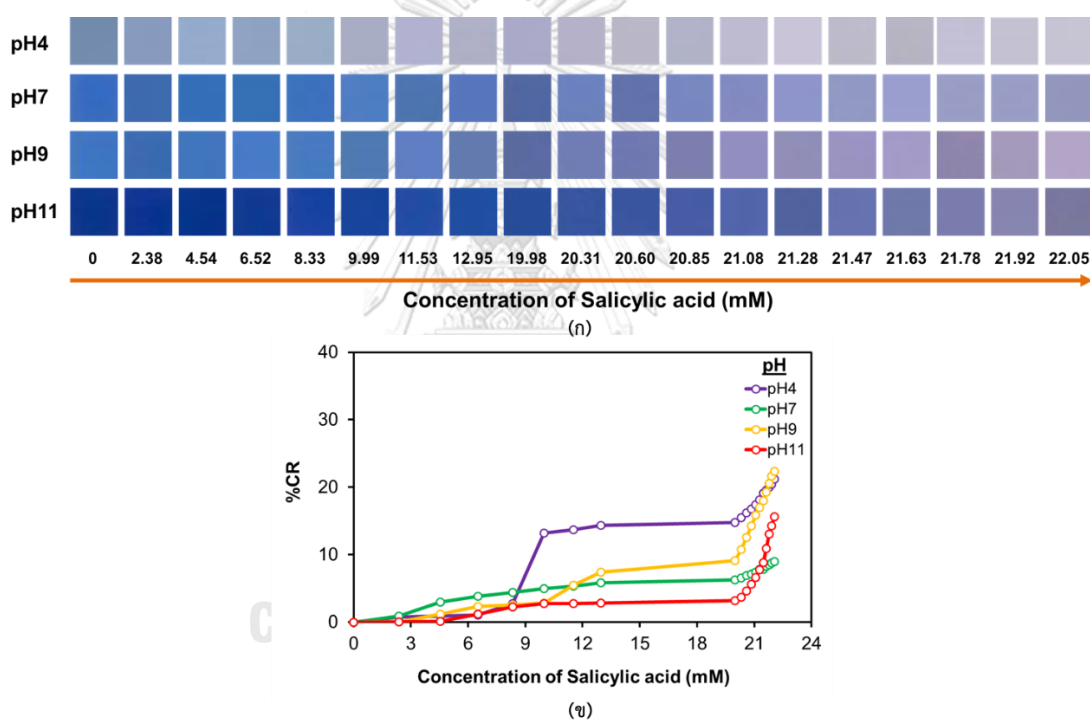
pH1 และ pH13 โดยที่ค่าพีเอชดังกล่าวนี้ สารแขวนลอยจะเกิดการเปลี่ยนสี (%CR) ประมาณ 12.07, 19.20, 16.58, 2.32 และ 4.96 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

กลไกในการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับการรบกวนจากความเป็นกรด – เบส เกิดจากไฮดรอกไซด์ไอออน (OH⁻) ไปดึงโปรตอนจากหมู่คาร์บอกซิลที่ head groups ของ PCDA ส่งผลให้พันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่าง head groups ของ PCDA เกิดการแตกออกและเกิดแรงผลักระหว่างคาร์บอกซิเลตไอออน (-COO⁻) ที่อยู่ติดกันอีกด้วย จึงทำให้เกิดความไม่เป็นระเบียบของสายโซ่ข้าง ส่งผลให้การจัดเรียงตัวอย่างเป็นระนาบของสายโซ่หลักที่มีโครงสร้างเป็นแบบคอนจูเกตลดน้อยลง และทำให้ระยะคอนจูเกตของสายโซ่หลักลดลง ส่งผลต่อสถานะของอิเล็กตรอนและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของโมเลกุลไปยังความยาวคลื่นที่สั้นกว่า ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรขึ้น โดยจากการทดลองพบว่าวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ จะเกิดการเปลี่ยนสีที่พีเอชมากกว่า 12 โดยการเปลี่ยนสีที่เกิดขึ้นที่ค่าพีเอชสูงนี้อาจเป็นผลจากการจัดเรียงตัวของ PCDA บนพื้นผิวของอนุภาคนาโนซิลิกาซึ่งมีซิงก์(II)ไอออนเป็นตัวเชื่อมมีความเป็นระเบียบสูงและมีการจัดเรียงตัวซ้อนกันเป็นชั้น ๆ โดยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จะเข้าทำปฏิกิริยาที่ชั้นด้านนอกก่อน ทำให้ชั้นของ PCDA ที่อยู่ด้านนอกสุดจะได้รับแรงกระทำจากโซเดียมไฮดรอกไซด์มากที่สุด และระดับของแรงกระทำที่ได้รับจะลดลงตามลำดับชั้นของ PCDA ที่อยู่ถัดเข้ามาด้านใน ทำให้การเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบไล่จากชั้นด้านนอกมาด้านในเป็นลำดับ ในขณะที่วงกลมลักษณะโครงสร้างที่เป็นชั้น ๆ นี้ ส่งผลให้ต้องใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นสูงเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนสีในวัสดุเชิงประกอบ สำหรับที่สภาวะกรดเมื่อทำการเติมกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เพื่อใช้ในการปรับค่าพีเอชให้มีความเป็นกรดหรือต่ำลงจากสารแขวนลอยที่เตรียมได้ในช่วงพีเอชเริ่มต้น พบว่าการละลายของอนุภาคนาโนซิลิกามีความเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนสี โดยปกติแล้วอนุภาคนาโนซิลิกาจะมีความทนกรดสูงโดยพบว่าจะไม่เกิดการละลายในกรด แต่เนื่องจากซิลิกาที่ใช้ในงานวิจัยนี้เมื่อนำมาเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรทำให้อนุภาคของซิลิกามีขนาดเล็กลงจึงเป็นเหตุให้อนุภาคนาโนซิลิกาบางส่วนเกิดการละลายได้ในสภาวะที่มีความเป็น กรดสูง ดังนั้นการละลายของอนุภาคนาโนซิลิกาดังกล่าวเป็นการทำลายแรงระหว่างประจุที่ส่วนหัวของ PDA ยึดเกาะกับประจุบวกบนพื้นผิวของอนุภาคนาโนซิลิกา ดังนั้นจึงทำให้เกิดแรงผลักระหว่าง ประจุของของหมู่ -COO⁻ ด้วยกันเอง ส่งผลให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของสายโซ่ข้างและสายโซ่หลัก ซึ่งก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนสีนั่นเอง

4.4.2 พฤติกรรมการเปลี่ยนสีต่อกรดและเบสอินทรีย์

ส่วนที่ 1 การตอบสนองต่อกรดซาลิซิลิก (Salicylic acid)

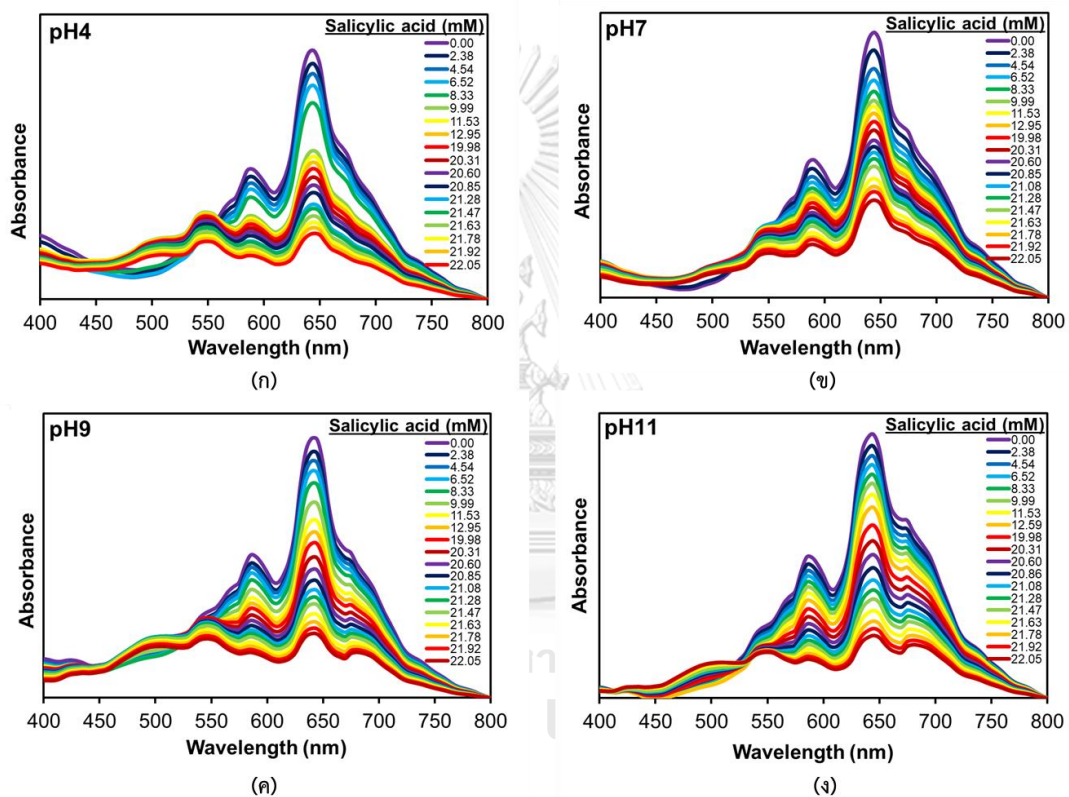
เมื่อนำวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ซึ่งเตรียมได้ที่ pH4 pH7 pH9 และ pH11 มาศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีเมื่อเติมกรดอินทรีย์ โดยใช้กรดซาลิซิลิก (salicylic acid) ความเข้มข้น 50 มิลลิโมลาร์ เติมลงในสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร Poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ พร้อมสังเกตพฤติกรรมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีที่เกิดขึ้น จากนั้นวิเคราะห์สมบัติการดูดกลืนแสง ด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโทร - สโกปี ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 400 ถึง 800 นาโนเมตร



รูปที่ 4.25 (ก) ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการตอบสนองโดยเปลี่ยนสีและ (ข) เปอร์เซนต์การเปลี่ยนสี (%CR) ของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่พีเอชต่าง ๆ เมื่อมีการเติมกรดซาลิซิลิกที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน

จากการศึกษาเมื่อนำวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ซึ่งเตรียมได้ที่ช่วง pH4 มาศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีต่อกรดอินทรีย์ เมื่อทำการเติมกรดซาลิซิลิก (salicylic acid) ความเข้มข้น 50 มิลลิโมลาร์ ลงในสารแขวนลอยของวัสดุเชิงประกอบดังกล่าว พบว่าสารแขวนลอยมีการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีน้ำเงินที่จางลงเมื่อปริมาณของ

กรดซาลิซิลิกที่เติมลงไปเพิ่มมากขึ้น ดังรูปที่ 4.25 (ก) พบว่าความเข้มของการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร ค่อย ๆ ลดลง ส่งผลให้การเปลี่ยนสีในช่วงนี้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ เนื่องจากกรดซาลิซิลิกที่เติมเข้าไปยังมีปริมาณไม่มากพอที่จะไปทำลายการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของโครงสร้างที่เป็นสาเหตุทำให้สารแขวนลอยเกิดการเปลี่ยนสี แต่เมื่อเติมกรดซาลิซิลิกเพิ่มขึ้นจนสารแขวนลอยมีความเข้มข้นของกรดซาลิซิลิกประมาณ 8.33 มิลลิโมลาร์ พบว่าสารแขวนลอยเริ่มเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีน้ำเงินอมม่วง โดยเป็นช่วงความเข้มข้นแรกที่ทำให้สารแขวนลอยเกิดการเปลี่ยนสี



รูปที่ 4.26 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่พีเอชต่าง ๆ เมื่อมีการเติมกรดซาลิซิลิกที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน

เมื่อพิจารณาสเปกตรากการดูดกลืนแสงพบว่าความเข้มของการดูดกลืนแสงที่ 640 นาโนเมตร ลดลงไปมากเมื่อเทียบกับตอนเริ่มต้นและมียอดการดูดกลืนแสงเล็ก ๆ ที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตร ปรากฏขึ้นมาด้วยและเป็นช่วงการดูดกลืนแสงของเฟสสีแดง นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสี (%CR) ในช่วงที่เริ่มเกิดการเปลี่ยนสี พบว่าวัสดุเชิงประกอบเกิดการเปลี่ยนสีไป 13.2 เปอร์เซ็นต์ จากตอนเริ่มต้นและเมื่อเติมกรดซาลิซิลิกลงไปอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งความเข้มข้นของกรดซาลิซิลิกในสารแขวนลอยมีประมาณ 22.05 มิลลิโมลาร์ สารแขวนลอยจะเปลี่ยนสี

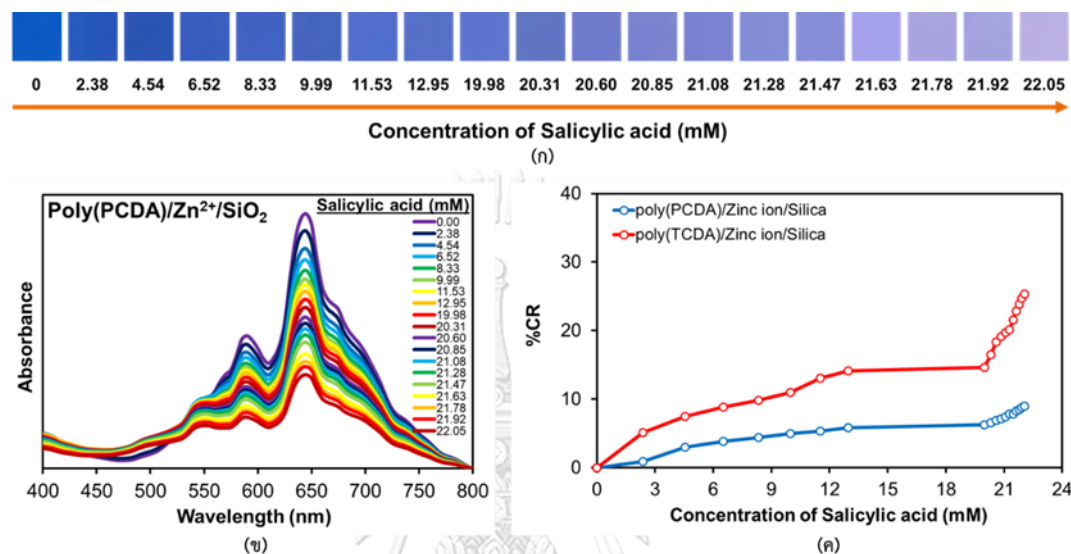
จากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงอมฟ้า ดังรูปที่ 4.25 (ก) และจากการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสี (%CR) พบว่าวัสดุเชิงประกอบมีการเปลี่ยนสีไป 21 เปอร์เซ็นต์จากตอนเริ่มต้น

สำหรับวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ซึ่งเตรียมได้ที่ pH7 pH9 และ pH11 จากการศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อกรดซาลิซิลิกพบว่า สารแขวนลอยที่เตรียมได้ในช่วงพีเอชดังกล่าวมีพฤติกรรมการเปลี่ยนสีที่แตกต่างกันเล็กน้อย เมื่อพิจารณาสารแขวนลอยของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมขึ้นโดยไม่ปรับพีเอช (pH7) พบว่าการเติมกรดซาลิซิลิกลงไปในการแขวนลอยแทบจะสังเกตไม่เห็นการเปลี่ยนสี เมื่อพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ในสภาวะนี้โดยการเติมกรดซาลิซิลิกลงไปอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งความเข้มข้นของกรดซาลิซิลิกในสารแขวนลอยมีประมาณ 22.05 มิลลิโมลาร์ พบว่าสารแขวนลอยเปลี่ยนสีไปประมาณ 9 เปอร์เซ็นต์เท่านั้นจากตอนเริ่มต้น เป็นการบ่งบอกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ช่วงดังกล่าวมีความเสถียรสูง ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีได้ยากแม้ว่าปริมาณกรดอินทรีย์ที่เติมเข้าไปมีปริมาณความเข้มข้นสูงก็ตาม โดยมีผลมาจากโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ในสภาวะนี้มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของโครงสร้างเพราะไม่มีการปรับพีเอชในระหว่างการเตรียมสารแขวนลอยส่งผลให้โครงสร้างภายในไม่ถูกรบกวนด้วยความเป็นกรด-เบส ทำให้โครงสร้างภายในมีความเป็นระเบียบแม้ว่าจะถูกรบกวนด้วยกรดซาลิซิลิกที่ความเข้มข้นสูงแล้วก็ตาม ขณะที่สารแขวนลอยที่เตรียมได้ในช่วงที่มีความเป็นเบสสูง (pH9 และ pH11) เมื่อสารแขวนลอยถูกรบกวนด้วยกรดซาลิซิลิกที่ความเข้มข้นสูงประมาณ 22.05 มิลลิโมลาร์ พบว่าสารแขวนลอยที่เตรียมได้ในช่วงพีเอชดังกล่าวเกิดการเปลี่ยนสี 22.3 และ 15.6 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ โดยเริ่มเปลี่ยนสีชัดเจนที่ความเข้มข้นประมาณ 20.31 และ 21.63 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ

จากการศึกษาที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมโดยไม่ปรับค่าพีเอช (pH7) เกิดการเปลี่ยนสีน้อยมากเนื่องจากวัสดุเชิงประกอบดังกล่าวมีความเสถียรสูง คงทนต่อการเปลี่ยนสี และเพื่อให้การศึกษามีความชัดเจนมากขึ้น ผู้วิจัยจึงเตรียมวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(TCDA)/Zn²⁺/SiO₂ โดยใช้ TCDA เป็นมอนอเมอร์ตั้งต้นในการเตรียม เนื่องจากมีสายแอลคิลที่สั้นกว่า PCDA ส่งผลให้การเปลี่ยนสีเกิดที่อุณหภูมิต่ำกว่า PCDA และมีความไวต่อความเป็นกรด-เบสมากกว่า

นอกจากนี้จากการศึกษาพบว่าวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(TCDA)/Zn²⁺/SiO₂ เกิดการเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีน้ำเงินอมม่วงชัดเจน เมื่อมีปริมาณความเข้มข้นของกรดซาลิซิลิกที่เติมในสารแขวนลอยประมาณ 21.63 มิลลิโมลาร์ ดังรูปที่ 4.27 (ก) จากการศึกษาสเปกตรากการดูดกลืนแสงพบว่าความเข้มของการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตร

ลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อเติมกรดซาลิซิลิกลงไปจนกระทั่งความเข้มข้นของกรดซาลิซิลิกในสารแขวนลอยมีประมาณ 22.05 มิลลิโมลาร์ พบว่าวัสดุดังกล่าวมีการเปลี่ยนสีไป 25.3 เปอร์เซ็นต์ (ที่ 25.3%CR) และจากการเปรียบเทียบกับ วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ พบว่ามีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีเพียง 9 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น ที่ความเข้มข้นของกรดซาลิซิลิกเท่ากัน ดังรูปที่ 4.27 (ค)



รูปที่ 4.27 (ก) ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมของการตอบสนองโดยเปลี่ยนสี (ข) สเปกตรากการดูดกลืนแสง และ(ค) เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสี (%CR) ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(TCDA)/Zn²⁺/SiO₂

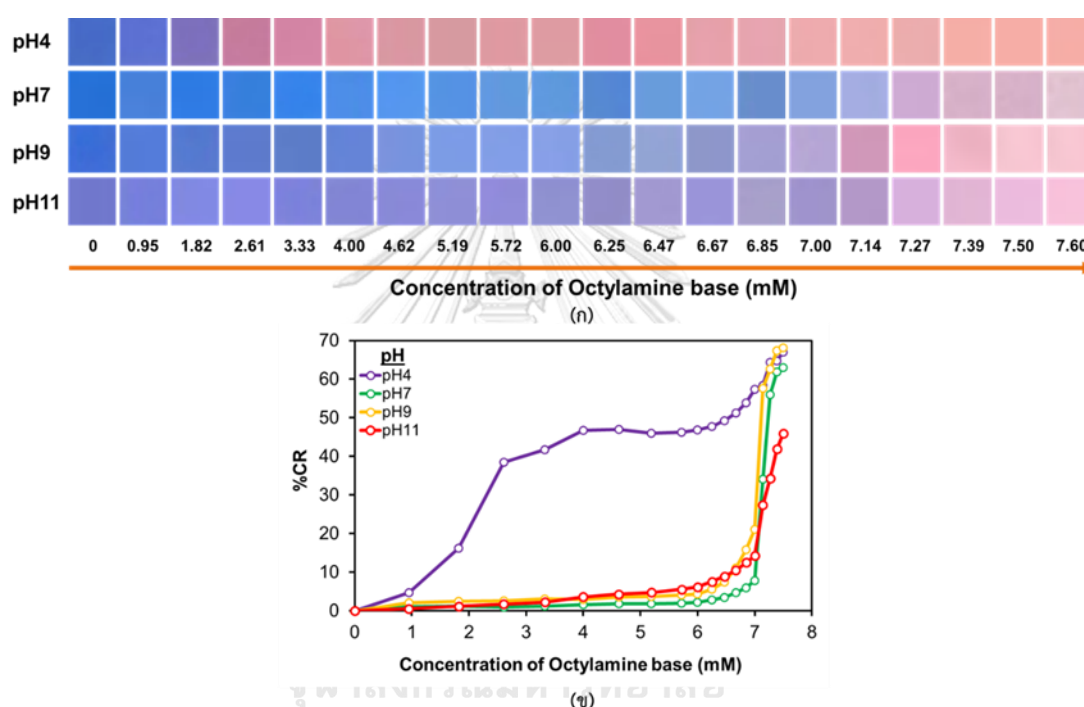
ส่วนที่ 2 การตอบสนองต่อออกทิลเอมีน (Octylamine base)

จากรูปที่ 4.28 (ก) แสดงภาพพฤติกรรมของการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อการเติมออกทิลเอมีน และรูปที่ 4.29 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงต่อการเติมออกทิลเอมีนในระบบสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมได้ในช่วง pH4 pH7 pH9 และ pH11 ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีความแตกต่างของการเปลี่ยนสีอย่างสิ้นเชิงเมื่อเทียบกับการเติมกรดซาลิซิลิกลงไปในระบบที่แทบไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงของสี จากการพิจารณาสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมได้ในช่วง pH4 พบว่าเริ่มต้นสารแขวนลอยมีสีน้ำเงินที่สังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่าและมีการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 645 นาโนเมตร ดังรูป 4.29 (ก) เมื่อเติมออกทิลเอมีน ความเข้มข้น 20 มิลลิโมลาร์ เข้าไปในระบบเพิ่มขึ้น พบว่าค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นดังกล่าวลดลงในขณะที่ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 535 นาโนเมตร ซึ่งเป็นเฟสสีแดงเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อในระบบของ

สารแขวนลอยมีปริมาณความเข้มข้นของออกทิลเอมีนเท่ากับ 2.61 มิลลิโมลาร์ โดยสีของสารแขวนลอยดังกล่าวเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงอย่างเห็นได้ชัดเจน และจากการวิเคราะห์จากเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีในช่วงความเข้มข้นดังกล่าว ดังรูป 4.28 (ข) พบว่าสารแขวนลอยเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงไป 38.5 เปอร์เซ็นต์หรือที่ 38.5%CR ซึ่งถือได้ว่าการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยที่เตรียมได้ที่ pH4 เกิดขึ้นง่ายกว่าสารแขวนลอยที่เตรียมได้ในช่วงพีเอชอื่น ๆ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงค่าการดูดกลืนแสงพบว่าที่ปริมาณความเข้มข้นของออกทิลเอมีนในสารแขวนลอย 2.61 มิลลิโมลาร์ มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 535 นาโนเมตร ในขณะที่เติมออกทิลเอมีนเพิ่มเข้าไปในระบบมากขึ้นพบว่าค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตรลดลงอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 535 นาโนเมตรก็เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเช่นกัน ส่งผลให้สารแขวนลอยดังกล่าวเห็นเป็นสีแดงชัดเจนขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อปริมาณความเข้มข้นของออกทิลเอมีนเท่ากับ 7.60 มิลลิโมลาร์ จะเห็นได้ว่าไม่มียอดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตรหลงเหลืออยู่เลย แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนสีดังกล่าวไม่มีเฟสสีน้ำเงินเหลืออยู่โดยจากการพิจารณาค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีที่ความเข้มข้นช่วงนี้พบว่าสารแขวนลอยดังกล่าวเกิดการเปลี่ยนสีไปประมาณ 67 เปอร์เซ็นต์ (ที่ 67%CR)

สำหรับสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมได้ในช่วง pH7 หรือไม่มีการปรับค่าพีเอช พบว่าตอนเริ่มต้นสารแขวนลอยดังกล่าวมีสีน้ำเงินและมีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตร ดังรูปที่ 4.29 (ข) และพบว่าเมื่อทำการเติมออกทิลเอมีนลงไปในระบบเพิ่มมากขึ้นค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นดังกล่าวจะค่อย ๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องในช่วงความเข้มข้นประมาณ 0.95 ถึง 7.00 มิลลิโมลาร์ โดยการเปลี่ยนสีที่เกิดขึ้นช่วงนี้ยังไม่ชัดเจนหรืออาจจะกล่าวได้ว่ามีสีน้ำเงินอมม่วง เมื่อเติมออกทิลเอมีนเพิ่มเข้าไปในระบบจนมีความเข้มข้นประมาณ 7.14 มิลลิโมลาร์ พบว่าสารแขวนลอยดังกล่าวมีเฟสสีแดงที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตรปรากฏเพิ่มขึ้น แต่ยังคงมีความเข้มของการดูดกลืนแสงน้อยกว่าความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร ส่งผลให้สารแขวนลอยในช่วงความเข้มข้นที่กล่าวนี้มีลักษณะเป็นสีม่วงที่เห็นได้ชัดเจน จนกระทั่งที่ความเข้มข้นประมาณ 7.27 มิลลิโมลาร์ พบว่าสารแขวนลอยดังกล่าวเปลี่ยนสีจากสีม่วงเป็นสีแดงโดยมีค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร สูงกว่า 640 นาโนเมตรอย่างชัดเจน และจากการพิจารณาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีในช่วงความเข้มข้นนี้พบว่าการเปลี่ยนสีไป 55.99 เปอร์เซ็นต์หรือที่ 55.99%CR และเมื่อเติมออกทิลเอมีนลงไปในระบบเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งมีความเข้มข้น 7.50 มิลลิโมลาร์ จะเห็นได้ว่าสารแขวนลอยดังกล่าวมีสีแดงชัดเจนและมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีไปจากตอนเริ่มต้น 63 เปอร์เซ็นต์ แต่อย่างไรก็ตามพบว่าการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อเบสอินทรีย์ของสารแขวนลอยที่เตรียมได้ในช่วง pH7 ดังกล่าว ต้องใช้ความเข้มข้นที่

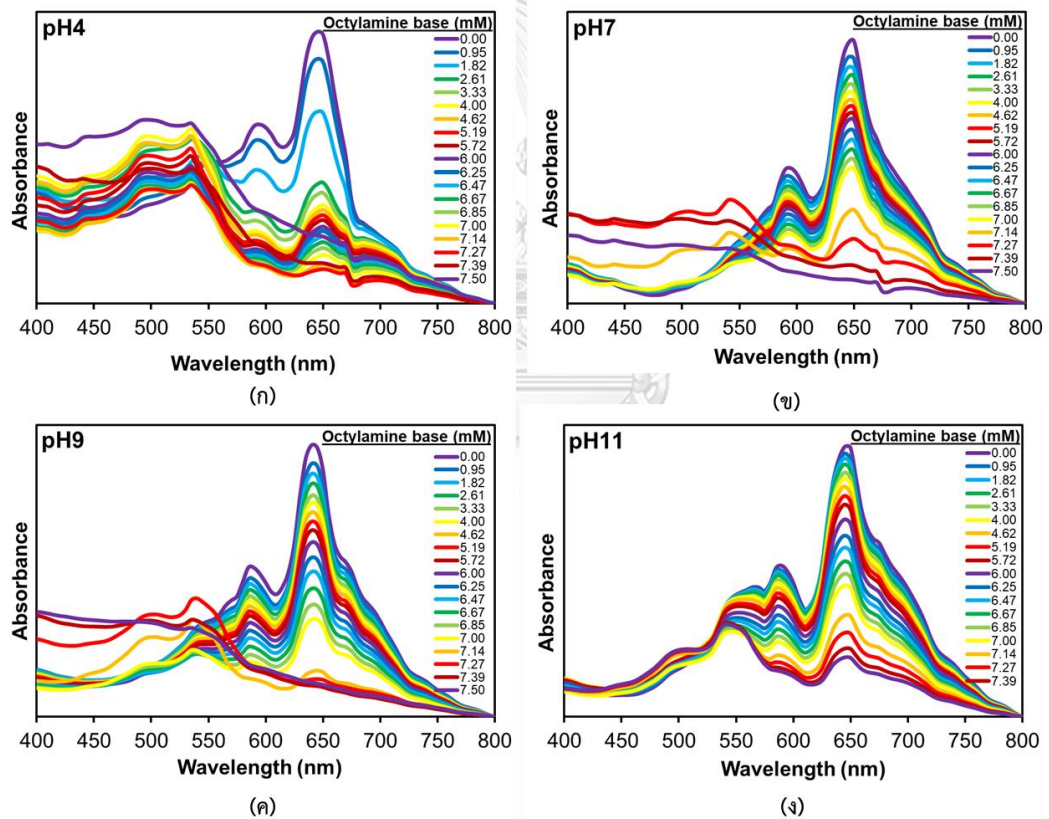
สูงกว่าสารแขวนลอยที่เตรียมได้ที่ pH4 ในการทำให้เกิดการเปลี่ยนสี นอกจากนี้จากรูปที่ 4.29 (ค) จะเห็นได้ว่าวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมได้ในช่วง pH9 มีช่วงการเปลี่ยนสีที่ใกล้เคียงกับวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ในช่วง pH7 โดยเริ่มเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงอมชมพูที่ความเข้มข้นประมาณ 7.14 นาโนเมตร และเกิดการเปลี่ยนสีเป็นสีแดงชัดเจนที่ความเข้มข้นประมาณ 7.27 มิลลิโมลาร์ โดยค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดปรากฏที่ความยาวคลื่นประมาณ 535 นาโนเมตร และมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีไป 62.57 เปอร์เซ็นต์ (ที่ 62.57%CR) และเมื่อเติมออกทิลเอมีนเพิ่มมากขึ้นจนถึง 7.50 มิลลิโมลาร์พบว่าการเปลี่ยนสีไป 68.09 เปอร์เซ็นต์



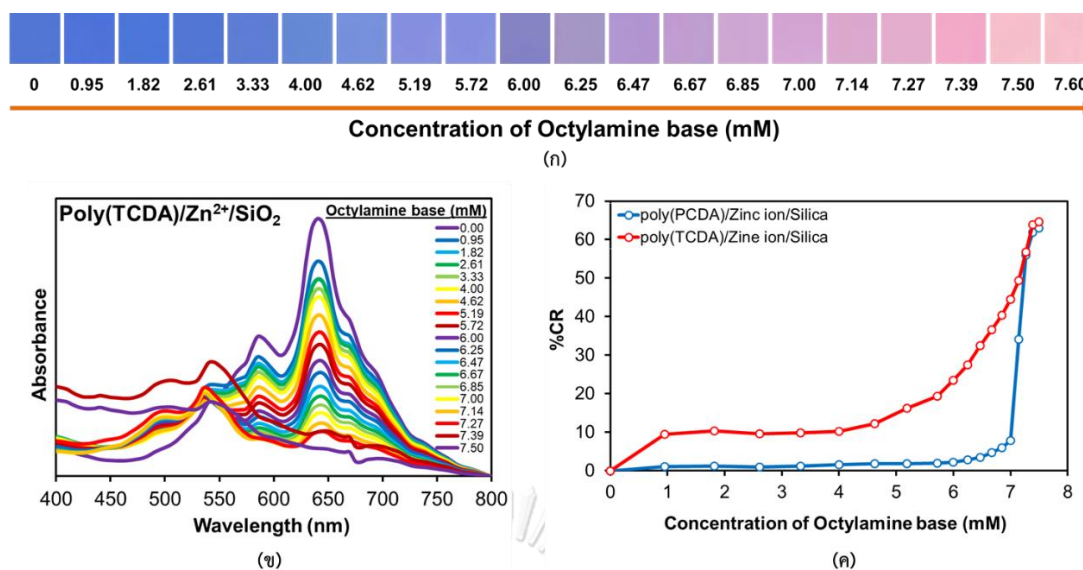
รูปที่ 4.28 (ก) ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมกรรมการตอบสนองโดยเปลี่ยนสีและ (ข) เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสี (%CR) ของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่พีเอชต่าง ๆ เมื่อมีการเติมออกทิลเอมีนที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน

ในขณะที่วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมได้ในช่วง pH11 พบว่าการเปลี่ยนสีที่ความเข้มข้นเดียวกับ pH7 และ pH9 นั่นคือเริ่มเปลี่ยนที่ความเข้มข้น 7.14 มิลลิโมลาร์ แต่เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีพบว่าในช่วงความเข้มข้นเดียวกันนี้มีการเปลี่ยนสีน้อยกว่าสารแขวนลอยที่เตรียมได้ในช่วงพีเอชอื่น ซึ่งมีค่าเท่ากับ 27.37 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อออกทิลเอมีนในระบบมีความเข้มข้นถึง 7.50 มิลลิโมลาร์พบว่าการเปลี่ยนสีไป 45.87 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจากผลการศึกษาที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมได้ในช่วง pH7 pH9 และ pH11 มีพฤติกรรมกรรมการตอบสนองโดย

การเปลี่ยนสีต่อออกทิลเอมีนในช่วงความเข้มข้นที่ใกล้เคียงกัน และจะเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงิน เป็นสีม่วงอมชมพูเมื่อสังเกตุด้วยตาเปล่า ในขณะที่วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมได้ในช่วง pH4 โดยในสภาวะนี้มีความเป็นกรดที่สูงมาก พบว่าเกิดการเปลี่ยนสีได้เร็วกว่าในช่วงพีเอชอื่น ๆ เนื่องจากช่วง pH4 จะทำให้อนุภาคนาโนซิลิกาที่เป็น ส่วนประกอบของวัสดุเชิงประกอบดังกล่าวเกิดการละลาย (dissove) ไปบางส่วนถึงแม้ว่าอนุภาคนาโนซิลิกาจะมีความทนกรดสูงก็ตาม ส่งผลให้การจัดเรียงตัวของโครงสร้างภายในมีความไม่เป็นระเบียบเกิดขึ้น และเมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยกรด-เบส เพิ่มเข้าไปอีกทำให้โครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบถูกรบกวนและเกิดการบิดตัวโครงสร้างได้ง่ายขึ้นกว่าสารแขวนลอยที่เตรียมได้ในช่วงพีเอชอื่น ๆ ส่งผลให้ตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีได้ง่ายขึ้น แม้ว่าปริมาณกรด-เบส ที่เติมลงไปมีความเข้มข้นไม่มากก็ตาม



รูปที่ 4.29 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่พีเอชต่าง ๆ เมื่อมีการเติมออกทิลเอมีนที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน



รูปที่ 4.30 (ก) ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมของการตอบสนองโดยเปลี่ยนสี (ข) สเปกตรากการดูดกลืนแสง และ(ค) เปอร์เซนต์การเปลี่ยนสี (%CR) ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(TCDA)/Zn²⁺/SiO₂

นอกจากนั้นแล้วในการศึกษานี้ได้มีการเปลี่ยนมอนอเมอร์ตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรจาก PCDA เป็น TCDA กลายเป็นวัสดุเชิงประกอบชนิดใหม่ที่มีพฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อออกทิลเอมีนในช่วงความเข้มข้นที่แตกต่างไปจากเดิม เนื่องจาก TCDA เป็นมอนอเมอร์ที่มีสายโซ่สั้นทำให้เกิดการเปลี่ยนสีได้ที่ความเข้มข้นของเบสต่ำกว่า PCDA ที่มีสายโซ่ยาวกว่า และจากการศึกษาพบว่าเมื่อเติมออกทิลเอมีนเข้าไปในระบบสารแขวนลอยดังกล่าวดังรูปที่ 4.30 (ข) ค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร จะลดลงเรื่อย ๆ และลดลงชัดเจนเมื่อความเข้มข้นของออกทิลเอมีนในระบบเท่ากับ 6.67 มิลลิโมลาร์ โดยช่วงความเข้มข้นนี้จะปรากฏค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร ขึ้นมาและมียอดการดูดกลืนแสงสูงกว่าความยาวคลื่นในช่วง 640 นาโนเมตร ส่งผลให้สารแขวนลอยมีสีแดงเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า ดังรูปที่ 4.30 (ก) จากการศึกษาจะเห็นได้ว่า poly(TCDA)/Zn²⁺/SiO₂ เกิดการเปลี่ยนสีได้ง่ายกว่า poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ จากการพิจารณาเปอร์เซนต์การเปลี่ยนสีดังรูปที่ 4.30 (ค) โดยที่ความเข้มข้นของออกทิลเอมีนในระบบเท่ากันคือ 6.47 มิลลิโมลาร์ พบว่า poly(TCDA)/Zn²⁺/SiO₂ เปลี่ยนสีไป 36.58 เปอร์เซนต์ ในขณะที่ poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ เปลี่ยนสีไปแค่ 4.67 เปอร์เซนต์

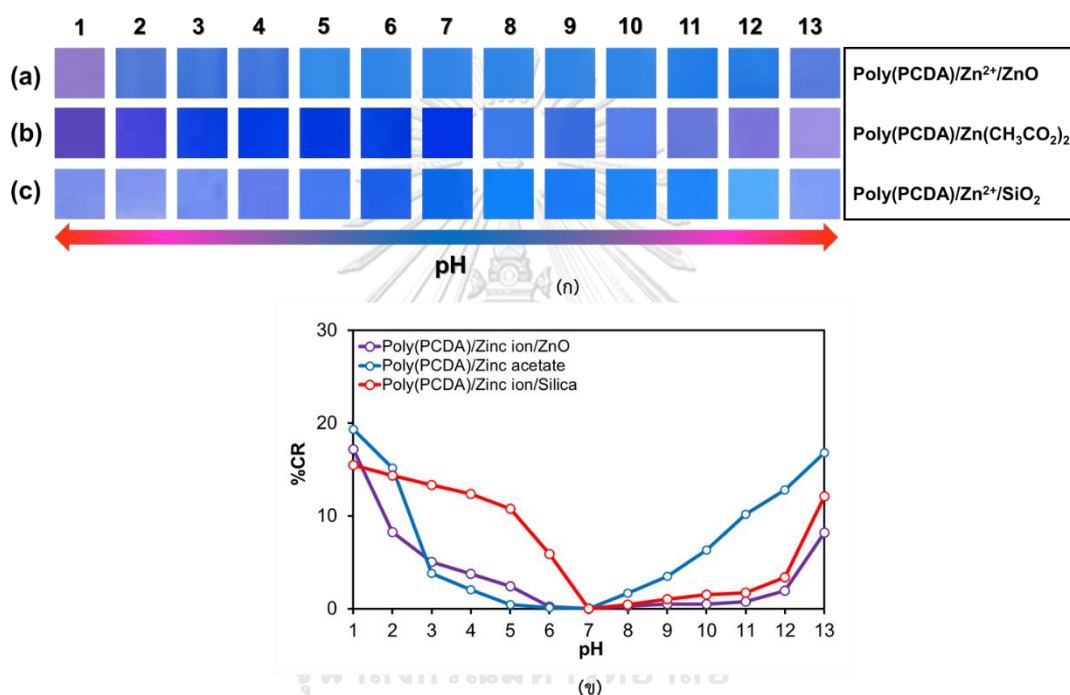
4.5 การศึกษาและเปรียบเทียบพฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรชนิดต่าง ๆ ต่อกรดและเบส

4.5.1 พฤติกรรมการเปลี่ยนสีต่อกรดและเบส

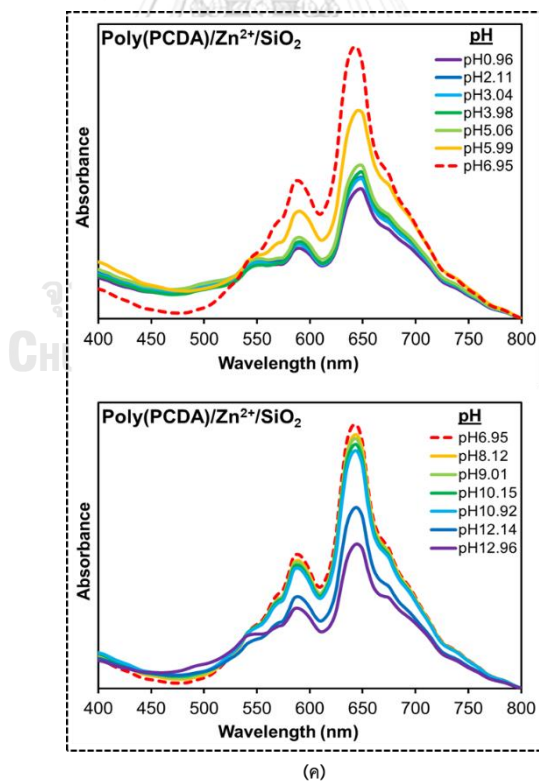
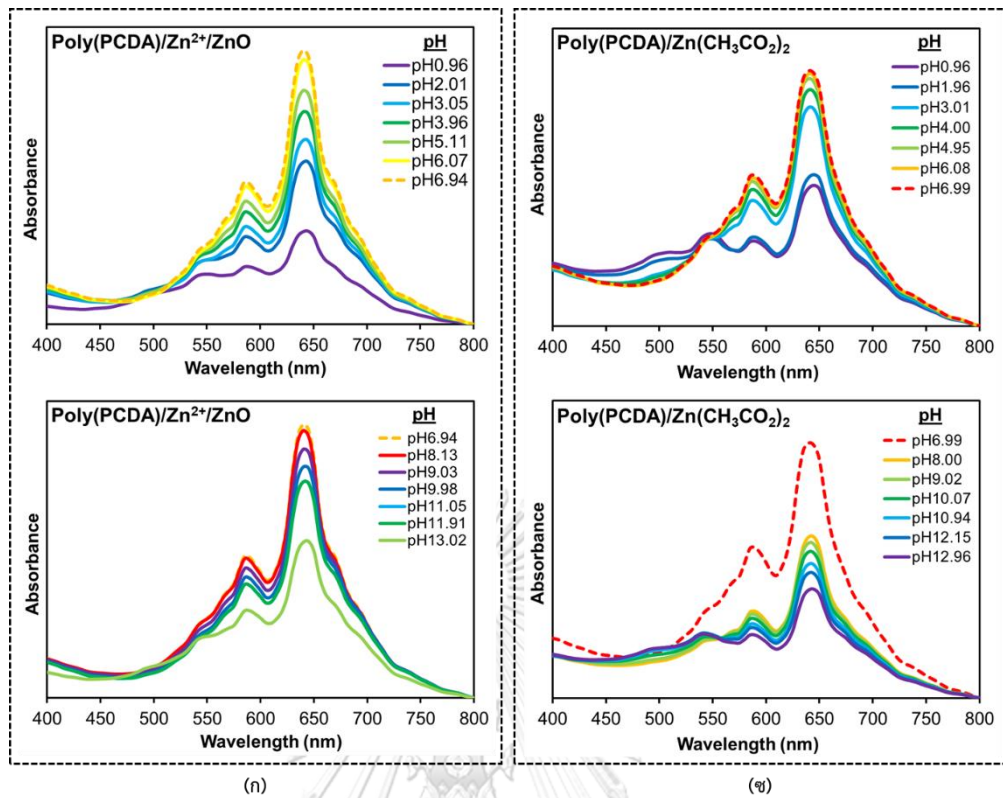
การศึกษาในหัวข้อนี้จะทำการเปลี่ยนมอนอเมอร์ตั้งต้นและโลหะออกไซด์บางตัวที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ โดยเตรียมในสภาวะปกติที่ไม่มีการปรับเปลี่ยนพีเอช เพื่อศึกษาผลของซิงก์(II)ไอออนและอนุภาคนาโนซิลิกาซึ่งมีผลต่อพฤติกรรมการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบดังกล่าวต่อกรดและเบส โดยในการศึกษานี้จะใช้กรดไฮโดรคลอริก (HCL) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH₄OH) ในการปรับเปลี่ยนค่าพีเอชให้สารแขวนลอยมีพีเอชอยู่ในช่วง pH1 ถึง pH13 เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของสีในช่วงพีเอชดังกล่าว

สำหรับวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมโดยใช้ PCDA เป็นมอนอเมอร์ตั้งต้น เมื่อนำวัสดุชนิดต่าง ๆ ได้แก่ poly(PCDA)/Zn²⁺/ZnO, poly(PCDA)/Zn(CH₃CO₂)₂ และ poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ไปศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีพบว่าช่วงการเปลี่ยนสีของวัสดุดังกล่าวอยู่ในช่วงพีเอชที่ใกล้เคียงกัน นั่นคือในช่วงพีเอชประมาณ pH1 และ pH13 ซึ่งวัสดุเชิงประกอบดังกล่าวจะมีการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีน้ำเงินอมม่วง ดังรูปที่ 4.31 (ก) และจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนสีที่ช่วงดังกล่าวก็ไม่ได้เกิดการเปลี่ยนสีอย่างชัดเจนเนื่องจาก PCDA มีความเสถียรต่อการเปลี่ยนสีสูงมากส่งผลให้กรดและเบสที่เติมลงไปแม้จะมีปริมาณความเข้มข้นที่สูงก็ตาม ยังไม่สามารถทำให้วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมโดยใช้ PCDA เป็นมอนอเมอร์ตั้งต้นเกิดการเปลี่ยนสีอย่างชัดเจนได้ และจากการพิจารณาสเปกตรากการดูดกลืนแสงของวัสดุทั้ง 3 ชนิดที่เตรียมได้ ดังรูปที่ 4.32 (ก) ถึง (ค) พบว่าค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้นอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตร เมื่อเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้าไปในระบบเพื่อให้มีค่าพีเอชต่ำลงหรือมีความเป็นกรดสูง หรือเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้าไปในระบบเพื่อให้มีพีเอชหรือมีความเป็นเบสสูงขึ้น พบว่าสเปกตรากการดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร จะค่อย ๆ ลดลง โดยที่ค่าความยาวคลื่นประมาณ 540 จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเช่นกัน ส่งผลให้สารแขวนลอยชนิดต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้น ค่อย ๆ เปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีน้ำเงินอมม่วง และเมื่อปรับสภาวะของสารแขวนลอยให้เป็น pH1 และ pH13 พบว่าค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตร จะปรากฏชัดเพิ่มขึ้นแต่ก็ยังมีค่าต่ำกว่าความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร มากทำให้แทบจะไม่เห็นการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยเลย และเมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยที่ช่วง pH1 และ pH13 พบว่าการเปลี่ยนสีทั้งสองช่วงพีเอชมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีไม่ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.31 (ข)

จากการศึกษาข้างต้นจะเห็นได้ว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมโดยใช้ PCDA เป็นมอนอเมอร์ดังกล่าว เมื่อนำมาศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีต่อกรดและเบส พบว่ายังไม่เห็นความแตกต่างในการเปลี่ยนสีเนื่องจาก PCDA มีสายโซ่ยาวทำให้เกิดการเปลี่ยนสีได้ยาก ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้มีการเตรียมวัสดุเชิงประกอบชนิดต่าง ๆ โดยเลือกใช้ TCDA ที่มีสายโซ่สั้นกว่าเป็นมอนอเมอร์ตั้งต้นในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ เนื่องจากการเลือกใช้มอนอเมอร์ดังกล่าวจะทำให้เกิดการเปลี่ยนสีที่ชัดเจนกว่าส่งผลให้สามารถศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนสีที่มีความแตกต่างของวัสดุเชิงประกอบแต่ละชนิดได้ง่ายขึ้น



รูปที่ 4.31 (ก) ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการตอบสนองโดยเปลี่ยนสีและ (ข) กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสี (%CR) ของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรชนิดต่าง ๆ โดยใช้ PCDA เป็นมอนอเมอร์

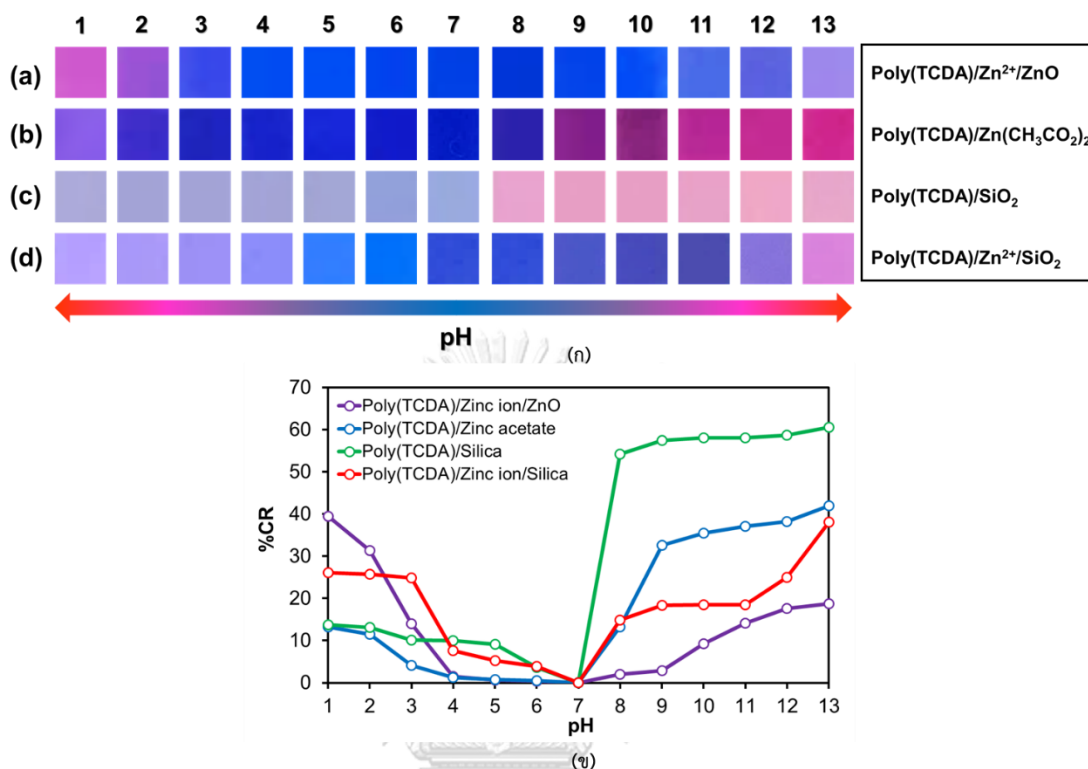


รูปที่ 4.32 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรชนิดต่าง ๆ โดยใช้ PCDA เป็นมอนอเมอร์

การศึกษานี้จะมีการเตรียมวัสดุเชิงประกอบโดยใช้ TCDA เป็นมอนอเมอร์ตั้งต้น ได้แก่ วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(TCDA)/Zn²⁺/ZnO, poly(TCDA)/Zn(CH₃CO₂)₂, poly(TCDA)/SiO₂ และ poly(TCDA)/Zn²⁺/SiO₂ จากผลการศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีได้ผลดังรูปที่ 4.33 (ก) แสดงภาพการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบชนิดดังกล่าว โดยจากการศึกษาที่ผ่านมาและได้ทำการยืนยันผลการศึกษาในการทดลองนี้พบว่า poly(TCDA)/Zn²⁺/ZnO ที่เตรียมได้ในสถานะที่ไม่มีการปรับค่าพีเอช เมื่อเติมกรดไฮโดรคลอริกจนสารละลายมีค่าพีเอช ประมาณ 2.01 สารแขวนลอยดังกล่าวเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงอมฟ้าชัดเจนและจากรูปที่ 4.34 (ก) จะเห็นได้ว่าสเปกตรากการดูดกลืนแสงสูงสุดจะอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 545 นาโนเมตร ซึ่งมีความสูงของยอดใกล้เคียงกับความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตร ส่งผลให้สีที่เปลี่ยนได้ในช่วงดังกล่าวยังคงมีเฟสสีน้ำเงินปนอยู่ แต่เมื่อมีค่าพีเอชประมาณ 1.12 พบว่าสเปกตรากการดูดกลืนแสงสูงสุดจะอยู่ที่ความยาวคลื่น 545 นาโนเมตร ซึ่งสูงกว่าความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร ทำให้สารแขวนลอยปรากฏเป็นสีม่วงอมชมพู และจากรูปที่ 4.33 (ข) จะเห็นได้ว่ามีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีในช่วงพีเอช 1.12 ไป 39.48 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการเปลี่ยนสีในช่วงเบสพบว่าต้องเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไปปริมาณมากจนสารแขวนลอยมีค่าพีเอชประมาณ 11.99 ถึง 13.01 จึงจะทำให้ปรากฏค่าการดูดกลืนแสงในช่วง 540 นาโนเมตรขึ้นมาแต่ยอดการดูดกลืนแสงดังกล่าวยังมีค่าน้อยกว่าช่วงความยาวคลื่น 640 นาโนเมตรมาก ส่งผลให้สารแขวนลอยเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีน้ำเงินอมม่วงที่มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีไป 18.76 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น

ในขณะที่วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(TCDA)/Zn(CH₃CO₂)₂ เริ่มเกิดการเปลี่ยนสีในช่วงกรดที่พีเอชประมาณ 0.98 โดยในช่วงนี้จะเห็นสารแขวนลอยเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงอมฟ้า ดังรูปที่ 4.33 (ก) โดยค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตร เช่นเดิม แต่ในช่วงพีเอชนี้มีค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 545 นาโนเมตรเกิดขึ้นด้วยซึ่งความสูงของยอดการดูดกลืนแสงมีค่าใกล้เคียงกัน ส่งผลให้มองเห็นสารแขวนลอยเป็นสีม่วงอมฟ้าเนื่องจากมีเฟสสีแดงเพิ่มขึ้นมาด้วย ดังรูปที่ 4.34 (ข) ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีที่พิจารณาได้ดังรูปที่ 4.33 (ข) พบว่ามีการเปลี่ยนสีไป 13.27 เปอร์เซ็นต์ (ที่ 13.27%CR) ในขณะเดียวกันเมื่อเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1 โมลาร์ เพื่อปรับค่าพีเอชของสารแขวนลอยให้สูงขึ้นหรือมีความเป็นเบสมากขึ้นพบว่าที่ pH7.97 สารแขวนลอยดังกล่าวเริ่มเกิดการเปลี่ยนสีขึ้นจากสีน้ำเงินเป็นสีน้ำเงินอมม่วง และเปลี่ยนสีชัดเจนขึ้นเมื่อมีพีเอชเป็น 9.03 โดยเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.33 (ก) จะเห็นสารแขวนลอยมีสีม่วงอมชมพู โดยปรากฏยอดการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 545 นาโนเมตรและมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีไป 32.54 เปอร์เซ็นต์ (ที่ 32.54%CR) นอกจากนี้เมื่อปรับค่าพีเอชเพิ่มขึ้นไปเรื่อย ๆ จนถึงพีเอชประมาณ 12.92 พบว่าสารแขวนลอยมีสีม่วงอมชมพูมาก

ขึ้น โดยค่าความยาวคลื่นสูงสุดจะคงที่อยู่ที่ค่า 545 นาโนเมตร ซึ่งเป็นค่าการดูดกลืนแสงของเฟสสีแดง และพบว่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีสูงขึ้นถึง 41.99 เปอร์เซ็นต์



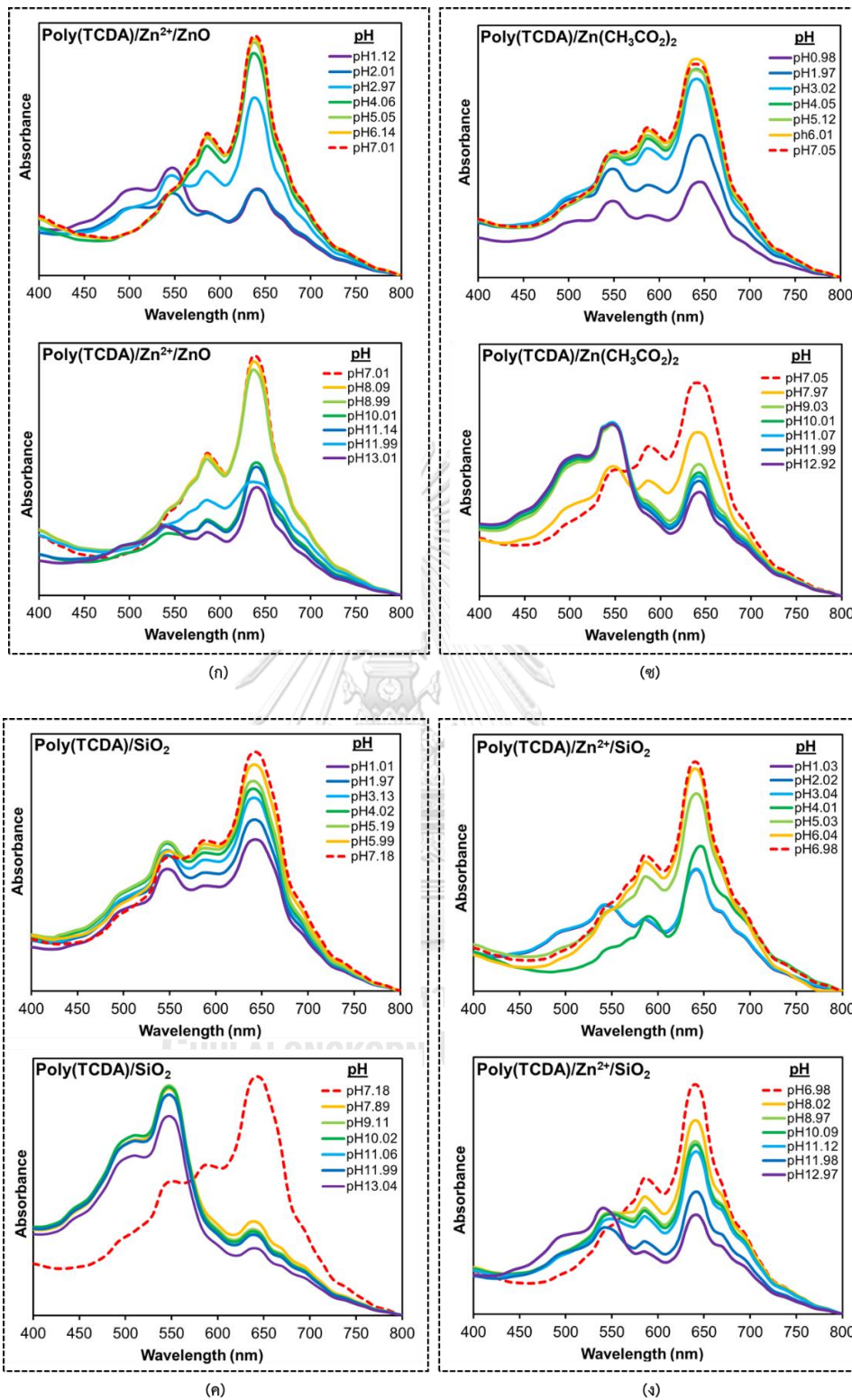
รูปที่ 4.33 (ก) ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมของการตอบสนองโดยเปลี่ยนสีและ (ข) กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสี (%CR) ของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรชนิดต่าง ๆ โดยใช้ TCDA เป็นมอนอเมอร์

สำหรับวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(TCDA)/SiO₂ เมื่อปรับค่าพีเอชให้อยู่ในสถานะกรดที่พีเอชประมาณ 4.06 จะมีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 545 นาโนเมตรปรากฏสูงขึ้น ทำให้สารแขวนลอยในช่วงพีเอชนี้มีสีน้ำเงินอมม่วงที่ค่อย ๆ ปรากฏชัดเจนขึ้นเมื่อค่าพีเอชลดต่ำลง จนถึงค่าพีเอชประมาณ 1.01 พบว่าค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 545 นาโนเมตรมีค่าใกล้เคียงกับความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตร ดังรูปที่ 4.34 (ค) แต่ยังคงมีความเข้มต่ำกว่า ส่งผลให้สีของสารแขวนลอยที่ปรากฏยังคงมีเฟสสีน้ำเงินหลงเหลืออยู่ ดังรูปที่ 4.33 (ก) และมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีไป 13.75 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อปรับค่าพีเอชโดยเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไปเพื่อให้ค่าพีเอชสูงขึ้นพบว่าสารแขวนลอยดังกล่าวเริ่มเกิดการเปลี่ยนสีเมื่อค่าพีเอชประมาณ 7.89 โดยมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 545 นาโนเมตร โดยแทบจะไม่มีเฟสสีน้ำเงินหลงเหลืออยู่เลย ดังรูปที่ 4.34 (ค) ทำให้สารแขวนลอยเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงชัดเจน และมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีไป 54.2 เปอร์เซ็นต์และเมื่อพีเอชเพิ่มสูงขึ้นจนถึง 13.04

ยอดการดูดกลืนแสงสูงสุดจะคงที่อยู่ที่ 545 นาโนเมตร และมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีไป 60.54 เปอร์เซ็นต์

ดังนั้นเมื่อเตรียมวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(TCDA)/SiO₂ โดยมีการเติมซิงค์(II)ไอออน ที่มีแหล่งกำเนิดมาจากซิงค์อะซีเตตลงไป จนกลายเป็นวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(TCDA)/Zn²⁺/SiO₂ โดยในสภาวะกรดพบว่าวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(TCDA)/Zn²⁺/SiO₂ เกิดการเปลี่ยนสีที่พีเอชประมาณ 3.04 ในขณะที่วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/ZnO และ poly(TCDA)/Zn²⁺/ZnO เริ่มเกิดการเปลี่ยนสีที่ค่าพีเอชประมาณ 0.96 และ 2.01 ตามลำดับ โดยเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีน้ำเงินอมม่วง ดังรูปที่ 4.31 (ก) และ 4.33 (ก) ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับ poly(TCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ดังรูปที่ 4.33 (ก) จะเห็นได้ว่าสารแขวนลอยดังกล่าวมีพฤติกรรมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีที่ช่วงพีเอชสูงกว่า poly(PCDA)/Zn²⁺/ZnO และ poly(TCDA)/Zn²⁺/ZnO และจากการพิจารณาสเปกตรากการดูดกลืนแสง ดังรูปที่ 4.34 (ง) พบว่าที่ค่าพีเอชดังกล่าวปรากฏยอดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 545 นาโนเมตร โดยเพิ่มขึ้นมาอย่างชัดเจนแต่ยังคงต่ำกว่าค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร ทำให้สีของสารแขวนลอยยังคงมีเฟสสีน้ำเงินปนอยู่ และจากการพิจารณาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีพบว่าเมื่อค่าพีเอชต่ำลงจนถึง 1.03 มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีไป 26.1 เปอร์เซ็นต์

นอกจากนั้นเมื่อเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไปในระบบพบว่าสารแขวนลอยดังกล่าวเริ่มเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงอมฟ้าที่พีเอชประมาณ 11.98 โดยมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีไป 24.97 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อค่าพีเอชเพิ่มมากขึ้นจนถึง 12.97 พบว่ามีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีไป 38.11 เปอร์เซ็นต์หรือที่ 38.11%CR ส่งผลให้สารแขวนลอยที่สังเกตเห็นเปลี่ยนจากสีม่วงอมฟ้าเป็นสีม่วงอมชมพูชัดเจน โดยมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตรสูงกว่าความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตรเล็กน้อย ในขณะที่วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/ZnO และ poly(TCDA)/Zn²⁺/ZnO เกิดการเปลี่ยนสีที่พีเอช 13.02 และ 11.99 ตามลำดับ ดังนั้นแล้วจะเห็นได้ว่าการเติมอนุภาคซิลิกาและซิงค์(II)ไอออนมีผลต่อการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(TCDA)/Zn²⁺/SiO₂ โดยดูจากการที่สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(TCDA)/Zn²⁺/SiO₂ เปลี่ยนสีกับทั้งกรดและเบสชัดเจนกว่า poly(TCDA)/Zn(CH₃CO₂)₂ และ poly(TCDA)/SiO₂



รูปที่ 4.34 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรชนิดต่าง ๆ โดยใช้ TCDA เป็นมอนอเมอร์

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ โดยการปรับเปลี่ยนค่าพีเอชและศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีเมื่อถูกรบกวนจากสิ่งกระตุ้นภายนอก ได้แก่ อุณหภูมิ กรดและเบสอินทรีย์ และการปรับเปลี่ยนค่าพีเอช ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1.1 พฤติกรรมการตอบสนองการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ สามารถเตรียมได้ตั้งแต่ pH4 ถึง pH11 โดยวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จะปรากฏเป็นสีน้ำเงินหลังจากการฉายแสงยูวีและพบว่าค่าพีเอชที่ใช้ในการเตรียมสูงขึ้นหรือมีความเป็นเบสมากขึ้นจะทำให้ปริมาณการเกิดวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรมากขึ้น สังเกตจากสีน้ำเงินที่เข้มข้น โดยมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตร และเมื่อศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิพบว่าวัสดุเชิงประกอบดังกล่าวจะเริ่มเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงอมน้ำเงินในช่วงอุณหภูมิเดียวกันคือ 80 องศาเซลเซียส และจะเปลี่ยนเป็นสีม่วงอมชมพูเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นมีค่าเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรที่เตรียมได้ที่ pH4 ถึง pH11 สามารถเกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้ (reversible thermochromism) เมื่อลดอุณหภูมิลงมาเท่ากับอุณหภูมิตอนเริ่มต้นของสาร ในขณะที่วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ที่ pH3 และ pH12 จะเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่านั้นคือ 50 องศาเซลเซียส โดยเกิดการเปลี่ยนสีแบบไม่ผันกลับ (irreversible thermochromism) นอกจากนี้เมื่อนำวัสดุเชิงประกอบดังกล่าวไปเตรียมเป็นฟิล์มวัสดุเชิงประกอบเพื่อใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิสูงขึ้นและจากการศึกษาพบว่าวัสดุเชิงประกอบเริ่มเปลี่ยนสีตั้งแต่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสและเกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้จนถึงอุณหภูมิประมาณ 170 องศาเซลเซียส จากการศึกษาเพื่อหาข้อสรุปเกี่ยวกับพฤติกรรมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ว่ามีผลมาจากองค์ประกอบใด ทำให้ได้ข้อสรุปว่าในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรระหว่างพีดีเอและซิลิกาเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้อย่างสมบูรณ์จำเป็นต้องมีทั้งอนุภาคนาโนซิลิกาและอนุภาคของซิงค์(II)ไอออนที่มีแหล่งกำเนิดมาจาก

ซิงก์อะซีเตต เนื่องจากถ้าขาดตัวใดตัวหนึ่งไปอาจจะทำให้วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้มีสมบัติการเปลี่ยนสีแบบผันกลับไม่ได้หรือผันกลับได้แบบไม่สมบูรณ์

5.1.2 พฤติกรรมการตอบสนองการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช

การศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อการปรับเปลี่ยนพีเอชของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมได้ที่ pH4 ถึง pH11 พบว่าวัสดุเชิงประกอบเกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับไม่ได้ (irreversible thermochromism) และเมื่อปรับค่าพีเอชของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรให้มีความเป็นเบสมากขึ้น พบว่าวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมที่ pH4 เกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงอมชมพูชัดเจนที่ค่าพีเอชประมาณ 6.11 โดยเกิดการเปลี่ยนสีได้ชัดเจนและเร็วกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ในพีเอชอื่น เนื่องจากที่สภาวะความเป็นกรดสูงจะทำให้อนุภาคนาโนซิลิกาเกิดการละลายไปบางส่วนทำให้การจัดเรียงตัวของโครงสร้างภายในเกิดความไม่เป็นระเบียบทำให้เกิดการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีได้เร็ว ในขณะที่ปรับค่าพีเอชให้ลดลงพบว่าวัสดุเชิงประกอบจะเริ่มเปลี่ยนสีที่ประมาณ pH1 เช่นเดียวกับวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ที่พีเอชอื่น สำหรับวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ที่เตรียมที่ pH สูงกว่า 4 พบว่าจะต้องปรับค่าพีเอชของวัสดุเชิงประกอบให้มีค่าประมาณ pH13 จึงจะเริ่มเห็นการเปลี่ยนสีชัดเจน นอกจากนั้นพบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนชนิดมอนอเมอร์ตั้งต้นเป็น TCDA เพื่อหาข้อสรุปเกี่ยวกับพฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบว่ามีผลมาจากองค์ประกอบใด จากการศึกษาพบว่าการเติมซิงก์(II)ไอออนร่วมกับอนุภาคนาโนซิลิกาทำให้วัสดุเชิงประกอบมีการตอบสนองต่อสภาวะความเป็นกรดและเบสที่แตกต่างไปจากการใช้องค์ประกอบใดองค์ประกอบหนึ่ง จึงสามารถสรุปได้ว่าพฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบเป็นผลมาจากทั้งซิงก์(II)ไอออนและอนุภาคนาโนซิลิกา

5.1.3 พฤติกรรมการตอบสนองการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ ต่อกรดและเบสอินทรีย์

จากการศึกษาพบว่าวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ สามารถเกิดการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีได้กับทั้งกรดและเบสอินทรีย์ โดยมีพฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อออกทิลเอมีน (octylamine) ได้ดีกว่ากรดซาลิซิลิก (salicylic acid) โดยวัสดุเชิงประกอบระดับที่เตรียมที่ pH4 เริ่มเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงอมชมพูเมื่อปริมาณความเข้มข้นของ

ออกทิลเอมีนที่เติมลงไปในระบบมีค่า 2.61 มิลลิโมลาร์ ซึ่งเกิดการเปลี่ยนสีได้เร็วกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ที่ pH7 pH9 และ pH11 ที่มีเริ่มเกิดการเปลี่ยนสีที่ความเข้มข้นประมาณ 7.27 มิลลิโมลาร์ และเมื่อเติมกรดซาลิซิลิกลงไปในระบบพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ตั้งแต่ pH4 ถึง pH11 เปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงอมฟ้าที่ความเข้มข้นสูงประมาณ 21.47 มิลลิโมลาร์

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาพฤติกรรม การตอบสนอง โดยการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ โดยการปรับเปลี่ยนค่าพีเอช พบว่ายังมีประเด็นที่สามารถนำไปศึกษาต่อเพิ่มเติมได้ดังนี้

1. ศึกษาในเชิงลึกถึงผลของปริมาณอนุภาคนาโนซิลิกาต่อความหนาของชั้น PCDA และความเป็นระเบียบของสายโซ่พอลิเมอร์
2. ศึกษาพฤติกรรม การตอบสนอง โดยการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ เมื่อได้รับการกระตุ้นจากตัวทำละลายอินทรีย์
3. ศึกษาพฤติกรรม การตอบสนอง โดยการเปลี่ยนสีของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/Zn²⁺/SiO₂ เมื่อได้รับการกระตุ้นจากสารลดแรงตึงผิว
4. ศึกษาการเตรียมและพฤติกรรม การตอบสนอง โดยการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบ PCDA กับอนุภาคนาโนของโลหะออกไซด์ชนิดอื่น เช่น เหล็กออกไซด์ เป็นต้น

บรรณานุกรม

1. Ahn, D. J.; Lee, S.; Kim, J. M., Rational design of conjugated polymer supramolecules with tunable colorimetric responses. *Advanced functional materials* 2009, 19 (10), 1483-1496.
2. Sun, X.; Chen, T.; Huang, S.; Li, L.; Peng, H., Chromatic polydiacetylene with novel sensitivity. *Chemical Society Reviews* 2010, 39 (11), 4244-4257.
3. Champaiboon, T.; Tumcharern, G.; Potisatityuenyong, A.; Wacharasindhu, S.; Sukwattanasinitt, M., A polydiacetylene multilayer film for naked eye detection of aromatic compounds. *Sensors and Actuators B: Chemical* 2009, 139 (2), 532-537.
4. Jelinek, R.; Ritenberg, M., Polydiacetylenes—recent molecular advances and applications. *RSC Advances* 2013, 3 (44), 21192-21201.
5. Kim, J. M.; Lee, Y. B.; Chae, S. K.; Ahn, D. J., Patterned color and fluorescent images with polydiacetylene supramolecules embedded in poly (vinyl alcohol) films. *Advanced Functional Materials* 2006, 16 (16), 2103-2109.
6. Chanakul, A.; Traiphol, N.; Traiphol, R., Controlling the reversible thermochromism of polydiacetylene/zinc oxide nanocomposites by varying alkyl chain length. *Journal of colloid and interface science* 2013, 389 (1), 106-114.
7. Pang, J.; Yang, L.; McCaughey, B. F.; Peng, H.; Ashbaugh, H. S.; Brinker, C. J.; Lu, Y., Thermochromatism and structural evolution of metastable polydiacetylenic crystals. *The Journal of Physical Chemistry B* 2006, 110 (14), 7221-7225.
8. Patlolla, A.; Zunino, J.; Frenkel, A. I.; Iqbal, Z., Thermochromism in polydiacetylene-metal oxide nanocomposites. *Journal of Materials Chemistry* 2012, 22 (14), 7028-7035.
9. Tanioku, C.; Matsukawa, K.; Matsumoto, A., Thermochromism and structural change in polydiacetylenes including carboxy and 4-carboxyphenyl groups as the intermolecular hydrogen bond linkages in the side chain. *ACS applied materials & interfaces* 2013, 5 (3), 940-948.
10. Traiphol, N.; Faisadcha, K.; Potai, R.; Traiphol, R., Fine tuning the color-transition temperature of thermoreversible polydiacetylene/zinc oxide

nanocomposites: the effect of photopolymerization time. *Journal of colloid and interface science* 2015, 439, 105-111.

11. Traiphol, N.; Rungruangviriya, N.; Potai, R.; Traiphol, R., Stable polydiacetylene/ZnO nanocomposites with two-steps reversible and irreversible thermochromism: The influence of strong surface anchoring. *Journal of colloid and interface science* 2011, 356 (2), 481-489.

12. Wacharasindhu, S.; Montha, S.; Boonyiseng, J.; Potisatityuenyong, A.; Phollookin, C.; Tumcharern, G.; Sukwattanasinitt, M., Tuning of thermochromic properties of polydiacetylene toward universal temperature sensing materials through amido hydrogen bonding. *Macromolecules* 2009, 43 (2), 716-724.

13. Wu, A.; Beck, C.; Ying, Y.; Federici, J.; Iqbal, Z., Thermochromism in polydiacetylene-ZnO nanocomposites. *The Journal of Physical Chemistry C* 2013, 117 (38), 19593-19600.

14. Kamphan, A.; Charoenthai, N.; Traiphol, R., Fine tuning the colorimetric response to thermal and chemical stimuli of polydiacetylene vesicles by using various alcohols as additives. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 2016, 489, 103-112.

15. Pires, A. C. S.; Soares, N. d. F. t. F.; da Silva, L. H. M.; da Silva, M. C. H.; Mageste, A. B.; Soares, R. F.; Teixeira, A. V.; Andrade, N. J., Thermodynamic study of colorimetric transitions in polydiacetylene vesicles induced by the solvent effect. *The Journal of Physical Chemistry B* 2010, 114 (42), 13365-13371.

16. Wu, A.; Gu, Y.; Tian, H.; Federici, J. F.; Iqbal, Z., Effect of alkyl chain length on chemical sensing of polydiacetylene and polydiacetylene/ZnO nanocomposites. *Colloid and Polymer Science* 2014, 292 (12), 3137-3146.

17. Chanakul, A.; Traiphol, N.; Faisadcha, K.; Traiphol, R., Dual colorimetric response of polydiacetylene/Zinc oxide nanocomposites to low and high pH. *Journal of colloid and interface science* 2014, 418, 43-51.

18. Chanakul, A.; Traiphol, R.; Traiphol, N., Colorimetric sensing of various organic acids by using polydiacetylene/zinc oxide nanocomposites: Effects of polydiacetylene and acid structures. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 2016, 489, 9-18.

19. Chanakul, A.; Traiphol, R.; Traiphol, N., Utilization of polydiacetylene/zinc oxide nanocomposites to detect and differentiate organic bases in various media. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 2017, 45, 215-222.
20. Kew, S. J.; Hall, E. A., pH response of carboxy-terminated colorimetric polydiacetylene vesicles. *Analytical chemistry* 2006, 78 (7), 2231-2238.
21. Toommee, S.; Traiphol, R.; Traiphol, N., High color stability and reversible thermochromism of polydiacetylene/zinc oxide nanocomposite in various organic solvents and polymer matrices. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 2015, 468, 252-261.
22. Traiphol, N.; Chanakul, A.; Kamphan, A.; Traiphol, R., Role of Zn²⁺ ion on the formation of reversible thermochromic polydiacetylene/zinc oxide nanocomposites. *Thin Solid Films* 2017, 622, 122-129.
23. Charoenthai, N.; Pattanatornchai, T.; Wacharasindhu, S.; Sukwattanasinitt, M.; Traiphol, R., Roles of head group architecture and side chain length on colorimetric response of polydiacetylene vesicles to temperature, ethanol and pH. *Journal of colloid and interface science* 2011, 360 (2), 565-573.
24. Su, Y.-l., Preparation of polydiacetylene/silica nanocomposite for use as a chemosensor. *Reactive and Functional Polymers* 2006, 66 (9), 967-973.
25. Giovaninni, G.; Moore, C. J.; Hall, A. J.; Byrne, H. J.; Gubala, V., pH-Dependent silica nanoparticle dissolution and cargo release. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* 2018, 169, 242-248.
26. Moore, C. J.; Hall, A. J.; Byrne, H.; Gubala, V., pH-Dependent Silica Nanoparticle Dissolution and 1 Cargo Release. 2018.
27. Wegner, G., Topochemische reaktionen von monomeren mit konjugierten dreifachbindungen/tochemical reactions of monomers with conjugated triple bonds. *Zeitschrift für Naturforschung B* 1969, 24 (7), 824-832.
28. Zhou, H.; Wada, T.; Sasabe, H.; Komiyama, H., Synthesis and optical properties of nanocomposite silver—polydiacetylene. *Synthetic metals* 1996, 81 (2-3), 129-132.
29. Yoon, B.; Lee, S.; Kim, J.-M., Recent conceptual and technological advances in polydiacetylene-based supramolecular chemosensors. *Chemical Society Reviews* 2009, 38 (7), 1958-1968.

30. Okada, S.; Peng, S.; Spevak, W.; Charych, D., Color and chromism of polydiacetylene vesicles. *Accounts of chemical research* 1998, 31 (5), 229-239.
31. Yang, S.; Gao, L., Preparation of titanium dioxide nanocrystallite with high photocatalytic activities. *Journal of the American Ceramic Society* 2005, 88 (4), 968-970.
32. Tokumoto, M.; Briois, V.; Santilli, C. V.; Pulcinelli, S. H., Preparation of ZnO nanoparticles: structural study of the molecular precursor. *Journal of Sol-Gel Science and Technology* 2003, 26 (1-3), 547-551.
33. Seetha, S.; Saymung, R.; Traiphol, R.; Traiphol, N., Controlling self-assembling and color-transition of polydiacetylene/zinc(II)ion/zinc oxide nanocomposites by varying pH: Effects of surface charge and head group dissociation. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 2019, 72, 423-431.
34. Diedrich, T.; Dybowska, A.; Schott, J.; Valsami-Jones, E.; Oelkers, E. H., The dissolution rates of SiO₂ nanoparticles as a function of particle size. *Environmental science & technology* 2012, 46 (9), 4909-4915.
35. Perkampus, H.-H., *UV-VIS Spectroscopy and its Applications*. Springer Science & Business Media: 2013.
36. Clogston, J. D.; Patri, A. K., Zeta potential measurement. In *Characterization of nanoparticles intended for drug delivery*, Springer: 2011; pp 63-70.
37. Hunter, R. J., *Zeta potential in colloid science: principles and applications*. Academic press: 2013; Vol. 2.
38. Kroetsch, D.; Wang, C., Particle size distribution. *Soil sampling and methods of analysis* 2008, 2, 713-725.
39. Chabal, Y. J., Surface infrared spectroscopy. *Surface science reports* 1988, 8 (5-7), 211-357.
40. Stuart, B., Infrared spectroscopy. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology* 2000, 1-18.
41. Graves, P.; Gardiner, D., *Practical raman spectroscopy*. Springer 1989.
42. Long, D. A.; Long, D., *Raman spectroscopy*. McGraw-Hill New York: 1977; Vol. 276.

43. Zevin, L. S.; Kimmel, G., Quantitative X-ray diffractometry. *Springer Science & Business Media*: 2012.
44. Oshiro, M.; Yamaguchi, K.; Takamizawa, T.; Inage, H.; Watanabe, T.; Irokawa, A.; Ando, S.; Miyazaki, M., Effect of CPP-ACP paste on tooth mineralization: an FE-SEM study. *Journal of oral science* 2007, 49 (2), 115-120.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

สมบัติทั่วไปและโครงสร้างทางเคมีของสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ ก-1 สมบัติทั่วไปของ 10,12-Pentacosadiynoic acid

ชื่อเคมี	10,12-Pentacosadiynoic acid Pentacosa-10,12-diynoic acid PCDA
สูตรเคมี	$C_{25}H_{42}O_2$
น้ำหนักโมเลกุล	374.60 g/mol
จุดหลอมเหลว	65°C
ลักษณะปรากฏ	ผลึกสีฟ้าอ่อน
CAS Number	66990-32-7



รูปที่ ก-1 โครงสร้างทางเคมีของ PCDA

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก-2 สมบัติทั่วไปของ 10,12-Tricosadiynoic acid

ชื่อเคมี	10,12-Tricosadiynoic acid Tricosa-10,12-diynoic acid TCDA
สูตรเคมี	$C_{23}H_{38}O_2$
น้ำหนักโมเลกุล	346.5 g/mol
จุดหลอมเหลว	65°C
ลักษณะปรากฏ	ผลึกสีฟ้าอ่อน
CAS Number	66990-30-5



รูปที่ ก-2 โครงสร้างทางเคมีของ TCDA

ตารางที่ ก-3 สมบัติทั่วไปของซิงก์ออกไซด์

ชื่อเคมี	Zinc oxide
สูตรเคมี	ZnO
น้ำหนักโมเลกุล	81.39 g/mol
เฟสผลึก (ที่ใช้ในงานวิจัยนี้)	Zincite (Hexagonal)
ความหนาแน่น	5.61 g/cm ³
ค่าพีเอช	7 - 8
จุดหลอมเหลว	1,975 °C
ลักษณะปรากฏ	ผงสีขาว
CAS Number	1314-13-2

ตารางที่ ก-4 สมบัติทั่วไปของซิลิกา

ชื่อเคมี	Silica Silicon Dioxide
สูตรเคมี	SiO ₂
น้ำหนักโมเลกุล	60.084 g/mol
เฟสผลึก (ที่ใช้ในงานวิจัยนี้)	Amorphous
ความหนาแน่น	2.65 g/cm ³
ค่าพีเอช	7 - 8
จุดหลอมเหลว	1,710°C
ลักษณะปรากฏ	ผงสีขาว
CAS Number	7631-86-9

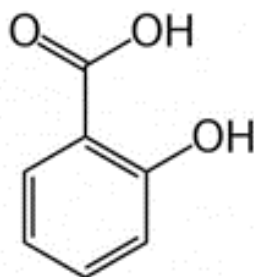
ตารางที่ ก-5 สมบัติทั่วไปของซิงก์อะซีเตต

ชื่อเคมี	Zinc diacetate dihydrate
สูตรเคมี	$Zn(CH_3CO_2)_2$
น้ำหนักโมเลกุล	219.49 g/mol
ความหนาแน่น	1.74 g/cm ³ ที่ 20°C
ค่าความเป็นกรดต่าง	กรดอ่อน ที่ 20°C
จุดหลอมเหลว	237°C
ลักษณะปรากฏ	ผลึกสีขาว
CAS Number	5970-45-6



ตารางที่ ก-6 สมบัติทั่วไปของกรดซาลิซิลิก

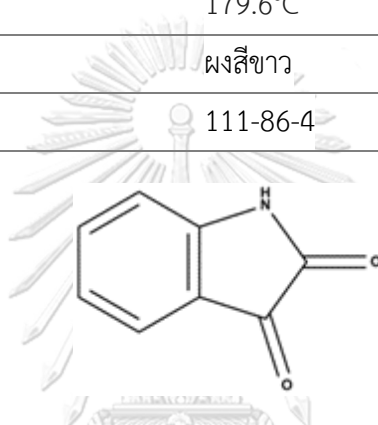
ชื่อเคมี	Salicylic acid
	2-Hydroxybenzoic acid
	O-hydroxybenzoic acid
	2-Carboxyphenol
	O-Carboxyphenol
สูตรเคมี	$C_7H_6O_3$
น้ำหนักโมเลกุล	138.12 g/mol
จุดหลอมเหลว	158 - 161°C
ลักษณะปรากฏ	ผงสีขาว
CAS Number	69-72-7



รูปที่ ก-3 โครงสร้างทางเคมีของ Salicylic acid

ตารางที่ ก-7 สมบัติทั่วไปของออกทิลเอมีน

ชื่อเคมี	Octylamine
	N-Octylamine
	octan-1-amine
	1-Aminooctane
สูตรเคมี	$C_8H_{19}N$
น้ำหนักโมเลกุล	129.24 g/mol
จุดหลอมเหลว	179.6°C
ลักษณะปรากฏ	ผงสีขาว
CAS Number	111-86-4



รูปที่ ก-4 โครงสร้างทางเคมีของ Octylamine base

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายชนะชล แก้วลีน
วัน เดือน ปี เกิด	29 ธันวาคม พ.ศ. 2536
สถานที่เกิด	จังหวัดนครศรีธรรมราช
วุฒิการศึกษา	การศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับ หนึ่งเหรียญทอง รางวัลทุนเรียนดีภูมิพล) สาขาวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ สำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2558 การศึกษาระดับปริญญาโท หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2562
ที่อยู่ปัจจุบัน	558/265 ชั้น 19 คอนโดลุมพินีสวีทดินแดง-ราชปรารภ ถนนดินแดง แขวงดินแดง เขตดินแดง กรุงเทพมหานคร 10400 โทร. 0661090936
ผลงานตีพิมพ์	Kaewlin, C., Traiphol, R., Traiphol, N., Preparation and Thermochromism of Polydiacetylene/Zinc(II)ion/Silica Nanocomposite. Proceedings International PPC Conference 2019, 472-477.